

Van mode naar bouw materiaal: Kledingafval als bron voor circulaire isolatie

Marth Van Mierlo

Studentennummer: 02009995

Promotoren: dr. ir. Liselotte De Ligne, prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche

Begeleiders: Ruben Van den Bossche, prof. dr. ir. Jan Van den Bulcke

Masterproef voorgelegd voor het behalen van de graad Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur -
architectuurontwerp en bouwtechniek

Academiejaar 2024-2025

Voorwoord

Vijf jaar geleden begon mijn opleiding tot burgerlijk ingenieur architect in alle stilte, midden in coronatijden. Intussen is die periode uitgegroeid tot misschien wel de mooiste tijd van mijn leven. Dit eindwerk vormt voor mij een symbolisch en trots slotstuk van een onvergetelijke studententijd. Bij de afronding van deze thesis wil ik graag een aantal mensen bedanken die op verschillende manieren een waardevolle bijdrage hebben geleverd.

Allereerst wil ik het volledige begeleidingsteam bedanken voor de vrijheid die ik kreeg om mijn onderzoek toe te spitsen op textielgebaseerde isolatiematerialen. Binnen het brede maar nog relatief jonge domein van biogebaseerde isolatie betekende dit een uitdagende en boeiende zoektocht die ik met volle overtuiging ben aangegaan.

Mijn dank gaat daarbij uit naar mijn promotoren, dr. ir. Liselotte De Ligne en prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche, voor hun begeleiding, kritische vragen en gerichte feedback die me telkens opnieuw aan het denken zetten. Ook prof. dr. ir. Jan Van den Bulcke wil ik bedanken voor zijn waardevolle feedback bij evaluatiemomenten. Een bijzondere dank gaat vervolgens uit naar ir.-arch. Ruben Van den Bossche, die me gedurende het hele jaar begeleidde. Hij dacht mee over de richting van het onderzoek, hielp bij het opzetten en uitvoeren van de experimenten en stond altijd klaar met snelle en duidelijke antwoorden op mijn vragen. Daarnaast wil ik ook graag ir.-arch. Pibbe Willems bedanken voor haar steeds enthousiaste hulp tijdens het productieproces, van bedrijfsbezoeken tot het urenlang manueel vermengen van vezels.

Ook Stijn Willen en Nicolas Coppieters wil ik bedanken voor hun praktische hulp bij het maken van mallen en netjes. Daarnaast bedank ik ook de experts en verkopers die me hielpen bij het verkrijgen van vezels, materialen en informatie: Peter Callewaert (Eurabo), Arno Vanermen (ViTeS), Philippe Hugo (VRK/MétisseBE), Stéphane Bailly (Le Relais), William en Vincent (Vanotex), Koen De Ruyck (Purfi) en Willem De Muynck (IFG).

Tot slot wil ik ook de mensen bedanken die me doorheen de hele opleiding hebben gesteund en er mee voor zorgden dat deze jaren zo memorabel waren. Mijn ouders, voor hun mentale steun, wekelijkse taxiritjes naar Gent, hulp bij het maken van maquettes en het borstelen van vezels, En mijn vrienden; als enige “binnenlander” in de groep had ik me geen leukere vriendengroep kunnen wensen om deze vijf jaar mee te beleven, zowel tijdens als buiten de lesuren.

Met dit eindwerk rond ik mijn opleiding af, maar vooral kijk ik terug op een periode vol leerrijke ervaringen, waardevolle inzichten en onvergetelijke momenten. Ik wens de lezer veel leesplezier toe en hoop dat dit onderzoek mag bijdragen tot nieuwe inspiratie en kennis.

Marth Van Mierlo, 22 mei 2025

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.

22 mei 2025

Marth Van Mierlo

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.

Van mode naar bouw materiaal: Kledingafval als bron voor circulaire isolatie

Auteur: Marth Van Mierlo

Promotoren: dr. ir. Liselotte De Ligne, prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche

Begeleiders: ir.-arch. Ruben Van den Bossche, prof. dr. ir. Jan Van den Bulcke

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in de ingenieurswetenschappen: architectuur – architectuurontwerp en bouwtechniek
Academiejaar 2024-2025

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Universiteit Gent

Abstract

De bouwsector staat voor grote ecologische uitdagingen, waarbij zowel energiebesparing als een lagere materiaalimpact essentieel zijn. Traditionele isolatiematerialen hebben door hun energie-intensieve productie, grondstoffen en synthetische bindmiddelen een hoge ecologische voetafdruk. Tegelijk zorgen fast fashion en overconsumptie in de kledingindustrie voor een groeiende textielafvalberg. Deze masterproef onderzoekt hoe afgedankte kleding kan dienen als circulaire grondstof voor isolatiematerialen. Vijf representatieve textieltypes (katoen, polyester, katoen/polyester-blend, wol en acryl) worden hiervoor vervezeld en thermisch gebonden met een biogebaseerd PLA-bindmiddel. Een eigen productiemethode wordt ontwikkeld, gericht op reproduceerbaarheid, praktische toepasbaarheid en minimale milieu-impact. PLA blijkt hierbij een geschikt bindmiddel, op voorwaarde dat de vezels voldoende verhit worden tot boven de smelttemperatuur van de buitenste polymeerlaag. In dit onderzoek werd dit verzekerd met behulp van aluminium mallen die de warmte goed geleiden. De geproduceerde isolatiestalen worden getest op warmtegeleiding, capillaire waterabsorptie en sorptiegedrag. Deze prestatiebepalingen vormen ook de basis voor een objectieve vergelijking met Métisse, een bestaand textielisolatiemateriaal op basis van katoenen jeansbroeken. Uit de experimenten blijkt dat alle onderzochte isolatiematerialen qua λ -waarde en waterabsorptiecoëfficiënt vergelijkbaar presteren met bestaande biogebaseerde isolatiematerialen, met duidelijke verschillen in vochttransport tussen natuurlijke en synthetische vezels die bepalend zijn voor hun inzetbaarheid in specifieke bouwtoepassingen. Isolatiematerialen op basis van natuurlijke vezels lijken door hun vochtregulerende eigenschappen meer geschikt te zijn voor dampopen binnenwanden, terwijl synthetische materialen beter inzetbaar zijn in omgevingen met langdurig hoge luchtvochtigheid door hun lage vochtgevoeligheid. De materialen tonen dus potentieel voor de bouwsector, op voorwaarde dat hun specifieke eigenschappen afgestemd worden op de toepassing. Deze resultaten tonen daarbij aan dat de ontwikkelde productiemethode kwalitatieve en reproduceerbare isolatiematerialen oplevert.

Trefwoorden: circulaire isolatie, textielrecyclage, productiemethodologie, PLA bindmiddel, hygrothermische prestaties

From fashion to building material: Clothing waste as source for circular insulation

Marth Van Mierlo

Supervisors: dr. ir. Liselotte De Ligne, prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche, ir.-arch. Ruben Van den Bossche, prof. dr. ir. Jan Van den Bulcke, ir.-arch. Pibbe Willems

Abstract - The construction sector faces significant ecological challenges, with both energy conservation and reduced material impact being essential. Traditional insulation materials often have a high environmental footprint due to energy-intensive production processes and the use of synthetic binders. At the same time, fast fashion and overconsumption in the clothing industry contribute to a growing amount of textile waste. This master's thesis investigates the potential of discarded clothing as a circular raw material for insulation products. Five representative textile types (cotton, polyester, a cotton/polyester blend, wool, and acrylic) are processed into fibers and thermally bonded using a biobased PLA (polylactic acid) binder. A custom production method is developed with a focus on reproducibility, practical applicability, and minimal environmental impact. PLA appears to be a suitable binder, provided that the fibers are sufficiently heated above the melting temperature of the outer polymer layer. In this study, this was achieved using aluminum molds, which conduct heat effectively. The resulting insulation samples are tested for thermal conductivity, capillary water absorption, and sorption behavior. These measurements also serve as the basis for an objective comparison with Métisse, a commercially available textile insulation material made from recycled cotton denim. The experimental results show that all tested insulation materials perform comparably to existing biobased alternatives in terms of thermal conductivity and water absorption. However, significant differences in moisture transport are observed between natural and synthetic fibers, which are critical for determining their suitability in specific construction applications. Natural fiber-based insulation materials appear to be more suitable for vapor-permeable interior walls due to their moisture-regulating properties, while synthetic fibers perform better in environments with prolonged high humidity due to their lower sensitivity to moisture. The findings demonstrate the potential for using these post-consumer textiles in the construction sector, provided their material properties are aligned with the intended application. Furthermore, the results confirm that the developed production method ensures both reproducibility and material quality.

Keywords – circular insulation, textile recycling, production methodology, PLA binder, hygrothermal performances

I. INTRODUCTION

Climate change presents one of the greatest challenges of our time, urging a fundamental rethinking of how we use energy and resources. The building sector plays a significant role, with attention needed for both embodied energy (linked to material production and transport) and operational energy (related to building use) [1]. Thermal insulation is a key factor in reducing heat loss and improving energy efficiency in buildings. While conventional insulation materials such as mineral wool, EPS, and PUR offer good thermal performance, their production is

energy-intensive and recycling options are limited, resulting in significant environmental impact [2].

Circular building materials, including those derived from post-consumer waste streams, offer a more sustainable alternative and support the transition from a linear to a circular economy [3]. In this context, textile waste from the fast fashion industry represents an underutilized resource. Despite increasing textile waste volumes, only a fraction is suitable for reuse in second-hand markets. Current recycling efforts, such as cotton-based insulation from used jeans, exclude many other fiber types.

This thesis aims to explore the potential of diverse textile waste streams for insulation applications. It assesses different fiber compositions and the use of PLA as a biobased binder. By testing the hygrothermal performance of the resulting materials, the research contributes to waste reduction and supports energy-efficient construction through sustainable, circular insulation solutions.

II. LITERATURE REVIEW

A. Biobased insulation

The growing shift toward a circular economy in the construction sector has increased interest in biobased insulation materials with a reduced environmental footprint. In this study, biobased insulation is defined according to Buildwise as materials produced from locally available, renewable, or recycled resources through low-energy manufacturing processes [4]. However, since this research focuses on recycled textile fibers, which are not necessarily biobased, the term circular insulation is adopted to more accurately describe the materials developed. Circular insulation materials minimize reliance on virgin resources, reduce embodied energy and lower waste generation throughout the product life cycle. To fully assess their circular potential, a life cycle perspective is essential. Life Cycle Assessment (LCA) is a widely recognized method for evaluating the environmental performance of materials by accounting for impacts across their entire life span, from raw material extraction and production to implementation and end-of-life processing [5].

B. Use of textile as raw material for insulation materials

The rise of fast fashion and e-commerce has led to unsustainable consumption patterns, with significant environmental consequences. Return rates in online retail now range from 25% to 60% [6], and many returned garments are destroyed rather than resold, contributing to approximately 5

billion kilograms of textile waste and 15 million tons of CO₂ emissions annually [7]. In Europe, an average of 16 kg of textiles per person is discarded each year [8]. Yet, the textile waste generated by a typical family of four over a period of ten years — approximately 640 kg (16 kg × 4 pers. × 10 years) — is nearly sufficient to insulate the façade area (around 250 m²) of an average single-family home [9], demonstrating the potential of post-consumer textiles in circular applications.

One commercial example of such reuse is Métisse, an insulation material made from discarded cotton denim en polyester as binder [10]. While the product achieves good thermal and acoustic performance, its raw material base is limited to pure cotton jeans, meaning that many other commonly discarded textile fibers remain unutilized. This is particularly relevant given that polyester alone accounts for over 55% of global textile production, especially in low-cost, short-lived garments [11].

Textile fibers are typically categorized as natural, regenerated or synthetic (see Table 1). Given the differing moisture affinities of natural (hydrophilic) and synthetic (hydrophobic) fibers, it is expected that these characteristics will affect the hygric behavior and overall performance of the insulation materials produced from them [12]. To improve durability, flexibility or cost-efficiency, manufacturers often combine these into fiber blends, such as cotton-polyester. While functionally advantageous, these blends pose major challenges for recycling. Their mixed chemical composition complicates separation processes, which are often still manual and inefficient [13]. As a result, blended textiles are rarely recycled into high-value applications such as new clothes [14]. Unlocking their potential for circular insulation requires innovative processing techniques specifically designed for mixed fiber streams.

Table 1: Categories of textile fibers [11]

Natural fibers		Man-made fibers	
Plant-based	Animal-based	Regenerated	Synthetic
Cotton	Wool	Viscose	Polyester
Flax	Silk	Modal	Acrylic
Hemp	Mohair	Lyocell	Polyamide

C. Binders

According to Angelotti et al. [15], flexible insulation mats made from fiberized textiles can be produced using either mechanical or thermal bonding, depending on the material type, insulation form and intended application. Mechanical bonding typically involves needle-punching, where fibers are physically entangled. Thermal bonding offers more versatility than mechanical bonding by using bicomponent fibers with a low-melting thermoplastic sheath and a high-strength thermoset core [15]. When heated, the sheath melts and flows to consolidate the fiber structure, while the core maintains structural integrity [16]. Bicomponent fibers used as binders can be of either synthetic or natural origin.

Traditional insulation materials are typically produced using synthetic binders such as polyester, polypropylene or formaldehyde-based resins [17], [18]. While these offer effective bonding, they raise environmental and health concerns [19]. In response, biobased alternatives have emerged, though their development remains limited. Examples of such materials are PLA (polylactic acid), PBS (polybutylene succinate), PHA (polyhydroxyalkanoates), TPS (thermoplastic starch), and CA (cellulose acetate) [20]. Among these, polylactic acid (PLA) stands out due to its thermoplastic

behavior, industrial compostability, relatively low price and compatibility with standard processing techniques [21]. PLA is therefore selected in this research as a sustainable binder, offering a favorable balance between performance, environmental impact, and cost compared to other biobased options.

III. PRODUCTION OF INSULATION MATERIALS

A. Methodology

1) Production preparation

Preliminary tests are first conducted to assess the feasibility of using PLA (type DPL-3618-2) as a binder in the production of insulation mats based on clothing waste. These tests were carried out using manually fiberized garments, whose fibers were ultimately too short to continue with in the main study. Nevertheless, the results confirm that PLA is compatible as a bicomponent binder for thermal bonding with textile fibers.

Longer textile fibers are then sourced from Purfi, a Belgian textile recycling company using mechanical fiber rejuvenation techniques. Five fiber types are selected: 100% polyester, 100% cotton, a 33% cotton / 67% polyester blend, 100% wool (Figure 1a), and 100% acrylic. These fibers are representative of the vast majority of textiles used in the clothing industry.

To ensure homogeneous manual mixing with PLA fibers, different brushes are tested; metal-bristled brushes prove most effective due to their stiffness and fiber penetration capacity (Figure 1b).



Figure 1: (a): wool in fabric (left) and fiber (right) form; (b) blending the textile and PLA fibers with brushes

2) Production optimization

Métisse was used as a reference due to its demonstrated feasibility for producing insulation from textile fibers. According to its product datasheet, Métisse has a density of 20 kg/m³ and a fiber-to-binder ratio of 85% to 15% [10].

Initial trials using wooden molds (30 × 30 cm) resulted in poor heat distribution, preventing complete melting of the PLA binder. Subsequently, smaller molds (10 × 10 cm) made of aluminum were employed, offering improved heat conduction and shape retention. These aluminum molds consistently produced samples with superior structural integrity. Allowing direct contact between the hot air and the fibers by perforating the aluminum mold, was found to have no significant effect on fiber cohesion (Figure 2, right).

Thermal bonding was conducted at 145 °C for 20 minutes. In the initial stages, conservative parameters were applied, specifically, a fiber/binder ratio of 80%/20% and a density of 40 kg/m³, to ensure successful bonding and material integrity. Once these conditions proved effective, the parameters were gradually adjusted to match Métisse and improve cost-efficiency. The density was reduced to 20 kg/m³ and the binder content to 15% (Figure 2), as PLA is about six times more expensive than standard polyester binders [22].



Figure 2: Result 20 kg/m³ - variation in ratio and contact with hot air

3) Production standardization

Based on the optimized conditions, a standardized production method was developed and applied, with the corresponding process parameters outlined in Table 2.

Table 2: Production parameters

Fiber/binder ratio	85%/15%
Density	20 kg/m ³
Mold	Aluminum container
Fiber blending	Brush with short metal bristles
Duration of thermal heating process	20 minutes
Oven temperature	145°C

Color coding and alphanumeric identifiers were implemented to ensure full traceability of all samples. Different symbols are used to represent each fibre type, enabling a clear visual distinction between natural fibres (circle), synthetic fibres (triangle) and blends (square) in the graphical presentation of the results. (Table 3). For each fiber type, eight specimens measuring 10 × 10 × 4 cm were prepared for moisture testing, alongside three larger specimens (15 × 15 × 4 cm) intended for thermal conductivity analysis.

Table 3: Sample coding

Wool	• WOO-X
Cotton	• COT-X
Cotton/polyester blend	■ CP-X
Polyester	▲ POL-X
Acrylic	▲ ACR-X
Métisse	• MET-X

B. Results

1) Apparent density

The apparent density of the 15 × 15 cm insulation samples was determined according to NBN EN 1602 (2013). Samples were conditioned for three weeks in a monitored basement environment, averaging 20.68 °C and 54.48% relative humidity. Dimensions were measured using a digital caliper (± 0.01 mm) and mass with a precision scale (± 0.001 g), meeting the standard's accuracy requirements. A uniform thickness of 40 mm was applied for all self-produced samples (60 mm for Métisse), corresponding to the thickness used for thermal conductivity measurements. Based on mass and volume, the apparent density of the self-produced materials was approximately 20 kg/m³, while Métisse exhibited a slightly higher average density of around 25 kg/m³ (Table 4), despite a nominal value of 20 kg/m³ as stated in the product datasheet. This density difference between the self-produced materials and Métisse will be considered in the interpretation of results in the subsequent phases of this study.

Table 4: Average density of the insulation samples

	WOO	COT	CP	POL	ACR	MET
ρ [kg/m ³]	19.92	19.44	19.75	19.64	19.69	25.30

2) Dry mass

The 10 × 10 × 4 cm samples were dried prior to the hygric tests. Additionally, the dry mass was used to estimate moisture loss during a drying process of 24 hours at 60°C (Table 5). Natural materials exhibited the highest moisture evaporation, whereas synthetic materials showed minimal loss. This can be attributed to the open fiber structure and hygroscopic nature of natural fibers, in contrast to the more hydrophobic character of synthetic ones. These observations highlight the material-dependent differences in water retention behavior.

Table 5: Average mass loss of the insulation samples

	WOO	COT	CP	POL	ACR
Mass loss [%]	5.62	3.55	2.06	1.20	1.52

3) Shape stability

Shape stability was qualitatively assessed using a subjective 10-point scale, ranging from 0 (no rigidity, e.g., loose fibers) to 10 (high rigidity, e.g., rigid foam boards). Evaluations were performed on the 15 × 15 cm samples, as deformation was more apparent at this scale. Each sample was briefly manipulated to observe deflection and structural response.

Natural fibers such as cotton and wool achieved the highest scores (7), showing minimal deformation. Polyester samples scored lowest (4), bending under their own weight. Cotton/polyester blends (6) and acrylic (5) exhibited intermediate behavior, retaining partial rigidity with moderate flexibility. Figure 3 displays the samples arranged from lowest to highest stiffness.

The stiffness of natural materials probably relates to their porous fiber structure, which leads to higher moisture loss during drying. This porosity enhances fiber interlocking within the matrix, thereby increasing mechanical stiffness.



Figure 3: Insulation samples - arranged according to shape retention (ascending from left to right: polyester-acrylic-cotton/polyester blend-cotton-wool)

IV. HYGROTHERMAL PERFORMANCE

A. Thermal conductivity

1) Methodology

The thermal conductivity (λ -value) of the insulation samples is measured using a Heat Flow Meter (FOX 314), following the NBN EN 12667 (2001) standard. A constant temperature gradient of 20 °C is applied until thermal equilibrium is reached, after which five measurement cycles are performed. The sample thickness is set to 40 mm (corresponding to a density of 20 kg/m³) (Figure 4a), with the exception of the reference material (Métisse, 60 mm).

Although the device's plates measure 30 × 30 cm, 15 × 15 cm samples are used effectively, as this is the minimum size required by the manual and covers the 10 × 10 cm active sensing area. To ensure stable conditions, the remaining space is filled with glass wool ($\lambda = 0.03357$ W/mK) (Figure 4b). For

each insulation type, three samples are tested to obtain representative and reliable results.

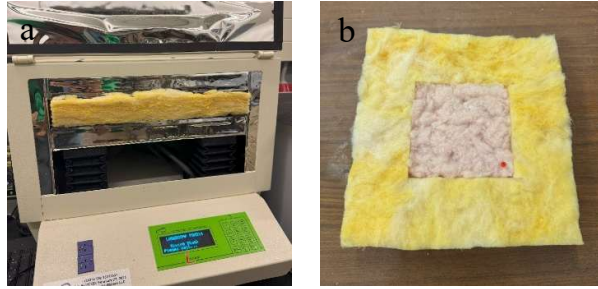


Figure 4: (a) setting of 40 mm thickness; (b) glass wool with 15 × 15 cm cutout for samples

2) Results

The thermal conductivity coefficients (λ -values) measured for various textile-based insulation materials reveal differences in thermal performance (Figure 5). Acrylic exhibits the lowest average λ -value (0.03605 W/mK), followed closely by wool (0.03645 W/mK) and a cotton/polyester blend (0.03697 W/mK), indicating superior insulating properties. Pure cotton performed the least effectively (0.03924 W/mK). Notably, the cotton/polyester blend outperforms both pure cotton and polyester, suggesting synergistic effects in fiber morphology that enhance air entrapment and reduce heat conduction. Compared to Métisse (0.03687 W/mK), several self-produced materials (acrylic, wool, and cotton/polyester) demonstrate equal or better performance, possibly due to their lower density and differing fiber structures.

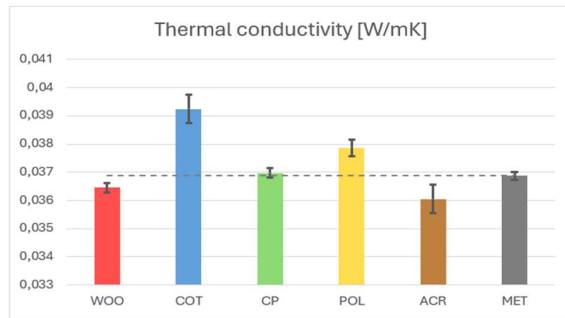


Figure 5: Average λ -value and standard deviation of the insulation samples

It is notable that the measured average λ -value of Métisse (0.03687 W/mK) is lower than the value stated on its technical data sheet (0.039 W/mK). This difference arises because manufacturers are required to report the declared value according to European standards such as NBN EN 13171, which mandates a conservative estimate using the 90/90 statistical method. Similarly, declared values for the self-produced materials are conservatively estimated due to the limited sample size ($n = 3$), which increases statistical uncertainty. These values represent a cautious ‘worst-case’ scenario, enabling fairer comparison with standard commercial insulation products (Table 6).

Table 6: Declared λ -values of the insulation samples

	WOO	COT	CP	POL	ACR	MET
λ_{decl} [W/mK]	0.0372	0.0413	0.0376	0.0391	0.0382	0.0375

The test is stopped each time the HFM readings stabilize and reach a steady state. These test durations varied notably between materials. Wool showed the longest average duration (135.33 minutes), while polyester and acrylic had the shortest (70.33 and 74.67 minutes, respectively). A striking example is the comparison between wool and acrylic: despite nearly identical thermal conductivity and equal density, wool required almost twice as long to reach thermal equilibrium.

This difference may be explained by a higher specific heat capacity (C) of wool. Since density was constant, a higher specific heat would lead to a greater thermal capacity, slowing the temperature change. Moisture transport likely also plays a role. Natural fibers like wool and cotton are hygroscopic, and temperature gradients during testing can trigger internal moisture migration. Because water has a high heat capacity and conductivity, this can delay stabilization. The pattern of test durations corresponds with observed mass loss from drying, suggesting that moisture content and movement influenced the thermal response time (Figure 6).

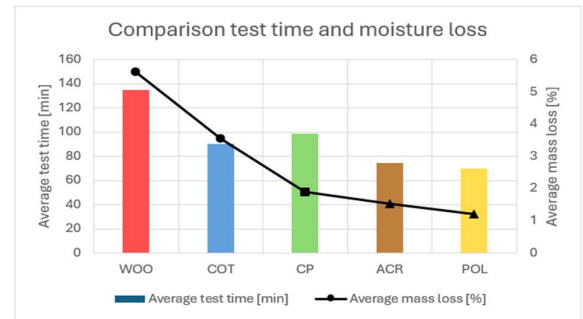


Figure 6: Comparison of the average test time and moisture loss of the insulation samples

B. Water absorption

1) Methodology

Capillary water absorption (A_w) is assessed using the partial immersion method, following the NBN EN ISO 15148 (2003) standard. Samples are placed in a water bath for 48 hours (Figure 7), with weighing at set intervals (5 min to 48 h) to measure water uptake over time. Although the norm prescribes a minimum test duration of 24 hours and a 1-minute drainage period, this study extends both to 48 hours and 2.5 minutes, respectively, to accommodate the biobased nature of the materials.

Each 10 × 10 cm sample is tested in a mesh holder with aluminum tape sealing the sides, ensuring one-dimensional water ingress. Five replicates per material type support statistical reliability, under monitored environmental conditions aligned with standards. The water uptake per unit area is calculated and plotted against the square root of time. In addition, the water absorption coefficient A_w [kg/m²s^{0.5}] is calculated based on the water uptake after 48 hours.



Figure 7: Setup water absorption test

2) Results

Results show significant variation between the water absorption curves of natural and synthetic fibers (Figure 8). Natural materials (cotton, wool, and cotton/polyester) displayed a gradual and sustained water uptake, indicating capillary-driven absorption and deeper moisture penetration. In contrast, synthetic materials (polyester and acrylic) absorbed water rapidly within the first five minutes, after which absorption plateaued. This pattern is attributed to their closed, hydrophobic fiber structures, which restrict moisture migration beyond the contact zone. Métisse exhibited an atypical profile: it absorbed large amounts of water both initially and continuously throughout the test. This is likely due to its higher density (25 kg/m³) and possible structural compression upon wetting, increasing capillary action.

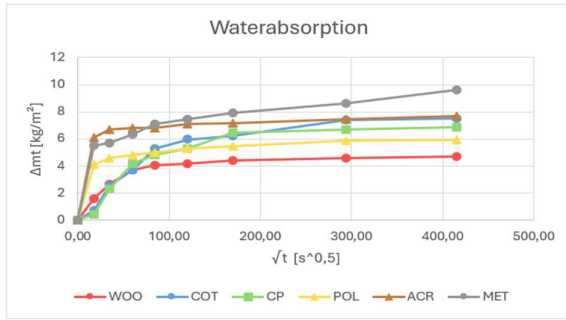


Figure 8: Water absorption curves of the insulation samples

Water absorption coefficients (A_w) of all self-produced materials were lower than that of Métisse, which exhibited the highest value at 0.0232 kg/m²s^{0.5} (Table 7). Overall, the measured coefficients are comparable to those of existing biobased insulation materials.

Table 7: Average water absorption coefficients of the insulation samples

	WOO	COT	CP	POL	ACR	MET
A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	0.0114	0.0181	0.0166	0.0143	0.0186	0.0232

C. Hygroscopic sorption properties

1) Methodology

To assess the moisture buffering capacity of insulation materials, sorption properties were determined using the desiccator method as specified in NBN EN ISO 12571 (2021). Material samples were exposed to controlled relative humidity (RH) environments using saturated salt solutions, as presented in Table 8.

Table 8: Salt solutions with corresponding RH levels

Salt solution	RH [%]
MgCl ₂ ·6H ₂ O	33%
NaCl	75%
KCl	85%
KNO ₃	94%
K ₂ SO ₄	97%

Changes in mass were recorded periodically until equilibrium moisture content was reached, defined as a mass variation below 0.1% between successive measurements with an interval of minimum 24 hours. Custom airtight boxes (Figure 9a) equipped with dataloggers ensured stable RH and temperature. Each sample progressed through increasing RH stages, starting at RH=33% (Figure 9b), allowing the construction of sorption curves. The moisture content u [kg/kg] was calculated on a dry weight basis and averaged per material type. This methodology enables accurate characterization of moisture uptake behavior under realistic climatic conditions.

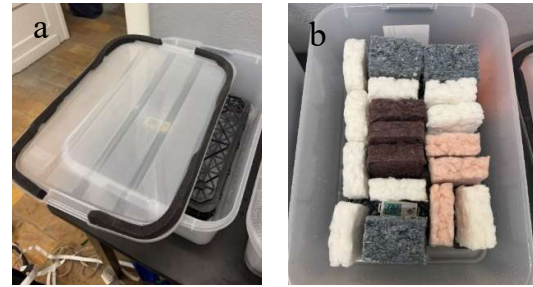


Figure 9: (a) airtight sealing with swelling strip; (b) Placement of samples and datalogger on a grid

2) Results

The sorption behavior (Figure 10) of the tested insulation materials reveals distinct differences between natural and synthetic fibers. Synthetic materials show minimal sensitivity to changes in relative humidity (RH), with only slight increases in moisture content across the measured RH range. In contrast, natural fiber-based materials exhibit a more pronounced moisture uptake, indicating a stronger hygroscopic response. This suggests that natural materials may contribute more effectively to indoor moisture regulation by buffering RH fluctuations. The blend possesses properties that lie between those of the pure fibers, thereby possibly integrating the advantages of both fiber types.

Métisse demonstrates the highest moisture uptake overall, particularly at 85% relative humidity, followed closely by wool. Both materials clearly outperform the other tested natural and synthetic fibres in terms of hygroscopic behaviour, indicating their strong moisture-buffering capacity. Cotton shows much lower moisture uptake than Métisse, even though both are made from cotton fibers. This clear difference is probably caused by the way the fibers are processed. The cotton fibers were gently treated (for example, with Purfi technology), while the fibers in Métisse go through a rougher mechanical process. This stronger treatment likely makes the fiber surface rougher and increases the specific surface area, thereby enhancing both initial water sorption and capillary absorption.

These findings underscore the relevance of fiber type and processing in determining the hygric behavior of textile-based insulation and point to the potential of natural materials for passive moisture regulation in building applications.

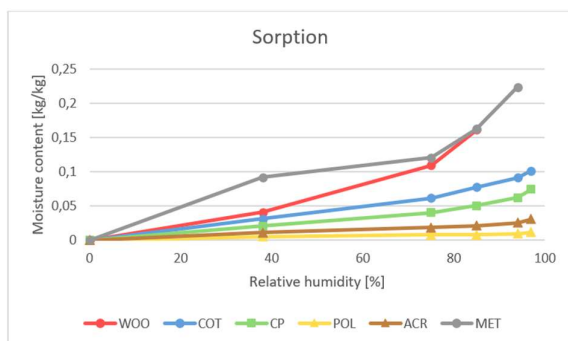


Figure 10: Hygroscopic sorption curves of the insulation samples

V. DISCUSSION

This study shows that combining discarded clothing with a biobased binder like PLA through thermal bonding is a technically viable alternative to conventional insulation. However, industrial scaling requires mechanized fiber processing: manual brushing is impractical. Carding machines and larger molds will be needed to ensure uniformity and meet standard insulation dimensions.

Despite the use of standardized tests where possible, results remain indicative due to equipment and material limitations. Crucially, fire resistance was not assessed, and further research is needed on flame retardancy and microbial resistance to ensure safety and indoor air quality.

Material sourcing also poses challenges. The recycled fibers were originally intended for clothing, raising concerns about resource competition. Furthermore, PLA's higher cost impacts economic feasibility. Most importantly, recycling should not legitimize overconsumption; it must be part of a broader shift toward reduced production and more responsible textile use.

VI. CONCLUSION

This thesis demonstrates the potential of using discarded textiles, thermally bonded with a bio-based PLA binder, to create technically viable and environmentally conscious insulation materials. The **developed production process** successfully integrated five common textile types into flexible insulation mats through an optimized combination of temperature, heating time and mold configuration. The resulting materials exhibited consistent density and reproducible quality, supporting the feasibility of standardized production. The use of PLA as a binder enhances the material's circular and biobased profile, supporting broader sustainability goals.

Performance testing revealed thermal conductivity values ($\lambda_{\text{declared}} = 0.037\text{--}0.041 \text{ W/mK}$) comparable to, or better than, the benchmark material Métisse, particularly for wool and acrylic variants. Additionally, natural fiber-based samples (cotton, wool, cotton/polyester) showed promising moisture-buffering behavior, which is critical for indoor comfort and building durability. While synthetic fibers offered less moisture regulation, their enhanced water resistance may be advantageous in specific applications.

Notably, the cotton/polyester blend performed better than both pure cotton and polyester in thermal conductivity, and exhibited intermediate moisture behavior. This balance makes

the blend versatile for a wider range of uses. Its good performance is especially significant given that such fiber mixtures are difficult to recycle into high-value applications. Improved applicability in insulation could offer a sustainable solution for managing these otherwise challenging waste streams.

REFERENCES

- [1] VVSG. (n.d.). *Lokaal circulair bouwen*.
- [2] Schulte, M., Lewandowski, I., Pude, R., & Wagner, M. (2021). Comparative life cycle assessment of bio-based insulation materials: Environmental and economic performances. *GCB Bioenergy*, 13(6), 979–998.
- [3] Dahiya, S., Katakjwala, R., Ramakrishna, S., & Mohan, S. V. (2020). Biobased Products and Life Cycle Assessment in the Context of Circular Economy and Sustainability. *Materials Circular Economy 2020* 2:1, 2(1), 1–28.
- [4] Claude, V., Charron, S., & Michaux, B. (2024). *Praktische gids over biogebaseerde/gerecycleerde isolatiematerialen en hun uitvoering*. (47).
- [5] To bio or not to bio. (n.d.). *Milieu-impact*.
- [6] Veen, T. (2023). Understanding the environmental impact of product returns in the fashion industry.
- [7] Constable, H. (n.d.). Your brand new returns end up in landfill. *BBC Earth*.
- [8] Belga. (2025). *We kopen meer kleren, schoenen en ander textiel dan ooit tevoren: jaarlijks gemiddeld 19 kilogram per persoon*.
- [9] Bouwen aan Vlaanderen. (2020). *Eerste grootschalig Belgisch project met luchtzuiverende gevelverf bij winkelsketen OKay*.
- [10] Eurabo. (n.d.-b). *Métisse katoenisolatie*.
- [11] Blaazer, E. (2023, april 13). Van vezel tot kledingstuk. *FashionUnited*.
- [12] Van Haver, Y. (2014). Optimalisatie van een industriële case study in vlasvezelversterkte compound via numerieke simulaties.
- [13] Seifali Abbas-Abadi, M., Tomme, B., Goshayeshi, B., Mynko, O., Wang, Y., Roy, S., Kumar, R., Baruah, B., De Clerck, K., De Meester, S., D'hooge, D. R., & Van Geem, K. M. (2025). Advancing Textile Waste Recycling: Challenges and Opportunities Across Polymer and Non-Polymer Fiber Types. *Polymers*, 17(5), 628.
- [14] Lasance, P. (2025). *End aan blends?*
- [15] Angelotti, A., Alongi, A., Augello, A., Dama, A., De Antonellis, S., Ravidà, A., Zinzi, M., & De Angelis, E. (2024). Thermal conductivity assessment of cotton fibers from apparel recycling for building insulation. *Energy and Buildings*, 324.
- [16] Naeimirad, M., Zadhoush, A., Kotek, R., Esmacely Neisiany, R., Nouri Khorasani, S., & Ramakrishna, S. (2018). Recent advances in core/shell bicomponent fibers and nanofibers: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(21), 46265.
- [17] Santos, A. S., Ferreira, P. J. T., & Maloney, T. (2021). Bio-based materials for nonwovens. *Cellulose* 2021 28:14, 28(14), 8939–8969.
- [18] Peng, W., & Riedl, B. (1995). Thermosetting Resins. *Journal of Chemical Education*, 73(7), 587–592.
- [19] Kristak, L., Antov, P., Bekhta, P., Lubis, M. A. R., Iswanto, A. H., Reh, R., Sedliacik, J., Savov, V., Taghiyari, H. R., Papadopoulos, A. N., Pizzi, A., & Hejna, A. (2023). Recent progress in ultra-low formaldehyde emitting adhesive systems and formaldehyde scavengers in wood-based panels: a review. *Wood Material Science & Engineering*, 18(2), 763–782.
- [20] Oskam, I., de Jong, M., Lepelaar, M., & ten Kate, R. (2015). *Ontwerpen met biobased plastics*.
- [21] Mochizuki, M., & Matsunaga, N. (2016). Bicomponent polyester fibers for nonwovens. *High-Performance and Specialty Fibers: Concepts, Technology and Modern Applications of Man-Made Fibers for the Future*, 395–408.
- [22] Textilebeacon. (2024). *Polyester markets driven by cost in April 2024*.

Inhoudsopgave

Voorwoord	I
Toelating tot bruikleen	II
Abstract.....	III
Extended abstract	IV
Inhoudsopgave	X
Lijst van figuren	XIII
Lijst van tabellen	XV
Lijst van afkortingen en symbolen.....	XVI
1 Inleiding.....	1
2 Literatuuronderzoek	3
2.1 Biogebaseerde isolatiematerialen	3
2.1.1 Motivatie	3
2.1.2 Voor- en nadelen	5
2.1.3 Circulaire isolatiematerialen op basis van hergebruikte grondstoffen.....	7
2.2 Gebruik van textiel als grondstof voor isolatiematerialen.....	9
2.2.1 Katoenisolatie op de markt.....	10
2.2.2 Kledingindustrie	11
2.3 Bindmiddelen.....	15
2.3.1 Traditionele bindmiddelen.....	16
2.3.2 Biogebaseerde bindmiddelen	17
2.3.3 Bestaand onderzoek met PLA bindmiddel	18
2.4 Hygrothermisch gedrag van isolatiematerialen	19
2.4.1 Warmtetransport.....	20
2.4.2 Warmteopslag.....	22
2.4.3 Vochttransport	23
2.4.4 Vochttopslag.....	28
3 Probleemstelling	31
4 Doelstelling.....	33

4.1	Onderzoeksvragen.....	33
5	Ontwikkeling van een productieproces	35
5.1	Terugkoppeling naar onderzoeksvragen 1 en 2.....	35
5.2	Methodologie	35
5.2.1	Preliminare testen	36
5.2.2	Vorbereiding van het productieproces.....	37
5.2.3	Optimalisatie van het productieproces	40
5.2.4	Standaardisatie van het productieproces	45
5.3	Resultaten	48
5.3.1	Massadichtheid.....	48
5.3.2	Droge massa	50
5.3.3	Stijfheid	51
5.4	Conclusie ontwikkeling van een productieproces	53
5.4.1	Conclusie onderzoeksvraag 1	53
5.4.2	Conclusie onderzoeksvraag 2.....	54
6	Bouwfysische prestaties	55
6.1	Terugkoppeling naar onderzoeksvragen 3 en 4.....	55
6.2	Warmtegeleiding	56
6.2.1	Methodologie	56
6.2.2	Resultaten	59
6.3	Waterabsorptie	65
6.3.1	Methodologie	65
6.3.2	Resultaten	70
6.4	Sorptie.....	75
6.4.1	Methodologie	75
6.4.2	Resultaten	79
6.5	Conclusie bouwfysische prestaties	84
6.5.1	Conclusie onderzoeksvraag 3.....	84
6.5.2	Conclusie onderzoeksvraag 4.....	85
7	Discussie.....	87

8	Algemene conclusie	89
9	Maatschappelijke reflectie	91
10	Gebruik van AI	93
11	Referentielijst	95
12	Bijlagen	107
12.1	Aanvullend onderzoek voor het productieproces	107
12.1.1	Preliminare testen	107
12.1.2	Onderzoek naar geschikte mal.....	110
12.2	Resultaten Heat Flow Meter	113
12.2.1	Meetdata onderzochte stalen	113
12.2.2	Meetdata glaswol	122
12.3	Resultaten capillaire absorptieproef	123
12.3.1	Grafische resultaten	123
12.3.2	Analytische resultaten	126
12.4	Resultaten sorptieproef	128
12.4.1	Conditie gemeten door dataloggers.....	128
12.4.2	Analytische resultaten	130
12.4.3	Grafische resultaten	133
12.5	Technische fiches.....	136
12.5.1	Technische fiche Métisse	136
12.5.2	Technische fiche Pavatextil	138
12.5.3	Technische fiche Pavacell	139
12.5.4	Technische fiche PLA.....	140
12.5.5	Technische fiche datalogger Hobo UX100-011A.....	142
12.5.6	Technische fiche Heat Flow Meter FOX 314	150

Lijst van figuren

Figuur 1: Vergelijking isolatiematerialen op basis van thermische weerstand en emissies (Cosentino et al., 2023).....	4
Figuur 2: Gebruikte grondstoffen in de kledingindustrie (Blaazer, 2023)	12
Figuur 3: Thermische binding van textiel door een bicomponente vezel (Dasdemir et al., 2011)	15
Figuur 4: Temperatuurverloop in een enkelvoudige laag (Janssens, 2022)	21
Figuur 5: Dampdrukverloop (Braeckman et al., 1987)	23
Figuur 6: Proces voor het vullen van poriën met vocht (Steeman, 2010)	26
Figuur 7: Lineair verband waterabsorptiecoëfficiënt A_w (Hens, 2013)	27
Figuur 8: Hygroscopische curve (Janssens, 2022)	28
Figuur 9: Verhouding tussen relatieve vochtigheid en vochtgehalte w in een poreus materiaal: adsorptie isotherm (- -) en desorptie isotherm (-) (Steeman, 2010)	29
Figuur 10: Katoen - stof en vezels.....	37
Figuur 11: Wol - stof en vezels	37
Figuur 12: Acryl - stof en vezels.....	37
Figuur 13: Borstels: (a) verschillende types; (b) borstelen van vezels	38
Figuur 14: Verschillende mallen 10×10 cm: (a) klaargemaakte mallen voor verhittingsproces; (b) vezels in aluminium bakje; (c) vezels in houten mal	41
Figuur 15: Resultaat 40 kg/m ³ - variatie in mal.....	42
Figuur 16: Resultaat 30 kg/m ³ - variatie in mal.....	43
Figuur 17: Resultaat 20 kg/m ³ - variatie in verhouding en contact met hete lucht.....	44
Figuur 18: Stalen in aluminium bakjes voor thermische binding	46
Figuur 19: Geproduceerde stalen (10x10x4 cm)	46
Figuur 20: Stalen in de droogoven	47
Figuur 21: Condities tijdens conditionering stalen voor bepaling massadichtheid	48
Figuur 22: Isolatiematerialen gerangschikt volgens stijfheid, van links naar rechts: cellulose (iCell, z.d.); glaswol (Diethelm, 2022), Métisse (Isolatiendoord, n.d.-b), PIR (Isolatiendoord, z.d.-a)	51
Figuur 23: Wol staal	52
Figuur 24: Katoen staal	52
Figuur 25: Kat/Pol staal	52
Figuur 26: Acryl staal	52
Figuur 27: Polyester staal.....	52
Figuur 28: Gebruikte aluminium mallen - 10x10 cm (links) en 15x15 cm (rechts)	53
Figuur 29: Isolatiestalen - gerangschikt volgens vormvastheid (oplopend van links naar rechts: polyester – acryl – katoen/polyester – katoen - wol).....	54
Figuur 30: Schematische weergave HFM-toestel (technische fiche, bijlage 12.5.6)	56

Figuur 31: Opstelling HFM: (a) instelling 40 mm; (b) glaswol met uitsparing	57
Figuur 32: Meetdata HFM POL-9	58
Figuur 33: λ -waarde en standaardafwijking van de isolatiestalen	60
Figuur 34: Vergelijking gemiddelde testduur HFM en vochtverlies van de isolatiestalen	64
Figuur 35: Opstelling waterabsorptieproef	65
Figuur 36: Onderdompeling isolatiestaal in netje met waterdichte tape.....	66
Figuur 37: Grafiektype A.I, waarbij het water het bovenoppervlak niet bereikt (NBN EN ISO 15148, 2003)	67
Figuur 38: Grafiektype A.II, waarbij het water het bovenoppervlak wel bereikt (NBN EN ISO 15148, 2003)	68
Figuur 39: Grafiektype B (NBN EN ISO 15148, 2003)	69
Figuur 40: Gemeten testcondities gedurende de testperiode	70
Figuur 41: Relatieve vochtigheid tijdens testperioden.....	71
Figuur 42: Waterabsorptiecurven van de isolatiestalen	72
Figuur 43: Acrylstaal na absorptieproef: Verzadigde onderkant - droge bovenkant	72
Figuur 44: Opstelling sorptieproef: (a) boxen; (b) zwelband; (c) rooster.....	76
Figuur 45: Sorptieproef: (a) isolatiestalen in desiccator; (b) luchtdichte afweging isolatiesamples.....	77
Figuur 46: Evenwichtsvochtgehalte sorptie- en desorptiecurve (NBN EN ISO 12571, 2021)	78
Figuur 47: Relatieve vochtigheid in desiccators gedurende de testperiode.....	79
Figuur 48: Piek op 24/04 bij 38%-dessicator	80
Figuur 49: Piek op 15/05 bij 97%-dessicator	81
Figuur 50: Sorptiecurven van de isolatiestalen.....	82
Figuur 51: Sorteercentrum ViTeS in Boortmeerbeek	107
Figuur 52: Vervezeling kleding: (a) verknijpte kleding; (b) maalmolen; (c) vezels uit maalmolen; (d) vermaalde kleding	108
Figuur 53: Resultaten proefproductie: (a) verschillende stalen met variatie in verhouding en bindmiddel; (b) staal 3	109
Figuur 54: 30×30×6 cm houten mal	111
Figuur 55: Productie houten mal 30×30 cm: (a) katoen; (b) acryl	111

Lijst van tabellen

Tabel 1: Aandeel bouwsector uitstoot en gebruik hulpbronnen in Europa (Vlaanderen Circulair, z.d.)	9
Tabel 2: Categorieën van textielvezels (Blaazer, 2023).....	11
Tabel 3: Vergelijking λ -waarden van isolatiematerialen uit de literatuur (Joostdevree, z.d.-b)	20
Tabel 4: Vergelijking waterabsorptiecoëfficiënten van isolatiematerialen uit de literatuur (Deweert & Wijnant, 2023).....	27
Tabel 5: Productieparameters	45
Tabel 6: Codering stalen	45
Tabel 7: Effectieve massadichtheden van de isolatiestalen	49
Tabel 8: Droge massa's m_0 [g] van de 10x10 cm stalen	50
Tabel 9: Schaal van stijfheid (0-10).....	51
Tabel 10: Score stijfheid van de isolatiestalen op basis van waarnemingen.....	52
Tabel 11: λ -waarden van de isolatiestalen [W/mK]	59
Tabel 12: Eenzijdige veiligheidsfactoren met 90% betrouwbaarheidsgraad (NBN ISO 16269-6, 2025)	61
Tabel 13: Gedeclareerde λ -waarden van de isolatiestalen	62
Tabel 14: Testduur van isolatiestalen met HFM [minuten].....	62
Tabel 15: Toegelaten testcondities tijdens absorptieproef (NBN EN ISO 15148, 2003)	66
Tabel 16: Waterabsorptie $\Delta m t$ [kg/m ²] van de isolatiestalen in functie van de tijd [s ^{0,5}].....	71
Tabel 17: Waterabsorptiecoëfficiënt A_w [kg/m ² s ^{0,5}] van de isolatiestalen	74
Tabel 18: Zoutoplossingen met bijhorende RV en dosering (NBN EN ISO 12571, 2021)	75
Tabel 19: Geregistreerde mediaan en gemiddelde RV in de desiccators gedurende de testperiode	79

Lijst van afkortingen en symbolen

Afkortingen

ACR	Acryl
bico	Bicomponent
CA	Cellulose Acetaat
EMC	Equilibrium Moisture Content
EPS	Geëxpandeerd polystyreen
HFM	Heat Flow Meter
K₂SO₄	Kaliumsulfaat
KAT	Katoen
KCl	Kaliumchloride
KNO₃	Kaliumnitraat
KP	Katoen/Polyester
LCA	Life Cycle Assessment
MBV	Moisture Buffer Value
MgCl₂	Magnesiumchloride
MET	Métisse
NaCl	Natriumchloride
PBS	Polybutyleensuccinaat
PE	Polyethyleen
PET	Polyester
PFU	Fenolformaldehyde-ureum
PHA	Polyhydroxyalkanoaat
PLA	Polylactide (polymelkzuur)
POL	Polyester
PP	Polypropyleen
PU	Polyurethaan
PUR	Polyurethaan
RV	Relatieve vochtigheid
TPS	Thermoplastisch zetmeel
ViTeS	Vlaams initiatief voor Tewerkstelling en Sociale integratie
XPS	Geëxtrudeerd polystyreen

Symbolen

A	Oppervlakte	m^2
A_w	Capillaire waterabsorptiecoëfficiënt	$kg/m^2\sqrt{s}$
α	Thermische diffusiviteit	m^2/s
c	Soortelijke warmte	J/kgK
C	Warmtecapaciteit	J/m^3K
d	Dikte	m
δ	Dampgeleidingscoëfficiënt van het materiaal	s
δ_a	Dampgeleidingscoëfficiënt van stilstaande lucht	$2 \cdot 10^{-10} s$
λ	Warmtegeleidingscoëfficiënt	W/mK
m	Massa	g
m_o	Droge massa	g
m_w	Opgezogen hoeveelheid water	kg/m^2
μ	Dampdiffusieweerstandsgetal	-
p	Dampdruk	Pa
p_s	Verzadigingsdampdruk	Pa
φ	Relatieve vochtigheid (RV)	%
q	Warmtestroomdichtheid	W/m^2
R	Warmteweerstand	m^2K/W
ρ	Massadichtheid	kg/m^3
Sd	Equivalenten luchtdikte	m
T	Temperatuur	$^{\circ}C$
t	Tijd	s
u	Vochtgehalte	kg/kg
θ_{se}	Oppervlaktetemperatuur buiten	$^{\circ}C$
θ_{si}	Oppervlaktetemperatuur binnen	$^{\circ}C$
w	Vochtgehalte	kg/m^3

1 Inleiding

Klimaatverandering vormt een van de grootste uitdagingen van onze tijd en dwingt ons om op een andere manier na te denken over hoe we omgaan met energie en grondstoffen (Sgouridis et al., 2015). De bouwsector heeft hier een groot aandeel in, waarbij zowel de energie-efficiëntie van het bouwen en de materialen zelf, als van de vereiste energie voor verwarming en koeling, respectievelijk de ingebedde energie en operationele energie, de nodige aandacht vereisen (VVSG, z.d.). Warmteverlies in woningen is een belangrijke oorzaak van onnodig energieverbruik en kan worden verminderd door het gebruik van kwalitatieve isolatiematerialen. Conventionele isolatiematerialen zijn rotswol, glaswol XPS, EPS en PUR (Schiavoni et al., 2016), echter dragen niet al deze materialen bij aan de fundamentele heroverweging van het energie-efficiënt handelen. Deze materialen leveren wel gunstige thermische prestaties, maar hun productie is energie-intensief en hun recycleerbaarheid beperkt, wat leidt tot een negatieve impact op het milieu (Schulte et al., 2021).

Om hieraan tegemoet te komen, is het gebruik van circulaire bouwmaterialen interessant. Circulaire bouwmaterialen zijn niet per definitie biogebaseerd, maar kunnen ook bestaan uit herwonnen materialen uit andere (afval)stromen (Cali, 2024). Daarmee verlagen deze materialen niet alleen de ecologische voetafdruk van de bouwsector, maar zijn ze ook een belangrijke factor in het overschakelen van een lineaire naar circulaire economie (Dahiya et al., 2020). Ondanks de relatief korte onderzoeks- en ontwikkelingshistoriek, kent het de afgelopen jaren een groeiende populariteit als strategie voor het realiseren van energiebesparing in gebouwen (Liu et al., 2017).

In de context van hergebruik is er een groeiende nood aan oplossingen voor de rest- en afvalstromen in de kledingsector. Vandaag de dag nemen de afvalbergen alleen maar toe omwille van de stijgende hoeveelheden aan afgedankte kledij (Gilliams, 2024). Volgens een rapport van de ETC CE (European Environment Agency's European Topic Centre on Circular Economy and Resource Use), zou er in Europa jaarlijks bijna 7 miljoen ton textiel op de afvalbergen belanden (Vito, 2024). Het probleem van het groeiend aantal afgedankte kledij is grotendeels te wijten aan de opkomst van (ultra-)fast fashion bedrijven. Zij produceren en verkopen gigantische hoeveelheden kleding van slechte kwaliteit aan een lage prijs (Shaw, 2022). Het gevolg hiervan is dat de levensduur van dit soort kledij veel korter is dan kwalitatieve kledij die we in degelijke winkels kopen. Deze kledij kan daarom niet meer van generatie op generatie worden doorgegeven of worden verkocht in tweedehandswinkels, waardoor deze kledij uiteindelijk op afvalbergen terechtkomt (Gilliams, 2024).

Er worden reeds enkele initiatieven genomen om textieloverschotten een nieuwe bestemming te geven, bijvoorbeeld afgedankte jeansbroeken die worden ingezet voor de

productie van katoenisolatie (Le Relais, z.d.). Deze toepassing richt zich echter uitsluitend op katoen afkomstig van jeans, waardoor andere veelvoorkomende textielsoorten momenteel nog niet commercieel worden benut als grondstof voor isolatiemateriaal. Deze masterproef streeft ernaar dit eenzijdige materiaalgebruik te doorbreken door eveneens de potentie van andere textielsoorten te evalueren. Op deze manier biedt dit onderzoek naar de transformatie van textielafval tot een duurzaam isolatiemateriaal dus een dubbele oplossing: het reduceert niet alleen de hoeveelheid textielafval, maar draagt ook bij aan energiezuinig bouwen. Door afgedankte kledij te recyclen en in te zetten als bron voor isolatiemateriaal, worden de principes van duurzaamheid en circulariteit aangemoedigd (Garmin, 2023). Om deze doelstelling te bereiken zal enerzijds gezocht worden naar de meest optimale productiemethode voor isolatiematten, waarbij verschillende stofsamenstellingen en de mogelijkheden van het biogebaseerd PLA-bindmiddel zullen worden geëvalueerd. Anderzijds zullen de hygrothermische prestaties van de ontwikkelde isolatietypes worden getest om na te gaan in welke mate deze materialen toepasbaar zijn in de bouwsector.

In deze masterproef wordt uitgegaan van de beschrijving van biogebaseerde isolatiematerialen zoals geformuleerd door Buildwise: ze worden vervaardigd uit lokaal beschikbare, hernieuwbare of gerecycleerde grondstoffen en geproduceerd via processen met een lagere energetische impact (Claude et al., 2024). Aangezien dit onderzoek zich richt op het gebruik van gerecycleerde textielvezels die niet per definitie biogebaseerd zijn, wordt in deze masterproef gekozen voor de meer specifieke classificatie ‘circulaire isolatie’ voor de materialen die uiteindelijk ontwikkeld zullen worden. Deze term weerspiegelt nauwkeuriger het hergebruikskarakter en de circulaire aard van de toegepaste grondstoffen. Circulaire isolatie wordt in deze context dus beschouwd als onderdeel van het bredere veld van biogebaseerde isolatiematerialen. Wanneer in dit onderzoek wordt gesproken over biogebaseerde isolatiematerialen, wordt daarmee de overkoepelende groep van materialen bedoeld, waaronder ook de materialen die vervaardigd zijn uit natuurlijke, hernieuwbare grondstoffen.

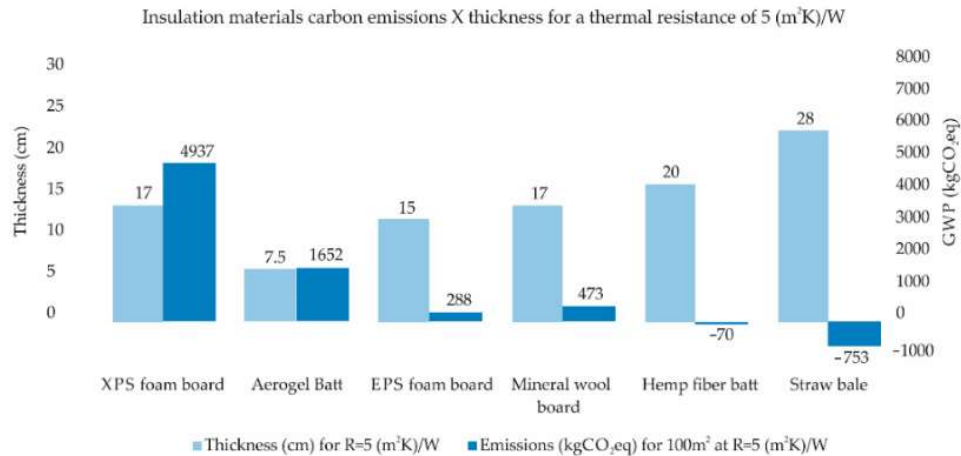
2 Literatuuronderzoek

2.1 Biogebaseerde isolatiematerialen

2.1.1 Motivatie

De belangstelling voor energiezuinige, duurzame architectuur en dus voor gebouwen met een minimale impact op het milieu is in de loop der jaren toegenomen. Door meer te isoleren, daalt de vraag naar operationele energie, maar stijgt de materiaalgerelateerde milieu-impact van isolatiematerialen (Torres-Rivas et al., 2018). Om een zo laag mogelijke totale impact te hebben, dienen materialen met een lage energie-inhoud gebruikt te worden zodat ook de ingebedde energie zal dalen. In deze context worden biogebaseerde materialen steeds vaker naar voren geschoven als alternatief voor traditionele bouwmaterialen (Palumbo et al., 2016). Biogebaseerde isolatiematerialen vertegenwoordigen momenteel echter slechts 7% van de markt (Schulte et al., 2021). Hierbij zijn houtvezelisolatie en cellulose de populairste, maar ook isolatie op basis van kurk, katoen en hennep worden reeds gehanteerd (Raja et al., 2023).

Volgens Cosentino et al. (2023) wordt er in academisch onderzoek, naast de fysische eigenschappen van een isolatiemateriaal, te weinig de focus gelegd op de ingebedde energie van isolatiematerialen. Bovendien blijkt uit de analyse van de resultaten dat de focus bij de karakterisering van de fysische eigenschappen van dit type materiaal meestal ligt op warmtegeleiding. Vaak zien studies andere belangrijke parameters van deze materialen over het hoofd, zoals de levensduur, de milieu-impact en het hygrothermisch gedrag (Cosentino et al., 2023). Vooral dit laatste aspect is in dit onderzoek relevant, aangezien natuurlijke materialen hygroscopisch zijn, wat het energiebesparingspotentieel beïnvloedt (Palumbo et al., 2016). Dit is een uitdaging die in toekomstige ontwikkelingen moet worden aangepakt om een uitgebreide vergelijking van de eigenschappen van verschillende isolatiematerialen, zowel conventionele als biogebaseerde, mogelijk te maken (Palumbo et al., 2018). In Figuur 1 worden een aantal isolatiematerialen met elkaar vergeleken op basis van thermische weerstand en emissies. Hieruit kan worden besloten dat het essentieel is om nieuwe isolatieoplossingen te ontwikkelen die een lage ingebedde milieu-impact hebben en kunnen voldoen aan de functionele eisen voor maximaal comfort (Cosentino et al., 2023).



Figuur 1: Vergelijking isolatiematerialen op basis van thermische weerstand en emissies (Cosentino et al., 2023)

Een gekende methode om de milieuscore van een materiaal te berekenen, is de levenscyclusanalyse (LCA). Hierbij wordt de milieu-impact van de volledige levenscyclus van een bouw materiaal berekend. Dit gaat van de ingebedde energie, waaronder de ontginning van de grondstoffen, de productie en implementering in een constructie, tot de eindelevensenergie, namelijk het behandelen van het materiaal na gebruik (To bio or not to bio, z.d.). Biogebaseerde isolatiematerialen scoren hier beduidend beter op dan traditionele isolatiematerialen (Peñaloza et al., 2016).

2.1.2 Voor- en nadelen

Hoewel biogebaseerde isolatiematerialen als een potentieel alternatief voor traditionele isolatiematerialen worden beschouwd, vertonen ze eigenschappen die kunnen afwijken van conventionele materialen, wat zowel voordelen als nadelen met zich meebrengt (Zerari et al., 2024). In dit deel worden de eigenschappen van deze isolatiematerialen aangehaald, waarbij besproken wordt in welke positieve en negatieve gevolgen dit resulteert in vergelijking met traditionele isolatie.

- Milieuaspecten

Onder traditioneel bouwen verstaat men bouwen in lineaire productievorm, waarbij grondstoffen worden ontgonnen met oog op de rechtstreekse verwerking tot een isolatiemateriaal (Nasir et al., 2017). Wanneer dit materiaal aan het einde van zijn levensduur komt, wordt het gestort als afval of verbrand (Eco-logisch, z.d.). Een circulaire economie daarentegen houdt in dat biogebaseerde isolatiematerialen verkregen worden vanuit materialen die afkomstig zijn van hernieuwbare of hergebruikte grondstoffen (Le et al., 2023). Dit is een alternatief dat minder energie vergt dan het traditioneel bouwen, en dat bovendien ook aandacht besteedt aan het afvalbeheer (Neri et al., 2021).

Ook op vlak van milieu-impact scoren biogebaseerde materialen beter dan traditionele materialen (Schulte et al., 2021). Dit werd eerder besproken aan de hand van de levenscyclusanalyse in deel 2.1.1. Echter is er ook een keerzijde aan het gebruik van natuurlijke grondstoffen, namelijk wanneer bos wordt gekapt en wordt ingezet om gewassen op te laten groeien die vaak bedoeld zijn voor voedselproductie, maar ook om toe te passen in de bouw (Valin et al., 2015). Wanneer een LCA-analyse wordt gedaan, is het dus belangrijk om het landgebruik voor het telen van de grondstoffen ook in rekening te nemen (Dams et al., 2023). Bovendien is het een realiteit dat alle grondstoffen eindig zijn, ongeacht hun oorsprong. Bij biogebaseerde materialen is er wel sprake van hergroei, maar hun duurzaamheid hangt af van een zorgvuldig evenwicht tussen aanwas en oogst (Gereedschapskist, z.d.). Het risico schuilt erin dat hernieuwbare grondstoffen ten onrechte als oneindig beschikbaar worden beschouwd.

- **Warmte en vocht**

Eén van de meest bepalende parameters voor de beoordeling van isolatie is het hygrothermisch gedrag (Lafond & Blanchet, 2020). Het bepaalt de wijze waarop het materiaal vocht- en warmtetransport reguleert binnen de bouwschil. Dit gedrag beïnvloedt de thermische prestaties, de levensduur van het materiaal en de gezondheid van het gebouw (Palumbo et al., 2016).

Hoewel biogebaseerde materialen een gunstige thermische geleidingscoëfficiënt (λ -waarde) hebben, is deze vaak toch hoger in vergelijking met die van traditionele isolatiematerialen (Joostdevree, z.d.-b). Hierdoor is er een grotere dikte nodig om hetzelfde isolatieniveau te behalen, wat een van de oorzaken kan zijn van de mogelijke hogere kostprijs indien men kiest voor biogebaseerde isolatie (van der Waal, 2024).

Biogebaseerde materialen op basis van natuurlijke grondstoffen zijn vochtbufferend met een relatief laag dampdiffusieweerstandsgetal en zijn dus dampdoorlatend, wat voordelig is bij dampopen constructies waarbij een gecontroleerde vochtbalans nodig is teneinde een gezond binnenklimaat te bereiken (Künzel, 2022). Daarnaast zorgt deze eigenschap er ook voor dat er minder energie nodig is voor verwarming en koeling, terwijl de luchtkwaliteit verbetert (Osanyintola & Simonson, 2006). Anderzijds zijn deze materialen gevoeliger voor vocht, wat een negatieve invloed kan hebben op de thermische prestaties en de groei van schimmels mogelijk maakt. De duurzaamheid van biogebaseerde materialen wordt op die manier dus beperkt door de impact van vocht, waardoor versnelde degradatieprocessen en een verkorte levensduur van het materiaal kunnen plaatsvinden (Lopez Hurtado et al., 2016).

• **Gezondheidsaspecten**

Een nadeel van isolatiematerialen is dat deze schadelijke stoffen kunnen bevatten. Zo komen er bijvoorbeeld cyanaten vrij bij het uitharden van gespoten PUR-schuim (Departement Omgeving, z.d.). Volgens onderzoek van Naldzhiev et al. (2020) ligt de blootstelling hiervan boven de huidige wettelijke grenswaarden, en kan het ademhalingsproblemen en irritaties aan de huid veroorzaken (Bello et al., 2007). Het voordeel van biogebaseerde isolatiematerialen is dat ze minder schadelijke stoffen bevatten (Isolatienuoord, z.d.-b). Zowel bij de plaatsing als gedurende de levensduur van het materiaal zullen de plaatser en bewoners minder tot geen gezondheidsrisico's ervaren (Yadav & Agarwal, 2021).

2.1.3 Circulaire isolatiematerialen op basis van hergebruikte grondstoffen

De bewustwording rond de milieubelasting van bouwmaterialen resulteert in de productie van duurzamere materialen, waarbij speciale aandacht wordt besteed aan biogebaseerde grondstoffen en circulaire processen (Platt et al., 2023). Ten gevolge van studies naar materialen zoals houtvezel, hennep en stobalen, verbeterde de kennis en kwaliteit van deze materialen. In de afgelopen jaren zijn de investeringen voor biogebaseerde bouwmaterialen bij grote fabrikanten hierdoor toegenomen (Claude et al., 2024). Bestaande materialen die kunnen worden gerecycleerd tot een isolatieproduct, kunnen zowel synthetisch als organisch zijn (Majumder et al., 2021). In beide gevallen is het voordelig om rest- en afvalstromen van deze materialen te hergebruiken, in plaats van ze op afvalbergen te gooien of te verbranden. Zo zorgt duurzaam materiaalbeheer ervoor dat afval een grondstof wordt (Tallini & Cedola, 2018).

Onder synthetische materialen die kunnen worden omgezet tot isolatiemateriaal, bestaan bijvoorbeeld gerecycleerde plastic flessen (Asdrubali et al., 2015). PET-vlokken worden via vezel-spinlijnen geëxtrudeerd, waarna het als gesmolten polymeer wordt gefilterd en uiteindelijk wordt afgekoeld om het bewerkbaar te maken (Intini & Kühtz, 2011). Volgens Solvari, online adviesplatform over isolatie, combineert de resulterende polyesterwol de voordelen van traditionele minerale isolatiematerialen met die van ecologische isolatiematerialen. Het brengt namelijk zowel voor de plaatsing als voor de verdere levensduur geen gezondheidsrisico's met zich mee en daarnaast is het materiaal waterafstotend waardoor er geen risico's zijn op vlak van verrotting en schimmels. Ook brengt polyesterwol weinig gevaren met zich mee op vlak van brand. Omwille van de uitstekende geluidsisolatie van dit materiaal, wordt polyesterwol voornamelijk gebruikt als akoestische isolatie (Solvari, z.d.). Hoewel PET zelf synthetisch is, kan het een duurzaam alternatief zijn als het gerecycleerd wordt en gebruikt als isolatie. Dit voorkomt dat het plastic in het milieu terechtkomt en verlengt de levensduur van het materiaal.

Voorbeelden van isolatie op basis van organische materialen zijn cellulose-, houtvezel-, kurk- en katoenisolatie.

- **Cellulose** isolatie wordt gemaakt van gerecycleerd krantenpapier. Het heeft goede thermische en akoestische kwaliteiten, en bestaat zowel in de vorm van platen als losse vlokken. De platenvorm ontstaat door krantensnippers te vermengen met een bindmiddel zoals polyester (Lopez Hurtado et al., 2016). Een voordeel aan de losse vlokken is dat het een kierloze vulling garandeert dankzij de inblaastechniek. Dit wordt vaak toegepast bij houtskeletwoningen (Isolatieshop, z.d.-a).
- **Kurkisolatie** wordt vervaardigd uit gerecycleerde kurk of restmateriaal uit kurkindustrie. Bij de productie van geëxpandeerde kurk worden volledig natuurlijke kurkkorrels eerst vermalen en vervolgens geëxpandeerd. Dit proces is milieuvriendelijk aangezien de korrels door middel van stoomverhitting uitzetten en zich verbinden via de natuurlijke harsen die in de kurk aanwezig zijn. Hierdoor is het gebruik van synthetische lijmstoffen overbodig (Biesbroeck, z.d.). Ook kurkisolatie is beschikbaar in de vorm van panelen of losse vlokken (Isolteam, z.d.).
- Uit bosbeheer en reststromen van de houtindustrie kan **houtvezelisolatie** gemaakt worden. Versnipperd hout wordt gekookt, en kan vervolgens via een droog of nat procedé tot een isolatiemateriaal gevormd worden. Bij het nat procedé komen er geen bindmiddelen aan te pas, terwijl er bij het droge productieproces polymeren zoals polyolefinevezels als binder worden gebruikt (O'Brien et al., 2025). Houtvezelisolatie is eveneens verkrijgbaar onder de vorm van platen en inblaas vlokken (Eurabo, z.d.-a). Met 51% van het totaal vormt houtvezel het meest voorkomende type binnen de biogebaseerde isolatiematerialen (Schulte et al., 2021).
- **Katoenisolatie** wordt geproduceerd op basis van gerecycleerde jeansbroeken, oorspronkelijk vervaardigd uit de biogebaseerde grondstof katoen. De bekendste producent hiervan vandaag is Métisse, waarbij katoenvezels worden vermengd met een bindmiddel van polyester (S. Bailly & P. Hugo, persoonlijke communicatie, 23 december 2024). Hier wordt nog verder op ingegaan in deel 2.2.1.

Isolatiematerialen op basis van hergebruikte en/of natuurlijke grondstoffen worden vandaag al toegepast in diverse bouwtoepassingen (Peñaloza et al., 2016). Echter, bij de productie van dergelijke materialen wordt meestal geopteerd voor synthetische bindmiddelen. Om een volledig circulair en milieuvriendelijk product te realiseren, is verder onderzoek naar alternatieve, biogebaseerde bindmiddelen noodzakelijk. Dit zou bijdragen aan een meer duurzame en circulaire aanpak binnen de bouwsector. Binnen dit onderzoek zal er dan ook specifiek gefocust worden op isolatiematerialen op basis van hergebruikte grondstoffen, met nadruk op textielafval van afgedankte kledij, in combinatie met een biogebaseerd bindmiddel.

2.2 Gebruik van textiel als grondstof voor isolatiematerialen

In Tabel 1 worden statistieken gepresenteerd die het aandeel van de Europese bouwsector in de uitstoot en het gebruik van hulpbronnen weergeven, zoals gerapporteerd door Vlaanderen Circulair (z.d.). Naast de eerder besproken hoge uitstoot en verbruik van materialen en energie in de bouwsector, is de bouwsector dus ook verantwoordelijk voor een derde van het waterverbruik en afval in Europa.

Tabel 1: Aandeel bouwsector uitstoot en gebruik hulpbronnen in Europa (Vlaanderen Circulair, z.d.)

Uitstoot broeikasgassen	40%
Waterverbruik	33%
Energieverbruik	50%
Materiaalverbruik	50%
Afval	33%

De textielindustrie scoort op bepaalde thema's ook slecht, onder andere op vlak van waterconsumptie. Voor de productie van één katoenen t-shirt is bijvoorbeeld 2500 liter water nodig, terwijl de vervaardiging van een katoenen jeansbroek zelfs 7000 liter water vergt (Janssen et al., 2020). Er zijn echter reeds onderzoeken gestart naar technieken om het waterverbruik in de textielindustrie van China te verminderen (Chen et al., 2019). Hoewel waterverbruik in de kledingsector niet volledig te vermijden is, kunnen er wel strategieën worden ontwikkeld om het gebruik efficiënter te maken. In dit kader kan het zinvol zijn om het waterverbruik van verschillende industriële sectoren, waaronder de textiel- en bouwsector, in kaart te brengen en te vergelijken, bijvoorbeeld via levenscyclusanalyses (LCA). De productie van conventionele isolatiematerialen gaat immers vaak gepaard met aanzienlijke milieu-impact, waaronder watergebruik. Het hergebruik van afgedankte kledij als grondstof voor isolatiemateriaal zou in dat opzicht een potentieel circulair alternatief kunnen bieden. Dergelijke oplossingen kunnen bijdragen aan een vermindering van primaire grondstof- en waterverbruik, hoewel de daadwerkelijke milieuvoordelen sterk afhankelijk zijn van de specifieke context en verwerkingstechnologieën.

Naast waterverbruik, is de kledingsector eveneens verantwoordelijk voor materiaalverbruik en de resulterende stapels textielafval, zowel bij postproductie als postconsumptie. Door de opkomst van fast fashion bedrijven met goedkope kledij van slechte kwaliteit, wordt dit een steeds groter probleem (Shaw, 2022). Het is daarom ook interessant om afgedankte kledij te hergebruiken voor de productie van isolatie. Op deze manier worden de afvalbergen van de textielindustrie gereduceerd, en zal er ook minder materiaalproductie en de daarmee gepaarde afvalstromen bij de bouwsector nodig zijn.

2.2.1 Katoenisolatie op de markt

2.2.1.1 Métisse

De meest gangbare textielgebaseerde isolatievariant is katoenisolatie, die beschikbaar is onder de merknaam 'Métisse'. Métisse werd ontwikkeld door Le Relais, een Franse organisatie die streeft naar een netwerk van duurzame arbeidsplaatsen voor personen (Le Relais, z.d.). Oorspronkelijk ging men van deur tot deur om kledij te verzamelen en deze door te verkopen. De kwaliteit van de kledij daalde echter geleidelijk aan, waardoor ze rond 1984 beschikten over een overschot aan niet-herbruikbare jeansbroeken, wat uiteindelijk aanleiding gaf tot de ontwikkeling van het isolatiemateriaal. Sindsdien groeide Métisse uit tot een biogebaseerd isolatiemateriaal dat aan belangstelling wint (P. Hugo, persoonlijke communicatie, 2 december 2024).

Een cruciale vereiste voor het gebruik van afgedankte kleding in dit type isolatie is dat de kledingstukken volledig uit katoen moeten bestaan. In dit geval wordt polyester toegevoegd dat zal functioneren als bindmiddel tussen de katoenvezels (Isolatieshop, z.d.-b). Polyester is een vezel die bestaat uit twee componenten (bicomponent) waarvan de mantel een smelttemperatuur tussen 110-150°C heeft, terwijl de kern pas smelt bij temperaturen boven 200°C (Decon, 2022). De percentages katoenvezel en polyester bindmiddel zijn 85%-15% (Eurabo, z.d.-b). Dit geheel kan dan verwarmd worden tot de smelttemperatuur van de polyestermantel, namelijk tot 110°C, waardoor het materiaal aan elkaar kan binden. De vezels kunnen aan elkaar hechten zonder dat de hele structuur vervormt, maar toch voldoende flexibiliteit en elasticiteit bezit om de plaatsing van het materiaal zo vlot mogelijk te laten verlopen. Bij verhitting van het katoen-polyester mengsel tot een temperatuur van 110°C wordt geen externe druk toegepast. De enige structurele aanpassing die tijdens dit proces plaatsvindt, betreft de doorvoer van het materiaal over een transportband, waarbij een specifieke laagdikte wordt gevormd met een beoogde dichtheid van 20 kg/m³ (S. Bailly & P. Hugo, persoonlijke communicatie, 23 december 2025).

Métisse kent uitstekende eigenschappen op vlak van schimmelresistentie, akoestiek en specifieke warmte (Eurabo, z.d.-b). De additieven die gebruikt worden om de brandwerende eigenschappen van de isolatie te bevorderen, hebben geen impact op de isolerende prestaties van het materiaal aangezien deze toevoegstoffen de met lucht gevulde poriën niet afsluiten (S. Bailly & P. Hugo, persoonlijke communicatie, 23 december 2024). De eigenschappen van dit materiaal worden vermeld in de productfiche van Métisse, die is opgenomen in de bijlagen (12.5.1).

2.2.1.2 Pavatextil en Pavacell

Naast Métisse was er nog een ander type katoenisolatie op de markt, namelijk Pavatextil, gemaakt voor het bedrijf Pavatex. Ook deze katoenisolatie werd vervaardigd met polyester als bindmiddel. Dit materiaal wordt vandaag echter niet meer geproduceerd omdat het te duur werd en omdat het moeilijk te plaatsen was vanwege de zachtheid van het materiaal waardoor het te snel uit elkaar viel (R. De Pooter, persoonlijke communicatie, 17 december 2024). Dit probleem wordt nu opgelost door katoen te vermengen met cellulose, wat resulteerde in de Pavacell-isolatie (Soprema, persoonlijke communicatie, 18 december 2024). De technische fiches van Pavatextil en Pavacell werden opgenomen in de bijlagen (12.5.2 en 12.5.3) aan het einde van deze thesis.

2.2.2 Kledingindustrie

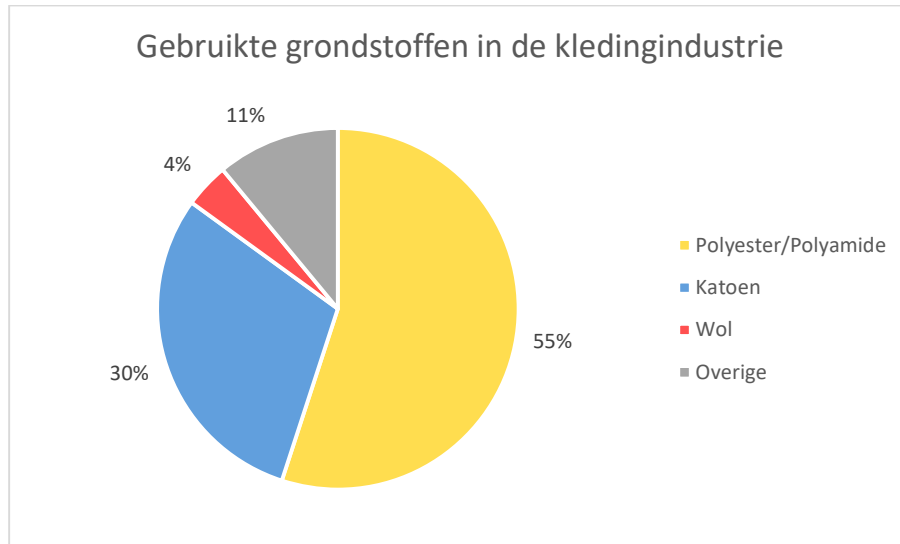
2.2.2.1 Textielsoorten

Textielvezels worden in de literatuur doorgaans onderverdeeld in twee hoofdcategorieën: natuurlijke vezels en kunstmatige vezels (Blaazer, 2023). Binnen deze overkoepelende classificatie kunnen verdere subcategorisaties worden aangebracht, zoals weergegeven in onderstaande Tabel 2.

Tabel 2: Categorieën van textielvezels (Blaazer, 2023)

Natuurlijke vezels		Kunstmatige vezels	
Plantaardig	Dierlijk	Plantaardig	Synthetisch
Katoen	Wol	Viscose	Polyester
Linnen	Zijde	Modal	Acryl
Hennep	Mohair	Lyocell	Nylon

In dit onderzoek zal vooral gefocust worden op de hoofdcategorie van de natuurlijke vezels en de subcategorie van de synthetische vezels. Een belangrijk verschil tussen natuurlijke en synthetische vezels is hun reactie op water. Natuurlijke vezels zijn over het algemeen hydrofiel, wat betekent dat ze gemakkelijk vocht opnemen. Synthetische vezels daarentegen zijn meestal hydrofoob en stoten water juist af (Van Haver, 2014). Dit verschil beïnvloedt het gedrag van de vezels bij contact met vocht, wat mogelijk een impact heeft op hun prestaties als isolatiemateriaal. Deze eigenschap zal dan ook worden meegenomen in de analyse van de resultaten.



Figuur 2: Gebruikte grondstoffen in de kledingindustrie (Blaazer, 2023)

Textielvezels komen in uiteenlopende vormen voor, waarbij polyester en katoen wereldwijd het textielgebruik domineren. Zoals weergegeven in Figuur 2, nemen deze twee materialen samen meer dan 80% van het totale gebruik voor hun rekening (Blaazer, 2023). Beide vezels bieden specifieke voordelen: katoen staat bekend om zijn zachtheid, terwijl polyester uitblinkt in kreukbestendigheid (Van Opstal, 2022). Om de eigenschappen van beide materialen te combineren, worden ze vaak verwerkt in blends, zoals de populaire katoen/polyestermix (Kahoush & Kadi, 2022). Hoewel dergelijke mengvormen functioneel aantrekkelijk zijn, brengen ze grote uitdagingen met zich mee op vlak van recyclage (Sasikumar et al., 2023). Voor gemengde textielstromen, zoals post-consument afval, is sorteren noodzakelijk om materialen te scheiden op basis van kleur, chemische samenstelling, afmetingen en kwaliteit. Deze factoren bepalen of een product kan worden hergebruikt, gerecycleerd of weggegooid (Peterson et al., 2022). Vooral de chemische samenstelling is van belang, omdat recyclageprocessen vaak gericht zijn op specifieke vezeltypes. Momenteel gebeurt de sortering volgens Seifali Abbas-Abadi et al. (2025) vooral handmatig. Dit is goedkoop in lagelonenlanden en laat kwaliteitsinschatting toe, maar het is traag, onnauwkeurig en ongeschikt voor chemische scheiding. Labels bieden soms hulp, maar ontbreken vaak of zijn onbetrouwbaar. Bovendien werken sorteerdere vaak onder slechte omstandigheden, wat de nauwkeurigheid van het proces verder onder druk zet (Seifali Abbas-Abadi et al., 2025). Daarom worden gemengde textielstromen zelden gerecycleerd tot hoogwaardige toepassingen zoals nieuwe kleding (Lasance, 2025).

2.2.2.2 Hedendaagse consumptiepatronen

De kledingindustrie is volgens Veen (2023) wereldwijd de op drie na grootste vervuiler en haar klimaatimpact blijft toenemen met gemiddeld 9,93% per jaar. E-commerce speelt hierin een grote rol, onder meer door het stimuleren van overconsumptie en hoge retourpercentages (Veen, 2023). Fast fashion, goedkope, snel geproduceerde kleding geïnspireerd op de laatste trends, heeft het consumentengedrag drastisch veranderd. Door lage prijzen kopen mensen meer en gooien ze sneller kleding weg (Gilliams, 2024). Deze overconsumptie leidt tot toenemende milieudruk en brengt gezondheidsrisico's met zich mee voor mensen die in of nabij textiel fabrieken werken en wonen (Bick et al., 2018). Zo is fast-fashion verantwoordelijk voor 8-10% van de wereldwijde CO₂-uitstoot (Blondin, 2024). Merken als Shein en Temu illustreren de negatieve zijde van fast fashion. Hun kleding is vaak gemaakt van synthetisch materiaal zoals polyester, wat recycling onmogelijk maakt (Heinhuis, z.d.). De slechte kwaliteit zorgt ervoor dat deze items snel worden weggegooid, waardoor het bijdraagt aan het groeiende textielafvalprobleem. Daarnaast is het gemak van retourneren via webwinkels een groeiende milieuproblematiek. Retourpercentages van 25–60% zijn inmiddels gangbaar (Veen, 2023). Veel van deze geretourneerde artikelen worden vernietigd of gestort in plaats van opnieuw verkocht, wat jaarlijks wereldwijd resulteert in zo'n 5 miljard kilogram afval en 15 miljoen ton CO₂-uitstoot (Constable, z.d.). Dit gedrag is niet alleen ecologisch schadelijk, maar tast ook de winstgevendheid van de sector aan (Hjort & Lantz, 2016). De oorzaken van deze problematiek liggen op alle niveaus: van beleid tot bedrijfsvoering en consumentengedrag. Een structurele aanpak is noodzakelijk om de groeiende ecologische impact van de kledingindustrie te beperken (Calcabrini et al., 2020).

Organisaties zoals ViTeS illustreren hoe bepaalde initiatieven trachten afgedankte kleding een tweede leven te geven. ViTeS zamelt in de provincie Vlaams-Brabant textiel in dat vervolgens wordt verdeeld over Kringloopwinkels. De organisatie stelt vast dat de hoeveelheid ingezamelde kleding de afgelopen jaren aanzienlijk is toegenomen: in 2023 werd maar liefst 3.151.587 kilogram textiel binnengebracht, wat ruim een miljoen kilogram meer is dan vijf jaar eerder (A. Vanermen, persoonlijke communicatie, 27 november 2024). Desondanks blijkt dat slechts 35% van deze kleding van voldoende kwaliteit is om daadwerkelijk te worden doorverkocht via de Kringwinkels. Het resterende deel wordt slechts in beperkte mate gerecycleerd voor andere doeleinden, het merendeel belandt namelijk alsnog op afvalbergen (A. Vanermen, persoonlijke communicatie, 27 november 2024). Dit wijst erop dat het veronderstelde hergebruik of de circulaire waarde van de kleding overschat wordt, waardoor men kan spreken van een vorm van schijnrecyclage.

Volgens een rapport van het Europees Milieuagentschap (EEA) wordt in Europa jaarlijks gemiddeld 16 kilogram textiel per persoon weggegooid. Naar schatting wordt 85% van dit textielafval niet gescheiden ingezameld, waardoor het merendeel uiteindelijk op

stortplaatsen terechtkomt of wordt verbrand (Belga, 2025). Hierdoor gaan waardevolle grondstoffen verloren en blijft het potentieel voor hergebruik en recyclage grotendeels onbenut. Om de verhouding tussen de hoeveelheid jaarlijks weggegooid textielafval en de benodigde hoeveelheid isolatiemateriaal te illustreren, wordt een indicatieve berekening uitgevoerd.

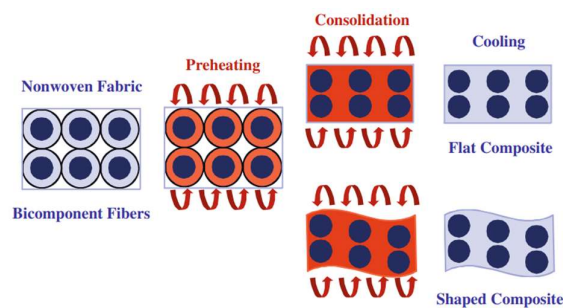
- Voor de isolatie van de buitenschil van een gemiddelde woning met een geveloppervlakte van circa 250 m^2 (Bouwen aan Vlaanderen, 2020), is bij toepassing van een materiaal zoals Métisse een totale hoeveelheid van ongeveer **700 kilogram isolatie vereist**. Deze schatting is gebaseerd op een isolatiedikte van 14 cm en een densiteit van 20 kg/m^3 , conform de technische specificaties van Métisse (zie bijlage 12.5.1). Het benodigde volume aan isolatiemateriaal bedraagt daarmee 35 m^3 ($250 \text{ m}^2 \times 0,14 \text{ m}$), wat leidt tot een massa van 700 kg.
- Indien textielafval effectief wordt ingezameld en gerecycleerd, kan dit een waardevolle grondstofbron vormen. Een gezin van vier personen produceert op tien jaar tijd ongeveer **640 kilogram textielafval** ($16 \text{ kg} \times 4 \text{ personen} \times 10 \text{ jaar}$): een hoeveelheid die nagenoeg volstaat om de geveloppervlakte van een woning te isoleren. Dit benadrukt het circulaire potentieel van afgedankte kledij binnen een duurzaam materialenbeleid.

2.3 Bindmiddelen

De binding van grondstoffen tot een functioneel isolatiemateriaal kan op verschillende manieren worden gerealiseerd. De keuze voor een specifieke productiemethode wordt bepaald door factoren zoals het type materiaal, de beoogde isolatievorm en de gewenste toepassing. Voor de productie van flexibele matten die worden verwerkt op basis van veverzeld textiel, worden er door Angelotti et al. (2024) twee methoden voorgesteld, namelijk mechanische binding en thermische binding.

Mechanische binding van textielvezels gebeurt door middel van ‘needle-punching’. Vezels worden met behulp van naalden verweven tot een vezelweb. Een moeilijkheid in dit proces is dat de vereiste vezels hiervoor voldoende lang dienen te zijn voor een goed resultaat. Bovendien levert dit isolatiematten op met geringe diktes tussen 15 mm en 17 mm (Patnaik et al., 2015). Hierdoor zijn meerdere lagen nodig om dezelfde isolerende prestaties te leveren als conventionele isolatiematerialen.

In tegenstelling tot mechanische binding, is thermische binding veelzijdiger. Bij dit proces worden textielvezels gemengd met bicomponent vezels die beschikken over een externe laag waarvan het smeltpunt lager ligt dan de kern (Angelotti et al., 2024). Die mantel is vaak een thermoplastisch polymeer dat smelt of zachter wordt bij verhitting. De versterkende component binnenin bestaat uit een thermohardend polymeer dat uithardt en de structuur verstevigt. Deze kern-mantelstructuur lijkt conceptueel op de vezel-matrixstructuur van vezelversterkte composieten (Naeimirad et al., 2018). Door de vezelstructuur op te warmen tot een temperatuur nabij de smelttemperatuur van het matrixpolymeer, wordt het matrixmateriaal zacht. Onder invloed van warmte vloeit dit polymeer en vult het de ruimten tussen de vezels (interfibrillaire ruimten), wat resulteert in een compacte, geconsolideerde structuur. Tegelijkertijd behoudt het kernpolymeer zijn sterkte en mechanische eigenschappen (Dasdemir et al., 2011). Een schematische voorstelling van dit proces wordt weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3: Thermische binding van textiel door een bicomponente vezel (Dasdemir et al., 2011)

Dit concept benut volledig de eigenschappen van bicomponent-vezels om een geïntegreerd productieproces te creëren, dat kosteneffectief en milieuvriendelijk is (Demirci, 2011). In dit deel zullen verder traditionele en biogebaseerde bicomponente bindmiddelen besproken worden die geschikt zijn voor de thermische binding van isolatie.

2.3.1 Traditionele bindmiddelen

Polymeren en harsen die gebaseerd zijn op synthetische materialen worden beschouwd als traditionele bindmiddelen (Palaniappan et al., 2020). Bij verhitting smelten ze of harden ze uit om vezels of deeltjes te verbinden. Ze kennen reeds toepassing bij de productie van biogebaseerde bouwmaterialen zoals cellulose, houtvezelisolatie en katoenisolatie (Lopez Hurtado et al., 2016; O'Brien et al., 2025).

Onder de synthetische thermoplastische bindmiddelen vallen ondermeer polyester (PET), polypropyleen (PP) en polyethyleen (PE) (Santos et al., 2021). Houtvezelisolatie kent twee verschillende productiemethodes, namelijk een nat procedé en een droog procedé. Voor de productie van droge, soepele houtvezelisolatie gebruikt men polyolefinevezels voor de binding (O'Brien et al., 2025). Deze bevatten polymeren zoals polypropyleen en polyethyleen (Eurabo, z.d.-a). Ook polyester wordt gebruikt bij de productie van biogebaseerde bouwmaterialen, zoals voor katoenisolatie. Métisse bestaat uit een verhouding van 85% katoenvezels en 15% polyester bindmiddel (S. Bailly & P. Hugo, persoonlijke communicatie, 23 december 2024).

Daarnaast bestaan er ook thermohardende harsen, zoals fenol-formaldehyde harsen en ureum-formaldehyde harsen (Peng & Riedl, 1995). Traditionele bindmiddelen op basis van fenol-formaldehyde-ureum (PFU) worden voornamelijk toegepast bij de productie van minerale wol (Bennett et al., 2022). Deze bindmiddelen staan echter steeds meer ter discussie vanwege de formaldehyde die kan vrijkomen, zowel tijdens de productie als gedurende de gebruiksperiode van het isolatiemateriaal. De classificatie van formaldehyde als een kankerverwekkende stof door diverse veiligheidsorganisaties heeft de industrie ertoe aangezet om versneld op zoek te gaan naar alternatieve bindmiddeltechnologieën die de uitstoot van formaldehyde sterk of volledig vermijden (Kristak et al., 2023). Een aantal van deze alternatieven waarbij het aandeel formaldehyde gereduceerd is tot de vooropgestelde normen of zelfs volledig afwezig is, bevatten echter nog steeds synthetische materialen zoals polyester (Bennett et al., 2022).

2.3.2 Biogebaseerde bindmiddelen

Net zoals er voor de traditionele grondstoffen van isolatiematerialen gezocht wordt naar milieuvriendelijkere alternatieven, gebeurt dit ook voor traditionele bindmiddelen. Het onderzoek naar natuurlijke bicomponente vezels die geschikt zijn voor thermische binding is echter nog vrij beperkt (van den Oever et al., 2012).

In de context van bicomponente bindmiddelen is PLA (polymelkzuur) een veelgebruikt biogebaseerd materiaal. Deze bicomponent wordt zacht bij verhitting, wat het geschikt maakt voor toepassingen waarbij smeltlijmen of thermoplastische bindmiddelen nodig zijn (Mochizuki & Matsunaga, 2016). Polymelkzuur kan worden geproduceerd uit diverse grondstoffen die zetmeel of suiker bevatten, zoals aardappelen, tapioca, suikerbieten en suikerriet. Welke grondstof wordt gebruikt, hangt meestal af van de lokale beschikbaarheid, in Thailand bijvoorbeeld is suikerriet de belangrijkste grondstof voor PLA-productie (Rayong, 2019). Het proces begint met de fermentatie van zetmeel of suikers, waarbij melkzuur wordt gevormd. Deze omzetting is zeer efficiënt: uit elk suikermolecuul ontstaan twee melkzuurmoleculen zonder bijproducten (Karthik, 2004). PLA kan vervolgens worden verwerkt met de gebruikelijke technieken voor thermoplastische materialen. Dit omvat onder andere vezelspinnen, extrusie, compounderen, spuitgieten en thermovormen (Molenveld & Bos, 2019). Bovendien kan PLA onder industriële composteeromstandigheden ook biologisch worden afgebroken, wat het uitermate geschikt maakt voor toepassingen met een focus op duurzaamheid (Mochizuki & Matsunaga, 2016).

De buitenste laag van PLA smelt al bij een relatief lage temperatuur van 135°C, terwijl de binnenste kern pas bij 160°C begint te smelten (W. De Muynck, persoonlijke communicatie, 10 januari 2025). Bij de thermische binding wenst men dat enkel de mantel smelt, aangezien de kern zorgt voor de structuur van het geheel. Daarom wordt er aangeraden om tussen deze twee temperaturen te blijven bij het verhitten van dit bindmiddel (Aguilar Del Bosque et al., 2024).

Daarnaast kan PLA ook enkel gebruikt worden als kern van een bicomponent bindmiddel (Ludwiczak et al., 2023). Door de juiste keuze van thermoplastisch polymeer als mantelmateriaal, kunnen deze bindmiddelen eveneens biobased en biodegradeerbaar zijn, zoals PBS (polybutyleensuccinaat), PHA (polyhydroxyalkanoaten), TPS (thermoplastisch zetmeel) en CA (cellulose acetaat) (Oskam et al., 2015). Deze alternatieven leveren echter minder gunstige eigenschappen dan het meest gekende PLA voor thermische bindingen. Zo vereist PHA een hogere smelttemperatuur (170-180°C) en is ook de kostprijs ervan hoger dan die van PLA vezels. PBS daarentegen bezit een lagere smelttemperatuur (115°C) dan PLA, maar ook hier is de kostprijs hoger dan PLA waardoor het minder interessant wordt voor

commercieel gebruik. Daarnaast varieert de mate waarin PBS biogebaseerd is tussen 50-100%, waardoor dit buiten het kader van dit onderzoek valt (W. De Muynck, persoonlijke communicatie, 10 januari 2025). Thermoplastisch zetmeel wordt gekarakteriseerd door een beperkte duurzaamheid en een geringe vochtbestendigheid. Daarnaast vertonen materialen met hogere concentraties TPS een afname in mechanische sterkte en thermische stabiliteit, wat de toepasbaarheid ervan in veeleisende omstandigheden aanzienlijk beperkt (Nazrin et al., 2020).

In deze fase van onderzoek naar biogebaseerde bicomponente bindmiddelen is PLA/PLA dus het meest gebruikt in de praktijk, vanwege de gunstige balans tussen prijs, sterkte en duurzaamheid (Hufenus et al., 2012).

2.3.3 Bestaand onderzoek met PLA bindmiddel

Zoals eerder beschreven, bestaat er vandaag enkel katoenisolatie met een synthetisch bindmiddel, namelijk polyester. De belangrijkste reden hiervoor is dat PLA vezels 6 keer zo duur zijn als PP/PE vezels. Polyesterbindmiddel kost namelijk ongeveer €0,97 per kilogram (Textilebeacon, 2024), terwijl PLA met €5,96 per kilogram aanzienlijk duurder is (W. De Muynck, persoonlijke communicatie, 19 mei 2025). Ter illustratie van dit verschil wordt de prijs berekend voor een isolatiemat met dezelfde eigenschappen als Métisse: 14 cm dik en 85%/15% vezels/bindmiddel verhouding. In deze samenstelling komt de kostprijs van het bindmiddel neer op €0,41 per vierkante meter bij gebruik van polyester, tegenover €2,50 per vierkante meter bij PLA.

Het doel van deze thesis is echter om te streven naar een isolatiemateriaal dat uitsluitend uit circulaire en biogebaseerde materialen bestaat. De productiemethode van een isolatiemateriaal is sterk afhankelijk van het gebruikte bindmiddel, wat het cruciaal maakt om hier inzicht in te krijgen in het geval PLA wordt gebruikt als binder.

Islam et al. (2024) voerden reeds onderzoek uit waarbij men materialen produceerde van katoenvezels van textielafval, met PLA als bicomponent bindmiddel. Zij hanteerden een productiemethode waarbij een verhouding van 90% katoen en 10% PLA eerst mechanisch gebonden wordt door needle-punching. Om dit geheel mechanisch sterker te maken, voerde men vervolgens een thermisch bindingsproces uit. Hierbij wordt gedurende 10 minuten een temperatuur van 165°C toegepast om de PLA-vezels deels te laten smelten zodat de nodige adhesie tussen de vezels tot stand komt zonder externe druk. Zoals eerder beschreven, is het echter beter om onder de smelttemperatuur van de kern te blijven, dus onder 160°C, om de

structuur van de vezel te behouden (W. De Muynck, persoonlijke communicatie, 10 januari 2025).

Uit de resultaten van dat onderzoek blijkt dat het geproduceerde isolatiemateriaal gunstige thermische eigenschappen heeft, waaruit kan geconcludeerd worden dat PLA dus geen duidelijke negatieve impact heeft op de isolerende eigenschappen van een vezel (Islam et al., 2024). De parameters betreffende het proces van de thermische binding kunnen daarom meegenomen worden in het experimenteel onderzoek in deze thesis.

2.4 Hygrothermisch gedrag van isolatiematerialen

Isolatiematerialen kunnen op diverse manieren worden getest om inzicht te krijgen in hun prestaties onder verschillende omstandigheden. Er zijn talrijke eigenschappen die in rekening kunnen worden gebracht, waaronder thermische geleiding, vochtregulerend vermogen, brandveiligheid, akoestische eigenschappen en resistentie tegen aantasting of schimmelgroei (Van Impe, 2024). Hoewel die laatste 3 zeker van belang zijn om in rekening te nemen bij de beoordeling van een isolatiemateriaal, zullen deze in dit onderzoek niet verder besproken worden. Binnen het kader van deze thesis zullen de isolatiematerialen voornamelijk getest worden volgens hygrothermisch gedrag.

Het hygrothermisch gedrag van bouwmaterialen in de bouwschil is een belangrijk aspect van de energieprestatie van een gebouw (Korjenic et al., 2011). Daarom is het noodzakelijk om de hygrothermische eigenschappen van de geproduceerde materialen te onderzoeken, zodat kan nagegaan worden in welke mate de materialen zullen isoleren bij bepaalde temperatuur en vochtigheid. De grootheden die nuttig zijn om de hygrothermische prestaties van een materiaal te bepalen, worden hieronder besproken aan de hand van de mechanismen van transport en opslag van warmte en vocht.

2.4.1 Warmtetransport

2.4.1.1 Warmtegeleidingscoëfficiënt

De warmtegeleidingscoëfficiënt λ , uitgedrukt in W/mK, beschrijft hoeveel warmte in een bepaalde tijd door een materiaal stroomt, bij een dikte van 1 meter en een oppervlakte van 1 m² als er een temperatuurverschil van 1 graad is tussen de twee oppervlakken van het materiaal. Hoe lager deze waarde, hoe beter het materiaal isoleert (Janssens, 2022). De thermische geleidbaarheid van een isolatiemateriaal wordt groter naarmate de temperatuur en de vochtigheid stijgen, maar de graad van verandering is afhankelijk van materiaal tot materiaal (Wang et al., 2022).

Wanneer men de thermisch isolerende prestaties van materialen met elkaar wil vergelijken, kan dit door hun λ -waarden naast elkaar te leggen. In Tabel 3 worden de warmtegeleidingscoëfficiënten van een aantal materialen met elkaar vergeleken. Doorgaans isoleren biogebaseerde isolatiematerialen minder goed dan traditionele materialen (Lafond & Blanchet, 2020). Bij de toepassing van biogebaseerde isolatiematerialen zal het dus nodig zijn om een grotere isolatiedikte te voorzien om dezelfde isolerende prestaties te bekomen als traditionele materialen (van der Putten, 2025). Dit volgt uit de warmteweerstand, die de verhouding voorstelt van de dikte van de laag ten opzichte van de warmtegeleidingscoëfficiënt ervan: $R = \frac{d}{\lambda}$.

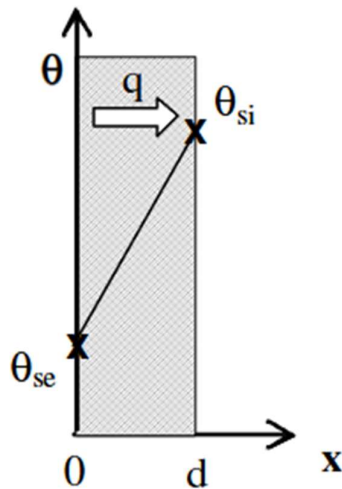
Tabel 3: Vergelijking λ -waarden van isolatiematerialen uit de literatuur (Joostdevree, z.d.-b)

Type isolatie		λ -waarde [W/mK]
Traditioneel	Rotswol	0,032-0,040
	PUR-schuim	0,024-0,028
	XPS	0,027-0,028
Biogebaseerd	Katoen	0,040
	Hennep	0,042
	Houtvezel	0,036-0,038

De warmtegeleidingscoëfficiënt van een materiaal kan gemeten worden door middel van een warmtestroommeter (Heat Flow Meter: HFM), volgens de norm NBN EN 12667 (2001).

2.4.1.2 Warmtestroom

De warmtestroom geeft aan hoeveel energie wordt overgedragen per tijdseenheid en per eenheidsoppervlak. Wanneer er een temperatuurverschil heerst tussen beide zijden van een wand, zal er binnenin de wand een warmteoverdracht plaatsvinden via geleiding door beweging van atomen en moleculen. Met de warmtestroom kan de impact van temperatuurschommelingen op de thermische prestaties worden geanalyseerd (Hens, 2013). De stromingsdichtheid doorheen een wand wordt weergegeven in Figuur 4 en wordt berekend volgens formule 1.



Figuur 4: Temperatuurverloop in een enkelvoudige laag (Janssens, 2022)

Voor de stromingsrichting wordt aangenomen dat de positieve richting wordt beschouwd voor een verloop van het binnenoppervlak naar het buitenoppervlak. Wanneer de temperatuur binnen hoger is dan buiten, zal de warmtestroom dus een positieve waarde aannemen.

$$q = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{R} \quad (1)$$

Met: q = warmtestroomdichtheid [W/m^2]
 θ_{si} = oppervlaktetemperatuur binnen [$^{\circ}\text{C}$]
 θ_{se} = oppervlaktetemperatuur buiten [$^{\circ}\text{C}$]
 R = warmteweerstand van de laag [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

De hoeveelheid energie die per seconde wordt overgedragen, wordt dus bepaald door verschillende factoren: de dikte van de wand, het temperatuurverschil tussen beide zijden en de warmtegeleidingscoëfficiënt λ van het materiaal (Hens, 2013).

2.4.2 Warmteopslag

2.4.2.1 Soortelijke warmte

Om een inzicht te krijgen in het thermisch gedrag van een bouw materiaal, is naast de thermische geleidbaarheid λ en de dichtheid ρ , ook de soortelijke warmte c een belangrijke fysische eigenschap om in rekening te nemen (Ghazi Wakili et al., 2003). Deze parameter vertelt hoeveel warmte een materiaal kan vasthouden. Met de soortelijke warmte c kan de warmtecapaciteit C van een isolatiemateriaal gedefinieerd worden (formule 2). Deze grootheid geeft weer hoeveel warmte nodig is om de temperatuur van 1 m³ van het materiaal te doen stijgen met 1 Kelvin (Braeckman et al., 1987).

$$C = \rho * c \quad (2)$$

Met: C = warmtecapaciteit [J/m³K]

ρ = massadichtheid [kg/m³]

c = soortelijke warmte [J/kgK]

Materialen die een hoge warmtecapaciteit hebben, nemen warmte langzaam op, wat helpt om de binnentemperatuur stabiel te houden. Bij isolatiematerialen kan dit nuttig zijn om pieken in temperatuur op te vangen, bijvoorbeeld wanneer de zon overdag schijnt. Die opgeslagen warmte wordt vervolgens 's nachts geleidelijk afgegeven, wat zorgt voor een aangeneramer binnenklimaat in huis (Janssens, 2022).

2.4.2.2 Thermische diffusiviteit

De thermische diffusiviteit geeft aan hoe snel een materiaal reageert op temperatuurveranderingen als gevolg van een externe warmtebron. Hoe lager deze waarde, hoe trager de warmte zich door het materiaal verspreidt. Met andere woorden: bij een lage diffusiviteit duurt het langer voordat warmte het materiaal volledig doordringt (GidsDuurzaamBouwen, z.d.). De eenheid van thermische diffusiviteit α [m²/s] wordt berekend volgens formule 3 (MilieuAdviesWinkel, 2022).

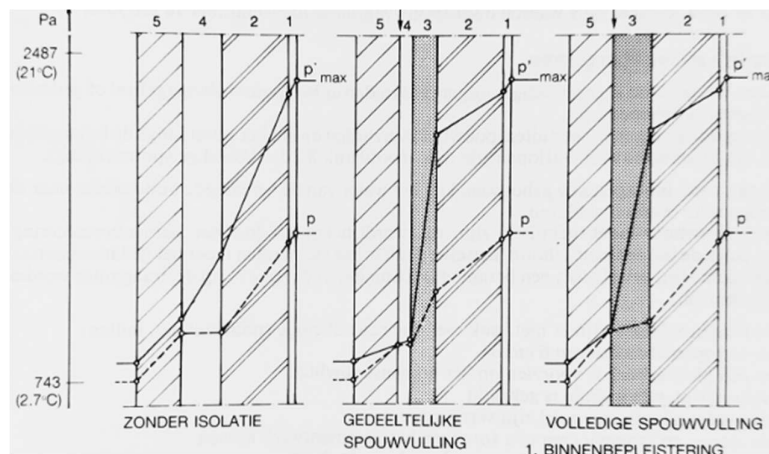
$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho * c} = \frac{\lambda}{c} \quad (3)$$

2.4.3 Vochttransport

In een materiaal kan vocht zich op twee manieren verplaatsen, namelijk via diffusie en capillaire absorptie. Deze transportmechanismen en de bijhorende begrippen worden hieronder besproken.

2.4.3.1 Dampdruk

De dampdruk, ook wel dampspanning genoemd, is een fysisch begrip dat de druk beschrijft die de dampfase (gas) van een bepaalde stof uitoefent op de wanden van een gesloten systeem. Deze druk wordt vaak uitgedrukt in kilopascal (kPa). De dampdruk vormt een maat voor de absolute vochtigheid van een materiaal en wordt bepaald door meerdere factoren, waaronder de hoeveelheid aanwezig vocht, de dichtheid van de waterdamp en de temperatuur. Daarnaast is de dampdruk afhankelijk van de temperatuur en de vluchtigheid van de stof in kwestie. Net als de relatieve vochtigheid biedt de dampdruk inzicht in processen zoals vochtbuffering en drooggedrag van materialen. Binnen een gesloten constructieonderdeel zal bij verschil in partiële dampdruk de waterdamp zich willen verplaatsen naar de zijde met de laagste dampdruk. Die verplaatsing van waterdampmoleculen wordt dampdiffusie genoemd. Het dampdrukverloop wordt weergegeven in Figuur 5 en formule 4.



Figuur 5: Dampdrukverloop (Braeckman et al., 1987)

$$p = \frac{RV * p_s}{100} \quad (4)$$

Met: p = dampdruk [Pa]
 RV = relatieve vochtigheid [%]
 p_s = verzadigingsdampdruk [Pa]

De verzadigingsdruk p_s wordt ook wel de maximale waterdampconcentratie genoemd. Deze is afhankelijk van de temperatuur, want naarmate de temperatuur stijgt, zal de lucht meer waterdamp kunnen opnemen. Dit staat dus in verband met de relatieve vochtigheid. Deze kan daaruit volgend worden weergegeven als de verhouding van de werkelijke dampconcentratie en de maximale dampconcentratie, zoals wordt uitgedrukt in formule 5 (Braeckman et al., 1987). Inzicht in het verloop van de relatieve vochtigheid staat ons toe om de vochtbufferende eigenschappen en het uitdrogingsproces van materialen te evalueren (Lawrence, 2005).

$$RV = \frac{p}{p_s} * 100 \quad (5)$$

2.4.3.2 Waterdampdiffusie

Temperatuurverschillen tussen het binnen- en buitenklimaat kunnen leiden tot verschillen in luchtdruk. Wanneer twee begrensde zones dezelfde luchtdruk hebben, maar toch een verschillende partiële dampdruk kennen, zullen de gasmoleculen dit in evenwicht willen brengen. Het vochttransport dat hiermee gepaard gaat, resulteert in een diffusie van waterdamp. Het diffusieproces stopt zodra een evenwicht in de partiële dampdrukken is bereikt. In normale omstandigheden is de waterdampdruk van de buitenomgeving lager dan in het binnenklimaat, wat betekent dat gasmoleculen via open poriën van binnen naar buiten zullen diffunderen doorheen de wand.

Afhankelijk van het materiaal waaruit de wand bestaat, zal de wand hier veel of weinig weerstand tegen bieden (Janssens, 2022). Kirchner voerde hiervoor het diffusieweerstandsgetal μ in (formule 6). Dit is een dimensieloze grootheid die de weerstand van een materiaal vergelijkt met de weerstand van een stilstaande luchtlaag van gelijke dikte. Om dit eenvoudig te kunnen doen, stelt hij het diffusieweerstandsgetal van lucht gelijk aan 1 (Braeckman et al., 1987).

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (6)$$

Met: μ = dampdiffusieweerstandsgetal [-]
 δ_a = dampgeleidingscoëfficiënt van stilstaande lucht = $2 * 10^{-1} \text{ s}$
 δ = dampgeleidingscoëfficiënt van het materiaal [s]

Om dit makkelijker voor te stellen bij bepaalde materiaaldiktes, wordt de diffusiedikte of equivalente luchtlaagdikte S_d gebruikt (Janssens, 2022). Deze wordt voorgesteld in formule 7. De S_d -waarde geeft aan hoe goed een materiaal met een bepaalde laagdikte waterdamp kan tegenhouden of doorlaten. Een S_d -waarde van 150 m betekent dat de waterdampdoorlatendheid van het materiaal bij die dikte vergelijkbaar is met die van een luchtlaag van 150 m dik, wat aangeeft dat het een sterke dampremmer is. Ter vergelijking: een dampopen materiaal heeft bijvoorbeeld een S_d -waarde van 0,04 m (Joostdevree, z.d.-a).

$$S_d = \mu * d \quad (7)$$

Met: S_d = equivalente luchtlaagdikte [m]

μ = dampdiffusieweerstandsgetal [-]

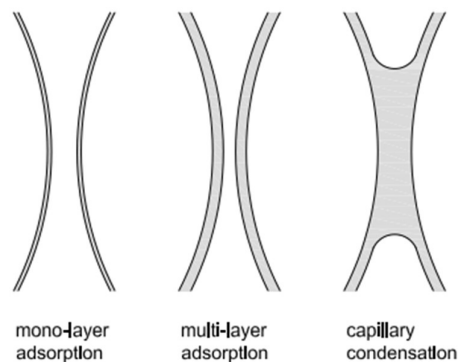
d = dikte van de laag [m]

Biogebaseerde materialen onderscheiden zich doorgaans van synthetische materialen door hun vermogen om vocht te reguleren. Dit maakt ze bijzonder geschikt voor toepassing in dampopen bouwmethoden, waar een gecontroleerde vochtbalans essentieel is voor het behoud van constructieve integri(Lafond & Blanchet, 2020)klimaat (Lafond & Blanchet, 2020). Natuurlijke isolatiematerialen hebben daarom gewoonlijk een dampopen gedrag waardoor de isolatie vochtregulerend is. Idealiter hebben isolatiematerialen bij houtskeletbouw een grote dampdoorlatendheid, waarbij deze waarde dus die van lucht benadert (Kies Biobased, 2023). De bepaling van deze materiaalfactor vindt plaats door middel van de cuptest, een eenvoudige en gangbare methode die wordt beschreven in de norm NBN EN ISO 12572 (2024).

2.4.3.3 Capillaire absorptie

Naast diffusie, kan vocht ook getransporteerd worden door middel van capillaire absorptie. Wanneer een materiaal bestaat uit een netwerk van holtes waar vocht zich in horizontale en verticale richting kan verplaatsen, spreken we van een poreus materiaal. Er ontstaan capillaire krachten tijdens de interactie van vloeibaar vocht met de wanden van de poriën. Samen met de aantrekkingskracht tussen de watermoleculen onderling, zijn die capillaire krachten verantwoordelijk voor het transport van vocht doorheen een materiaal (Hens, 2013).

Het proces waarbij de poriën gevuld worden met vocht bestaat uit twee fases. Eerst zullen de wanden van de poriën bedekt worden met dunne laagjes water. Dit noemt men moleculaire adsorptie (Steeman, 2010). Wanneer de waterlaagjes verder aangedikt zijn en met elkaar in contact komen, start de tweede fase: capillaire condensatie. Dit proces wordt geïllustreerd in Figuur 6.

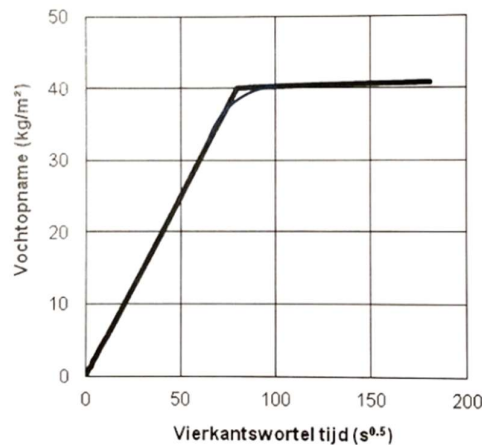


Figuur 6: Proces voor het vullen van poriën met vocht (Steeman, 2010)

Belangrijke parameters die dit proces versnellen zijn de relatieve vochtigheid van de lucht en de poriëndiameter. Stijgende relatieve vochtigheden zullen leiden tot een stijgende hoeveelheid vocht in een poreus materiaal. Daarnaast zal de opzuigkracht ook sterker worden bij nauwere poriën (Braeckman et al., 1987).

2.4.3.4 Waterabsorptiecoëfficiënt

De waterabsorptiecoëfficiënt A_w [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0,5}$] geeft weer aan welke snelheid vocht doorheen een materiaal wordt getransporteerd (May, 2005). Deze materiaalafhankelijke parameter heeft invloed op de capillaire absorptie van een materiaal en kan gemeten worden volgens de norm NBN EN ISO 15148 (2003). Bij deze proef wordt de vochtopname van een materiaal, dat gedeeltelijk ondergedompeld wordt in water, gemeten in functie van de tijd. Uit de grafiek van Figuur 7 blijkt dat het vochtgehalte van het materiaal aanvankelijk lineair toeneemt door absorptie, totdat het capillair vochtgehalte wordt bereikt. Vanaf dit punt neemt de stijging af en verloopt de curve naar een bijna horizontale lijn. Het eindpunt van de curve markeert het verzadigd vochtgehalte, wat duidt op het maximale vochtgehalte dat het materiaal kan bevatten (Hens, 2013). Capillaire opzuiging kan omschreven worden door middel van formule 8. Uit deze formule en Figuur 7 kan geconcludeerd worden dat een porie trager water opzuigt naarmate de waterabsorptiecoëfficiënt A_w van een materiaal kleiner is. De waterabsorptiecoëfficiënten van een aantal biogebaseerde isolatiematerialen worden weergegeven in Tabel 4.



Figuur 7: Lineair verband waterabsorptiecoëfficiënt A_w (Hens, 2013)

$$A_w = \frac{m_w}{\sqrt{t}} \quad (8)$$

Met: m_w = opgezogen hoeveelheid water [kg/m^2]
 $\sqrt{t}$ = tijd [s]

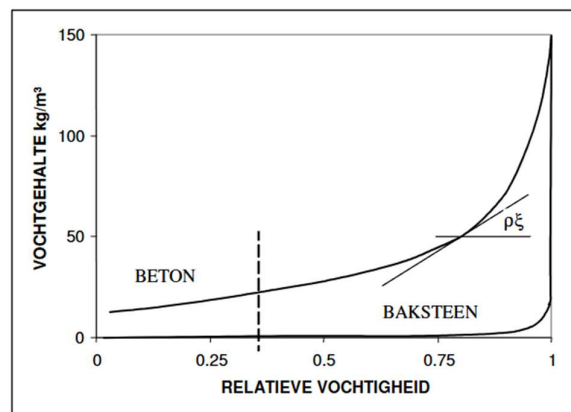
Tabel 4: Vergelijking waterabsorptiecoëfficiënten van isolatiematerialen uit de literatuur (Deweert & Wijnant, 2023)

Type isolatie	A_w [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0,5}$]
Katoen	0,0213
Hennep	0,0114
Houtvezel	0,0264

2.4.4 Vochttopslag

2.4.4.1 Vochtbuffering

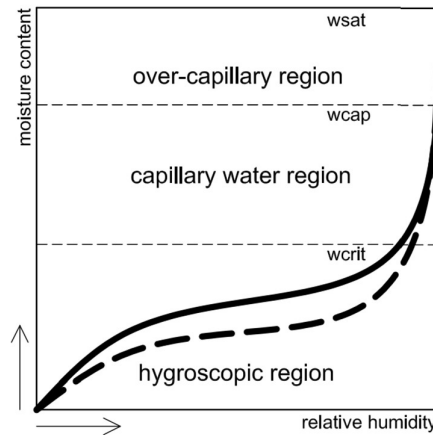
Zoals reeds aangehaald in deel 2.1.2, blijken natuurlijke materialen een gunstig vochtregulerend vermogen te hebben (Künzel, 2022). Dit houdt in dat ze in staat zijn een bepaalde hoeveelheid vocht op te slaan, zonder dat hun isolerende prestaties daaronder lijden (Eurabo, z.d.-c). De hoeveelheid vocht die een materiaal kan opnemen, hangt af van de relatieve vochtigheid en de poriëndiameter. Het verloop van een hygroscopische curve waaruit men het vochtgehalte u [kg/kg] kan vinden, wordt weergegeven in Figuur 8. Wanneer het materiaal een stabiele vochtbalans bereikt, spreekt men van statische vochttopslag (Janssens, 2022).



Hygroscopische curve

Figuur 8: Hygroscopische curve (Janssens, 2022)

Echter is er voor organische materialen een verschil te bemerken tussen de hoeveelheden vocht dat een materiaal opneemt en afgeeft, deze processen worden respectievelijk adsorptie en desorptie genoemd. Het vochtgehalte van poreuze materialen vertoont namelijk doorgaans een hogere waarde tijdens desorptie dan tijdens adsorptie. Dit verschijnsel, bekend als hysteresis, illustreert dat de sorptie-isothermen verkregen tijdens het bevochtigen van een aanvankelijk droog monster en het drogen van een volledig verzadigd monster van elkaar verschillen. In Figuur 9 zijn de belangrijkste isothermen voor adsorptie en desorptie van een poreus materiaal weergegeven. De waargenomen hysteresis kan volgens Steeman (2010) onder meer worden toegeschreven aan verschillen in de interactie tussen de vloeistof- en gasfasen tijdens adsorptie en desorptie, aan het zwellen en krimpen van de poriënwanden als gevolg van fysische en chemische processen, en aan het zogeheten inktfleuseffect. Dit laatste verwijst naar het fenomeen waarbij grotere poriën, gevuld met vloeistof, worden afgesloten door kleinere luchtgevulde poriën die in verbinding staan met het poriënnetwerk (Steeman, 2010).



Figuur 9: Verhouding tussen relatieve vochtigheid en vochtgehalte w in een poreus materiaal: adsorptie isotherm (---) en desorptie isotherm (—) (Steeman, 2010)

In het kader van dit onderzoek is het interessant om de hygroscopische eigenschappen van een isolatiemateriaal te kunnen begroten, zodoende een evaluatie kan worden gedaan van de vochtregulatie van gebouwen waar deze materialen worden gebruikt. De norm NBN EN ISO 12571 (2021) beschrijft de methoden waarmee de sorptie-eigenschappen van bouwmaterialen worden bepaald, waarbij de vochtopname en -afgifte bij verschillende relatieve vochtigheidsniveaus worden onderzocht.

2.4.4.2 Vochtbufferwaarde (MBV)

In tegenstelling tot de statische vochttopslag bij sorptie, geeft de moisture buffer value (MBV) het vermogen weer bij dynamische omstandigheden. De hoeveelheid vocht die een materiaal kan opnemen en afgeven bij variaties van relatieve vochtigheid tussen twee niveaus, noemt men dus de vochtbufferwaarde (Rode et al., 2005). Aan de hand van deze waarde kan dus voorspeld worden hoe het binnenklimaat zal reageren op schommelingen in luchtvochtigheid.

3 Probleemstelling

Thermische isolatie is cruciaal voor het reduceren van het energieverbruik in gebouwen, wat een essentiële bijdrage levert aan milieubescherming en duurzame ontwikkeling. Conventionele isolatiematerialen brengen echter aanzienlijke milieubelastingen met zich mee, zowel gedurende hun productieproces als na afloop van hun levensduur in de bouwsector. Dit onderstreept het belang van een circulaire benadering, waarbij de ontwikkeling van alternatieve isolatiematerialen steunt op het gebruik van hernieuwbare en recycleerbare grondstoffen (Zach et al., 2016).

In de context van isolatiematerialen op basis van hergebruik, zien we onder andere katoenisolatie terug. Het initiatief om textielafval te “upcyclen”, kan meehelpen met het controleren van een zeer actueel probleem. Hoewel gerecycleerde jeansbroeken al worden ingezet voor katoenisolatie, is het probleem van de grote afvalbergen hier nog lang niet mee opgelost. Binnen de textielsector is polyester het meest gebruikte vezeltype voor kledingproductie, met een aandeel van 55%, gevolgd door katoen met 30% (Blaazer, 2023). Het hergebruik van afgedankte kleding voor isolatietoepassingen vereist daarom dat dit proces niet beperkt blijft tot katoenen jeansbroeken, maar ook andere textielvezels omvat. Het beschikbare onderzoek op dit gebied is echter momenteel zeer beperkt, wat verdere studie en ontwikkeling noodzakelijk maakt.

Daarnaast wordt vastgesteld dat de bindmiddelen die momenteel het meest worden toegepast bij de productie van isolatiematerialen voornamelijk synthetisch van aard zijn, met polyester als de meest gebruikte bicomponent. Er bestaan echter ook biogebaseerde bicomponente vezels die biologisch afbreekbaar zijn, waar polylactide (PLA) het prominentste voorbeeld van is (W. De Muynck, persoonlijke communicatie, 10 januari 2025). Verder onderzoek is vereist om na te gaan in hoeverre deze toepasbaar zijn om circulaire bouwmaterialen ook effectief uitsluitend uit biogebaseerde en circulaire componenten te laten bestaan.

4 Doelstelling

Er is onderzoek nodig naar de verdere mogelijkheden van isolatiematerialen met een lage impact op het milieu. Er zal in deze master thesis dus specifiek gefocust worden op circulaire isolatiematerialen gemaakt uit hergebruikt textiel (post consumptie), in combinatie met PLA als biogebaseerd bindmiddel.

In dit proces dient eerst de productiemethode voor het gebruik van een PLA-bindmiddel te worden geëvalueerd. Vervolgens kunnen diverse isolatiestalen worden vervaardigd uit afgedankte kledingtypes. Zoals bleek uit onderzoek van Angelotti et al. (2024) is polyester de meest voorkomende vezel in kledij, daarom zal deze zeker meegenomen worden in het onderzoek. Daarnaast zullen ook andere synthetische en natuurlijke vezels getest worden om de mogelijkheden van textiel zo breed mogelijk te evalueren. Een blend van beide vezeltypes wordt eveneens onderzocht om na te gaan of deze de hygrothermische voordelen kan combineren.

Indien de voorgaande stappen resulteren in kwalitatieve isolatiematten, zullen deze worden onderworpen aan testen om te evalueren of hun hygrothermische eigenschappen vergelijkbaar zijn met die van bestaande isolatiematerialen. In dit kader is een relevante vergelijking die met Métisse, één van de meest bekende isolatiematerialen op basis van gerecycleerde textielvezels dat momenteel op de markt beschikbaar is.

4.1 Onderzoeksvragen

De hierboven beschreven doelstelling kan worden omgevormd tot één centrale onderzoeksvraag. Op basis hiervan kunnen vier deelvragen worden afgeleid die richtinggevend zijn voor dit onderzoek. Deze deelvragen vormen de structuur voor de verdere analyse en worden in de volgende hoofdstukken systematisch behandeld.

"Kan een productieproces gebaseerd op gerecycleerd textiel uit kledingafval en biogebaseerd PLA-bindmiddel resulteren in kwalitatieve, circulaire isolatiematten?"

- 1. Kan PLA gebruikt worden als bindmiddel voor een flexibele isolatiemat?*
- 2. Is het mogelijk om textielisolatie - op basis van alternatieve textielstromen naast jeanskatoen – te maken volgens een gestandaardiseerde productiemethode?*
- 3. In welke mate benaderen de zelf ontwikkelde isolatiematerialen de prestaties van Métisse?*
- 4. Kan deze circulaire isolatie op basis van alternatieve textielvezels beschouwd worden als een geschikte optie voor de toepassing als bouwisolatie?*

5 Ontwikkeling van een productieproces

5.1 Terugkoppeling naar onderzoeksvragen 1 en 2

1. *Kan PLA gebruikt worden als bindmiddel voor een flexibele isolatiemat?*
2. *Is het mogelijk om textielisolatie - op basis van alternatieve textielstromen naast jeanskatoen – te maken volgens een gestandaardiseerde productiemethode?*

In deze onderzoeksfase wordt onderzocht hoe een isolatiemateriaal kan worden geproduceerd op basis van gerecycleerde textielvezels en PLA als bindmiddel. Er wordt gewerkt met verschillende textielsoorten (katoen, polyester, katoen-polyester mix, wol en acryl) om na te gaan welke vezeltypes leiden tot een flexibele isolatiemat. Aangezien Métisse reeds aantoonde dat dergelijke toepassingen mogelijk zijn, zullen de materiaaleigenschappen ervan als referentie worden gebruikt. Hierbij wordt specifieke aandacht besteed aan parameters zoals de verhouding tussen grondstof en bindmiddel van 85%/15% en een massadichtheid van 20 kg/m³ (bijlage 12.5.1). Door deze aanpak kan de invloed van zowel het textieltype als het gebruik van PLA als bindmiddel systematisch worden geëvalueerd.

5.2 Methodologie

De productie van de isolatie verloopt volgens een thermisch bindingsproces. Hierbij dienen de textielvezels eerst vermengd te worden met bicomponentvezels. Zoals in het literatuuronderzoek vermeld, wordt hiervoor PLA/PLA gebruikt aangezien dit als biogebaseerd bindmiddel commercieel het meest voordelig is en de beste eigenschappen biedt (W. De Muynck, persoonlijke communicatie, 10 januari 2025). De PLA-vezels die in dit onderzoek gebruikt worden, worden geleverd door IFG en hebben een mantelsmelttemperatuur van 135°C (type DPL-3618-2, technische fiche wordt bijgevoegd in bijlage 12.5.4).

Het proces begint met een reeks preliminaire testen om de eigenschappen en mogelijkheden van de PLA-vezel te verkennen. Op basis van de bevindingen worden de relevante parameters verder verfijnd voor de productie. Ten slotte wordt een trial-and-error benadering toegepast om het uiteindelijke productieproces te optimaliseren en de efficiëntie te maximaliseren, waarbij continu wordt aangepast en geëvalueerd om het best mogelijke resultaat te bereiken.

5.2.1 Preliminaire testen

In een eerste fase van het onderzoek werd via preliminaire testen nagegaan of de gebruikte PLA-vezels effectief ingezet kunnen worden als bindmiddel binnen een thermisch bindingsproces, met het oog op de productie van flexibele isolatiematten op basis van textielvezels. Deze testen werden uitgevoerd met textielvezels die te fijn bleken om representatieve isolatieproducten te vervaardigen, waardoor de resultaten slechts in beperkte mate relevant zijn voor de centrale conclusies van deze masterproef. Desondanks leverde deze onderzoeksfase waardevolle inzichten op met betrekking tot de geschiktheid van PLA als bindmiddel en de algemene procesopbouw. Om die reden wordt dit onderdeel uitgebreider toegelicht in bijlage 12.1.1. Op basis van deze bevindingen kan worden geconcludeerd dat PLA een veelbelovend bindmiddel vormt voor de verwerking van flexibele textielisolatie.

5.2.2 Voorbereiding van het productieproces

5.2.2.1 Verzamelen van lange textielvezels

Om een homogene vermenging met PLA-vezels (met een lengte van 51 mm) te garanderen, is het gunstig dat de textielvezels een vergelijkbare lengte als die van de PLA-vezels hebben. Daarom wordt beroep gedaan op Purfi, een Belgisch bedrijf gespecialiseerd in mechanische vervezeling van textiel en dat in staat is om voldoende lange vezels te bekomen van 20-50 mm. Purfi hanteert namelijk een innovatieve techniek, ‘rejuvenating’, waarbij gebruikte kledij op een zachte manier wordt ontleed. Dit proces maakt het mogelijk om de originele vezellengte te benaderen, wat resulteert in hoogwaardige gerecycleerde vezels (K. De Ruycck, persoonlijke communicatie, 12 maart 2025). Er worden 5 verschillende soorten textielvezels geleverd door Purfi, afkomstig van kledij bestaande uit 100% polyester, 100% katoen (van T-shirts, Figuur 10), een blend van 33% katoen en 67% polyester, 100% wol (Figuur 11) en 100% acryl (Figuur 12).



Figuur 10: Katoen - stof en vezels



Figuur 11: Wol - stof en vezels



Figuur 12: Acryl - stof en vezels

5.2.2.2 Vermenging van de vezels

Om een efficiënte binding tussen de textielvezels en de PLA-vezels te garanderen, dient het mengsel zo homogeen mogelijk te zijn. Dit wordt in dit onderzoek gerealiseerd met behulp van borstels. Er worden verschillende borstels uitgetest om na te gaan welk type het snelste werkt en het beste resultaat oplevert. De drie onderzochte borstels verschillen in materiaal van de borstelharen: respectievelijk varkenshaar, kunststof en metaal (Figuur 13-a, van links naar rechts). Op basis van de observaties blijkt dat de borstel met metalen haren het meest doeltreffend is, zowel qua snelheid van het borstelen als qua kwaliteit van het verkregen mengsel. Dit is vermoedelijk te danken aan de kortere lengte en grotere stijfheid van de metalen haren, die zorgen voor een effectieve vermenging van de vezels.

Allereerst wordt voor het nodige aantal te produceren stalen een specifieke hoeveelheid textiel- en PLA-vezels afgewogen, overeenkomstig de beoogde vezel-bindmiddelverhouding. Per borstelbeurt wordt dan een hoeveelheid textielvezels aangebracht, met daarbovenop een kleinere hoeveelheid PLA-vezels, resulterend in de gewenste verhouding vezel/bindmiddel (Figuur 13-b). Hoewel kleine afwijkingen per beurt mogelijk zijn, blijft de globale verhouding behouden. Na het borstelen wordt het mengsel van tussen de borstelharen gehaald, geheroriënteerd en opnieuw aangebracht. Dit proces wordt herhaald tot visueel geen afzonderlijke PLA-vezels meer zichtbaar zijn. PLA is wit, dus bij contrasterende kleuren, zoals acryl (bruin) en wol (roze), is dit eenvoudig waarneembaar. Bij witte textielvezels (katoen, polyester, katoen/polyester) wordt dit proces vaker herhaald ter garantie van een homogene vermenging.



Figuur 13: Borstels: (a) verschillende types; (b) borstelen van vezels

5.2.2.3 Procesparameters

Tijdens de preliminaire testen werd een oventemperatuur van 165°C toegepast, gebaseerd op het onderzoek van Islam et al. (2024). Deze temperatuur blijkt echter te hoog te zijn, aangezien de smelttemperatuur van de PLA-kern reeds 160°C bedraagt (W. De Muynck, persoonlijke communicatie, 10 januari 2025). Om thermische degradatie van de kern en het daarmee gepaard gaande verlies van structurele integriteit te voorkomen, wordt geopteerd voor een oventemperatuur van 135°C, zoals voorgesteld door Aguilar Del Bosque et al. (2024).

Naast temperatuur, wordt in het onderzoek van Aguilar Del Bosque et al. (2024) ook ingegaan op andere procesparameters voor de productie van isolatiemateriaal met PLA als bindmiddel. Zo stellen zij een textielvezel/bindmiddel-ratio voor van 80%/20%. Deze verhouding wordt bevestigd door W. De Muynck van IFG (persoonlijke communicatie, 10 januari 2025), die aangeeft dat meerdere bedrijven eveneens de voorkeur geven aan deze ratio. Het is echter zo dat PLA een relatief kostbare vezel is, in vergelijking met het conventionele polyester bindmiddel is het 6 keer duurder. Dit prijsverschil maakt het gebruik van PLA economisch minder aantrekkelijk, vooral bij toepassingen op grotere schaal. Daarom zal in dit onderzoek worden geprobeerd om het aandeel bindmiddel zo laag mogelijk te houden, zonder in te boeten op de kwaliteit van de mat. Zo blijft het eindproduct technisch betrouwbaar en kostenefficiënt.

5.2.3 Optimalisatie van het productieproces

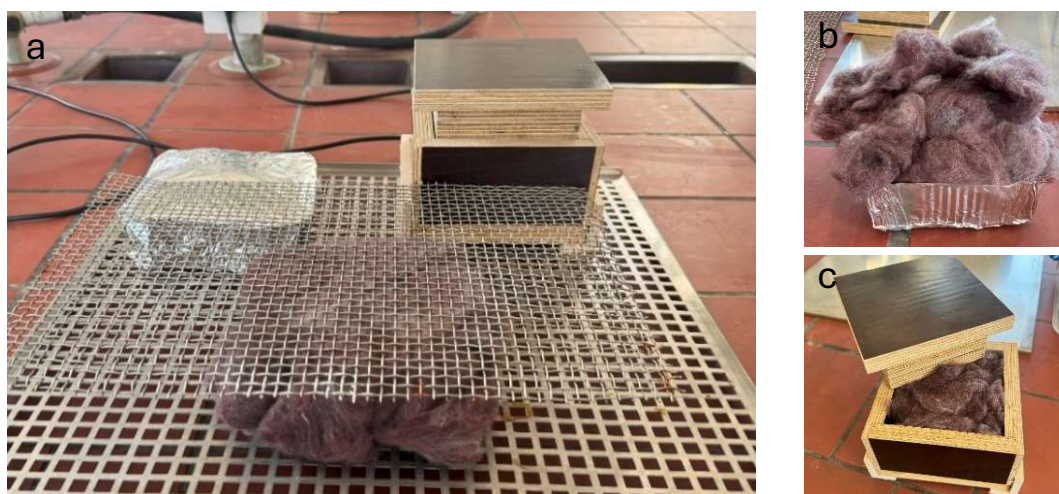
Bij de ontwikkeling van een productieproces ligt de focus op het realiseren van twee kernkarakteristieken van Métisse-isolatiematten: een massadichtheid van circa 20 kg/m^3 en een vezel-bindmiddelverhouding van 85% textielvezels ten opzichte van 15% bindmiddel. Door geleidelijk aan deze parameters te benaderen, wordt gestreefd naar een reproduceerbaar, technisch haalbaar en commercieel een zo voordelig mogelijk alternatief met vergelijkbare fysische eigenschappen.

In eerste instantie wordt er gebruikgemaakt van een houten mal met afmetingen van $30 \times 30 \text{ cm}$ als standaard testopstelling. Dit vormt het uitgangspunt voor een systematische werkwijze waarbij getracht wordt de materiaalparameters van het referentieproduct Métisse zo nauwkeurig mogelijk te benaderen. Dit gebeurt aan de hand van een trial-and-error-methode in combinatie met een One Factor At a Time (OFAT)-aanpak, waarbij telkens één parameter wordt aangepast om het effect op het eindresultaat te observeren. Het onderzoek naar de toepasbaarheid van de houten mal van $30 \times 30 \text{ cm}$ leverde echter geen gunstige resultaten op, waardoor deze piste niet werd verdergezet. Om die reden werd dit onderdeel niet opgenomen in de hoofdtypekst, maar de volledige uitwerking is terug te vinden in bijlage 12.1.2. Ondanks de beperkte bruikbaarheid van deze methode, bood dit onderzoek wel waardevolle inzichten die bijdroegen aan de verdere ontwikkeling van het productieproces.

5.2.3.1 Productie met verschillende 10 × 10 cm mallen

Voor deze testen wordt consequent gebruikgemaakt van acryl als textielvezel, aangezien hierbij duidelijk te observeren is dat vermenging met de witte PLA-vezels homogeen en efficiënt heeft plaatsgevonden. Op die manier kan een eventueel falen niet toegeschreven worden aan een onvoldoende homogene blend.

Uit de testen met de 30 × 30 cm houten mal (en een massadichtheid van 30 kg/m³) blijkt dat de PLA-vezels niet volledig zijn gesmolten. Dit geeft een indicatie dat de hete lucht in de grote houten mal de PLA-vezels niet (voldoende) bereikt, waardoor het smeltproces niet ten volle kan plaatsvinden. De mal wordt daarom aangepast: 10 cm × 10 cm × 4 cm als afmetingen, met 3 verschillende mogelijke materialen (Figuur 14-a): aluminium bakje (Figuur 14-b), houten mal (Figuur 14-c) en een opstelling waarbij losse vezels worden aangedrukt met een rooster.



Figuur 14: Verschillende mallen 10×10 cm: (a) klaargemaakte mallen voor verhittingsproces; (b) vezels in aluminium bakje; (c) vezels in houten mal

Om te garanderen dat de hete lucht van de oven alle PLA-vezels in de drie proefstukken goed bereikt, worden de stalen deze keer verhit gedurende 20 minuten aan een hogere temperatuur van 145°C. Daarnaast wordt de massadichtheid verhoogd tot 40 kg/m³, in de veronderstelling dat een sterkere compressie van de vezels kan bijdragen aan een betere onderlinge binding en een steviger eindresultaat.

De testresultaten verklaren het uitblijven van succes bij eerdere proeven met de houten mal: de verschillende opstellingen tonen een duidelijk verschil in vormvastheid. Het staal uit de houten mal (Figuur 15, rechts boven) valt op doordat ze, hoewel ze er op het eerste zicht stevig uitziet, opnieuw uit elkaar valt zodra ze wordt opgetild. In tegenstelling tot deze, behouden de andere twee stalen uit het aluminium bakje (Figuur 15, links boven) en de los verwerkte vezels

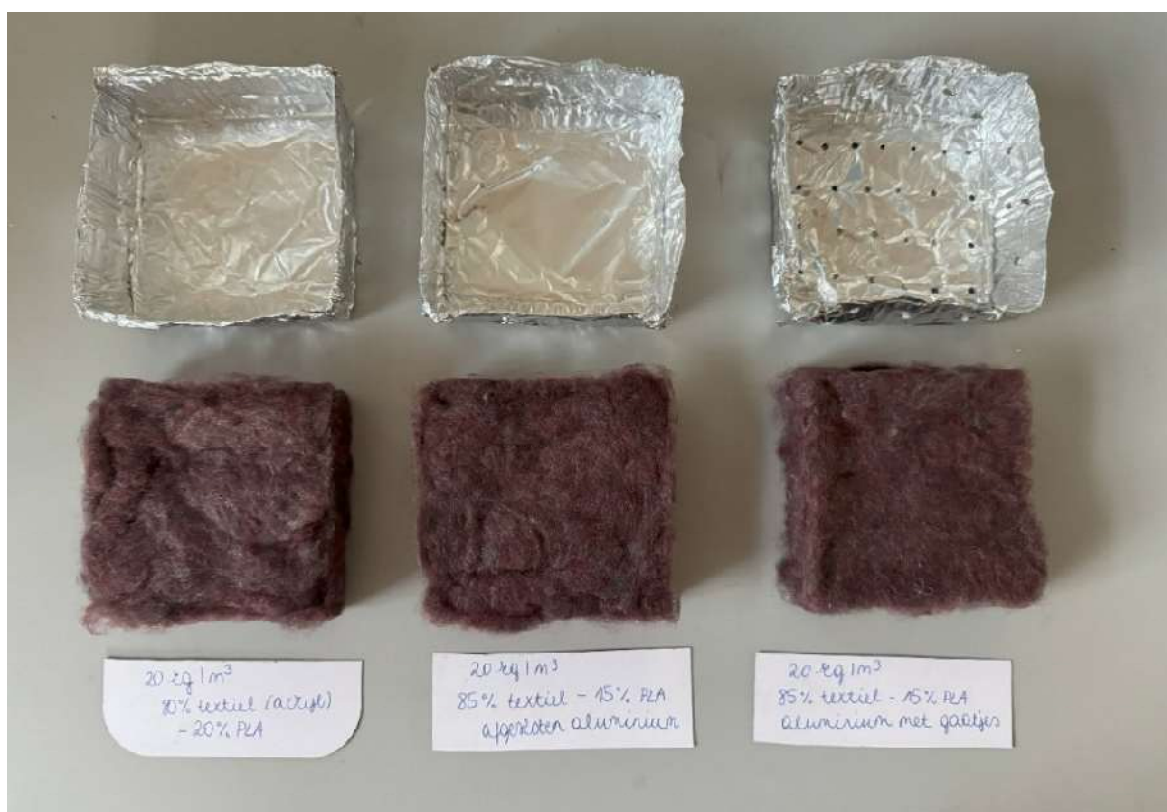
aangedrukt met een rooster (Figuur 15, midden onder) wel hun vorm. Het verschil is vermoedelijk te verklaren door het materiaal van de mal. De dikke houten wanden isoleren warmte, waardoor de PLA-vezels onvoldoende smelten en de vezelbinding beperkt blijft. Tussen de aluminium mal en de losse vezels is ook een klein verschil zichtbaar: de structuur uit het aluminium bakje is een beetje vormvaster, vermoedelijk omdat de vezels tijdens het verwarmen beter op hun plaats bleven en minder konden uitwijken.



Figuur 15: Resultaat 40 kg/m³ - variatie in mal

Binnen dit kader wordt vervolgens onderzocht in hoeverre een verlaging van de massadichtheid tot 20 kg/m^3 nog steeds kan leiden tot een voldoende samenhangend en vormvast eindproduct (Figuur 17, links). Daarnaast wordt ook de vezel/bindmiddelverhouding aangepast van 80%/20% naar 85%/15%, overeenkomstig met de samenstelling van Métisse, om zo een grotere gelijkenis met het referentieproduct te realiseren. In deze fase wordt bovendien nagegaan of rechtstreeks contact tussen de hete lucht en de vezelmassa een invloed heeft op het resultaat. Daartoe worden twee identieke stalen met elkaar vergeleken: één waarbij het aluminium bakje volledig gesloten is (Figuur 17, midden) en één waar kleine gaatjes in zijn gemaakt om luchtcirculatie mogelijk te maken (Figuur 17, rechts). Uit de resultaten blijkt echter dat deze variatie in luchttoevoer geen merkbaar effect heeft op de structurele eigenschappen of de vormvastheid van het eindproduct.

Dit wijst erop dat het gebruikte productieproces voldoende toepasbaar is om, met PLA als biogebaseerd bindmiddel, materiaaleigenschappen na te streven die vergelijkbaar zijn met die van Métisse. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid om dit proces ook toe te passen op andere textielvezels voor de ontwikkeling van circulaire isolatiematerialen.



Figuur 17: Resultaat 20 kg/m^3 - variatie in verhouding en contact met hete lucht

5.2.4 Standaardisatie van het productieproces

Nu een flexibel isolatiemateriaal met gunstige eigenschappen werd bekomen op basis van acryl, kan worden onderzocht in welke mate de gehanteerde productiemethode ook geschikt is als gestandaardiseerde werkwijze voor de verwerking van andere types textielvezels tot isolatiemateriaal. De gehanteerde productieparameters worden weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Productieparameters

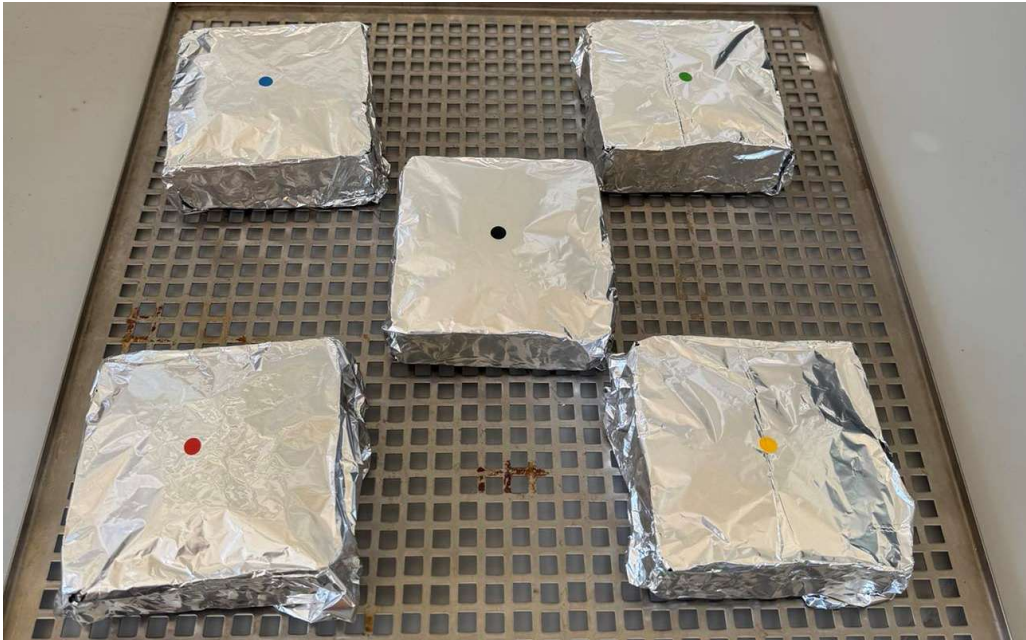
Vezel/bindmiddel verhouding	85%/15%
Massadichtheid	20 kg/m ³
Mal	Aluminium bakje
Vermenging vezels	Borstels met korte metalen haren
Duur van thermisch verhittingsproces	20 minuten
Oventemperatuur	145°C

Aangezien de katoen-, polyester- en katoen/polyestervezels alle drie een witte kleur hebben en visueel moeilijk van elkaar te onderscheiden zijn, wordt er gewerkt met een kleuraanduiding per vezeltype. Daarnaast krijgt elk staal een unieke code, bestaande uit een afkorting van het textieltype in combinatie met een nummer (hier afgebeeld met 'X'), zodat resultaten van de metingen in het vervolgtraject op een correcte en eenduidige manier aan de juiste stalen kunnen worden gekoppeld. In de grafische weergave van de resultaten worden verschillende symbolen gebruikt om elk vezeltype te onderscheiden, waardoor een duidelijke visuele differentiatie mogelijk is tussen natuurlijke vezels (cirkel), synthetische vezels (driehoek) en een blend van beide (vierkant) (Tabel 6). Omdat er ook hygrothermische testen zullen worden uitgevoerd op Métisse om de prestaties van de zelfgeproduceerde isolatie mee te vergelijken, wordt deze isolatie ook opgenomen in de codering.

Tabel 6: Codering stalen

Wol	• WOL-X
Katoen	• KAT-X
Katoen/polyester blend	■ KP-X
Polyester	▲ POL-X
Acryl	▲ ACR-X
Métisse	• MET-X

Per textielsoort worden 8 stalen (10 × 10 × 4 cm) gemaakt voor de waterabsorptie- (5) en sorptieproeven (3) (Figuur 19). Daarnaast worden 3 stalen van 15 × 15 cm geproduceerd voor thermische geleidbaarheidstesten met de Heat Flow Meter.



Figuur 18: Stalen in aluminium bakjes voor thermische binding



Figuur 19: Geproduceerde stalen (10x10x4 cm)

Na de productie worden de stalen gedurende 24 uur gedroogd in een oven bij een constante temperatuur van 60°C (Figuur 20). Op deze manier kan de droge massa (massa bij een relatieve luchtvochtigheid van 0%) van de stalen nauwkeurig worden bepaald, wat essentieel is voor een correcte interpretatie van de vochtgerelateerde testresultaten.



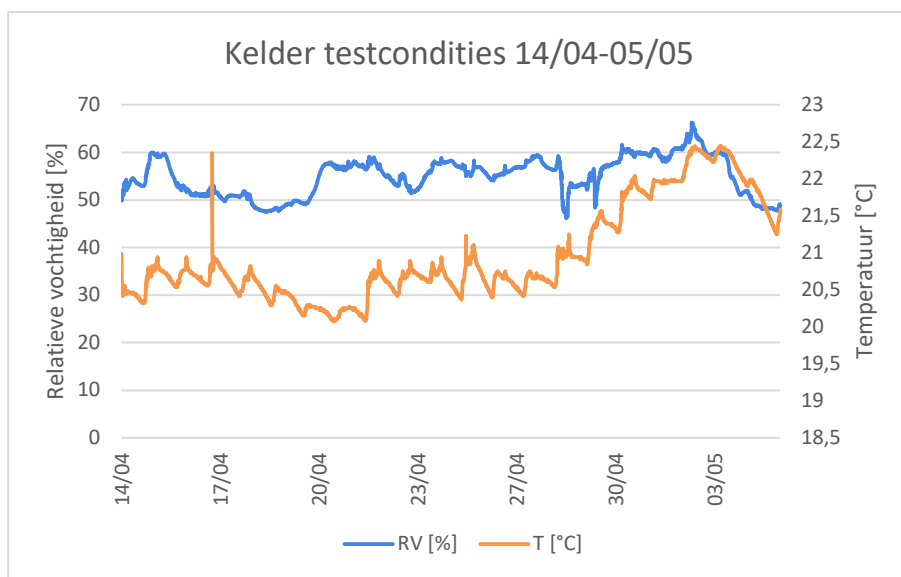
Figuur 20: Stalen in de droogoven

5.3 Resultaten

5.3.1 Massadichtheid

Voor de bepaling van de massadichtheid de geproduceerde materialen worden stalen met afmetingen van 15 × 15 cm gebruikt. De metingen worden uitgevoerd conform de procedure beschreven in de norm NBN EN 1602 (2013), die richtlijnen biedt voor het bepalen van de schijnbare dichtheid van isolatiematerialen.

Volgens de norm dienen de stalen voorafgaand aan de meting te worden geconditioneerd bij een temperatuur van $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ en een relatieve vochtigheid van $(50 \pm 5) \%$. In dit onderzoek werden de stalen gedurende drie weken geconditioneerd in een kelderruimte. De klimaatomstandigheden in deze ruimte werden continu gemonitord met een Hobo-datalogger van het type Hobo UX100-011A, waarvan de productfiche is opgenomen in bijlage 12.5.5. Tijdens deze conditioneringsperiode werd een gemiddelde temperatuur van $20,68 ^\circ\text{C}$ en een gemiddelde relatieve vochtigheid van 54,48% gemeten (Figuur 21). Hoewel de gemeten relatieve vochtigheid binnen de voorgeschreven toleranties valt, ligt de gemiddelde temperatuur lichtjes onder de ondergrens van het opgelegde bereik. Aangezien de afwijking hierbij beperkt is tot minder dan $2 ^\circ\text{C}$, worden de omgevingscondities desalniettemin als nagenoeg conform de normvereisten beschouwd.



Figuur 21: Condities tijdens conditionering stalen voor bepaling massadichtheid

Na conditionering worden de afmetingen van de stalen gemeten met behulp van een schuifmaat (type Beta 1651 DGT) met een bereik van 0,01 mm, de massa wordt bepaald met een weegschaal met een nauwkeurigheid van 0,001 g. Deze meetnauwkeurigheden voldoen aan de vereisten van de norm, waarin een maximale meetfout van 0,5% wordt voorgeschreven voor zowel afmetingen als massa. Voor de hoogte van de stalen wordt een uniforme dikte van 40 mm (60 mm voor Métisse) aangehouden, aangezien de bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt eveneens bij deze dikte zal worden uitgevoerd (zie deel 6.2). Aan de hand van de metingen kan de schijnbare dichtheid [kg/m^3] van elk staal berekend worden met formule 9.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

Met: m = massa van het staal [g]

V = volume van het staal [m^3]: lengte x breedte x hoogte

Tabel 7: Effectieve massadichtheden van de isolatiestalen

	l [mm]	b [mm]	h [mm]	m [g]	ρ [kg/m^3]
WOL-9	150,61	150,68	40,00	18,521	20,40
WOL-10	151,94	154,24	40,00	18,469	19,70
WOL-11	152,19	152,27	40,00	18,219	19,65
KAT-9	150,84	152,54	40,00	17,912	19,46
KAT-10	150,69	153,19	40,00	18,051	19,55
KAT-11	152,34	153,46	40,00	18,046	19,30
KP-9	150,85	150,94	40,00	18,062	19,83
KP-10	148,72	151,34	40,00	17,970	19,96
KP-11	151,55	152,62	40,00	18,000	19,46
POL-9	146,39	149,16	40,00	17,988	20,59
POL-10	150,86	152,68	40,00	17,178	18,64
POL-11	149,30	152,99	40,00	17,989	19,69
ACR-9	150,15	151,12	40,00	17,764	19,57
ACR-10	150,40	151,98	40,00	17,895	19,57
ACR-11	148,54	151,35	40,00	17,934	19,94
MET-9	149,28	150,94	60,00	34,668	25,64
MET-10	143,34	152,55	60,00	33,172	25,28
MET-11	146,55	149,89	60,00	32,904	24,97

Uit de metingen blijkt dat de zelfgeproduceerde isolatiestalen een massadichtheid vertonen van ongeveer 20 kg/m^3 . Hoewel volgens de productfiche ook het commerciële materiaal Métisse een dichtheid van 20 kg/m^3 zou hebben, werd een gemiddelde massadichtheid van circa 25 kg/m^3 vastgesteld. Dit verschil in dichtheid tussen de zelfgeproduceerde materialen en Métisse zal in rekening worden genomen bij de interpretatie van de resultaten die in de volgende fases van dit onderzoek aan bod komen.

5.3.2 Droge massa

Een massadichtheid van $\pm 20 \text{ kg/m}^3$ voor een staalvolume van $10 \times 10 \times 4 \text{ cm}$ resulteert in een totaalgewicht van $\pm 8 \text{ gram}$, bestaande uit respectievelijk 6,8 gram textielvezels en 1,2 gram PLA-vezels. Uit de droge massa's kan afgeleid worden hoeveel vocht elk staal verliest tijdens het droogproces. De uitkomsten van deze metingen zijn opgenomen in Tabel 8. Er zijn duidelijke verschillen tussen de verschillende stalen: bij de natuurlijke materialen verdampt het meeste vocht tijdens het droogproces, terwijl bij de synthetische materialen vochtverlies eerder minimaal is. Dit kan verklaard worden door het hygroscopisch gedrag van natuurlijke vezels, terwijl synthetische vezels eerder hydrofoob van aard zijn. Hierna kan onderzocht worden of deze interne materiaaleigenschappen in verband staan met visuele en fysieke waarnemingen van de stalen.

Tabel 8: Droge massa's m_0 [g] van de 10x10 cm stalen

	WOL	KAT	KP	POL	ACR
1	7,454	7,683	7,841	7,945	7,862
2	7,587	7,715	7,815	7,927	7,891
3	7,558	7,758	7,847	7,912	7,835
4	7,572	7,691	7,852	7,894	7,891
5	7,560	7,704	7,824	7,781	7,889
6	7,486	7,707	7,840	7,920	7,882
7	7,592	7,744	7,834	7,934	7,890
8	7,592	7,729	7,827	7,919	7,889
Massaverlies [%]	5,62	3,55	2,06	1,20	1,52

5.3.3 Stijfheid

Het beoordelen van de stijfheid en uiterlijke kenmerken van isolatiematerialen is niet eenvoudig omdat dit subjectief is, zoals hoe het materiaal aanvoelt, eruitziet en reageert op beweging. Daarom wordt een eigen schaal ontwikkeld van 0 tot 10. Daarbij staat 0 voor een materiaal dat uit elkaar valt als het wordt opgenomen en 10 voor een zeer stijve vorm. Een visuele voorstelling van deze schaal is weergegeven in Tabel 9.

Tabel 9: Schaal van stijfheid (0-10)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
										
Cellulose vlokken						Métisse mat				
										
										PIR plaat

Figuur 22: Isolatiematerialen gerangschikt volgens stijfheid, van links naar rechts: cellulose (iCell, z.d.); glaswol (Diethelm, 2022), Métisse (Isolatiendoord, n.d.-b), PIR (Isolatiendoord, z.d.-a)

De evaluatie gebeurt met de 15x15 cm stalen, omdat beweging en vervorming hierbij beter zichtbaar zijn. Elk staal wordt aan één zijde opgetild, waarbij het met één hand langs de rand wordt vastgenomen. Vervolgens wordt het materiaal herhaaldelijk bewogen met korte, snelle op- en neergaande bewegingen. Deze handeling laat toe om de doorbuiging en vormvastheid van het materiaal te evalueren.

De scorebepaling per textielsoort wordt weergegeven in Tabel 10. Hierbij is er opnieuw een duidelijk onderscheid waarneembaar tussen natuurlijke en synthetische materialen. Natuurlijke vezels vertonen een grotere stijfheid, terwijl synthetische materialen meer doorbuigen bij beweging. Deze bevinding stemt overeen met de analyse van de vezelstructuur, afgeleid uit de metingen van de droge massa's en het vochtverlies. Natuurlijke materialen verliezen procentueel meer vocht, wat wijst op een meer open en poreuze vezelstructuur. Deze porositeit verklaart niet alleen het hogere vochtverlies, maar draagt vermoedelijk ook bij aan de grotere stijfheid door een betere vezelverankering binnen het materiaal.

Tabel 10: Score stijfheid van de isolatiestalen op basis van waarnemingen

Textieltype	Beschrijving van de waarneming	Score
Wol  <i>Figuur 23: Wol staal</i>	Het staal op basis van wol blijft grotendeels vormvast tijdens hantering en vertoont enkel minimale vervorming bij beweging. Dit geeft aan dat het materiaal over een relatief hoge mate van stijfheid beschikt.	7
Katoen  <i>Figuur 24: Katoen staal</i>	De isolatiemat op basis van katoenvezels behoudt zijn vorm en toont slechts een lichte mate van buiging bij op en neer schudden. Deze eigenschap wijst eveneens op een hoge structurele integriteit en plaatst het monster in het bovenste segment van de stijfheidsschaal.	7
Katoen/Polyester  <i>Figuur 25: Kat/Pol staal</i>	Dit isolatiemonster vertoont een goede mate van vormvastheid. Het blijft grotendeels in vorm wanneer het wordt opgetild, maar vertoont wel een iets grotere doorbuiging tijdens schudden dan de katoensample. Deze combinatie van flexibiliteit en stevigheid wijst op een evenwichtige materiaalstructuur.	6
Polyester  <i>Figuur 26: Acryl staal</i>	Het acrylstaal buigt een beetje door wanneer het wordt opgepakt en bewogen. Hoewel het minder weerstand biedt tegen vervorming, behoudt het nog voldoende samenhang om gecontroleerd te kunnen hanteren. De stijfheid is eerder beperkt, maar het materiaal blijft stabiel genoeg voor toepassingen waar enige flexibiliteit toelaatbaar is.	5
Polyester  <i>Figuur 27: Polyester staal</i>	Het staal vervaardigd met polyestervezels buigt door onder zijn eigen gewicht wanneer het wordt opgepakt. Deze mate van vervorming wijst op een beperktere stijfheid, die zich op de lagere middenpositie van de beoordelingsschaal bevindt.	4

5.4 Conclusie ontwikkeling van een productieproces

5.4.1 Conclusie onderzoeksvraag 1

Kan PLA gebruikt worden als bindmiddel voor een flexibele isolatiemat?

De experimenten bevestigen dat het gebruik van PLA in het thermisch bindingsproces haalbaar is, mits aan twee cruciale voorwaarden wordt voldaan. Ten eerste dient de vermenging van PLA-vezels en textielvezels volledig homogeen te zijn, zodat overal in de mat voldoende bindmiddel aanwezig is. Ten tweede is het essentieel dat de toegepaste warmte effectief de PLA-vezels bereikt en deze tot boven hun mantelsmelpunt (135 °C) verhit om een betrouwbare binding tussen de vezels te realiseren. Om te waarborgen dat aan deze temperatuurconditie werd voldaan, is bij de proeven gebruikgemaakt van aluminium mallen (Figuur 28). Aluminium garandeert de warmtegeleiding en zorgt er zo voor dat de PLA-vezels in de gehele sample uniforme verhitting ondergaan. Dankzij deze aanpak ontstonden dichte, vormvaste isolatiematten met een gelijkmatige vezelbinding zonder ongebonden zones of ongelijkmatige dichtheden.

Op basis van de verkregen resultaten kan geconcludeerd worden dat PLA een veelbelovende, duurzame bindoptie vormt voor textielgebaseerde isolatiematten.



Figuur 28: Gebruikte aluminium mallen - 10x10 cm (links) en 15x15 cm (rechts)

5.4.2 Conclusie onderzoeksvraag 2

Is het mogelijk om textielisolatie - op basis van alternatieve textielstromen naast jeanskatoen – te maken volgens een gestandaardiseerde productiemethode?

Uit dit onderzoek blijkt dat het mogelijk is om textielisolatie te vervaardigen uit alternatieve textielstromen met behulp van de ontwikkelde productiemethode. De toegepaste methode resulteert in stabiele en reproduceerbare producten en kan daarom als geschikt worden beschouwd voor de verwerking van verschillende soorten textielvezels.

Wel tonen de resultaten aan dat de uiteindelijke materiaaleigenschappen, in het bijzonder de stijfheid, sterk beïnvloed worden door de aard van de gebruikte vezels. De geproduceerde stalen worden in Figuur 29 gepresenteerd, gerangschikt volgens oplopende vormvastheid. Daarbij suggereren de bevindingen dat er een verband bestaat tussen het vochtverlies tijdens het droogproces en de vormvastheid van het eindproduct. De stijfheid van natuurlijke materialen lijkt verband te houden met hun poreuze vezelstructuur, die leidt tot een verhoogd vochtverlies tijdens het drogen. Deze porositeit bevordert vermoedelijk de verankering van de vezels binnen de matrix, wat resulteert in een toename van de mechanische stijfheid.



Figuur 29: Isolatiestalen - gerangschikt volgens vormvastheid (oplopend van links naar rechts: polyester – acryl – katoen/polyester – katoen – wol)

6 Bouwfysische prestaties

6.1 Terugkoppeling naar onderzoeksvragen 3 en 4

3. *In welke mate benaderen de zelf ontwikkelde isolatiesamples de prestaties van Métisse?*
4. *Kan deze circulaire isolatie op basis van alternatieve textielvezels beschouwd worden als een geschikte optie voor de toepassing als bouwisolatie?*

Het tweede deel van dit onderzoek focust op de evaluatie van de hygrothermische prestaties van de ontwikkelde isolatiestalen aan de hand van experimentele testen. Hierbij wordt zo veel mogelijk gewerkt volgens de geldende NBN-normen. Omdat het echter gaat om nieuw ontwikkelde en zelfgeproduceerde isolatiematerialen, is het niet altijd mogelijk deze normen volledig te volgen. Waar van de standaardprocedures wordt afgeweken, wordt dit duidelijk aangegeven.

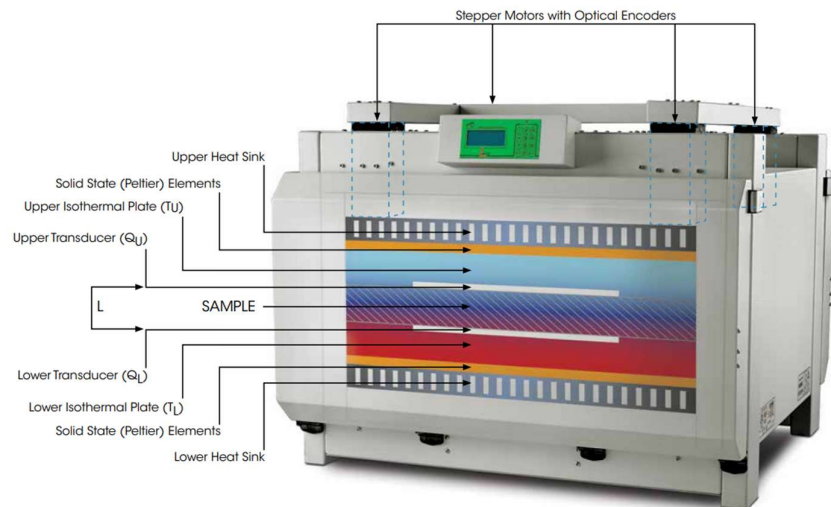
Aangezien het referentiemateriaal Métisse een belangrijke rol speelde tijdens het productieproces, wordt ook dit materiaal aan dezelfde testen onderworpen. Op die manier kan worden onderzocht of gelijkaardige materiaalparameters ook resulteren in vergelijkbare prestaties binnen het domein van textielisolatie. De verkregen resultaten worden met elkaar vergeleken, wat toelaat om vervolgens te beoordelen of de nieuw ontwikkelde isolatiematerialen in aanmerking komen voor gebruik als bouw materiaal.

6.2 Warmtegeleiding

6.2.1 Methodologie

6.2.1.1 Testprocedure

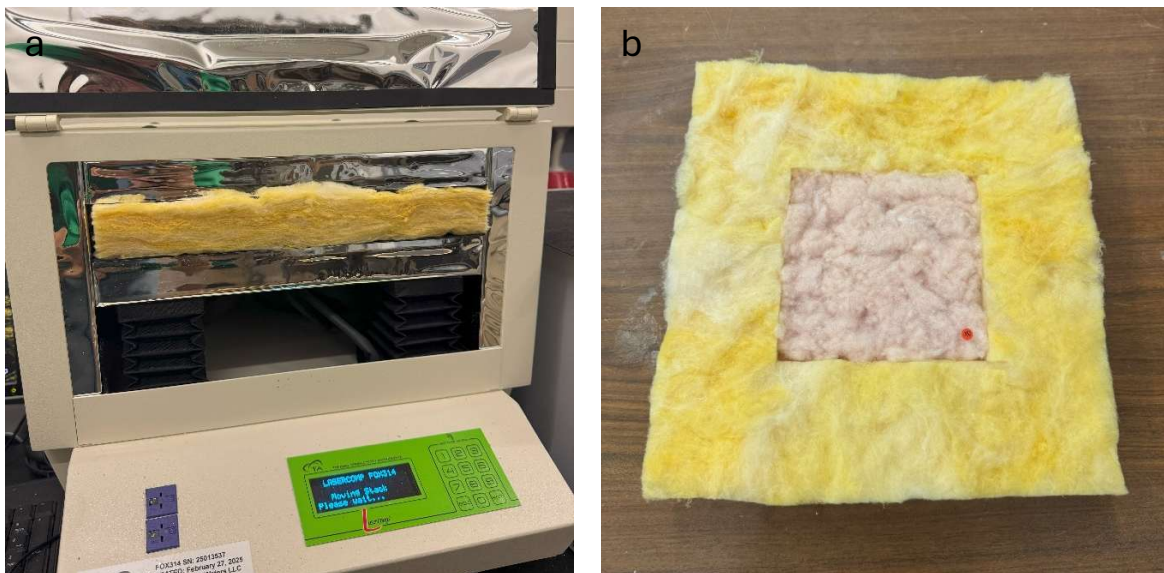
De isolatiewaarde van een materiaal wordt uitgedrukt aan de hand van de warmtegeleidingscoëfficiënt λ [W/mK]. In dit onderzoek wordt deze parameter bepaald met behulp van een Heat Flow Meter (toestel FOX 314, Figuur 30), waarvan de technische specificaties zijn opgenomen in bijlage 12.5.6. Aan de hand van warmtestroommeters aan de onder- en bovenzijde van het toestel wordt de warmtestroom gemeten doorheen het proefmonster op basis van een temperatuurverschil (ΔT) van 20°C (0°C als ondergrens – 20°C als bovengrens), waarbij de gemiddelde temperatuur over het proefmonster 10°C ($\frac{20+0}{2}$) bedraagt. Nadat er door het toestel een evenwicht in de metingen gevonden wordt, worden vervolgens 5 afsluitende meetblokken uitgevoerd om een betrouwbare λ -waarde te berekenen. De bekomen waarde is dan het gemiddelde van de metingen aan beide platen over die 5 meetblokken. Met een opgegeven meetnauwkeurigheid van $\pm 1\%$ levert het FOX 314 toestel warmtestroomgegevens die geschikt zijn voor de berekening van de warmtegeleidingscoëfficiënt van de onderzochte materialen. De meetprocedure wordt uitgevoerd conform de norm NBN EN 12667 (2001).



Figuur 30: Schematische weergave HFM-toestel (technische fiche, bijlage 12.5.6)

De dikte (L) van de isolatiestalen wordt telkens ingesteld op 40 mm om te garanderen dat de λ -waarde bij een massadichtheid van 20 kg/m^3 wordt gemeten (Figuur 31-a). De Métisse stalen die als referentie worden gebruikt, hebben een dikte van 60 mm.

Volgens de standaardvereisten dienen de testmonsters dezelfde afmetingen te hebben als de meetplaat van het toestel, met name $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$. Dit blijkt echter niet strikt noodzakelijk te zijn, de actieve meetzone van het toestel bevindt zich namelijk in het centrale gebied van $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, waardoor ook kleinere stalen betrouwbare meetresultaten kunnen opleveren. In dit onderzoek wordt daarom geadviseerd voor monsters met een afmeting van $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ (wat eveneens de minimumafmeting is conform de handleiding van het toestel), zodat er wel een veiligheidsmarge buiten de meetzone behouden blijft. Om te vermijden dat de kleinere afmetingen van de testmonsters een invloed zouden uitoefenen op de metingen, wordt de resterende ruimte in het toestel opgevuld met glaswol ($\lambda = 0,03357 \text{ W/mK}$, zie meetdata van HFM in bijlage 12.2.2). De zelfgeproduceerde stalen worden geacht beter te geleiden, waardoor de warmtestroom voornamelijk door de stalen zal gaan en niet buitenmatig verstoord wordt door de randisolatie. Hiervoor wordt in een flexibele glaswollen mat een uitsparing van $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ voorzien, waarin de zelfgeproduceerde textielstalen geplaatst worden (Figuur 31-b). Per isolatiesoort worden drie stalen getest om toevallige afwijkingen in individuele monsters op te vangen en een representatieve λ -waarde te verkrijgen.



Figuur 31: Opstelling HFM: (a) instelling 40 mm; (b) glaswol met uitsparing

6.2.1.2 Berekening van de λ -waarde [W/mK]

Voor elke uitgevoerde meting met de heat flow meter wordt een gedetailleerde dataset gegenereerd, waarin alle relevante parameters van het betreffende isolatiestaal worden geregistreerd. Als voorbeeld wordt in onderstaande Figuur 32 het meetresultaat van staal POL-9 weergegeven, de resultaten van alle geteste stalen zijn opgenomen in bijlage 12.2.

De λ -waarde van elk isolatiestaal wordt berekend op basis van de gemeten warmtestroom en temperatuurgradiënt over het staal. Hiervoor worden de temperaturen aan de boven- en onderzijde van het monster (respectievelijk T_{upper} en T_{lower}) en de overeenkomstige warmtestromen (Q_{upper} en Q_{lower}) continu geregistreerd door het meettoestel. Op basis van de warmtestroom per oppervlakte-eenheid, $q = \frac{Q}{A}$ [W/m²] en de gekende dikte van het monster (L), wordt de warmtegeleidingscoëfficiënt vervolgens berekend volgens formule 10, waarbij $\Delta T = T_{upper} - T_{lower}$ de temperatuurgradiënt over het staal voorstelt. Deze berekening wordt herhaald gedurende het volledige meetproces, totdat er een evenwicht bereikt is. Dit levert een reeks opeenvolgende λ -waarden op die de evolutie tijdens de test weergeven. Bij het beëindigen van de meting rapporteert het toestel drie representatieve waarden: 'upper', 'lower' en 'average condition'. Voor de verdere analyse en vergelijking van de isolatiestalen wordt de 'average condition' als representatieve λ -waarde gebruikt.

$$\lambda = \frac{Q}{A} * \frac{L}{\Delta T} \quad (10)$$

POL-9									
Block Averages for setpoint 1 in SI units									
	Tupper	Tlower	Qupper	Qlower	Lambda	Setpoint No.	1		
	[°C]	[°C]	[μV]	[μV]	[W/mK]	Setpoint Upper:	0.00	°C	
-ne-	0.45	19.99	-2895	614	0.06262	Setpoint Lower:	20.00	°C	
-ne-	0.01	20.01	-1172	1083	0.03826	Temperature Upper:	0.01	°C	
-te-	0.01	20.01	-1076	1140	0.03749	CalibFactor Upper:	0.017700		
-te-	0.01	20.00	-1061	1149	0.03739	Results Upper:	0.03755	W/mK	
-pe-	0.01	20.01	-1063	1149	0.03742	Temperature Lower:	20.01	°C	
-pe-	0.01	20.00	-1059	1155	0.03744	CalibFactor Lower:	0.016170		
-pe-	0.01	20.00	-1058	1158	0.03747	Results Lower:	0.03749	W/mK	
-pe-	0.01	20.01	-1060	1158	0.03749	Percent Difference:	0.16%		
-pe-	0.01	20.01	-1061	1158	0.03751				
-pe-	0.01	20.01	-1061	1158	0.03752	Thermal Equilibrium Criteria:			
-pe-	0.01	20.01	-1059	1159	0.03750	Temperature Equilibrium:	0.20		
-pe-	0.01	20.01	-1061	1157	0.03750	Between Block HFM Equil.:	50		
-pe-	0.01	20.01	-1060	1160	0.03753	HFM Percent Change:	2.00		
-pe-	0.01	20.01	-1060	1159	0.03752	Min Number of Blocks:	12		
-pe-	0.01	20.01	-1060	1159	0.03752	Calculation Blocks:	5		
-pe-	0.01	20.01	-1060	1160	0.03753				
Thickness: 40.01mm						Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond
Setpoint duration: 67 min						10.01	0.03755	0.03749	0.03752

Figuur 32: Meetdata HFM POL-9

6.2.2 Resultaten

6.2.2.1 Warmtegeleidingscoëfficiënt

De gemeten λ -waarden van de stalen (telkens met nummer 9, 10 en 11) worden weergegeven in Tabel 11. De gemiddelde λ -waarde per textieltype met bijhorende standaardafwijking worden eveneens berekend en grafisch voorgesteld in Figuur 33. Op basis van deze warmtegeleidingscoëfficiënten kunnen duidelijke verschillen in thermische prestaties tussen de geteste textielisolatiematerialen worden vastgesteld. Acryl vertoont de laagste gemiddelde warmtegeleidingscoëfficiënt (0,03605 W/mK), gevolgd door wol (0,03645 W/mK) en de katoen/polyester-blend (0,03697 W/mK).

Tabel 11: λ -waarden van de isolatiestalen [W/mK]

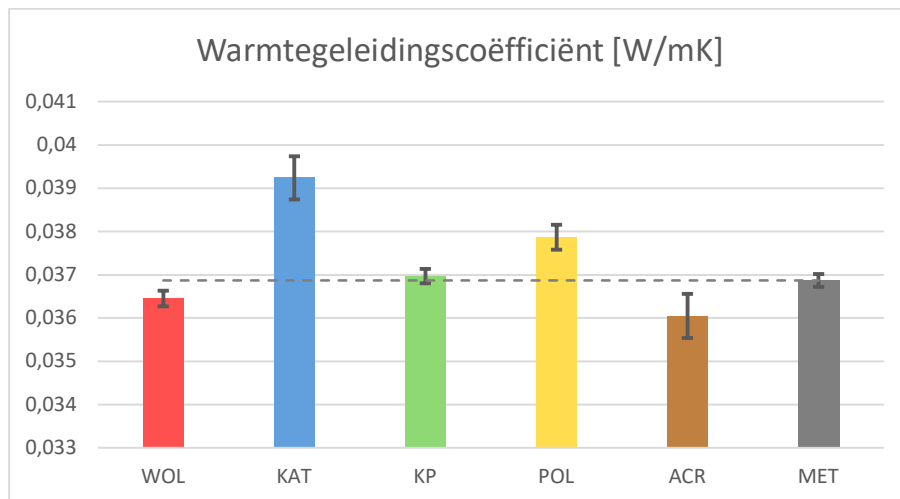
	WOL	KAT	KP	POL	ACR	MET
9	0,03668	0,03851	0,03711	0,03752	0,03653	0,03673
10	0,03643	0,03967	0,03674	0,03824	0,03627	0,03709
11	0,03624	0,03955	0,03707	0,03786	0,03534	0,03679
Gemiddelde λ -waarde	0,03645	0,03924	0,03697	0,03787	0,03605	0,03687
Standaardafwijking	0,00018	0,00050	0,00017	0,00029	0,00051	0,00015

Hierbij is het opmerkelijk dat de stalen op basis van katoen/polyester blends beter presteren dan de zuivere stalen op van katoen en polyester. Een mogelijke verklaring voor de lagere λ -waarde van de katoen/polyester-blend is dat de combinatie van beide vezeltypes resulteert in een gunstigere microstructuur. Door de verschillende morfologische eigenschappen van katoen- en polyestervezels zou een meer efficiënte luchtinsluiting kunnen ontstaan, met een verminderde warmteoverdracht via vezelcontacten. Daarnaast kan verondersteld worden dat deze vezelmix de minder gunstige thermische eigenschappen van de afzonderlijke componenten gedeeltelijk compenseert. Deze synergetische interactie binnen de vezelstructuur zou kunnen bijdragen aan de verbeterde isolatieprestatie van het gemengde materiaal.

In vergelijking met Métisse (gemiddelde $\lambda = 0,03687$ W/mK) blijkt dat verschillende zelfgeproduceerde isolatiematerialen (zoals acryl, wol en katoen/polyester) gelijkwaardig of zelfs beter presteren, wat het potentieel aantoont van gerecycleerde textielvezels als volwaardige circulaire isolatie-optie. Dit kan te wijten zijn aan de lagere massadichtheid van de zelfgeproduceerde isolatiestalen (± 20 kg/m³) ten opzichte van de Métisse-stalen (± 25 kg/m³), aangezien materialen met een lagere dichtheid doorgaans meer stilstaande lucht bevatten, wat de thermische isolatie verbetert. Opmerkelijk is daarbij dat de katoenstalen dan weer een hogere λ -waarde vertonen dan Métisse, hoewel beide materialen hoofdzakelijk uit katoenvezels bestaan. Dat verschil kan mogelijk worden verklaard door variaties in

vezelstructuur: de katoenvezels in Métisse zijn ruw vervezeld, wat kan resulteren in een grotere specifieke oppervlakte en een verhoogde interne luchtinsluiting, wat op zijn beurt de warmtegeleiding kan verlagen. Daarnaast kan het gebruikte bindmiddel eveneens een invloed uitoefenen. Terwijl Métisse gebruikmaakt van polyester als bindmiddel, zijn de katoenstalen met PLA verwerkt. Dit zou kunnen suggereren dat PLA een hogere thermische geleidbaarheid heeft dan polyester. Deze hypothese wordt echter genuanceerd door het feit dat ook wol- en acrylstalen, eveneens verwerkt met PLA, een lagere λ -waarde vertonen dan Métisse. De invloed van het bindmiddel blijkt zo eerder van secundair belang te zijn ten opzichte van het vezeltype en de materiaalverwerking.

De standaardafwijkingen (weergegeven in Figuur 33) in de metingen blijven beperkt (0,00015 – 0,00051 W/mK), wat wijst op een hoge reproduceerbaarheid en betrouwbaarheid van de resultaten. Materialen zoals Métisse, katoen/polyester en wol vertonen bijzonder lage spreidingen, hetgeen duidt op homogene thermische prestaties en verhoogde voorspelbaarheid. Voor toepassingen in de bouw vormt dit een belangrijk kwaliteitskenmerk, aangezien stabiele en consistente prestaties daar essentieel zijn. Acryl en katoen vertonen daarentegen de grootste standaardafwijkingen, een indicatie van een grotere gevoeligheid voor minder uniforme materiaalstructuren of samenstellingen.



Figuur 33: λ -waarde en standaardafwijking van de isolatiestalen

6.2.2.2 Gedeclareerde λ -waarden

Opvallend is dat het gemeten gemiddelde van de warmtegeleidingscoëfficiënt van Métisse, namelijk 0,03687 W/mK, lager ligt dan de waarde die vermeld wordt in de technische fiche (0,039 W/mK, zie bijlage 12.5.1). Dit verschil is verklaarbaar door de manier waarop de gedeclareerde waarde $\lambda_{declared}$ wordt vastgesteld volgens de Europese normen. Volgens NBN EN 13171 (2015), die de productspecificaties voor onder meer houtvezelisolatie vastlegt maar ook richtinggevend is voor andere soorten isolatie, moet de gedeclareerde waarde zo worden gekozen dat 90% van de productie met 90% betrouwbaarheid een lagere of gelijke waarde behaalt. Deze benadering, bekend als de 90/90-statistische methode, vereist het toepassen van een correctiefactor op basis van de standaardafwijking van de gemeten waarden. Daarnaast schrijft NBN EN ISO 10456 (2024) voor hoe gemeten laboratoriumwaarden statistisch moeten worden aangepast tot gedeclareerde en ontwerpwaarden, rekening houdend met factoren zoals veroudering, vocht en productietoleranties. Bij een beperkt aantal metingen ($n = 3$), zoals in dit onderzoek, is de onzekerheid echter groter. Wanneer er een gedeclareerde waarde dient berekend te worden voor de metingen die hier voor Métisse gedaan worden, wordt daarom een hogere k-factor gehanteerd op basis van de t-verdeling (Tabel 12, NBN ISO 16269-6, 2025). Met een gemiddelde van 0,03687 W/mK, een standaardafwijking van 0,00015 W/mK en een k-factor van 4,26 (voor $n = 3$ en 90% betrouwbaarheid), dient de gedeclareerde waarde volgens norm NBN EN 13171 (2015) als volgt te worden berekend:

$$\lambda_{decl,MET} = 0,03687 + 4,26 * 0,00015 = 0,03752 \text{ W/mK}$$

Afronding naar boven op drie decimalen volgens de normatieve richtlijnen resulteert in een gedeclareerde waarde van 0,038 W/mK. Dit komt dichterbij de waarde van 0,039 W/mK op de productfiche, waarbij de hogere waarde kan worden verklaard door de toepassing van extra veiligheidsmarges, conform de eisen van de geldende productnormen.

Tabel 12: Eenzijdige veiligheidsfactoren met 90% betrouwbaarheidsgraad (NBN ISO 16269-6, 2025)

n	(1 - α = 0,90)		
	p		
	0,90	0,95	0,99
2	10,2528	13,0898	18,5001
3	4,2582	5,3115	7,3405
4	3,1879	3,9566	5,4383
5	2,7424	3,3999	4,6660
6	2,4937	3,0919	4,2426
7	2,3327	2,8938	3,9721
8	2,2186	2,7543	3,7826
9	2,1329	2,6500	3,6415
10	2,0657	2,5684	3,5317
11	2,0113	2,5027	3,4435
12	1,9662	2,4483	3,3707

Voor de zelfgeproduceerde isolatiematerialen worden eveneens gedeclareerde λ -waarden berekend, zodat een correcte vergelijking mogelijk is met de gedeclareerde waarden van conventionele isolatiematerialen uit technische fiches. Aangezien per textielsoort slechts drie stalen werden getest, wordt een relatief hoge veiligheidsmarge toegepast. Dit resulteert in conservatieve waarden die als een ‘worst case-benadering’ kunnen worden beschouwd; de werkelijke λ -waarden liggen lager. Bij een grotere steekproef (bijvoorbeeld tien stalen) zou de statistische betrouwbaarheid toenemen, waardoor een lagere veiligheidsfactor volstaat en de gedeclareerde waarde representatiever wordt voor de effectieve isolatieprestatie. Alle gedeclareerde λ -waarden worden in Tabel 13 weergegeven.

Tabel 13: Gedeclareerde λ -waarden van de isolatiestalen

	WOL	KAT	KP	POL	ACR	MET
λ_{decl} [W/mK]	0,03722	0,04137	0,03769	0,03911	0,03822	0,03752

6.2.2.3 Testduur

Naast het bespreken van de warmtegeleidingscoëfficiënten van de verschillende isolatietypes is het eveneens waardevol om stil te staan bij de duur van de uitgevoerde metingen. Deze testduur, weergegeven in Tabel 14, kan immers bijkomende inzichten bieden in het thermisch gedrag van de verschillende textielgebaseerde isolatiematerialen. Van elk type werden drie stalen van 40 mm dik getest, met uitzondering van Métisse, dat 60 mm dik is. Aangezien de test eindigt bij thermisch evenwicht, beïnvloedt de materiaaldikte de duur. Daardoor is een rechtstreekse vergelijking met Métisse minder relevant, maar de vijf zelfgeproduceerde materialen kunnen wel onderling vergeleken worden.

Tabel 14: Testduur van isolatiestalen met HFM [minuten]

	WOL	KAT	KP	POL	ACR	MET
9	135	123	80	67	72	101
10	123	72	106	72	72	101
11	148	76	110	72	80	131
Gemiddelde duur	135,33	90,33	98,67	70,33	74,67	111,00

Bij het interpreteren van deze gegevens is het echter belangrijk om in rekening te nemen dat de testduur kan variëren naargelang het moment van de dag waarop de test plaatsvindt. Vooral de eerste test 's ochtends duurt meestal iets langer, omdat de platen dan nog op temperatuur moeten komen. Dit geldt voor de stalen KP-11, WOL-9, WOL-11 en ACR-11, die inderdaad een iets langere testduur vertonen dan de overige stalen van hetzelfde textieltype. Desondanks lijkt de invloed hiervan op de algemene gemiddelde waarden beperkt te blijven.

Uit de resultaten blijkt dat wol de langste gemiddelde testduur vertoont (135,33 minuten), gevolgd door katoen/polyester-blends (98,67 minuten) en katoen (90,33 minuten). De synthetische materialen polyester en acryl vertonen met respectievelijk 70,33 en 74,67 minuten de kortste testtijden. Een opvallende vaststelling is de directe vergelijking tussen wol en acryl: beide materialen vertonen een nagenoeg gelijke gemiddelde warmtegeleidingscoëfficiënt (respectievelijk 0,03645 W/mK en 0,03605 W/mK), maar de testduur van wol is bijna het dubbele van die van acryl. Aangezien de warmtegeleiding vergelijkbaar is, duidt het verschil in testduur mogelijks op verschillen in thermische respons en interne energieopslag.

Op basis van de observatie dat natuurlijke materialen systematisch trager op temperatuurveranderingen reageren dan synthetische materialen, kan de hypothese worden geformuleerd dat zij beschikken over een hogere soortelijke warmte c [J/kgK]. Deze grootheid bepaalt, samen met de massadichtheid ρ [kg/m³], de warmtecapaciteit C [J/m³K] van een materiaal volgens formule 2:

$$C = \rho * c$$

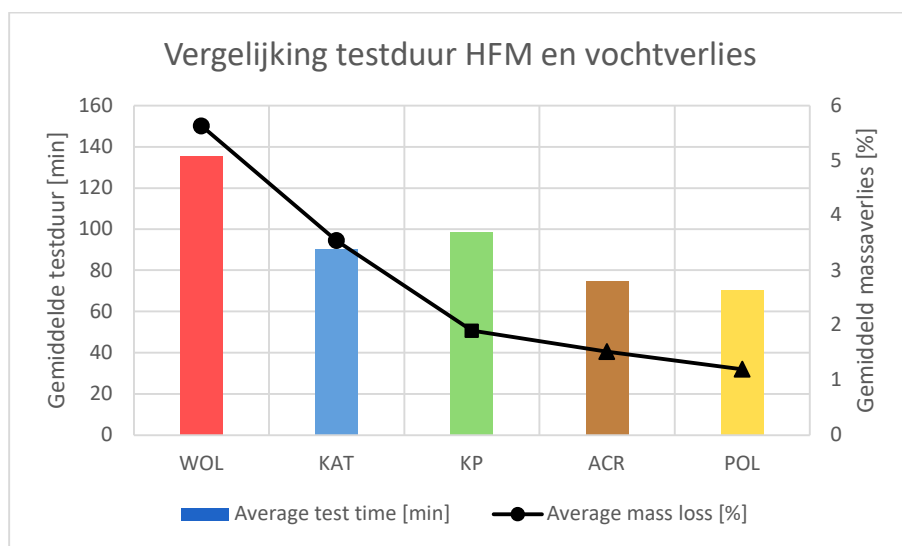
Aangezien de massadichtheid in dit experiment voor alle stalen gelijk is aan ± 20 kg/m³, kunnen verschillen in warmtecapaciteit rechtstreeks toegeschreven worden aan verschillen in de soortelijke warmte. Een hogere warmtecapaciteit betekent dat een materiaal meer energie nodig heeft om op te warmen, wat resulteert in een tragere temperatuursverandering en dus een langere testtijd. Dit duidt erop dat deze materialen over een hogere thermische inertie beschikken, wat in de context van bouwkundige toepassingen als een gunstige materiaaleigenschap kan worden beschouwd. Een verhoogde thermische inertie maakt het immers mogelijk om warmte over een langere tijdsspanne op te slaan en geleidelijk weer af te geven. Dit vertraagt de opwarming en afkoeling van de binnenruimte, waardoor temperatuurschommelingen worden beperkt en het thermisch comfort toeneemt.

Een bijkomende relevante parameter is dan mogelijks ook de thermische diffusiviteit α [m²/s], die aangeeft hoe snel warmte zich door een materiaal verspreidt. Een lagere thermische diffusiviteit impliceert een trager intern warmtetransport, wat in lijn ligt met de geobserveerde langere stabilisatietijd voor natuurlijke vezels zoals wol en katoen. Dit wordt gedefinieerd volgens formule 3:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho * c} = \frac{\lambda}{C}$$

Hierbij kan verondersteld worden dat isolatiematerialen op basis van natuurlijke vezels dus een lagere thermische diffusiviteit hebben dan isolatiematerialen op basis van synthetische vezels.

Daarnaast kan ook vochtmigratie een rol spelen in de duur vooraleer er een evenwicht wordt bereikt. Opmerkelijk hierbij is dat de rangschikking van de lengte van de testduur nagenoeg overeenkomt met de volgorde van het procentuele massaverlies bij droging van de isolatiestalen (zie Tabel 8). Natuurlijke materialen zoals wol en katoen vertonen niet alleen langere testtijden, maar ook aanzienlijk meer vochtverlies, zoals grafisch voorgesteld in Figuur 34. Dit is te wijten aan de meer open en hygroscopische vezelstructuur, die in staat is om vocht op te nemen en af te geven. Tijdens het testproces kan het interne vochttransport, als gevolg van een temperatuurgradiënt ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$), het warmteverloop beïnvloeden. Gezien water een hoge soortelijke warmte en warmtegeleidingscoëfficiënt bezit, kan zelfs beperkte vochtmigratie aanleiding geven tot dynamische verstoringen in de meting, waardoor het langer duurt om thermisch evenwicht te bereiken.



Figuur 34: Vergelijking gemiddelde testduur HFM en vochtverlies van de isolatiestalen

Samenvattend kan worden gesteld dat de duidelijk langere thermische stabilisatie van natuurlijke isolatiematerialen zoals wol niet louter aan hun structuur, maar ook aan een hogere soortelijke warmte en vochtinteractie kan worden toegeschreven. Beide factoren kunnen het bereiken van een stationaire toestand vertragen, wat resulteert in langere testtijden ondanks een vergelijkbare λ -waarde, gelijke massadichtheid en gelijke dikte.

6.3 Waterabsorptie

6.3.1 Methodologie

6.3.1.1 Testprocedure

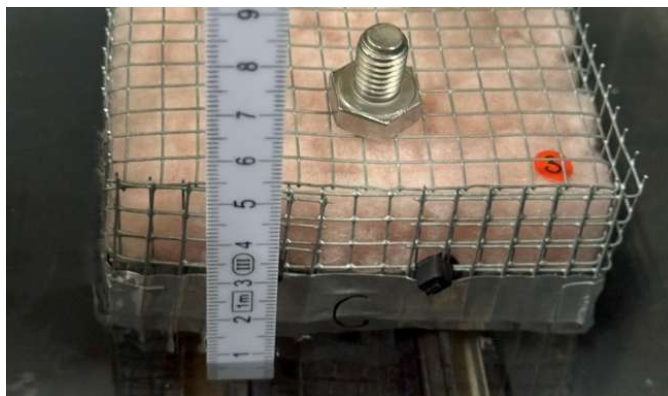
De waterabsorptiecoëfficiënt A_w [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$] karakteriseert de hoeveelheid water die door een materiaal wordt opgenomen ten gevolge van capillaire werking (formule 8). Deze parameter speelt daarom een cruciale rol in het beschrijven van het vochttransport binnen materialen. In dit onderzoek wordt de methode van de gedeeltelijke onderdompeling gehanteerd volgens norm NBN EN ISO 15148 (2003), waarbij de isolatiestalen gedurende een bepaalde periode in een waterbak worden geplaatst. De norm vereist dat de test gedurende minstens 24 uur wordt uitgevoerd. Om echter een meer gedetailleerd resultaat te verkrijgen en een nauwkeurigere inschatting te kunnen maken van het gedrag van de nieuwe materialen, wordt in dit onderzoek gekozen om de metingen telkens uit te breiden tot een duur van 48 uur. Conform de normvoorschriften wordt de onderdompeling op vaste tijdsintervallen, namelijk na 5 minuten, 20 minuten, 1 uur, 2 uur, 4 uur, 8 uur, 24 uur en 48 uur, onderbroken om de proefstukken te wegen. Aan de hand van deze metingen wordt de hoeveelheid opgenomen water geëvalueerd in functie van de tijd. De weegprocedure wordt bij elk meetmoment op identieke wijze uitgevoerd: elk proefstuk wordt afzonderlijk uit het water genomen en gedurende 2,5 minuten onder een hoek van 45° gehouden om te laten uitlekken (Figuur 35, rechts). Hoewel de norm een maximale uitlektijd van 1 minuut voorschrijft, wordt hier bewust gekozen voor een langere periode, gezien het biogebaseerd karakter van de isolatiematerialen, waarbij het verwijderen van overtollig water vermoedelijk meer tijd vergt. Dit wordt ook beaamd door een andere norm, namelijk (NBN EN ISO 29767, 2019). Aansluitend wordt het staal binnen 30 seconden kort op een vochtige doek geplaatst om resterende druppels te verwijderen, waarna het wordt gewogen en onmiddellijk terug in de waterbak wordt geplaatst.



Figuur 35: Opstelling waterabsorptieproef

Hoewel de norm een minimale contactoppervlakte van 100 cm² voorschrijft, is het gebruikelijk dat deze test gebeurt met drie monsters van 20 x 20 cm (Deweert & Wijnant (2023); NBN EN ISO 29767 (2019)). Omwille van de praktische haalbaarheid voor de productie van de stalen wordt er echter toch gekozen om de afmetingen van de stalen te beperken tot 10 x 10 cm. Ter compensatie van het kleinere formaat en om de betrouwbaarheid van de resultaten te verhogen, worden per textielsoort vijf monsters getest in plaats van drie.

Om te garanderen dat de isolatiestalen gedurende de onderdompeling hun vorm behouden, worden deze in netjes met dezelfde afmetingen geplaatst. Deze netjes worden onderaan de zijvlakken voorzien van waterdichte aluminiumtape om ervoor te zorgen dat het water enkel in ééndimensionale richting in het materiaal kan indringen (Figuur 36). De geproduceerde isolatiestalen worden op steunpunten geplaatst, waarbij het onderste uiteinde van de stalen steeds 0,5-1 cm in contact komt met water. Om te voorkomen dat de stalen gaan drijven, worden er kleine boutjes op geplaatst om ze op hun plaats te houden (Figuur 36).



Figuur 36: Onderdompeling isolatiestaal in netje met waterdichte tape

De norm vereist dat de omgevingsparameters in de ruimte waarin de absorptiemeting wordt uitgevoerd, binnen vooraf vastgestelde grenswaarden blijven en dat de variaties tijdens de test een bepaalde maximaal toegestane afwijking niet overschrijden. Deze grenswaarden zijn weergegeven in Tabel 15. Tijdens de metingen zullen de omgevingsparameters continu worden geregistreerd met behulp van een datalogger (technische specificaties in bijlage 12.5.5).

Tabel 15: Toegelaten testcondities tijdens absorptieproef (NBN EN ISO 15148, 2003)

	Temperatuur [°C]	Relatieve vochtigheid [%]
Toegelaten bereik van de testcondities	18-28	40-60
Toegelaten afwijking gedurende de test	± 2	± 5

6.3.1.2 Berekening van de waterabsorptiecoëfficiënt A_w [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$]

In eerste instantie wordt het contactoppervlak A [m^2] berekend. Dit betreft het oppervlak dat daadwerkelijk in contact staat met het water, waarbij specifiek de oppervlakte van de onderzijde van het gebruikte netje per afzonderlijk isolatiestaal in rekening wordt gebracht. Vervolgens wordt voor elk meetmoment het massaverschil m_t [kg] ten opzichte van de initiële massa m_i [kg] bepaald. Op basis hiervan wordt het specifieke massaverschil per oppervlak Δm_t [kg/m^2] berekend, zoals weergegeven in formule 11. Deze waarden worden gevisualiseerd in een grafiek waarin Δm_t uitgezet wordt tegen de vierkantswortel van de tijd. Conform de norm dient de resulterende grafiek overeen te komen met één van de twee voorgedefinieerde types, A of B.

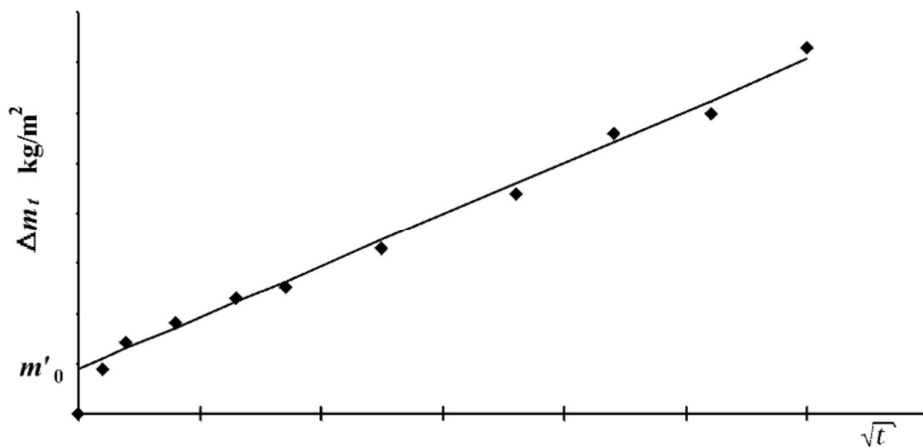
$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A} \quad (11)$$

- **Grafiek A**

Grafiektype A, weergegeven in Figuur 37, illustreert dat na een korte initiële stabilisatiefase een lineair verband ontstaat tussen de waarden van Δm_t en $\sqrt{t}$. In dit geval bereikt het wateroppervlak de bovenzijde van het staal niet binnen de 48 uur, wat overeenkomt met grafiektype A, subtype I. De waterabsorptiecoëfficiënt A_w [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$] kan vervolgens worden berekend aan de hand van formule 12.

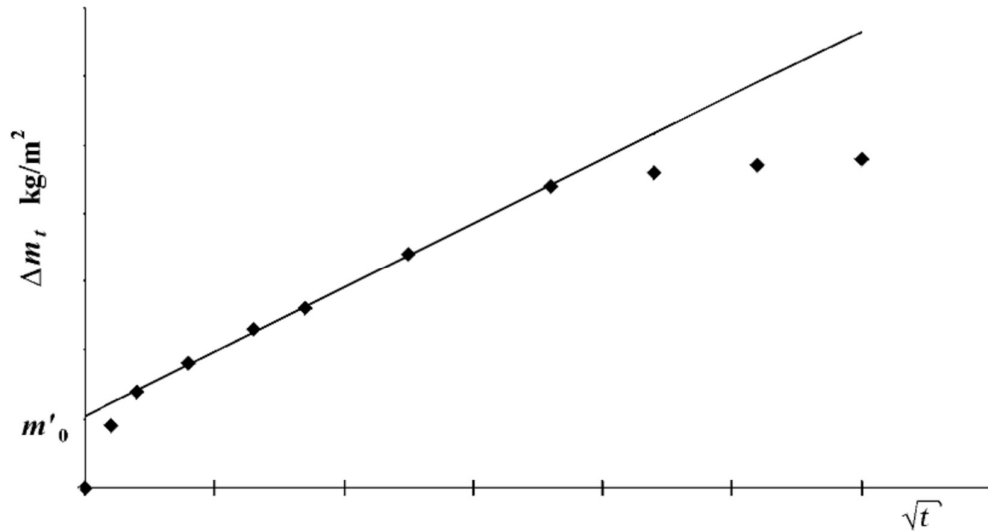
$$A_w = \frac{\Delta m'_{tf} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}} \quad (12)$$

Met: $\Delta m'_{tf}$ = waarde van Δm op de rechte op tijdstip t_f [kg/m^2]
 t_f = duur van de test [s], hier 48 uur = 172 800 s



Figuur 37: Grafiektype A.I, waarbij het water het bovenoppervlak niet bereikt (NBN EN ISO 15148, 2003)

Wanneer de grafiek een lineair verloop vertoont gevolgd door een plotse daling (Figuur 38), wijst dit erop dat het water het bovenoppervlak van het monster voortijdig heeft bereikt. Dit gedrag wordt geclassificeerd als grafiektype A, subtype II. In dit geval wordt de waterabsorptiecoëfficiënt A_W berekend met een eindtijd t_f die kleiner is dan 172 800 seconden (48 uur).



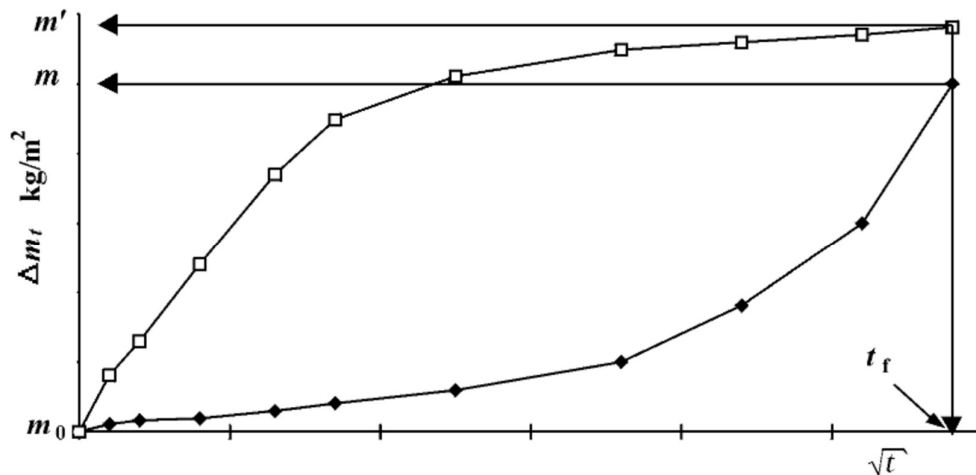
Figuur 38: Grafiektype A.II, waarbij het water het bovenoppervlak wel bereikt (NBN EN ISO 15148, 2003)

- **Grafiek B**

Daarnaast kan het voorkomen dat de relatie tussen Δm_t en t geen lineair verloop vertoont, maar eerder een kromlijng patroon volgt, zoals geïllustreerd in Figuur 39. In dit geval wordt voor Δm_t uitgegaan van de waarde Δm_{tf} na een meetduur van 48 uur. Op basis daarvan kan de waterabsorptiecoëfficiënt A_W berekend worden met behulp van formule 13.

$$A_{W,48} = \frac{\Delta m_{tf}}{\sqrt{172\,800}} \quad (13)$$

Indien het water het bovenoppervlak van het monster voortijdig bereikt (binnen de 48 uur), wordt er geen waarde voor de waterabsorptiecoëfficiënt berekend; enkel de tijd tot het bereiken van het bovenoppervlak wordt dan in rekening genomen.



Figuur 39: Grafiektype B (NBN EN ISO 15148, 2003)

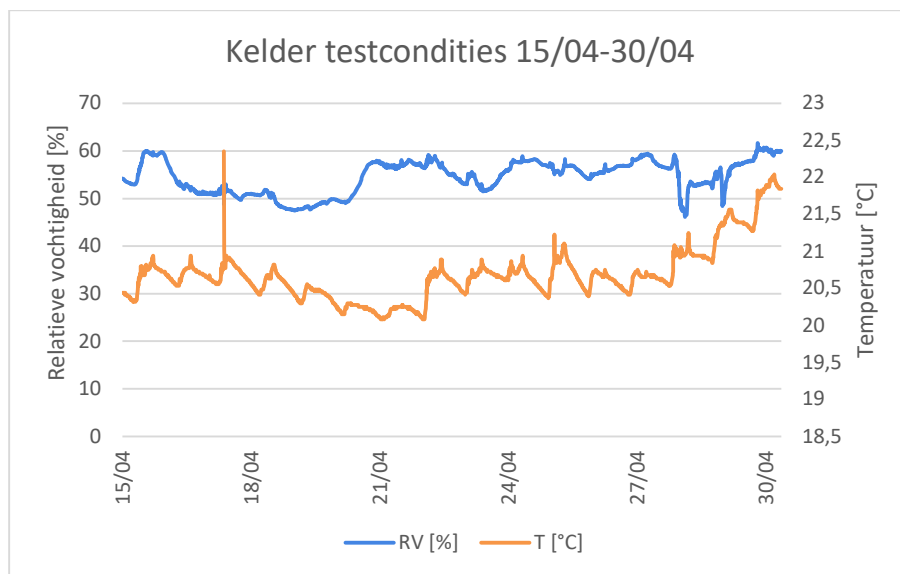
Ter verduidelijking worden de 4 mogelijke types grafieken hieronder nog eens opgelijst:

- Grafiektype A, subtype I: Na een korte stabilisatiefase ontwikkelt zich een lineair verband, zonder dat het water het bovenoppervlak van het monster bereikt gedurende de meetperiode.
- Grafiektype A, subtype II: Na een korte stabilisatiefase ontwikkelt zich een lineair verband, waarbij het water het bovenoppervlak van het monster wel bereikt gedurende de meetperiode.
- Grafiektype B, subtype I: het verloop is kromlijng en het water bereikt het bovenoppervlak niet binnen de 48 uur.
- Grafiektype B, subtype II: het verloop is eveneens kromlijng, maar het water bereikt het bovenoppervlak wel binnen de 48 uur.

6.3.2 Resultaten

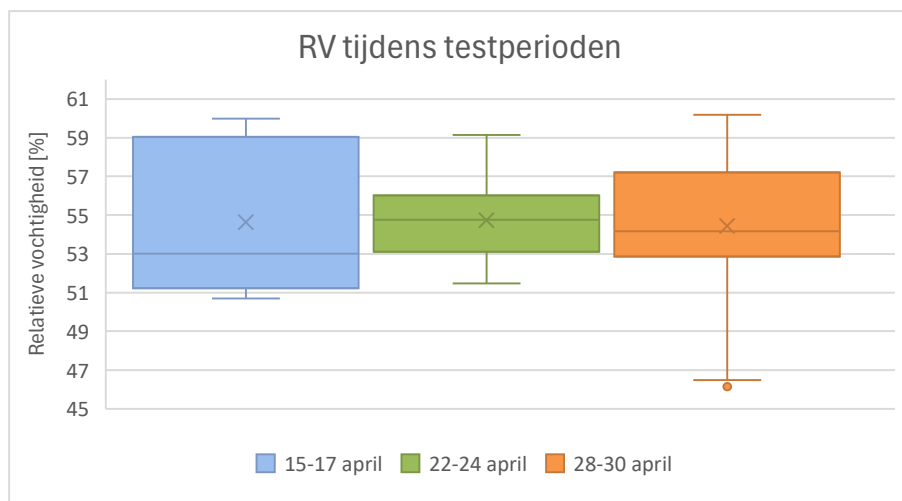
6.3.2.1 Testcondities

De waterabsorptieproeven vonden plaats tussen 15 april en 30 april. De katoen- en wolstalen werden getest op 15-17 april, de polyester- en acrylstalen 22-24 april en de katoen-polyester- en Métisse-stalen 28-30 april. Op basis van de door de datalogger geregistreerde en in Figuur 40 grafisch weergegeven meetwaarden blijkt dat de gemiddelde temperatuur tijdens de testdagen (niet-testdagen zijn hierbij buiten beschouwing gelaten) 20,67°C bedroeg, met een minimum van 20,54°C en een maximum van 20,94°C. De temperatuur bleef dus gedurende de gehele testperiode binnen de toegestane marges van 18-28°C en een afwijking van $\pm 2^\circ\text{C}$.



Figuur 40: Gemeten testcondities gedurende de testperiode

Aangezien uit de grafiek blijkt dat de relatieve luchtvochtigheid (RV) tussen 15 en 30 april grotere variaties vertoont, wordt de analyse opgesplitst per afzonderlijke testperiode. In Figuur 41 worden voor elke testperiode de gemiddelde, minimale en maximale RV-waarden weergegeven. Hieruit blijkt dat enkel tijdens de testperiode van 28-30 april een spreiding van circa 8% optreedt, wat als te groot wordt beschouwd om betrouwbare resultaten te garanderen. De minimale RV van 46,13% wordt hierbij gemeten 18 uur ($\sqrt{18 \text{ uur}} = 255 \text{ s}$) na de aanvang van de test. Indien uit de verdere analyse blijkt dat deze afwijking een duidelijke invloed heeft gehad op de resultaten, zal hiermee rekening worden gehouden bij de interpretatie.



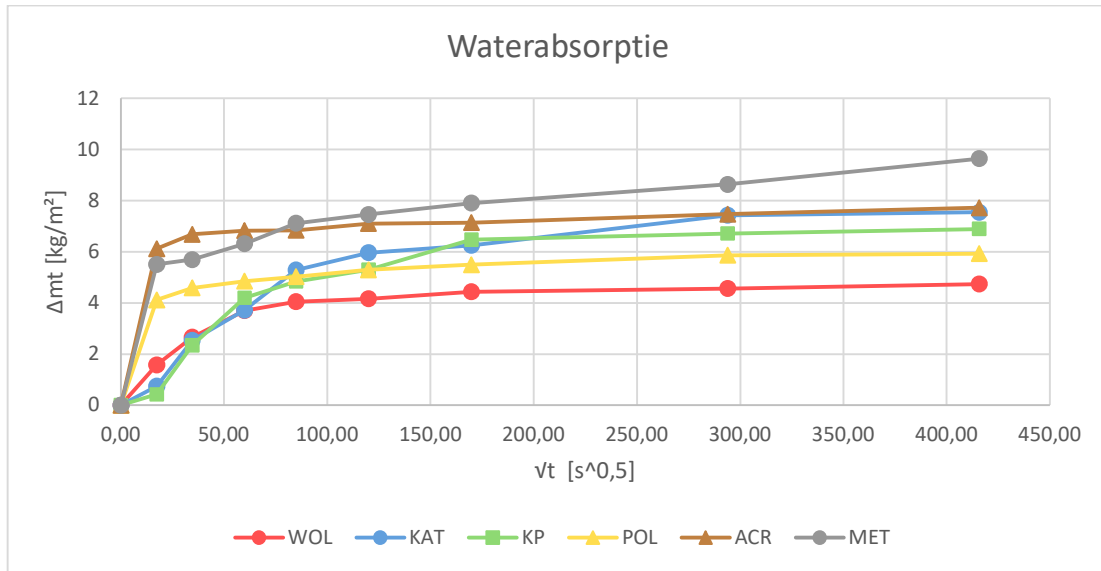
Figuur 41: Relatieve vochtigheid tijdens testperioden

6.3.2.2 Waterabsorptiecurve

Een overzicht van de gemeten massa's van de proefstukken is opgenomen in bijlage 12.3.2. Op basis van deze meetgegevens werd voor elke textielsoort een grafiek opgesteld, gebaseerd op de resultaten van vijf afzonderlijke stalen. De zes resulterende grafieken zijn opgenomen in bijlage 12.3.1 en kunnen worden geclassificeerd volgens één van de vier vooraf gedefinieerde grafiektypes. Aangezien de waterabsorptiecurves per textielsoort een gelijkaardig verloop vertonen, is het mogelijk om representatieve gemiddelde waarden te berekenen. Deze zijn weergegeven in Tabel 16 en visueel voorgesteld in Figuur 42.

Tabel 16: Waterabsorptie Δm_t [kg/m²] van de isolatiestalen in functie van de tijd [s^{0.5}]

	WOL	KAT	KP	POL	ACR	MET
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
17,32	1,5758	0,7389	0,4254	4,1180	6,1186	5,5000
34,64	2,6506	2,5286	2,3320	4,5826	6,6809	5,6938
60,00	3,6876	3,7200	4,1930	4,8424	6,8180	6,3179
84,85	4,0429	5,2783	4,8314	5,0230	6,8271	7,1167
120,00	4,1595	5,9654	5,2936	5,2916	7,1075	7,4506
169,71	4,4331	6,2438	6,4656	5,4927	7,1404	7,9058
293,94	4,5599	7,4262	6,7133	5,8539	7,4668	8,6317
415,69	4,7324	7,5430	6,8882	5,9258	7,7175	9,6397



Figuur 42: Waterabsorptiecurven van de isolatiestalen

Uit de analytische en grafische resultaten blijkt dat isolatiestalen op basis van synthetische vezels (polyester en acryl) binnen de eerste 5 minuten al een aanzienlijke hoeveelheid water opnemen. Vervolgens vlakken de absorptiecurves sterk af, wat duidt op een snelle verzadiging waarbij nauwelijks nog bijkomende opname optreedt gedurende de resterende meetperiode van 48 uur. Dit gebeurt ondanks het feit dat het water nooit het bovenoppervlak van de stalen heeft bereikt. Figuur 43 toont bovendien een scherpe grens tussen natte en droge zones: de ondergedompelde laag van circa 1 cm is volledig verzadigd, terwijl het erboven gelegen deel zichtbaar droog blijft. Dit gedrag is typerend voor materialen met een gesloten of hydrofobe vezelstructuur, waarbij water slechts oppervlakkig wordt geabsorbeerd en capillaire opstijging uitblijft. De wateropname is bij dergelijke synthetische materialen dus hoofdzakelijk afhankelijk van het rechtstreeks contact met water. Een hogere waterstand zou vermoedelijk tot meer opname geleid hebben; bij een lagere waterhoogte zou de opname dan weer beperkter zijn geweest.



Figuur 43: Acrylstaal na absorptieproef: Verzadigde onderkant - droge bovenkant

Natuurlijke vezelmaterialen (katoen en wol) en de katoen/polyester blend daarentegen tonen een meer geleidelijke toename in waterabsorptie. Bij deze materialen wordt pas na ongeveer 8 uur een lineair verband tussen de wortel van de tijd en de wateropname zichtbaar ($\sqrt{8 \text{ uur}} = 169,71 \text{ seconden}$). Dit duidt op een trager, capillair gestuurd absorptieproces waarbij het water dieper in het materiaal doordringt.

Een bijzonder geval binnen de onderzochte materialen is Métisse. Hoewel dit materiaal bestaat uit natuurlijke vezels (jeanskatoen), absorbeert het in tegenstelling tot de andere natuurlijke materialen ook in de eerste 5 minuten reeds een grote hoeveelheid water. Nadien blijft de absorptie ook verder toenemen. Waar de absorptiecurves van de meeste andere materialen na verloop van tijd afvlakken, blijft die van Métisse duidelijk stijgen, ook na 8 uur. Deze afwijkende absorptiedynamiek kan mogelijk worden toegeschreven aan verschillende materiaalspecifieke factoren. Zo bevat Métisse naast katoenvezels ook polyester als bindmiddel, wat invloed kan hebben op de structuur en capillaire eigenschappen van het materiaal. Een bijkomende hypothese is dat de Métisse-stalen tijdens contact met water licht samendrukken, waardoor het poreuze volume dat in contact staat met water toeneemt en het materiaal bijkomend vocht kan opnemen. Dit zou verklaren waarom de absorptiecurve niet stabiliseert zoals bij de meeste andere onderzochte materialen, maar verder blijft stijgen na 8 uur. Nader microscopisch of porositeitsonderzoek zou hier uitsluitsel over kunnen geven.

In geen van de gevallen werd waargenomen dat het water het bovenoppervlak van de isolatiestalen bereikt heeft. Subtype II, waarbij waterdoorslag optreedt tot aan het oppervlak, kan dan ook voor alle geteste materialen worden uitgesloten. Verder blijkt uit de curves dat voor geen enkel materiaal een zuiver lineair verband tussen $\sqrt{t}$ en Δm_t optreedt. Op basis van deze observaties worden alle materialen geclassificeerd onder grafiektype B.I, gekenmerkt door een bepaalde initiële opname gevolgd door een afnemend opnamevermogen over tijd.

6.3.2.3 Waterabsorptiecoëfficiënt

Aangezien alle absorptiecurves geclassificeerd worden onder grafiektype B.I, kan voor elke textielsoort de waterabsorptiecoëfficiënt A_w worden berekend op basis van formule 13. De bekomen resultaten, evenals de gemiddelde waterabsorptiecoëfficiënt per textielsoort, zijn samengevat in Tabel 17.

Tabel 17: Waterabsorptiecoëfficiënt A_w [$\text{kg/m}^2\text{s}^{0.5}$] van de isolatiestalen

	WOL	KAT	KP	POL	ACR	MET
1	0,0118	0,0200	0,0199	0,0159	0,0197	0,0231
2	0,0108	0,0183	0,0168	0,0145	0,0179	0,0247
3	0,0110	0,0162	0,0127	0,0138	0,0161	0,0224
4	0,0119	0,0181	0,0167	0,0144	0,0198	0,0237
5	0,0116	0,0181	0,0167	0,0128	0,0192	0,0220
Gemiddelde	0,0114	0,0181	0,0166	0,0143	0,0186	0,0232
Standaardafwijking	0,00049	0,00135	0,00256	0,00113	0,00156	0,00107

De berekende waterabsorptiecoëfficiënten voor de zes onderzochte isolatiematerialen op textielbasis vertonen duidelijke verschillen in absorptiegedrag. Binnen de groep van de vijf zelfgeproduceerde stalen blijkt acryl de hoogste gemiddelde coëfficiënt te hebben, gevolgd door katoen en katoen/polyester. Polyester en wol nemen minder water op. Echter is het hierbij belangrijk om in rekening te nemen dat de synthetische materialen vermoedelijk een hogere waterabsorptiecoëfficiënt zouden gehad hebben indien de waterlaag groter was (zie veronderstelling bij Figuur 43). De waarden van deze isolatiestalen mogen dus niet volledig als representatief beschouwd worden.

Het commerciële Métisse-staal vertoont met een gemiddelde absorptiecoëfficiënt van $0,0232 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ het hoogste waterabsorptievermogen van alle geteste materialen. Deze hoge waarde weerspiegelt het eerder vastgestelde gedrag in de absorptiegrafiek, waarin Métisse zowel een snelle initiële opname als een aanhoudende toename in waterabsorptie vertoonde over de volledige testperiode. Bepalende factoren hierin zijn vermoedelijk de vezelstructuur en de hogere massadichtheid van de Métisse-stalen (25 kg/m^3), in vergelijking met $\pm 20 \text{ kg/m}^3$ voor de zelfgeproduceerde stalen. De grotere hoeveelheid vezelmateriaal per volume-eenheid kan de verhoogde capillaire werking mede verklaren.

Wanneer deze waterabsorptiecoëfficiënten vergeleken worden met de waarden van de biogebaseerde isolatiematerialen voorgesteld in Tabel 4, dan lijken waarden van $0,01$ - $0,02 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ in lijn te liggen met, of zelfs lager te zijn dan, de prestaties van reeds bestaande biogebaseerde materialen.

6.4 Sorptie

6.4.1 Methodologie

6.4.1.1 Testprocedure

Naast rechtstreeks contact met water, kan ook de relatieve luchtvochtigheid van de omgeving een invloed hebben op het vochttransport in isolatiematerialen. Het sorptiegedrag van de stalen geeft inzicht in de mate waarin een bouw materiaal vocht kan opnemen en afgeven onder verschillende omstandigheden, wat essentieel is voor het beoordelen van de vochtregulerende eigenschappen van het materiaal. In het kader van deze masterproef is gekozen voor de toepassing van de desiccator methode zoals beschreven in de norm NBN EN ISO 12571 (2021). Deze statische methode houdt in dat materiaalmonsters worden geplaatst in luchtdicht afgesloten desiccators waarin de relatieve vochtigheid (RV) constant wordt gehouden bij een bepaalde waarde door middel van verzadigde zoutoplossingen.

De norm specificiert dat relatieve vochtigheden van 33%, 75% en 94% verplicht dienen te worden opgenomen in de meetreeks. Daarnaast moet minimaal één extra RV worden geselecteerd om het vochtgedrag van de monsters bij een ruimer spectrum van RV-niveaus te kunnen evalueren. In dit onderzoek is ervoor gekozen om twee aanvullende vochtcondities op te nemen, beide met een relatief hoge RV-waarde (85% en 97%). Dit wordt gemotiveerd door het feit dat materialen bij hogere luchtvochtigheden doorgaans meer vocht opnemen, wat essentieel is voor het inschatten van hun maximale vochtbufferend vermogen. Bovendien kunnen bij een hogere RV capillaire condensatieprocessen optreden, wat leidt tot een sterkere toename in vochtgehalte. Dit weerspiegelt beter de praktijkomstandigheden waarin vochtaccumulatie en materiaaldegradatie het meest voorkomen. Een overzicht van de toegepaste verzadigde zoutoplossingen, inclusief hun bijbehorende stabiele RV-waarden bij de testtemperatuur, wordt weergegeven in Tabel 18. In iedere desiccator wordt een Hobo-datalogger geplaatst, waarmee zowel de relatieve luchtvochtigheid als de temperatuur gedurende de volledige testperiode continu worden geregistreerd.

Tabel 18: Zoutoplossingen met bijhorende RV en dosering (NBN EN ISO 12571, 2021)

Zoutoplossing	RV [%]	Theoretische oplosbaarheid [g/100 ml]	Toegepaste dosering [g/100 ml]
MgCl ₂ *6H ₂ O	33%	167	336,7
NaCl	75%	35,7	28,9
KCl	85%	34,7	18,8
KNO ₃	94%	13,3	15,0
K ₂ SO ₄	97%	12	9,1

Conform de norm mag de RV tijdens de testperiode maximaal $\pm 2\%$ afwijken van de nominale waarde van de desbetreffende zoutoplossing. Hierbij dient rekening gehouden te worden met een meetnauwkeurigheid van $\pm 2,5\%$ tussen 10-90% RV en $\pm 5\%$ boven een RV van 90%, zoals gespecificeerd voor de gebruikte dataloggers. Om de betrouwbaarheid van de meetresultaten te waarborgen, wordt gestreefd om de testtemperatuur gedurende het volledige meettraject op $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ te houden. Aangezien temperatuurschommelingen de sorptie-eigenschappen van materialen kunnen beïnvloeden, mag de temperatuur tijdens de test niet meer dan $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ afwijken van deze streefwaarde. Op vlak van temperatuurmetingen hebben de dataloggers een nauwkeurigheid van $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$.

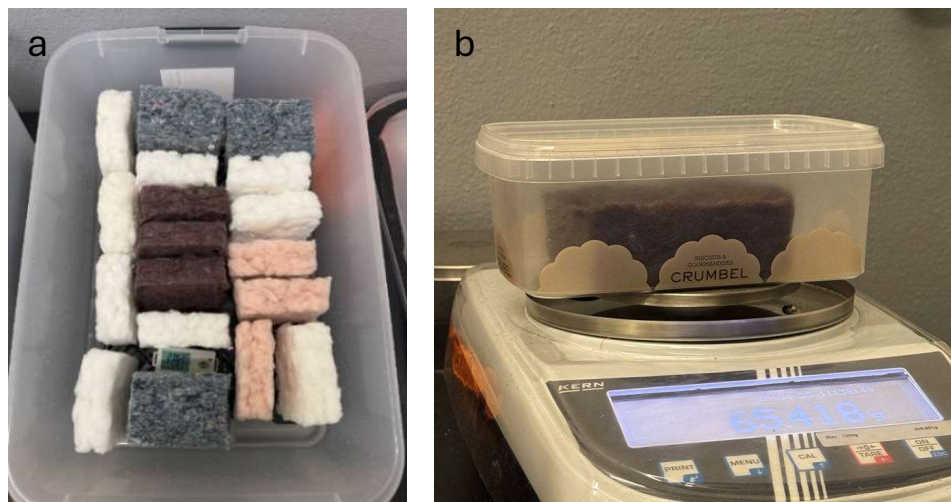
Gezien het grote aantal te testen materiaalstalen, bieden standaard desiccators onvoldoende capaciteit om alle stalen gelijktijdig te testen. Als alternatief wordt daarom gebruikgemaakt van grotere afsluitbare plastic boxen (zie Figuur 44-a). Om de luchtdichtheid van deze boxen te garanderen, wordt een zwelband aangebracht langs de binnenzijde van de dekselrand (Figuur 44-b). Conform de richtlijn in NBN EN ISO 12571 (2021) moet de verzadigde zoutoplossing een laag van 3 tot 5 cm vormen. Gezien de zoutoplossing over de volledige bodem wordt aangebracht, volstaat een laag van 3 cm. De benodigde hoeveelheid zout wordt vastgesteld aan de hand van de richtlijnen in Tabel B.1 van de norm, waarin de vereiste zoutmassa is aangegeven in verhouding tot het watervolume (gedestilleerd water). De oplossing wordt als verzadigd beschouwd wanneer zich een restlaag niet-opgelost zout op de bodem vormt. De theoretische en uiteindelijk toegepaste hoeveelheden zout per 100 ml gedestilleerd water worden eveneens weergegeven in Tabel 18. Zodra de oplossing verzadigd is, wordt een rooster geplaatst boven de waterlaag. Hierop zullen later de materiaalstalen worden gepositioneerd, zodat ze aan alle zijden gelijkmatig worden blootgesteld aan de vochtige lucht. De datalogger wordt eveneens op dit rooster geplaatst (Figuur 44-c).



Figuur 44: Opstelling sorptieproef: (a) boxen; (b) zwelband; (c) rooster

Tijdens de proef worden de materiaalstalen telkens op geregelde tijdstippen gewogen om de verandering in massa als gevolg van vochtopname of -afgave te registreren. Dit gebeurt totdat elk staal een stabiel gewicht bereikt, ook wel aangeduid als het evenwichtsvochtgehalte (Equilibrium Moisture Content, EMC). Volgens de norm is er sprake van evenwicht wanneer gedurende drie opeenvolgende metingen, met telkens een interval van 24 uur, de massa met minder dan 0,1% verandert. In dit onderzoek wordt dit omwille van de beperkte beschikbare tijd versoepeld naar twee opeenvolgende metingen, onder dezelfde voorwaarden.

Alle stalen worden initieel in de eerste klimaatbox geplaatst, met een relatieve luchtvochtigheid van 33% (Figuur 45-a). Vervolgens worden zij om de 24 uur gewogen. Tijdens het wegen wordt elk staal kort uit de box gehaald en onmiddellijk in een kleiner afsluitbaar doosje geplaatst, om blootstelling aan de laboratoriumomgeving tot een minimum te beperken en zo ongewenste beïnvloeding van het vochtgehalte te vermijden (Figuur 45-b). Aangezien de weegschaal een meetnauwkeurigheid van 0,001 gram heeft, treden er door de gevoeligheid van het toestel soms kleine fluctuaties op in de laatste decimalen. Een stabiele meting wordt aangenomen wanneer de weergegeven massa gedurende ten minste 10 seconden ongewijzigd blijft. Op dat moment wordt de waarde genoteerd als het actuele gewicht. Zodra een staal voldoet aan het evenwichtscriterium, wordt het overgebracht naar de volgende box met een hogere RV. Dit proces wordt herhaald tot de laatste box, met een relatieve luchtvochtigheid van 97%, bereikt is. Op deze wijze kunnen de sorptie-eigenschappen van elk materiaalstaal worden vastgesteld. In theorie kan hetzelfde traject in omgekeerde richting worden gevolgd om de desorptie-eigenschappen in kaart te brengen. Aangezien dit onderzoek onder tijdsdruk plaatsvindt, ligt de nadruk echter op de bepaling van sorptiecurves.



Figuur 45: Sorptieproef: (a) isolatiestalen in desiccator; (b) luchtdichte afweging isolatiesamples

6.4.1.2 Berekening van de sorptie-eigenschappen

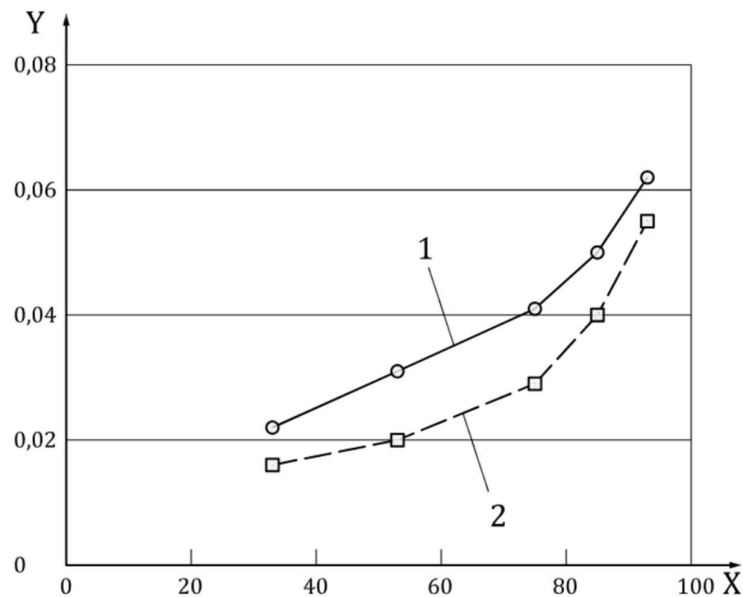
Wanneer een staal in evenwicht is bij een bepaald RV-niveau, kan het vochtgehalte u [kg/kg] berekend worden volgens formule 14:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (14)$$

Met: m = massa bij evenwicht [kg]

m_0 = droge massa van het staal [kg] (zie Tabel 8)

Vervolgens kan per textielsoort het gemiddelde genomen worden van het berekende vochtgehalte van de 3 stalen. Na berekening van het gemiddelde vochtgehalte van de verschillende testmonsters bij elke relatieve vochtigheid kunnen de sorptie- en desorptiecurven worden getekend door de datapunten met rechte lijnen te verbinden (Figuur 46).



Figuur 46: Evenwichtsvochtgehalte sorptie- en desorptiecurve (NBN EN ISO 12571, 2021)

Met: x-as: Relatieve vochtigheid φ [%]

y-as: Vochtgehalte u [kg/kg]

1: Desorptiecurve

2: Sorptiecurve

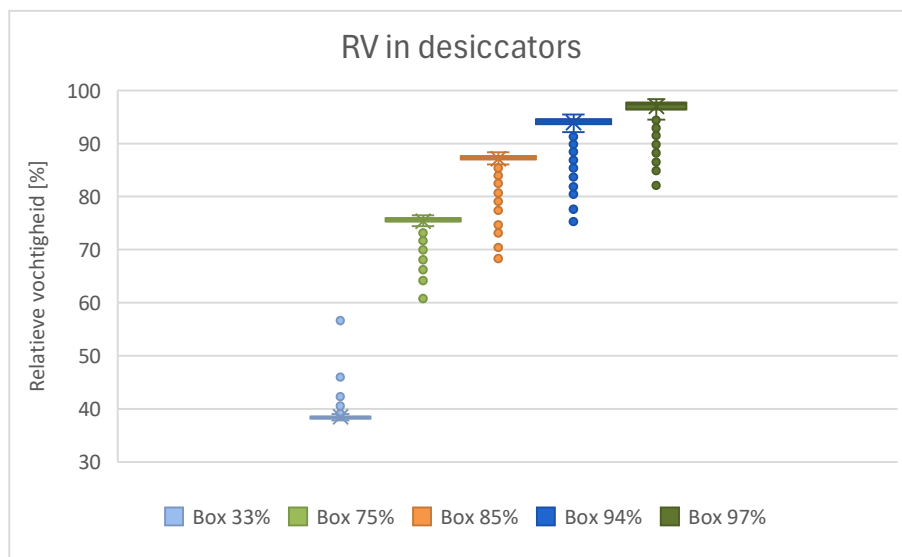
6.4.2 Resultaten

6.4.2.1 Testcondities

Tijdens de conditioneringsperiode van de isolatiestalen worden de relatieve luchtvochtigheid [%] en temperatuur [°C] in de desiccators continu gemonitord met behulp van dataloggers. De volledige tijdsreeksen van deze metingen zijn terug te vinden in Bijlage 12.4.1. De gemiddelde en mediaanwaarden van de gemeten relatieve vochtigheden per box zijn samengebracht in Tabel 19. In Figuur 47 wordt deze informatie aangevuld met een boxplot waarin ook de spreiding van de metingen en eventuele uitschieters zichtbaar worden.

Tabel 19: Geregistreeerde mediaan en gemiddelde RV in de desiccators gedurende de testperiode

	33%	75%	85%	94%	97%
Mediaan	38,31%	75,72%	87,33%	94,13%	97,39%
Gemiddelde	38,51%	75,39%	87,12%	93,89%	96,95%



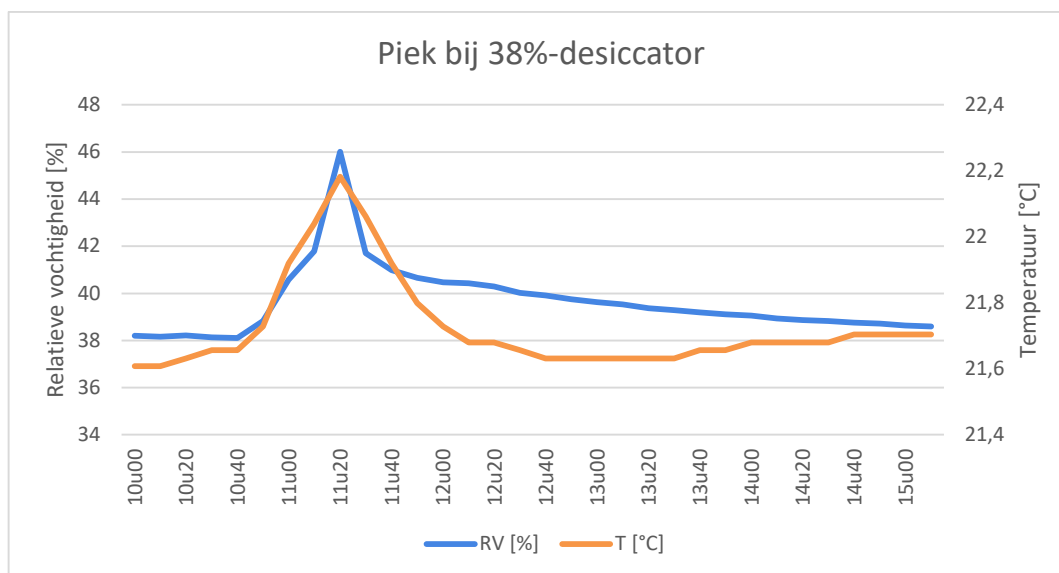
Figuur 47: Relatieve vochtigheid in desiccators gedurende de testperiode

Uit Tabel 19 blijkt dat het gemiddelde en de mediaan van de relatieve vochtigheid per box doorgaans dicht bij elkaar liggen, wat wijst op een beperkte spreiding. Opvallend is echter dat bij de box met een ingestelde RV van 33% het gemiddelde iets boven de mediaan ligt, terwijl dit bij de hogere RV's (75%, 85%, 94% en 97%) omgekeerd is. Dit duidt op een lichte scheefheid in de verdeling: respectievelijk links- en rechts-scheef. Deze scheefheid wordt verklaard door tijdelijke verstoringen tijdens het openen van de desiccators om de stalen te wegen, waarbij de interne RV kort beïnvloed wordt door de omgevingslucht (gemiddelde RV

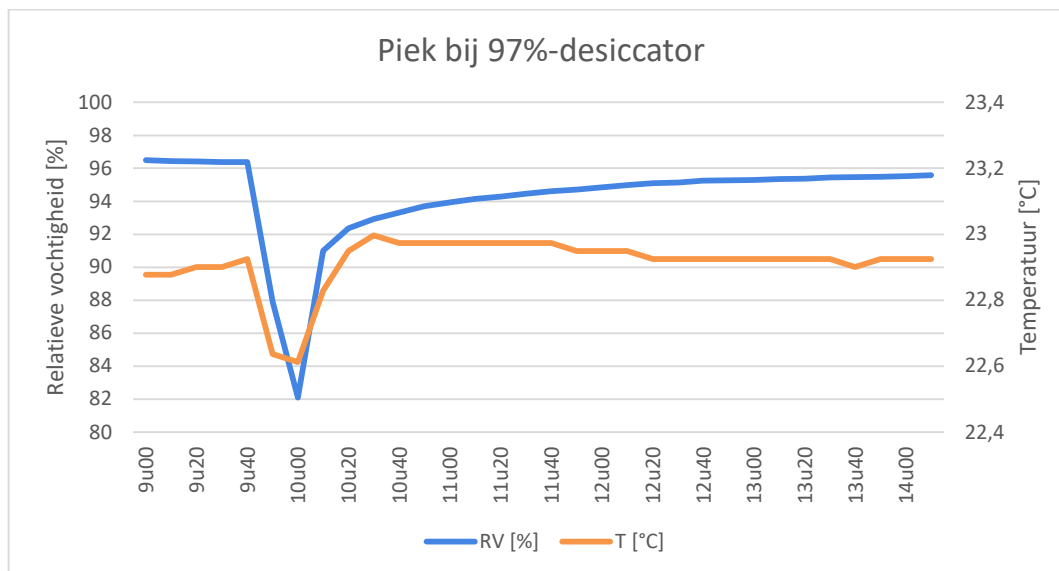
van 54,48%, zie Figuur 21: Testcondities van de kelder). Hierdoor ontstaan afwijkende meetwaarden ten opzichte van de streef-RV, zichtbaar als uitschieters in de boxplot (Figuur 47).

Uit deze resultaten blijkt bovendien dat de eerste box ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) er niet in slaagde om de beoogde RV van 33% te bereiken, ondanks een toevoeging van zouten die de theoretische oplosbaarheid ruim overschreed. Een waarschijnlijke verklaring hiervoor is dat deze box als enige was ingesteld op een RV onder het omgevingsniveau van 54,48%. Het lijkt erop dat het verlagen van de RV complexer is dan het verhogen ervan via een verzadigde zoutoplossing. De mediaan van 38% zal vanaf nu als representatieve waarde voor deze desiccator worden gebruikt.

Door het openen van de boxen voor het wegen van de stalen ontstaan verstoringen in de relatieve vochtigheid (RV), waarna deze tijd nodig heeft om opnieuw te stabiliseren. Daarom wordt aanvullend bij twee boxen onderzocht hoelang het duurt voor de RV weer binnen de toegestane afwijking van $\pm 2\%$ rond de mediaan valt, zoals voorgeschreven in de geldende norm. Dit biedt extra inzicht in het herstelgedrag van de luchtvochtigheid na het openen van de desiccator en helpt verklaren waarom de gemeten verdelingen licht asymmetrisch zijn, ondanks de overwegend stabiele omstandigheden tijdens de conditioneringsfase. Hiervoor worden de boxen met de hoogste en laagste ingestelde relatieve vochtigheid geselecteerd, vanuit de veronderstelling dat deze het langst nodig hebben om na een verstoring opnieuw te stabiliseren. De pieken die voor de desiccatoren met 38% en 97% RV kenmerkend zijn voor deze momenten, worden weergegeven in grafieken in respectievelijk Figuur 48 en Figuur 49.



Figuur 48: Piek op 24/04 bij 38%-desiccator



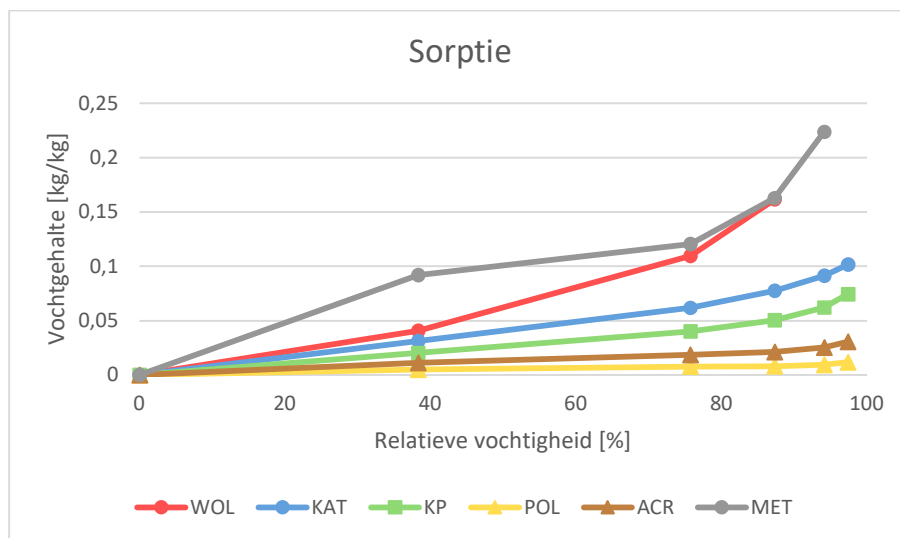
Figuur 49: Piek op 15/05 bij 97%-dessicator

Aangezien de wegingen telkens ongeveer 30 minuten in beslag nemen en de desiccators pas nadien definitief worden gesloten, kan worden aangenomen dat het ongeveer één uur duurt voordat de relatieve vochtigheid opnieuw binnen de toegelaten afwijking van $\pm 2\%$ rond de streefwaarde stabiliseert. Gedurende deze periode blijft de temperatuur steeds binnen een marge van $0,5^{\circ}\text{C}$, conform de eisen van de geldende norm. Gezien deze relatief snelle hersteltijd en het feit dat de relatieve vochtigheid buiten deze piekmomenten over het algemeen stabiel blijft, mag worden verondersteld dat deze tijdelijke verstoringen geen significante impact hebben op het algemene RV-profiel. Dit wordt ondersteund door het beperkte verschil tussen de gemiddelde en mediaan RV-waarden, zoals weergegeven in Tabel 19.

6.4.2.2 Sorptiecurven

De sorptiecurven per textielsoort vertonen onderling een sterk gelijkaardig verloop, wat het verantwoord maakt om een gemiddelde curve per textielsoort op te stellen. Omwille van tijdsbeperkingen zijn voor wol enkel gegevens beschikbaar tot en met een RV van 85%, voor Métisse tot 94%. Bij enkele andere textielsoorten was er bij 97% nog één staal dat op dat moment niet volledig geconditioneerd was. Aangezien de individuele curven binnen elke textielgroep nagenoeg identiek verlopen, kan het berekende gemiddelde van de twee andere stalen desondanks als representatief worden beschouwd. De afzonderlijke curven van elk staal zijn opgenomen in Bijlage 12.4.3.

De gemiddelde sorptiecurven (Figuur 50) tonen duidelijk onderscheid tussen natuurlijke en synthetische vezelmaterialen wat betreft hun vochtopslag. De datapunten werden ter illustratie lineair verbonden, maar om de volledige sorptiecurve te bepalen op basis van experimentele data bestaan er wiskundige modellen zoals het GAB-model (Blahovec & Yanniotis, 2008).



Figuur 50: Sorptiecurven van de isolatiestalen

De synthetische materialen vertonen met hun lage hygroscopische gevoeligheid slechts beperkte toename in vochtgehalte bij toenemende relatieve vochtigheid. Dit maakt dergelijke materialen minder geschikt voor passieve vochtregulatie, maar potentieel wel stabiel in omgevingen met een voortdurend hoge luchtvochtigheid. Doordat ze slechts in beperkte mate vocht absorberen, is het risico op degradatie of verlies aan isolerende werking kleiner, wat deze materialen geschikt maakt voor toepassingen waar vochtbestendigheid primeert op vochtbufferend vermogen.

De natuurlijke materialen vertonen door hun hygroscopisch karakter een duidelijk hogere vochtopname bij toenemende relatieve vochtigheid. Deze eigenschap maakt hen geschikt voor toepassing in de binnenomgeving waar passieve regulatie van de luchtvochtigheid gewenst is. Door hun vermogen om vocht uit de lucht op te nemen en weer af te staan, dragen zij bij aan een stabiel binnenklimaat. Vooral bij schommelingen in RV kunnen deze materialen tijdelijke pieken effectief bufferen, waardoor ze bijdragen aan het comfort en de duurzaamheid van het gebouw. De mate van vochttopslag blijkt hierbij bovendien sterk afhankelijk van zowel het vezeltype als de verwerkingswijze van het textielmateriaal. Opmerkelijk is het verschil in vochtopname tussen katoen en Métisse, ondanks dat ze allebei uit katoenvezels bestaan. De aanzienlijk hogere opname bij Métisse wijst mogelijks op de invloed van het vervezelingsproces op het sorptiegedrag. Terwijl het katoen in dit onderzoek afkomstig is van een zachte, gecontroleerde recyclage via Purfi-technologie, werden de vezels in Métisse onderworpen aan een intensievere mechanische behandeling (S. Bailly & P. Hugo, persoonlijke communicatie, 23 december 2024). Deze grovere verwerking verhoogt vermoedelijk de oppervlakteruwheid en de specifieke oppervlakte van de vezels, wat zowel de initiële vochtopname als de capillaire werking bevordert. Daarnaast kan ook het type bindmiddel een rol spelen, waarbij respectievelijk polyester bij Métisse en PLA bij de katoenisolatie wordt toegepast. Aangezien er dus meerdere factoren aan de oorsprong van het verschil in vochttopslag kunnen liggen, kunnen hierover slechts hypothesen worden geformuleerd.

De gemengde katoen/polyester-blend vertoont een gemiddeld gedrag, met vochtopnames die zich positioneren tussen die van de zuiver natuurlijke en synthetische materialen. Dit suggereert dat vezelmengsels het potentieel hebben om eigenschappen van beide vezeltypes te combineren. Dergelijke combinaties zouden in verdere studies meer in detail onderzocht kunnen worden om het optimale evenwicht te vinden tussen vochtregulatie, stabiliteit en mechanische prestaties.

Hoewel de gegevens bij hogere RV's (94% en 97%) voor een aantal stalen nog ontbreken, geven de reeds beschikbare meetpunten een duidelijk indicatief beeld van de hygrische prestaties. Op 21/05/2025 werden de metingen binnen het kader van deze thesis stopgezet. Echter worden de gegevens verder verzameld, maar dit valt buiten het bestek van dit eindwerk. In een later stadium worden ook desorptiecurves opgesteld om het vochtbufferend vermogen bij droging te karakteriseren. De voorlopige resultaten onderstrepen alvast het belang van vezeltype en verwerkingswijze bij het ontwerpen van vochtregulerende biogebaseerde isolatiematerialen.

6.5 Conclusie bouwfysische prestaties

6.5.1 Conclusie onderzoeksvraag 3

In welke mate benaderen de zelf ontwikkelde isolatiematerialen de prestaties van Métisse?

Uit de hygrothermische testen blijkt dat de zelfgeproduceerde isolatiematerialen op verschillende vlakken vergelijkbaar presteren met het commerciële referentiemateriaal Métisse:

- De **densiteit** van de zelfgeproduceerde materialen bedraagt gemiddeld circa 20 kg/m³, tegenover 25 kg/m³ voor Métisse.
- Ondanks deze lichte variatie in massadichtheid, liggen de **thermische eigenschappen** van de materialen dicht bij elkaar: de gemeten λ -waarden van de zelfgeproduceerde materialen schommelen rond die van Métisse, wat wijst op een gelijkaardige warmtegeleidingscoëfficiënt en dus een vergelijkbare isolatiewaarde.
- Op vlak van **vochttransport** worden echter meer uitgesproken verschillen vastgesteld.
 - **Métisse** heeft de hoogste waterabsorptiecoëfficiënt, met een hoge initiële opname en een aanhoudend stijgende curve tot (na) 48 uur.
 - Hoewel Métisse als isolatie op basis van natuurlijke vezels kan beschouwd worden, is er een verschil te zien met de **natuurlijke materialen** die in dit onderzoek zelf ontwikkeld werden. Hierbij is eveneens een gestage vochtabsorptie met een toenemende opname te zien, alleen treedt hier na enige tijd wel afvlakking op.
 - De zelfgeproduceerde **synthetische materialen** daarentegen vertonen een grote initiële vochtopname, waarna de opname echter zeer snel afvlakt.
- Wat betreft **sorptie** zijn de zelfgeproduceerde materialen over het algemeen minder gevoelig aan stijgende RV dan Métisse.

Samenvattend tonen de resultaten aan dat de onderzochte zelfgeproduceerde isolatiematerialen, ondanks hun uiteenlopende samenstellingen, op thermisch vlak vergelijkbare prestaties leveren in vergelijking met Métisse. Op hygrisch vlak nemen de stalen minder vocht op dan Métisse, waarbij de synthetische materialen minder gevoelig zijn voor vochtopname dan de natuurlijke materialen. Deze bevindingen ondersteunen de potentie van zowel natuurlijke als synthetische materialen als volwaardige alternatieven binnen duurzaam bouwen.

6.5.2 Conclusie onderzoeksvraag 4

Kan deze circulaire isolatie op basis van alternatieve textielvezels beschouwd worden als een geschikte optie voor de toepassing als bouwisolatie?

Wat betreft **warmtegeleiding** presteren alle beschouwde materialen gunstig als isolatiemateriaal. Hun λ -waarden liggen binnen het gebied van 0,036-0,042 W/mK, wat overeenkomt met de waarden die in Tabel 3 werden opgelijst voor bestaande biogebaseerde isolatiematerialen.

Het **waterabsorptiegedrag** van isolatiematerialen speelt een essentiële rol in hun geschiktheid voor specifieke bouwtoepassingen. Op basis van de gemeten waterabsorptiecoëfficiënten en het verloop van de capillaire opname doorheen de tijd, kan een onderscheid worden gemaakt tussen materialen die snel verzadigen en materialen die over een langere periode vocht blijven opnemen. Deze karakteristieken bepalen in belangrijke mate of een materiaal geschikt is voor duurzame, technisch verantwoorde en gezonde bouwconstructies.

- De resulterende absorptiecurves tonen aan dat **synthetische materialen** zoals polyester en acryl een snelle initiële wateropname vertonen, waarna de absorptie vrijwel onmiddellijk afvlakt. Dit suggereert dat deze materialen voornamelijk vocht opnemen in de zones die direct in contact staan met water, met een beperkte capillaire opstijging naar de verdere delen van het materiaal. Hoewel deze eigenschap voordelig kan zijn in toepassingen waar incidenteel vochtcontact mogelijk is, rijst de vraag in welke mate deze materialen het opgenomen water ook weer kunnen afgeven. Bij herhaalde of langdurige vochtbelasting bestaat het risico dat het materiaal progressief meer water absorbeert zonder voldoende te kunnen uitdrogen. Hiervoor is echter bijkomend onderzoek vereist, bijvoorbeeld via dynamische simulaties.
- **Materialen op basis van natuurlijke vezels**, zoals katoen, wol en blends, vertonen daarentegen een meer geleidelijke vochtopname, waarbij de capillaire opname over langere tijd voortduurt. Dit duidt op een groter vermogen tot intern vochttransport, wat in bepaalde bouwcontexten zowel een voor- als nadeel kan zijn. Enerzijds kan de spreiding van vocht over een groter volume verdamping bevorderen, anderzijds kan het leiden tot een hoger vochtgehalte, met mogelijke gevolgen voor thermische prestaties of biologische degradatie.

Voor toepassingen in gevels en andere buitenschilconstructies, waar regeninslag en condensatie een rol kunnen spelen, verdienen materialen met een lage waterabsorptiecoëfficiënt en een beperkte totale vochtopname dan ook de voorkeur. Tegelijk

onderstreept dit het belang van een correcte plaatsing en bescherming van isolatiematerialen in vochtgevoelige bouwdelen, ongeacht hun samenstelling.

Op vlak van **sorptie** blijkt dat de natuurlijke materialen aanzienlijk meer vocht kunnen opnemen uit de omgevingslucht dan synthetische varianten. In dampopen binnenwanden, waar vochtbuffering en een stabiel, gezond binnenklimaat cruciaal zijn, bieden deze materialen belangrijke voordelen. Door hun hygroscopische aard kunnen ze tijdelijke schommelingen in relatieve luchtvochtigheid opvangen en het opgenomen vocht op een later moment weer afgeven, wat bijdraagt aan een gebalanceerd binnenklimaat en verminderd risico op condensatie. Dit dient echter nog bevestigd te worden door desorptiecurven van de materialen. Voor toepassingen in buitenmuren of vochtige omgevingen, waar langdurige blootstelling aan hoge luchtvochtigheid of waterinslag mogelijk is, zijn synthetische materialen dan weer geschikter. Hun evenwichtsvochtgehaltes maken hen minder gevoelig voor vochtaccumulatie, waardoor ze beter bestand zijn tegen schimmelvorming en degradatie onder natte omstandigheden.

Samengevat kan dus gezegd worden dat de geschiktheid van de ontwikkelde isolatiematerialen sterk afhangt van de bouwfysische context waarin ze toegepast worden. Een doordachte materiaalkeuze vereist daarom steeds een integrale beoordeling van zowel het waterabsorptie- en sorptiegedrag, als de geplande opbouw van de constructie.

7 Discussie

Dit onderzoek toont aan dat het hergebruik van afgedankte kledij in combinatie met een biogebaseerd bindmiddel zoals PLA, via een thermisch bindingsproces, een technisch haalbaar alternatief biedt voor conventionele isolatiematerialen. Niettemin zijn er bij een mogelijke **opschaling van het productieproces naar industriële schaal diverse uitdagingen en randvoorwaarden** waarmee rekening moet worden gehouden.

- Een eerste belangrijke overweging betreft het mechanisch voorbereiden van de textielvezels. In dit onderzoek werd gebruikgemaakt van een manuele borsteling om de vezels voldoende te vermengen, maar deze methode is zeer tijdsintensief en daardoor ongeschikt voor grootschalige productie. Bij opschaling is het noodzakelijk om gebruik te maken van industriële kaardmachines die een meer efficiënte, uniforme en reproduceerbare vezelverdeling kunnen garanderen. De keuze van geschikte vezelverwerkingstechnologieën zal een directe invloed hebben op zowel de productkwaliteit als de productiecapaciteit.
- Daarnaast dienen de dimensionele vereisten van commerciële isolatiematten in rekening te worden gebracht. Flexibele isolatieproducten zoals die van Métisse hebben doorgaans een standaardbreedte tussen van 45 of 60 cm en een lengte van 120 cm. Om compatibiliteit met bestaande bouwtoepassingen te verzekeren, moet het productieproces worden aangepast aan deze formaten. Dit impliceert de ontwikkeling van grotere en bij voorkeur modulaire (aluminium) mallen die het mogelijk maken om isolatiepanelen op industriële schaal te verhitten met een consistente dikte en dichtheid.
- Daarnaast kunnen grotere afmetingen ook invloed hebben op de testresultaten: zo kan een groter volume leiden tot meer vochttransport, wat zowel de thermische als hygrische prestaties van het materiaal kan beïnvloeden.

Hoewel bij de uitvoering van de metingen zoveel mogelijk werd aangesloten bij gestandaardiseerde testmethoden, was het in de praktijk **niet steeds mogelijk om de geldende normen volledig te volgen**. Deze uitdagingen zijn enerzijds te wijten aan de aard van het onderzoek, waarbij gebruik werd gemaakt van zelfgeproduceerde materialen en anderzijds aan de beschikbare tijd en middelen. De bekomen resultaten dienen dan ook beschouwd te worden als indicatief en niet als officieel genormeerde waarden. Verder werden in dit onderzoek geen experimenten uitgevoerd voor de begroting van de brandveiligheid, hoewel dit een cruciale vereiste is binnen de bouwsector. Commerciële textielisolatieproducten zoals Métisse behalen momenteel brandklasse E volgens de geldende Europese normen. Om de markttoepassing van het hier ontwikkelde materiaal te kunnen onderbouwen, dient aanvullend onderzoek te worden uitgevoerd naar het

brandgedrag van de geproduceerde matten. Maatregelen zoals het toevoegen van brandvertragende additieven kunnen daarbij nodig zijn. Daarnaast is ook de biologische stabiliteit van het materiaal een niet te verwaarlozen aspect. Textielmateriaal dat in bouwconstructies wordt toegepast, moet resistent zijn tegen schimmels en micro-organismen om degradatie te voorkomen en de binnenluchtkwaliteit niet negatief te beïnvloeden. Métisse is gecertificeerd als schimmelresistent (klasse 0), maar de ontwikkelde prototypes werden op dit punt niet geëvalueerd. **Verdere testen** met betrekking tot microbiële resistentie en duurzaamheid onder realistische klimaatomstandigheden zijn dan ook aangewezen.

Een ander belangrijk punt betreft de **grondstofvoorziening**.

- In dit onderzoek werd gebruikgemaakt van vezels afkomstig van Purfi, een bedrijf dat deze gerecycleerde vezels normaliter inzet voor het vervaardigen van nieuwe kleding. Bij een opschaling van de textielisolatieproductie is het essentieel om na te gaan of er sprake is van grondstofconcurrentie. Het hergebruik van hoogwaardige gerecycleerde vezels voor isolatie mag de beschikbaarheid voor circulaire textieltoepassingen in de mode-industrie niet onder druk zetten. Een geïntegreerde ketenvisie is daarom noodzakelijk, waarbij de soort en de kwaliteit van het ingezamelde textiel worden afgestemd op de beoogde eindtoepassing.
- Ook de kost speelt mee: PLA is momenteel duurder dan traditionele bindmiddelen. In dit onderzoek werd het bindmiddelgehalte al teruggebracht tot 15%. Voor vormvastere materialen zoals wol, katoen en de blend is een verdere verlaging tot 10% misschien ook mogelijk. Bij de synthetische vezels bleek de vormvastheid echter minder goed, waarbij het risico zou ontstaan dat de materialen uit elkaar zouden vallen bij hantering indien het bindmiddelgehalte hier nog verder zou verlaagd worden. De impact van PLA op de materiaaleigenschappen is moeilijk te isoleren door het ontbreken van een geschikt referentieproduct. Hoewel de katoenisolatie inhoudelijk het dichtst bij Métisse komt, blijven er verschillen in vezelverwerking, type katoen en densiteit. Een directe vergelijking is daardoor lastig, maar PLA blijkt in ieder geval wel geschikt als bindmiddel voor de productie van isolatiematten.

Tot slot dient bij het promoten van textielrecyclage voor isolatiedoeleinden gewaakt te worden voor het ontstaan van een vals gevoel van ecologische compensatie. Het feit dat kleding kan worden hergebruikt in bouwtoepassingen, mag niet als excuus dienen om de huidige lineaire consumptiepatronen in de kledingindustrie in stand te houden. **De kern van een duurzame textielketen blijft het vermijden van overproductie en overconsumptie van goedkope en weinig duurzame kleding.** Textielrecyclage moet worden ingebed in een bredere strategie gericht op efficiëntie, waarbij het bewust omgaan met grondstoffen vooropstaat.

8 Algemene conclusie

De bouwsector staat voor grote ecologische uitdagingen en de zoektocht naar duurzame, circulaire materialen is urgenter dan ooit. In deze masterproef werd onderzocht in hoeverre afgedankte kleding, verwerkt tot textielvezels en gebonden met een biogebaseerd PLA-bindmiddel, kan dienen als grondstof voor kwalitatieve isolatiematerialen. De ambitie van het onderzoek was dubbel: enerzijds het ontwikkelen van een technisch haalbaar, reproduceerbaar productieproces voor flexibele isolatiematten, anderzijds het beoordelen van de prestaties van deze materialen in vergelijking met bestaande alternatieven, met bijzondere aandacht voor hun hygrothermisch gedrag.

- **Ontwikkeling van een productieproces**

Het productieproces vertrok van vijf textieltypes (katoen, polyester, katoen/polyesterblend, wol en acryl) die thermisch werden gebonden met PLA. Experimenten toonden aan dat PLA, ondanks afwijkende smelteigenschappen ten opzichte van traditionele bindmiddelen, een betrouwbare vezelverbinding mogelijk maakt. Door een nauwkeurige afstemming van temperatuur, verhittingstijd en malconfiguratie werd een vormvaste structuur bekomen. De PLA-fractie werd tot 15% gereduceerd om de kostprijs te beperken. Voor alle textieltypes werd een gestandaardiseerde, reproduceerbare methodiek ontwikkeld, geschikt voor opschaling, mits herbeoordeling van de procesparameters (zie Tabel 5).

Daarnaast draagt PLA bij aan de milieuvriendelijkheid van het materiaal, aangezien het afkomstig is van hernieuwbare grondstoffen en industrieel biologisch afbreekbaar is. Dit maakt het concept compatibel met circulaire en biogebaseerde bouwprincipes.

- **Bouwfysische prestaties**

Wat de prestaties betreft, tonen de ontwikkelde isolatiematerialen gunstige eigenschappen voor de toepassing in de bouwsector.

- De gedeclareerde λ -waarden liggen in een grootteorde van 0,037-0,041 W/mK, wat bevestigt dat de isolerende waarde van deze materialen gunstig is.

Op vlak van vloeibaar water- en damptransport is het belangrijk om de materialen in de juiste bouwfysische context te plaatsen om de toepassing ervan optimaal te laten zijn.

- Het capillair gedrag verschilt naargelang het type vezel. Synthetische materialen vertonen een snelle initiële wateropname met beperkte capillaire werking en snelle verzadiging, wat duidt op geringe interne vochtverdeling. Natuurlijke materialen absorberen vocht trager maar aanhoudend, met uitgesproken capillair transport en grotere interne vochtspreiding, wat zowel verdamping bevordert als risico's op vochtaccumulatie inhoudt.
- Ook in het sorptiegedrag kan een onderscheid worden gemaakt tussen beide soorten. Natuurlijke materialen vertonen door hun hygroscopisch karakter een hoge sorptiecapaciteit, synthetische materialen nemen daarentegen minder vocht op uit de lucht.

De zelfgeproduceerde materialen presteren over het algemeen beter dan het commercieel verkrijgbare Métisse, al kunnen deze verschillen niet aan één factor worden toegeschreven. Mogelijke verklaringen zijn variaties in staaldikte, massadichtheid, het gebruikte bindmiddel (PLA versus polyester) en vezelverwerking.

Wol blijkt de meest gunstige eigenschappen te bezitten, met lage thermische geleidbaarheid, beperkte waterabsorptie en goed vochtregulerend vermogen. Ook de katoen/polyester-blend presteert sterk, met een betere warmteweerstand dan de zuivere varianten ervan en gematigde vochttransporteigenschappen. Deze balans maakt de blend geschikt voor diverse toepassingen. Gezien de recyclage-uitdagingen van gemengde vezels, verhoogt dergelijke functionele inzetbaarheid de duurzaamheid van deze reststromen.

Deze masterproef toont daarmee aan dat het technisch en ecologisch mogelijk is om textielafval te transformeren tot een functioneel isolatiemateriaal met goede hygrothermische eigenschappen. Het voorgestelde productieproces en de geproduceerde materialen vormen een veelbelovende stap richting circulair bouwen waarbij afval niet langer een eindpunt is, maar een begin van nieuwe toepassingen.

Hoewel het onderzoek veelbelovende resultaten opleverde, blijven er enkele belangrijke aandachtspunten, zoals reeds besproken in deel 7: Discussie. Zo is de huidige, kleinschalige productiemethode met manuele menging en kleine mallen niet geschikt voor industriële opschaling. Daarnaast ontbreekt nog cruciale informatie om de toepasbaarheid binnen gangbare bouwsystemen overtuigend aan te tonen. Verdere investeringen in onderzoek, standaardisering en regelgeving zullen echter noodzakelijk zijn om deze materialen ook effectief ingang te doen vinden in de bouwpraktijk.

9 Maatschappelijke reflectie

De bouwsector bevindt zich op een kruispunt van ingrijpende transitie, met duurzaamheid en circulaire economie als centrale uitgangspunten voor de toekomst. De sector is immers verantwoordelijk voor een aanzienlijk deel van het grondstoffenverbruik, de afvalproductie en de CO₂-uitstoot wereldwijd. Binnen dit kader vormt de zoektocht naar innovatieve materialen die niet alleen performant, maar ook milieuvriendelijk zijn, een cruciale maatschappelijke uitdaging. Deze masterproef sluit nauw aan bij deze urgente maatschappelijke noden door te onderzoeken of afgedankte kleding als een steeds toenemende reststroom binnen onze lineaire textielketen kan worden ingezet als grondstof voor circulaire isolatiematerialen.

Het herdenken van afval als potentiële grondstof past binnen het bredere maatschappelijke streven naar circulair materiaalgebruik. De keuze om textielafval, en meer specifiek post-consumptiekleding, als uitgangspunt te nemen, draagt bij aan een bewustwording van de problematiek rond fast fashion en de korte levenscyclus van kledingstukken. Tegelijkertijd wordt vermeden dat hoogwaardige textielstromen uit de recyclageketen worden onttrokken, aangezien enkel materiaal dient te worden ingezet dat niet meer in aanmerking komt voor hergebruik of hoogwaardige recyclage (bijvoorbeeld voor blends die moeilijk te recycleren zijn). Dit wijst op een ethisch verantwoorde omgang met grondstoffen, waarbij een reststroom pas wordt ingezet als grondstof voor laagwaardige toepassingen wanneer de hergebruikhiërarchie dit toelaat.

De methodologische keuze voor PLA als bindmiddel verdient eveneens maatschappelijke duiding. Waar conventionele synthetische bindmiddelen vaak fossiel-gebaseerd zijn, biedt PLA als biogebaseerde en onder specifieke omstandigheden biodegradeerbare materiaal, een ecologisch aantrekkelijker alternatief. De integratie van een biopolymeer draagt bij aan een reductie van de ecologische voetafdruk van het eindproduct, zonder aan technische haalbaarheid in te boeten. Hiermee wordt aangetoond dat performantie en duurzaamheid geen tegengestelde polen hoeven te zijn.

Toch is het belangrijk te erkennen dat de maatschappelijke waarde van dit onderzoek niet uitsluitend ligt in het technische potentieel van het materiaal. Het brengt eveneens belangrijke ethische en systeemgebonden vragen naar voren. Zo moet gewaakt worden over het risico dat circulaire innovaties zoals deze gebruikt worden als legitimering voor de overproductie in de textielindustrie. Het verwerken van kledingafval tot isolatiemateriaal mag geen substituuat worden voor noodzakelijke veranderingen in productie- en consumptiegedrag. Circulaire technologieën kunnen enkel succesvol zijn als ze ingebed worden in een bredere systeemverandering die inzet op efficiëntie, verlengde productlevensduur en een verantwoorde omgang met materialen.

Ten slotte werpt dit onderzoek ook licht op de sociale dimensie van circulair bouwen. Door gebruik te maken van lokaal beschikbaar afvalmateriaal ontstaat het potentieel om productieprocessen te decentraliseren en in te bedden in lokale contexten. Dit kan bijdragen aan nieuwe vormen van lokale waardecreatie wanneer gekozen wordt voor manuele of kleinschalige verwerkingsmethoden. Bovendien toont een eenvoudige rekensom aan dat de beschikbaarheid van grondstoffen geen onoverkomelijke drempel hoeft te zijn: een gemiddeld gezin van vier personen zou naar schatting na 10 jaar genoeg afgedankte kledij hebben verzameld om hun eigen woning mee te isoleren. Uiteraard hangen hier nog heel wat voorwaarden en uitdagingen aan vast, maar dit versterkt toch het idee dat circulaire bouwmaterialen niet alleen een industriële ambitie zijn, maar ook op kleinere, lokale schaal gerealiseerd kunnen worden in samenwerking met of zelfs door eindgebruikers zelf.

Samengevat toont dit onderzoek aan dat technische innovatie en maatschappelijke relevantie hand in hand kunnen gaan. Door textielafval te valoriseren binnen een circulair en potentieel lokaal productieproces, draagt deze masterproef bij aan een duurzamer, ethischer en inclusiever bouwmodel.

10 Gebruik van AI

Tijdens het uitvoeren van deze masterproef werd gebruikgemaakt van artificiële intelligentie in de vorm van ChatGPT, ter ondersteuning van verschillende onderdelen van het onderzoek. Hoewel het zeker geen vervanging is voor kritisch denken of inhoudelijke kennis, heeft het wel geholpen om het proces efficiënter en vlotter te laten verlopen.

Een belangrijk onderdeel waarbij ChatGPT werd ingezet, was het herschrijven van teksten. De inhoud van deze teksten was steeds zelf geschreven, maar werd met behulp van AI omgezet naar een meer wetenschappelijke schrijfstijl. Zo werden zinnen geherformuleerd om beter aan te sluiten bij de stijl die in academische publicaties gebruikelijk is, zonder dat de betekenis of inhoud ervan verloren ging.

Verder werd de AI-tool gebruikt om te helpen bij het uitvoeren van technische berekeningen. Zo werd het bijvoorbeeld ingezet om de juiste hoeveelheden vezels te bepalen voor mengsels, of om uit te rekenen hoeveel zouten nodig waren voor de sorptieproeven. Door deze berekeningen op een correcte manier uit te voeren, kon het risico op fouten verkleind worden, wat bijdroeg aan de nauwkeurigheid van het onderzoek.

Kortom, artificiële intelligentie speelde in deze masterproef een ondersteunende rol bij het schrijven, rekenen en voorbereiden. Het was geen vervanging voor het eigen denkwerk, maar wel een nuttig hulpmiddel dat bijdroeg aan de kwaliteit van het onderzoek. De gegenereerde informatie werd hierbij steeds kritisch geëvalueerd en waar mogelijk geverifieerd op juistheid, zodat de inhoud betrouwbaar en onderbouwd bleef.

11 Referentielijst

- Aguilar Del Bosque, V., Ibañez Garcia, N., & Del Bosque Lesmes, I. (2024). *Thermal and/or acoustic insulating non-woven textile material and manufacturing process*. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/089984404/publication/ES2959711A1?q=ES2959711A1>
- Angelotti, A., Alongi, A., Augello, A., Dama, A., De Antonellis, S., Ravidà, A., Zinzi, M., & De Angelis, E. (2024). Thermal conductivity assessment of cotton fibers from apparel recycling for building insulation. *Energy and Buildings*, 324. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2024.114866>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1–17. <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2015.05.002>
- Belga. (2025). *We kopen meer kleren, schoenen en ander textiel dan ooit tevoren: jaarlijks gemiddeld 19 kilogram per persoon*. [https://www.hln.be/nieuws/we-kopen-meer-kleren-schoenen-en-ander-textiel-dan-ooit-tevoren-jaarlijks-gemiddeld-19-kilogram-per-persoon~a99f4227/#:~:text=%C2%A9%20ThinkStock-,We%20kopen%20meer%20kleren%2C%20schoenen%20en%20ander%20textiel%20dan%20ooit,het%20Europees%20Milieuagentschap%20\(EEA\).](https://www.hln.be/nieuws/we-kopen-meer-kleren-schoenen-en-ander-textiel-dan-ooit-tevoren-jaarlijks-gemiddeld-19-kilogram-per-persoon~a99f4227/#:~:text=%C2%A9%20ThinkStock-,We%20kopen%20meer%20kleren%2C%20schoenen%20en%20ander%20textiel%20dan%20ooit,het%20Europees%20Milieuagentschap%20(EEA).)
- Bello, D., Herrick, C. A., Smith, T. J., Woskie, S. R., Streicher, R. P., Cullen, M. R., Liu, Y., & Redlich, C. A. (2007). Skin exposure to isocyanates: Reasons for concern. *Environmental Health Perspectives*, 115(3), 328–335. <https://doi.org/10.1289/EHP.9557/ASSET/6E9AF336-AA13-4850-A9EA-C2CC91C130D1/ASSETS/GRAPHIC/EHP0115-000328F1.JPG>
- Bennett, T. M., Allan, J. F., Garden, J. A., & Shaver, M. P. (2022). Low Formaldehyde Binders for Mineral Wool Insulation: A Review. *Global Challenges*, 6(4), 2100110. <https://doi.org/10.1002/GCH2.202100110>
- Bick, R., Halsey, E., & Ekenga, C. C. (2018). The global environmental injustice of fast fashion. *Environmental Health*, 17(1), 92. <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0433-7>
- Biesbroeck, K. (z.d.). De perfecte Isolatie. *Sofalca*. Geraadpleegd 18 februari 2025, van www.sofalca.pt

- Blaazer, E. (2023, april 13). Van vezel tot kledingstuk. *FashionUnited*. <https://fashionunited.nl/nieuws/achtergrond/van-vezel-tot-kledingstuk/2023041356914>
- Blahovec, J., & Yanniotis, S. (2008). GAB Generalized Equation for Sorption Phenomena. *Food and Bioprocess Technology*, 1(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1007/s11947-007-0012-3>
- Blondin, O. (2024). *Four Reasons to Stop Shopping Fast Fashion*. <https://business.catholic.edu/news/2024/04/four-reasons-to-stop-shopping-fast-fashion.html#:~:text=image%20source-,End%20up%20in%20Landfills,of%20the%20world's%20carbon%20emissions.&text=Post%2Dproduction%2C%20the%20majority%20of,clothing%20is%20landfilled%20or%20incinerated.>
- Bouwen aan Vlaanderen. (2020). *Eerste grootschalig Belgisch project met luchtzuiverende gevelverf bij winkelketen OKay*. https://bouwenaanvlaanderen.be/algemeen/eerste-grootschalig-belgisch-project-met-luchtzuiverende-gevelverf-bij-winkelketen-okay/?utm_source=chatgpt.com
- Braeckman, B., De Cock, N., & Drugmand, K. (1987). *Thermisch en hygrisch gedrag van bouwconstructies*. Braeckman, Benoît.
- Calcabrini, A., Dodds, N., Edwards, R., Gustavsson, A. V., & Mathieu, L. (2020). “Free Returns” - Reducing Returns in the Online Fashion Industry.
- Cali, H. (2024, oktober 22). *Circulaire bouwmaterialen: de toekomst van duurzaam onderhouden en renoveren*. <https://www.vanson-onderhoud.nl/2024/10/circulaire-bouwmaterialen/#:~:text=Circulaire%20bouwmaterialen%20zijn%20ontworpen%20om,en%20daarna%20als%20afval%20eindigen.>
- Chen, L., Caro, F., Corbett, C. J., & Ding, X. (2019). Estimating the environmental and economic impacts of widespread adoption of potential technology solutions to reduce water use and pollution: Application to China's textile industry. *Environmental Impact Assessment Review*, 79, 106293. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2019.106293>
- Claude, V., Charron, S., & Michaux, B. (2024). *Praktische gids over biogebaseerde/gerecycleerde isolatiematerialen en hun uitvoering*. (47). https://www.buildwise.be/nl/publicaties/innovation-papers/47/?utm_source=chatgpt.com

- Constable, H. (z.d.). Your brand new returns end up in landfill. *BBC Earth*. Geraadpleegd 15 mei 2025, van <https://www.bbcearth.com/news/your-brand-new-returns-end-up-in-landfill>
- Cosentino, L., Fernandes, J., & Mateus, R. (2023). A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 4676, 16(12), 4676. <https://doi.org/10.3390/EN16124676>
- Dahiya, S., Katakojwala, R., Ramakrishna, S., & Mohan, & S. V. (2020). Biobased Products and Life Cycle Assessment in the Context of Circular Economy and Sustainability. *Materials Circular Economy* 2020 2:1, 2(1), 1–28. <https://doi.org/10.1007/S42824-020-00007-X>
- Dams, B., Maskell, D., Shea, A., Allen, S., Cascione, V., & Walker, P. (2023). Upscaling bio-based construction: challenges and opportunities. *Building Research & Information*, 51(7), 764–782. <https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2204414>
- Dasdemir, M., Maze, B., Anantharamaiah, N., & Pourdeyhimi, B. (2011). Formation of novel thermoplastic composites using bicomponent nonwovens as a precursor. *Journal of Materials Science*, 46(10), 3269–3281. <https://doi.org/10.1007/S10853-010-5214-9/FIGURES/13>
- Decon, H. (2022, januari 21). *Low melt polyester fiber*. <https://www.polyestermfg.com/low-melt-fiber/>
- Demirci, E. (2011). *Mechanical behaviour of thermally bonded bicomponent fibre nonwovens: experimental analysis and numerical modelling*. Loughborough University.
- Departement Omgeving. (z.d.). *Zitten er gevaarlijke isocyanaten in polyurethaan-isolatiemateriaal?* Geraadpleegd 11 maart 2025, van <https://omgeving.vlaanderen.be/nl/klimaat-en-milieu/gezonde-veilige-en-aantrekkelijke-leefomgeving/bouw-gezond/veelgestelde-vragen-over-gezond-bouwen/zitten-er-gevaarlijke-isocyanaten-in-polyurethaan-isolatiemateriaal>
- Deweert, S., & Wijnant, V. (2023). *Het drogingspotentieel van biogebaseerde isolatiematerialen in geval van accidentele waterinfiltratie: analyse aan de hand van in situ metingen en numerieke HAM-simulaties*.
- Diethelm, E. (2022). *Glaswol of steenwol: wat zijn de belangrijkste verschillen?* <https://vloerisolatie.nl/glaswol-of-steenwol-belangrijkste-verschillen/>
- Eco-logisch. (z.d.). *Biobased bouwen*.

- Eurabo. (z.d.-a). *Houtvezelisolatie*. Geraadpleegd 12 december 2024, van <https://www.eurabo.be/nl/lexicon/houtvezelisolatie>
- Eurabo. (z.d.-b). *Métisse katoenisolatie*. Geraadpleegd 24 februari 2025, van <https://www.eurabo.be/nl/producten/metisse-katoenisolatie>
- Eurabo. (z.d.-c). *Vochtbufferend*. Geraadpleegd 20 december 2024, van <https://www.eurabo.be/nl/lexicon/vochtbufferende-of-vochtregulerende-isolatie>
- Garmin, W. (2023, september 1). *De wisselwerking tussen de bouwsector en het klimaat in vier thema's*. CG Concept.
- Gereedschapskist. (z.d.). *Productie en oogst van duurzame grondstoffen in het bos*.
- Ghazi Wakili, K., Binder, B., & Vonbank, R. (2003). A simple method to determine the specific heat capacity of thermal insulations used in building construction. *Energy and Buildings*, 35(4), 413–415. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00112-3)
- GidsDuurzaamBouwen. (z.d.). *Thermische diffusiviteit van een materiaal (α)*. Geraadpleegd 16 mei 2025, van <https://gidsduurzamegebouwen.brussels/woordenlijst/thermische-diffusiviteit-materiaal-a#:~:text=Bepaalt%20de%20snelheid%20waarmee%20de,van%20het%20materiaal%20te%20gaan>.
- Gilliams, J. (2024, oktober 15). *'Kwaliteit zo laag dat zelfs kringwinkels er niks mee kunnen aanvangen': aanbod tweedehandskleding keldert door fast fashion*. VRT NWS.
- Heinhuis, T. (z.d.). Dit is wat er echt gebeurt met kleding die je op Shein of Temu hebt gekocht. *Amayzine*. Geraadpleegd 15 mei 2025, van <https://amayzine.com/nl/2024/dit-is-wat-er-echt-gebeurt-met-kleding-die-je-op-shein-of-temu-hebt-gekocht/>
- Hens, H. (2013). *Gebouwentechiek: Vol. 1: Bouwfysica* (8ste dr.). Uitgeverij Acco.
- Hjort, K., & Lantz, B. (2016). *The impact of returns policies on profitability: A fashion e-commerce case*.
- Hufenus, R., Reifler, F. A., Maniura-Weber, K., Spierings, A., & Zinn, M. (2012). Biodegradable bicomponent fibers from renewable sources: Melt-spinning of poly(lactic acid) and poly[(3-hydroxybutyrate)-co-(3-hydroxyvalerate)]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 297(1), 75–84. <https://doi.org/10.1002/MAME.201100063>
- iCell. (z.d.). *iCell cellulose isolatie vlokken*. Geraadpleegd 15 mei 2025, van <https://www.eco-bouwmaterialen.nl/product/icell-cellulose-isolatie-vlokken/>

- Intini, F., & Kühtz, S. (2011). Recycling in buildings: An LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(4), 306–315. <https://doi.org/10.1007/S11367-011-0267-9/TABLES/10>
- Islam, S., Bhat, G., & Mani, S. (2024). Life cycle assessment of thermal insulation materials produced from waste textiles. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(2), 1071–1085. <https://doi.org/10.1007/S10163-023-01882-7/FIGURES/7>
- Isolatienoord. (z.d.-a). *Harde isolatieplaten*. Geraadpleegd 15 mei 2025, van <https://isolatienoord.nl/kennisbank/harde-isolatieplaten>
- Isolatienoord. (z.d.-b). *Katoen Isolatie | Ecologisch & milieuvriendelijk isoleren | Isolatienoord*. Geraadpleegd 2 december 2024, van <https://isolatienoord.nl/biobased-isolatie/katoen-isolatie>
- Isolatienoord. (z.d.-c). *Métisse katoenvezelplaten 1200x600x180mm Rd:4.60 3pl/pak (=2,16 m²)*. Geraadpleegd 15 mei 2025, van <https://isolatienoord.nl/metisse-katoenvezelplaten-1200x600x180mm-rd-4-60-3pl-pak-2-16-m2>
- Isolatieshop. (z.d.-a). *Cellulose Isolatie*. Geraadpleegd 12 december 2024, van <https://www.isolatiemateriaal.be/ecologische-isolatie/cellulose-isolatie>
- Isolatieshop. (z.d.-b). *Ecologische isolatie - Welke materialen kan je gebruiken?* Geraadpleegd 1 december 2024, van <https://www.isolatiemateriaal.be/kenniscentrum/ecologische-isolatie-welke-materialen-kan-je-gebruiken>
- Isolteam. (z.d.). *Kurkisolatie*. Geraadpleegd 12 december 2024, van <https://www.isolteam.be/nl/isolatiemateriaal/kurkisolatie>
- Janssen, C., van der Vaart, I., Bos, I., & Bakker, A. (2020). *Fast Fashion Onderzoek: vermindering van de negatieve impact* (pp. 1–97). <https://www.kplustv.nl/media/olbdekjs/onderzoek-fast-fashion.pdf>
- Janssens, A. (2022). *Bouwfysische Aspecten van Gebouwen*.
- Joostdevree. (z.d.-a). *dampdiffusie en dampdiffusieweerstand (Z-waarde)*.
- Joostdevree. (z.d.-b). *warmtegeleidingscoefficient lambda*. Geraadpleegd 27 november 2024, van <https://www.joostdevree.nl/shtmls/warmtegeleidingscoefficient.shtml>

- Kahoush, M., & Kadi, N. (2022). Towards sustainable textile sector: Fractionation and separation of cotton/ polyester fibers from blended textile waste. *Sustainable Materials and Technologies*, 34, Art. 34. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00513>
- Karthik, T. (2004). Novel properties of PLA fibers. *Synthetic Fibres*, 33(4), 5–10. <https://doi.org/10.1177/1558925001OS-01000308>
- Kies Biobased. (2023, oktober 6). *Dampopen Constructie: Gezond, Duurzaam en Energiezuinig*. <https://www.kiesbiobased.nl/isoleren/dampopen-bouwen/>
- Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518–2523. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.06.012>
- Kristak, L., Antov, P., Bekhta, P., Lubis, M. A. R., Iswanto, A. H., Reh, R., Sedliacik, J., Savov, V., Taghiyari, H. R., Papadopoulos, A. N., Pizzi, A., & Hejna, A. (2023). Recent progress in ultra-low formaldehyde emitting adhesive systems and formaldehyde scavengers in wood-based panels: a review. *Wood Material Science & Engineering*, 18(2), 763–782. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2056080>
- Künzel, H. M. (2022). Characteristics of Bio-based Insulation Materials. *Green Energy and Technology*, 163–175. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98693-3_6
- Lafond, C., & Blanchet, P. (2020). Technical Performance Overview of Bio-Based Insulation Materials Compared to Expanded Polystyrene. *Buildings 2020, Vol. 10, Page 81*, 10(5), 81. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS10050081>
- Lasance, P. (2025). *End aan blends?* <https://www.promowerkt.nl/nieuws/end-aan-blends/#:~:text=Blends%20zijn%20moeilijker%20te%20recyclen,upcyclen%20tot%20een%20nieuw%20kledingstuk.>
- Lawrence, M. G. (2005). The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225–234. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
- Le, D. L., Salomone, R., & Nguyen, Q. T. (2023). Circular bio-based building materials: A literature review of case studies and sustainability assessment methods. *Building and Environment*, 244, 110774. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110774>
- Le Relais. (z.d.). *Une innovation durable | Métisse*. Geraadpleegd 2 december 2024, van <https://www.isolantmetisse.com/nl/rubriques/une-innovation-durable>

- Liu, L. F., Li, H. Q., Lazzaretto, A., Manente, G., Tong, C. Y., Liu, Q. Bin, & Li, N. P. (2017). The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 912–932. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.140>
- Lopez Hurtado, P., Rouilly, A., Vandenbossche, V., & Raynaud, C. (2016). A review on the properties of cellulose fibre insulation. *Building and Environment*, 96, 170–177. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.09.031>
- Ludwiczak, J., Dmitruk, A., Skwarski, M., Kaczyński, P., & Makuła, P. (2023). UV resistance and biodegradation of PLA-based polymeric blends doped with PBS, PBAT, TPS. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 28(4), 366–382. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2023.2218696>
- Majumder, A., Canale, L., Mastino, C. C., Pacitto, A., Frattolillo, A., & Dell’isola, M. (2021). Thermal Characterization of Recycled Materials for Building Insulation. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 3564, 14(12), 3564. <https://doi.org/10.3390/EN14123564>
- May, N. (2005). *Breathability: The Key to Building Performance*.
- MilieuAdviesWinkel. (2022). *Hittebestendigheid van particuliere gebouwen*.
- Mochizuki, M., & Matsunaga, N. (2016). Bicomponent polyester fibers for nonwovens. *High-Performance and Specialty Fibers: Concepts, Technology and Modern Applications of Man-Made Fibers for the Future*, 395–408. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55203-1_25/FIGURES/9
- Molenveld, K., & Bos, H. (2019). *Biobased plastics 2019*. <https://edepot.wur.nl/464407>
- Naeimirad, M., Zadhoush, A., Kotek, R., Esmaeely Neisiany, R., Nouri Khorasani, S., & Ramakrishna, S. (2018). Recent advances in core/shell bicomponent fibers and nanofibers: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(21), 46265. <https://doi.org/10.1002/APP.46265>
- Naldzhiev, D., Mumovic, D., & Strlic, M. (2020). Polyurethane insulation and household products – A systematic review of their impact on indoor environmental quality. *Building and Environment*, 169, 106559. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106559>
- Nasir, M. H. A., Genovese, A., Acquaye, A. A., Koh, S. C. L., & Yamoah, F. (2017). Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. *International Journal of Production Economics*, 183, 443–457. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2016.06.008>

- Nazrin, A., Sapuan, S. M., & Zuhri, M. Y. M. (2020). Mechanical, physical and thermal properties of sugar palm nanocellulose reinforced thermoplastic starch (Tps)/poly (lactic acid) (pla) blend bionanocomposites. *Polymers*, 12(10), 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym12102216>
- NBN EN 1602. (2013). *Thermal insulating products for building applications - Determination of the apparent density.*
- NBN EN 12667. (2001). *Thermische eigenschappen van bouwmaterialen en -producten - Bepaling van de warmteweerstand volgens de methode met de afgeschermd 'hot plate' en de methode met warmtestroommeter - Producten met een gemiddelde en hoge warmteweerstand.*
- NBN EN 13171. (2015). *Producten voor thermische isolatie van gebouwen - Fabrieksmatig vervaardigde producten van houtvezel (WF) - Specificatie.*
- NBN EN ISO 10456. (2024). *Bouwmaterialen en bouwwaren - Hygrothermische eigenschappen - Getabelleerde ontwerpwaarden en procedures voor de bepaling van de opgegeven en nuttige thermische waarden.*
- NBN EN ISO 12571. (2021). *Hygrothermische prestaties van bouwmaterialen en -producten - Bepaling van hygroscopische sorptie-eigenschappen.*
- NBN EN ISO 12572. (2024). *Hygrothermische eigenschappen van bouwmaterialen en -producten - Bepaling van de waterdampdoorlatende eigenschappen - Cup methode - Wijziging 1.*
- NBN EN ISO 15148. (2003). *Hygrothermische eigenschappen van bouwmaterialen en -producten - Bepaling van de waterabsorptiecoëfficiënt door gedeeltelijke onderdompeling.*
- NBN EN ISO 29767. (2019). *Thermal insulation products for building applications - Determination of short-term water absorption by partial immersion.*
- NBN ISO 16269-6. (2025). *Statistical interpretation of data - Part 6: Determination of statistical tolerance intervals.*
- Neri, M., Pilotelli, M., Traversi, M., Levi, E., Piana, E. A., Bannó, M., Cuerva, E., Pujadas, P., & Guardo, A. (2021). Conversion of End-of-Life Household Materials into Building Insulating Low-Cost Solutions for the Development of Vulnerable Contexts: Review and Outlook towards a Circular and Sustainable Economy. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 4397, 13(8), 4397. <https://doi.org/10.3390/SU13084397>

- O'Brien, L., Li, L., Friess, W., Snow, J., Herzog, B., & O'Neill, S. (2025). Review of bio-based wood fiber insulation for building envelopes: Characteristics and performance assessment. *Energy and Buildings*, 328, 115114. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2024.115114>
- Osanyintola, O. F., & Simonson, C. J. (2006). Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. *Energy and Buildings*, 38(10), 1270–1282. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2006.03.026>
- Oskam, I., de Jong, M., Lepelaar, M., & ten Kate, R. (2015). *Ontwerpen met biobased plastics*. <https://www.hva.nl/binaries/content/assets/subsites/kc-techniek/publicaties/publicatie-biobased-plastics.pdf>
- Palaniappan, S. K., Chinnasamy, M., Rathanasamy, R., & Pal, S. K. (2020). Synthetic Binders for Polymer Division. *Green Adhesives: Preparation, Properties and Applications*, 227–272. <https://doi.org/10.1002/9781119655053.CH11>
- 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>
- Palumbo, M., Lacasta, A. M., Holcroft, N., Shea, A., & Walker, P. (2016). Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials. *Construction and Building Materials*, 124, 269–275. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.106>
- Patnaik, A., Mvubu, M., Muniyasamy, S., Botha, A., & Anandjiwala, R. D. (2015). Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies. *Energy and Buildings*, 92, 161–169. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.01.056>
- Peñaloza, D., Erlandsson, M., & Falk, A. (2016). Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings. *Construction and Building Materials*, 125, 219–226. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.08.041>
- Peng, W., & Riedl, B. (1995). Thermosetting Resins. *Journal of Chemical Education*, 73(7), 587–592. <https://doi.org/10.1021/ED072P587>
- Peterson, A., Wallinder, J., Bengtsson, J., Idström, A., Bialik, M., Jedvert, K., & de la Motte, H. (2022). Chemical Recycling of a Textile Blend from Polyester and Viscose, Part I: Process

- Description, Characterization, and Utilization of the Recycled Cellulose. *Sustainability*, 14(12), 7272. <https://doi.org/10.3390/su14127272>
- Platt, S. L., Walker, P., Maskell, D., Shea, A., Bacoup, F., Mahieu, A., Zmamou, H., & Gattin, R. (2023). Sustainable bio & waste resources for thermal insulation of buildings. *Construction and Building Materials*, 366, 130030. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.130030>
- Raja, P., Murugan, V., Ravichandran, S., Behera, L., Mensah, R. A., Mani, S., Kasi, A. K., Balasubramanian, K. B. N., Sas, G., Vahabi, H., & Das, O. (2023). A Review of Sustainable Bio-Based Insulation Materials for Energy-Efficient Buildings. *Macromolecular Materials and Engineering*, 308(10), 2300086. <https://doi.org/10.1002/MAME.202300086>
- Rayong, T. (2019, september 17). 75.000 ton biokunststof uit suikerriet per jaar. *Vraag & Aanbod*.
- Rode, C., Peuhkuri, R. H., Hansen, K. K., Time, B., Svennberg, K., Arfvidsson, J., & Ojanen, T. (2005). *NORDTEST Project on Moisture Buffer Value of Materials*. <https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/235442555/AIVC%20moistbuf%20revised.pdf>
- Santos, A. S., Ferreira, P. J. T., & Maloney, T. (2021). Bio-based materials for nonwovens. *Cellulose* 28:14, 28(14), 8939–8969. <https://doi.org/10.1007/S10570-021-04125-W>
- Sasikumar, U., Mundkur, S., & Athalye, A. (2023). *Strategies for Separating and Recycling Textile Blends* (6 (2); Advance in Environmental Waste Management & Recycling).
- Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988–1011. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.045>
- Schulte, M., Lewandowski, I., Pude, R., & Wagner, M. (2021). Comparative life cycle assessment of bio-based insulation materials: Environmental and economic performances. *GCB Bioenergy*, 13(6), 979–998. <https://doi.org/10.1111/GCBB.12825>
- Seifali Abbas-Abadi, M., Tomme, B., Goshayeshi, B., Mynko, O., Wang, Y., Roy, S., Kumar, R., Baruah, B., De Clerck, K., De Meester, S., D'hooge, D. R., & Van Geem, K. M. (2025). Advancing Textile Waste Recycling: Challenges and Opportunities Across Polymer and Non-Polymer Fiber Types. *Polymers*, 17(5), 628. <https://doi.org/10.3390/polym17050628>
- Sgouridis, S., Bardi, U., & Csala, D. (2015). *A Net Energy-based Analysis for a Climate-constrained Sustainable Energy Transition*. <https://arxiv.org/abs/1503.06832v1>

- Shaw, R. (2022). *Creating a Sustainable Planet: How Fast Fashion is Contributing to Textile Waste*.
- Solvári. (z.d.). *Polyesterwol isolatie: eigenschappen en voordelen*. Geraadpleegd 12 december 2024, van <https://www.isolatie-info.be/isolatiemateriaal/polyesterwol>
- Steeman, M. (2010). *Hygrothermisch modelleren voor toepassingen in gebouwenergiesimulatie*.
- Tallini, A., & Cedola, L. (2018). A review of the properties of recycled and waste materials for energy refurbishment of existing buildings towards the requirements of NZEB. *Energy Procedia*, 148, 868–875. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2018.08.108>
- Textilebeacon. (2024, mei 8). *Polyester markets driven by cost in April 2024*. <https://www.textilebeacon.com/news/polyester-markets-driven-cost-april-2024/>
- To bio or not to bio. (z.d.). *Milieu-impact*. Geraadpleegd 23 februari 2025, van <https://www.milieubewustisoleren.be/milieu-impact/muurisolatie-houtskelet>
- Torres-Rivas, A., Palumbo, M., Haddad, A., Cabeza, L. F., Jiménez, L., & Boer, D. (2018). Multi-objective optimisation of bio-based thermal insulation materials in building envelopes considering condensation risk. *Applied Energy*, 224, 602–614. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.079>
- Valin, H., Peters, D., van den Berg, M., Frank, S., Havlik, P., Forsell, N., & Hamelinck, C. (2015). *The land use change impact of biofuels consumed in the EU*. www.ecofys.com
- van den Oever, M., Molenveld, K., & Bos, H. (2012). *Biocomposieten 2012*. https://www.wur.nl/upload_mm/7/c/6/de36d60c-5582-4211-b91b-4dc34b7e75c3_14Biocomposieten.pdf?utm_source=chatgpt.com
- van der Putten, M. (2025). *Biobased isolatie*. Homedeal. https://www.homedeal.nl/isolatie/biobased-isolatie/?utm_source=chatgpt.com
- van der Waal, J. (2024, juni 9). *Wat je moet weten voor je biobased isolatie koopt*. Biobased isoleren. <https://isoleerbewust.nl/isolatie/biobased-isoleren/biobased-isolatie/>
- Van Haver, Y. (2014). *Optimalisatie van een industriële case study in vlasvezelversterkte compound via numerieke simulaties*. .
- Van Impe, V. (2024, november 29). *Ken je deze verrassende isolatiematerialen al?* Bouwunie. https://www.bouwunie.be/nl/advies/duurzaam-bouwen-en-energie/circulair-bouwen/ken-je-deze-verrassende-isolatiematerialen-al?utm_source=chatgpt.com

- Van Opstal, J. (2022, april 30). *Zweten, vlekken of kreukels: alle voor- en nadelen van de stoffen in jouw kleding*. <https://www.linda.nl/lifestyle/mode/zweten-vlekken-of-kreukels-alle-voor-en-nadelen-van-de-stoffen-in-jouw-kleding/>
- Veen, T. (2023). *Understanding the environmental impact of product returns in the fashion industry*.
- Vito. (2024). *Jaarlijks belandt bijna 7 miljoen ton textiel op de Europese afvalberg*. <https://vito.be/nl/nieuws/jaarlijks-belandt-bijna-7-miljoen-ton-textiel-op-de-europese-afvalberg>
- Vlaanderen Circulair. (z.d.). *Wat is circulair bouwen?* Geraadpleegd 1 december 2024, van <https://bouwen.vlaanderen-circulair.be/nl/wat-is-het>
- VVSG. (z.d.). *Lokaal circulair bouwen*. Geraadpleegd 23 februari 2025, van https://vlaanderen-circulair.be/src/Frontend/Files/userfiles/files/Brochure_Circulair%20Bouwen_VVSG_VC_def.pdf
- Wang, Y., Liu, K., Liu, Y., Wang, D., & Liu, J. (2022). The impact of temperature and relative humidity dependent thermal conductivity of insulation materials on heat transfer through the building envelope. *Journal of Building Engineering*, 46, 103700. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103700>
- Yadav, M., & Agarwal, M. (2021). Biobased building materials for sustainable future: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2895–2902. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.01.165>
- Zach, J., Hroudová, J., & Korjenic, A. (2016). Environmentally efficient thermal and acoustic insulation based on natural and waste fibers. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 91(8), 2156–2161. <https://doi.org/10.1002/JCTB.4940>
- Zerari, S., Franchino, R., & Pisacane, N. (2024). Industry Experts' Perspectives on the Difficulties and Opportunities of the Integration of Bio-Based Insulation Materials in the European Construction Sector. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 7314, 16(17), 7314. <https://doi.org/10.3390/SU16177314>

12 Bijlagen

12.1 Aanvullend onderzoek voor het productieproces

In het onderzoek naar het optimale productieproces werden verschillende methoden uitgetest. De zaken die geen gunstig resultaat opleverden, werden niet opgenomen in de hoofdtekst van deze masterproef omdat ze minder relevant waren voor de uiteindelijke conclusies. Aangezien ze toch interessante inzichten bieden in de aanpak en ontwikkeling van het proces, worden ze in dit onderdeel besproken.

12.1.1 Preliminare testen

12.1.1.1 Verzamelen van kledij

Dit onderzoek heeft als doel textiel, dat anders op de afvalberg zou belanden, te hergebruiken door het om te zetten in circulaire isolatie. Daarom werd hier uitsluitend gebruik gemaakt van gedragen kleding die door de oorspronkelijke eigenaar werd afgedankt.

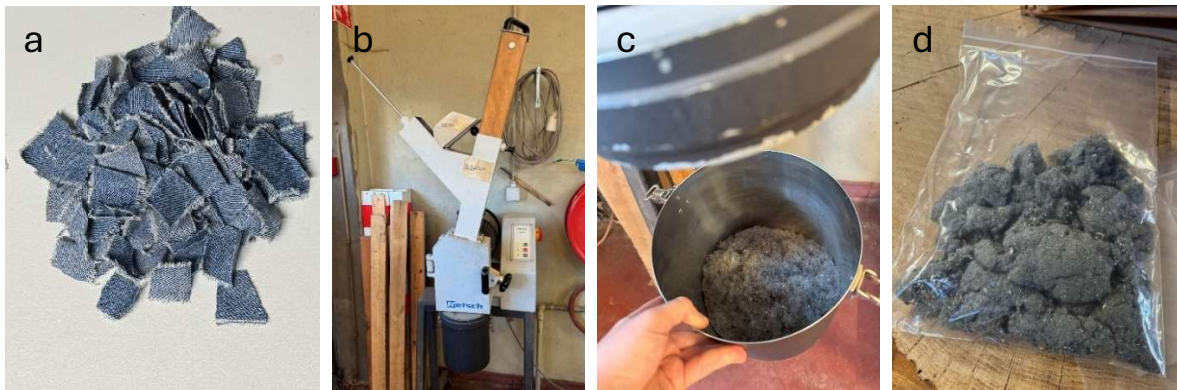
De inzameling van deze gerecycleerde kleding vond plaats op verschillende manieren. Enerzijds werd contact opgenomen met diverse organisaties en winkels die tweedehands kleding weggeven of doorverkopen. Deze instanties ontvangen regelmatig kledingstukken die vanwege slechte kwaliteit of gebreken niet verkoopbaar zijn en daardoor op de afvalberg zouden belanden (A. Vanermen, persoonlijke communicatie, 27 november 2024). Voorbeelden hiervan zijn de Kringloopwinkel (ViTeS, Figuur 51), Open Plaats en de Weggeefwinkel in de kerk in Rabot. Anderzijds werd via Facebook-groepen een oproep gedaan aan particulieren om oude kleding af te staan voor dit onderzoek in plaats van deze weg te gooien.



Figuur 51: Sorteercentrum ViTeS in Boortmeerbeek

12.1.1.2 Kledij vervezelen

De ingezamelde kleding werd vervolgens voorbereid op het vezelproces door deze eerst in kleinere stukken te knippen (Figuur 52-a). Daarna ondergingen de textielresten een vervezelingsproces met behulp van een maalmolen in de schrijnwerkerij van UGent-Woodlab (Figuur 52-b). Deze methode leverde echter vezels op die aanzienlijk fijner zijn (Figuur 52-c en Figuur 52-d) dan de textielvezels die kunnen worden waargenomen in Métisse. Hoewel dit verschil in vezelgrootte de binding en samenstelling van het isolatiemateriaal kan beïnvloeden, werden er reeds preliminaire testen uitgevoerd met deze fijne vezels om de compatibiliteit van PLA met textielvezels te evalueren. Voor deze testen werd bewust gekozen voor jeanskatoen als textielvezel, aangezien deze vezel al succesvol wordt toegepast in flexibele isolatiematten zoals Métisse, waar polyester als bindmiddel wordt gebruikt. In dit onderzoek blijft de vezel behouden, maar wordt polyester vervangen door PLA om de mogelijkheden van dit biogebaseerde bindmiddel te evalueren. In een volgende onderzoeksfase zal de focus verschuiven naar alternatieve vezels met een lengte van enkele tientallen millimeters, om de materiaaleigenschappen verder te optimaliseren.



Figuur 52: Vervezeling kleding: (a) verknijpte kleding; (b) maalmolen; (c) vezels uit maalmolen; (d) vermaalde kleding

12.1.1.3 Verkennende proefproductie met PLA-bindmiddel

De eerste testen werden uitgevoerd met de fijne katoenvezels verkregen door de maalmolen, waarbij de parameters uit het onderzoek van Islam et al. (2024) werden aangehouden. Twee PLA-bindmiddeltypes werden onderzocht: 'bico 3 den 51 mm' en 'black 6 den 60 mm'. Diverse samenstellingen werden ontwikkeld, met variaties in de verhouding tussen textielvezels en bindmiddel, evenals het type bindmiddel (Figuur 53-a).

Staal 1: 10% PLA 'bico' – 90% katoen

Staal 2: 10% PLA 'black' – 90% katoen

Staal 3: 20% PLA 'bico' – 80% katoen

Staal 4: 20% PLA 'black' – 80% katoen



Figuur 53: Resultaten proefproductie: (a) verschillende stalen met variatie in verhouding en bindmiddel; (b) staal 3

De textielvezels werden handmatig vermengd met de PLA-vezels en in botervlootjes geplaatst. Vervolgens werden ze gedurende 10 minuten verhit in de oven bij een temperatuur van 165°C (Islam et al., 2024). Na afkoeling werden ze uit de vormen gehaald om ze visueel te observeren. Hoewel niet alle fijne textielvezels gebonden zijn aan de PLA-vezels, kan er wel geconcludeerd worden dat staal 3 (20% PLA 'bico' – 80% katoen) het meest vormvast resultaat geeft (Figuur 53-b). De gebruikte parameters geven dus een degelijk resultaat, echter is dit nog niet te vergelijken met de katoenisolatie van Métisse. Dit kan te wijten zijn aan het gebruik van zeer fijne katoenvezels in combinatie met de langere PLA-vezels en de manuele vermenging van de vezels. Daarnaast dienen de gebruikte procesparameters (onder andere de oventemperatuur en de textielvezel/bindmiddel-ratio) verder geëvalueerd te worden.

12.1.2 Onderzoek naar geschikte mal

Aanvankelijk werd een houten mal van 30 × 30 cm gebruikt als standaard testopstelling. Deze aanpak bleek echter niet doeltreffend, waardoor werd besloten om deze methode niet verder te volgen. Bijgevolg werd dit onderdeel niet opgenomen in de hoofdtekst, maar de volledige uitwerking is hieronder toegevoegd omwille van de relevante inzichten die het opleverde binnen het onderzoeksproces.

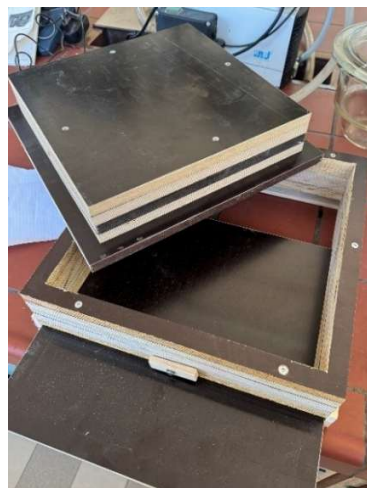
12.1.2.1 Gestandaardiseerde mal

Het vezel/bindmiddel-mengsel wordt in een vooraf gemaakte mal geplaatst. Hiermee wordt gegarandeerd dat alle geproduceerde stalen consistent zijn qua grootteorde en voldoen aan de afmetingen die zijn vastgelegd in de relevante NBN-normen, welke later gehanteerd worden voor het bepalen van het hygrothermisch gedrag van de isolatiematten.

Volgens de normen NBN EN ISO 15148 (waterabsorptieproef) en NBN EN ISO 12571 (sorptieproef) dienen de testmonsters prisma's met een vierkante vorm te zijn, met een contactoppervlak van bij voorkeur minstens 100 cm². Volgens de norm NBN EN 12667 (warmtestroom) dienen de testmonsters het volledige oppervlak van het meetelement van de warmtestroommeter te bedekken. Dit impliceert dat de afmetingen van de proefmonsters 30 cm × 30 cm bedragen om een nauwkeurige meting van de thermische eigenschappen te garanderen.

Voor de dikte van de stalen gelden in dit stadium van het onderzoek geen specifieke vereisten. Aangezien hier de focus ligt op het verkennen van geschikte productiemethoden, en de geproduceerde stalen niet bedoeld zijn voor directe toepassing in de bouwsector, wordt gekozen voor een beperkte dikte van 4 cm. Deze keuze maakt het mogelijk om zowel materiaalverbruik als de tijdsintensieve verwerking van de vezelcomponenten, zoals het borstelen, te reduceren.

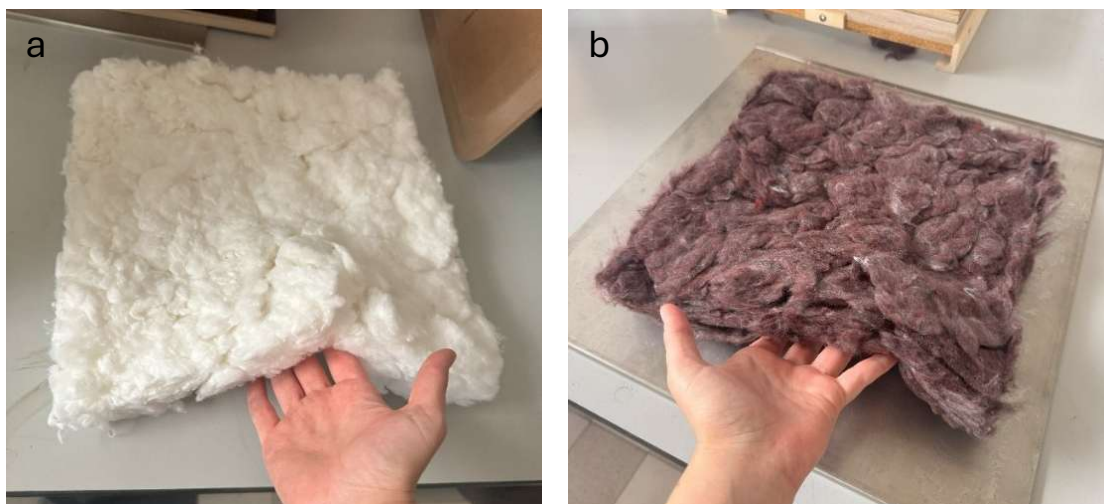
Op basis hiervan wordt een houten mal gemaakt met afmetingen van 30 cm × 30 cm × 6 cm, afgestemd op de vereisten voor het benodigde contactoppervlak. Deze mal dient niet enkel als vormgevend element, maar vervult tevens een functionele rol bij het aandrukken van het mengsel. Dit draagt bij aan een verbeterde hechting tussen het PLA-bindmiddel en de textielvezels, en maakt het mogelijk om de gewenste materiaaldichtheid te realiseren. Door het vezelmengsel met circa 2 cm aan te drukken, wordt een uiteindelijke dikte van 4 cm bekomen. Na verhitting in de oven kan de onderste plaat van de mal worden uitgeschoven, waar het geproduceerde monster dan eenvoudig kan worden doorgedruwd (Figuur 54).



Figuur 54: 30×30×6 cm houten mal

12.1.2.2 Productie met 30 × 30 cm houten mal

Aanvankelijk wordt er gewerkt met een mengsel dat een vezel-bindmiddelverhouding van 80%/20% heeft, zoals voorgesteld in het onderzoek van Aguilar Del Bosque et al (2024), en een massadichtheid van 20 kg/m³ zoals Métisse. Het mengsel wordt in de afgesloten houten mal geplaatst en vervolgens 15 minuten verhit in de oven aan 135°C. Na afkoeling wordt het mengsel uit de mal gehaald. Hoewel er enige samenhang tussen de componenten merkbaar is, is de structuur nog niet voldoende sterk. Het materiaal is niet in staat om in zijn geheel te worden opgepakt zonder uit elkaar te vallen (Figuur 55-a).



Figuur 55: Productie houten mal 30×30 cm: (a) katoen; (b) acryl

Aangezien het behaalde resultaat nog lang niet voldoet aan de gewenste materiaaleigenschappen, wordt besloten om in de volgende test meerdere parameters gelijktijdig aan te passen. In deze fase wordt gekozen voor een acryl/PLA-mengsel met een massadichtheid van 30 kg/m^3 , waarbij het geheel gedurende 20 minuten op 140°C wordt verhit. Gezien de nadruk ligt op het maximaliseren van de recyclage van kleding en rekening houdend met de relatief hoge kosten van PLA als bindmiddel, wordt het percentage aan PLA-vezels niet verhoogd, en blijft deze op 80%/20%.

Desondanks resulteert ook dit proces in een materiaal waarin de vezels wel enige samenhang vertonen, maar nog steeds onvoldoende om het als een functionele flexibele isolatiemat te beschouwen (Figuur 55-b). Dit benadrukt de noodzaak om de optimalisatie van de productiemethode verder te zetten waarbij andere parameterwijzigingen in overweging worden genomen.

12.2 Resultaten Heat Flow Meter

12.2.1 Meetdata onderzochte stalen

KAT-9									
Block Averages for setpoint 1 in SI units									
	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]				
-ne-	6.57	19.97	-5603	662	0.1640				
-ne-	-0.02	19.99	-2095	1141	0.05551				
-te-	0.01	20.01	-1312	1328	0.04472				
-te-	0.01	20.01	-1233	1319	0.04316				
-se-	0.01	20.01	-1195	1295	0.04210				
-pe-	0.01	20.01	-1176	1278	0.04148				
-pe-	0.01	20.01	-1159	1259	0.04087				
-pe-	0.01	20.01	-1145	1247	0.04044				
-pe-	0.01	20.01	-1136	1235	0.04008				
-pe-	0.01	20.01	-1132	1224	0.03983				
-pe-	0.01	20.01	-1125	1216	0.03958				
-pe-	0.01	20.01	-1121	1209	0.03940				
-pe-	0.01	20.01	-1117	1204	0.03925				
-pe-	0.01	20.01	-1114	1200	0.03914				
-pe-	0.01	20.01	-1110	1198	0.03902				
-pe-	0.01	20.01	-1108	1197	0.03897				
-pe-	0.01	20.01	-1105	1192	0.03884				
-pe-	0.01	20.01	-1106	1188	0.03879				
-pe-	0.01	20.01	-1104	1187	0.03874				
-pe-	0.01	20.01	-1103	1186	0.03871				
-pe-	0.01	20.01	-1101	1185	0.03866				
-pe-	0.01	20.01	-1100	1184	0.03862				
-pe-	0.01	20.01	-1100	1182	0.03859				
-pe-	0.01	20.01	-1100	1181	0.03858				
-pe-	0.01	20.01	-1099	1180	0.03854				
-pe-	0.01	20.01	-1099	1179	0.03853				
-pe-	0.01	20.00	-1097	1179	0.03850				
-pe-	0.01	20.01	-1098	1177	0.03849				
-pe-	0.01	20.00	-1095	1180	0.03848				
Thickness: 40.01mm									
Setpoint duration: 123 min									
Setpoint No.	1								
Setpoint Upper:	0.00	°C							
Setpoint Lower:	20.00	°C							
Temperature Upper:	0.01	°C							
CalibFactor Upper:	0.017700	W/mK							
Results Upper:	0.03887	W/mK							
Temperature Lower:	20.01	°C							
CalibFactor Lower:	0.016170	W/mK							
Results Lower:	0.03814	W/mK							
Percent Difference:	1.88%								
Thermal Equilibrium Criteria:									
Temperature Equilibrium:	0.20								
Between Block HFM Equil.:	50								
HFM Percent Change:	2.00								
Min Number of Blocks:	12								
Calculation Blocks:	5								
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond						
10.01	0.03887	0.03814	0.03851						

KAT-10									
Block Averages for setpoint 1 in SI units									
	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]				
-ne-	1.83	19.99	-4275	738	0.09652				
-ne-	0.01	20.00	-1416	1207	0.04461				
-te-	0.01	20.01	-1252	1278	0.04284				
-te-	0.01	20.01	-1203	1279	0.04199				
-se-	0.01	20.01	-1183	1272	0.04151				
-pe-	0.01	20.01	-1167	1261	0.04105				
-pe-	0.01	20.01	-1156	1252	0.04072				
-pe-	0.01	20.01	-1149	1243	0.04044				
-pe-	0.01	20.01	-1145	1239	0.04030				
-pe-	0.01	20.01	-1139	1233	0.04009				
-pe-	0.01	20.01	-1136	1228	0.03997				
-pe-	0.01	20.01	-1134	1224	0.03988				
-pe-	0.01	20.01	-1132	1223	0.03982				
-pe-	0.01	20.01	-1130	1218	0.03971				
-pe-	0.01	20.01	-1125	1220	0.03966				
-pe-	0.01	20.01	-1127	1215	0.03961				
-pe-	0.01	20.01	-1124	1215	0.03956				
Thickness: 40.01mm									
Setpoint duration: 72 min									
Setpoint No.	1								
Setpoint Upper:	0.00	°C							
Setpoint Lower:	20.00	°C							
Temperature Upper:	0.01	°C							
CalibFactor Upper:	0.017700	W/mK							
Results Upper:	0.03993	W/mK							
Temperature Lower:	20.01	°C							
CalibFactor Lower:	0.016170	W/mK							
Results Lower:	0.03941	W/mK							
Percent Difference:	1.30%								
Thermal Equilibrium Criteria:									
Temperature Equilibrium:	0.20								
Between Block HFM Equil.:	50								
HFM Percent Change:	2.00								
Min Number of Blocks:	12								
Calculation Blocks:	5								
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond						
10.01	0.03993	0.03941	0.03967						

POL-9						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper	Ttower	Qupper	Qlower	Lambda	
-ne-	0.45	19.99	-2895	614	0.06262	
-ne-	0.01	20.01	-1172	1083	0.03826	
-te-	0.01	20.01	-1076	1140	0.03749	
-te-	0.01	20.00	-1061	1149	0.03739	
-pe-	0.01	20.01	-1063	1149	0.03742	
-pe-	0.01	20.00	-1059	1155	0.03744	
-pe-	0.01	20.00	-1058	1158	0.03747	
-pe-	0.01	20.01	-1060	1158	0.03749	
-pe-	0.01	20.01	-1061	1158	0.03751	
-pe-	0.01	20.01	-1061	1158	0.03752	
-pe-	0.01	20.01	-1059	1159	0.03750	
-pe-	0.01	20.01	-1061	1157	0.03750	
-pe-	0.01	20.01	-1060	1160	0.03753	
-pe-	0.01	20.01	-1060	1159	0.03752	
-pe-	0.01	20.01	-1060	1159	0.03752	
-pe-	0.01	20.01	-1060	1160	0.03753	
Thickness: 40.01mm						
Setpoint duration: 67 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700	W/mK				
Results Upper:	0.03755					
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170	W/mK				
Results Lower:	0.03749					
Percent Difference:	0.16%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	12					
Calculation Blocks:	5					
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond			
10.01	0.03755	0.03749	0.03752			

KAT-11						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper	Ttower	Qupper	Qlower	Lambda	
-ne-	2.16	19.99	-4563	648	0.1023	
-ne-	0.01	20.00	-1475	1241	0.04621	
-te-	0.01	20.01	-1282	1320	0.04405	
-te-	0.01	20.01	-1221	1308	0.04277	
-pe-	0.01	20.01	-1192	1291	0.04198	
-pe-	0.01	20.01	-1179	1279	0.04154	
-pe-	0.01	20.01	-1165	1262	0.04102	
-pe-	0.01	20.01	-1153	1253	0.04067	
-pe-	0.01	20.01	-1149	1243	0.04043	
-pe-	0.01	20.01	-1139	1238	0.04019	
-pe-	0.01	20.01	-1139	1230	0.04007	
-pe-	0.01	20.01	-1133	1227	0.03990	
-pe-	0.01	20.01	-1130	1222	0.03977	
-pe-	0.01	20.01	-1129	1219	0.03969	
-pe-	0.01	20.01	-1128	1215	0.03961	
-pe-	0.01	20.01	-1124	1214	0.03953	
-pe-	0.01	20.01	-1123	1211	0.03947	
-pe-	0.01	20.01	-1121	1212	0.03945	
Thickness: 40.01mm						
Setpoint duration: 76 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700					
Results Upper:	0.03983	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170	W/mK				
Results Lower:	0.03927					
Percent Difference:	1.39%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	12					
Calculation Blocks:	5					
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond			
10.01	0.03983	0.03927	0.03955			

POL-10									
Block Averages for setpoint 1 in SI units									
	Tupper	Tlower	Qupper	Qlower	Lambda				
-ne-	2.06	19.99	-4067	746	0.09392				
-ne-	0.01	20.00	-1258	1105	0.04022				
-te-	0.01	20.01	-1121	1176	0.03892				
-se-	0.01	20.01	-1095	1180	0.03852				
-se-	0.01	20.01	-1093	1177	0.03844				
-pe-	0.01	20.00	-1087	1177	0.03834				
-pe-	0.01	20.01	-1088	1174	0.03830				
-pe-	0.01	20.01	-1089	1172	0.03829				
-pe-	0.01	20.01	-1087	1174	0.03828				
-pe-	0.01	20.01	-1086	1175	0.03828				
-pe-	0.01	20.01	-1086	1174	0.03826				
-pe-	0.01	20.01	-1085	1173	0.03824				
-pe-	0.01	20.01	-1088	1171	0.03825				
-pe-	0.01	20.01	-1085	1174	0.03825				
-pe-	0.01	20.01	-1086	1173	0.03825				
-pe-	0.01	20.01	-1084	1174	0.03824				
-pe-	0.01	20.01	-1087	1171	0.03824				
Thickness: 40.06mm									
Setpoint duration: 72 min									
Setpoint No.	1								
Setpoint Upper:	0.00	°C							
Setpoint Lower:	20.00	°C							
Temperature Upper:	0.01	°C							
CalibFactor Upper:	0.017700								
Results Upper:	0.03851	W/mK							
Temperature Lower:	20.01	°C							
CalibFactor Lower:	0.016170								
Results Lower:	0.03798	W/mK							
Percent Difference:	1.36%								
Thermal Equilibrium Criteria:									
Temperature Equilibrium:	0.20								
Between Block HFM Equil.:	50								
HFM Percent Change:	2.00								
Min Number of Blocks:	12								
Calculation Blocks:	5								
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond						
10.01	0.03851	0.03798	0.03824						

POL-11									
Block Averages for setpoint 1 in SI units									
	Tupper	Tlower	Qupper	Qlower	Lambda				
-ne-	3.23	19.99	-4629	670	0.1108				
-ne-	0.01	20.00	-1261	1079	0.03979				
-te-	0.01	20.01	-1116	1172	0.03872				
-te-	0.01	20.01	-1088	1175	0.03827				
-se-	0.01	20.01	-1082	1172	0.03812				
-pe-	0.01	20.01	-1078	1169	0.03800				
-pe-	0.01	20.01	-1077	1168	0.03796				
-pe-	0.01	20.01	-1074	1169	0.03793				
-pe-	0.01	20.01	-1075	1167	0.03791				
-pe-	0.01	20.01	-1076	1165	0.03790				
-pe-	0.01	20.00	-1074	1166	0.03788				
-pe-	0.01	20.01	-1075	1165	0.03788				
-pe-	0.01	20.01	-1075	1165	0.03787				
-pe-	0.01	20.01	-1074	1165	0.03787				
-pe-	0.01	20.00	-1073	1166	0.03786				
-pe-	0.01	20.01	-1073	1167	0.03786				
-pe-	0.01	20.01	-1073	1165	0.03785				
Thickness: 40.01mm									
Setpoint duration: 72 min									
Setpoint No.	1								
Setpoint Upper:	0.00	°C							
Setpoint Lower:	20.00	°C							
Temperature Upper:	0.01	°C							
CalibFactor Upper:	0.017700								
Results Upper:	0.03802	W/mK							
Temperature Lower:	20.01	°C							
CalibFactor Lower:	0.016170								
Results Lower:	0.03771	W/mK							
Percent Difference:	0.82%								
Thermal Equilibrium Criteria:									
Temperature Equilibrium:	0.20								
Between Block HFM Equil.:	50								
HFM Percent Change:	2.00								
Min Number of Blocks:	12								
Calculation Blocks:	5								
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond						
10.01	0.03802	0.03771	0.03786						

KP-10						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper	Ttower	Qupper	Qlower	Lambda	
-ne-	5.49	19.98	-5505	583	0.1476	
-pe-	-0.06	20.00	-1700	1066	0.04723	
-te-	0.01	20.01	-1206	1218	0.04105	
-te-	0.01	20.01	-1136	1207	0.03965	
-te-	0.01	20.01	-1108	1190	0.03887	
-se-	0.01	20.01	-1093	1178	0.03840	
-pe-	0.01	20.01	-1079	1165	0.03796	
-pe-	0.01	20.01	-1073	1155	0.03769	
-pe-	0.01	20.01	-1068	1149	0.03749	
-pe-	0.01	20.01	-1063	1143	0.03732	
-pe-	0.01	20.01	-1060	1137	0.03718	
-pe-	0.01	20.01	-1058	1136	0.03712	
-pe-	0.01	20.01	-1054	1135	0.03703	
-pe-	0.01	20.01	-1054	1130	0.03696	
-pe-	0.01	20.01	-1052	1132	0.03694	
-pe-	0.01	20.00	-1050	1130	0.03688	
-pe-	0.01	20.01	-1050	1129	0.03686	
-pe-	0.01	20.01	-1049	1128	0.03683	
-pe-	0.01	20.01	-1048	1128	0.03681	
-pe-	0.01	20.01	-1048	1126	0.03678	
-pe-	0.01	20.01	-1047	1126	0.03675	
-pe-	0.01	20.01	-1047	1127	0.03677	
-pe-	0.01	20.01	-1046	1126	0.03675	
-pe-	0.01	20.00	-1045	1126	0.03673	
-pe-	0.01	20.01	-1046	1125	0.03672	
Thickness: 40.02mm						
Setpoint duration: 106 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700					
Results Upper:	0.03705	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170					
Results Lower:	0.03643	W/mK				
Percent Difference:	1.69%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	12					
Calculation Blocks:	5					
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond			
10.01	0.03705	0.03643	0.03674			

KP-9						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper	Ttower	Qupper	Qlower	Lambda	
-ne-	3.62	19.99	-4859	779	0.1205	
-pe-	0.00	20.00	-1368	1155	0.04290	
-te-	0.01	20.01	-1191	1238	0.04110	
-te-	0.01	20.01	-1132	1222	0.03980	
-te-	0.01	20.01	-1108	1202	0.03907	
-se-	0.01	20.01	-1095	1191	0.03866	
-pe-	0.01	20.01	-1084	1176	0.03821	
-pe-	0.01	20.01	-1077	1166	0.03792	
-pe-	0.01	20.01	-1068	1162	0.03770	
-pe-	0.01	20.01	-1068	1155	0.03759	
-pe-	0.01	20.01	-1066	1150	0.03746	
-pe-	0.01	20.01	-1061	1148	0.03736	
-pe-	0.01	20.01	-1060	1145	0.03728	
-pe-	0.01	20.01	-1058	1143	0.03722	
-pe-	0.01	20.01	-1056	1143	0.03718	
-pe-	0.01	20.01	-1056	1142	0.03716	
-pe-	0.01	20.01	-1053	1140	0.03708	
-pe-	0.01	20.01	-1055	1138	0.03709	
-pe-	0.01	20.00	-1052	1139	0.03705	
Thickness: 40.01mm						
Setpoint duration: 80 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700					
Results Upper:	0.03734	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170					
Results Lower:	0.03689	W/mK				
Percent Difference:	1.20%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	12					
Calculation Blocks:	5					
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond			
10.01	0.03734	0.03689	0.03711			

WOL-9						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tipper	Ttower	Qupper	Qlower	Lambda	
-ne-						
-ne-	9.74	20.03	-6026	-279	0.2161	
-ne-	0.37	19.99	-2793	758	0.06291	
-ne-	0.01	20.00	-1317	1149	0.04191	
-te-	0.01	20.01	-1193	1200	0.04053	
-te-	0.01	20.00	-1152	1195	0.03973	
-se-	0.01	20.01	-1134	1184	0.03923	
-pe-	0.01	20.01	-1117	1173	0.03873	
-pe-	0.01	20.01	-1106	1164	0.03841	
-pe-	0.01	20.01	-1100	1157	0.03818	
-pe-	0.01	20.01	-1094	1150	0.03796	
-pe-	0.01	20.01	-1089	1145	0.03779	
-pe-	0.01	20.01	-1085	1140	0.03765	
-pe-	0.01	20.01	-1082	1136	0.03753	
-pe-	0.01	20.01	-1080	1133	0.03743	
-pe-	0.01	20.01	-1078	1129	0.03733	
-pe-	0.01	20.01	-1074	1127	0.03724	
-pe-	0.01	20.01	-1072	1125	0.03717	
-pe-	0.01	20.01	-1072	1123	0.03712	
-pe-	0.01	20.01	-1072	1118	0.03705	
-pe-	0.01	20.01	-1069	1119	0.03701	
-pe-	0.01	20.01	-1068	1116	0.03695	
-pe-	0.01	20.01	-1066	1114	0.03690	
-pe-	0.01	20.01	-1066	1114	0.03689	
-pe-	0.01	20.01	-1065	1112	0.03683	
-pe-	0.01	20.01	-1063	1111	0.03679	
-pe-	0.01	20.01	-1064	1110	0.03678	
-pe-	0.01	20.01	-1063	1109	0.03675	
-pe-	0.01	20.01	-1062	1108	0.03672	
-pe-	0.01	20.01	-1061	1107	0.03669	
-pe-	0.01	20.00	-1059	1109	0.03668	
-pe-	0.01	20.01	-1058	1109	0.03666	
-pe-	0.01	20.01	-1060	1106	0.03665	
Thickness: 40.00mm						
Setpoint duration: 135 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700					
Results Upper:	0.03753	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170					
Results Lower:	0.03583	W/mK				
Percent Difference:	4.65%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equi.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	20					
Calculation Blocks:	5					
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond			
10.01	0.03753	0.03583	0.03668			

KP-11						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tipper	Ttower	Qupper	Qlower	Lambda	
-ne-						
-ne-	12.07	20.06	-5929	-643	0.2887	
-ne-	0.97	19.99	-3298	848	0.07583	
-ne-	0.01	20.00	-1298	1234	0.04294	
-te-	0.01	20.00	-1162	1248	0.04077	
-te-	0.01	20.00	-1117	1232	0.03970	
-se-	0.01	20.01	-1098	1216	0.03910	
-pe-	0.01	20.01	-1083	1199	0.03855	
-pe-	0.01	20.01	-1072	1188	0.03820	
-pe-	0.01	20.01	-1066	1180	0.03797	
-pe-	0.01	20.01	-1061	1174	0.03777	
-pe-	0.01	20.01	-1057	1169	0.03762	
-pe-	0.01	20.01	-1054	1166	0.03750	
-pe-	0.01	20.01	-1053	1160	0.03742	
-pe-	0.01	20.01	-1052	1158	0.03736	
-pe-	0.01	20.01	-1050	1156	0.03729	
-pe-	0.01	20.01	-1049	1155	0.03725	
-pe-	0.01	20.01	-1047	1154	0.03721	
-pe-	0.01	20.01	-1048	1151	0.03717	
-pe-	0.01	20.01	-1047	1151	0.03716	
-pe-	0.01	20.01	-1048	1150	0.03714	
-pe-	0.01	20.01	-1046	1149	0.03711	
-pe-	0.01	20.01	-1046	1148	0.03709	
-pe-	0.01	20.01	-1046	1148	0.03708	
-pe-	0.01	20.01	-1046	1147	0.03708	
-pe-	0.01	20.01	-1046	1146	0.03706	
-pe-	0.01	20.01	-1044	1147	0.03704	
Thickness: 40.01mm						
Setpoint duration: 110 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700					
Results Upper:	0.03703	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170					
Results Lower:	0.03712	W/mK				
Percent Difference:	0.26%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equi.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	12					
Calculation Blocks:	5					
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond			
10.01	0.03703	0.03712	0.03707			

WOL-10									
Block Averages for setpoint 1 in SI units									
	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Average
	Temp	Cond	Temp	Cond	Temp	Cond	Temp	Cond	Cond
-ne-	10.01	0.03716	0.03569	0.03643					
-ne-	19.99	0.01	20.01	0.01	19.99	0.01	20.01	0.01	0.1157
-ne-	19.99	0.01	20.01	0.01	19.99	0.01	20.01	0.01	0.04391
-te-	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	0.04216
-te-	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	0.04091
-te-	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	0.04005
-se-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03953
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03897
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03859
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03833
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03809
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03786
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03769
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03751
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03740
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03726
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03714
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03704
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03698
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03690
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03677
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03672
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03668
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03661
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03656
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03652
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03646
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03642
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03637
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03637
Thickness: 40.01mm									
Setpoint duration: 123 min									
Setpoint No.	1								
Setpoint Upper:	0.00								
Setpoint Lower:	20.00								
Temperature Upper:	0.01								
CalibFactor Upper:	0.017700								
Results Upper:	0.03716								
Temperature Lower:	20.01								
CalibFactor Lower:	0.016170								
Results Lower:	0.03569								
Percent Difference:	4.04%								
Thermal Equilibrium Criteria:									
Temperature Equilibrium:	0.20								
Between Block HFM Equil.:	50								
HFM Percent Change:	5.00								
Min Number of Blocks:	12								
Calculation Blocks:	5								
Mean Temp	10.01								
Upper Cond	0.03716								
Lower Cond	0.03569								
Average Cond	0.03643								

WOL-11									
Block Averages for setpoint 1 in SI units									
	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Average
	Temp	Cond	Temp	Cond	Temp	Cond	Temp	Cond	Cond
-ne-	10.01	0.03645	0.03603	0.03624					
-ne-	11.66	0.01	20.04	0.01	11.66	0.01	20.04	0.01	0.2827
-ne-	0.83	0.01	19.99	0.01	0.83	0.01	19.99	0.01	0.07588
-te-	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	0.04459
-te-	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	0.04239
-te-	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	0.04110
-te-	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	20.00	0.01	0.04019
-se-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03960
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03899
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03858
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03824
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03798
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03775
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03756
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03739
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03725
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03713
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03692
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03683
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03675
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03670
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03663
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03657
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03652
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03648
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03645
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03641
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03636
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03633
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03631
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03630
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03626
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03625
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03623
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03620
-pe-	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	20.01	0.01	0.03620
Thickness: 40.01mm									
Setpoint duration: 148 min									
Setpoint No.	1								
Setpoint Upper:	0.00								
Setpoint Lower:	20.00								
Temperature Upper:	0.01								
CalibFactor Upper:	0.017700								
Results Upper:	0.03645								
Temperature Lower:	20.01								
CalibFactor Lower:	0.016170								
Results Lower:	0.03603								
Percent Difference:	1.16%								
Thermal Equilibrium Criteria:									
Temperature Equilibrium:	0.20								
Between Block HFM Equil.:	50								
HFM Percent Change:	2.00								
Min Number of Blocks:	12								
Calculation Blocks:	5								
Mean Temp	10.01								
Upper Cond	0.03645								
Lower Cond	0.03603								
Average Cond	0.03624								

ACR-9						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper	Tlower	Qupper	Qlower	Lambda	
-ne-	0.92	20.01	-3706	549	0.07809	
-ne-	0.01	20.01	-1255	1069	0.03951	
-te-	0.01	20.01	-1094	1138	0.03778	
-te-	0.01	20.01	-1059	1139	0.03718	
-se-	0.01	20.01	-1053	1132	0.03695	
-pe-	0.01	20.01	-1041	1133	0.03676	
-pe-	0.01	20.01	-1040	1128	0.03667	
-pe-	0.01	20.01	-1039	1125	0.03664	
-pe-	0.01	20.01	-1039	1125	0.03659	
-pe-	0.01	20.01	-1038	1126	0.03658	
-pe-	0.01	20.01	-1035	1127	0.03656	
-pe-	0.01	20.01	-1038	1124	0.03655	
-pe-	0.01	20.01	-1038	1124	0.03654	
-pe-	0.01	20.01	-1036	1125	0.03654	
-pe-	0.01	20.00	-1035	1125	0.03652	
-pe-	0.01	20.01	-1037	1123	0.03653	
-pe-	0.01	20.01	-1034	1126	0.03654	
Thickness: 40.01mm						
Setpoint duration: 72 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700	W/mK				
Results Upper:	0.03668	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170	W/mK				
Results Lower:	0.03638	W/mK				
Percent Difference:	0.83%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	12					
Calculation Blocks:	5					
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond			
10.01	0.03668	0.03638	0.03653			

ACR-10						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper	Tlower	Qupper	Qlower	Lambda	
-ne-	0.63	20.00	-3246	590	0.06920	
-ne-	0.01	20.01	-1214	1072	0.03883	
-te-	0.01	20.01	-1079	1127	0.03733	
-te-	0.01	20.01	-1049	1130	0.03685	
-se-	0.01	20.01	-1041	1124	0.03661	
-pe-	0.01	20.01	-1031	1125	0.03646	
-pe-	0.01	20.01	-1031	1121	0.03639	
-pe-	0.01	20.01	-1030	1122	0.03638	
-pe-	0.01	20.01	-1029	1121	0.03634	
-pe-	0.01	20.01	-1029	1116	0.03627	
-pe-	0.01	20.00	-1027	1121	0.03632	
-pe-	0.01	20.01	-1027	1119	0.03629	
-pe-	0.01	20.01	-1027	1119	0.03628	
-pe-	0.01	20.00	-1026	1120	0.03629	
-pe-	0.01	20.01	-1026	1120	0.03627	
-pe-	0.01	20.01	-1027	1118	0.03628	
-pe-	0.01	20.00	-1025	1119	0.03626	
Thickness: 40.01mm						
Setpoint duration: 72 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700	W/mK				
Results Upper:	0.03634	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170	W/mK				
Results Lower:	0.03621	W/mK				
Percent Difference:	0.57%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	12					
Calculation Blocks:	5					
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond			
10.01	0.03634	0.03621	0.03627			

MET-9						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper [°C]	Ttower [°C]	Qupper [μV]	Qtower [μV]	Lambda [W/mK]	
-ne-	1.38	19.99	-3983	120	0.1168	
-ne-	0.01	20.00	-1372	426	0.04677	
-te-	0.01	20.01	-1037	646	0.04320	
-te-	0.01	20.01	-899	731	0.04159	
-te-	0.01	20.01	-851	764	0.04113	
-se-	0.01	20.00	-826	777	0.04078	
-se-	0.01	20.00	-792	785	0.04008	
-se-	0.01	20.01	-771	786	0.03953	
-se-	0.01	20.01	-756	785	0.03911	
-pe-	0.01	20.01	-747	778	0.03870	
-pe-	0.01	20.01	-739	774	0.03841	
-pe-	0.01	20.01	-732	770	0.03813	
-pe-	0.01	20.01	-727	767	0.03790	
-pe-	0.01	20.01	-724	762	0.03769	
-pe-	0.01	20.01	-719	759	0.03750	
-pe-	0.01	20.01	-716	755	0.03734	
-pe-	0.01	20.01	-715	752	0.03722	
-pe-	0.01	20.01	-711	750	0.03707	
-pe-	0.01	20.01	-709	747	0.03695	
-pe-	0.01	20.01	-709	745	0.03691	
-pe-	0.01	20.01	-705	743	0.03673	
-pe-	0.01	20.01	-705	740	0.03666	
-pe-	0.01	20.00	-702	741	0.03661	
-pe-	0.01	20.01	-703	737	0.03655	
Thickness: 59.99mm						
Setpoint duration: 101 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700					
Results Upper:	0.03746	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170					
Results Lower:	0.03600	W/mK				
Percent Difference:	3.98%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	14					
Calculation Blocks:	6					
Mean Temp	Upper Cond 0.03746	Lower Cond 0.03600	Average Cond 0.03673			
10.01						

ACR-11						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper [°C]	Ttower [°C]	Qupper [μV]	Qtower [μV]	Lambda [W/mK]	
-ne-	11.86	20.05	-5519	-555	0.2604	
-ne-	0.89	19.99	-3024	648	0.06703	
-ne-	0.01	20.00	-1187	1052	0.03804	
-te-	0.01	20.00	-1059	1107	0.03665	
-te-	0.01	20.00	-1026	1110	0.03611	
-se-	0.01	20.01	-1014	1105	0.03583	
-pe-	0.01	20.01	-1008	1099	0.03563	
-pe-	0.01	20.01	-1005	1096	0.03552	
-pe-	0.01	20.01	-1005	1093	0.03546	
-pe-	0.01	20.01	-1004	1090	0.03540	
-pe-	0.01	20.01	-1004	1088	0.03538	
-pe-	0.01	20.01	-1004	1087	0.03536	
-pe-	0.01	20.01	-1005	1086	0.03534	
-pe-	0.01	20.01	-1005	1084	0.03534	
-pe-	0.01	20.01	-1006	1084	0.03533	
-pe-	0.01	20.01	-1006	1084	0.03534	
-pe-	0.01	20.01	-1007	1082	0.03533	
-pe-	0.01	20.01	-1008	1082	0.03534	
-pe-	0.01	20.01	-1008	1082	0.03535	
Thickness: 40.01mm						
Setpoint duration: 80 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700					
Results Upper:	0.03566	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170					
Results Lower:	0.03502	W/mK				
Percent Difference:	1.79%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	12					
Calculation Blocks:	5					
Mean Temp	Upper Cond 0.03566	Lower Cond 0.03502	Average Cond 0.03534			
10.01						

MET-10						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper	Tlower	Qupper	Qlower	Lambda	
-ne-	19.97	19.97	-5633	198	0.2219	
-ne-	-0.05	19.99	-1973	299	0.05947	
-te-	0.01	20.01	-1147	619	0.04547	
-te-	0.01	20.01	-960	748	0.04362	
-te-	0.01	20.01	-871	795	0.04240	
-te-	0.01	20.01	-821	813	0.04150	
-te-	0.01	20.01	-796	812	0.04082	
-se-	0.01	20.00	-776	812	0.04031	
-se-	0.01	20.01	-761	806	0.03976	
-se-	0.01	20.01	-752	802	0.03942	
-pe-	0.01	20.01	-744	797	0.03908	
-pe-	0.01	20.01	-739	790	0.03878	
-pe-	0.01	20.01	-734	785	0.03851	
-pe-	0.01	20.01	-732	779	0.03831	
-pe-	0.01	20.01	-726	777	0.03810	
-pe-	0.01	20.01	-720	773	0.03788	
-pe-	0.01	20.01	-720	769	0.03778	
-pe-	0.01	20.01	-718	766	0.03764	
-pe-	0.01	20.01	-715	763	0.03748	
-pe-	0.01	20.01	-712	761	0.03736	
-pe-	0.01	20.01	-711	757	0.03725	
-pe-	0.01	20.00	-708	758	0.03717	
-pe-	0.01	20.01	-708	754	0.03708	
-pe-	0.01	20.01	-708	751	0.03702	
Thickness: 59.99mm						
Setpoint duration: 101 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700	W/mK				
Results Upper:	0.03759	W/mK				
CalibFactor Lower:	20.01	°C				
Results Lower:	0.016170	W/mK				
Percent Difference:	2.71%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	6					
Calculation Blocks:	3					
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond			
10.01	0.03759	0.03659	0.03709			

MET-11						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper	Tlower	Qupper	Qlower	Lambda	
-ne-	9.44	19.97	-5911	208	0.3076	
-ne-	0.32	19.99	-2758	233	0.08020	
-ne-	0.01	20.01	-1229	587	0.04690	
-te-	0.01	20.01	-996	737	0.04434	
-te-	0.01	20.01	-890	794	0.04290	
-te-	0.01	20.01	-834	812	0.04186	
-te-	0.01	20.01	-802	816	0.04111	
-te-	0.01	20.01	-784	812	0.04054	
-se-	0.01	20.01	-769	807	0.04000	
-se-	0.01	20.01	-754	804	0.03954	
-pe-	0.01	20.01	-748	797	0.03921	
-pe-	0.01	20.01	-743	790	0.03888	
-pe-	0.01	20.01	-739	784	0.03863	
-pe-	0.01	20.01	-734	780	0.03843	
-pe-	0.01	20.01	-729	776	0.03820	
-pe-	0.01	20.01	-725	773	0.03799	
-pe-	0.01	20.01	-721	769	0.03783	
-pe-	0.01	20.01	-722	765	0.03774	
-pe-	0.01	20.01	-717	764	0.03758	
-pe-	0.01	20.01	-714	760	0.03742	
-pe-	0.01	20.01	-714	758	0.03736	
-pe-	0.01	20.01	-710	756	0.03721	
-pe-	0.01	20.01	-710	753	0.03716	
-pe-	0.01	20.01	-709	753	0.03709	
-pe-	0.01	20.01	-706	752	0.03700	
-pe-	0.01	20.01	-707	748	0.03692	
-pe-	0.01	20.01	-706	748	0.03689	
-pe-	0.01	20.01	-702	747	0.03679	
-pe-	0.01	20.01	-703	745	0.03676	
-pe-	0.01	20.01	-704	743	0.03673	
-pe-	0.01	20.00	-701	744	0.03666	
Thickness: 60.02mm						
Setpoint duration: 131 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
CalibFactor Upper:	0.01	°C				
Results Upper:	0.017700	W/mK				
CalibFactor Lower:	0.03739	W/mK				
Results Lower:	0.016170	W/mK				
Percent Difference:	3.24%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	14					
Calculation Blocks:	6					
Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond			
10.01	0.03739	0.03619	0.03679			

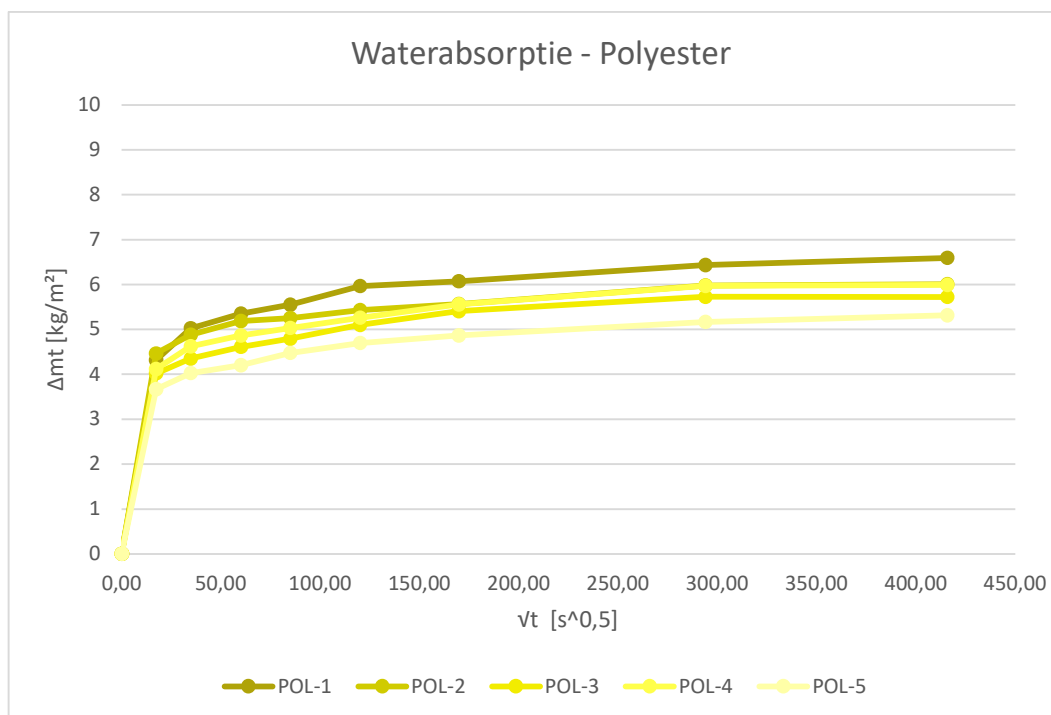
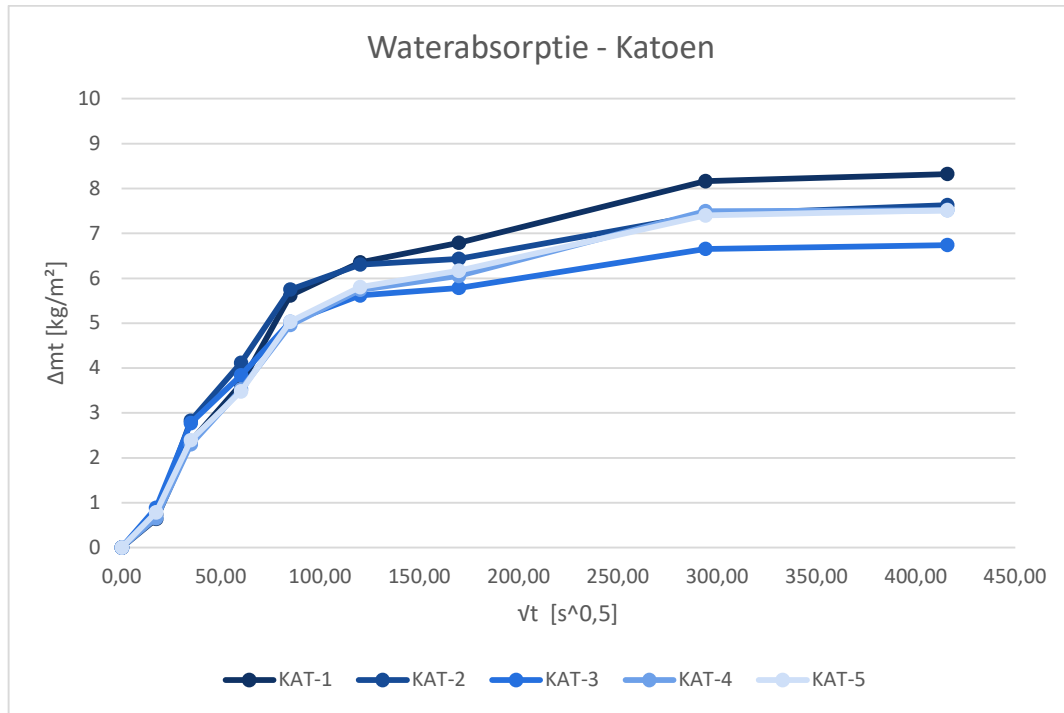
12.2.2 Meetdata glaswol

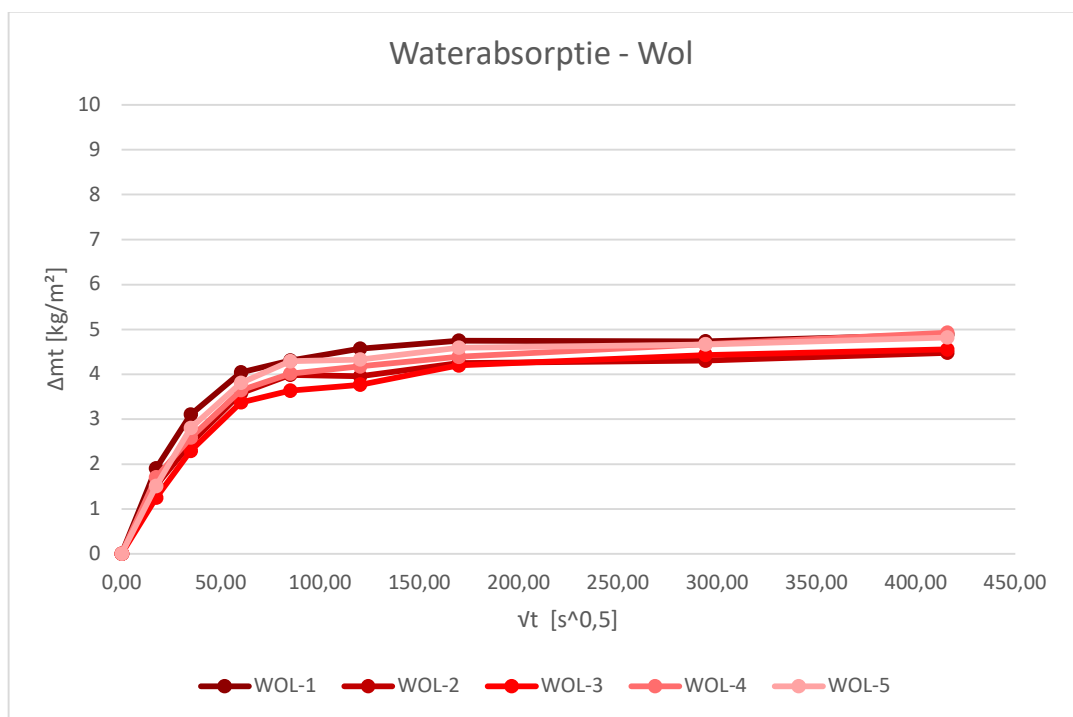
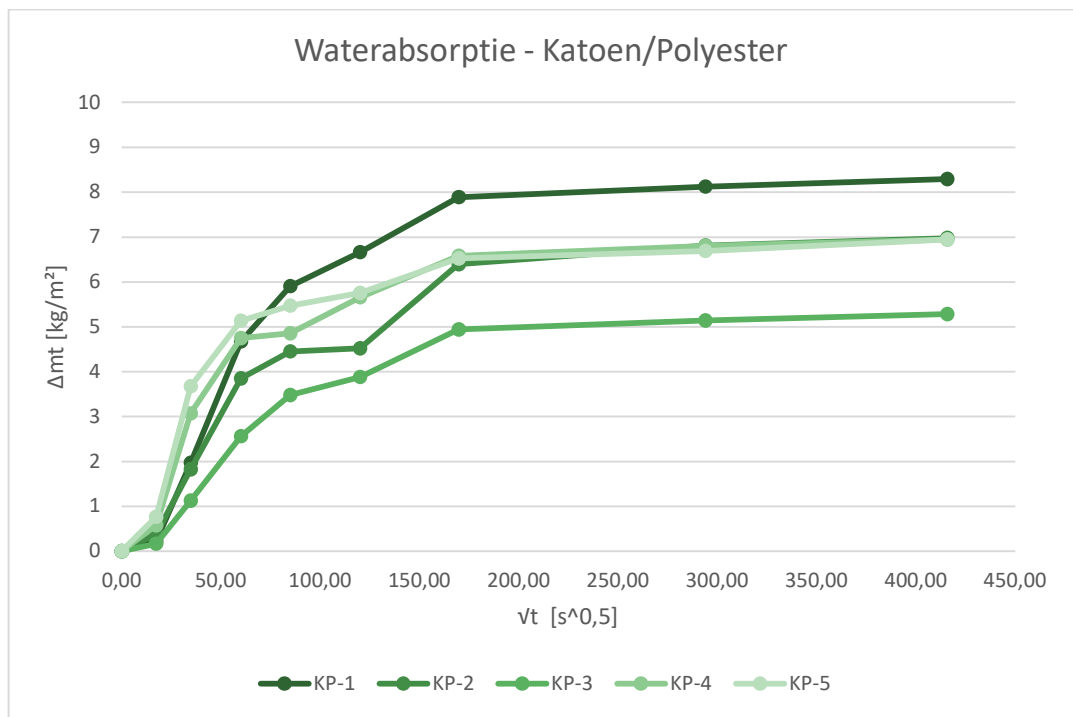
GLASWOL-1						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]	
-ne-	7.59	19.96	-5100	1012	0.1293	
-ne-	0.09	19.99	-1879	1313	0.04104	
-te-	0.01	20.01	-1261	1386	0.03354	
-te-	0.01	20.01	-1264	1369	0.03339	
-pe-	0.01	20.00	-1254	1371	0.03328	
-pe-	0.01	20.01	-1254	1369	0.03325	
-pe-	0.01	20.01	-1254	1367	0.03323	
-pe-	0.01	20.01	-1252	1368	0.03321	
-pe-	0.01	20.01	-1253	1366	0.03320	
-pe-	0.01	20.01	-1251	1368	0.03320	
Thickness: 30.00mm						
Setpoint duration: 42 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700	W/mK				
Results Upper:	0.03325	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170	W/mK				
Results Lower:	0.03316	W/mK				
Percent Difference:	0.26%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	6					
Calculation Blocks:	3					
Mean Temp	Upper Cond 0.03325	Lower Cond 0.03316	Average Cond 0.03320			
10.01						

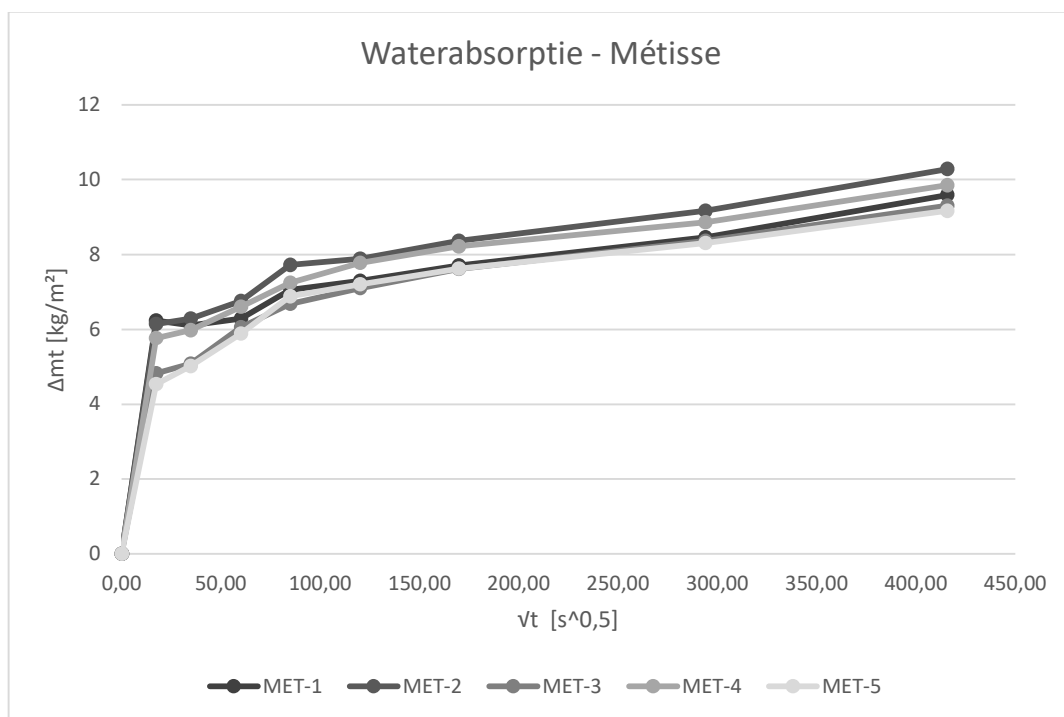
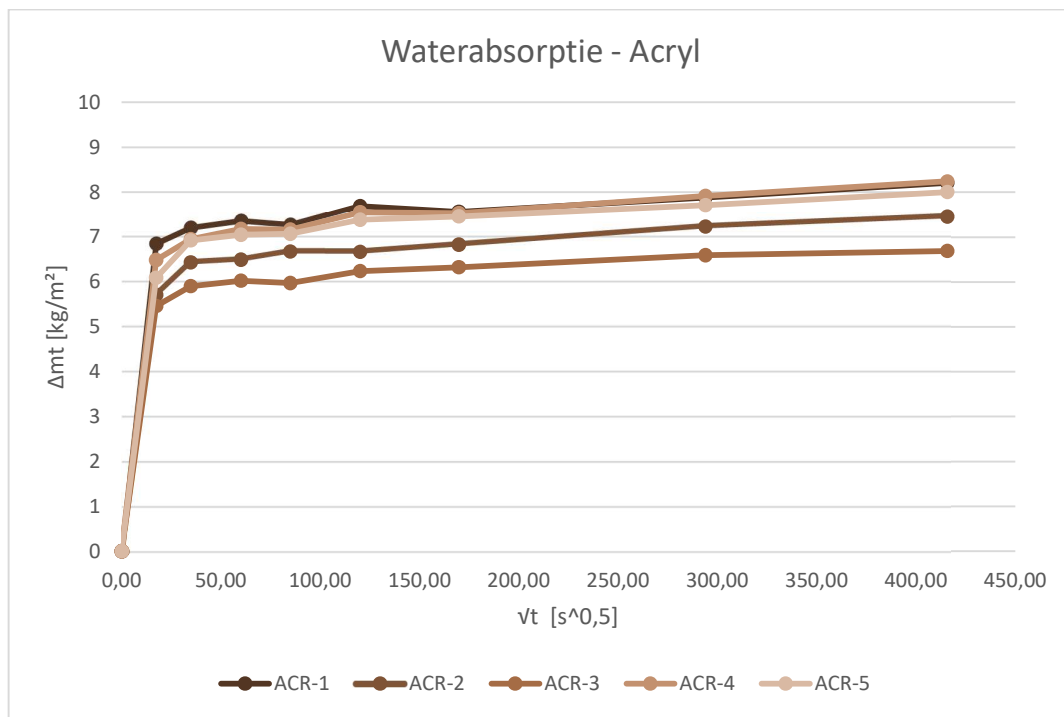
GLASWOL-2						
Block Averages for setpoint 1 in SI units						
	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]	
-ne-	1.53	19.99	-3425	1145	0.06431	
-ne-	0.01	20.00	-1301	1401	0.03427	
-te-	0.01	20.01	-1284	1400	0.03403	
-pe-	0.01	20.01	-1282	1397	0.03397	
-pe-	0.01	20.00	-1281	1397	0.03395	
-pe-	0.01	20.01	-1280	1397	0.03394	
-pe-	0.01	20.00	-1280	1397	0.03394	
-pe-	0.01	20.01	-1282	1395	0.03394	
-pe-	0.01	20.01	-1279	1398	0.03394	
Thickness: 30.00mm						
Setpoint duration: 38 min						
Setpoint No.	1					
Setpoint Upper:	0.00	°C				
Setpoint Lower:	20.00	°C				
Temperature Upper:	0.01	°C				
CalibFactor Upper:	0.017700	W/mK				
Results Upper:	0.03400	W/mK				
Temperature Lower:	20.01	°C				
CalibFactor Lower:	0.016170	W/mK				
Results Lower:	0.03388	W/mK				
Percent Difference:	0.36%					
Thermal Equilibrium Criteria:						
Temperature Equilibrium:	0.20					
Between Block HFM Equil.:	50					
HFM Percent Change:	2.00					
Min Number of Blocks:	6					
Calculation Blocks:	3					
Mean Temp	Upper Cond 0.03400	Lower Cond 0.03388	Average Cond 0.03394			
10.01						

12.3 Resultaten capillaire absorptieproef

12.3.1 Grafische resultaten







12.3.2 Analytische resultaten

De massa van de isolatiestalen wordt gemeten op vaste tijdstippen: na 5 minuten, 20 minuten, 1 uur, 2 uur, 4 uur, 8 uur, 24 uur en 48 uur onderdompeling. Bij elke meting worden de stalen eerst gedurende 2,5 minuten onder een hoek van 45° uitgelekt. Daarna worden ze in een tijdspanne van 30 seconden kort op een vochtige doek geplaatst om de laatste waterdruppels te verwijderen, gewogen en terug in het water geplaatst. Het volledige tijdsverloop van de metingen voor 5 stalen van één textielsoort is hieronder weergegeven.

Duur	0min	5min			20min			1u			2u		
Tijdstip	Erin	Eruit	Wegen	Erin	Eruit	Wegen	Erin	Eruit	Wegen	Erin	Eruit	Wegen	Erin
1A	9:00:00	9:05:00	9:07:30	9:08:00	9:23:00	9:25:30	9:26:00	10:06:00	10:08:30	10:09:00	11:11:00	11:13:30	11:14:00
2B	9:01:00	9:06:00	9:08:30	9:09:00	9:24:00	9:26:30	9:27:00	10:07:00	10:09:30	10:10:00	11:12:00	11:14:30	11:15:00
3C	9:02:00	9:07:00	9:09:30	9:10:00	9:25:00	9:27:30	9:28:00	10:08:00	10:10:30	10:11:00	11:13:00	11:15:30	11:16:00
4D	9:03:00	9:08:00	9:10:30	9:11:00	9:26:00	9:28:30	9:29:00	10:09:00	10:11:30	10:12:00	11:14:00	11:16:30	11:17:00
5E	9:04:00	9:09:00	9:11:30	9:12:00	9:27:00	9:29:30	9:30:00	10:10:00	10:12:30	10:13:00	11:15:00	11:17:30	11:18:00

4u			8u			24u			48u		
Eruit	Wegen	Erin	Eruit	Wegen	Erin	Eruit	Wegen	Erin	Eruit	Wegen	Erin
13:14:00	13:16:30	13:17:00	17:17:00	17:19:30	17:20:00	9:20:00	9:22:30	9:23:00	9:23:00	9:25:30	9:26:00
13:15:00	13:17:30	13:18:00	17:18:00	17:20:30	17:21:00	9:21:00	9:23:30	9:24:00	9:24:00	9:26:30	9:27:00
13:16:00	13:18:30	13:19:00	17:19:00	17:21:30	17:22:00	9:22:00	9:24:30	9:25:00	9:25:00	9:27:30	9:28:00
13:17:00	14:19:30	13:20:00	17:20:00	17:22:30	17:23:00	9:23:00	9:25:30	9:26:00	9:26:00	9:28:30	9:29:00
13:18:00	13:20:30	13:21:00	17:21:00	17:23:30	17:24:00	9:24:00	9:26:30	9:27:00	9:27:00	9:29:30	9:30:00

Bij elke meting wordt de volledige bruto massa van het isolatiestaal inclusief het bijhorende netje bepaald. Om indien gewenst achteraf de netto massa van de isolatiestalen te kunnen berekenen, worden de netjes individueel gecodeerd met een letter. De bijbehorende massa en afmetingen van de gebruikte netjes zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Netjes	m	lxb	h
A	35,685	10x10,4	4
B	36,506	9,8x10,1	3,9
C	35,589	9,6x10	4
D	32,360	9,7x9,9	4
E	33,024	9,8x9,9	3,9
F	34,812	9,8x10	3,8
G	34,584	9,7x9x8	3,7
H	33,587	10x10,1	3,9
I	36,813	9,8x10,1	4
J	35,445	9,7x10,2	3,8
K	56,188	9,8x9,9	8
L	56,669	9,8x10,2	8
M	56,212	9,5x10,2	7,5
N	56,117	9,6x9,7	8
O	55,421	9,5x9,7	7,6

De gemeten bruto massa's van de isolatiestalen worden per type textielmateriaal geregistreerd.

Wol	0min	5min	20min	1u	2u	4u	8u	24u	48u
1A	43,673	63,457	75,962	85,692	88,395	91,202	93,000	92,843	94,484
2B	44,526	59,563	68,967	79,932	83,964	83,678	86,570	87,097	88,851
3C	43,577	55,556	65,579	75,928	78,430	79,740	83,836	86,102	87,283
4D	40,376	56,715	65,237	75,353	78,919	80,497	82,517	85,261	87,695
5E	41,003	55,634	68,152	77,952	82,584	82,983	85,564	86,282	87,748

Katoen	0min	5min	20min	1u	2u	4u	8u	24u	48u
1F	42,844	49,064	65,937	78,525	97,883	105,137	109,361	122,828	124,380
2G	42,615	49,588	69,484	81,712	97,282	102,583	103,742	113,227	115,115
3H	41,667	50,607	69,664	80,465	92,432	98,356	100,074	108,871	109,725
4I	44,829	51,349	67,574	79,729	93,948	101,691	104,753	118,970	119,237
5J	43,164	50,903	66,810	77,583	92,988	100,595	104,152	116,350	117,492

Acryl	0min	5min	20min	1u	2u	4u	8u	24u	48u
1A	44,022	115,119	118,816	120,397	119,498	124,002	122,659	126,017	129,332
2B	45,244	101,784	108,947	109,498	111,309	111,247	112,833	116,808	119,035
3C	43,795	96,220	100,456	101,640	101,126	103,703	104,521	107,135	108,008
4D	40,582	102,905	107,353	109,537	109,369	113,093	112,870	116,560	119,703
5E	41,232	100,353	108,385	109,617	109,810	112,906	113,600	116,032	118,864

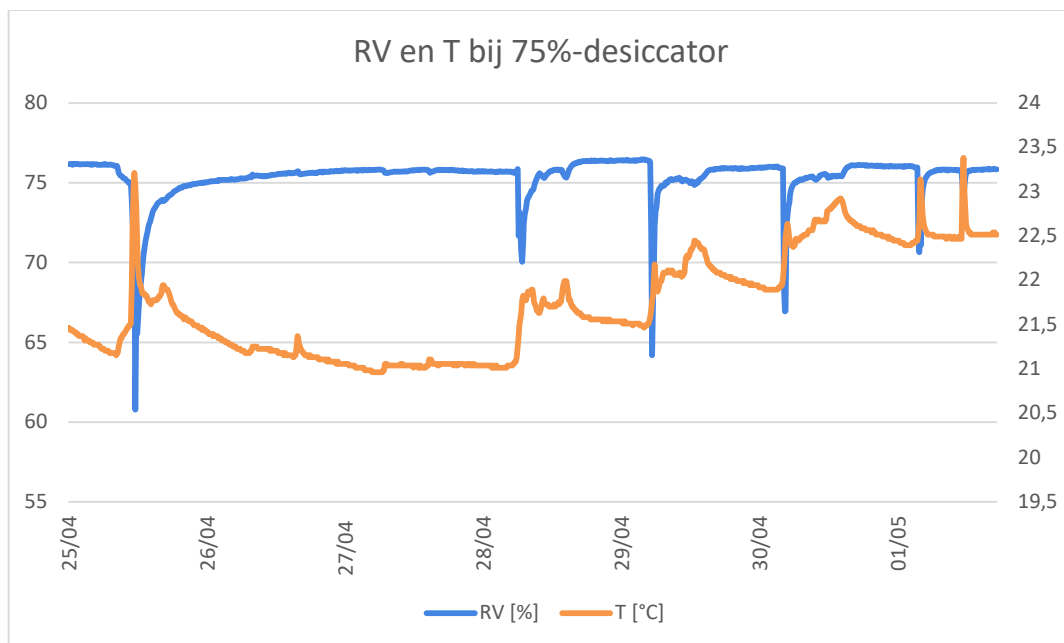
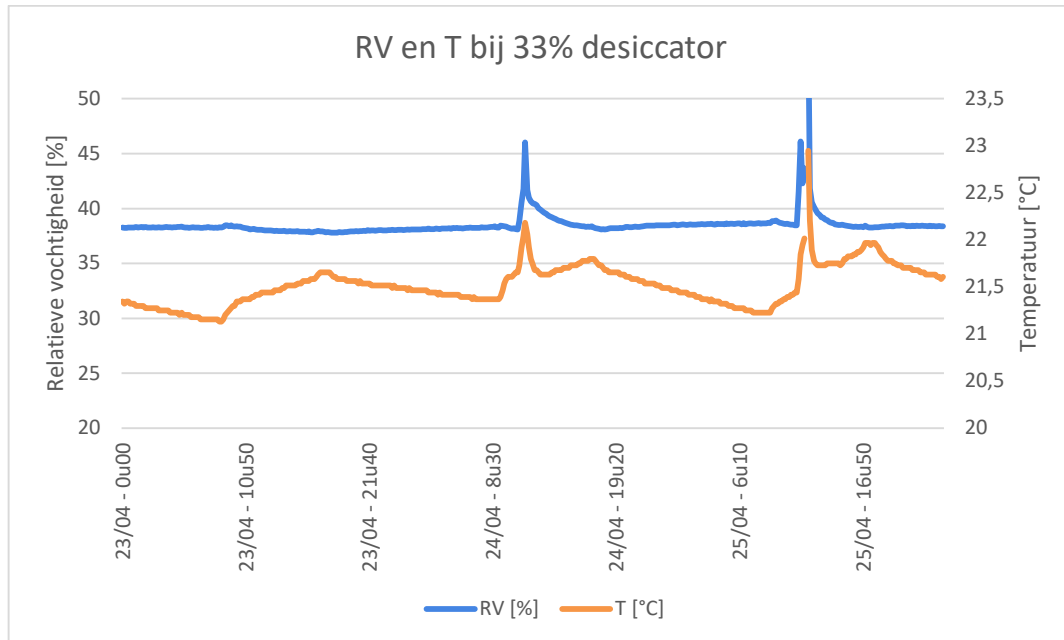
Polyester	0min	5min	20min	1u	2u	4u	8u	24u	48u
1F	43,009	85,345	92,271	95,402	97,413	101,471	102,493	106,055	107,630
2G	42,758	85,193	89,162	92,062	92,743	94,378	95,627	99,566	99,859
3H	41,807	82,433	85,770	88,409	90,230	93,358	96,437	99,643	99,599
4I	45,002	85,750	90,783	93,140	94,849	97,067	100,032	104,083	104,306
5J	43,287	79,566	83,126	84,858	87,560	89,769	91,406	94,389	95,872

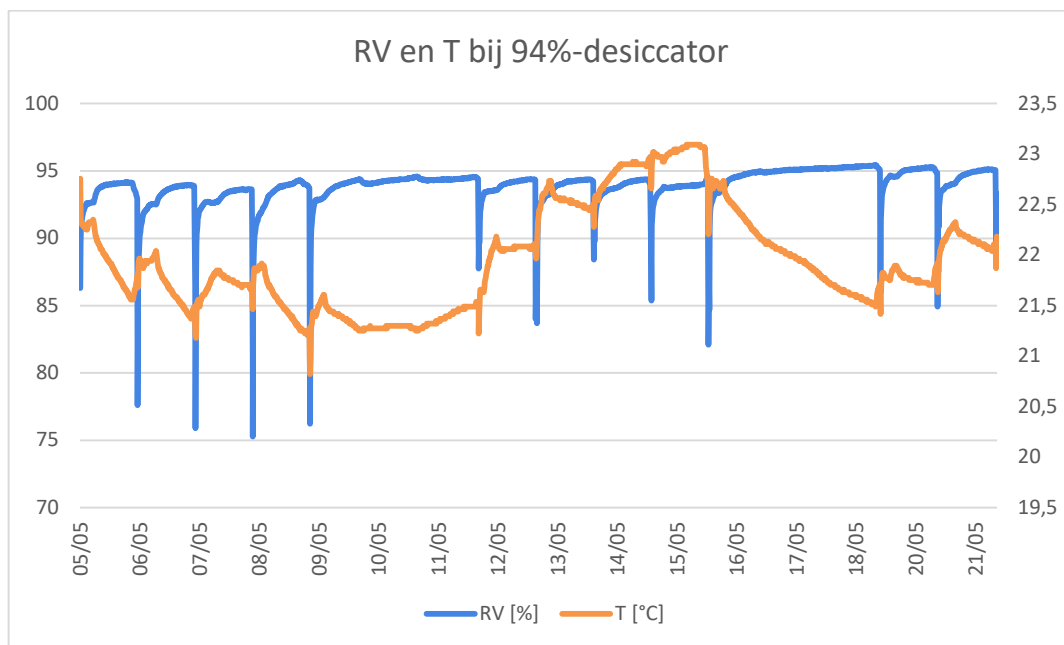
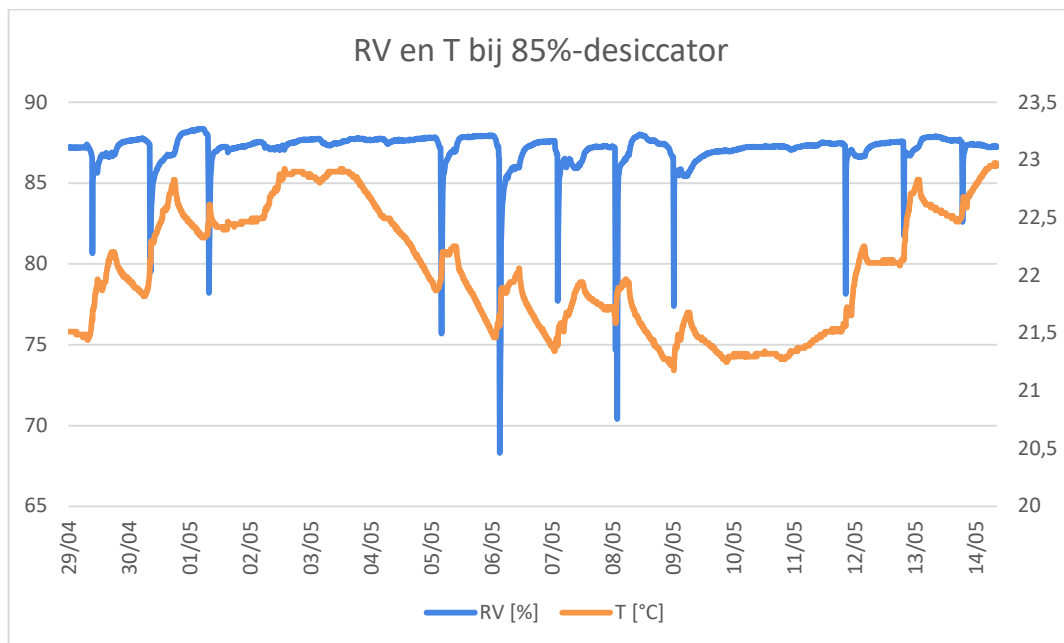
Kat-Pol	0min	5min	20min	1u	2u	4u	8u	24u	48u
1F	43,203	45,402	62,514	89,002	101,072	108,504	120,477	122,783	124,467
2G	42,756	46,486	60,072	79,334	85,043	85,669	103,532	107,473	109,059
3H	41,850	43,583	53,206	67,747	77,006	81,050	91,762	93,798	95,218
4I	45,084	50,787	75,448	92,057	93,139	101,082	110,255	112,424	113,824
5J	43,372	50,914	79,743	94,170	97,468	100,279	107,917	109,575	112,089

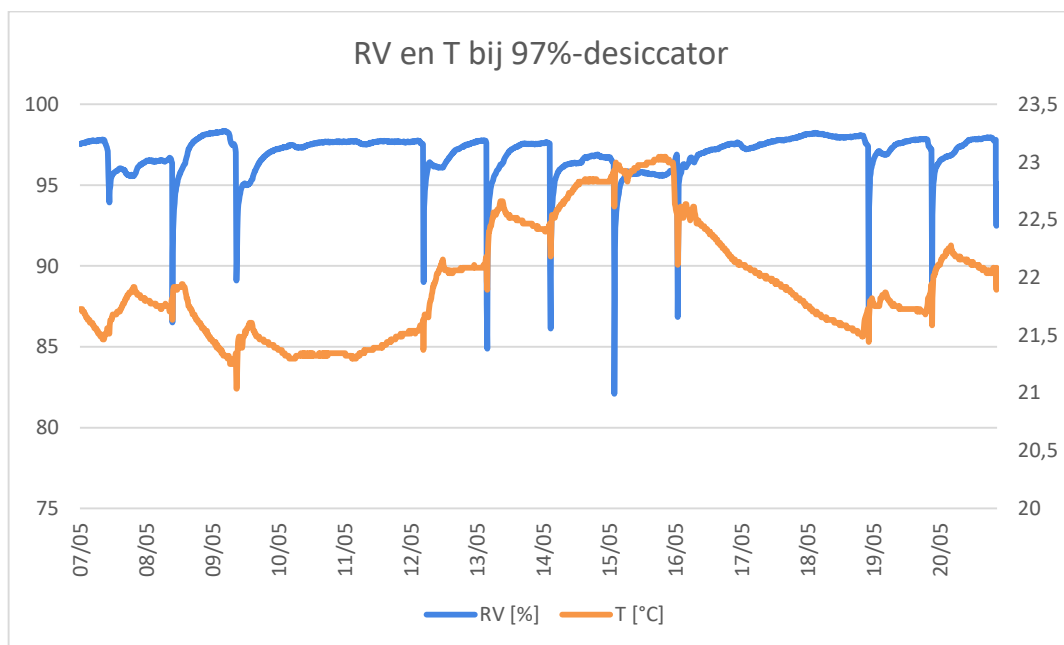
Métisse	0min	5min	20min	1u	2u	4u	8u	24u	48u
1K	71,133	131,560	130,355	132,164	139,559	141,866	145,907	153,243	164,197
2L	73,549	134,955	136,383	141,109	150,733	152,380	157,117	165,212	176,336
3M	72,139	118,919	121,365	130,801	136,877	140,935	145,942	153,165	162,321
4N	71,432	125,135	127,101	132,873	138,887	143,823	147,980	153,939	163,169
5O	71,283	113,063	117,547	125,546	134,722	137,653	141,549	147,787	155,743

12.4 Resultaten sorptieproef

12.4.1 Condities gemeten door dataloggers







12.4.2 Analytische resultaten

Sample	m(0)	38%		75%		87%		94%		97%	
		m(38)	u(38) [kg/kg]	m(75)	u(75) [kg/kg]	m(87)	u(87) [kg/kg]	m(94)	u(94) [kg/kg]	m(97)	u(97) [kg/kg]
WOL-6	7,4858	7,846	0,0481178	8,388	0,1205215	8,782	0,1731545				
WOL-7	7,5921	7,873	0,036999	8,382	0,1040424	8,758	0,1535675				
WOL-8	7,5920	7,876	0,0374078	8,385	0,1044521	8,798	0,1588514				

Sample	m(0)	38%		75%		87%		94%		97%	
		m(38)	u(38) [kg/kg]	m(75)	u(75) [kg/kg]	m(87)	u(87) [kg/kg]	m(94)	u(94) [kg/kg]	m(97)	u(97) [kg/kg]
KAT-6	7,7068	7,954	0,032076	8,195	0,063347	8,304	0,077490	8,412	0,091504	8,525	0,106166
KAT-7	7,7435	7,988	0,031575	8,210	0,060244	8,334	0,076258	8,467	0,093433	8,496	0,097178
KAT-8	7,7293	7,966	0,030624	8,204	0,061416	8,339	0,078882	8,421	0,089491		

Sample	m(0)	38%		75%		87%		94%		97%	
		m(38)	u(38) [kg/kg]	m(75)	u(75) [kg/kg]	m(87)	u(87) [kg/kg]	m(94)	u(94) [kg/kg]	m(97)	u(97) [kg/kg]
KP-6	7,8395	8,010	0,0217488	8,153	0,0399898	8,240	0,0510874	8,329	0,0624402	8,487	0,0825946
KP-7	7,8335	7,993	0,0203613	8,162	0,0419353	8,233	0,0509989	8,348	0,0656795	8,337	0,0642752
KP-8	7,8268	7,975	0,0189349	8,132	0,0389942	8,211	0,0490877	8,280	0,0579036	8,424	0,0763019

Sample	m(0)	38%		75%		87%		94%		97%	
		m(38)	u(38) [kg/kg]	m(75)	u(75) [kg/kg]	m(87)	u(87) [kg/kg]	m(94)	u(94) [kg/kg]	m(97)	u(97) [kg/kg]
POL-6	7,9195	7,959	0,0049877	7,980	0,0076394	7,990	0,0089021	7,988	0,0086495	8,022	0,0129427
POL-7	7,9340	7,975	0,0051676	7,997	0,0079405	7,990	0,0070582	8,017	0,0104613	8,018	0,0105873
POL-8	7,9188	8,003	0,0106329	8,020	0,0127797	8,015	0,0121483	8,055	0,0171996	8,061	0,0179573

Sample	m(0)	38%		75%		87%		94%		97%	
		m(38)	u(38) [kg/kg]	m(75)	u(75) [kg/kg]	m(87)	u(87) [kg/kg]	m(94)	u(94) [kg/kg]	m(97)	u(97) [kg/kg]
ACR-6	7,8815	7,966	0,0107213	8,029	0,0187147	8,029	0,0187147	8,072	0,0241705	8,150	0,0340671
ACR-7	7,8895	7,980	0,0114709	8,042	0,0193295	8,065	0,0222448	8,108	0,027695		
ACR-8	7,8888	7,978	0,0113072	8,030	0,0178988	8,064	0,0222087	8,075	0,0236031	8,103	0,0271524

Sample	m(0)	38%		75%		87%		94%		97%	
		m(38)	u(38) [kg/kg]	m(75)	u(75) [kg/kg]	m(87)	u(87) [kg/kg]	m(94)	u(94) [kg/kg]	m(97)	u(97) [kg/kg]
MET-6	21,1287	23,414	0,1081609	23,984	0,1351385	25,007	0,183556	26,375	0,2483021		
MET-7	22,2374	23,864	0,073147	24,530	0,1030966	25,402	0,1423098	26,668	0,1992409		
MET-8	20,8397	22,811	0,0945935	23,415	0,1235766						

u [kg/kg]	WOL	KAT	KP	POL	ACR	MET
0	0	0	0	0	0	0
38,31	0,040842	0,031425	0,020348	0,005078	0,011166	0,091967
75,72	0,109672	0,061669	0,040306	0,007790	0,018648	0,120604
87,33	0,161858	0,077543	0,050391	0,007980	0,021056	0,162933
94,13		0,091476	0,062008	0,009555	0,025156	0,223771
97,39		0,101672	0,074391	0,011765	0,030610	

u [kg/kg]	WOL-6	WOL-7	WOL-8	GEM
0	0	0	0	0
38,31	0,048118	0,036999	0,037408	0,040842
75,72	0,120522	0,104042	0,104452	0,109672
87,33	0,173155	0,153568	0,158851	0,161858
94,13				
97,39				

u [kg/kg]	KAT-6	KAT-7	KAT-8	GEM
0	0	0	0	0
38,31	0,032076	0,031575	0,030624	0,031425
75,72	0,063347	0,060244	0,061416	0,061669
87,33	0,077490	0,076258	0,078882	0,077543
94,13	0,091504	0,093433	0,089491	0,091476
97,39	0,106166	0,097178		0,101672

u [kg/kg]	KP-6	KP-7	KP-8	GEM
0	0	0	0	0
38,31	0,021749	0,020361	0,018935	0,020348
75,72	0,03999	0,041935	0,038994	0,040306
87,33	0,051087	0,050999	0,049088	0,050391
94,13	0,06244	0,065679	0,057904	0,062008
97,39	0,082595	0,064275	0,076302	0,074391

u [kg/kg]	ACR-6	ACR-7	ACR-8	GEM
0	0	0	0	0
38,31	0,010721	0,011471	0,011307	0,011166
75,72	0,018715	0,019329	0,017899	0,018648
87,33	0,018715	0,022245	0,022209	0,021056
94,13	0,024171	0,027695	0,023603	0,025156
97,39	0,034067		0,027152	0,03061

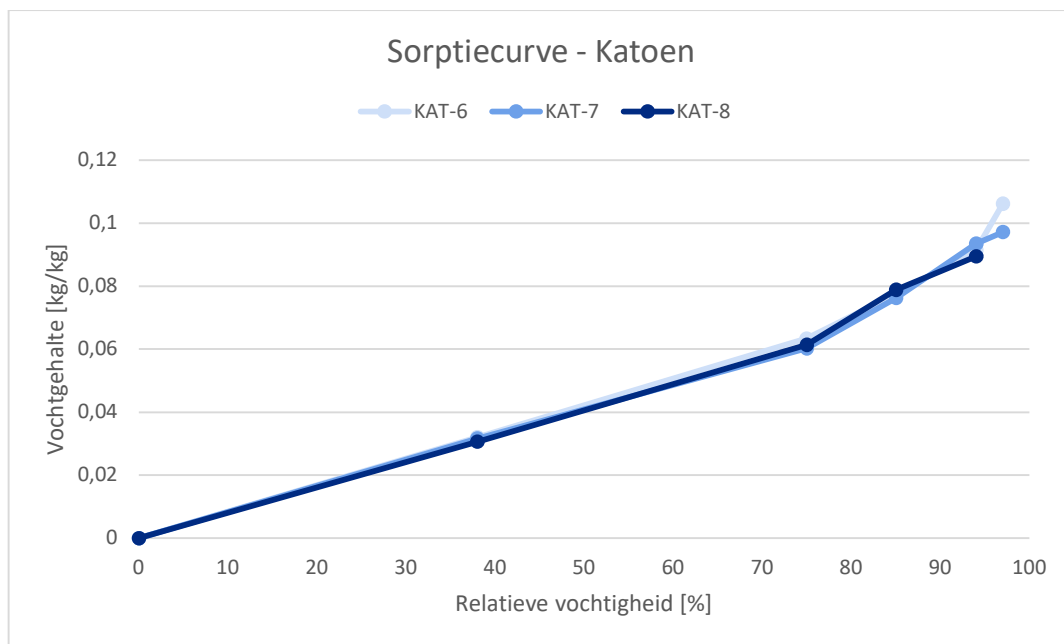
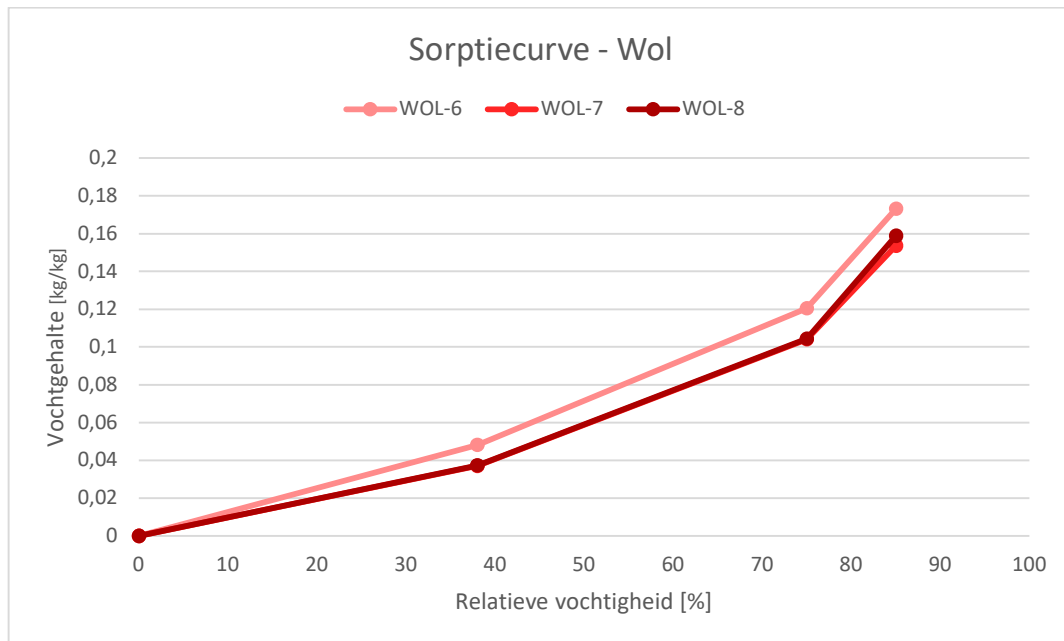
Voor bepaalde textielsoorten ontbreken bij een RV van 97% de gegevens van één van de stalen (KAT-8 en ACR-7). Gezien het sterke overeenkomstige verloop van de curven binnen elke textielgroep, kan het gemiddelde van de twee beschikbare stalen in beide gevallen alsnog als representatief worden beschouwd.

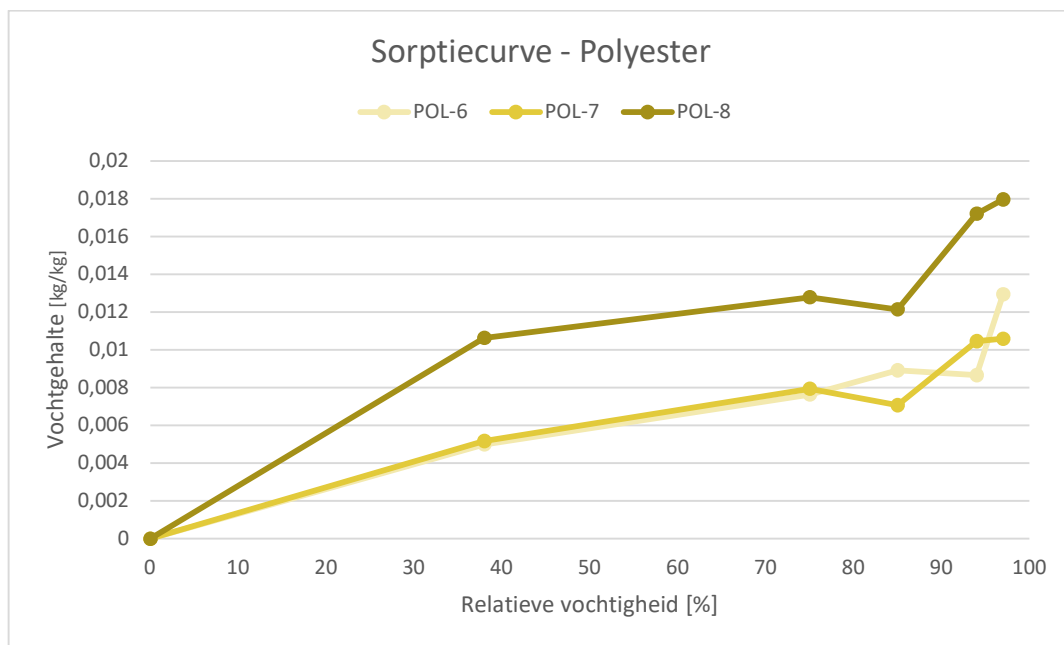
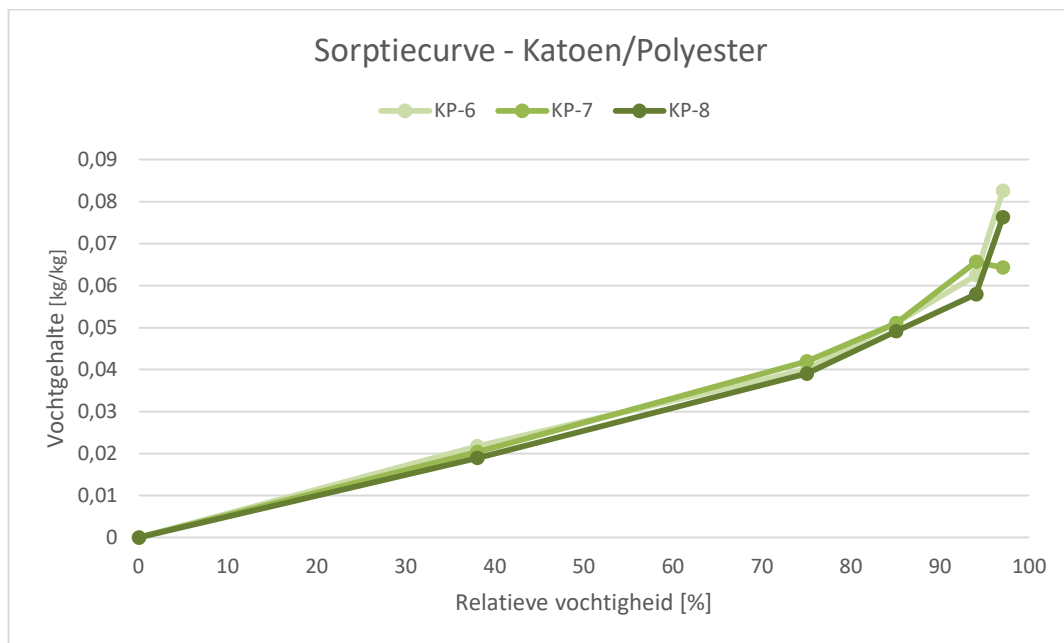
Voor polyester werd echter één staal (POL-8) waargenomen waarvan de curve significant afweek van die van de andere twee polyesterstalen (zie grafieken in deel 12.4.3). Deze afwijking kan mogelijk worden toegeschreven aan meetonnauwkeurigheden of variaties in de samenstelling van het staal. Om deze reden werd POL-8 buiten beschouwing gelaten in de verdere analyse. Bij de Métisse-stalen viel één staal (MET-8) bij het terugplaatsen in de meetopstelling in het water. Hierdoor werd dit staal onbruikbaar voor verdere metingen.

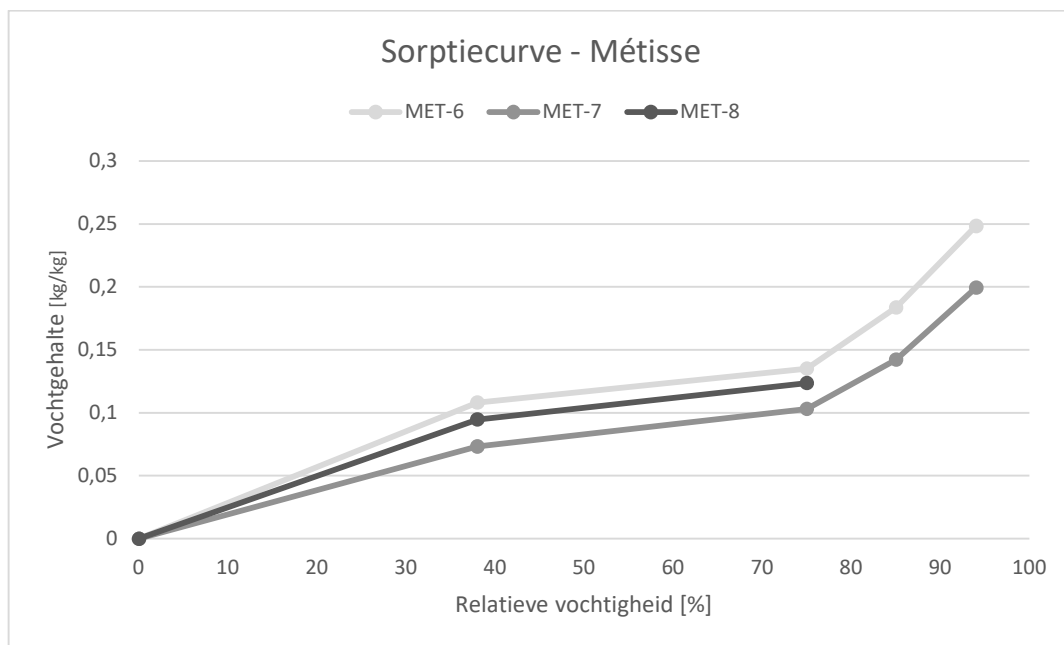
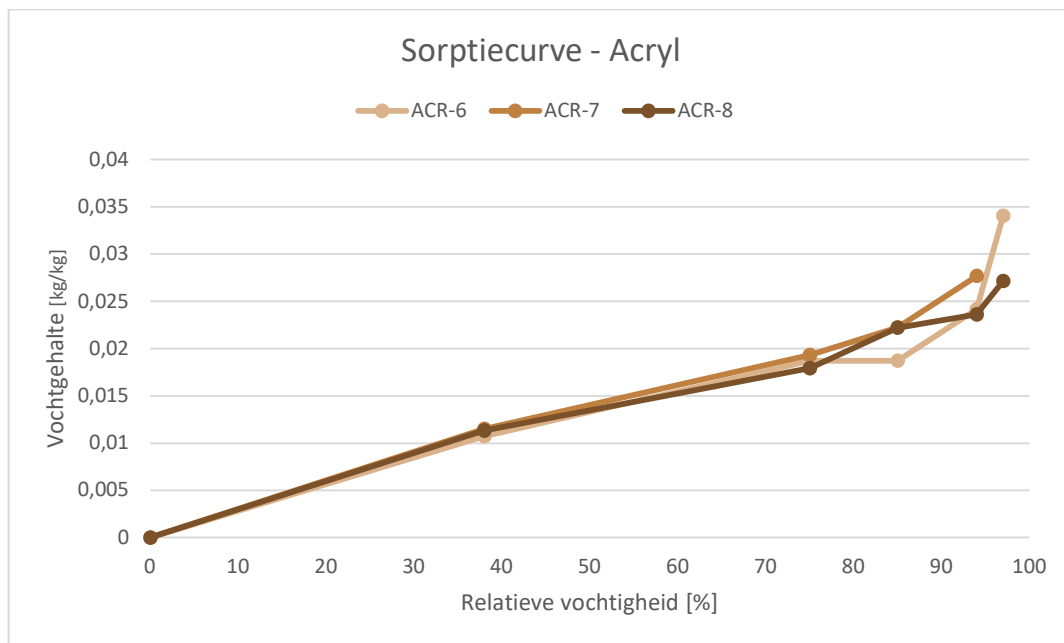
u [kg/kg]	POL-6	POL-7	POL-8	GEM	(enkel 6 en 7)
0	0	0	0	0	
38,31	0,004988	0,005168	0,010633	0,005078	
75,72	0,007639	0,007941	0,01278	0,00779	
87,33	0,008902	0,007058	0,012148	0,00798	
94,13	0,00865	0,010461	0,0172	0,009555	
97,39	0,012943	0,010587	0,017957	0,011765	

u [kg/kg]	MET-6	MET-7	MET-8	GEM	(enkel 6 en 7)
0	0	0	0	0	
38,31	0,108161	0,073147	0,094593	0,091967	
75,72	0,135138	0,103097	0,123577	0,120604	
87,33	0,183556	0,14231		0,162933	
94,13	0,248302	0,199241		0,223771	
97,39					

12.4.3 Grafische resultaten







12.5 Technische fiches

12.5.1 Technische fiche Métisse



DUBOKEUR®

ECOLOGISCHE EN SOCIALE MEERWAARDE:

Voor ruim de helft van alle ingezamelde kleding is er nu een veel beter alternatief dan de afvalberg: **upcyclen tot isolatiemateriaal Métisse®**. Voor dit revolutionaire isolatiemateriaal worden kledingstukken met specifieke thermische, akoestische en hygroscopische eigenschappen geselecteerd. De innovatieve productie Métisse®, gestart in 2007, kreeg onder meer vanwege NIBE-milieuclassificatie het DUBOkeur® toegekend. De selectie en verwerking van de kleding gebeurt in **een sociale tewerkstellingsplaats** van Le Relais te Billy-Berclau, omgeving Rijsel. Op amper **75 km van onze vestiging Ronse** wordt daarmee ook het transport tot een uiterste minimum beperkt.

AKOESTISCH EN THERMISCH ISOLEREND:

Métisse isoleert uitstekend in winter én zomer maar scoort ook akoestisch uitstekend. Door de goede geluidsabsorptie kan deze isolatie dus ook gebruikt worden voor de realisatie van akoestische binnenwanden (in combinatie met Fermacell gipsvezelplaten of Lemix leemplaten). Gemakkelijke verwerking: met Métisse op rol wordt snijwerk tot minimum beperkt. Métisse is een zacht isolatiemateriaal, gemakkelijk te snijden (mes met golvende vertanding) en dit zonder al te veel stof of huidirritatie.

AFMETINGEN, VOORRAAD EN PRIJZEN:

Breedte	60 mm dikte (rol)	90 mm dikte (rol)	140 mm dik (plaat)
450 mm	€ 6,45/m ²	€ 9,65/m ²	€ 14,09/m ²
600 mm	€ 6,04/m ²	€ 9,06/m ²	€ 14,09/m ²
R-waarde (W/(m.K))	1,54 m ² K/W	2,31 m ² K/W	3,59 m ² K/W

TECHNISCHE EIGENSCHAPPEN:

Warmtegeleidingscoëfficiënt: 0,039 W/mK

Warmteopslagcapaciteit: $C = 1600 \text{ J/kg.K}$

Massadichtheid: 20 kg/m^3

Dampdiffusieweerstand: $\mu 2,2$

Geluidsabsorptievermogen $\alpha_w = 0,8$

Brandklasse (DIN EN 13501-1): E

Samenstelling: 85% katoenvazels, 15% bindende vezels en 1% toeslagstoffen voor resistentie tegen schimmels

Aantasting schimmels (EN ISO 846-Conidia): klasse 0 (inert)



PREMIES EN BELASTINGVOORDEEL:

Premies via de netbeheerder in 2018 (Vlaanderen):

Type premie	Uitvoering door	Bedrag	Voorwaarde
Dakisolatie	Aannemer	€ 6/m ²	R-waarde 4,5 m ² K/W
	Particuliere zelfbouwer	€ 2/m ²	R-waarde 4,5 m ² K/W
Vloerisolatie	Aannemer	€ 6/m ²	R-waarde 2 m ² K/W
Combipremie	Combipremies en voucher voor totaalrenovatie tot € 4 750.		

Tip: in sommige steden (bv. Gent) en gemeenten gelden bijkomende premies!

TOTAALOPLOSSING BIJ EURABO:

ADVIES EN OPLEIDING



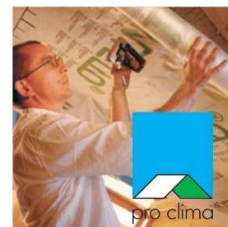
VERHUUR ISOLATIEZAAG



WEBSHOP



LUCHTDICHTINGSMATERIAAL



U ZOEKT EEN AANNEMER MET ERVARING IN BIO-ECOLOGISCH ISOLEREN OF (VER)BOUWEN? WIJ HELPEN U GRAAG VERDER!



Eurabo Ronse
ROK 52
Pont West 112
B-9600 Ronse
tel. +32 55 23 51 40

Eurabo Gent
Wiedauwkaai 87
9000 Gent
tel. +32 9 216 46 40

info@eurabo.be
www.eurabo.be
Twitter: @eurabo
Facebook: eurabo



05/09/2018

12.5.2 Technische fiche Pavatextil



PAVATEXIL P Thermo-akoestische isolatie op basis van katoenvezel



- Goed isolerend vermogen tegen de koude in de winter en de warmte in de zomer
- Damp-open
- Bezit geluidsisolerende eigenschappen



Verpakking

Dikte [mm]	Platen/pallet	Platen/pak	Afmetingen [mm]	m ² /pallet [m ²]	m ² /pak [m ²]	Thermische weerstand (R _a) [m ² .K/W]
45	104	13	1200 x 600	74,88	9,36	1,15
60	80	10	1200 x 600	57,60	7,20	1,50
80	56	7	1200 x 600	40,32	5,04	2,05
100	48	6	1200 x 600	34,56	4,32	2,55
120	40	5	1200 x 600	28,80	3,60	3,05
145	32	4	1200 x 600	23,04	2,88	3,70
160	24	3	1200 x 600	17,28	2,16	4,10
180	24	3	1200 x 600	17,28	2,16	4,60
200	24	3	1200 x 600	17,28	2,16	5,10

Eigenschappen

Dichtheid (EN 1602) [kg/m ³]	± 20
Warmtegeleidingscoëfficiënt (λ _d) (EN 12667) [W/(m.K)]	0,039
Specifieke warmtecapaciteit (c) [J/(kg.K)]	1600
Akoestische geluidsreductieindex* (R _w +C) [dB]	39
Brandreactie (EN 13501-1)	E
Waterabsorptie op korte termijn door gedeeltelijke onderdompeling [kg/m ²]	8
Afwerking zijden	rechte boord
Weerstand tegen schimmelgroei (EN 13501-F)	Klasse 0

NPD = geen prestatie vastgesteld

*Tussenwand 72/48 - Bron: ACOUBOIS-onderzoek (juni 2014) + simulaties

Productomschrijving

PAVATEXIL P is een zachte thermo-akoestische isolatieplaat op basis van katoenvezel (85 %), afkomstig van gerecycleerd textiel (jeans en fluweel), en polyestervezel (15 %).

De katoenvezel bezit hydrofiele en hygroscopisch eigenschappen en onderging een antibacteriële, schimmel- en brandwerende behandeling waardoor het mijt- en schimmel bestendig is.

PAVATEXIL P wordt hoofdzakelijk met een dampremmend membraan aan de binnenzijde geplaatst tussen het houten of metalen kaderwerk aan binnenzijde van muren en schuine daken. Het kan eveneens toegepast worden in zoldervloeren.

Consulteer steeds de plaatselijke regelgeving en contacteer de producent voor technische vragen.

Hygiëne, gezondheid en milieu

Dit product bevat geen gevaarlijke bestanddelen en beantwoordt aan de eisen inzake hygiëne, gezondheid en milieu.

Raadpleeg de veiligheidsfiche voor meer informatie.

Opslag

De isolatieplaten droog en beschermd tegen zonnestraling op een vlakke ondergrond opslaan.

De paletten zijn niet stapelbaar.



SOPREMA behoudt zich het recht voor om zonder voorafgaande kennisgeving de samenstelling en de gebruiksvoorwaarden van zijn producten te wijzigen, en dus ook de prijs. Bijgevolg zullen de bestellingen aanvaard worden aan de voorwaarden en technische eigenschappen die gelden op het ogenblik van ontvangst van de bestelling.

Contact: www.soprema.com



12.5.3 Technische fiche Pavacell



PAVACELL P *Thermo-akoestische isolatie op basis van cellulosewatten*



- Goed isolerend vermogen tegen de koude in de winter en de warmte in de zomer
- Eenvoudige verwerking en zeer goede klemwerking
- Damp-open
- Goede geluidsisolerende eigenschappen

Verpakking

Dikte [mm]	Platen/pallet	Platen/pakket	Afmetingen [mm]	m ² /pallet [m ²]	Thermische weerstand (R _a) [m ² .K/W]
60	80	10	1350 x 600	64,8	1,50
80	56	7	1350 x 600	45,4	2,05
100	48	6	1350 x 600	38,9	2,55
120	40	5	1350 x 600	32,4	3,05
145	32	4	1350 x 600	25,9	3,70
160	32	4	1350 x 600	25,9	4,10
180	24	3	1350 x 600	19,4	4,60
200	24	3	1350 x 600	19,4	5,10

Eigenschappen

Samenstelling	
cellulosevezels	75 ± 10 %
textielvezels (voornamelijk gerecycleerd katoen)	15 ± 5 %
bindvezels en hulpstoffen	10 ± 4 %
Dichtheid [kg/m ³]	35 (-5/+10)
Warmtegeleidingscoëfficiënt (λ ₀) [W/(m.K)]	0,039
Afwerking zijden	rechte boord

NPD = geen prestatie vastgesteld



Productomschrijving

PAVACELL P is een zachte thermo-akoestische isolatie hoofdzakelijk op basis van cellulosewatten.

De plaat kan op maat gesneden worden met een mes dat geschikt is voor het snijden van isolatiemateriaal op basis van plantaardige vezels (bijvoorbeeld PAVACUT) of met een cirkelzaag.

PAVACELL P wordt hoofdzakelijk geplaatst tussen het houten of metalen kaderwerk van muren, tussenwanden, plafonds en schuine daken.

Het kan eveneens toegepast worden in zoldervloeren.

Gebruik een damprem en luchtdicht membraan indien nodig.

Zorg ervoor dat de isolatie tijdens en na de plaatsing droog blijft.

Consulteer steeds de plaatselijke regelgeving en contacteer de producent voor technische vragen.

Hygiëne, gezondheid en milieu

Dit product bevat geen gevaarlijke bestanddelen en beantwoordt aan de eisen inzake hygiëne, gezondheid en milieu.

Opslag

De isolatieplaten droog en beschermd tegen zonnestraling op een vlakke ondergrond opslaan.

De paletten zijn niet stapelbaar.

SOPREMA behoudt zich het recht voor om zonder voorafgaande kennisgeving de samenstelling en de gebruiksvoorwaarden van zijn producten te wijzigen, en dus ook de prijs. Bijgevolg zullen de bestellingen aanvaard worden aan de voorwaarden en technische eigenschappen die gelden op het ogenblik van ontvangst van de bestelling.

Contact: www.soprema.com



12.5.4 Technische fiche PLA

IFGBio



Polylactic Acid (PLA) Fibre

IFG PLA fibres are melt spun from a sustainable, bio-based raw material that is compostable under industrial conditions (DIN 13432). IFG PLA fibre provides a bio-based solution for ground stabilisation projects (turf, grass, sand) that will not affect the natural drainage properties. Due to their unique thermal properties, they also offer a bio-based solution for heat-sealing paper applications. Fibres are mainly raw white, but a range of colours can be supplied, minimum order quantities apply.



Titre:
2.2 - 140dtex



Cut Length:
5 - 90mm



Crimp:
0.5 - 5crimps/cm or straight



Tenacity:
min.15cN/tex



Elongation:
25 - 80%



Applications:
Geotextiles, Turf
Stabilisation, Shading
Fabrics, Heat Seal, Yarns

Form of supply:	Staple fibres
Packaging:	Bales or cardboard boxes

Special demands on certain properties need to be discussed.

Sustainability is imperative to our future, and we have a responsibility to ensure our company, products and customers can contribute as much as possible. Our progressive R&D line investment allows IFG to develop more environmentally friendly, sustainable fibres, recycled polymers and be committed to future advancements in technology.

fibresgroup.com

FIBER INNOVATION TECHNOLOGY

DPL-3618-2

3 dpf x 51mm PLA/PLA

135°C Melt

GROSS WT	1	lb.
TARE WT.	0	lb.
NET WT.	1	lb.

2/17/2023

**FIBER INNOVATION TECHNOLOGY
398 INNOVATION DRIVE
JOHNSON CITY, TN.
U.S.A.**

12.5.5 Technische fiche datalogger Hobo UX100-011A

HOBO® Temp/RH 2.5% Data Logger (UX100-011A) Manual



The HOBO Temp/RH data logger records temperature and relative humidity (within 2.5% accuracy) in indoor environments with its integrated sensors. Using HOBOWare®, you can easily configure the logger alarm to trip for specific high or low sensor readings. Or, you can set up burst logging in which the logger records data at a different interval during certain conditions. The logger can also calculate minimum, maximum, average, and standard deviation statistics. This compact data logger has a built-in LCD screen to monitor the current temperature, relative humidity, logging status, battery use, and memory consumption in between readouts.

Specifications

HOBO Temp/RH 2.5% Data Logger

UX100-011A

Included Items:

- Command™ strip
- Double-sided tape
- Hook & loop strap

Required Items:

- HOBOWare 3.7.16 or later
(download at
www.onsetcomp.com/hoboware-free-download)
- USB cable

Temperature Sensor

Range	-20° to 70°C (-4° to 158°F)
Accuracy	±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32° to 122°F), see Plot A
Resolution	0.024°C at 25°C (0.04°F at 77°F), see Plot A
Response Time	4 minutes in air moving 1 m/s (2.2 mph)
Drift	<0.1°C (0.18°F) per year

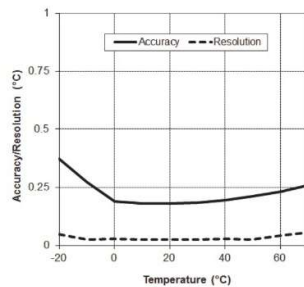
RH Sensor

Range	1% to 95% (non-condensing)
Accuracy	±2.5% from 10% to 90% typical to a maximum of ±3.5% including hysteresis at 25°C (77°F); below 10% and above 90% ±5% typical
Resolution	0.01%
Response Time	10 seconds to 90% in airflow of 1 m/s (2.2 mph)
Drift	<1% per year typical

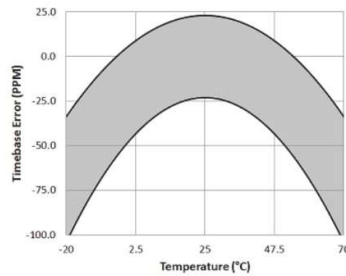
Logger

Logger Operating Range	Logging: -20° to 70°C (-4° to 158°F); 0 to 95% RH (non-condensing) Launch/Readout: 0° to 50°C (32° to 122°F) per USB specification
Logging Rate	1 second to 18 hours, 12 minutes, 15 seconds
Logging Modes	Fixed interval (normal), burst, or statistics
Memory Modes	Wrap when full or stop when full
Start Modes	Immediate, push button, date & time, or next interval
Stop Modes	When memory full, push button, or date & time
Restart Mode	Push button
Time Accuracy	±1 minute per month at 25°C (77°F), see Plot B
Power Source	One 3V CR2032 lithium battery and USB cable
Battery Life	1 year, typical with logging rate of 1 minute and sampling interval of 15 seconds or greater
Memory	128 KB (63,488 measurements, maximum)
Download Type	USB 2.0 interface
Full Memory Download Time	20 seconds
LCD	LCD is visible from 0° to 50°C (32° to 122°F); the LCD may react slowly or go blank in temperatures outside this range
Size	3.66 x 8.48 x 2.29 cm (1.44 x 3.34 x 0.9 in.)
Weight	30 g (1.06 oz)
Environmental Rating	IP50
CE	The CE Marking identifies this product as complying with all relevant directives in the European Union (EU).

Specifications (continued)

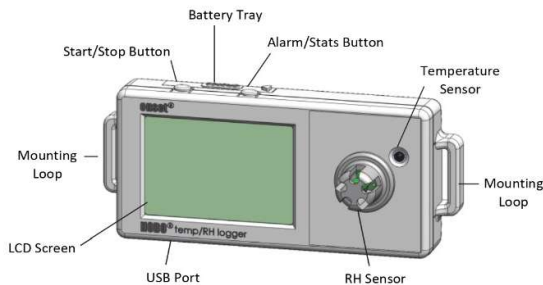


Plot A: Temperature Accuracy and Resolution

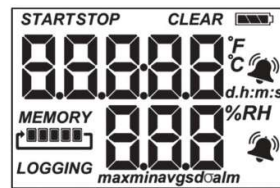


Plot B: Time Accuracy

Logger Components and Operation



LCD Screen: This logger is equipped with an LCD screen that displays details about the current status. This example shows all symbols illuminated on the LCD screen followed by definitions of each symbol in the table below.



Start/Stop Button: Press this button for 3 seconds to start or stop logging data, or to resume logging on the next even logging interval. This requires configuring the logger in HOBOWare with a push button start or stop, and with "Resume logging on next button push" selected (see *Setting up the Logger*). You can also press this button for 1 second to record an internal event (see *Recording Internal Logger Events*) or to turn the LCD screen on if the option to turn off the LCD has been enabled (see *Setting up the Logger*).

Battery Tray: Remove the battery tray on the top of the logger to access the logger battery (see *Battery Information*).

Alarm/Stats Button: Use this button to clear a tripped alarm (see *Setting up Alarms*) or to switch between statistics, alarm readings, and the current sensor readings.

Mounting Loops: Use the two mounting loops to mount the logger with the hook-and-loop strap (see *Mounting the Logger*).

Temperature Sensor: This sensor is located to the right of the RH sensor.

RH Sensor: The RH sensor is housed in the cap to the right of the LCD screen.

USB Port: Use this port (not visible in the diagram) to connect the logger to the computer or the HOBO U-Shuttle via USB cable (see *Setting up the Logger* and *Reading Out the Logger*).

LCD Symbol	Description
START	The logger is waiting to be launched. Press and hold the Start/Stop button for 3 seconds to launch the logger.
STOP	The logger has been launched with a push button stop enabled; press and hold the Start/Stop button for 3 seconds to stop the logger. Note: If you also launched the logger with a push button start, this symbol will not appear on the display for 30 seconds.
	The battery indicator shows the approximate battery power remaining.
MEMORY 	The logger has been configured to stop logging when memory fills. The memory bar indicates the approximate space remaining in the logger to record data. When first launched, all five segments in the bar will be empty. In this example, the logger memory is almost full (only one segment in the memory bar is empty).
MEMORY 	The logger has been configured to never stop logging (wrapping). The logger will continue recording data indefinitely, with newest data overwriting the oldest data. When first launched, all five segments in the memory bar will be empty. In this example, the memory is full (all five segments are filled in) and new data is now overwriting the oldest data. This will continue until the logger is stopped or the battery runs out.
LOGGING	The logger is currently logging.

LCD Symbol	Description
	A sensor reading is above or below the high or low alarm that you configured. Press and release the Alarm/Stats button until the “alm” symbol (described below) is displayed on the screen. This symbol at left will clear depending on how alarms were configured in HOBOWare. If the alarm was configured to clear when the logger is relaunched, this symbol will remain on the LCD. Otherwise, it will clear when the sensor reading is back within the alarm limits or by pressing the Alarm/Stats button for 3 seconds.
CLEAR	An alarm is ready to be cleared. This will only appear if “Cleared with button press” was selected in the HOBOWare alarm settings. Press the Alarm/Stats button for 3 seconds to clear the alarm.
max min avg sdσ	These symbols show the maximum, minimum, average, and standard deviation values most recently calculated for the logger (if the logging mode has been set to Statistics in HOBOWare). Press the Alarm/Stats button for 1 second to cycle through each of the available statistics and then back to the current sensor reading (or to the alarm value if applicable).
alm	This is the sensor reading that tripped the alarm. Press the Alarm/Stats button to view this reading. Press the Alarm/Stats button again to cycle through any statistics (defined above) and ultimately back to the current sensor reading.
80.2°F	This is an example of a temperature reading. Temperature units are determined by the settings in HOBOWare. To switch between Celsius and Fahrenheit, change the Display Preferences in HOBOWare before launching the logger.
68.0%RH	This is an example of an RH reading.
05:38 m:s	The logger has been configured to start logging on a particular date/time. The display will count down in days, hours, minutes, and seconds until logging begins. In this example, 5 minutes and 38 seconds remain until logging will begin.
LoAd	The launch settings are being loaded onto the logger from HOBOWare. Do not disconnect the USB cable during this process.
Err	An error occurred while loading the launch configurations onto the logger from HOBOWare. Make sure the USB cable is connected to both the logger and the computer and try launching again.
StoP	The logger has been stopped with HOBOWare or because the memory is full.

Notes:

- You can disable the LCD screen when logging. Select “Turn LCD off” when setting up the logger as described in the next section. When this option is enabled, you can still temporarily view the LCD screen by pushing the Start/Stop button for 1 second. The LCD will then remain on for 10 minutes.
- The LCD screen refreshes every 15 seconds regardless of the logging interval selected in HOBOWare. If you choose a logging interval less than 15 seconds, the data will be recorded at the faster interval, but the sensor readings will only be updated on the screen every 15 seconds.
- When the logger has stopped logging, the LCD screen will remain on until the logger is offloaded to a computer or

HOBO U-Shuttle (unless launched with the “Turn LCD off” option). Once the logger has been offloaded and disconnected from the computer, the LCD will turn off automatically after 2 hours. The LCD will turn back on the next time the logger is connected to the computer.

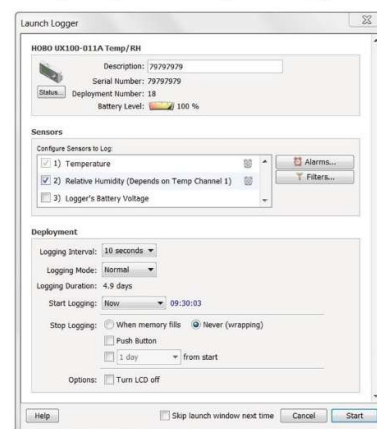
Setting up the Logger

Use HOBOWare to set up the logger, including setting alarms, selecting the options to start and stop logging, and choosing a logging mode.

- 1. Connect the logger and open the Launch Logger window.** To connect the logger to a computer, use the cable provided. Click the Launch icon on the HOBOWare toolbar or select Launch from the Device menu.

Important: USB 2.0 specifications do not guarantee operation outside the range of 0°C (32°F) to 50°C (122°F).

- 2. Select the sensors to log in this deployment.** Choose Temperature or Temperature and RH. Type a label for the sensor(s) if desired. Note that both sensors are required to calculate dew point, which is an additional data series available for plotting after reading out the logger.



- 3. Set up alarms (optional).** Click the Alarms button if you want to configure an alarm to trip when the sensor reading is above or below a value you specify. See *Setting up Alarms* for details.
- 4. Configure filters (optional).** Click the Filters button to create additional filtered data series. Any filtered series will be available automatically upon reading out the logger.
- 5. Select the Logging Interval.** Select a logging interval from 1 second to a maximum of 18 hours, 12 minutes, and 15 seconds.
- 6. Select the Logging Mode:**
 - Fixed Interval.** In Fixed Interval mode, data will always be recorded at the regular logging interval set in the previous step. This is the default setting.
 - Burst.** In Burst mode, logging will occur at a different interval when a specified condition is met. See *Burst Logging* for more information.

- **Statistics.** In Statistics mode, maximum, minimum, average, and standard deviation statistics are calculated for all enabled sensors during logging, sampling at an interval you specify. See *Statistics* for more information.

7. Choose when to start logging:

- **Now.** Logging begins immediately.
- **At Interval.** Logging will begin at the next even interval as determined by the selected logging interval.
- **On Date/Time.** Logging will begin at a date and time you specify.
- **Push Button.** Logging will begin once you press the Start/Stop logging button for 3 seconds.

8. Choose when to stop logging:

- **When Memory Fills.** Logging will end once the logger memory is full.
- **Never (Wrap When Full).** The logger will continue recording data indefinitely, with newest data overwriting the oldest. This option is not available if Burst is selected for the Logging Mode.
- **Push Button.** Logging will end once you press the Start/Stop logging button for 3 seconds. Note that if you also choose Push Button to start logging, then you will not be able to stop logging until 30 seconds after logging begins.

If you select the Push Button setting, then you also have the option to select "Allow button restart." This allows you to stop and then restart logging during the deployment by pushing the Start/Stop button on the logger for 3 seconds.

Important: When "Allow button restart" is selected and you use the Start/Stop button to stop and restart logging, logging will restart on the next even logging interval, not at the time the button was pushed. For example, a logger started logging at 7:00 AM with a logging interval set to 1 hour. If you press the Start/Stop button to stop the logger at 8:45 AM and then press the button again at 10:15 AM, logging will not begin immediately at 10:15. Instead, logging will begin again at 11:00 AM, which is the next even interval time based on your 1-hour logging interval. Therefore, depending on the logging interval, the gap between the time you press the button to resume logging and the time actual logging begins could be significant. The faster the logging interval, the less time will elapse before logging resumes.

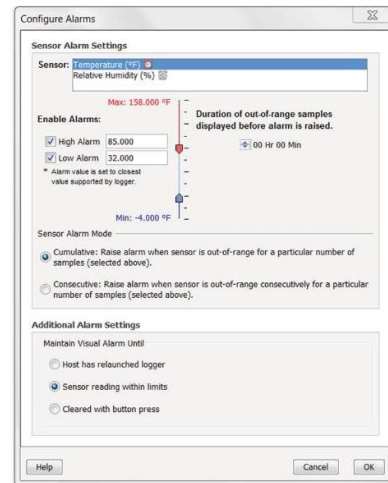
- **Specific Stop Time.** Logging will end at a date and time you specify. Note that if you also configure the logger for a Push Button stop and to "Allow button restart," then the logger will stop logging at the date you select regardless of how many times you stop and restart the logger with the Start/Stop button.
9. **Choose whether to keep the LCD on or off.** By default, the LCD will always remain on while logging. If you select the "Turn LCD off" checkbox, the LCD will not show the current readings, status, or other information while the logger is logging. You will, however, be able to temporarily turn the LCD screen on by pressing the Start/Stop button for 1 second if you select this option.
 10. **Click the Start button to launch the logger.** Disconnect the logger from the computer and deploy it using the mounting materials (see *Mounting the Logger*). After logging begins,

you can read out the logger at any time (see *Reading Out the Logger* for details).

Setting up Alarms

You can set an alarm to trip on the logger when a sensor reading rises above or falls below a specified value. To set an alarm:

1. Click the Alarms button from the Launch Logger window. If the Alarms button is disabled, make sure the Logging Mode is not set to Burst. (Alarms can only be configured if the logger is in Normal or Statistics mode.)
2. Select a sensor. In this example, the temperature sensor is selected.



3. Select the High Alarm checkbox if you want an alarm to trip when the sensor reading rises above the high alarm value. Type the reading next to the High Alarm checkbox or drag the red upper slider in the Configure Alarms window.
4. Select the Low Alarm checkbox if you want an alarm to trip when the sensor reading falls below the low alarm value. Type the reading next to the Low Alarm checkbox or drag the blue lower slider.
5. Set the duration before an alarm is tripped.
6. Select either Cumulative or Consecutive. If you select Cumulative, then the alarm will trip when the time the sensor is out of range over the course of the deployment is equal to the selected duration. If you select Consecutive, then the alarm will trip when the time the sensor is continuously out of range is equal to the selected duration. For example, the high alarm for temperature is set to 85°F and the duration is set to 30 minutes. If Cumulative is selected, then an alarm will trip once a sensor reading has been at or above 85°F for a total of 30 minutes since the logger was configured; specifically, this could be 15 minutes above 85°F in the morning and then 15 minutes above 85°F again in the afternoon. If Consecutive is selected, then an alarm will trip only if all sensor readings are 85°F or above for a continuous 30-minute period.
7. Repeat steps 2 through 6 for the other sensor if desired.
8. Choose how long the logger should maintain a sensor alarm once it has tripped. Select "Host has relaunched logger" if you want the alarm to remain visible on the LCD until the

next time you relaunch the logger. Select "Sensor reading within limits" if you want the alarm to clear once the sensor reading returns to the normal range between the high and low alarm limits. Select "Cleared with button press" if you want the alarm to remain on until you press the Alarm/Stats button on the logger.

9. Click OK to save alarm settings.

Notes:

- Once the logger is launched, alarms will trip as determined by these settings. Logger alarms will display on the LCD screen. Note that the alarm limits are only checked when the logger's LCD screen refreshes every 15 seconds.
- The actual values for the high and low alarm limits are set to the closest value supported by the logger. For example, the closest value to 85°F that the UX100 series logger can record is 84.990°F and the closest value to 32°F is 32.043°F. In addition, alarms can trip or clear when the sensor reading is within the logger specifications of 0.02°C resolution. This means the value that triggers the alarm may differ slightly than the value entered. For example, if the High Alarm is set to 75.999°F, the alarm can trip when the sensor reading is 75.994°F (which is within the 0.02°C resolution).
- When you read out the logger, high and low alarm levels will be displayed on the plot along with "Chan <#> Alarm Tripped" and "Chan <#> Alarm Cleared" events showing when the sensor alarm tripped and cleared. The "Chan <#> Alarm Cleared" event contains the value that was furthest out of range for the sensor before the alarm cleared (see the Points table for the actual value).

Burst Logging

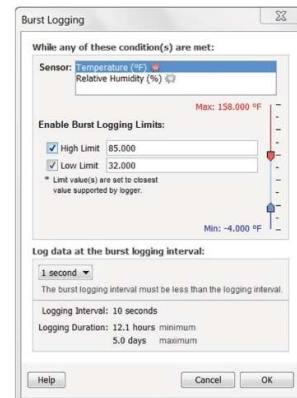
Burst logging is a logging mode that allows you to set up more frequent logging when a specified condition is met. For example, let's say the logger is recording data at a 5-minute logging interval and burst logging is configured to log every 10 seconds when the temperature goes above 85°F (the high limit) or falls below 32°F (the low limit). This means the logger will record data every 5 minutes as long as the temperature remains between 85°F and 32°F. Once the temperature reaches 90°F, for example, the logger will switch to the faster logging rate and record data every 10 seconds until the temperature falls back below the high limit (or 85°F in this case). At that time, logging then resumes every 5 minutes at the normal logging interval. Similarly, if the temperature falls to 30°F, for example, then the logger would switch to burst logging mode again and record data every 10 seconds. Once the temperature rises back to 32°F, the logger will then return to normal mode, logging every 5 minutes.

To set up burst logging:

1. Select Burst for Logging Mode in the Launch Logger window. If Burst has already been configured for this logger, click the Edit button in the Launch Logger window. Note that you cannot set up alarms with burst logging. You also cannot select the Stop Logging option "Never (wrap when full)" if burst logging is configured.
2. In the Burst Logging window, select a sensor. In the example at right, the temperature sensor was selected.
3. Select the High Limit checkbox if you want to set up a condition in which burst logging will occur when the sensor

reading rises above the high limit value. Type in the value or drag the red upper slider (see example below).

4. Select the Low Limit checkbox if you want to set up a condition in which burst logging will occur when the sensor reading falls below the low limit value. Type in the value or drag the blue lower slider.



5. Repeat steps 2 through 4 for the other sensor, if desired.
6. Set the burst logging interval, which must be less than the logging interval. Select either a preset burst logging interval or select Custom and enter your own interval. Keep in mind that the more frequent the burst logging rate, the greater the impact on battery life and the shorter the logging duration.
7. Click OK when done. This will return you to the Launch Logger window. Click the Edit button next to Logging Mode in the Launch Logger window to make additional changes.

Notes:

- Once the logger is launched, the high and low burst logging limits are only checked when the logger's LCD screen refreshes once every 15 seconds. Therefore, if you set the logging interval to less than 15 seconds and the sensor reading falls outside the limits, the burst logging will not begin until the next 15-second refresh cycle.
- If high and/or low limits have been configured for more than one sensor, then burst logging will begin when any high or low condition goes out of range. Burst logging will not end until all conditions on all sensors are back within normal range.
- The actual values for the burst logging limits are set to the closest value supported by the logger. For example, the closest value to 85°F that the logger can record is 84.990°F and the closest value to 32°F is 32.043°F.
- Burst logging mode can begin or end when the sensor reading is within the logger specifications of 0.02°C resolution. This means the value that triggers burst logging may differ slightly than the value entered. For example, if the high limit for a temperature alarm is set to 75.999°F, burst logging can start when the sensor reading is 75.994°F (which is within the 0.02°C resolution).
- Once the high or low condition clears, the logging interval time will be calculated using the last recorded data point in burst logging mode, not the last data point recorded in

“normal mode.” For example, let’s assume the logger has a 10-minute logging interval and logged a data point at 9:05. Then, the high limit was surpassed and burst logging began at 9:06. Burst logging then continued until 9:12 when the sensor reading fell back below the high limit. Now back in normal mode, the next logging interval will be 10 minutes from the last burst logging point, or 9:22 in this case. If burst logging had not occurred, the next data point would have been at 9:15.

- A New Interval event will appear on the plot (if you select events for plotting in the Plot Setup window) each time the logger enters or exits burst logging mode.

Statistics

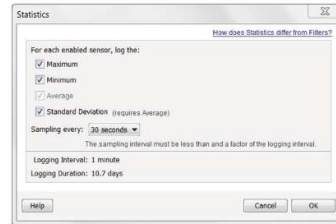
Statistics is a logging mode in which the logger calculates maximum, minimum, average, and standard deviation statistics during logging, recording the results at each logging interval based on samples taken at a rate you specify. This will result in up to four additional series per sensor that record the following information at each logging interval:

- The maximum, or highest, sampled value,
- The minimum, or lowest, sampled value,
- An average of all sampled values, and
- The standard deviation from the average for all sampled values.

For example, let’s say both the temperature and RH sensors have been enabled, the logging interval is set to 5 minutes and the sampling interval is set to 30 seconds (with maximum, minimum, average, and standard deviation all enabled). Once logging begins, the logger will measure and record the actual temperature and RH sensor values every 5 minutes. In addition, the logger will take a temperature and RH sample every 30 seconds and temporarily store them in memory. The logger will then calculate the maximum, minimum, average, and standard deviation using the samples gathered over the previous 5-minute period and log the resulting values. When reading out the logger, this would result in 10 data series (not including any derived series, such as dew point): two sensor series (with temperature and RH data logged every 5 minutes) plus eight maximum, minimum, average, and standard deviation series (four for temperature and four for RH with values calculated and logged every 5 minutes based on the 30-second sampling).

To set up statistics:

1. Select Statistics for Logging Mode in the Launch Logger window. If Statistics has already been configured for this logger, click the Edit button in the Launch Logger window.
2. Click the Maximum, Minimum, Average, and Standard Deviation checkboxes for each of the statistics you want to calculate during logging. Note that Average is automatically enabled when selecting Standard Deviation. **Important:** Statistics apply to all enabled sensors; every selected statistic will be calculated for all sensors (except battery voltage). For example, if both the temperature and RH sensors have been selected in the Launch Logger window and you select Average, then the average will be calculated for both temperature and RH. In addition, the more statistics you record, the shorter the logger duration and the more memory is required.



3. Set the sampling interval, which must be less than and a factor of the logging interval. Choose either a preset sampling interval or select Custom and enter your own sampling interval. Keep in mind that the more frequent the sampling rate, the greater the impact on battery life.
4. Click OK when done. This will return you to the Launch Logger window. Click the Edit button next to Logging Mode in the Launch Logger window to make additional changes.

Once logging begins, click the Alarm/Stats button on the logger to cycle through the current maximum, minimum, average, and standard deviation data on the LCD screen. You can plot the statistics series once you read out the logger.

Reading Out the Logger

There are two options for reading out the logger: connect it to the computer with a USB cable and read out it with HOBOWare, or connect it to a HOBO U-Shuttle (U-DT-1, firmware version 1.18m030 or higher) and then offload the data files from the U-Shuttle to HOBOWare. Refer to the HOBOWare Help for more details.

Recording Internal Logger Events

The logger records the following internal events to track logger operation and status. You can plot these events in HOBOWare after reading out the logger and opening the data file.

Internal Event Name	Definition
Host Connected	The logger was connected to the computer.
Started	The Start/Stop button was pressed to begin logging.
Stopped	The logger received a command to stop recording data (from HOBOWare or by pushing the Start/Stop button).
Button Up/Button Down	The Start/Stop button was pressed for 1 second.
Chan <#> Alarm Tripped	A sensor alarm has tripped; # is the channel or sensor number as shown in the Launch Logger window in HOBOWare.
Chan <#> Alarm Cleared	A sensor alarm has cleared; # is the channel or sensor number as shown in the Launch Logger window in HOBOWare. This event also contains the value that was furthest out of range for the sensor before the alarm cleared.
New Interval	The logger has entered or exited burst logging mode.
Safe Shutdown	The battery level dropped below 2.5 V; the logger performs a safe shutdown.

Mounting the Logger

There are several ways to mount the logger using the materials included:

- Use the four built-in magnets on the back of the logger to mount it to a magnetic surface.
- Attach the Command strip to the back of the logger to mount it to a wall or other flat surface.
- Use the double-sided tape to affix the logger to a surface.
- Insert the hook-and-loop strap through the mounting loops on both sides of the logger to mount it to a curved surface, such as a pipe or tubing.

Protecting the Logger

The logger is designed for indoor use and can be permanently damaged by corrosion if it gets wet. Protect it from condensation. If the message FAIL CLK appears on the LCD screen, there was a failure with the internal logger clock possibly due to condensation. Remove the battery immediately and dry the circuit board.

Note: Static electricity may cause the logger to stop logging.

The logger has been tested to 8 KV, but avoid electrostatic discharge by grounding yourself to protect the logger. For more information, search for "static discharge" on www.onsetcomp.com.

Replacing the RH Sensor

The internal RH sensor may require replacement if it is damaged mechanically or by exposure to condensation or chemicals. The replacement sensor (HUM-RHPCB-3C) is available from Onset. To replace the sensor:

1. Remove the cap from the logger case with a one quarter turn counter-clockwise.



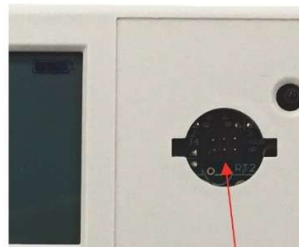
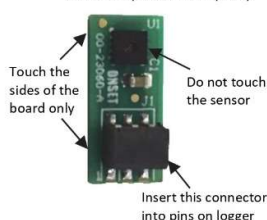
2. Pull to remove the RH sensor from the board inside the logger. Discard the sensor.



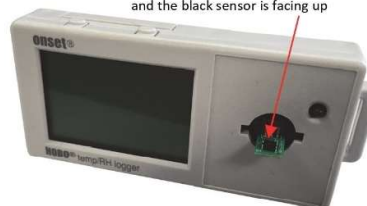
3. Wearing gloves or finger cots to prevent contamination or damage, hold the replacement sensor by the sides of the board only. Do not touch the actual sensor (the small black square). Touching the sensor may compromise accuracy. Insert the connector on the sensor board into the pins on the board in the logger. Make sure the RH sensor is oriented with

the flat part of the board pointed down as shown below and gently insert the connector into the pins on the logger board.

WARNING: Wearing gloves or finger cots, touch the sides of the board only; do not touch the sensor (small black square)



When installed correctly, the flat part of the RH sensor board is pointed down and the black sensor is facing up



4. Place the cap over the RH sensor lining up the notches on the cap with the grooves on both sides of the sensor. Secure the cap with a one quarter turn clockwise until it snaps back in place.
5. Check logger status in HOBOWare to verify the RH reading.

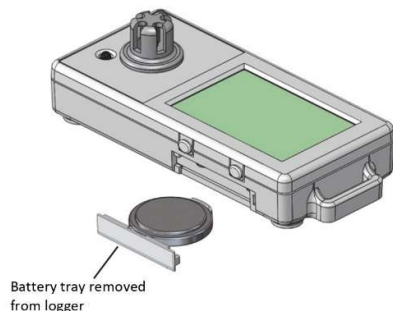
Battery Information

The logger contains a 3V CR2032 battery (HRB-TEMP). Expected battery life varies based on the ambient temperature where the logger is deployed, the logging or sampling interval, frequency of offloading to the computer, number of channels that are active, if burst or statistics logging modes are active, and battery performance. A new battery typically lasts 1 year with logging intervals greater than 1 minute. Deployments in extremely cold or hot temperatures, a logging interval faster than 1 minute, or a sampling interval faster than 15 seconds can impact battery life. Estimates are not guaranteed due to uncertainties in initial battery conditions and operating environment.

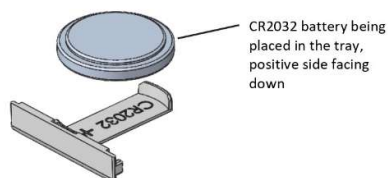
The logger can also be powered by the USB cable when the remaining battery voltage is too low for it to continue logging. Connect the logger to the computer, click the Readout button on the toolbar, and save the data as prompted. Replace the battery before launching the logger again.

To replace the battery:

1. Holding the logger with the LCD screen facing up, pull the battery tray out of the logger housing.



2. Remove the old battery from the tray.
3. Place the new battery in the tray with the positive side facing down.



4. With the LCD screen still facing up, slide the tray back into the logger. The LCD should display "HOBO" briefly after correctly installing the battery.

⚠ WARNING: Do not cut open, incinerate, heat above 85°C (185°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.

HOBOWare provides the option of recording the current battery voltage at each logging interval, which is disabled by default. Recording battery life at each logging interval takes up memory and therefore reduces logging duration. It is recommended you only record battery voltage for diagnostic purposes.

12.5.6 Technische fiche Heat Flow Meter FOX 314



LaserComp Thermal Conductivity

Thermal conductivity measures the ability of a material to transfer heat. Exact measurements of this material property are essential for understanding and optimizing energy efficiency and predicting thermal performance of materials in a wide range of industries including construction, electronics, aerospace, automotive, and many more.

TA Instruments proudly presents a line of cutting-edge instruments for the direct measurement of heat flow of low to medium conductivity materials: the LaserComp FOX series of heat flow meters and guarded hot plate. The FOX Series provides end-users with unique features and the widest range of possible configurations to meet every measurement need.

Let us show you why, for over 50 years, scientists and engineers have relied upon TA Instruments systems for the most advanced, reliable, and sensitive instruments for thermal property measurement.

Heat flow meter

LASERCOMP HEAT FLOW METERS

FOX instruments utilize a steady state technique for the determination of thermal conductivity. The Heat Flow Meter Method, designed specifically for insulating materials, is defined by international standards ASTM C518, ISO 8301, and DIN EN 12667. This cost-effective and practical method is widely recognized and preferred by industry professionals throughout the world for its speed, simplicity, and accuracy.

In a heat flow meter, a specimen is positioned between two temperature-controlled plates. These plates establish a user-defined temperature difference (ΔT) across the sample. The sample thickness (L) is set to match the target thickness of compressible samples, or the actual sample dimension. Accurate sample thickness is critical. Only the FOX Series incorporates four optical encoders, one at each corner, to ensure the utmost accuracy. The resulting heat flux (Q/A) from steady-state heat transfer through the specimen is measured by two proprietary thin film heat flux transducers covering a large area of upper and lower sample surfaces. This unique technology, unlike competitive designs, insures the most sensitive and exact measurement of heat flow.

The average heat flux is used to calculate the thermal conductivity (λ) and thermal resistance (R), according to Fourier's Law.

$$\lambda = \frac{Q}{A} \frac{L}{\Delta T}$$

UNITS	(W/mK) (Btu in/h ft ² F)
-------	--

$$R = \frac{1}{\lambda} L$$

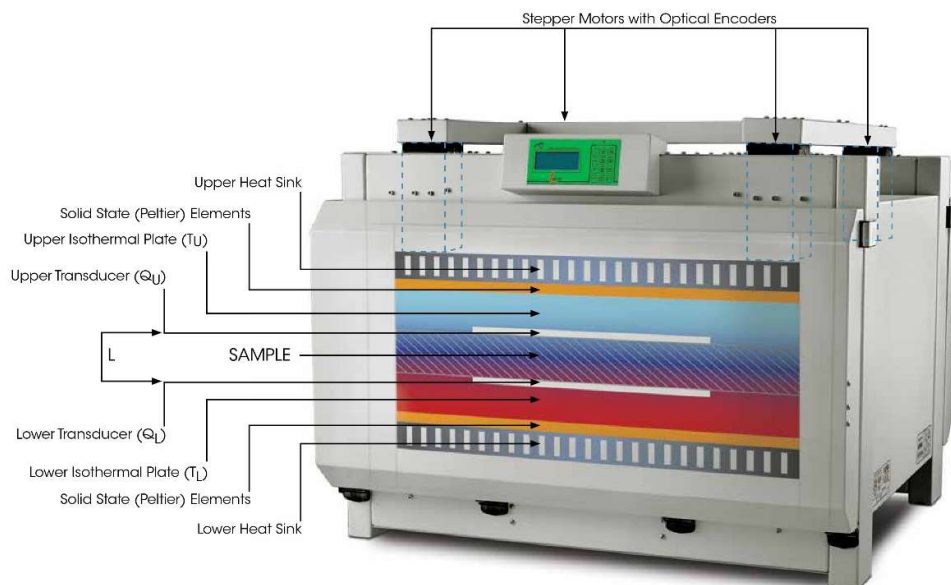
UNITS	m ² K/W (h-ft ² -F/Btu)
-------	--

Features

- Solid state heating/cooling for precise temperature control
- Optical encoders for the most accurate digital measurement of sample thickness
- Proprietary thin film heat flux transducers for the most representative sample heat flow measurement
- Powerful WinTherm software for enhanced testing functionality
- Automatic sample feeder for high-throughput analyses
- Stand-alone or PC-based operation
- Conforms to standard test methods:

Thermal Conductivity
ASTM C518 ISO 8301 DIN EN 12667

Specific Heat
ASTM C1784



FOX Series

HEAT FLOW METERS

An Instrument for Every Application

The most meaningful thermal conductivity measurements are performed on samples with dimensions representative of real world conditions. These dimensions, such as sample thickness to width ratio, are requirements often outlined by international standards. Four models of the FOX Series Heat Flow Meters accommodate the widest range of sample dimensions. Each instrument has the flexibility to test samples with smaller dimensions and oversized samples can be tested in the open-door configuration without sacrificing measurement precision and accuracy.


FOX 200

FOX 314

	FOX 200	FOX 314
Maximum Sample Thickness	51 mm (2 inch)	100 mm (4 inch)
Square Sample Width ⁽¹⁾	200 mm (8 inch)	300 mm (12 inch)
Temperature Range ⁽²⁾	-20 °C to 75 °C	-20 °C to 75 °C
Temperature Resolution	±0.01 °C	±0.01 °C
Accuracy	±1%	±1%
Reproducibility	±0.5%	±0.5%
Thermal Conductivity Range ⁽³⁾	0.005 to 0.35 W/m·K (0.035 to 2.4 BTU in/hr ft² °F)	0.005 to 0.35 W/m·K (0.035 to 2.4 BTU in/hr ft² °F)
Available Configurations	Automatic Sample Feeder External Thermocouple Kit Vacuum	Automatic Sample Feeder External Thermocouple Kit Linear Gradient Guard
Proprietary Thin Film Heat Flux Transducer	75 mm x 75 mm (3 in) Top and bottom	100 mm x 100 mm (4 in) Top and bottom

Technology

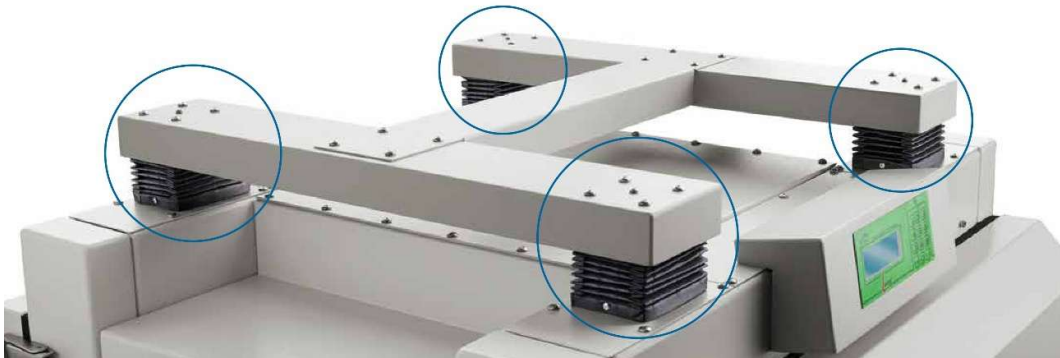
FOX HEAT FLOW METER

Linear Optical Encoders improve accuracy

The accuracy of a thermal conductivity measurement is directly affected by the precision of the measurement of sample thickness. Unlike competitive units that rely on a single analog measurement of thickness, with limited accuracy, the FOX Heat Flow Meters feature optical encoders and stepper motors for **independent position control and measurement at all four plate corners**. This gives the system the ability to level the plates to conform to samples with non-parallel surfaces, improving thermal contact and providing a **truly representative measurement of sample thickness to within 25 μm** . The plates may be positioned either to a user-defined thickness for soft compressible samples, or using Auto-Thickness function for rigid samples, in which the plate automatically moves to establish full contact with the sample.



Stepper Motor with Optical Encoder



Advanced Heat Flux Measurement

The Fox heat flux transducer delivers a **true**, undistorted measurement of the total heat flux, with durability over a long operating lifetime. The proprietary thin film design of the transducer (< 1 mm thick) is made from a continuous surface of sensing junctions that integrate evenly over the entire sensor area. A type-E thermocouple is bonded in the center of each transducer within 0.1 mm of the samples surface and sealed against moisture. The design provides for the most representative sample temperature and heat flow measurements, simple and robust calibrations, no susceptibility to edge losses or gains, and better testing of heterogeneous materials.

LaserComp Heat Flux Transducer



Precision Temperature Control

Two arrays of solid-state Peltier elements provide responsive heating and cooling to each of the plates. The low-mass, high-output Peltier elements enable fast attainment of set-points, improving productivity. Plate temperature control is driven by responsive thermocouples in close contact with the sample. An advanced temperature control algorithm continuously maintains the plate temperatures and rapidly brings the system to full thermal equilibrium.

A unique feature of the Fox systems is the ability to heat or cool the top and bottom plates, allowing for testing with heat flow either up or down.

FOX Heat Flow Meters utilize a recirculating chiller system as a heat exchanger, allowing the Peltier elements to operate at the necessary power output.



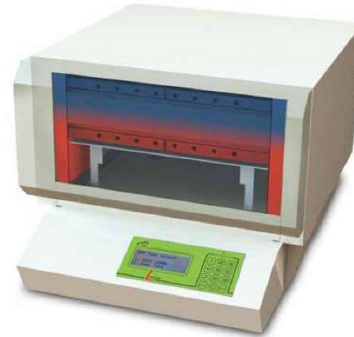
Recirculating Chiller

System configurations

FOX HEAT FLOW METER

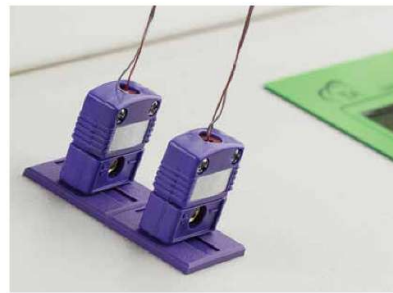
FOX 304 with Linear Gradient Guard

The FOX 304 is a specialized configuration of the FOX 314 that includes a Linear Gradient Guard. This provides an active thermal guarding system on all four sides of the plates, precluding distortions in results due to edge heat loss or gain when testing thick samples. This minimizes dependence of calibration factor on thickness, decreases the time to thermal equilibrium, and **improves accuracy of tests for very thick samples.**



External Thermocouple Option

Thermocouples are attached directly to the sample surfaces, eliminating the impact of interface resistance, and improving the measurement accuracy for higher thermal conductivity samples (up to 2.5 W/m·K). External thermocouples are placed in contact with the sample or placed in grooves machined in rigid specimens. Instruments configured for this option feature auxiliary outlets for the external thermocouples.



Measurement Under Vacuum

Certain applications such as the design of vacuum insulation panels and the evaluation of blowing agents require operation under vacuum or controlled atmosphere. The FOX 200 Vacuum features sealed electronics, water lines, and motor shafts for operation within an evacuated chamber. The test chamber can also be back-filled with purge gas. The FOX 200 Vacuum allows the test environment to be evacuated while the plates remain open. The plates can then be closed according to a user-defined gap or Auto-Thickness protocol. When paired with a turbomolecular pump, vacuum as high as 10^{-11} atm is possible.



Rotational System Option

The FOX 600 and FOX 801 Heat Flow Meters can be configured with the innovative Rotational System. This unique accessory allows thermal conductivity to be measured under conditions which match the installation orientation. The rugged system motor can be rotated to angles between 0° and 90°.



Cryogenic Measurements - FOX 200LT

The FOX 200LT incorporates liquid nitrogen cooling for sub-ambient testing. Gaseous nitrogen circulates through the plates to provide accurate temperature control from -175 °C to 50°C. Plate positioning control ensures that plates remain in contact with the sample, to account for changes due to thermal expansion or contraction.

System configurations

FOX HEAT FLOW METER

Automation

Improve productivity with the Automatic Sample Feeder (ASF) available for all models. The ASF is mounted to the back of the instrument and is controlled directly by the WinTherm Instrument Control Software. The ASF automatically loads and unloads up to 20 standard size samples (stack height 500 mm). Additional samples can be added while a test is in progress.

Calibration Materials

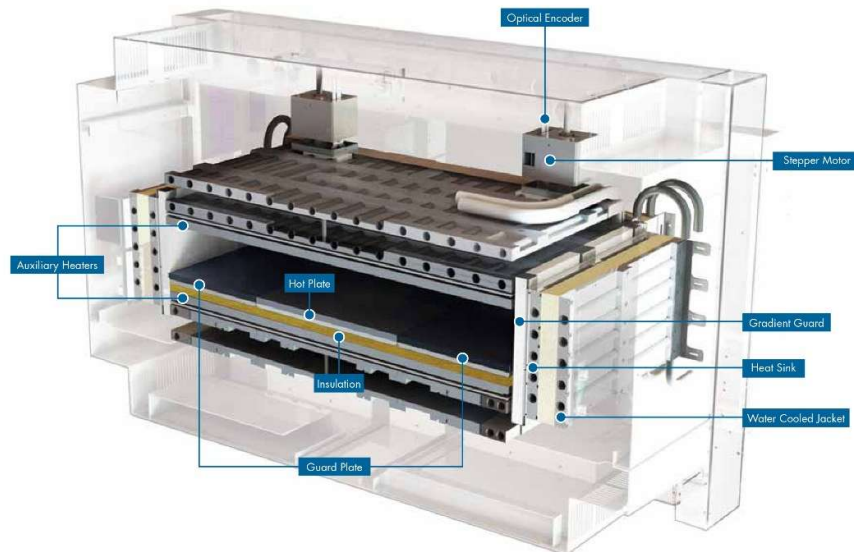
Standard materials may be purchased for verification test and re-calibration of all FOX Series Heat Flow Meters. Expanded Polystyrene specimens tested and verified by the LaserComp Laboratory are available for routine verification tests. Fiberglass reference materials certified by the National Institute of Standards and Technology (NIST) or the Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM) are also available.

The long-term stability of FOX systems means that calibrations and corrections are often not required for several years.



Optical Encoders deliver the most accurate measurement of sample thickness

Similar to the FOX Heat Flow Meters, the GHP features optical encoders and stepper motors for independent position control and measurement at all four plate corners. This gives the system the ability to level the plates to conform to samples with non-parallel surfaces, improving thermal contact and providing a truly representative measurement of sample thickness to within 25 μm .



Guarded Hot Plate 17

Software control and advanced features

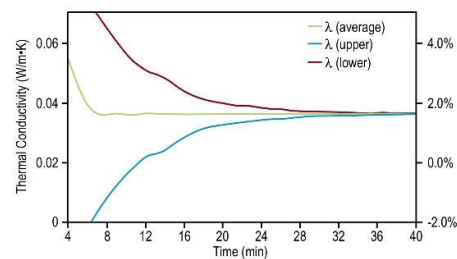
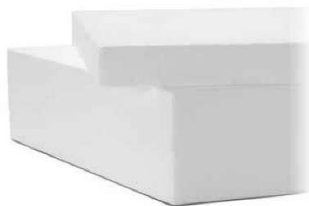
The FOX 200, FOX 314, FOX 600, and FOX 801 systems can be operated in stand-alone mode, or connected to a PC.

Powerful software gives users the ultimate flexibility to:

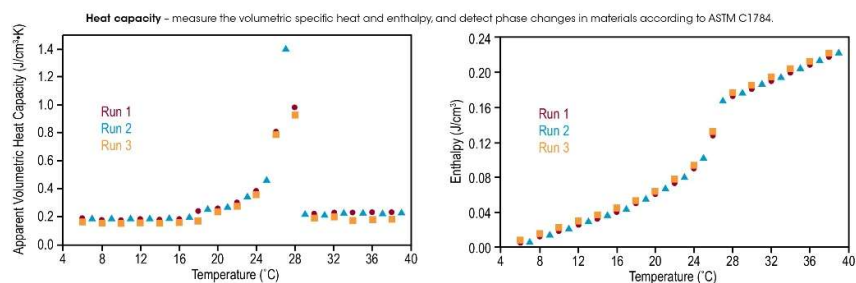
- Automatically verify system performance and if necessary re-calibrate
- Control sample thickness and plate's temperatures
- View real time data
- Collect, store, and analyze data



Accelerated testing – the average heat flow of the upper and lower heat flux sensors is calculated, and stabilizes much faster than individual signals. Accurate measurements (to within $\pm 0.4\%$) can be made in less than half the time, increasing laboratory throughput.



Calibrations for lateral heat loss and interface resistance. Gives users the ability to test thick samples, and materials of higher thermal conductivity.

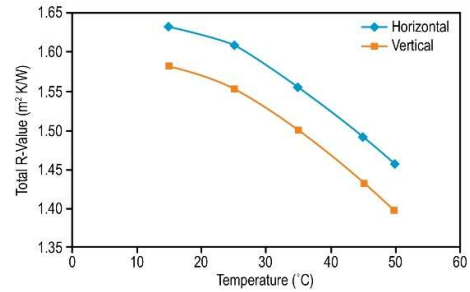


Applications

Heat Flow Meter

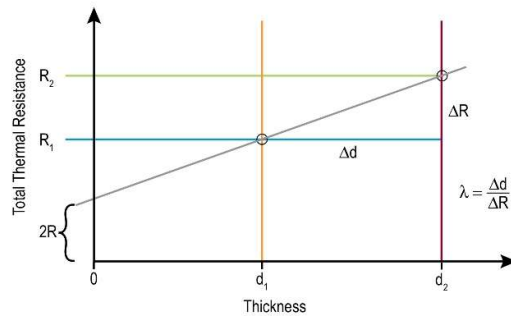
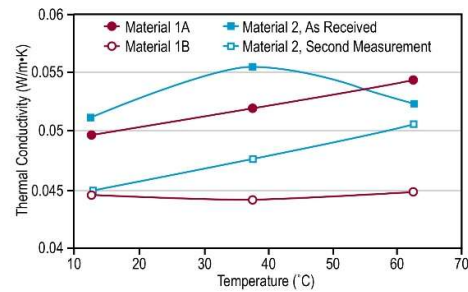
Rotational Testing

The total effective thermal resistance for an open-form component includes contributions from heat conduction and natural convection. Convection is dependent on installation orientation. A specimen constructed of two layers of oriented-strand board separated by two air cavities and reflective foil was tested in horizontal (0°) and vertical (90°) orientations. Both exhibit similar temperature dependence, decreasing thermal resistance with increasing temperature. The horizontal installation provides 3% to 5% greater thermal resistance than the vertical orientation.



Loose Fill

Thermal conductivity depends on composition of a material, and especially on the processing or preparation of that material. In this example two different formulations of fine powder were tested for thermal conductivity using the FOX 200 Heat Flow Meter. Material 1 was prepared with the same composition, but following two different manufacturing methods, which resulted in a 20% difference in thermal conductivity. Material 2 was tested twice. The second experiment shows a markedly lower thermal conductivity than the first, indicating that the powder was impregnated with water when received and initially tested. The material dried during the first heating cycle, leading to a lower thermal conductivity on subsequent measurement.



The Two-Thickness Method

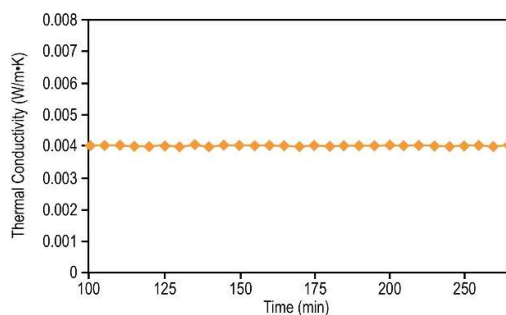
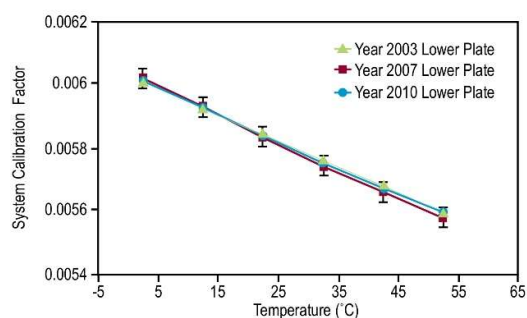
The two-thickness method for thermal conductivity measurements is a powerful technique for materials that are rigid and have higher thermal conductivity values. By measuring two specimens of the same material, but different thicknesses, the thermal resistances, $2R$, that occur at the two plate/sample interfaces can be calculated and excluded.

Applications

Heat Flow Meter

Long-Term System Stability

In addition to exceptional measurement accuracy and sensitivity, the LaserComp heat flux transducer design provides unparalleled system stability. In this example, the calibration factors for a FOX 600 are shown for over 7 years. Error bars are shown at $\pm 0.5\%$. It can be seen that the calibration factor – and therefore the measured values – deviate by much less than 0.5% over the full temperature range through this very long timespan. This stability leads to greater data confidence and much less time spent calibrating as compared to competitive designs.



Measurement Stability

The FOX Series Heat Flow Meters exhibit both exceptional sensitivity to small heat flows, and reliable stability over the course of the measurement, free from noise or external disturbances. This example data is for a very low conductivity vacuum insulation panel tested at a mean temperature of 15 °C. The measurement is continued for more than two hours to demonstrate the stability of the measurement. The signal deviates by less than 0.2% over the course of the measurement, even for this extremely low conductivity material.