

Het drogingspotentieel van biogebaseerde isolatiematerialen in geval van accidentele waterinfiltratie: analyse aan de hand van in situ metingen en numerieke HAM-simulaties

Victor Wijnant, Siemen Deweer

Studentennummers: 01806313, 01809334

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

Begeleider: ir.-arch. Bruno Vanderschelden

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2022-2023

Het drogingspotentieel van biogebaseerde isolatiematerialen in geval van accidentele waterinfiltratie: analyse aan de hand van in situ metingen en numerieke HAM-simulaties

Victor Wijnant, Siemen Deweer

Studentennummers: 01806313, 01809334

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

Begeleider: ir.-arch. Bruno Vanderschelden

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2022-2023

Voorwoord

In een tijd waarin de nood aan duurzame ontwikkelingen en innovatieve oplossingen steeds duidelijker worden, is het onderzoeken van biogebaseerde isolatiematerialen interessant met het oog op de toekomst. Deze problematiek is momenteel een ‘hot topic’ die in de toekomst alleen nog maar van belang zal toenemen, zelfs na het nemen van doeltreffende maatregelen. Hierdoor sprak dit onderwerp ons aan om te achterhalen hoe wij en anderen ons steentje kunnen bijdragen aan deze problematiek. Bijkomend trok dit onderzoek onze aandacht aangezien we niet alleen eerder onderzochte zaken dienden te herexamineren. Een uitgebreide waaier aan opdrachten, gaande van in-situ metingen tot het ontdekken van een volledig nieuw simulatieprogramma, behoorden tot ons takenpakket. Het leek ons een leuke uitdaging waarin veel variatie zit.

Doorheen het jaar bleek dit ook effectief het geval te zijn. Desalniettemin verliep niet alles zoals we zelf in onze gedachten hadden. Hier en daar liep al eens iets grondig mis of was diepgaand onderzoek vereist voor het bekomen van representatieve resultaten. Oppervlakkige kennis en een beperkte achtergrond met betrekking tot het uitvoeren van simulaties hielpen ons aanvankelijk niet vooruit. Dit hoort er echter allemaal bij en het zou geen echte masterproef zijn indien alles vlekkeloos verloopt. Desondanks zijn we tevreden met wat we hebben verwezenlijkt en hopen we dat onze masterproef een bijdrage levert tot de weg naar een duurzamere en milieuvriendelijkere toekomst.

Dit onderzoek zou niet mogelijk zijn zonder de hulp van een aantal personen. Eerst en vooral gaat onze bijzondere dank uit naar onze begeleider ir.-arch. Bruno Vanderschelden. Hij stond ons gedurende het volledige onderzoek bij met al zijn kennis en expertise. Hij adviseerde ons continu om bepaalde zaken op een andere manier aan te pakken en gaf ons de nodige feedback op het geleverde werk. Kortom stond de heer Vanderschelden steeds paraat om ons te helpen waar nodig en onze vragen te beantwoorden.

Daarnaast wensen we ook graag onze promotor te bedanken. Prof. dr. ir.-arch. Marijke Steeman was eveneens altijd beschikbaar voor het beantwoorden van onze vragen en we konden het hele jaar door rekenen op haar steun. Haar advies en feedback hielpen ons verder om tot de gewenste resultaten te komen. Tot slot bracht prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche ons de nodige tips en tricks bij omtrent de aanpak voor het uitvoeren van ons experimenteel onderzoek.

“De auteurs geven 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 authors give 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. “

1 juni 2023

Siemen Deweer en Victor Wijnant

Toelichting in verband met de mondelinge uiteenzetting:

“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.”

Abstract

Om het potentieel van biogebaseerde isolatiematerialen optimaal te benutten, is nood aan bijkomende kennis. Het gebrek aan deskundigheid vormt voorsnog een barrière tot de toegankelijkheid en frequent gebruik van de natuurlijke isolatiematerialen als alternatief voor synthetische isolatiematerialen. In dit onderzoek worden verschillende biogebaseerde isolatiematerialen, namelijk houtwol, katoen, gras, hennep en twee soorten kalkhennep, blootgesteld aan accidentele vochtinfiltratie. In een speciaal ontworpen testpaviljoen zijn iedere keer twee compartimenten voorzien voor elk eerdergenoemd isolatiemateriaal. Om de invloed van accidentele vochtinfiltratie te bestuderen wordt telkens één van de twee compartimenten voorzien van een vochtbron waarlangs eenmalig een specifieke hoeveelheid aan water wordt ingebracht. Door middel van continue monitoring op verschillende plaatsen in de wand worden de temperatuur, de relatieve vochtigheid en de warmtestroom gemeten. Zo kan de thermische werking en het drogingspotentieel in kaart gebracht worden. Naast in-situ metingen worden ook HAM-simulaties uitgevoerd aan de hand van de software Delphin 6.1. De wandopbouw is identiek aan de situatie die zich voordoet in het testpaviljoen. Niet alleen de opbouw van het model en de bijhorende parameters van elk materiaal zijn gelijk, maar eveneens wordt het correcte binnen- en buitenklimaat toegepast. Om betrouwbare resultaten te verkrijgen werden voorafgaand aan de HAM-simulaties karakteristieke proeven uitgevoerd ter bepaling van het dampdiffusieweerstandgetal μ en de waterabsorptiecoëfficiënt A_w . Zo wordt een representatief model bekomen om het drogingspotentieel van vier – aangezien kalkhennep buiten beschouwing gelaten wordt - biogebaseerde isolatiematerialen te beoordelen. Er is vastgesteld dat de verschillende isolatiematerialen vochtbuffering vertonen. Het geïnfiltreerde water verspreidt zich slechts over een relatief klein volume, waarna het vocht naargelang de specifieke eigenschappen en omgevingsomstandigheden van elk isolatiemateriaal, gaat uitdrogen.

Trefwoorden: biogebaseerde isolatiematerialen, hygrothermische eigenschappen, drogingspotentieel, waterinfiltratie en HAM-simulaties

Drying potential of bio-based insulation materials against accidental water infiltration: in situ measurements and numerical HAM modelling

Deweert Siemen & Wijnant Victor

Supervisors: prof. dr. ir.-arch Marijke Steeman, prof. dr. ir.-arch Nathan Van Den Bossche,
ir.-arch Bruno Vanderschelden

Abstract - To fully utilize the potential of bio-based insulation materials, additional knowledge is needed. Now, the lack of expertise is a barrier to the accessibility and frequent use of bio-based insulation materials as an alternative to synthetic insulation materials. In this study, several bio-based insulation materials, namely wood wool, cotton, grass, hemp and hemp lime, are exposed to accidental water infiltration. In a test pavilion designed by the University of Ghent, two compartments are provided per previously mentioned insulation material. To study the influence of accidental water infiltration, one of the two compartments is provided with a moisture source, through which a specific amount of water is introduced once. Through continuous monitoring at various locations in the wall, the temperature, relative humidity and heat flow are measured. Accordingly, thermal performance and drying potential can be mapped.

In addition to in-situ measurements, HAM simulations are performed using the software Delphin 6.1. The model is identical to the wall structure found in the test pavilion. Not only are the structure of the model and the corresponding parameters of each material identical, the indoor and outdoor climates are also alike. In order to obtain reliable results, characteristic tests were carried out prior to the HAM simulations to determine the vapor diffusion resistance factor μ and the water absorption coefficient A_w . Thus, a representative model is obtained to assess the drying potential of these five bio-based insulation materials. It was found that the different insulation materials exhibit moisture buffering. The infiltrated water diffuses over a relatively small volume, after which, depending on the specific properties of each insulation material, the moisture starts to dry out.

Keywords: bio-based insulation materials, hygrothermal behaviour, drying potential, water infiltration and HAM simulations

I. INTRODUCTION

Buildings have a major impact on their environment. The construction sector is responsible for 38 percent of total CO₂ emissions worldwide and, of all industries, is the largest contributor to the world's waste production [1]. Moreover, the construction sector is largely co-responsible for climate change, ecosystem collapse, overconsumption of natural resources and waste generation [2].

A large number of scientists are presently ringing alarm bells regarding the deterioration of the planet. Sustainability has never been more important, and the construction industry can make a major contribution to turning the tide [3]. One possible factor is the implementation of bio-based materials in future constructions. However, a lack of knowledge and expertise hinders the use for now. For example, little reliable information is known about the hygrothermal properties and behavior of a

bio-based insulation material during accidental water infiltration. Because of their more complex organic structure, materials of natural origin possess a buffering property that allows them to store an amount of moisture and release it over time [4]. Therefore, the question arises: 'What is the drying potential of bio-based insulation materials during accidental water infiltration?'

II. METHODOLOGY

To answer the question above, a two-part study is conducted. The first part will focus on analyzing in-situ measurements where water is infiltrated into five bio-based insulation materials based on a controlled leakage. Using temperature, relative humidity and heat flow sensors, the drying potential of wood wool, cotton, grass, hemp and two forms of lime hemp insulation can be studied. A specially designed test pavilion is used for this purpose.

However, this only provides information about one specific location in each compartment. Therefore, the aim is to obtain a representative model through HAM simulations to discover how moisture moves within the structure. To achieve this, it's appropriate to perform characteristic tests to acquire the missing parameters.

A. Test pavilion

The tests in the test pavilion, existing of a wood-frame structure, are conducted exclusively on the mobile walls. These walls consist of compartments with different bio-based insulation materials, specifically wood wool, cotton, grass, hemp and poured lime hemp. Figure 1 shows a floor plan including the south-oriented long replaceable wall and west-oriented short replaceable wall. Two compartments are provided for each of the five bio-based insulation materials, except for cast lime hemp used in floors. One of the two compartments will be provided with a flexible tube that allows the bio-based insulation materials to be wetted. In other words, the tube acts as a moisture source in order to mimic accidental moisture infiltration. Accordingly, the behavior of the insulation materials can be analyzed. In this way, both a dry and a humidified compartment is present for each insulation type.

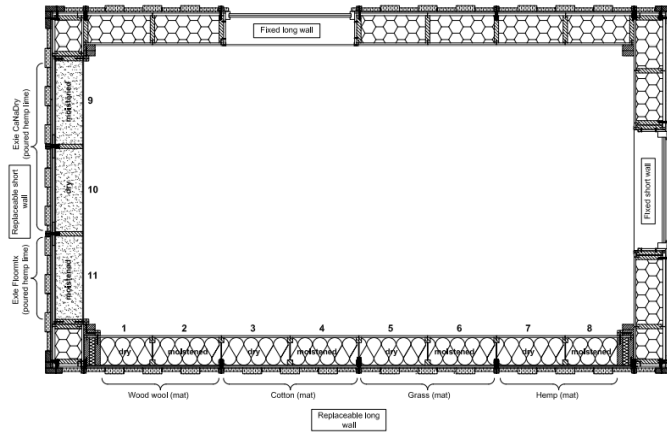


Figure 1: Floor plan including the different compartments and bio-based insulation materials

The properties of all insulation materials, gathered from the manufacturers' technical data sheets, can be found in Table 1. The wet compartments are indicated with a * symbol.

Table 1: Insulation properties

Material	Location	Implementation	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]
Wood wool	1, 2*	Mat	0,036	60	2100
Cotton	3, 4*	Mat	0,039	20	1600
Grass	5, 6*	Mat	0,040	40	1700
Hemp	7, 8*	Mat	0,040	100	-
Hemp lime (CaNaDry)	9*, 10	Blown in	0,054	175	-
Hemp lime (Floormix)	11*	Blown in	0,054	175	-

In order to calculate the water quantity, an estimation is made considering the average driving rain and the portion that infiltrates into the wall. This study assumes a recommend rate of 0.6% [5]. Multiplying the volume of the source of the point source with this infiltration percentage results in a rounded quantity of 0.5 l water. Figure 2 shows that the water infiltrates in the insulation at an elevation of 1.609 meters.

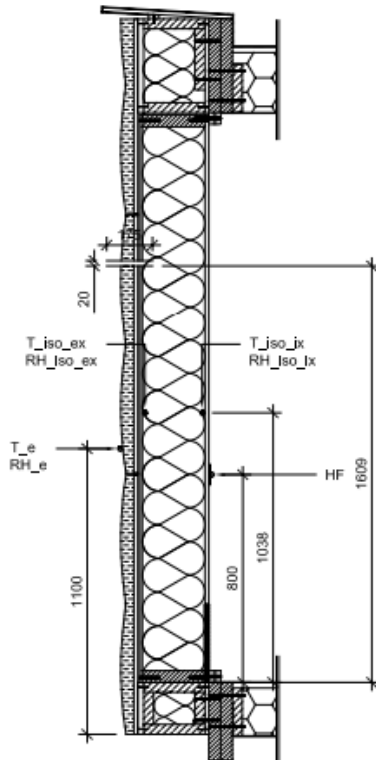


Figure 2: Vertical cross-section with indication of sensors and water infiltration

To determine the hygrothermal behavior and drying potential of bio-based insulation materials, three quantities are measured by specific sensors: relative humidity, temperature, and heat flow. These sensors are coupled with data loggers capable of temporarily storing the measurement data. Through a fixed time interval of ten minutes, the quantities are measured and stored simultaneously. The exact location of the various sensors is shown in Figure 2. The sensors on the inside and outside of the insulation that monitor relative humidity and temperature are located 0.571 meters below the water source. Heat flow is measured on the inside of the complete wall structure at 0.809 meters below the moisture source.

B.Characteristic tests: vapor diffusion resistance factor number μ and water absorption coefficient A_w

First of all, it is important to say that lime hemp insulation was not tested due to its different/loose composition. Furthermore, cork strips, magnesium oxide boards and the insulating material isovlas are additionally tested next to wood wool, cotton, grass and hemp.

In order to determine the water absorption coefficient A_w , the standard EN ISO 15148:2016 is relied upon. To ensure that the initial composition and cohesion is maintained during the test, a mesh is used for each bio-based material, with the exception of magnesium oxide boards. In addition, it is important that the water absorption is one-dimensional, meaning the (unfinished) side surfaces of the magnesium oxide plates must be shielded from water. This has been accomplished by using plastic U-profiles (see Figure 3).

To obtain reliable results, the samples must always be immersed in water over the entire surface by 5 ± 2 mm. To achieve this, a grid is suspended in a plastic container by means of fine iron wire. This principle provides an optimal experimental setup where the water level can be continuously monitored. The samples are continuously immersed evenly over the entire surface and no air bubble formation is possible underneath. The final test setup can be seen in Figure 4.



Figure 3: Magnesium oxide board with plastic U-profiles



Figure 4: Set-up to determine the water absorption coefficient A_w

The vapor diffusion resistance factor μ is determined by wet cups using a KNO_3 solution. This involves moisture transport through the bio-based insulation material from inside the cup to the outside environment. This is accompanied by a mass reduction, from which the vapor diffusion resistance factor μ

can be determined. This is carried out in accordance with norm NBN EN ISO 12572:2016. Here, the lime hemp insulation is excluded, but the cork strips (exterior finish) and magnesium oxide boards (interior finish) are added in order to provide all the missing parameters of the entire wall construction.

The different compositions and cohesions made it necessary to use different test arrangements to ensure one-dimensional moisture transport. For wood wool, cotton, grass and hemp, metal cups fitted with a Plexiglas sleeve were utilized. Both are vapor sealed together by silicone. Additionally, all seams were provided with aluminum tape to avoid unwanted vapor transport (see Figure 5). The cork strips were tested by using a PVC tube with a suitable attachment into which the custom cut sample was fixed (see Figure 6). Finally, magnesium oxide boards were tested using plastic cups. Thus, one-dimensional moisture transport was guaranteed in all three cases.



Figure 5: Metal cup to determine μ of wood wool, cotton, grass and hemp



Figure 6: PVC tube to determine μ of cork



Figure 7: Plastic cup to determine μ of magnesium oxide boards

C. Ham simulations in Delphin

In the simulation software Delphin 6.1, a model is constructed that has exactly the same structure as in reality. Each individual material is given the correct thickness and properties, including the in-situ measured values for vapor diffusion resistance factor μ and water absorption coefficient A_w . The dynamic model is also provided with the correct climate data from the city of Ghent. Using a weather station near the test pavilion, climate data was collected and linked to the HAM simulations. Finally, a water source is applied at the correct height to analyze the effect of accidental water infiltration.

Through trial and error in Delphin 6.1, exactly 0.5 l of water is infiltrated into each insulation material. Both dry and wet conditions are simulated, providing the ideal comparison model to analyze the effect of moisture. By plotting the correct quantities in graphs, it is possible to find out exactly how the moisture diffuses through the different bio-based materials.

Moreover, it provides the opportunity to look at the drying process and find out what time is needed to reach the initial dry situation. The final model can be seen on Figure 8.

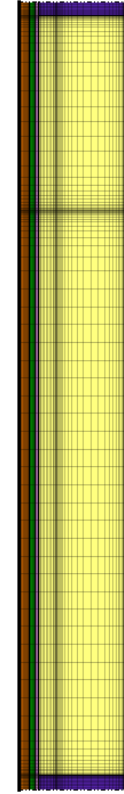


Figure 8: Final model in Delphin

III. RESULTS

A. Water absorption coefficient A_w

Table 2 shows the two most accurate values for each material. Some clear trends are noted. First of all, the cork insulation is associated with the smallest value for the water absorption coefficient A_w . This indicates that the cork insulation is rather water repellent and infiltration is limited to the surface layers.

Furthermore, it appears that density and pore structure are important. The finer the pore structure, the more resilient thus the greater the suction force is in the material. This leads to the fact that because of the compact composition of the wood wool fibers, and consequently the higher specific density, the wood wool insulation has the greatest suction and the greatest water absorption coefficient A_w . However, it appears that cotton is an exception to this rule. Despite a low density, a relatively large water absorption coefficient A_w is obtained. This can be attributed to the structure of the cotton fibers themselves. These contain small cavities and openings that are able to retain water. On the other hand, it was also noted that the cotton insulation unraveled the most during the test, increasing the contact area with water. Thus, the result of cotton insulation is rather questionable.

Finally, it can be stated that magnesium oxide boards are not at all resistant to large amounts of water, as the water reached the surface after a little less than four hours. Therefore, the question must be asked whether this test setup is suitable for magnesium oxide. The results are shown in Table 2, where the symbol * indicates that the rough side of the magnesium oxide board was in contact with the water.

Table 2: Results water absorption coefficient A_w

	Wood wool	Cotton	Grass	Hemp	Isovlas	Cork	MgO*
$A_{w, experimental}$ [kg/m ² s ^{1/2}]	0,0264	0,0220	0,0187	0,0120	0,0057	0,0025	0,0116
	0,0265	0,0229	0,0145	0,0134	0,0067	0,0031	0,0096

B. Vapor diffusion resistance factor μ

The test was conducted by using the production thickness of the different materials. In general, a greater thickness provides a higher vapor diffusion resistance number μ . However, the vapor diffusion resistance does not always increase linearly with the thickness because other factors, such as the structure and composition of the material, are also determining.

Yet, wood wool and isovlas, which both have a production thickness of about 58 mm, can be mutually compared. Analyzing the data in Table 3 suggests that materials with finer pore structures provide greater resistance to vapor diffusion. In addition, wood wool has a relatively high density and a fine pore structure, resulting in the experimental value of the vapor diffusion resistance factor μ being relatively high. This also explains why the vapor diffusion resistance factor of cotton is rather low. Despite their reduced thickness, cork insulation and magnesium oxide boards are also associated with relatively high values of the vapor diffusion resistance factor, despite their reduced thickness. Both consist of a more compact unit with a closed cell structure that prevents vapor transport.

The derived Sd values are also added to Table 3. The ability of a material to retain vapor increases with this Sd value, making it more vapor resistant. The Sd value is simply obtained by multiplying the vapor diffusion resistance number μ by the indicated thickness of the insulation material. In short, the Sd value can be simply defined as the number of meters of air corresponding to the material in question. For instance, wood wool (with a thickness of 0.058 m) has the same vapor diffusivity as a layer of stagnant air of 0.081 m.

Table 3: Results vapor diffusion resistance factor μ and Sd-value

	Wood wool	Cotton	Grass	Hemp	Isovlas	Cork	MgO
$\mu_{experimental}$ [-]	1,440	1,091	1,723	1,301	1,319	3,304	3,110
d_{prod} [m]	0,057	0,049	0,110	0,080	0,057	0,040	0,009
Sd [m]	0,082	0,053	0,188	0,104	0,074	0,132	0,028

C. In-situ results test pavilion

The temperature, relative humidity and heat flow were closely monitored in the test pavilion for fifty days. All in-situ measured values are converted to the appropriate unit and plotted in graphs. Consequently, the key developments and findings regarding the impact of moisture on the various quantities, thermal performance and drying potential can be listed below.

1) Temperature

The infiltrated water did not cause a significant change in temperature. If the temperature gradient between the warm and cold sides of each compartment is taken, a small difference of about 0.3 - 0.5 °C is noticed every time. This minor difference can be explained by the fact that temperatures were not high outside on the day of infiltration, so the temperature differential between the infiltrated water and the insulation itself was not large enough to induce a temperature drop.

Furthermore, the temperature in the west-oriented wall is also substantially lower than in the south-oriented wall. The impact of this is visible in the temperature on the warm side of the insulation but is significantly reduced by the insulating capacity. Thus, the temperature provides little to no information about moisture transport and drying process.

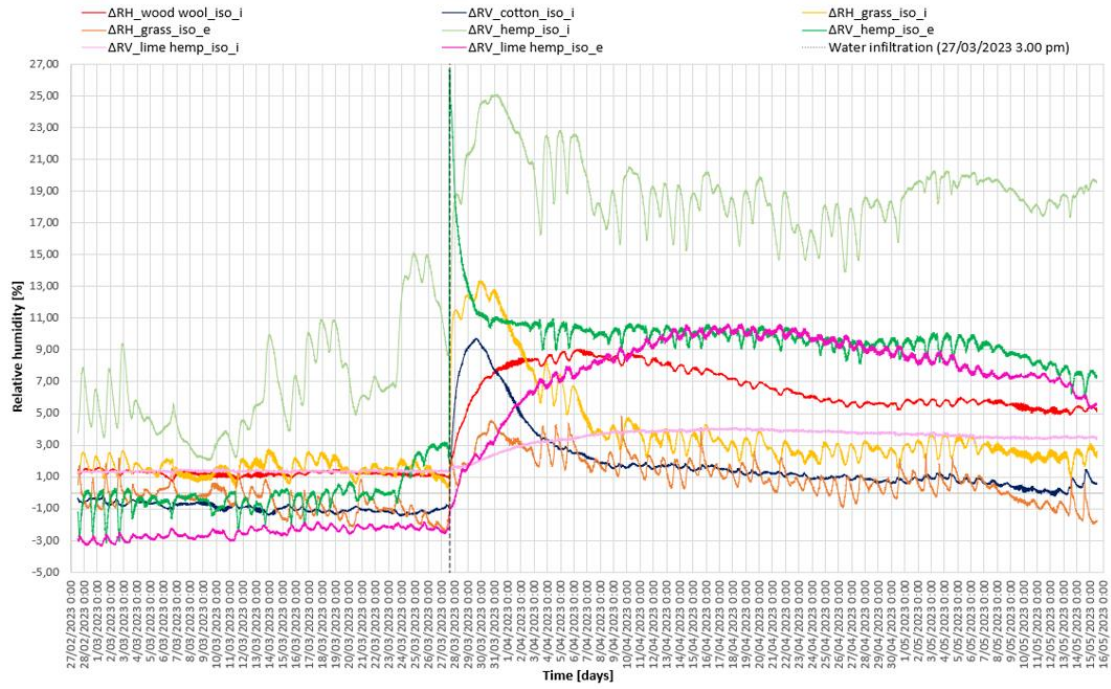
2) Relative humidity

The analysis is carried out using Graph 1, where the difference in relative humidity between the wetted and dry compartment is shown on both insulation surfaces. In Graph 1, each color represents a different insulation material. The lighter colors represent the difference in relative humidity on the inside of the insulation between the wet and dry compartments. On the other hand, the darker variant represents the outside surface of the insulation. The difference in relative humidity can provide information about the rate of moisture absorption and dehydration behavior of the insulation materials. The sensor in compartment 2 with wood wool and compartment 4 with cotton revealed abnormal behavior after adding the water. This could be due to direct contact with one or more water droplets. As a result, neither are displayed in Graph 1.

During the entire measurement, the relative humidity for the compartments in the short wall is generally higher on the outside of the insulation because this wall receives almost no direct incident sunlight. Due to the inverse relationship between temperature and relative humidity, this leads to a higher amount of water vapor, which does not promote the drying process.

Thus, all insulation materials exhibit some form of buffering, because no material releases moisture as quickly as it is absorbed. This can also have a negative effect on the dehydration process, because the moisture takes longer to completely evaporate. In addition, a higher density can restrict airflow, slowing the rate of evaporation. This also explains why poured lime hemp insulation (pink) generally returns to its original state more slowly compared to insulation mats. In short, water diffuses in different ways. The insulation mats (wood wool, cotton, grass and hemp) show a faster absorption of moisture than the poured lime hemp insulation. Due to the greater diffusion, a higher increase for relative humidity is observed immediately after wetting (see Graph 1).

In general, it can be observed that the increase in relative humidity for any insulation material, with the exception of grass, is greater on the cold side of the insulation. This is shown in Graph 1, where the light orange line increases faster than the dark orange line. This is due to the position of the supply tube. For grass, it is observed that the relative humidity, just like the vapor pressure, is highest on the warm side of the insulation. This may explain why only the grass insulation is completely dried out within a drying period of 50 days. Since most of the water is on the warm side of the insulation, the drying process is accelerated. This can be explained by the fact that the average daily temperature is about 7 °C higher than on the cold side of insulation. However, the reliability of these results is questioned.

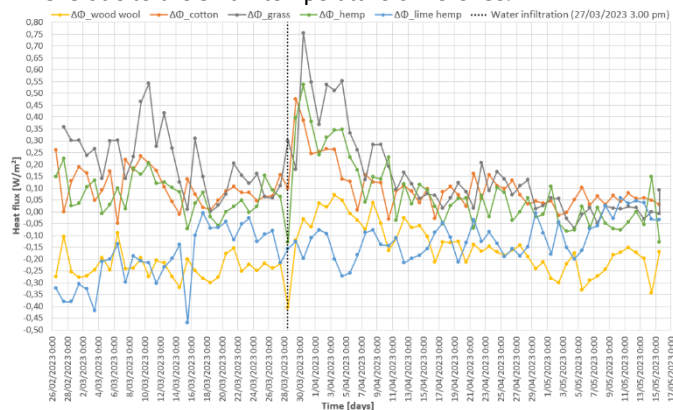


Graph 1: Relative humidity difference between moistened and dry compartment

3) Heat flux

A positive heat flux means a heat flow from the inside to the outside. In other words, as long as the temperature is higher on the inside, the heat flux remains positive. During the measurement campaign, it became progressively warmer resulting in the a heat flux becoming negative, for instance at noon, meaning a heat flow from outside to inside.

Graph 2 compares the daily average heat flux differences for each insulation material. After adding water, the heat flux in the wetted compartment increase for each insulation except lime hemp. An increase in heat flux results in reduced thermal performance of the insulation because more heat transfer occurs. The effect of water infiltration is relatively small for lime hemp insulation (blue) compared to the other bio-based insulation materials. Wood wool shows a relatively small increase compared to hemp, grass and cotton, respectively. However, the largest increase is only 0.8, which is not much. This is due to the small temperature difference.



Graph 2: The daily average heat flux difference for each insulation material

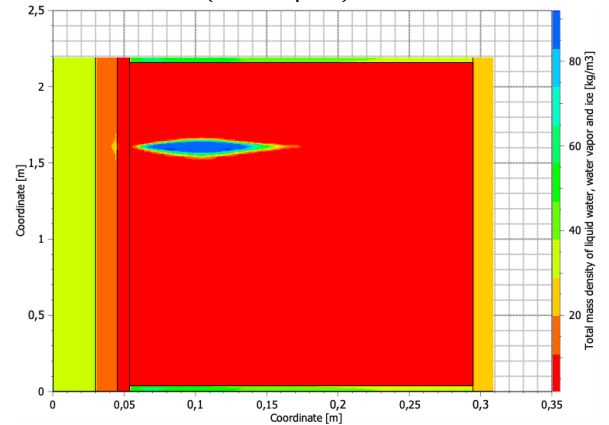
D.HAM simulations

First, it is necessary to examine how water diffuses into the insulation and the drying process over time. This is done using the model where wood wool insulation was used. Indeed, the course is almost identical except for some minor changes over

time. It is then briefly compared whether the simulated results are in line with the in-situ measured values.

1) Moisture transport and drying process

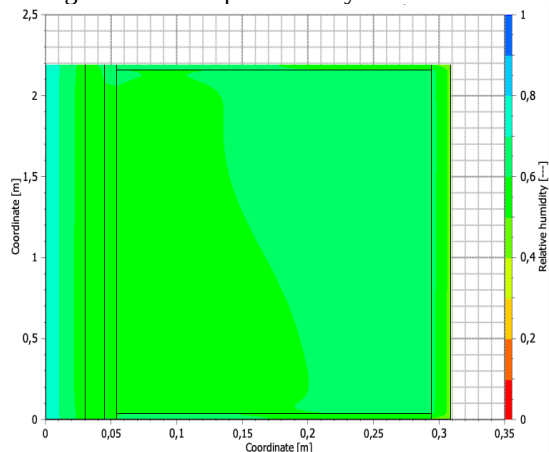
To analyze the moisture transport and drying potential, "colormaps" are employed that display the moisture mass density (=MMD) and relative humidity at each point of the entire wall structure at any point in the drying process. For example, saturation occurs immediately after wetting ($W_{sat} = 780 \text{ kg/m}^3$). This means that no larger amount of water, or the same amount with a shorter inflow time, can be infiltrated because the maximum capacity in that point has been reached. Therefore, after adding half a liter of water, it is observed that the wood wool insulation buffers the water locally at the level of the moisture source (see Graph 3).



Graph 3: Total mass density of liquid water in the construction

The liquid substance gradually transforms into water vapor over time until, after 40 days of drying, all that is left is water vapor. This water vapor gradually spreads over a larger volume, which is logically associated with an increase in relative humidity. Initially, the increase is mainly visible on the cold side of the insulation due to the position of the moisture source, which is also the case in reality. Graph 4 shows that after 94 days, the water vapor is mainly on the warm side of the wood wool insulation. In other words, a moisture front is created on

the warm side of the insulation because the average temperature is higher than on the cold side. This is caused by the fact that warm air has a greater moisture capacity than cold air. This also means that as the day progresses - and the temperature increases on the cold side of the insulation - the water vapor diffuses toward the outside environment. So the residual water vapor largely dries out toward the inside, but has a very difficult time leaving the structure permanently.



Graph 4: Relative humidity after 94 days

One hundred days after moisture infiltration, there is still a difference of 1.5% relative humidity between the dry and wet conditions. After 266 days, a difference of about 0.05 % is still observable. It can therefore be critically stated that dehydration is still not fully complete. The same applies to cotton, grass and hemp insulation with slight changes over time.

2) Comparison

In the simulations, the moisture is extremely well buffered, causing a delay of about 5 days. In reality, this is not the case at all, indicating that the moisture spreads much faster across the insulation and this is why the difference is also much greater. The relative humidity difference on the cold and warm sides of wood wool is 18% and 6% respectively, whereas in the simulation it is only 3% and 2.5% on the sensor side.

Hence, it was found that after a drying period of 50 days, the initial condition of the grass insulation was reached again, but this does not correspond to the simulation. This is because in reality the moisture immediately diffused to the warm side of the insulation. The higher temperature significantly accelerated the drying process. Additionally, no temperature difference at all is noticed at the level of the sensor in the simulation. This is because the moisture only reaches the sensor after 6 days in the form of water vapor, by which time the temperature has already fully adjusted to the prevailing conditions.

IV. DISCUSSION

The water absorption coefficient A_w highly depends on the pore structure. The finer the pore structure is, the more resilient and thus the greater the suction power is in the material. Furthermore, the compactness and rather closed cell structure can exert a great influence, which can be seen by the cork insulation.

It also appears that the materials with a finer pore structure offer more resistance to water vapor diffusion. The same can be said about the density of an insulation material: the higher the density is, the higher the resistance to vapor diffusion.

The drying potential strongly depends on the weather conditions, the orientation and shading of environmental

elements. The conclusion is that an insulation material with a higher buffering capacity is able to absorb and retain moisture better. This causes a slower water dispersal, which causes a slower conversion into vapor. This reduces the rate at which moisture can move out of the structure. The reliability of the in-situ measurements does need to be questioned as the sensors often showed anomalous results.

Finally, it can be stated that the actual results and the simulated results are quite different. Similar trends are observed, but the effective course of the moisture and the corresponding drying process differs. This is due to the simulations which do not take into account the orientation of the compartments and the influence of environmental factors (shading). In addition, the inflow time strongly deviates and an optimal composition and structure is assumed. However, when the tube was installed, an opening was manually made in the insulation, which may inadvertently cause changes in the composition and structure. This allows moisture at the source site to flow away more easily and spread over a larger volume.

V. CONCLUSION

The aim of the study was to analyze the hygrothermal performance and drying potential of five biobased insulation materials subjected to coincident water infiltration. The results showed slow drying rates for all compartments. For example, grass showed anomalous results, with moisture immediately diffusing to the warm side of the insulation. When moisture is on the warm side, the drying process is stimulated. In the in-situ measurements, clear moisture buffering was observed especially for the lime hemp. In the simulations, each material was found to have extremely good buffering capacity. In all cases, other than grass insulation, the structure did not dry out after a drying period of 50 days. The same was also observed in the simulations.

However, further research is needed to find out what kind of degradation occurred in the insulation, which affects moisture transport and dehydration. The simplification to a point source to analyze accidental water infiltration does also not reflect reality. In reality, water could leak into the construction in a more contentious manner. In that way, a spread of half a liter of water over a full day approximates a realistic situation more closely during precipitation. Nevertheless, further research is appropriate to find out how a certain amount of water can be infiltrated in a faster way in the simulations.

REFERENCES

- [1] V. Lammerse, "CO₂-uitstoot van de bouw bereikt recordhoogte," Scientias, 2020. [Online]. Available: <https://scientias.nl/co2-uitstoot-van-de-bouw-bereikt-recordhoogte/>.
- [2] E. Douguet, Wagner, F. "Milieuvoordelen (impact) van hergebruik in de bouwsector." https://www.nweurope.eu/media/15815/bookletfcrbenl-1_milieuvoordelen_impact.pdf
- [3] M. Kooiman, "Een onderzoek naar de effecten van duurzame woningbouw op de residuele grondwaarden," 2018. [Online]. Available: <https://www.pasbv.nl/wp-content/uploads/2018/06/PAS-2018-Rapport.pdf>
- [4] M. Volf, J. Divis, and F. Havlik, "Thermal, moisture and biological behaviour of natural insulating materials," (in English), *Enrgy Proced*, vol. 78, pp. 1599-1604, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.219.
- [5] S. Van Goethem, "Rainwater runoff on building facades: numerical simulations and analysis of wetting patterns," 2014. [Online]. Available: https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/153/536/RUG01002153536_2014_0001_AC.pdf

Inhoudsopgave

Voorwoord	I
Abstract	III
Extended abstract	IV
Inhoudsopgave.....	X
Lijst van figuren	XIV
Lijst van tabellen	XV
Lijst van grafieken.....	XV
1 Inleiding	1
2 Verkennende literatuurstudie.....	2
2.1 Biogebaseerde isolatiematerialen	2
2.1.1 Voordelen	2
2.1.2 Nadelen.....	2
2.2 Hygrothermisch gedrag	3
2.2.1 Relatieve vochtigheid	3
2.2.2 Dampdruk.....	3
2.2.3 Warmtegeleidingscoëfficiënt.....	4
2.2.4 Warmtestroom	5
2.2.5 Vochtbuffering	6
2.2.6 Capillaire absorptie.....	8
2.2.6.1 Waterabsorptiecoëfficiënt.....	10
2.2.7 Vochttransport door waterdampdiffusie	11
2.3 Vochtoorzaken.....	12
2.3.1 Slagregen	12
2.3.2 Opstijgend vocht.....	13
2.3.3 Vochtproductie binnenshuis	13
2.4 Drogingsproces.....	13
2.5 HAM-simulaties	15
2.5.1 Algemeen werkingsprincipe	15
2.5.2 Bestaand onderzoek: Hygrothermisch transport door een biogebaseerde materiaal	16
	X

2.6	Algemeen vergelijkend onderzoek van hygrothermische parameters	16
3	Probleemstelling.....	18
4	Doelstellingen en afbakening van onderzoeksveld	19
5	Onderzoeksaanpak en -methodologie.....	20
5.1	Karakterisatie biogebaseerde materialen	20
5.1.1	Capillaire absorptietest	20
5.1.1.1	Testprocedure	21
5.1.1.2	Berekening.....	24
5.1.2	Dampdiffusietest.....	26
5.1.2.1	Testprocedure	27
5.1.2.2	Berekening.....	32
5.2	Meetcampagne testpaviljoen The Mobble.....	34
5.2.1	Mobiele wanden	34
5.2.1.1	De vijf biogebaseerde isolatiematerialen in de mobiele wand	34
5.2.1.2	Bijkomende wandopbouw	35
5.2.2	Locatie en oriëntatie	36
5.2.3	Technische installaties.....	36
5.2.4	Meetapparatuur.....	37
5.2.4.1	Sensoren	37
5.2.4.2	Dataloggers.....	40
5.2.5	Bevochtiging	41
5.3	Simulaties in Delphin 6.1	44
6	Onderzoeksresultaten	50
6.1	Karakteristieke proeven.....	50
6.1.1	Waterabsorptietest	50
6.1.2	Cuptest.....	59
6.2	Meetcampagne Mobble	66
6.2.1	Weersomstandigheden.....	68
6.2.2	Temperatuur	69
6.2.2.1	Houtwol.....	69

6.2.2.2	Katoen, gras en hennep.....	71
6.2.2.3	Kalkhennep (CaNaDry).....	72
6.2.2.4	Kalkhennep (Floormix)	73
6.2.2.5	Vergelijking van alle compartimenten op vlak van de temperatuur	75
6.2.3	Relatieve vochtigheid	79
6.2.3.1	Houtwol	79
6.2.3.2	Katoen	80
6.2.3.3	Gras	82
6.2.3.4	Hennep.....	84
6.2.3.5	Kalkhennep (CaNaDry).....	86
6.2.3.6	Kalkhennep (Floormix)	87
6.2.3.7	Vergelijking van alle compartimenten op vlak van de relatieve vochtigheid.....	89
6.2.4	Dampdruk	93
6.2.4.1	Kalkhennep (CaNaDry).....	93
6.2.4.2	Vergelijking van alle compartimenten op vlak van de dampdruk	95
6.2.5	Warmtestroom	98
6.2.5.1	Houtwol	98
6.2.5.2	Katoen, gras en hennep.....	100
6.2.5.3	Kalkhennep (CaNaDry).....	100
6.2.5.4	Kalkhennep (Floormix)	101
6.2.5.5	Vergelijking van alle compartimenten op vlak van de warmtestroom	102
6.3	Resultaten Delphin	104
6.3.1	Totale waterinfiltratie	104
6.3.2	Analyse vochttransport en drogingspotentieel	105
6.3.2.1	Temperatuur	106
6.3.2.2	MMD en relatieve vochtigheid.....	106
6.3.2.3	Vergelijking onderzochte isolatiematerialen	112
6.3.3	Vergelijking met meetcampagne van L. Lambrechts (2022)	113
6.3.3.1	Temperatuur	114

6.3.3.2	Relatieve vochtigheid	115
6.3.3.3	Dampdruk.....	117
6.3.3.4	Warmtestroom	118
7	Conclusie.....	120
8	Duurzaamheidsreflectie.....	123
9	Referentielijst	125
10	Bijlagen	130

Lijst van figuren

Figuur 1: Warmtestroomdichtheid q (Steeman, 2019)	6
Figuur 2: Theoretische sorptie-isotherm (Steeman, 2010)	7
Figuur 3: Testwand paviljoen (Steeman et al., 2020)	8
Figuur 4: RV aan binnenoppervlak van cellulose en minerale wol (Steeman et al., 2020)	8
Figuur 5: Cilinder met straal r en normaal in punt P (Behroozi, 2022)	9
Figuur 6: Capillaire absorptie (De Jonghe, 2005)	9
Figuur 7: Tweefasig proces voor opvullen poriënnetwerk met vocht (Steeman, 2019)	10
Figuur 8: Lineair verband waterabsorptiecoëfficiënt A_w (Roels, S, 2008)	11
Figuur 9: Tweefasig drogingsproces van een vochtig poreus materiaal (Buildwise, 2014)	14
Figuur 10: Verschil in RV tussen nat en droog compartiment (Steeman et al., 2020)	14
Figuur 11: Op maat gesneden isolatiemateriaal in gaas	21
Figuur 12: Aanbrengen van silicone en bevestigen van U-profiel	22
Figuur 13: Magnesiumoxideplaat na bevestiging U-profielen voor ééndimensionale waterabsorptie .	22
Figuur 14: Waterpas ophangstelsel capillaire absorptietest	23
Figuur 15: Proefopstelling capillaire absorptietest zonder en met samples	24
Figuur 16: Uitlekbak	24
Figuur 17: Grafiektype A, waarbij het water het bovenoppervlak niet bereikt	25
Figuur 18: Grafiektype A, waarbij het water het bovenoppervlak heeft bereikt	25
Figuur 19: Grafiektype B	26
Figuur 20: Plexiglas aan elkaar ‘lassen’ tot kokers d.m.v. een spuit gevuld met chloroform	28
Figuur 21: Afgewerkte kokers uit plexiglas	28
Figuur 22: Afplakken van de hoeken met aluminiumtape	28
Figuur 23: Afgewerkte cup zonder sample	28
Figuur 24: Afgewerkte cup met katoenisolatie	29
Figuur 25: Op maat zagen van kurkisolatie en magnesiumoxideplaat	29
Figuur 26: Kunststofcup gevuld met KNO_3 -oplossing	30
Figuur 27: Kunststofcup met MgO -plaat bevestigd met laagje silicone	30
Figuur 28: Kunststofcup met deksel en MgO -plaat	30
Figuur 29: Klevende aluminiumfolie rond kurkisolatie	31
Figuur 30: Silicone op aluminiumfolie van de kurkisolatie	31
Figuur 31: Sample in opzetstuk	31
Figuur 32: Silicone op opzetstuk	31
Figuur 33: PVC-buis gevuld met KNO_3 -oplossing	31
Figuur 34: PVC-buis met opzetstuk voorzien van kurkisolatie	31
Figuur 35: Temperatuur (23 °C) en relatieve vochtigheid (50 %) in de klimaatkast	32
Figuur 36: Alle cups van tweede meetcampagne in klimaatkast	32
Figuur 37: Grondplan testpaviljoen (L. Lambrechts, 2022)	35
Figuur 38: Inplantingsplan testpaviljoen (L. Lambrechts, 2022)	36
Figuur 39: Schematische werking warmtestroomsensor (Hukseflux, 2021)	39
Figuur 40: Bevochtiging van 0,5 l water via flexibel buisje	43
Figuur 41: Discretisatieparameters	45
Figuur 42: Pop-upvenster m.b.t. output file	46
Figuur 43: Pop-upvenster m.b.t. output grid	46
Figuur 44: Pop-upvenster m.b.t. het binnenklimaat	47
Figuur 45: Pop-upvenster m.b.t. tijdschema	47
Figuur 46: Gediscretiseerd 2D-model met aanduiding lek	48
Figuur 47: Extra vereisten vóór de simulatie van start kan gaan	49

Figuur 48: Finaal model houtwol in Delphin	49
Figuur 49: Waterabsorptie magnesiumoxide 1 met ruwe kant onderaan	56
Figuur 50: Waterabsorptie magnesiumoxide 2 met ruwe kant onderaan	56
Figuur 51: Waterabsorptie magnesiumoxide 1 met ruwe kant bovenaan.....	57
Figuur 52: Waterabsorptie magnesiumoxide 2 met ruwe kant bovenaan.....	57
Figuur 53: PVC-cup met lek	62
Figuur 54: Zoutkristallisatie aan buitenoppervlak plexiglas	63
Figuur 55: Temperatuur en relatieve vochtigheid in april te Gent (Meteoblue, 2022).....	68

Lijst van tabellen

Tabel 1: Lambda-waarde van enkele isolatiematerialen (Vandenberghe, D., n.d.).....	5
Tabel 2: Parameters uit de literatuur	17
Tabel 3: Toegestane bereik van gemiddelde condities en afwijking	23
Tabel 4: Eigenschappen vijf biogebaseerde isolatiematerialen	34
Tabel 5: Eigenschappen andere materialen mobiele wand testpaviljoen	35
Tabel 6: Gevoeligheid S per specifieke warmtestroomsensor.....	39
Tabel 7: Rain event 10 gemiddelde hoeveelheid slagregen (Gryson & Dewachter, 2019; Van Goethem, 2014).....	42
Tabel 8: Duur waterinfiltratie van 0,5 l per compartiment.....	44
Tabel 9: Oppervlaktes van het lek en instroomsnelheden horend bij ieder isolatiemateriaal.....	48
Tabel 10: Massaverschil per oppervlakte van kurk, katoen, houtwol en isovlas	50
Tabel 11: Massaverschil per oppervlakte van hennep, gras en magnesiumoxide	50
Tabel 12: Vergelijking waterabsorptiecoëfficiënt A_w literatuur - experimenteel	57
Tabel 13: Berekende waarden dampdiffusieweerstandsgetal μ volgens de norm deel 1	64
Tabel 14: Berekende waarden dampdiffusieweerstandsgetal μ volgens de norm deel 2	65
Tabel 15: Vergelijking dampdiffusieweerstandsgetal μ literatuur – experimenteel.....	66
Tabel 16: Beschrijving afkortingen in grafieken van de in-situ metingen	67
Tabel 17: Aantal dagen tot verdwijnen MMD en RV	112

Lijst van grafieken

Grafiek 1: Waterabsorptietest van kurkisolatie (grafiektype B).....	51
Grafiek 2: Waterabsorptietest van katoenisolatie (grafiektype B)	52
Grafiek 3: Waterabsorptietest van houtwolisolatie (grafiektype B).....	53
Grafiek 4: Waterabsorptietest van isovlas (grafiektype B)	53
Grafiek 5: Waterabsorptietest van hennepisolatie (grafiektype B).....	54
Grafiek 6: Waterabsorptietest van grasisolatie (grafiektype B)	55
Grafiek 7: Waterabsorptietest van magnesiumoxideplaat (grafiektype A&B).....	56
Grafiek 8: Cuptest KNO_3 -weging van katoenisolatie.....	60
Grafiek 9: Cuptest KNO_3 -weging van houtwolisolatie	60
Grafiek 10: Cuptest KNO_3 -weging van isovlas.....	61
Grafiek 11: Cuptest KNO_3 -weging van kurkisolatie	61
Grafiek 12: Cuptest KNO_3 -weging van hennepisolatie.....	62
Grafiek 13: Cuptest KNO_3 -weging van grasisolatie.....	63
Grafiek 14: Cuptest KNO_3 -weging van magnesiumoxideplaat.....	64

Grafiek 15: Temperatuur en relatieve vochtigheid april te Gent (HOBO-resultaten)	68
Grafiek 16: Temperatuur aan koude en warme zijde van de houtwolisolatie	70
Grafiek 17: Temperatuurverschil aan koude en warme zijde van de houtwolisolatie.....	70
Grafiek 18: Temperatuurgradiënt ΔT tussen binnen- en buitentemperatuur houtwolisolatie	71
Grafiek 19: Temperatuurverschil aan koude en warme zijde van de CaNaDry	72
Grafiek 20: Temperatuurgradiënt ΔT tussen binnen- en buitentemperatuur CaNaDry.....	73
Grafiek 21: Temperatuurverschil aan koude en warme zijde van de Floormix	74
Grafiek 22: Temperatuurgradiënt ΔT tussen binnen- en buitentemperatuur Floormix	74
Grafiek 23: Gemiddelde temperatuur aan de koude zijde van de isolatie voor alle compartimenten ...	76
Grafiek 24: Gemiddelde temperatuur aan de warme zijde van de isolatie voor alle compartimenten ..	78
Grafiek 25: Relatieve vochtigheid aan de koude en warme zijde van de houtwolisolatie	80
Grafiek 26: Relatief vochtigheidsverschil aan de koude en warme zijde van de houtwolisolatie.....	80
Grafiek 27: Relatieve vochtigheid aan de koude en warme zijde van de katoenisolatie.....	81
Grafiek 28: Relatief vochtigheidsverschil aan de koude en warme zijde van de katoenisolatie	82
Grafiek 29: Relatieve vochtigheid aan de koude en warme zijde van de grasisolatie.....	83
Grafiek 30: Relatief vochtigheidsverschil aan de koude en warme zijde van de grasisolatie	84
Grafiek 31: Relatieve vochtigheid aan de koude en warme zijde van de hennepisolatie.....	85
Grafiek 32: Relatief vochtigheidsverschil aan de koude en warme zijde van de hennepisolatie	86
Grafiek 33: Relatieve vochtigheid aan koude en warme zijde van kalkhennepisolatie (CaNaDry).....	87
Grafiek 34: Relatief vochtigheidsverschil aan koude en warme zijde kalkhennepisolatie (CaNaDry).	87
Grafiek 35: Relatieve vochtigheid aan koude en warme zijde van kalkhennepisolatie (Floormix)	88
Grafiek 36: Relatief vochtigheidsverschil aan koude en warme zijde kalkhennepisolatie (Floormix) .	89
Grafiek 37: Relatief vochtigheidsverschil aan koude zijde van de isolatie voor alle compartimenten .	91
Grafiek 38: Relatief vochtigheidsverschil aan warme zijde v.d. isolatie voor alle compartiment	92
Grafiek 39: Dampdruk aan de koude en warme zijde van de kalkhennepisolatie (CaNaDry).....	94
Grafiek 40: Dampdrukverschil aan de koude en warme zijde van de kalkhennepisolatie (CaNaDry) .	94
Grafiek 41: Dampdrukverschil aan koude zijde van alle isolatiematerialen	96
Grafiek 42: Dampdrukverschil aan warme zijde van alle isolatiematerialen	97
Grafiek 43: Warmtestoom doorheen houtwolisolatie.....	99
Grafiek 44: Warmtestroomverschil houtwolisolatie.....	99
Grafiek 45: Warmtestroomverschil kalkhennepisolatie (CaNaDry)	101
Grafiek 46: Warmtestroomverschil kalkhennepisolatie (Floormix).....	102
Grafiek 47: Warmtestroomverschil van alle isolatiematerialen	103
Grafiek 48: Totale MMD in functie van de tijd met betrekking tot houtwol	105
Grafiek 49: Totale MMD in functie van de tijd met betrekking tot houtwol (ingezoomd).....	105
Grafiek 50: Temperatuur 12 uren na aanvang van de infiltratie (overdag)	106
Grafiek 51: Temperatuur 24 uren na aanvang van de infiltratie (nacht)	106
Grafiek 52: MMD op de dag vóór het invoegen van water.....	107
Grafiek 53: Relatieve vochtigheid op de dag vóór het invoegen van water	107
Grafiek 54: MMD op moment van invoegen 0,5 l water	108
Grafiek 55: Relatieve vochtigheid op moment van invoegen 0,5 l water	108
Grafiek 56: MMD 24 uren na volledige infiltratie 0,5 l water	108
Grafiek 57: Relatieve vochtigheid 24 uren na volledige infiltratie 0,5 l water	108
Grafiek 58: MMD 15 dagen na volledige infiltratie 0,5 l water	109
Grafiek 59: Relatieve vochtigheid 15 dagen na volledige infiltratie 0,5 l water	109
Grafiek 60: MMD 39 dagen na infiltratie van 0,5 l water.....	110
Grafiek 61: Relatieve vochtigheid 93 dagen na infiltratie van 0,5 l water	110
Grafiek 62: Relatieve vochtigheid natte toestand (dag 1288 om 7 uur 's ochtends)	111
Grafiek 63: Relatieve vochtigheid droge toestand (dag 1288 om 7 uur 's ochtends).....	111
Grafiek 64: Relatieve vochtigheid natte toestand (dag 1288 om 17 uur 's middags).....	111

Grafiek 65: Relatieve vochtigheid droge toestand (dag 1288 om 17 uur 's middags)	111
Grafiek 66: Gemiddelde RV aan beide zijden van de houtwolisolatie (nat en droog)	112
Grafiek 67: Verschil in relatieve vochtigheid aan koude zijde van katoen-, gras- en hennepisolatie .	113
Grafiek 68: Temperatuur aan koude en warme zijde houtwolisolatie (Delphin)	114
Grafiek 69: Vergelijking temperatuur gemiddeld en aan sensor met waterinfiltratie (Delphin).....	115
Grafiek 70: RV aan koude en warme zijde houtwolisolatie (Delphin)	116
Grafiek 71: RV aan de koude en warme zijde houtwolisolatie (L. Lambrechts, 2022)	116
Grafiek 72: RV aan sensor tegenover gemiddelde RV aan het gehele oppervlak.....	117
Grafiek 73: Dampdruk aan de koude en warme zijde van de houtwolisolatie (Delphin).....	118
Grafiek 74: Dampdruk aan de koude en warme zijde van de houtwolisolatie (L. Lambrechts, 2022)	118
Grafiek 75: Warmtestroom doorheen houtwolisolatie (Delphin).....	119
Grafiek 76; Warmtestroom doorheen houtwolisolatie (L. Lambrechts, 2022)	119

1 Inleiding

Wetenschappers trekken dezer tijd aan de alarmbellen omtrent de achteruitgang van de planeet. Duurzaamheid was nooit eerder zo belangrijk en ook de bouwsector kan een grote bijdrage leveren om het tij te doen keren. Zo worden energiezuinigheid, klimaatbestendigheid en de milieu-impact van een woning kernwoorden in de zoektocht naar een oplossing (Kooiman, 2018). Eén deel van de puzzel is de implementering van biogebaseerde materialen. Echter staan een gebrek aan kennis en expertise deze overgang vooralsnog in de weg. Zo is weinig betrouwbare informatie bekend over de hygrothermische eigenschappen en het gedrag van een biogebaseerd isolatiemateriaal wanneer het blootgesteld wordt aan accidentele waterinfiltratie. Materialen van natuurlijke oorsprong beschikken omwille van hun complexere organische structuur over een buffereigenschap waardoor het mogelijk is om een hoeveelheid aan vocht op te slaan en in de loop der tijd weer af te geven (Volf et al., 2015). Daarom stelt de vraag zich wat het drogingspotentieel is van biogebaseerde isolatiematerialen bij accidentele waterinfiltratie.

Om die vraag te beantwoorden, wordt een tweeledig onderzoek uitgevoerd. In het eerste deel wordt de focus gelegd op het analyseren van in-situ metingen waarbij op basis van een gecontroleerd waterlek vocht geïnfiltreerd wordt in zes biogebaseerde isolatiematerialen. Met behulp van temperatuur-, relatieve vochtigheids- en warmtestroomsensoren kan het drogingspotentieel van houtwol-, katoen-, gras-, hennep- en twee vormen van kalkhennepisolatie bestudeerd worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een speciaal ontworpen testpaviljoen.

Echter verstrekt dit enkel informatie over één specifieke plaats in de constructie. Daarom wordt gestreefd naar het bekomen van een representatief model om door middel van HAM-simulaties te ontdekken hoe het vocht zich verplaatst binnen de structuur. Om dit te verwezenlijken is het aangewezen om karakteristieke proeven uit te voeren zodanig dat de ontbrekende hygrothermische parameters verkregen worden. Zo wordt de realiteit zo goed als mogelijk benaderd en wordt een beeld geschetst van hoe het vocht zich diffundeert doorheen het biogebaseerd isolatiemateriaal.

Op het einde worden beide onderzoeken uitvoerig geanalyseerd en wordt de vergelijking gelegd tussen de gesimuleerde – en de werkelijk gemeten resultaten. Zo kan een betrouwbaar besluit geformuleerd worden omtrent het drogingspotentieel van biogebaseerde isolatiematerialen.

2 Verkennende literatuurstudie

2.1 Biogebaseerde isolatiematerialen

Het volbrengen van de doelstellingen op vlak van de CO₂-uitstoot, klimaatopwarming en afvalproductie zijn geen sinecure. Eén van de oplossingen is het gebruik van biogebaseerde bouwmaterialen. Biogebaseerde materialen worden omschreven als producten die hoofdzakelijk bestaan uit een stof afkomstig van levend materiaal (biomassa) en die ofwel in de natuur voorkomen of gesynthetiseerd zijn (Curran, M. Curran, M. A., 2010). Dit zorgt ervoor dat de totale emissies gedurende de volledige levenscyclus eerder beperkt zijn. Ook de duurzaamheid speelt een belangrijke rol met het oog op de toekomst. Door in te zetten op duurzaamheid wordt getracht de natuurlijke omgeving en de ecologische en menselijke gezondheid te beschermen (hemhotels, 2019).

Dit wordt gestaafd door het onderzoek van NIBE (2019) die aantoont dat er in de bouw een aanzienlijke potentie ligt van biogebaseerde bouwmaterialen om de vooropgestelde doelstellingen te volbrengen. Echter is het aandeel van de momenteel toegepaste biogebaseerde materialen eerder beperkt en dringt een drastische opschaling zich op. NIBE beweert dat de opschaling qua aanbod perfect mogelijk is mits voldoende investeringen in de productie- en verwerkingscapaciteit.

2.1.1 Voordelen

Materialen van natuurlijke oorsprong hebben een buffereigenschap waardoor het mogelijk is om een hoeveelheid aan vocht op te slaan uit de lucht en in de loop der tijd weer af te geven. De bufferende werking vormt omwille van de poreuzere structuur een belangrijk onderscheid met de welgekende traditionele isolatiematerialen. Dit vermogen is dus te danken aan de complexere organische structuur van natuurlijke materialen (Volf et al., 2015). Door toedoen van deze buffereigenschap wordt een gecontroleerd, stabiel en gezonder binnenklimaat gerealiseerd (Korjenic et al., 2011).

Bijkomstig confirmeert Volf et al. (2015) dat het gebruik van natuurlijk isolatiemateriaal een aanzienlijk grotere duurzaamheid oplevert. Vergeleken met minerale wol liggen de primaire energie-input, het aardopwarmings- of het verzuringsvermogen van natuurlijke isolatiematerialen ongeveer 95% lager ten opzichte van minerale wol. Bovendien is het gezondheidsrisico ook lager in goed ontworpen gebouwen.

2.1.2 Nadelen

Het vermogen om overtollig vocht op te slaan brengt ook nadelen met zich mee. De thermische prestatie van de isolatiematerialen komt in gevaar doordat het thermisch geleidingsvermogen gerelateerd is aan het vochtgehalte. Hoe vochtiger een materiaal is, hoe beter de warmtegeleidbaarheid. Langdurige blootstelling aan overtollig vocht heeft dus nefaste gevolgen voor de prestatie van het isolatiemateriaal. Zo bevordert het ook de eventuele schimmelgroei wat ervoor zorgt dat de kwaliteit van het

isolatiemateriaal drastisch vermindert. Deze nadelen, met betrekking tot de duurzaamheid en de thermische eigenschappen, kunnen tot een minimum beperkt worden door de toepassing van een correct ontwerp. Desalniettemin biedt dit geen garantie op een optimale constructie aangezien de kwaliteit van de uitvoering eveneens een significante rol speelt. Een slecht uitgevoerde waterkering of luchtafdichting kan regeninfiltratie of infiltratie van vochtige binnenlucht veroorzaken.

Volgens Schik et al. (2022) is de onbekendheid en het gebrek aan kennis bij de afnemers enerzijds het gevolg van onduidelijke specificaties en/of eigenschappen van de producten en anderzijds is er weinig informatie en vakkennis voor handen over de toepassing en het onderhoud van biogebaseerde bouwmaterialen. Veel producten staan nog in de kinderschoenen, wat ervoor zorgt dat de biogebaseerde producten moeite hebben om te concurreren met conventionele producten. Deze genieten namelijk de voorkeur door jarenlang onderzoek en incrementele verbeteringen.

Tot slot vermelden Schik et al. dat biogebaseerde producten vaak nog toevoegingen bevatten die op zichzelf niet honderd procent duurzaam zijn, wat leidt tot een negatieve connotatie. Daarnaast speelt onder andere het ontbreken van een betrouwbaar aanbod van biogebaseerde grondstoffen en de aanwezigheid van zwakke schakels in de productieketen in de kaart van het frequent gebruik van biogebaseerde bouwmaterialen. De onduidelijke wet- en regelgeving helpen evenmin. Hierdoor is de bouwsector eerder geneigd om toch terug te vallen op de traditionele isolatiematerialen.

Er dienen dus nog heel wat obstakels overwonnen te worden om het potentieel van biogebaseerde materialen optimaal te benutten.

2.2 Hygrothermisch gedrag

Het hygrothermisch gedrag van een materiaal kan worden gedefinieerd als de verandering in de fysische eigenschappen van een materiaal als gevolg van de gelijktijdige absorptie, opslag en afgifte van zowel warmte als vocht (Hall, M. R. et al., S., 2012). In wat volgt worden de voornaamste grootheden en wetmatigheden aangehaald die betrekking hebben op het hygrothermisch gedrag van materialen.

2.2.1 Relatieve vochtigheid

De relatieve vochtigheid, uitgedrukt in %, geeft aan hoeveel waterdamp de lucht bij de heersende temperatuur bevat. Een waarde van 100% wijst op maximale waterdamp wat betekent dat de lucht verzadigd is. Aangezien de relatieve vochtigheid afhangt van zowel de condensatiesnelheid als de verdampingssnelheid, wordt deze eveneens beïnvloedt door het dauwpunt en de temperatuur.

2.2.2 Dampdruk

De dampspanning (of dampdruk) is de druk die de damp (gas) van een bepaalde stof uitoefent op de wanden van een gesloten ruimte. Meestal wordt mbar of kPa als eenheid gebruikt om de dampdruk uit

te drukken. De dampspanning is afhankelijk van de temperatuur en de vluchtigheid van de stof. De dampdruk wordt bepaald door middel van Formule 1.

$$p = \frac{RV \cdot p_s}{100} \quad (1)$$

Met:

p = dampdruk [kPa]

RV = relatieve vochtigheid [%]

p_s = verzadigingsdampdruk [Pa]

De dampdruk bij verzadiging p_s kan enerzijds bepaald worden via stoomtabellen en anderzijds via Formule 2 (Steeman, 2019).

$$p_s(\theta) = e^{\left(65,8094 - \frac{7066,27}{273,15 + \theta} - 5,976 \cdot \ln(273,15 + \theta)\right)} \quad (2)$$

Met:

θ = temperatuur [K]

e = getal van Euler = 2,71828...

Algemeen kan gesteld worden dat waterdamp zich in een constructieonderdeel verplaatst van de kant waar de hoogste dampdruk heerst naar de kant met de laagste dampdruk. Omdat er een verschil in dampdruk optreedt, ontstaat dampdiffusie. Kortom wordt de richting van de dampdiffusie in het desbetreffende constructieonderdeel bepaald door het dampdrukverschil.

2.2.3 Warmtegeleidingscoëfficiënt

De warmtegeleidingscoëfficiënt λ geeft aan hoeveel warmte doorheen een materiaal van 1 m dik en 1 m² doorsnede gaat, per eenheid van tijd en per graad temperatuurverschil tussen de beide oppervlakten van het materiaal. De waarde wordt dan ook kortweg uitgedrukt in W/(m·K).

Hoe lager de lambda-waarde van een materiaal, hoe lager de warmtegeleiding of - met andere woorden - hoe beter de isolatiegraad. De λ -waarde laat dus gemakkelijk toe om de isolerende werking van verschillende materialen met elkaar te vergelijken.

Over het algemeen worden biogebaseerde isolatiematerialen gekarakteriseerd door iets hogere warmtegeleidingscoëfficiënten λ in vergelijking met traditionele isolatiematerialen. Dit komt doordat de traditionele isolatiematerialen voor een groot deel bestaan uit ingesloten lucht of een ander gas dewelke uitermate goed isoleren. Zo kan geconcludeerd worden dat de isolatiegraad van biogebaseerde isolatiematerialen iets lager ligt, wat ervoor zorgt dat een dikker isolatiepakket vereist is. In Tabel 1 worden drie traditionele en drie biogebaseerde isolatiematerialen weergegeven deze bewering te staven.

Tabel 1: Lambda-waarde van enkele isolatiematerialen (Vandenberghe, D., n.d.)

	Type isolatie	λ -waarde [W/mK]
Traditioneel	Resolhardschuim	0,018-0,020
	PIR of polyisocyanuraathardschuim	0,021-0,026
	Rotswol	0,031-0,044
Bio-based	Papiervlokken of cellulose	0,035-0,040
	Kurk	0,038-0,040
	Katoen	0,038-0,042

2.2.4 Warmtestroom

De warmtestroom beschrijft het transport van energie per tijdseenheid per eenheidsoppervlak. Het warmtetransport wordt door de beweging van atomen en moleculen veroorzaakt doordat deze temperatuurafhankelijk zijn. Wanneer de temperatuur aan beide kanten van de wandopbouw verschilt, vindt er binnenin de wand warmtetransport plaats door geleiding. De hoeveelheid energie die per seconde getransporteerd wordt, hangt af van verschillende factoren. Zo oefent de oppervlakte van de wand, de dikte van de wand, de grootte van het temperatuurverschil tussen beide fronten van de wand en de warmtegeleidingscoëfficiënt λ van het materiaal een invloed uit op het warmtetransport. Door middel van de warmtestroom kan de invloed van de temperatuurschommelingen op de thermische prestatie in kaart gebracht worden.

Figuur 1 toont het principe van de warmtestroomdichtheid q die aan de hand van Formule 3 bekomen wordt. Hierin is de warmteweerstand R gelijk aan $\frac{d}{\lambda}$.

$$q = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{R} \quad (3)$$

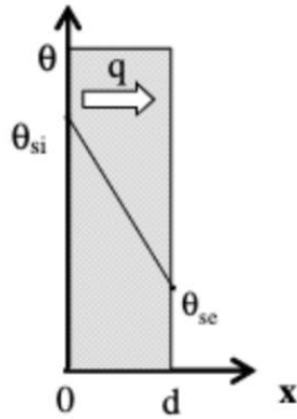
Met:

q = warmtestroomdichtheid [W/m²]

θ_{si} = temperatuur binnenoppervlak [K]

θ_{se} = temperatuur buitenoppervlak [K]

R = warmteweerstand [m²K/W]



Figuur 1: Warmtestroomdichtheid q (Steeman, 2019)

Echter om de warmtestroom ϕ te bepalen dient ook het oppervlak in rekening gebracht te worden. Zodoende wordt de warmtestroom ϕ bekomen door toepassing van Formule 4.

$$\phi = A * q \quad (4)$$

Met:

ϕ = warmtestroom [J/S]

A = oppervlakte [m^2]

q = warmtestroomdichtheid [W/m^2]

Volgens de wetten van de thermodynamica verloopt het warmtetransport altijd van een hoge naar een lage temperatuur. Zo wordt de stroomzin, aangegeven op Figuur 1, van binnen naar buiten als positief aangenomen en betekent dit dat de temperatuur aan het binnenoppervlak groter is dan aan het buitenoppervlak. Hetzelfde principe geldt voor de omgekeerde stromingszin, wat gedefinieerd wordt als een negatieve warmtestroom.

2.2.5 Vochtbuffering

De vochtbufferwaarde (MBV) geeft de hoeveelheid vocht aan die een materiaal opneemt of afgeeft wanneer het wordt blootgesteld aan herhaalde dagelijkse variaties van de relatieve vochtigheid tussen twee bepaalde niveaus (Rode et al., 2005)

Ter bepaling van de correcte vochtbufferwaarde dient Formule 5 in rekening gebracht te worden.

$$MBV = \frac{m_a - m_b}{A * \Delta \varphi} \quad (5)$$

Met:

m_a = massa van het materiaal na absorptie

m_b = massa van het materiaal na opnieuw vrijgeven van het vocht

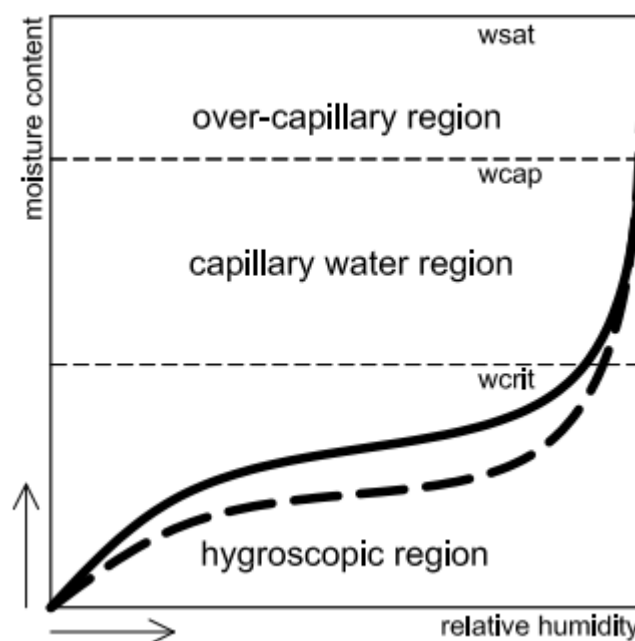
A = het aan vocht blootgestelde oppervlak van het materiaal

$\Delta \varphi$ = verschil in relatieve vochtigheid

Formule 5 toont aan dat de vochtbufferwaarde wijzigt gedurende het proces van opname en afgifte van vocht. Dit fenomeen wordt veroorzaakt door het hysteresis effect (Rode et al., 2005).

De term hysteresis-effect verwijst naar de vorm van de prestatiecurve (sorptie of desorptiecurve) wanneer deze wordt uitgezet tegen een toenemende en vervolgens afnemende vraag. De sorptiecurve bereikt bij toenemende vraag een maximumpunt en begint terug af te nemen bij hoge vraagniveaus. Daarentegen neemt de desorptiecurve aanzienlijk af bij een afnemende vraag. (Farrell et al., 1999).

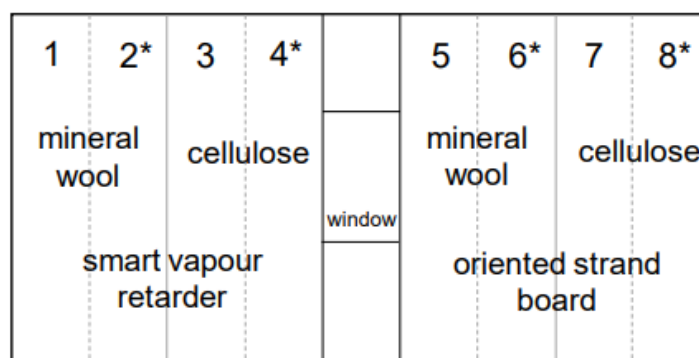
Het verband tussen de aanwezige hoeveelheid opgezogen vocht (het vochtgehalte) en de heersende relatieve vochtigheid in het materiaal wordt verkregen door middel van een sorptie-isotherm. Op Figuur 2 is een theoretische sorptie-isotherm weergegeven waarbij de stippellijn symbool staat voor de adsorptie, terwijl de volle lijn de desorptie of de uitdroging symboliseert. Zoals eerder beschreven is de verschuiving van de curve het gevolg van het hysteresis effect dat volgens Steeman rechtstreeks te wijten is aan volgende vier factoren: de onvermijdbare aanwezigheid van lucht in de poriën, de materiaalgebonden contacthoek, het zwellen en krimpen van het materiaal door toedoen van vocht en het ink-bottle effect (Steeman, 2010).



Figuur 2: Theoretische sorptie-isotherm (Steeman, 2010)

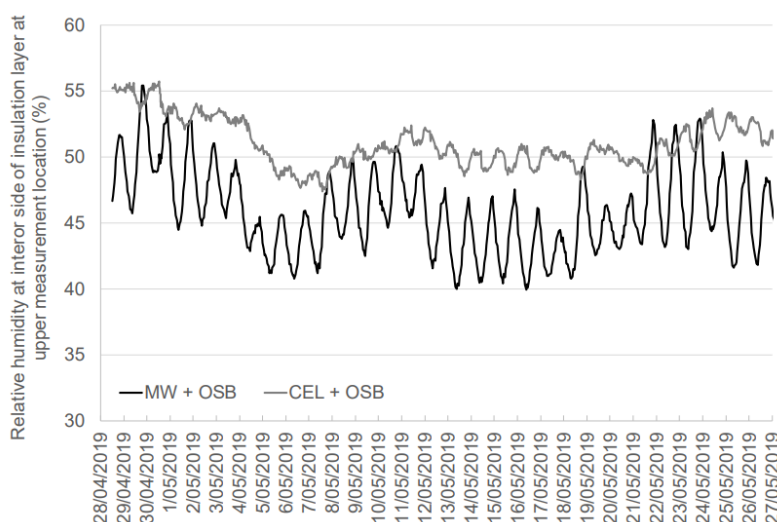
Steeman et al. (2020) onderzochten het verschil in vochtbufferwaarde (MBV) en drogingsproces tussen minerale wol en cellulose (= biogebaseerde). Verder werd ook gewerkt met twee soorten dampremmende lagen, namelijk OSB-platen en folies (=SVP).

De testwand van het paviljoen, te zien op Figuur 3, geeft aan dat een onderscheid gemaakt wordt tussen een vochtige (met *) en droge (zonder *) wandopbouw. Het droge en vochtige gedeelte worden door een folie gescheiden.



Figuur 3: Testwand paviljoen (Steeman et al., 2020)

Figuur 4 geeft het verloop van de relatieve vochtigheid in de isolatie weer voor de droge compartimenten 5 en 7. Het minder grillige verloop van cellulose is te danken aan de hygroscopische aard van biogebaseerde materialen. Op Figuur 4 is duidelijk te zien dat er minder grote pieken zijn in het verloop van cellulose in vergelijking met het verloop van minerale wol. Logischerwijs brengt waterinfiltratie een stijging van de relatieve vochtigheid met zich mee. Een verklaring hiervoor is de geringe vochtbufferwaarde van minerale wol.



Figuur 4: RV aan binnenoppervlak van cellulose en minerale wol (Steeman et al., 2020)

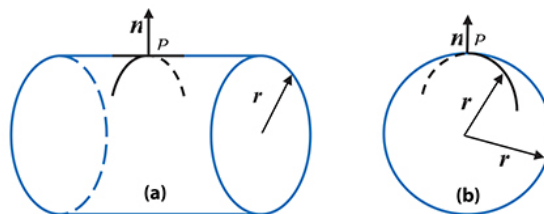
2.2.6 Capillaire absorptie

Capillaire werking is een fysisch verschijnsel waarbij een vloeistof, tegen de werking van de zwaartekracht in, het vermogen bezit om in haarbuisjes of capillairen omhoog te kruipen. Zo bestaat een poreus materiaal uit een netwerk van fijne poriën of holtes die onderling al dan niet verbonden zijn door kleine kanaaltjes. Bij contact tussen een poreus materiaal en een vloeibare substantie treedt bijgevolg absorptie op waarbij vocht zich ongeacht de richting kan verplaatsen. De capillaire werking is het gevolg van enerzijds de cohesiekrachten aan een wateroppervlak en anderzijds de adhesiekrachten tussen water en poriënwanden.

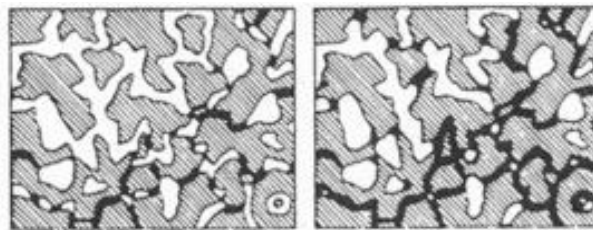
Volgens het onderzoek van De Jonghe (2005) is de opzuigkracht in een materiaal afhankelijk van de poriënstructuur. Hoe fijner de poriënstructuur is, hoe veerkrachtiger en dus hoe groter de opzuigkracht is in het materiaal. Laatstgenoemd feit wordt bewezen door middel van de vergelijking van Young-Laplace. Behroozi (2022) geeft aan dat het drukverschil Δp over het vloeistofoppervlak op een willekeurig punt wordt weergegeven in termen van de oppervlaktespanning γ en de twee hoofdkrommingsstralen op dat punt. Formule 6 geeft de vergelijking van Young-Laplace weer.

$$\Delta p = \gamma * \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (6)$$

De uitdrukking $\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$ wordt vaak de gemiddelde oppervlaktekromming genoemd, waarbij r symbool staat voor de straal van de cilinder. Op Figuur 5 staat een cilinder afgebeeld met straal r en normaal n in punt P . Elk vlak in n snijdt het cilinderoppervlak in een kromme met een bepaalde kromtestraal. De kromtestraal van de snijcurve in punt P verandert als het vlak om de n -as draait. Wanneer het vlak loodrecht op de as van de cilinder staat, is de sectie cirkelvormig met als minimale kromtestraal $r_1 = r$. Wanneer het vlak evenwijdig met de as van de cilinder staat, is het snijpunt een rechte lijn met maximale kromtestraal $r_2 = \infty$. De kromming van het cilindrisch oppervlak wordt dan gedefinieerd door eerder vermelde uitdrukking $\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$. De opzuigkracht in een materiaal wordt gedefinieerd als capillaire absorptie en wordt geïllustreerd door Figuur 6.

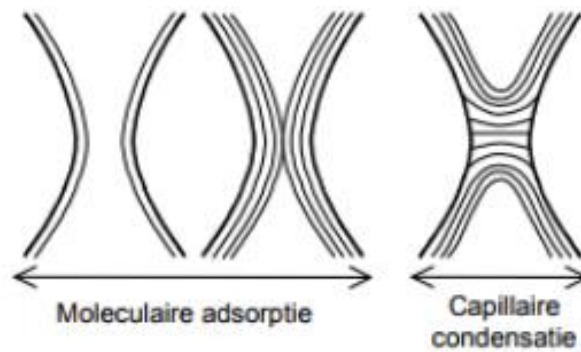


Figuur 5: Cilinder met straal r en normaal in punt P (Behroozi, 2022)



Figuur 6: Capillaire absorptie (De Jonghe, 2005)

Adsorptie kan gedefinieerd worden als een proces waarbij een vast oppervlakte vloeibare moleculen aantrekt door de aanwezige fysische krachten (Wat is adsorptie?, n.d.). Het poriënnetwerk wordt steeds volgens eenzelfde proces gevuld met vocht. In de eerste fase treedt er moleculaire adsorptie op. Dit wordt ook geïllustreerd door Figuur 7 waarop te zien is dat er in de eerste fase dunne laagjes water gevormd worden langsheen de randen van de poriënstructuur. Naarmate de opgezogen hoeveelheid water toeneemt, gaan de verschillende laagjes water elkaar raken. Dit resulteert in capillaire condensatie en doet zich voor bij een hoge relatieve vochtigheid.



Figuur 7: Tweefasig proces voor opvullen poriënnetwerk met vocht (Steeman, 2019)

Er werden in het verleden reeds studies uitgevoerd naar het gedrag van biogebaseerde isolatiematerialen m.b.t. de absorptie van water. Zo blijkt uit het onderzoek van Fino et al. (2018) dat voor kurk, als buitenafwerking, de waterabsorptie beperkt blijft tot de oppervlaktelagen. Toch werd vastgesteld dat onder zomerse omstandigheden het regenwater een iets grotere diepte bereikt. Dit komt doordat kurk gaat uitzetten door de hoge (oppervlakte)temperaturen, waardoor de openingen groter worden en het vocht dieper kan infiltreren. Een andere conclusie die genomen kon worden is dat de invloed van vocht beperkt bleef tot de bevochtigingsperiode en eerste uren na bevochtiging. Tot slot werd geconstateerd dat de veranderingen in de muurtemperatuur en de warmteoverdracht door de muur in regenachtige omstandigheden voornamelijk worden veroorzaakt door de temperatuur van het water. Het vochttransport en veranderingen in hygrothermische materiaaleigenschappen blijven dus beperkt tot de eerste lagen en tot de regenperiode.

2.2.6.1 Waterabsorptiecoëfficiënt

De waterabsorptie wordt beschreven in de norm “EN ISO 15148: Hygrothermische prestaties van bouwmaterialen en- producten – Bepaling van de waterabsorptie door gedeeltelijke onderdompeling” (2003). Zoals in de titel worden in dit onderzoek biogebaseerde isolatiematerialen gedeeltelijk ondergedompeld in water. De waterabsorptie beschrijft de capillaire zuiging (context zie paragraaf 2.2.6 Capillaire absorptie) van een materiaal en omvat het capillair vochtgehalte W_c en de waterabsorptiecoëfficiënt A . Het doel van de test bestaat erin om de massa van een monster, dat gedeeltelijk is ondergedompeld in water, te analyseren in functie van de tijd.

De waterabsorptiecoëfficiënt wordt onrechtstreeks bepaald door onderstaande Formule 7.

$$m = A * \sqrt{t} \quad (7)$$

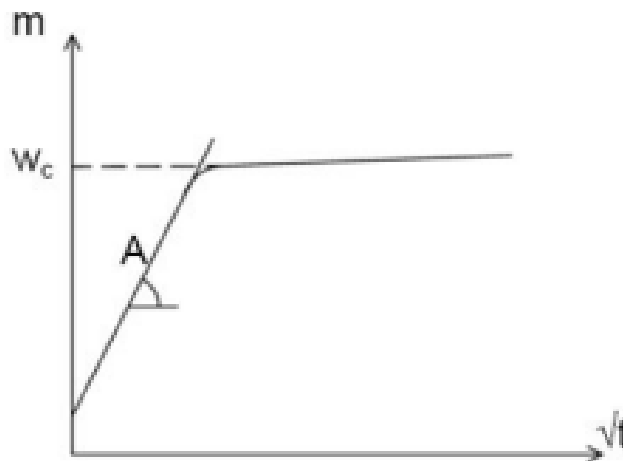
Met:

m = opgenomen massa water per contactoppervlakte-eenheid [kg/m^2]

A = waterabsorptiecoëfficiënt [$\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{s})$]

t = tijd [s]

In Formule 7 wordt de vierkantswortel van de tijd genomen zodat er een lineair verband te vinden is met de waterabsorptiecoëfficiënt A , zoals te zien is op Figuur 8. Hierop is te zien dat het vochtgehalte lineair toeneemt – als gevolg van absorptie - tot het capillair vochtgehalte W_{cap} ($=W_c$) bereikt wordt. Eens voorbij dit punt vlakt het verloop snel af tot een nagenoeg horizontaal verloop bekomen wordt. Het eindpunt van de curve wijst op het verzadigd vochtgehalte W_{sat} . Op dit punt heeft het materiaal zijn maximale vochtgehalte bereikt. In dit geval gaat dit vaak om een oplossing van water met ingesloten lucht die gevangen zit in de poriën van het materiaal of tussen de watermoleculen.



Figuur 8: Lineair verband waterabsorptiecoëfficiënt A_w (Roels. S, 2008)

2.2.7 Vochttransport door waterdampdiffusie

Algemeen kan waterdampdiffusie omschreven worden als het evenwicht brengen van het concentratieverschil aan damp. Bovendien gaat met een verschil in dampconcentratie ook een verschil in dampdruk gepaard. De dampdruk is op zijn beurt het gevolg van een verschil in de relatieve vochtigheid of een temperatuurverschil tussen de binnen- en buitenlucht.

De waterdampdruk is hoger binnen in de woning dan in de buitenomgeving op voorwaarde dat de relatieve vochtigheid of temperatuur in de woning hoger is. In bijna alle gevallen gaat dus een waterdampstroom vloeien van de binnen- naar de buitenomgeving doorheen de lucht die aanwezig is in het poriënnetwerk. De mate waarin waterdamp gaat diffunderen is enerzijds afhankelijk van het dampdrukverschil en anderzijds van de weerstand van een bepaald materiaal tegen diffusie. Om deze weerstand te begroten voerde Kirchner het dimensieloze dampdiffusieweerstandsgetal of de μ -waarde in. Hoe kleiner de μ -waarde is, hoe beter de dampdiffusie doorheen een materiaal en des te sneller de waterdamp afgevoerd wordt. De μ -waarde van lucht wordt gelijk verondersteld aan 1. Zodoende ligt de waarde voor het dampdiffusieweerstandsgetal μ voor gelijk welk materiaal steeds hoger aangezien dit ten opzichte van lucht een remmende werking vertoont.

Echter is dit getal niet zo handig en wordt de term equivalente luchtdikte of Sd-waarde ingevoerd. Met de Sd-waarde wordt de weerstand tegen dampdiffusie gekwantificeerd van een bepaalde laagdikte van een bepaald materiaal. Simpelweg kan de Sd-waarde gedefinieerd worden als het aantal meter lucht

dat overeenkomt met het desbetreffende materiaal (Joostdevree, n.d.). Hoe hoger de Sd-waarde, hoe beter het materiaal in staat is om damp tegen te houden en dus hoe dampremmender het materiaal is.

In de praktijk is in de winter de warme binnenlucht vochtiger dan de koude buitenlucht, waardoor waterdamp van binnen naar buiten zal diffunderen. 's Zomers wordt dit fenomeen omgekeerd. Indien de vochtige lucht een koud vlak bereikt, gaat de damp condenseren. Om dit te voorkomen moet dus aan de warme zijde van de isolatie een dampremmend materiaal voorzien worden en aan de koude zijde een dampopen materiaal.

Het bepalen van de materiaalfactor gebeurt aan de hand van de cuptest. Dit is de eenvoudigste en meest gebruikelijke techniek en wordt beschreven in de norm *“EN ISO 12572: Warmte- en vochteigenschappen van bouwmaterialen en –producten – Bepaling van de waterdampdoorlatendheidseigenschappen”* (2016). Er worden in essentie twee proeven onderverdeeld, namelijk de dry cup en de wet cup. Het verschil tussen beide proeven is de richting van het vochttransport doorheen de samples. De richting van het vochttransport wordt namelijk omgedraaid. Dit is mogelijk door gebruik te maken van twee verschillende oplossingen, namelijk een KNO₃-oplossing en een KOH-oplossing voor respectievelijk de wet- en dry cups. Dit zorgt ervoor dat het materiaal ook een ander evenwichtsvochtgehalte heeft.

2.3 Vochttoorzaken

Het infiltreren van vocht in materialen gaat volgens Buildwise (voormalig WTCB) steeds gepaard met damptransport, hygroscopische eigenschappen en capillariteit van materialen. Hieronder worden de voornaamste oorzaken toegelicht die steeds vermeden moeten worden om defecten en degradatie te voorkomen.

2.3.1 Slagregen

Een veelvoorkomende bron van vochtinfiltratie is slagregen. Grote hoeveelheden neerslag in combinatie met hevige windstoten kunnen leiden tot doorslaand vocht in buitenmuren. De oriëntatie speelt dus een prominente rol. Indien de muur in België naar het zuidwesten, volgens F. Deboosere de meest voorkomende windrichting, georiënteerd is, is de kans op ongewenste vochtproblemen het grootste. Bij slagregen wordt een vochtfront gevormd dat door vloeibaar vochttransport zijn weg baant tot in de binnenwand. Wanneer de constructie onvoldoende kan uitdrogen en dus na verloop van tijd verzadigd geraakt, kunnen vochtproblemen en lekkages optreden en de isolatielaag aantasten. Dezelfde gedachtegang kan gevolgd worden voor accidentele vochtinfiltratie als gevolg van structurele ontwerp- en uitvoeringsfouten.

2.3.2 Opstijgend vocht

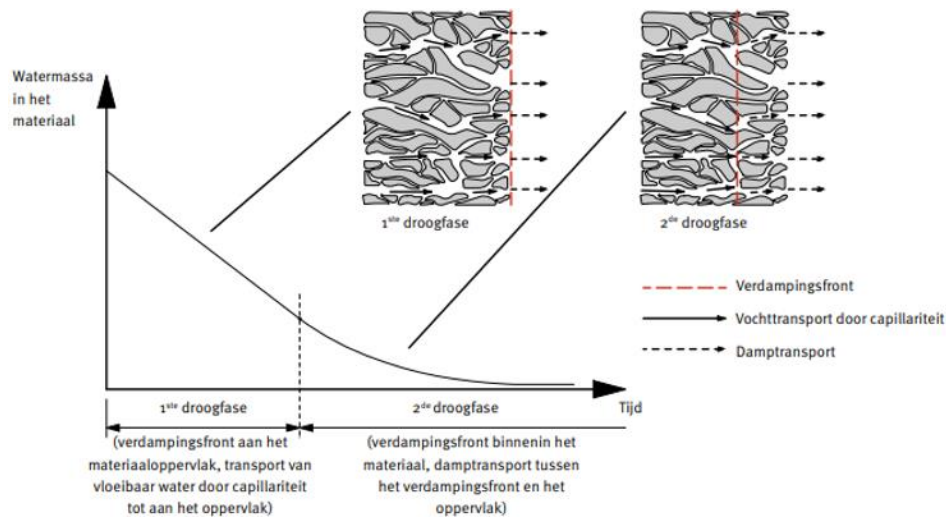
Indien geen horizontale barrières in de vorm van waterkerende folies worden voorzien om de scheiding te vormen tussen natte delen en de droge constructie, kan opstijgend vocht de constructie binnendringen. Vervolgens treedt andermaal het fenomeen van vloeibaar vochttransport op waardoor het water zich doorheen de constructie gaat verspreiden. Indien er toch accidentele vochtinfiltratie door gebrekkige uitvoering of dergelijke meer optreedt, moet het vocht ten allen tijde de constructie kunnen verlaten. De constructie dient dus minimaal langs één zijde dampopen te zijn om degradatie van de materialen te voorkomen als gevolg van vochtophoping.

2.3.3 Vochtproductie binnenshuis

Een laatste, niet te onderschatten, vocht oorzaak is de vochtproductie in de woning. Dit is vaak het rechtstreeks gevolg van een slecht werkende ventilatie. Veel hedendaagse woningen hebben geen (mechanisch) ventilatiesysteem en in gebouwen met natuurlijke ventilatie is de luchtbeweging alleen afhankelijk van de windsnelheid en de temperatuurgradiënt tussen binnen- en buitenomgeving (Lerma, C. et al., 2021). De vochtige lucht in de woning kan niet tijdig afgevoerd worden waardoor het neerslaat als condensatievocht tegen koele oppervlakken zoals ramen en muren. Dit principe heet oppervlaktecondensatie. Het condensatievocht trekt vervolgens in de muur met als gevolg schimmels, houtrot en dergelijke meer.

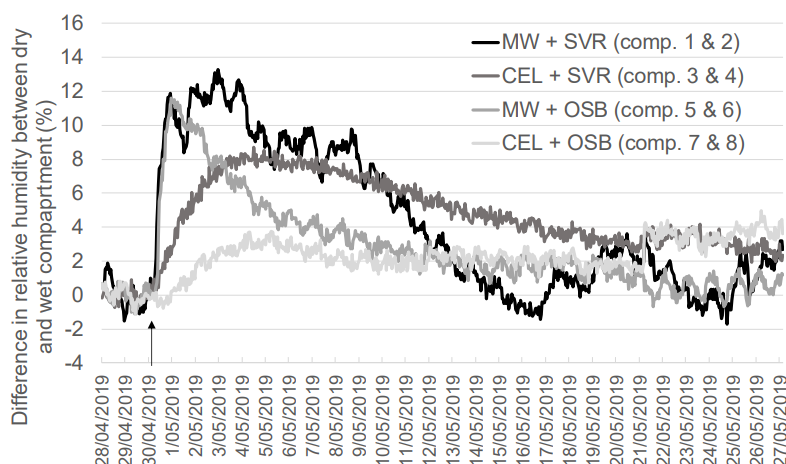
2.4 Drogingsproces

Volgens onderzoek van J. Meeusen bestaat het drogingsproces van een poreus materiaal steeds uit twee afzonderlijke fasen. Tijdens de eerste fase verplaatst het water zich in vloeibare toestand met een hoge en constante snelheid naar het materiaaloppervlak, waar het verdampt. Het mechanisme dat zich hierbij voordoet wordt convectie genoemd waarbij het droogfront zich niet terugtrekt. Tijdens de tweede fase vertraagt de droogsnelheid aanzienlijk aangezien de verdamping niet langer plaatsvindt aan het materiaaloppervlak, maar binnenin het poriënnetwerk. Vervolgens wordt het water onder de vorm van damp getransporteerd van het verdampingsfront tot aan het materiaaloppervlak. Dit damptransport verloopt veel trager dan het capillaire vochttransport. Dit komt doordat de droogsnelheid nu in sterke mate beïnvloed wordt door de eigenschappen van het poriënnetwerk. Kortom kan gesteld worden dat het oppervlak niet langer vochtig is doordat het vochtgehalte gedaald is tot onder het kritisch vochtgehalte w_{cr} . Figuur 9 schetst een beeld van hoe het drogingsproces zich gedraagt in de tijd.



Figuur 9: Tweefasig drogingsproces van een vochtig poreus materiaal (Buildwise, 2014)

Om een inzicht te verschaffen in het drogingsproces van isolatiematerialen werd in het onderzoek van Steeman et al. (2020) het verschil in relatieve vochtigheid bepaald tussen het natte en het droge compartiment van elk constructietype, hetzij minerale wol of cellulose (zie Figuur 10). Het verschil neemt uitermate snel toe in de compartimenten voorzien van minerale wol, wat er op wijst dat de droging nagenoeg onmiddellijk van start gaat. De droogtijd voor de compartimenten met minerale wol bedraagt ± 14 dagen en ± 21 dagen, terwijl dit voor cellulose meer dan 27 dagen in beslag neemt. De droogsnelheid voor minerale wol is dus relatief groot. Echter is meer onderzoek vereist om een beter beeld te krijgen van hoe het drogingsproces van biogebaseerde isolatiematerialen verloopt. Niet alle biogebaseerde materialen hebben namelijk dezelfde hygroscopische eigenschappen en ondanks deze eigenschappen heeft de dosering van de bestanddelen ook een invloed op de prestaties van het materiaal. Een andere constatactie is dat de droging voornamelijk via de warme zijde van de isolatie verloopt.



Figuur 10: Verschil in RV tussen nat en droog compartiment (Steeman et al., 2020)

Uit de resultaten voor cellulose, wat ook een natuurlijke toepassing is, kan opgemaakt worden dat het drogingsproces vrij veel tijd in beslag neemt ten opzichte van de minerale wol. Ook wordt vastgesteld dat er sprake is van een delaytijd, wat erop wijst dat het effect van het vocht pas zichtbaar is na het

verstrijken van een bepaalde tijdspanne. De resultaten van dit onderzoek worden dus in dezelfde lijn verwacht.

2.5 HAM-simulaties

“HAM-tools” is een simulatiesoftware voor gebouwen. “HAM” staat voor warmte-, lucht- en vochttransportprocessen in een gebouwschil die door het programma kunnen worden gesimuleerd. Er bestaan twee belangrijke commerciële softwarepakketten, WUFI en Delphin. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van Delphin 6.1.

2.5.1 Algemeen werkingsprincipe

In Delphin kunnen 1D-, 2D- en 3D-rotationeel-symmetrische constructieonderdelen worden ingegeven. De constructieonderdelen zijn opgedeeld in een raster. De software beschikt over een uitgebreide database van materialen met vooringestelde waarden, dewelke aangepast kunnen worden om de werkelijkheid zo goed als mogelijk te kunnen benaderen. Vervolgens wordt aan ieder element van het raster een materiaal toegekend. Het raster wordt gedescritiseerd ofwel omgevormd in fijnere elementen zodat de output exactere resultaten genereert. Verder kunnen de klimatologische condities zoals temperatuur en relatieve vochtigheid worden toegewezen. Andermaal beschikt de software over een database waarin standaard buiten- en binnenklimaten ter beschikking worden gesteld. Echter is het ook mogelijk een buiten- en/of binnenklimaat toe te voegen.

Om duidelijke resultaten te verkrijgen moeten outputs gedefinieerd worden a.d.h.v. outputschema's en outputformaten. Onder outputschema's wordt een tijdschema verstaan, wat aangeeft over welke periode gesimuleerd moet worden en om de hoeveel tijd data moet worden verwerkt. Vervolgens is het aangewezen om de gewenste outputfiles aan te maken en toe te voegen aan het model. Dit is niet alleen van belang om zo alle gewenste gegevens te verkrijgen, maar reduceert ook sterk de rekentijd nodig om de simulatie uit te voeren. Enkele voorbeelden hiervan zijn bijvoorbeeld het aanmaken van een outputfile voor de relatieve vochtigheid aan de warme zijde van de isolatie, de temperatuur aan de warme zijde van de isolatie, dampdruk aan de warme zijde van de isolatie enz.

Tot slot kan ook nog bepaalde bron worden toegekend aan één of meerdere cellen van het model. Enkele voorbeelden hiervan zijn een energiebron, een waterbron, de uitwisseling van lucht enz. Zo kunnen specifieke invloeden grondig onderzocht worden. Het toewijzen van een waterbron kan relevant zijn indien bijvoorbeeld accidentele waterinfiltratie onderzocht wordt. Van zodra alles is toegewezen aan het gewenste deel van de constructie kan de simulatie uitgevoerd worden en worden alle balansvergelijkingen voor warmte, lucht en vocht uitgerekend. De gesimuleerde data wordt verder verwerkt in een externe software genaamd PostProc (Post Processing). De verkregen data wordt eenvoudig uitgezet in een grafiek waarvan de lay-out verder aangepast kan worden.

2.5.2 Bestaand onderzoek: Hygrothermisch transport door een biogebaseerde materiaal

Volgens het onderzoek van Benzaama et al. (2022) hangt het hygrothermisch gedrag van gebouwen samen met verschillende parameters die vaak niet beheersbaar zijn. Hierdoor is het opstellen van een betrouwbaar en representatief model een uitdagende taak. De dynamiek wordt immers bepaald door complexe en niet-lineaire processen die gestuurd worden door de omgeving. Fysische modellen zoals Fluent, WUFI en Delphin-tools vormen een geschikte benadering.

Voor het fysische model zijn in de literatuur verschillende modellen voorgesteld om de fysische verschijnselen van hygrothermische overdracht in poreuze materialen te benaderen. De gebouwschil staat bloot aan verschillende invloedparameters zoals de omstandigheden van de externe omgeving (straling, regen, temperatuur, wind, enz.) en de interne omgeving (verwarming, ventilatie, verschillende bronnen van warmte en vochtigheid, enz.). Numerieke modellering is een nuttige methode om het gedrag van de gebouwschil te beoordelen. Voor warmteoverdracht, bijvoorbeeld, wordt de temperatuur aangeduid als een conventionele overdrachtspotentieel. Met betrekking tot vochtoverdracht zijn er verschillende modellen met verschillende drijvende krachten voor massaoverdracht zoals het watergehalte, de dampdruk, het dampgehalte en relatieve vochtigheid.

Benzaama et al. stelt dat de voornaamste moeilijkheid voor het creëren van een representatief model ligt in de bepaling van: (i) de modelparameters door het scheiden van de overdracht van de vloeibare fase en de dampfase, (ii) de thermische gradiëntcoëfficiënt. De karakterisering van de invoerparameters dient namelijk chronologisch te gebeuren door middel van testen.

2.6 Algemeen vergelijkend onderzoek van hygrothermische parameters

In Tabel 2 worden voor elk van de onderzochte materialen alle gevonden waarden voor het dampdiffusieweerstandsgetal μ , de waterabsorptiecoëfficiënt A_w , warmtegeleidingscoëfficiënt λ , specifieke warmtecapaciteit c_p en de soortelijke dichtheid ρ . Er is specifiek gekozen voor deze vijf parameters aangezien dit de vijf parameters zijn die in de software Delphin moeten worden ingegeven. Enerzijds vormt Tabel 2 een ideale vergelijkingsgrond om de verkregen testresultaten uit de waterabsorptietest en cuptest te kunnen vergelijken. Anderzijds kan door middel van de verschillende waarden achterhaald worden wat de meest courante waarde is voor elke specifieke parameter.

Het is echter wel opvallend dat in de literatuur bijzonder weinig informatie terug te vinden is over de waterabsorptiecoëfficiënt A_w van de vijf onderzochte biogebaseerde isolatiematerialen, de biogebaseerde kurkafwerking en de magnesiumoxideplaten in deze thesis. Het dampdiffusieweerstandsgetal μ daarentegen is makkelijker terug te vinden in de literatuur waardoor de meetgegevens van de in-situ metingen van de cuptest beter vergeleken kunnen worden.

Tabel 2: Parameters uit de literatuur

	Waterabsorptie-coëfficiënt [kg/m ³ vs]	Dampdiffusie-weerstandsgetal [-]	Warmtegeleidings-coëfficiënt [W/mK]	Specifieke warmtecapaciteit [J/kgK]	Soortelijke dichtheid [kg/m ³]
Houtwol	0,02 ^a	3 ^b	0,04 ^b	2100 ^d	54 tot 270 ^d
	0,07 ^c	1 tot 5 ^d	0,036 ^g	2100 ^g	60 ^g
	/	2 ^e	0,039 tot 0,052 ^m	2100 ^l	40 tot 60 ^l
	/	4 ^f	0,038 tot 0,048 ^c	/	/
Katoen	/	1 tot 5 ^d	0,038 ^d	1300 ^d	18 ^d
	/	2,2 ^g	0,039 ^g	1600 ^g	20 ^g
	/	2,2 ^h	0,039 ^h	1700 ^l	27 ^l
Kurk	0,04 ⁱ	5 tot 30 ^j	0,043 ^j	/	/
	0,001433 ^k	2 tot 10 ^l	0,04 tot 0,045 ^l	1800 ^l	70 tot 140 ^l
	/	19,79 ^m	/	/	/
	/	25 tot 30 ⁿ	0,04 tot 0,043 ⁿ	/	/
	/	5 tot 30 ^o	0,038 tot 0,04 ^o	1670 ^o	140 tot 160 ^o
	/	54,61 ^p	0,037 tot 0,041 ^x	1160 ^x	/
Isovlas	/	1 ^q	0,038 tot 0,05 ^l	1600 ^l	15 tot 60 ^l
	/	5,7 ^r	0,038 ^r	1600 ^r	/
	/	1 tot 2 ^s	0,04 ^s	/	/
Hennep	1,5 ^t	1 tot 2 ^s	0,04 ^f	1800 ^f	/
	/	1 tot 5 ^u	0,04 tot 0,045 ^s	1140 ^y	/
	/	<2 ^v	0,04 tot 0,048 ^l	1800 ^l	24 tot 60 ^l
	/	1 ^w	0,04 ^d	2300 ^d	30 tot 42 ^d
Gras	/	2,6 ^x	0,04 ^x	1110 ^x	60 ^x
	/	1 ^y	0,04 ^y	1700 ^y	40 ^y
	/	1 tot 2 ^z	0,042 ^l	2200 ^l	53 tot 68 ^l
MgO	geen teken van absorptie ^{aa}	184,7 ^{aa}	0,213 ^{aa}	/	946 ^{aa}

^a Verelst, R. (2014)

^b Sto (2022)

^c De Mets, T. (2017)

^d Rescoop Mecise (2016)

^e STEICOflex (2019)

^f Leefmilieu Brussel (2020)

^g Eurabo (2018)

^h De Koevoet (2019)

ⁱ Database Delphin 6.1

^j Kurkfabriek van avermaet (n.d.)

^k Fino, R. et al. (2018)

^l UND-Jahrbuch (2013)

^m Database Delphin 6.1

ⁿ De Koevoet (2019)

^o Ecomat (2014)

^p Fino, R. et al. (2018)

^q Leefmilieu Brussel (2020)

^r Isovlas (n.d.)

^s De Koevoet (2019)

^t Voerman, B. (2013)

^u Lets-Rebuild (n.d.)

^v Rescoop Mecise (2016)

^w Ecoinsul (2020)

^w Leefmilieu Brussel (2020)

^x Koh, C. H. et al. (2022)

^y GRAMITHERM (2019)

^z UND-Jahrbuch (2013)

^{aa} Magooxx (2021)

3 Probleemstelling

Gebouwen hebben een grote impact op hun omgeving. Zo is de bouwsector wereldwijd verantwoordelijk voor 38 procent van de totale CO₂-uitstoot en levert de bouwsector van alle bedrijfstakken de grootste bijdrage aan de afvalproductie in de wereld (Lammerse, 2020). Bovendien is de bouwsector in grote mate mee verantwoordelijk voor de klimaatverandering, de ineenstorting van ecosystemen, de overconsumptie van natuurlijke grondstoffen en de productie van afval (Douguet et al., 2021).

Dit zijn alarmerende cijfers die benadrukken dat er nog heel wat werk aan de winkel is. Zo kan gesteld worden dat de totale milieu-impact van gebouwen niet enkel te wijten is aan het energieverbruik in de gebruiksfase maar tevens het gevolg is van de ingebedde energie van de gebruikte bouwmaterialen.

Op de dag van vandaag zijn woningen energiezuiniger ontwikkeld waardoor de impact van de gebruikte materialen verhoudingsgewijs steeds verder toeneemt. De laatste jaren wordt een groeiende bewustwording waargenomen vanuit de bouwsector, om materialen te gebruiken met een lagere milieu-impact. Hieronder worden biogebaseerde bouwmaterialen verstaan zoals hout en hout-gebaseerde plaatmaterialen, kurk, hennep, houtwol, stro, kalkhennep etc. Deze materialen zijn typisch nagroeibaar of hernieuwbaar en hebben aan het einde van hun levensduur ook meer potentieel voor recycling of compostering, waardoor zij passen binnen de circulaire gedachte.

Echter hecht volgens De Wolf, C. (2016) slechts een minderheid van de vakspecialisten belang aan de integratie van biogebaseerde bouwmaterialen om de milieu-impact van het ontwerp te verminderen. Tal van hindernissen staan in de weg om deze tendens om te keren. Zo vormen onder meer het gebrek aan technische kennis, draagvlak en economische redenen een struikelblok.

Bijkomend zijn deze biogebaseerde bouwmaterialen deels opgebouwd uit natuurlijke materialen waardoor ze gedeeltelijk biologisch afbreekbaar zijn. Zo vertonen dergelijke bouwmaterialen een verhoogd risico op degradatie bij (langdurige) blootstelling aan een hoog vochtigheidsgehalte (Tazelaar, K., 2017). Het staat vast dat biogebaseerde bouwmaterialen een aanzienlijk potentieel hebben (NIBE, 2019), maar vooralsnog is het onduidelijk onder welke omstandigheden (temperatuur, vocht) er precies degradatie ontstaat (schimmelgroei, rot).

4 Doelstellingen en afbakening van onderzoeksveld

Het doel van deze studie is om het drogingspotentieel te onderzoeken van verschillende biogebaseerde isolatiematerialen. Hierin spelen tal van factoren zoals de vochtbuffering, de temperatuur, het vochttransport en dergelijke meer een belangrijke rol. Vooralsnog is er weinig bekend over hoe biogebaseerde materialen reageren op accidentele vochtinfiltratie. Zo wordt specifiek onderzocht hoe snel en op welke wijze het vocht zich enerzijds diffundeert doorheen de biogebaseerde isolatie en hoelang het duurt vooraleer de initiële toestand terug bereikt wordt. Bijkomstig worden ook testen uitgevoerd om enkele hygrothermische eigenschappen, meer bepaald de waterabsorptiecoëfficiënt A_w en het dampdiffusieweerstandsgetal μ , te bepalen om zo over alle relevante parameters te beschikken.

Er wordt dus niet onderzocht welke eventuele degradatierisico's gekoppeld zijn aan accidentele vochtinfiltratie en of de kwaliteit in het algemeen afneemt na blootstelling aan vocht.

Onderzoeksvragen:

- ❖ Wat is het drogingspotentieel van biogebaseerde isolatiematerialen na accidentele vochtinfiltratie?
- ❖ Welke invloed oefenen de hygrothermische eigenschappen uit op het droogproces?
- ❖ Op welke manier verloopt het vochttransport in de biogebaseerde isolatie?
- ❖ Oefent het vocht een invloed uit op de prestaties van een biogebaseerd isolatiemateriaal?

5 Onderzoeksaanpak en -methodologie

De basis van dit onderzoek werd gelegd door L. Lambrechts (2022) die eerder een meetcampagne uitvoerde in de zelfontworpen Mobble van de Universiteit Gent. Echter is verder en diepgaander onderzoek op haar resultaten vereist voor het in kaart brengen van het hygrothermisch gedrag, bevochtiging en het drogingspotentieel van vijf biogebaseerde isolatiematerialen. Allereerst wordt getracht om door middel van karakteristieke proeven de gewenste parameters te achterhalen, namelijk de waterabsorptiecoëfficiënt A_w en het dampdiffusieweerstandsgetal μ . Vervolgens wordt in Delphin 6.1 een betrouwbaar model opgesteld om HAM-simulaties uit te voeren met als doel het bekomen van vergelijkbare waarden met de in-situ gemeten waarden in de Mobble die het hygrothermisch gedrag beschrijven. Om het drogingspotentieel van de vijf biogebaseerde isolatiematerialen in kaart te brengen, wordt een hoeveelheid water ingebracht in enkele compartimenten van de wand van de Mobble. Afsluitend worden beide meetcampagnes onderling vergeleken, alsook de in-situ gemeten resultaten met de gesimuleerde resultaten.

5.1 Karakterisatie biogebaseerde materialen

Om representatieve resultaten te verkrijgen moet stapsgewijs te werk gegaan worden. Allereerst worden de biogebaseerde isolatiematerialen gekarakteriseerd door het uitvoeren van twee afzonderlijke proeven die enerzijds het dampdiffusieweerstandsgetal μ en anderzijds de waterabsorptiecoëfficiënt A_w bepalen. Dit is essentieel om de simulaties waarheidsgetrouw te kunnen uitvoeren. De software Delphin beschikt namelijk over een beperkte bibliotheek op vlak van biogebaseerde isolatiematerialen. Het is aangewezen om de specifiek van toepassing zijnde parameters te integreren in de software.

5.1.1 Capillaire absorptietest

Zoals in de literatuurstudie vermeld staat, wordt de waterabsorptiecoëfficiënt A_w bepaald volgens de norm EN ISO 15148:2016. De samples die onderzocht worden, moeten voldoen aan volgende voorwaarden:

- ❖ De samples zijn prisma's (vierkante vorm) met een constante sectie om ééndimensionale waterstroom te garanderen.
- ❖ Het contactoppervlak bedraagt minstens 50 cm² en is bij voorkeur groter dan 100 cm².
- ❖ Bij voorkeur dient de productiedikte van het sample gebruikt te worden om de werkelijkheid zo min mogelijk te beïnvloeden.
- ❖ Per materiaal dienen minstens drie samples getest te worden. Indien het contactoppervlak kleiner is dan 100 cm², moeten zes samples worden getest.

- ❖ In geval van minder samenhangende materialen is het toegestaan een gaas te gebruiken waarvan de open oppervlakte zo groot mogelijk is. In dit scenario is het verplicht een contactoppervlak van minstens 100 cm² te hanteren.

5.1.1.1 Testprocedure

Eerst en vooral worden de materialen op maat (200x200 mm) gesneden. Alle materialen, met uitzondering van de magnesiumoxideplaten, zijn minder samenhangend, waardoor gewerkt wordt met een gaas. Een voorbeeld hiervan is te zien op Figuur 11.



Figuur 11: Op maat gesneden isolatiemateriaal in gaas

In vergelijking met de biogebaseerde isolatiematerialen worden de magnesiumoxideplaten niet voorzien van een gaas. Het materiaal vormt namelijk een goed samenhangend geheel. De magnesiumoxideplaten hebben een verschillende afwerking aan de boven- en onderkant waardoor het aangewezen is om de absorptietest op beide kanten van de plaat uit te voeren. Echter is het belangrijk dat de waterabsorptie ééndimensionaal verloopt waardoor de (onafgewerkte) zijvlakken van de magnesiumoxideplaten waterdicht afgeschermd moeten worden. Dit gebeurt door middel van U-profielen uit kunststof waarvan de opening ongeveer even groot is als de dikte van een magnesiumoxideplaat. Na het op maat snijden van de U-profielen worden deze opgevuld met silicone waarna zo over een zijvlak geschoven worden. De silicone vormt een extra barrière aangezien het ervoor zorgt dat alle naden waterdicht zijn afgewerkt en de profielen op de gewenste plaats blijven zitten. Na bevestiging van de U-profielen wordt de overtollige silicone afgestroken om een zo groot mogelijk contactoppervlak met het wateroppervlak te verkrijgen. Zo wordt een waterdicht geheel gecreëerd en wordt een ééndimensionaal verloop gegarandeerd.

Later dient de oppervlaktereductie als gevolg van de U-profielen in rekening gebracht te worden voor de berekening van de waterabsorptiecoëfficiënt. Figuur 12 toont aan hoe de U-profielen waterdicht bevestigd worden aan de magnesiumoxideplaten, terwijl Figuur 13 een afgewerkte plaat illustreert.



Figuur 12: Aanbrengen van silicone en bevestigen van U-profiel



Figuur 13: Magnesiumoxideplaat na bevestiging U-profielen voor ééndimensionale waterabsorptie

De samples worden vooraf geconditioneerd aan de vooropgestelde condities (zie Tabel 3) totdat de massa van elk sample gestabiliseerd is binnen 0,1 % van de totale massa, gemeten over 24 uur. Na de conditionering van de samples worden deze gewogen met een nauwkeurigheid van $\pm 0,1$ % van de massa om de initiële massa m_i te bepalen.

Tabel 3: Toegestane bereik van gemiddelde condities en afwijking

	Temperatuur [°C]	Relat. vocht. [%]
Toegestane bereik van de testcondities	18 tot 28	40 tot 60
Toegestane afwijking gedurende de test	± 2	± 5

Volgens de norm moeten de samples ten allen tijde 5 ± 2 mm ondergedompeld zijn. Dit bleek echter geen makkelijke opgave te zijn. Eerst en vooral is het oppervlak van de bakken oneffen. Dit zorgt ervoor dat de samples niet horizontaal komen te liggen in het water. Het creëren van een horizontaal en waterpas oplegoppervlak is cruciaal voor het bekomen van representatieve waarden. Als tweede stelt de norm dat de samples niet op de bodem mogen liggen, zodat geen luchtballen vast komen te zitten onder de samples.

Bijgevolg wordt gebruik gemaakt van een rooster die door middel van fijne ijzerdraad opgehangen wordt in de bak aan de vier hoekpunten. De uiteindes van de draad worden bevestigd aan de rand van de bak door het boren van enkele gaten op gepaste hoogte. Dit principe zorgt voor een optimale proefopstelling waar het waterpeil voortdurend gemonitord kan worden zodat de samples altijd voldoende en gelijkmatig ondergedompeld zijn. Indien nodig mag extra gewicht worden geplaatst op de samples om opdrijven te voorkomen. Figuur 14 toont aan dat de roosters perfect horizontaal bevestigd zijn, terwijl Figuur 15 de uiteindelijke proefopstelling weergeeft.



Figuur 14: Waterpas ophangstelsel capillaire absorptietest



Figuur 15: Proefopstelling capillaire absorptietest zonder en met samples

De samples worden gewogen na 5 minuten, 20 minuten, 1 uur, 2 uren, 4 uren, 8 uren en 24 uren met een nauwkeurigheid van 0,1 % van de totale massa. Echter is het volgens de norm NBN EN 12087 van belang om de samples eerst gedurende vijf minuten te laten uitlekken in een uitlekbak, zoals te zien is op Figuur 16. Zo worden eventuele fouten door waterverlies of een foutief waterpeil tot een minimum beperkt. Echter kan de proef vroegtijdig beëindigd worden indien één van volgende zaken zich voordoet:

- ❖ Als het water het bovenoppervlak van het sample bereikt heeft in een periode minder dan 24 uren.
- ❖ Als de massatoename minder dan 1 g/m² bedraagt bij twee opeenvolgende wegingen.



Figuur 16: Uitlekbak

5.1.1.2 Berekening

Eerst wordt het contactoppervlak A [m²] berekend. Daarna wordt het verschil in massa berekend tussen elke weging op een bepaald tijdstip m_t [kg] ten opzichte van de initiële massa m_i [kg]. Zo kan het verschil in massa tussen elke weging en de initiële massa per oppervlak Δm_t [kg/m²] bepaald worden (zie Formule 8). Dit wordt vervolgens geplot met de vierkantswortel van de tijden van de wegingen. De gevormde grafiek zou één van twee types (A of B) moeten zijn volgens de norm.

$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A} \quad (8)$$

❖ Grafiek type A

Op Figuur 17 is, na de korte initiële stabilisatieperiode, te zien dat een rechtlijnig verband gevormd wordt tussen de resultaten van Δm_t in functie van $\sqrt{t}$. Hierbij bereikt het water het bovenoppervlak niet binnen de 24 uren. Dit wordt gedefinieerd als grafiektype A subtype I. De waterabsorptiecoëfficiënt A_w kan berekend worden door middel van volgende Formule 9.

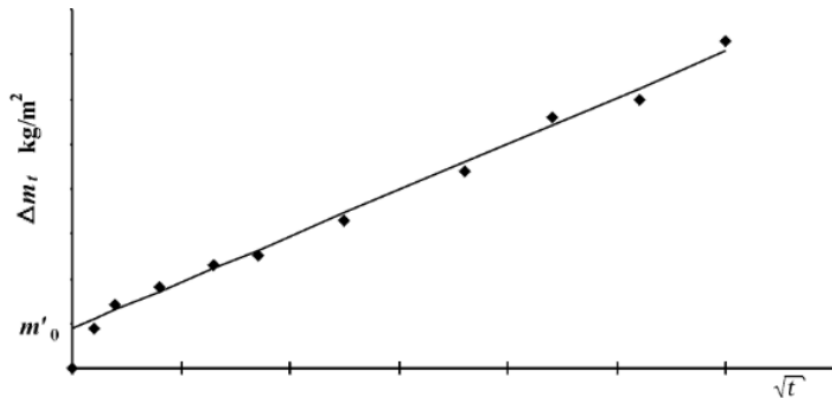
$$A_w = \frac{\Delta m'_{tf} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}} \quad (9)$$

Met:

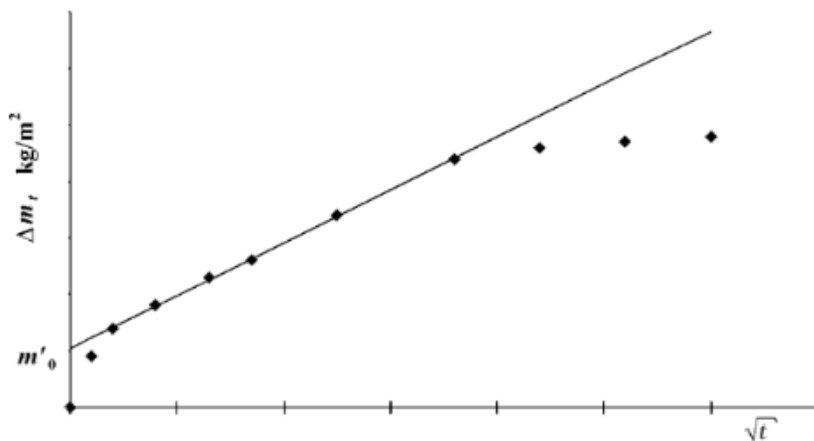
$\Delta m'_{tf}$ [kg/m²] = waarde van Δm op de rechte op tijdstip t_f

t_f [s] = de duur van de test, meestal 24 uren = 86 400 s

Indien de grafiek een rechte lijn vertoont met een plotse daling (zie Figuur 18), heeft het water het bovenoppervlak van het sample vroegtijdig bereikt. Dit wordt gedefinieerd als grafiektype A subtype II. In dit geval wordt A_w berekend met een waarde voor t_f kleiner dan 86 400 s.



Figuur 17: Grafiektype A, waarbij het water het bovenoppervlak niet bereikt



Figuur 18: Grafiektype A, waarbij het water het bovenoppervlak heeft bereikt

❖ Grafiek type B

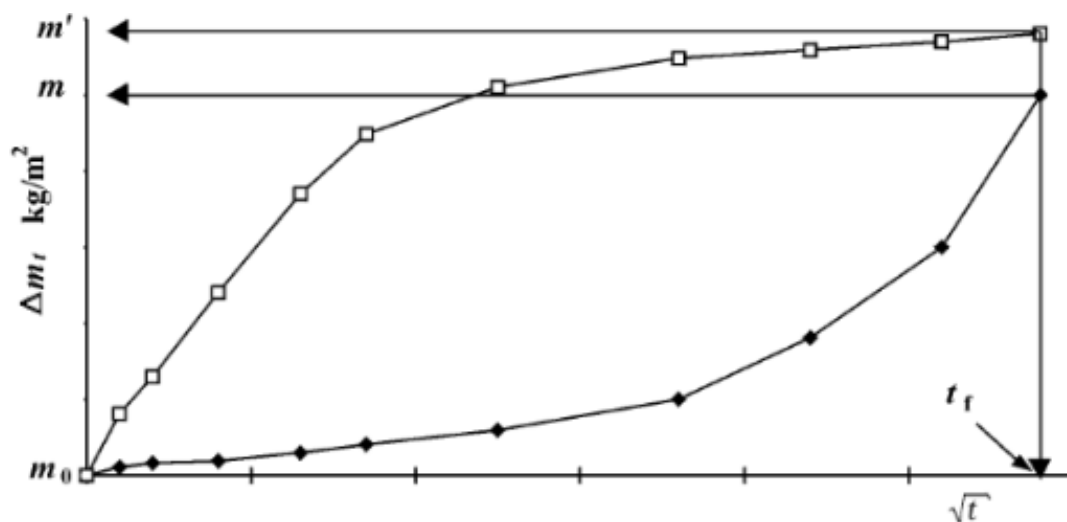
Op Figuur 19 is te zien dat de resultaten van Δm_t op $\sqrt{t}$ geen rechte lijn vormen, maar het verloop van een kromme beschrijven. In dit geval wordt voor Δm_t de waarde van Δm_{tf} genomen na 24 uren waardoor A_w nu bepaald kan worden door Formule 10.

$$A_{w,24} = \frac{\Delta m_{tf}}{\sqrt{86\,400}} \quad (10)$$

Indien het water het bovenoppervlak van het sample vroegtijdig (< 24 uren) heeft bereikt, wordt geen waarde van A_w berekend en wordt enkel rekening gehouden met de tijd. Andermaal wordt voor de eenvoud een duidelijk onderscheid gemaakt:

Grafiektype B, subtype I: Er wordt geen rechte lijn meer gevormd, maar een kromme waarbij het water het bovenoppervlak niet bereikt binnen de 24 uren.

Grafiektype B, subtype II: Er wordt geen rechte lijn meer gevormd, maar een kromme waarbij het water vroegtijdig het bovenoppervlak bereikt.



Figuur 19: Grafiektype B

5.1.2 Dampdiffusietest

Het dampdiffusieweerstandsgetal μ van de onderzochte biogebaseerde isolatiematerialen wordt bepaald via de eerder beschreven norm NBN EN ISO 12572:2016. Ook hier zijn enkele voorwaarden verbonden aan de test:

- ❖ De cups moeten bestand zijn tegen corrosie afkomstig van de KOH- of KNO₃-oplossing. Bij voorkeur cups gemaakt uit glas of metaal.
- ❖ De cups moeten bewaard worden in een klimaatkast met constante temperatuur (23 ± 5 °C) en relatieve vochtigheid (50 ± 5 %).

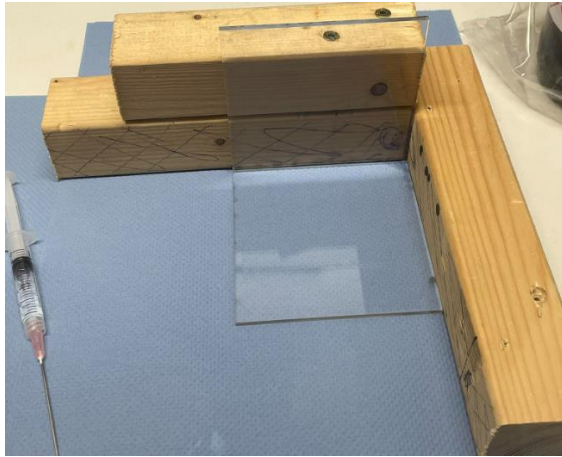
- ❖ Het blootgestelde oppervlak moet minstens 0,005 m² bedragen. Daarnaast moet het boven- en onderoppervlak nagenoeg identiek zijn en bedraagt de maximale afwijking in totale oppervlakte slechts 3 %.
- ❖ Indien de dikte van het materiaal groter is dan 100 mm, mag deze verkleind worden.
- ❖ Indien het sample-oppervlak kleiner is dan 0,05 m², moeten minstens vijf cups met dit materiaal getest worden. In alle andere gevallen volstaan drie cups.
- ❖ Voorafgaand aan de test moeten de biogebaseerde isolatiematerialen stabiliseren in gewicht door toedoen van een klimaatkast. Dit wil zeggen dat het verschil in gewicht tussen drie opeenvolgende metingen maximaal 5 % van het totale gewicht mag bedragen.
- ❖ De minimale diepte van beide oplossingen (KNO₃ en KOH) bedraagt 15 mm.

5.1.2.1 Testprocedure

De karakterisatie gebeurt door middel van wet en dry cups, waarbij respectievelijk gebruik gemaakt wordt van een KNO₃- en KOH-oplossing. Echter is enkel de wet cup uitgevoerd, aangezien de klimaatkast langdurig defect was. Dit zorgde ervoor dat er niet voldoende tijd overbleef om beide testen uit te voeren. Er wordt dus enkel gewerkt met een KNO₃-oplossing, waarbij vochttransport plaatsvindt van binnen (in de cup) naar de buitenomgeving (de klimaatkast).

Voor vijf van de te onderzoeken materialen is gekozen voor metalen cups voorzien van ‘gelaste’ plexiglas kokers. Dit betreft katoen, houtwol, hennep, gras en isovlas. Het plexiglas heeft een dikte van 3 mm, terwijl de centrale opening van de cups 100x100 mm bedraagt. Vervolgens wordt een lasercutfile opgesteld om de verschillende vlakken van de koker te kunnen vervaardigen. Er wordt geopteerd om vierkante vlakken 103x103 mm te gebruiken en de verschillende vlakken alternerend aan elkaar te bevestigen. Zo zijn de binnenafmetingen van de cup identiek aan deze van de afgewerkte kokers (100x100 mm) zodanig dat het vochttransport ééndimensionaal verloopt.

Het aan elkaar lassen van de afzonderlijke plexiglas plaatjes gebeurt door middel van een chemisch product genaamd chloroform. De plaatsjes worden onder een rechte hoek gehouden en tegelijkertijd wordt in de spleet een kleine hoeveelheid chloroform toegevoegd. Hierdoor ontstaat een chemische reactie waardoor beide plaatjes met elkaar verbonden worden (zie Figuur 20). Wegens de bedwelmende werking van chloroform wordt dit uitgevoerd onder een trekkast om de veiligheid en gezondheid te garanderen. Figuur 21 schetst een beeld van de afgewerkte kokers.



Figuur 20: Plexiglas aan elkaar 'lassen' tot kokers d.m.v. een spuit gevuld met chloroform



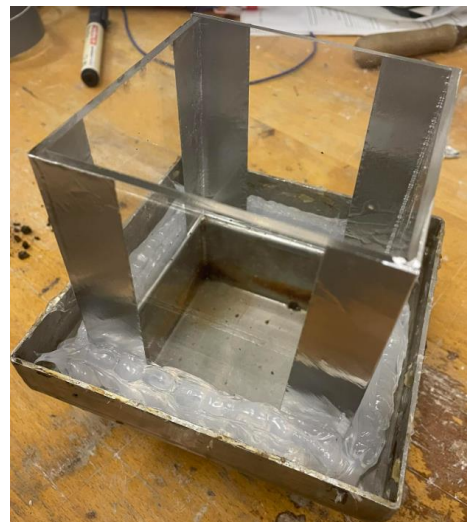
Figuur 21: Afgewerkte kokers uit plexiglas

Vervolgens worden de hoeken van de kokers met aluminiumtape afgeplakt. Dit biedt een extra garantie op de dampdichtheid van de plexiglas kokers en vermijdt ongewenst damptransport doorheen de spleten van de kokers (zie Figuur 22).

Tot slot worden de cup en de plexiglas koker verbonden met elkaar door middel van silicone. De silicone zorgt ervoor dat de koker op zijn plaats blijft zitten en vormt een dampdichte barrière tussen de cup en de plexiglaskoker. Andermaal wordt zo ongewenst damptransport verhinderd. Het uiteindelijke resultaat is te zien op Figuur 23.



Figuur 22: Afplakken van de hoeken met aluminiumtape



Figuur 23: Afgewerkte cup zonder sample

Vervolgens worden de gestabiliseerde samples in de kokers geplaatst. De verschillende samples worden iets te groot uitgesneden waardoor ze een klein beetje samengedrukt worden bij het aanbrengen in de kokers. Dit zorgt ervoor dat de samples klem komen te zitten en op de gewenste hoogte boven het vloeistofoppervlak blijven zitten. Zodoende is er geen nood aan een bijkomend ophangstelsel. Hierbij is het overigens wel van belang dat de samples zoveel als mogelijk hun natuurlijke dichtheid en

samenstelling aanhouden waardoor het samendrukken tot een absoluut minimum beperkt moet worden. Het uiteindelijke resultaat is te zien op Figuur 24.



Figuur 24: Afgewerkte cup met katoenisolatie

Desalniettemin bleek bovenstaande proefopstelling niet voor alle samples de meest geschikte. Zo wordt voor kurk en de magnesiumoxideplaat gekozen voor een variant. Doordat beide op geen enkele manier samendrukbaar zijn, komen deze niet klem te zetten in de koker. Dit zorgt ervoor dat de samples niet voldoende aansluiten en een opening gevormd wordt tussen de samples en de plexiglas kokers. Langsheen deze openingen kan de oplossing vrij verdampen wat zorgt voor onbetrouwbare meetgegevens. Zodoende wordt geopteerd om gebruik te maken van ronde samples die door middel van een lintzaagmachine op maat gezaagd worden. Het gebruik van dergelijke machine is aangewezen aangezien de kurk met een handmatige zaag volledig afbrokkelt en zo ongewenste kanalen creëert. De magnesiumoxideplaat is gewoonweg een te hard materiaal om handmatig te verzagen tot het gewenste formaat. Het op maat zagen is te zien op Figuur 25.



Figuur 25: Op maat zagen van kurkisolatie en magnesiumoxideplaat

Op Figuur 25 is te zien dat beide samples een verschillende dikte hebben. De kurkisolatie is relatief dik, terwijl de vrije hoogte van een kunststofcup beperkt is. Omwille van deze reden moet verder gezocht worden naar een alternatief. Desalniettemin is dit wel de ideale methode voor de magnesiumoxideplaat aangezien deze slechts een dikte van 9 mm heeft. De cups zijn voorzien van een pot en deksel die door middel van een draaibeweging aan elkaar bevestigd kunnen worden. Bijkomend werd de ruimte tussen het magnesiumoxideplaatje en de cup dampdicht afgesloten door een laag silicone aan te brengen. Tot slot wordt het deksel stevig op de pot gedraaid totdat deze volledig aansluit tegen het magnesiumoxideplaatje. Het proces is te zien op Figuur 26 t.e.m. Figuur 28.



Figuur 26: Kunststofcup gevuld met KNO₃-oplossing



Figuur 27: Kunststofcup met MgO-plaat bevestigd met laagje silicone



Figuur 28: Kunststofcup met deksel en MgO-plaat

Tot slot wordt de kurkisolatie getest door gebruik te maken van een PVC-buis met een op maat gemaakt opzetstuk. Het sample wordt eerst rond om rond voorzien van klevende aluminiumfolie zodat het vochttransport ééndimensionaal verloopt en eventuele kleine kanalen, gevormd tijdens het op maat zagen, worden afgedicht. Vervolgens wordt een laag silicone aangebracht op de aluminiumfolie en wordt het sample gecentreerd in het opzetstuk. De resterende ruimte tussen de aluminiumfolie en het PVC-opzetstuk wordt ook afgekit met een dunne laag silicone. Daarna wordt opnieuw silicone aangebracht, maar deze keer rond om rond het opzetstuk. Tenslotte wordt het opzetstuk in de PVC-buis geplaatst. Alle voorgaande stappen van het proces zijn visueel waarneembaar op Figuur 29 tot en met Figuur 34.



Figuur 29: Klevende aluminiumfolie rond kurkisolatie



Figuur 30: Silicone op aluminiumfolie van de kurkisolatie



Figuur 31: Sample in opzetstuk



Figuur 32: Silicone op opzetstuk



Figuur 33: PVC-buis gevuld met KNO₃-oplossing



Figuur 34: PVC-buis met opzetstuk voorzien van kurkisolatie

Daarna wordt het te testen geheel in de klimaatkast geplaatst en herhaaldelijk gewogen met een constante tijdsperiode van ongeveer twee dagen. Het temperatuurverschil tussen de klimaatkast en de ruimte waar gewogen wordt, mag maximaal ± 2 °C zijn. Bovendien moet de temperatuur en de relatieve

vochtigheid van de klimaatkast continu worden opgevolgd om foutieve metingen uit te sluiten. Zoals eerder vermeld wordt gestreefd naar een temperatuur $\pm 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ en een RV van $\pm 50\text{ }%$ (zie Figuur 35). Het uiteindelijke resultaat van de tweede meetcampagne is te zien op Figuur 36.



Figuur 35: Temperatuur (23 °C) en relatieve vochtigheid (50 %) in de klimaatkast



Figuur 36: Alle cups van tweede meetcampagne in klimaatkast

De test moet vroegtijdig beëindigd worden indien één van volgende zaken van toepassing is:

- ❖ Indien de massa meer dan 1,5 g is toegenomen per 25 ml KOH-oplossing bij een dry cup test.
- ❖ Indien het massaverlies de helft is van de initiële massa KNO₃-oplossing bij een wet cup test.

5.1.2.2 Berekening

Volgend stappenplan dient toegepast te worden om het gewenste dampdiffusieweerstandsgetal μ te bekomen.

1. Dichtheid van het waterdampdebiet g [kg/m²s] (Formule 11):

$$g = \frac{G}{A} \quad (11)$$

Met:

G = waterdampdebiet door het sample (= richtingscoëfficiënt van de geplotte grafiek) [kg/s]

A = blootgesteld oppervlak van het sample [m²]

2. Waterdampdrukverschil over het sample Δp [Pa] (Formule 12):

$$\Delta p = \frac{(RV_{KNO_3} - RV_{Klimaatkast}) * p}{100} = 1235,66 \text{ Pa} \quad (12)$$

Met:

RV_{KNO_3} = relatieve vochtigheid KNO_3 = 94 %

$RV_{klimaatkast}$ = relatieve vochtigheid in de klimaatkast = 50 %

$$p = e^{\left(65,8094 - \frac{7066,27}{273,15 + \theta} - 5,976 * \ln(273,15 + \theta)\right)} \text{ waarbij } \theta = 23 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow p = 2808,32 \text{ Pa}$$

3. Waterdampdoorlaatbaarheid W [kg/m² s Pa] (Formule 13):

$$W = \frac{g}{\Delta p} \quad (13)$$

Met:

g = dichtheid van het waterdampdebiet

Δp = waterdampdrukverschil over het sample

4. Waterdamppermeabiliteit δ [kg/m s Pa] (Formule 14):

$$\delta = W * d \quad (14)$$

Met:

W = waterdampdoorlaatbaarheid [kg/m² s Pa]

d = gemiddelde dikte van de sample [m]

5. Waterdamppermeabiliteit van lucht δ_{air} [kg/m s Pa] (Formule 15):

$$\delta_{air} = \frac{0,086 * p_0}{3600 * R_D * T * p} * \left(\frac{T}{273,15}\right)^{1,81} = 2,023 * 10^{-10} \frac{kg}{m * s * Pa} \quad (15)$$

Met:

$p_0 = p = p_{atm}$ = atmosferische druk = 101 325 Pa

R_D = gasconstante van waterdamp = 462,5 Nm/kgK

T = thermodynamische temperatuur = 296,15 K

6. Waterdampdiffusieweerstandsgetal μ [-] (Formule 16):

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta} \quad (16)$$

Met:

δ_{air} = waterdamppermeabiliteit van lucht [kg/m s Pa]

δ = waterdamppermeabiliteit [kg/m s Pa]

5.2 Meetcampagne testpaviljoen The Mobble

De volledige opbouw van het testpaviljoen werd uitgebreid beschreven in de masterproef van zowel N. Vanden Haute (2021) als L. Lambrechts (2022). In dit onderdeel worden enkel de noodzakelijke aspecten kort toegelicht met betrekking tot deze thesis. Dit betreft de opbouw van de mobiele wanden waarop de testen worden uitgevoerd, de locatie/oriëntatie, de verschillende meetapparatuur om de gewenste gegevens uit te lezen, de te volgen berekeningen en de bepaling van de hoeveelheid water die moet worden ingebracht in de Mobble.

5.2.1 Mobiele wanden

De testen voor dit onderzoek worden uitsluitend uitgevoerd op de mobiele wanden die zijn opgebouwd uit verschillende biogebaseerde isolatiematerialen, meer bepaald houtwol, katoen, gras, hennep en gestorte kalkhennep. Voor elk van de vijf biogebaseerde isolatiematerialen worden telkens twee compartimenten voorzien, behalve voor gestorte kalkhennep voor vloertoepassingen (EXIE Floormix). Een van de twee compartimenten wordt voorzien van een flexibel buisje die het mogelijk maakt om de biogebaseerde isolatiematerialen te bevochtigen (zie paragraaf 5.2.5). Met andere woorden doet het buisje dienst als een vochtbron om zo accidentele vochtinfiltratie na te bootsen en het gedrag van het isolatiemateriaal hierop te kunnen analyseren. Op deze manier is er een droog en bevochtigd compartiment aanwezig voor elke isolatiesoort, met uitzondering van EXIE Floormix.

Om het gedrag te kunnen bestuderen is meetapparatuur aangebracht om de gewenste output te verkrijgen. Dit komt verder in paragraaf 5.2.4 nog aan bod. Een schematische voorstelling en eenvoudige benoeming van de locatie van de verschillende biogebaseerde isolatiematerialen is te zien op Figuur 37. In wat volgt, wordt dus enkel de focus gelegd op de opbouw van beide mobiele wanden.

5.2.1.1 De vijf biogebaseerde isolatiematerialen in de mobiele wand

De eigenschappen van alle isolatiematerialen, verzameld uit de technische fiches van de producenten, zijn weergegeven in Tabel 4. In combinatie met Tabel 2, die ook waarden bevat van de voornaamste parameters, kan teruggevallen worden op een uitgebreide vergelijkingsgrond. Voor verdere detaillering over de opbouw wordt verwezen naar de thesis van L. Lambrechts (2022).

Tabel 4: Eigenschappen vijf biogebaseerde isolatiematerialen

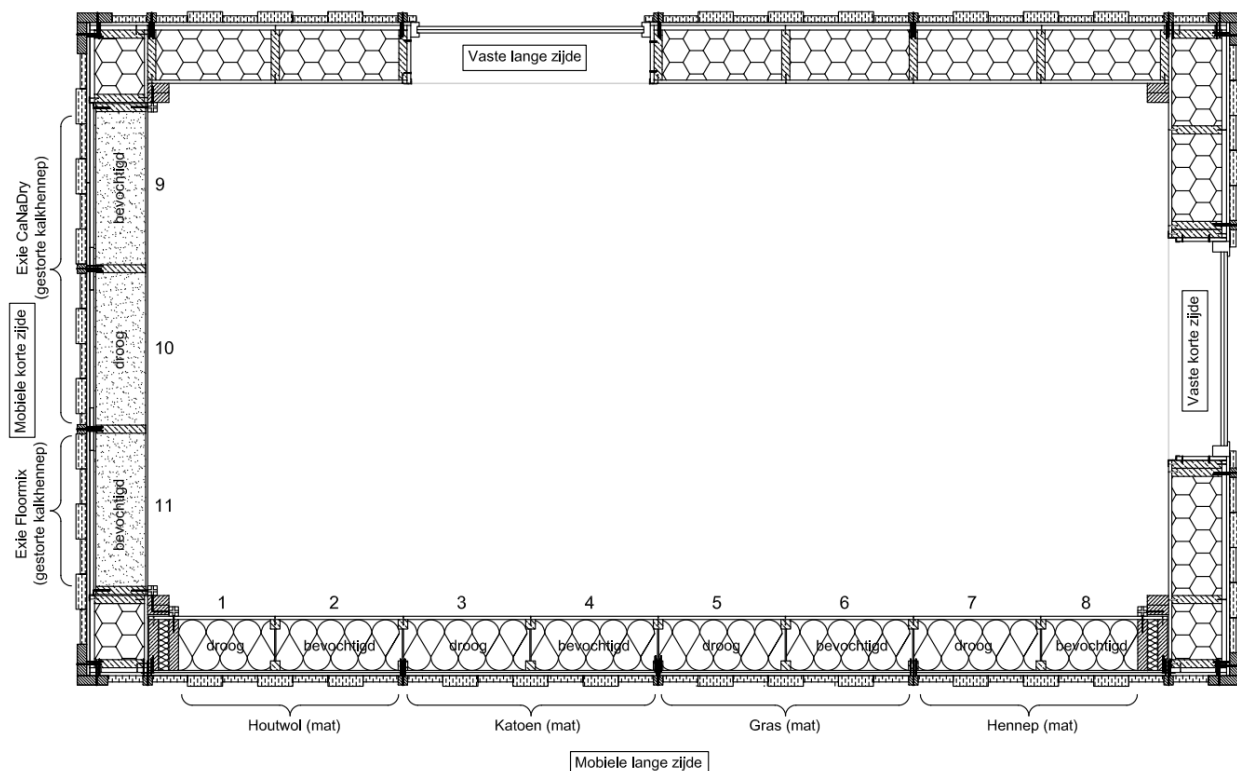
Materiaal	Uitvoering	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	μ [-]
Houtwol	Mat	0,036	60	2100	2
Katoen	Mat	0,039	20	1600	2,2
Gras	Mat	0,040	40	1700	1
Hennep	Mat	0,040	100	-	2
Kalkhennep (CaNaDry en Floormix)	Ingestort	0,054	175	-	-

5.2.1.2 Bijkomende wandopbouw

Naast deze vijf biogebaseerde isolatiematerialen speelt de verdere wandopbouw ook een belangrijke factor. In wat volgt, wordt de wandopbouw van buiten naar binnen beschreven. De gevelbekleding bestaat uit kurkstrips die bevestigd zijn op glasvezelversterkte sandwichpanelen (Fermacell HD-plaat). In de mobiele korte wand bevindt zich vervolgens een geventileerde luchtspouw, terwijl dit bij de mobiele lange wand niet het geval is. Daarna worden dampopen en weersbestendige magnesiumoxideplaten (EXIE Board) voorzien, waarbij de beplating versterkt is door middel van glasvezel gaas. De magnesiumoxidebeplating vormt zo de dampopen beplating aan de koude zijde van de isolatie. Aan de warme zijde van de isolatie in de lange mobiele wand is gebruik gemaakt van OSB3-beplating, terwijl bij de korte zijde geopteerd is voor dezelfde magnesiumoxidebeplating (EXIE Board). De eigenschappen van bovenvermelde materialen worden weergegeven in Tabel 5. De waarden vermeld in Tabel 5 worden ook gebruikt voor het model in de simulatiesoftware Delphin 6.1.

Tabel 5: Eigenschappen andere materialen mobiele wand testpaviljoen

Materiaal	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	μ [-]
Isokurk wave	0,040	145-160	1670	-
Fermacell Powerpanel HD plaat	0,400	1000	-	40
EXIE Board	0,213	1000	-	-
Oriented strand board 3	0,130	600	-	-



Figuur 37: Grondplan testpaviljoen (L. Lambrechts, 2022)

5.2.2 Locatie en oriëntatie

Het testpaviljoen is gelegen te Zwijnaarde op de parking van Campus Ardoyen (Universiteit Gent). De precieze oriëntatie en externe factoren spelen een belangrijke rol in het correct analyseren van de uitgelezen meetgegevens. Op Figuur 38 is het inplantingsplan van het testpaviljoen te zien met aanduiding van het Noorden. Het spreekt voor zich dat de zuidelijk georiënteerde wand, en in mindere mate de westelijk georiënteerde wand, significante gevolgen ondervindt van direct invallend zonlicht. De mobiele wanden A-D en C-D (zie Figuur 38), waarop de testen uitgevoerd worden, zijn dus respectievelijk westelijk en zuidelijk georiënteerd.

Bijkomend dient rekening gehouden te worden met externe omgevingselementen die eventueel voor schaduwvorming kunnen zorgen en zodoende ook een belangrijke invloed uitoefenen op de meetgegevens. Als eerste is te zien op het inplantingsplan (zie Figuur 38) dat het naastliggende gebouw ‘Labo Magnel-Vandepitte’, met een geschatte hoogte van 15 m, een invloed uitoefent op de verkregen meetgegevens. Afhankelijk van de stand van de zon zal slagschaduw ontstaan door het gebouw, wat vooral van belang is bij de analyse van de korte mobiele wand A-D. Een tweede omgevingselement dat zorgt voor de nodige schaduwvorming is de omvangrijke boom vlak naast de Mobble. De boom oefent een aanzienlijke invloed uit op de resultaten van beide mobiele wanden.



Figuur 38: Inplantingsplan testpaviljoen (L. Lambrechts, 2022)

5.2.3 Technische installaties

Om een constant binnenklimaat van 20 °C te verkrijgen wordt gebruik gemaakt van een elektrische convector in combinatie met een relais die op zijn buurt voorzien is van een temperatuursensor. De sensor zorgt voor een voortdurende monitoring van het binnenklimaat. Deze zorgt ervoor dat de

convactor aan- en uitgeschakeld wordt indien de temperatuur respectievelijk daalt onder of stijgt boven van de gewenste 20 °C.

Bijkomend wordt een ventilator geïnstalleerd zodat de warmte, afkomstig van het verwarmingselement, gelijkmatig verspreid wordt over de volledige binnenruimte van het testpaviljoen. Zo wordt een realistisch binnenklimaat bekomen.

5.2.4 Meetapparatuur

Ter bepaling van het hygrothermisch gedrag en het drogingspotentieel van biogebaseerde isolatiematerialen worden door middel van specifieke sensoren drie grootheden gemeten, namelijk de relatieve vochtigheid, de temperatuur en de warmtestroom. Deze sensoren worden gekoppeld aan dataloggers die in staat zijn om de meetgegevens tijdelijk op te slaan. De verschillende meetapparatuur wordt via de software of de interface vooraf ingesteld op een vast tijdsinterval van tien minuten. Zo wordt een tijdsinterval van tien minuten ingesteld en wordt elke parameter gelijktijdig gemeten en opgeslagen. De formules zijn nodig voor het bekomen van de gewenste grootheden in Excel. De uitgelezen data wordt volledig verwerkt in Excel om de juiste grafieken te bekomen.

In wat volgt, worden de verscheidene meetapparatuur kort besproken. Voor verdere detaillering, informatie en precieze locatie van de sensoren wordt verwezen naar de masterpoef van L. Lambrechts (2022).

5.2.4.1 Sensoren

Per compartiment worden twee relatieve vochtigheidssensoren, twee temperatuursensoren en een warmtestroomsensor voorzien. Bijkomend worden ook nog twee temperatuur- en RV-sensoren voorzien aan het binnenoppervlak van de wand en een extra temperatuursensor die de werking van de elektrische verwarming monitort.

❖ Relatieve vochtigheid: HIH-4000 Series

De sensoren voor de relatieve vochtigheid zijn bevestigd aan het binnen- en buitenoppervlak van de biogebaseerde isolatiematerialen en is operationeel voor een temperatuur van – 40 tot 85 °C. In theorie kan elke mogelijke waarde voor de relatieve vochtigheid van 0 tot 100 % gemeten worden met een nauwkeurigheid van $\pm 3,5$ %. De meetgegevens worden opgeslagen en uitgelezen als een spanningsverschil in millivolt. Door Formule 17 toe te passen kan de eenheid voor de relatieve vochtigheid omgezet worden in procent. (Honeywell, 2010).

$$RV = \frac{\frac{V_{uit}}{V_{toegevoegd}} - 0,16}{0,0062 * (1,0546 - 0,00216 T)} \quad (17)$$

Met:

RV = relatieve vochtigheid [%]

V_{uit} = output datalogger [mV]

V_{toegevoegd} = bronspanning [mV] = 5000 mV

T = temperatuur [°C]

❖ Temperatuur: Thermokoppel Type K

De temperatuursensor is een thermokoppel type K dat bestaat uit twee geleiders die zich als een plus- en minpool gedragen. De geleiders worden rond elkaar gedraaid en bevinden zich per compartiment andermaal aan het binnen- en buitenoppervlak van de biogebaseerde isolatiematerialen. De sensor is operationeel voor een temperatuur van – 40 tot 1200 °C met een nauwkeurigheid van $\pm 40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

De meetgegevens worden opgeslagen en uitgelezen als een potentiaalverschil en komen tot stand door het fenomeen dat beter gekend staat als het Seebeck-effect. Dit potentiaalverschil is te wijten aan een temperatuurverschil of -gradiënt dat optreedt tussen de twee uiteinden van de draad (Molki, A. 2010). Door Formule 18 toe te passen kan de eenheid voor de temperatuur omgezet worden in graden Celsius.

$$\Delta V = \alpha_s * \Delta T \quad (18)$$

Met:

ΔV = potentiaalverschil [V]

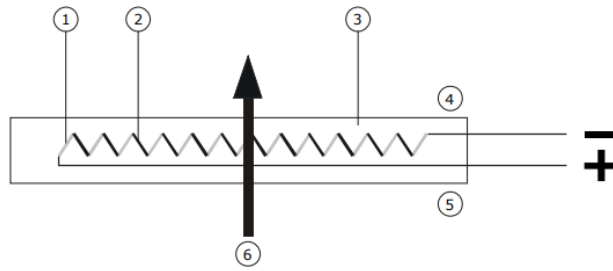
α_s = Seebeck coëfficiënt

ΔT = temperatuurverschil [°C]

❖ Warmtestroom: Hukseflux HFP01

De warmtestroomsensor wordt per compartiment aangebracht op het binnenoppervlak van de wand door middel van tape. De warmtestroomsensor is operationeel bij een temperatuur tussen -30 en 70 °C met een meetbereik van -2000 tot 2000 W/m².

De werking van de warmtestroomsensor gebeurt volgens het principe van een thermozuil (zie Figuur 39). De thermozuil bestaat uit een aantal in serie geschakelde thermokoppels die op hun beurt bestaan uit twee geleiders die zich als een plus- en minpool gedragen. De thermozuilen meten niet de absolute temperatuur, maar produceren een uitgangsspanning evenredig aan een lokaal temperatuurverschil of een -gradiënt. De opgewekte uitgangsspanning is evenredig met de warmtestroom door het plaatje (Hukseflux, 2021).



Figuur 39: Schematische werking warmtestroomsensor (Hukseflux, 2021)

De meetgegevens worden opgeslagen en uitgelezen als een uitgangsspanning in Volt. Om de precieze waarde van de warmtestroom Φ te bekomen dient de specifieke gevoeligheid S per sensor in rekening gebracht te worden volgens Formule 19. Tabel 6 geeft een overzicht van de gevoeligheid S per gebruikte sensor.

$$\Phi = \frac{U}{S} \quad (19)$$

Met:

Φ = warmtestroom [W/m^2]

U = uitgangsspanning [mV]

S = gevoeligheid per specifieke warmtestroomsensor [$\text{mV}/(\text{W}/\text{m}^2)$]

Tabel 6: Gevoeligheid S per specifieke warmtestroomsensor

Paneel nr.	Serienummer	S [$\text{mV}/(\text{W}/\text{m}^2)$]
1	5101	0,062990
2	8980	0,063910
3	5103	0,059600
4	5104	0,062150
5	6087	0,060020
6	8978	0,061590
7	8979	0,063470
8	8977	0,064800
9	9361	0,061240
10	2506	0,060170
11	9362	0,066090

Uiteindelijk kan de warmtedoorgangscoefficiënt bepaald worden door gebruik te maken van Formule 20. Hierbij is ΔT gelijk aan het verschil tussen de temperatuur van respectievelijk de binnen- en buitenomgeving.

$$U = \frac{\Phi}{\Delta T} \quad (20)$$

Met:

U = warmtedoorgangscoefficiënt [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

Φ = warmtestroom [W/m^2]

$\Delta T = T_i - T_e$ [K]

5.2.4.2 Dataloggers

Dataloggers zijn van essentieel belang om de data enerzijds te verzamelen en anderzijds op te slaan in functie van de tijd. Zo worden de sensoren aangesloten op een specifieke datalogger die vooraf ingesteld zijn op een vast tijdsinterval. De van toepassing zijnde dataloggers zijn: Daqpro 5300, Onset HOBO en de DT85 + CEM20.

❖ Datataker: DT85 + CEM20

De datataker DT85 verzamelt alle meetgegevens afkomstig van de temperatuur- en relatieve vochtigheidssensoren aanwezig in het testpaviljoen. Bijkomend worden nog enkele sensoren verbonden met deze datalogger: de twee temperatuur- en RV-sensoren en de sensor die dienst doet als controlemeting voor de werking van de elektrische verwarming. Tot slot worden ook enkele sensoren voorzien rondom de datalogger die fungeren als referentie. In totaal worden 56 verschillende sensoren aangesloten op de datataker DT85. Door zijn beperkte capaciteit aan toegangspoorten is het noodzakelijk om gebruik te maken van een uitbreidingsmodule onder de vorm van een CEM20-module.

De loggers kunnen via knoppen bestuurd en/of uitgelezen worden, echter is het eenvoudiger om dit te doen via de software op de computer. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om de duur van een meetperiode te wijzigen. Dit is van belang aangezien de capaciteit beperkt is en het geheugen vol kan zitten. Bijkomend mag niet te lang gewacht worden om de gemeten gegevens uit te lezen. Hiervoor wordt verbinding gemaakt met een extern bureaublad op een computer van UGent. Het voordeel hierbij is dat het op elk ogenblik, mits aanwezigheid van een internetverbinding, mogelijk is de gegevens uit te lezen of de logger te besturen. Belangrijk om weten is dat bij het uitlezen van de gegevens voor de optie ‘alle waarden’ gekozen wordt en dus niet voor ‘binnen een bepaald bereik’. Op die manier gaat zeker geen data verloren.

❖ Daqpro 5300

De Daqpro 5300 doet dienst als datalogger voor de warmtestroomsensoren. Eén datalogger heeft slechts acht toegangspoorten. In het testpaviljoen zijn in totaal elf warmtestroomsensoren aanwezig waardoor gebruik gemaakt wordt van twee Daqpro's. De acht warmtestroomsensoren van de lange mobiele zijde worden aangesloten op de eerste Daqpro, terwijl de overige drie van de korte mobiele zijde op de tweede Daqpro worden aangesloten.

Het uitlezen van de meetgegevens gebeurt via een USB-connectie. Via de speciaal ontwikkelde software Daqlab is het mogelijk de verzamelde meetgegevens te downloaden en eenvoudig te exporteren tot een Excel-rekenblad. Hierbij is het van belang om de data tijdig uit te lezen. Door het beperkte geheugen van de dataloggers is het aangewezen om niet langer dan zeven dagen te wachten. Eens het geheugen vol is, wordt de oudste data namelijk automatisch overschreven en gaan datagegevens verloren.

❖ Onset HOBO

In vergelijking met de voorgaande dataloggers worden er nu geen sensoren aangesloten. De Onset HOBO-meetapparatuur bevat inwendig de nodige sensoren voor het meten van de gewenste parameters, in dit geval de temperatuur en de relatieve vochtigheid. Bovendien functioneren voorgaande dataloggers door aansluiting op het elektriciteitsnet, terwijl deze werkzaam zijn op een batterij. Door middel van de speciaal ontwikkelde HOBO-software kunnen de meetgegevens eenvoudig uitgelezen worden via een USB-connectie en geëxporteerd worden naar een Excel-rekenblad. Afhankelijk van de omgeving worden twee types toegepast in het testpaviljoen.

- HOBO U12 Temp/RH Data Logger

Het eerste type is geschikt voor metingen in een binnenomgeving of -klimaat. In het testpaviljoen worden twee HOBO's van dit type opgehangen. De eerste bevindt zich ter hoogte van de toegangsdeur en de tweede is centraal opgehangen. Bijzondere aandacht is nodig bij de bevestiging. De metingen gebeuren in de HOBO zelf door middel van enkele openingen die dus niet afgeplakt mogen worden om correcte metingen te bekomen. Beide metingen fungeren als referentie om te controleren of de warme lucht, afkomstig van een elektrisch verwarmingstoestel, gelijkmatig verspreid wordt over het testpaviljoen en zo een constant binnenklimaat gecreëerd wordt. De meting aan de deuropening begroot eveneens de plaatselijke effecten ter hoogte van de deuropening. Met een nauwkeurigheid van respectievelijk 2,5 % voor de RV en 0,35°C voor de temperatuur worden accurate gegevens verzameld.

- HOBO Pro v2 U23

Het tweede type is iets meer geavanceerd en kan zowel in een buiten- als binnenomgeving worden toegepast. Bijkomend kan de datalogger afgeschermd worden door middel van een stralingsscherm om de invloed van de zon tot een minimum te beperken. In de werkelijke opstelling wordt op elke mobiele wand een datalogger inclusief stralingsscherm geïnstalleerd. Echter bleek dat een aparte sensor vereist was voor het meten van de relatieve vochtigheid ter plaatste van de kopse mobiele wand aangezien de HOBO foutieve waarden vertoonde. Andermaal worden representatieve waarden bekomen doordat de dataloggers een nauwkeurigheid bezitten van 2,5 % voor de RV en 0,25°C voor de temperatuur.

5.2.5 Bevochtiging

Om te achterhalen hoeveel water er effectief in de realiteit gaat infiltreren, is beroep gedaan op voorgaande onderzoeken. Eerst en vooral moet bepaald worden hoeveel van de verticale regen de gevel

bereikt. Uit voorgaande onderzoeken^{bb} kan geconcludeerd worden dat 0,6 % van de verticale regen de gevel bereikt. Deze 0,6 % wordt gezien als slagregen.

Met dit in het achterhoofd kan bepaald worden hoeveel water effectief moet worden toegevoegd aan elk nat compartiment om de werkelijkheid zo goed mogelijk na te bootsen. Hiervoor wordt beroep gedaan op de onderzoeken van J. Lagniau & M. Vanhaverbeke (2018), Gryson en Dewachter (2019) en Van Goethem (2014). Het werkingsprincipe wordt gedetailleerd uitgeschreven door L. Lambrechts (2022) en wordt hier kort nog eens samengevat.

Om de gemiddelde slagregen te bepalen wordt uitgegaan van een hevige regenbui van vier uur, een constante voor de horizontale regenvalintensiteit van rain event 10 en terreincategorie III. Voor de constante wordt een waarde van 18,1 mm/h bekomen door de gemiddelde grootste hoeveelheid regen van de afgelopen 100 jaar (72,4 mm) te delen door vier uur. Tabel 7 geeft de gebruikte gegevens weer.

Tabel 7: Rain event 10 gemiddelde hoeveelheid slagregen (Gryson & Dewachter, 2019; Van Goethem, 2014)

t [min]	v [m/s]	R_h [mm/h]	R_{wdr,gem,10min} [mm/hm ²]
10	6,052	18,100	17,179
20	5,504	18,100	15,624
30	5,352	18,100	15,192
40	7,905	18,100	22,439
50	8,231	18,100	23,365
60	7,737	18,100	21,963
70	7,925	18,100	22,496
80	7,935	18,100	22,525
90	5,127	18,100	14,554
100	5,633	18,100	15,990
110	4,862	18,100	13,801
120	4,517	18,100	12,822
130	6,418	18,100	18,218
140	7,717	18,100	21,906
150	7,538	18,100	21,398
160	9,383	18,100	26,635
170	8,540	18,100	24,242
180	8,828	18,100	25,060
190	9,195	18,100	26,101
200	10,921	18,100	31,001
210	9,671	18,100	27,452
220	8,709	18,100	24,722
230	10,296	18,100	29,227
240	7,826	18,100	22,215

^{bb} Arce Recatala et al. (2017);

ASHRAE(standard (2016);

Geldof, L. (2016);
Gryson & Dewachter (2019)

Via Formule 21 wordt de gemiddelde hoeveelheid slagregen op de buitengegeven $R_{wdr,gem,10min}$ bepaald.

$$R_{wdr,gem,10min} = 0,222 * v * R_h^{0,88} \quad (21)$$

Met:

$R_{wdr,gem,10min}$ = gemiddelde hoeveelheid slagregen per uur om de 10 min [mm/h]

v = windsnelheid [m/s]

R_h = horizontale regenintensiteit [mm/h]

Om $R_{wdr,gem}$ te bepalen wordt het gemiddelde genomen van de laatste kolom in Tabel 7. De totale hoeveelheid slagregen R_{wdr} wordt gevonden aan de hand van Formule 22.

$$R_{wdr} = R_{wdr,gem} * 4h = 21,505 \frac{mm}{4hm^2} * 4h = 86,021 l/m^2 \quad (22)$$

Aangezien de infiltratiebron een flexibel buisje is, zie Figuur 40, wordt bovenstaande hoeveelheid omgezet naar een puntbron. Er wordt uitgegaan van de meest nadelige omstandigheden, waarbij het compartiment een breedte heeft van 0,60 m en een hoogte tot aan het buisje van 1,609 m. Het volume water resulteert dan in 83,045 l. Echter is dit niet het volume aan water dat ingebracht wordt in het buisje. Lambrechts (2022) onderzocht verschillende bronnen en kwam tot de conclusie dat slechts 0,6 % effectief infiltreert. Dit resulteert dus in een volume van net onder 0,5 l.



Figuur 40: Bevochtiging van 0,5 l water via flexibel buisje

Op Figuur 40 is te zien dat met behulp van een trechter met slang het water wordt geïnfilteerd. Het toevoegen van het water bleek geen sinecure te zijn. Een gewone trechter voldeed namelijk niet. Enerzijds bleef het water in het buisje staan doordat er te weinig druk was en anderzijds was het uitstekende gedeelte van het buisje vrij kort om de trechter ‘verticaal’ te kunnen koppelen. Door gebruik te maken van een trechter met slang werden enerzijds beide struikelblokken weggewerkt en stroomde de halve liter water vlot en zonder verliezen in de natte compartimenten. De exacte hoeveelheid water werd aan de hand van een maatbeker in de trechter gegoten, terwijl met een timer gemeten werd hoe lang het water er over deed om volledig in de isolatie te stromen. Tabel 8 geeft de gemeten tijden weer.

Tabel 8: Duur waterinfiltratie van 0,5 l per compartiment

Nummer compartiment	Isolatiesoort	Duur [sec.]
2	Houtwol mat	32
4	Katoen mat	45
6	Gras mat	47
8	Hennep mat	34
9	Kalkhennep floormix	28
11	Kalkhennep CaNaDry	13

Algemeen kan geconcludeerd worden dat de implementatieperiode bij de isolatiematten (houtwol, katoen, gras en hennep) langer duurt vooraleer het volume aan water volledig geïnfiltreerd is in de isolatie. Dit kan verklaard worden doordat inblaasisolatie zich na verloop van tijd gaat ‘zetten’. Dit fenomeen is duidelijk waarneembaar in het testpaviljoen waar zichtbaar is dat de inblaasisolatie na het transport van het testpaviljoen en verloop van tijd drastisch is gezakt. De inblaasisolatie vormt met andere woorden veel minder een geheel, ondanks het feit dat de densiteit in normale omstandigheden wel hoger is. Er ontstaan kleine kanaaltjes waar het water eenvoudig weg kan instromen.

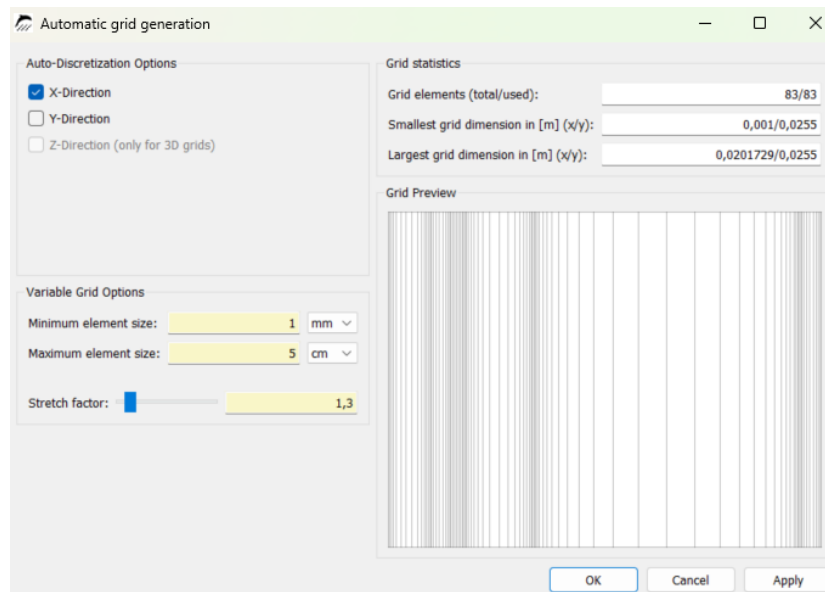
Een tweede oorzaak kan te wijten zijn aan de methode voor de plaatsing van het buisje. Het buisje zit namelijk ongeveer 5 cm in de isolatie. Dit betekent dat een opening in de isolatiematten voorzien moet worden. Onrechtstreeks kan dit leiden tot het plaatselijk samendrukken van de isolatiemat aan het uiteinde van het buisje. Hierdoor wordt de densiteit plaatselijk aanzienlijk verhoogd, wat leidt tot een toenemende druk aan het uiteinde van het buisje. Het water moet dus eerst doorheen een ‘extra’ barrière vooraleer het zich kan verspreiden over de rest van de isolatiematten.

5.3 Simulaties in Delphin 6.1

Voorafgaand aan de uiteindelijke resultaten van de karakteristieke proeven wordt een testmodel van de opbouw van de wand opgesteld met cellulose, want in de database van Delphin zijn geen biogebaseerde isolatiematerialen beschikbaar. Bijkomstig worden de eigenschappen van alle andere gebruikte materialen in de wand (zie 5.2.1.2) handmatig ingegeven in de software. Enkel de vochtbron en de correcte klimaatdata worden nog niet toegekend. Zo kan gecontroleerd worden of het model betrouwbaar en operationeel is om in een later stadium te gebruiken met de specifieke eigenschappen van de gebruikte isolatiematerialen.

Eens de waterabsorptiecoëfficiënt A_w en het dampdiffusieweerstandsgetal μ gekend zijn, kunnen deze parameters worden gebruikt om toe te kennen aan de isolatiematerialen. Uiteraard zijn meerdere parameters vereist, denk maar aan de massadichtheid, warmtedoorgangscoefficiënt, soortelijke warmte, etc. Echter worden deze waarden niet onderzocht en wordt teruggevallen op gegevens afkomstig van technische fiches en vooringestelde parameters uit de database van Delphin. Er wordt van start gegaan met een 1D-model omdat de rekentijd hiervan vele malen kleiner is dan 2D-model. Allereerst worden de juiste dimensies ingesteld voor de verschillende onderdelen van de wand ingegeven. Daarna worden

hieraan de correcte materialen toegekend. Het 1D-model wordt vervolgens gediscretiseerd volgens de instellingen weergegeven op Figuur 41. Dit wil zeggen dat de materialen zich opdelen in kleinere cellen om zo exactere resultaten te verkrijgen.



Figuur 41: Discretisatieparameters

In een volgende stap worden output files en een output grid aangemaakt. Onder de output files worden de gevraagde/gewenste parameters verstaan. In dit onderzoek zijn onder meer temperatuur, relatieve vochtigheid, dampdruk, warmtestroom en de dichtheid van vocht in een materiaal relevante grootheden. Op Figuur 42 is het pop-upvenster te zien voor het aanmaken van de gewenste output files. Standaard staat temperatuur als output ingesteld, maar dit kan eenvoudig gewijzigd naar de gewenste grootheden. Zo kan ook gekozen worden om het gemiddelde of de integraal te nemen van meerdere cellen. Bijkomstig kan eveneens geopteerd worden voor een 'colormap', waarbij het mogelijk is om het verloop te zien op elke specifieke locatie in de constructie. Via een kleurencode wordt op het gewenste tijdstip en van elk punt de daarbij horende grootheden weergegeven.

Zoals gezegd moet ook een grid gekozen worden. Onder grid wordt de tijdspanne waarover gesimuleerd wordt verstaan, alsook de stapgrootte. Zo wordt in dit project geopteerd om de simulatie te laten verlopen over een tijdspanne van vier jaar, waarbij een datapunt gegenereerd wordt om de 60 minuten. De tijdspanne van vier jaar werd bekomen door iteratief enkele simulaties uit te voeren met het basismodel. Zo kon achterhaald worden hoeveel tijd er nodig is vooraleer er stabilisatie optreedt. De stabilisatieperiode bleek ongeveer twee jaar te duren. Voor de zekerheid werd gekozen om een stabilisatieperiode van drie jaar te hanteren. In het vierde jaar, ofwel in 2022, wordt dan het water geïnfiltreerd. Op deze manier kan de simulatie vergeleken worden met de in-situ gemeten resultaten van L. Lambrechts. Het is van belang om de tijdspanne zo klein mogelijk te houden om zo de rekentijd sterk te verminderen. Op Figuur 43 is het venster te zien met de bijhorende in te vullen parameters. Dit zijn respectievelijk de starttijd, eindtijd en stapgrootte.

Figuur 42: Pop-upvenster m.b.t. output file

Figuur 43: Pop-upvenster m.b.t. output grid

Daarnaast moet ook een binnen- en buitenklimaat toegekend worden. Voor het buitenklimaat is gebruik gemaakt van een externe datafile die de klimaatgegevens, afkomstig van een weerstation op campus De Sterre (Gent), bevat van begin 2016 tot eind 2022. Er wordt rekening gehouden met onder andere de warmteoverdracht, de dampdiffusie, de regenslag en korte/lange golfstraling. Het binnenklimaat daarentegen wordt constant verondersteld op een temperatuur van 20 °C en een relatieve vochtigheid van 48,14 %. Beide waarden worden verkregen door het analyseren van de HOBO-meetresultaten binnenin de Mobble. Er is geopteerd om gebruik te maken van de gemiddelde waarde gedurende de meetcampagne. Voor de overige twee parameters, meer bepaald de surface heat transfer en de surface vapor diffusion coëfficiënt, worden de waarden gebruikt die automatisch zijn ingevuld (zie Figuur 44).

Interface/Boundary condition

Specification

Name:

Type:

Indoor Conditions

User-defined indoor climate [IndoorUserData]

Temperature [C]:	20
Relative humidity [%]:	48,14
Surface heat transfer coefficient (convective+radiative) [W/m2K]:	8
Surface vapor diffusion coefficient [s/m]:	1,9e-08

Figuur 44: Pop-upvenster m.b.t. het binnenklimaat

Indien al het voorgaande correct is uitgevoerd, is het 1D-model in droge toestand klaar. Als laatste stap moet enkel nog een vochtbron ontworpen en toegevoegd worden op de juiste plaats. In paragraaf 5.2.5 wordt berekend welke hoeveelheid water ingebracht moet worden om aan realistische regenbuien en de blootstelling aan wind gedreven regen te voldoen. Dit blijkt 0,5 l te zijn, ofwel 0,5 kg water. Het tijdstip waarop het water wordt ingebracht, en de duur van het inbrengmoment wordt ingegeven in een tijdschema in Delphin (zie Figuur 45).

Edit schedule

Specification

Name:

Number of intervals:

Time intervals in which definition becomes active

Definition of intervals

Format: Enter time offsets or intervals as "<value> <unit>" strings.
Note: A duration of 0 in the last interval will let this interval run forever.

Interval #1	
Start time	1193 d
Duration	1 d
End time	

Computed intervals (computed time offsets are converted to the unit of the start time offset)

Interval #1	
Start time	1193 d
Duration	1 d
End time	1194 d

OK Cancel

Figuur 45: Pop-upvenster m.b.t. tijdschema

De tijd nodig om het water in te brengen bedraagt in werkelijkheid slechts 30 seconden. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat de stapgrootte ingesteld staat op een uur, maar vooral een gevolg van oververzadiging. Indien een realistische oppervlakte wordt gekozen waarlangs het vocht infiltreert, kan op zo een korte periode namelijk geen halve liter water infiltreren. Om de grootte van de waterproductiesnelheid van het lek zelf te achterhalen wordt iteratief gesimuleerd tot het isolatiemateriaal verzadigd is.

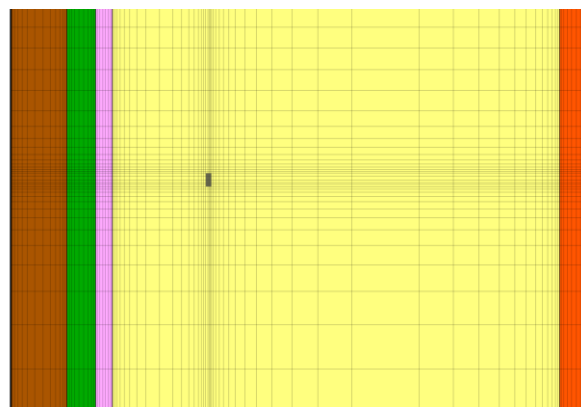
Verder wordt in een statisch 1D-model via trial & error met verschillende hoogtes van de cellen gesimuleerd tot een massa van 0,5 kg wordt verkregen in de output file 'moisture mass density

(=MMD)'. Dit is de verhouding van de hoeveelheid water ten opzichte van het totaal volume materiaal. Een statisch model houdt in dat het buitenklimaat gelijk gesteld wordt aan het binnenklimaat.

Wanneer de outputgegevens geplot worden met deze instellingen, bleek dat deze totaal niet overeenkwam met de experimentele data. De reden hiervoor is dat vooralsnog gesimuleerd wordt met een 1D-model, waarbij het water zich enkel maar in twee richtingen kan verplaatsen (links of rechts). In een 2D-model is het namelijk mogelijk om ook cellen onder en boven elkaar te plaatsen, waardoor de redistributie in vier richtingen kan verlopen. Het water kan zich nu zowel horizontaal (links en rechts) als verticaal (boven en onder) verspreiden. Opnieuw is (ter controle t.o.v. het 1D-model) via trial & error te werk gegaan om de exacte grootte van het lek te achterhalen, zodat telkens 0,5 l wordt geïnfiltreerd (zie Tabel 9). Op Figuur 46 is het gediscretiseerd 2D-model van houtwol weergegeven met aanduiding van het lek.

Tabel 9: Oppervlaktes van het lek en instroomsnelheden horend bij ieder isolatiemateriaal

	A [mm ²]
Houtwol	7x3
Katoen	5,5x12
Gras	4x10
Hennep	4x10



Figuur 46: Gediscretiseerd 2D-model met aanduiding lek

Tot slot dienen nog enkele waarden gecontroleerd te worden vooraleer de simulatie van start kan gaan. Standaard staat in Delphin de optie 'use Kirchoff potential for liquid flux calculation', 'use equilibrium ice model' en 'use gravity' respectievelijk in-, uit- en uitgeschakeld. De optie over het ijsmodel moet worden ingeschakeld omdat het in België mogelijk is kan vriezen. Dit zorgt ervoor dat de optie 'Kirchoff' moet worden uitgeschakeld aangezien deze niet compatibel zijn. Het spreekt voor zich dat ook rekening gehouden moet worden met de zwaartekracht. Verder moet het domain correct worden ingesteld. Hiermee wordt bedoeld dat de startdatum en einddatum van de simulatietijd tot op de seconde correct worden ingevuld. Dit alles is te zien op Figuur 47.

Om het drogingspotentieel van een materiaal te kunnen analyseren moeten twee simulaties uitgevoerd worden, namelijk in droge - en natte toestand. In laatstgenoemde wordt dus een waterlek toegevoegd in het desbetreffende materiaal. Dit waterlek kan worden aan- of uitgezet alvorens de simulatie wordt gestart. In PostProc kunnen beide simulaties worden uitgezet op één grafiek. Op deze manier is het verschil tussen beide onmiddellijk visueel waarneembaar.

Model Options Solver Options Performance Options

The settings on this page control basic properties of the physical model.

☒ Energy Balance Equation

Default initial temperature: 20 C

☐ Use thermal conductivity of dry material (LAMBDA)

☐ Use design value of thermal conductivity (LAMBDA_DESIGN)

☒ Consider moisture content of materials

Default initial relative humidity: 80 %

☒ Moisture Balance Equation

Default initial relative humidity: 80 %

☐ Use Kirchhoff potential for liquid flux calculation

☒ Use gravity

☒ Use equilibrium ice model

☒ Prevent overfilling

☒ Use strict material function checks

☒ Use upper temperature limit

☐ Air Mass Balance Equation

☐ Use gravity

☐ Salt Balance Equations

Salt Simulation Options...

☐ Pollutant Balance Equations

VOC Simulation Options...

Additional Modeling Options

☐ Use anisotropic material transport model

Output options

Output time unit: a

Condensate above: 95 %

☐ Write binary output files

Precision in ASCII files: -1

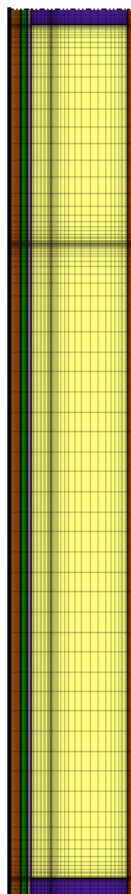
Simulation Time Frame

Start date: 01.01.2019 0:00:00

End date: 31.12.2022 22:58:58

Duration: 3,99988391 a

Figuur 47: Extra vereisten vóór de simulatie van start kan gaan



Figuur 48: Finaal model houtwol in Delphin

6 Onderzoeksresultaten

De resultaten worden onderverdeeld in drie hoofddelen. Het eerste deel omvat de resultaten van de waterabsorptie- en cuptest. Vervolgens worden alle resultaten met betrekking tot de Mobble besproken. Tot slot worden de gesimuleerde resultaten, verkregen door middel van HAM-simulaties in Delphin, geanalyseerd en vergeleken met de in-situ gemeten waarden van de meetcampagne uitgevoerd door L. Lambrechts (2022).

6.1 Karakteristieke proeven

Hoe de berekening uitgevoerd wordt voor beide testen is te vinden in het onderdeel '5.1 Karakterisatie biogebaseerde materialen'. In dit onderdeel worden uitsluitend de resultaten weergegeven en besproken.

6.1.1 Waterabsorptietest

In Tabel 10 en Tabel 11 is het massaverschil per oppervlakte [kg/m^2] van de samples terug te vinden. De wegingen werden uitgevoerd volgens een strikt tijdsinterval. Na een totale tijdspanne van 24 uren is de test ten einde. Indien het water het bovenoppervlak van het sample bereikt vooraleer de 24 uren verstreken zijn, dient de test voor het materiaal in kwestie vroegtijdig stopgezet te worden. Dit was het geval voor de magnesiumoxideplaat. Dit is aangeduid in Tabel 11 door middel van groene arcering.

Tabel 10: Massaverschil per oppervlakte van kurk, katoen, houtwol en isovlas

Wegingen	# sec	Wortel(#sec)	Massaverschil/oppervlakte [kg/m^2]											
			Kурk			Katoen			Houtwol			Isovlas		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Oorspronkelijke massa (incl. gaas) [kg]			0,3216	0,3102	0,3213	0,2186	0,2130	0,2204	0,3056	0,3001	0,2996	0,2052	0,2164	0,2118
Weging 1: 5'	300	17,32	0,3300	0,0000	0,3775	2,8750	3,1175	3,9775	0,9650	0,3650	1,5400	0,4250	0,5950	0,2700
Weging 2: 20'	1200	34,64	0,3975	0,0000	0,5250	3,2200	3,8175	4,7575	2,8775	3,6025	2,3975	0,7575	0,8050	0,3650
Weging 3: 1h	3600	60,00	0,4375	0,0000	0,5850	4,0750	4,1650	5,0475	4,6025	5,3600	4,1975	1,0750	1,1600	0,5125
Weging 4: 2h	7200	84,85	0,5350	0,0000	0,6450	4,6775	4,7275	5,8200	5,4575	6,5825	5,0325	1,1975	1,3025	0,6125
Weging 5: 4h	14400	120,00	0,5900	0,0000	0,7425	5,3600	5,1875	5,9300	6,4500	6,8400	6,1325	1,2825	1,4100	0,7025
Weging 6: 8h	28800	169,71	0,6750	0,0000	0,8325	5,9325	5,3600	6,1725	7,0125	7,3050	7,2850	1,3650	1,5700	1,0625
Weging 7: 24h	86400	293,94	0,7350	0,0000	0,9100	6,4700	5,5825	6,7350	7,7525	7,8025	7,7725	1,6850	1,9550	1,2550

Tabel 11: Massaverschil per oppervlakte van hennep, gras en magnesiumoxide

Wegingen	# sec	Wortel(#sec)	Massaverschil/oppervlakte [kg/m^2]									
			Hennep			Gras			Magnesiumoxide			
			1	2	3	1	2	3	1 (ruw boven)	2 (ruw boven)	1 (ruw onder)	2 (ruw onder)
Oorspronkelijke massa (incl. gaas) [kg]			0,3009	0,3058	0,2858	0,3815	0,3662	0,3608	0,9299	0,9240	0,9040	0,9277
Weging 1: 5'	300	17,32	1,4750	1,7975	1,0000	0,6725	1,0375	0,7850	0,3301	0,3374	0,1443	0,0856
Weging 2: 20'	1200	34,64	1,9750	2,1950	1,1950	1,4350	2,1650	1,3975	0,6516	0,6785	0,3325	0,2445
Weging 3: 1h	3600	60,00	2,2625	2,4875	1,4125	2,1600	3,3525	1,9600	1,0648	1,0257	0,6003	0,4731
Weging 4: 2h	7200	84,85	2,4625	2,6650	1,5925	2,6775	3,8125	2,3700	1,2825	1,2409	0,9181	0,7274
Weging 5: 4h	14400	120,00	2,8950	3,0900	1,9700	3,1350	4,3200	2,8150	1,4267	1,3986	1,3497	1,1492
Weging 6: 8h	28800	169,71	3,0650	3,3575	2,1725	3,5700	4,7275	3,1600	1,4842	1,4585	1,5086	1,2886
Weging 7: 24h	86400	293,94	3,5275	3,9325	2,5575	4,2625	5,5075	3,7325	1,5160	1,4976	1,5551	1,3363

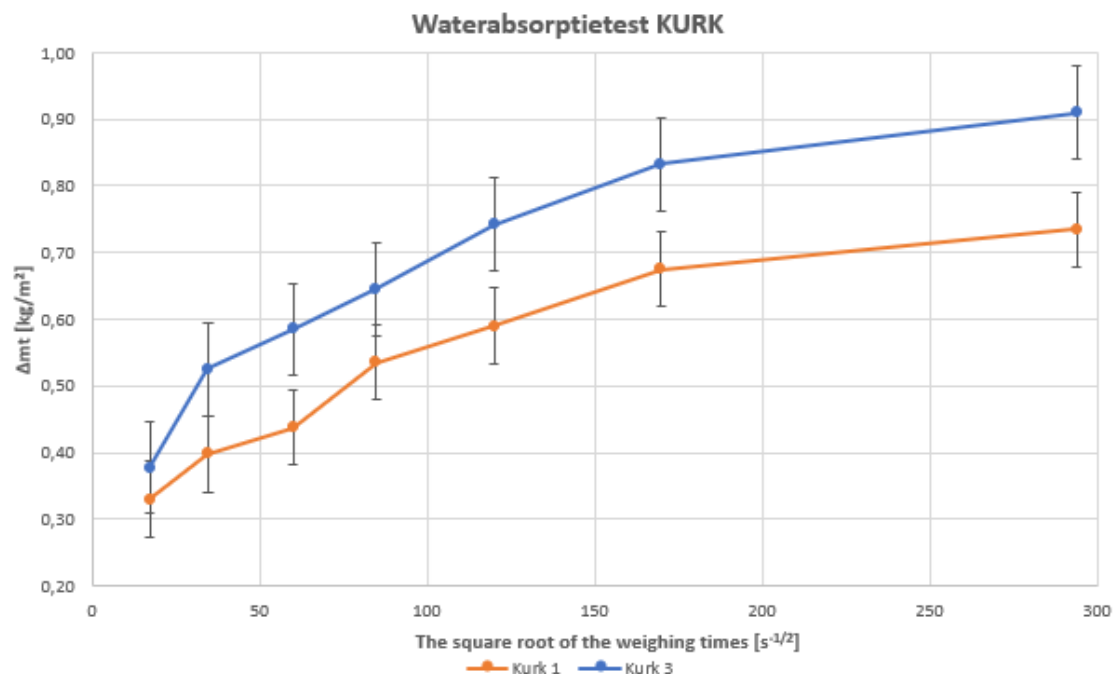
Grafiek 1 tot en met Grafiek 14 geeft telkens het verloop van het massaverschil per oppervlakte weer ten opzichte van de vierkantswortel van de tijd. Op alle grafieken, met uitzondering van Grafiek 14, is

te zien dat volgens de norm grafiektype B van toepassing is. Voor de duidelijkheid worden de vier mogelijke types nog eens opgesomd:

1. Grafiektype A, subtype I: Na een korte initiële stabilisatieperiode wordt een rechtlijnig verband gevormd, waarbij het water het bovenoppervlak niet bereikt.
2. Grafiektype A, subtype II: Na een korte initiële stabilisatieperiode wordt een rechtlijnig verband gevormd, waarbij het water vroegtijdig het bovenoppervlak bereikt.
3. Grafiektype B, subtype I: Er wordt geen rechte lijn meer gevormd, maar een kromme waarbij het water het bovenoppervlak niet bereikt.
4. Grafiektype B, subtype II: Er wordt geen rechte lijn meer gevormd, maar een kromme waarbij het water vroegtijdig het bovenoppervlak bereikt.

Op de grafieken is ook het onzekerheidsinterval te zien. Deze foutbalken staan ingesteld als standaardfout en helpen de lezer om in een oogopslag te zien of de waarden binnen de verwachte foutmarges liggen. Hoe kleiner de foutbalken, hoe nauwkeuriger de resultaten.

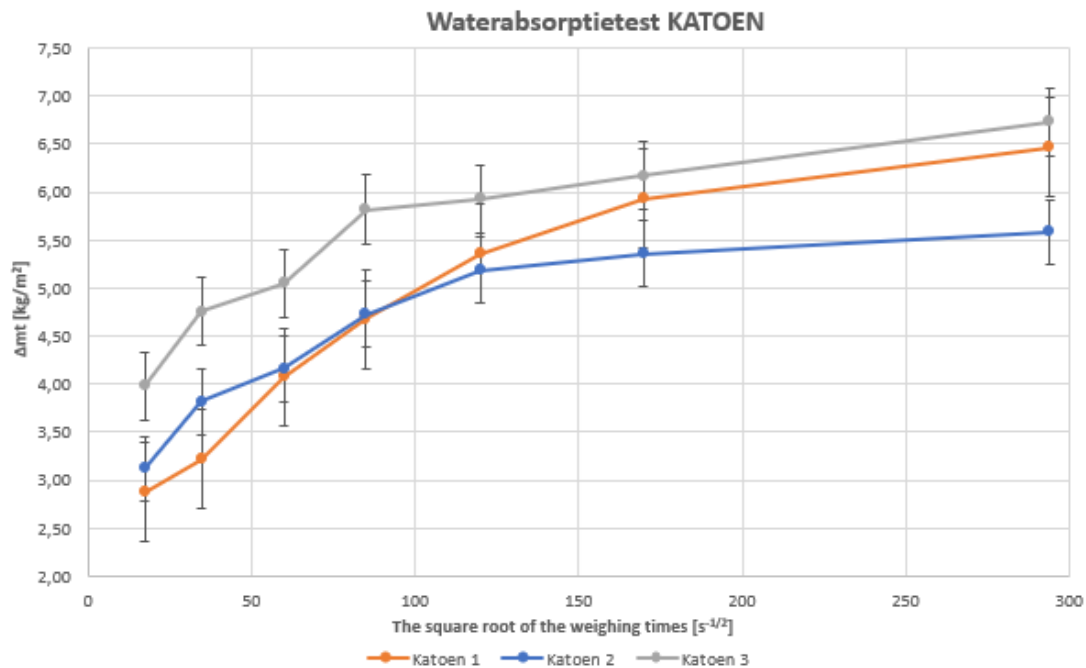
Grafiek 1, met name kurk, behoort tot grafiektype B, subtype I. Omwille van een tekort aan kurkisolatie tijdens het uitvoeren van de proef zijn slechts twee samples getest. Beide vertonen een vergelijkbaar verloop, waardoor een derde sample ter controle niet essentieel is. De massatoename van kurk is relatief klein, wat erop wijst dat kurk vrijwel geen water absorbeert.



Grafiek 1: Waterabsorptietest van kurkisolatie (grafiektype B)

Grafiek 2, met name katoen, behoort tot grafiektype B subtype I. De drie curves vertonen een iets minder gestroomlijnd verloop. Het is opvallend dat katoen 1 naarmate de tijd vordert, steeds meer water opneemt in vergelijking met de andere twee samples. Dit kan te wijten zijn aan een foutieve

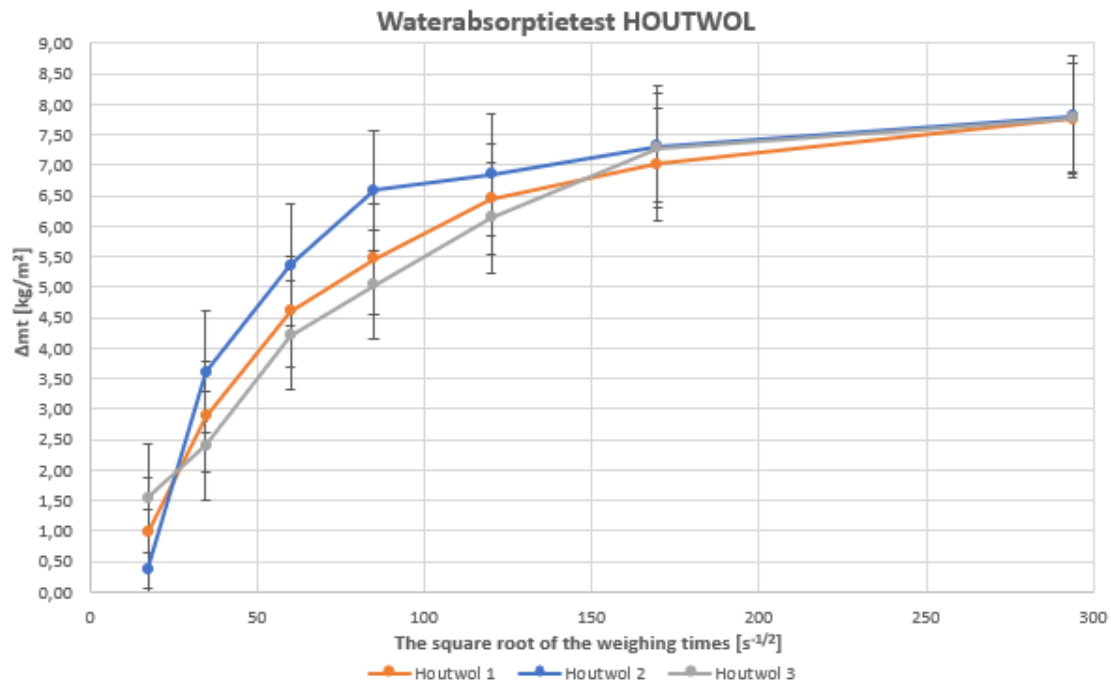
meetopstelling, waarbij het rooster tijdelijk niet honderd procent waterpas hing. Hierdoor kan het zijn dat het sample te diep ondergedompeld was en zo meer water kon opnemen. Deze veronderstelling wordt bevestigd doordat katoen 3 (en in mindere mate katoen 2) een kleine inzakking vertoont op het moment waarop katoen 1 verhoudingsgewijs veel water opneemt. Beide samples lagen aan een uiteinde van het rooster waarbij katoen 1 zich aan de diepste kant bevond. Desalniettemin heeft dit weinig effect op de uiteindelijke waterabsorptiecoëfficiënt. Indien het water het bovenoppervlak niet vroegtijdig bereikt, is enkel de massa van het sample na 24 uren van belang.



Grafiek 2: Waterabsorptietest van katoenisolatie (grafiektype B)

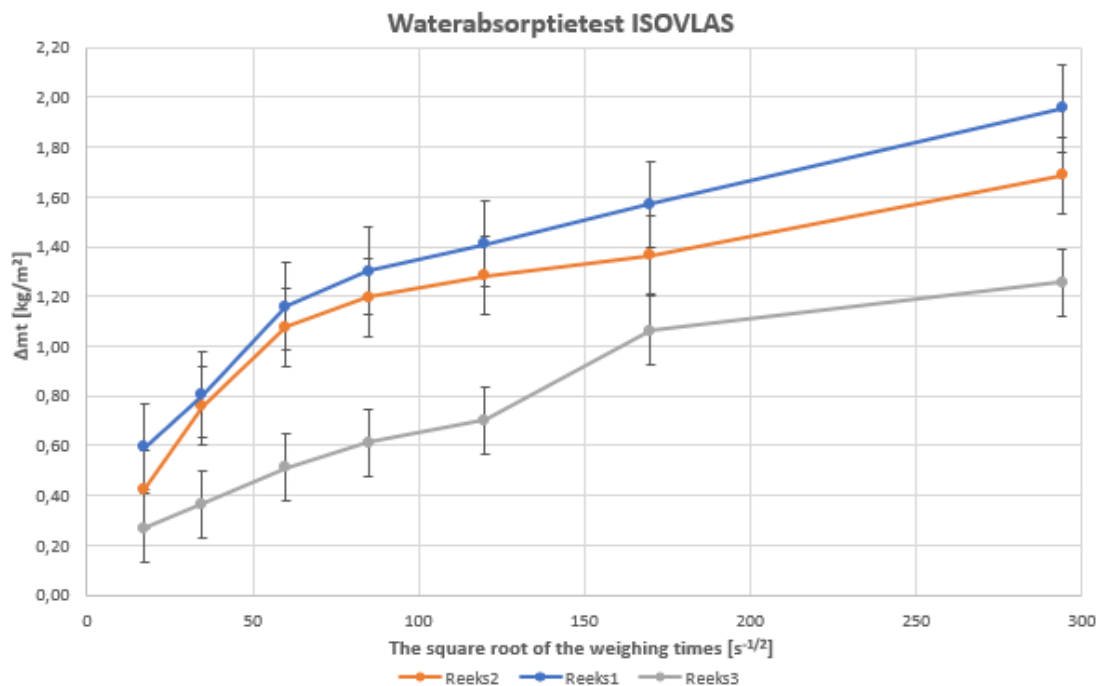
Grafiek 3, met name houtwol, behoort andermaal tot grafiektype B subtype I. De resultaten na een tijdspanne van 24 uren zijn quasi identiek voor de drie samples. Indien de oorspronkelijke massa (zie Tabel 10) ook quasi identiek is, betekent dit dat de proef zo goed als perfect is uitgevoerd. De waterabsorptiecoëfficiënt is namelijk afhankelijk van de oppervlakte, de begin- en eindmassa (na 24 uren). De oorspronkelijke massa's bedragen respectievelijk 0,2186; 0,2130 en 0,2204 kg. De proef is dus goed uitgevoerd.

Tussen de eerste en de tweede natte meting kruisen de drie grafieken elkaar. Dit is het rechtstreekse gevolg van de positie van de samples op het rooster. Na de eerste natte weging werden sample 1 en sample 3 van plaats verwisseld. Ondanks het feit dat het rooster quasi 100 procent horizontaal hing (zie Figuur 14), kan het zijn dat het rooster tijdens het uitvoeren van de proeven niet altijd 100 procent horizontaal bleef hangen. Dit verklaart het verloop van beide grafieken. Een kleine afwijking zorgt namelijk al snel voor een relatief groot hoogteverschil op de grafiek. Ook een onevenredige verdeling van de massa op het rooster kan een kleine afwijking tot gevolg hebben.



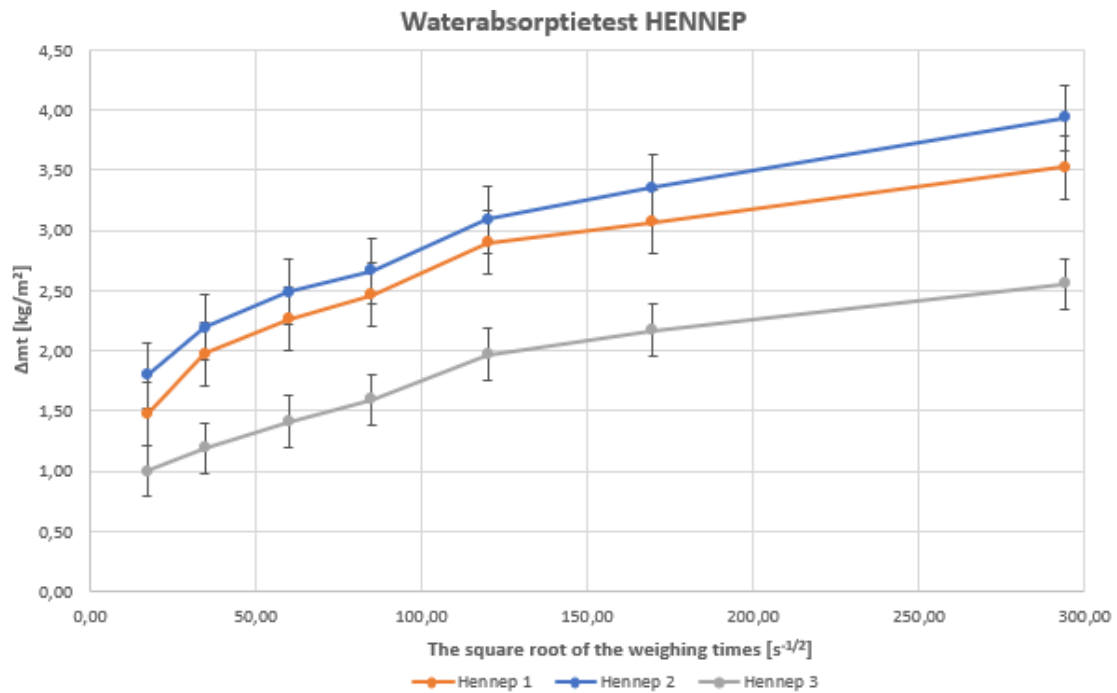
Grafiek 3: Waterabsorptietest van houtwolisolatie (grafiektype B)

Grafiek 4, met name isovlas, behoort opnieuw tot grafiektype B subtype I. Hier valt het op dat isovlas 3 een lichte zakking vertoont qua massaverschil per oppervlakte op het vijfde weegpunt (na 4 uur), wat het gevolg is van de eerder vermelde fouten. Bijkomstig kan de zakking veroorzaakt zijn door het te lang laten uitlekken van het sample in vergelijking met de andere. Het daaropvolgend weegmoment ligt terug in de lijn van de verwachtingen, wat bevestigt dat het een eenmalige afwijking is. De resterende twee curves zijn relatief gelijklopend waardoor deze resultaten hoe dan ook betrouwbaar zijn.



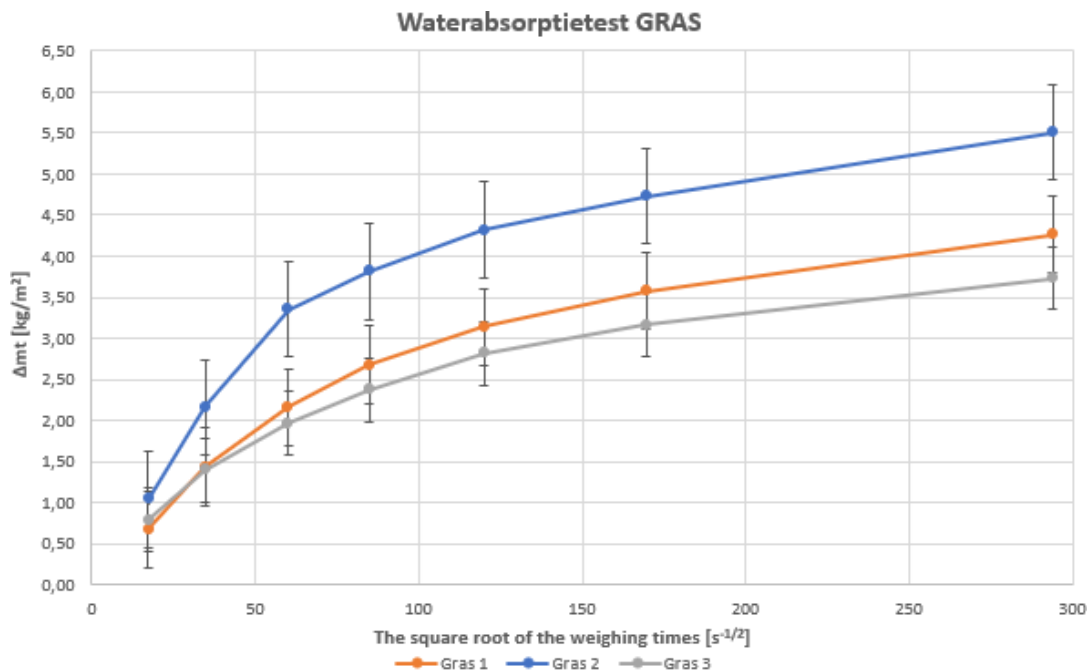
Grafiek 4: Waterabsorptietest van isovlas (grafiektype B)

Grafiek 5, met name hennep, behoort ook tot grafiektype B subtype I en vertoont drie gelijklopende curves. Dit ligt volledig in de lijn van de verwachtingen, want dit wijst er namelijk op dat ongeveer dezelfde hoeveelheid aan water opgenomen wordt door de drie samples. Dit is logisch aangezien de samples quasi identiek zijn en dus dezelfde waterabsorptiecoëfficiënt hebben. Aanvankelijk heeft sample 2 ook de grootste massa (zie Tabel 11) en dit blijft zo aangezien de blauwe curve zich het hoogste bevindt in Grafiek 5.



Grafiek 5: Waterabsorptietest van hennepisolatie (grafiektype B)

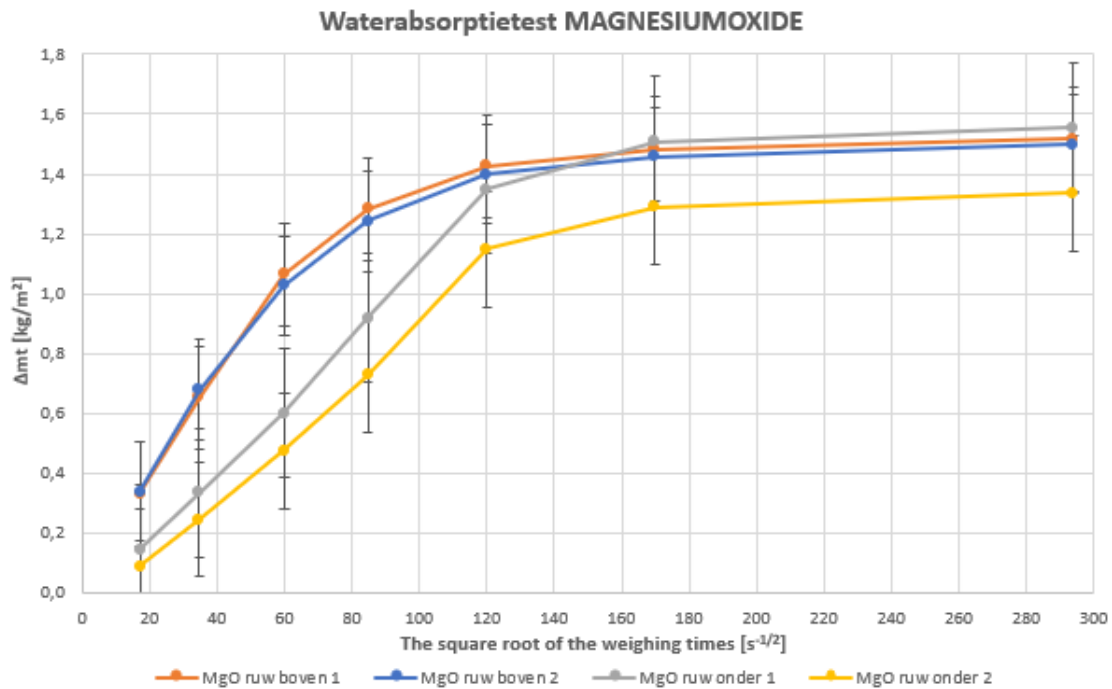
Grafiek 6, met name gras, behoort tot grafiektype B subtype I en vertoont ook drie gelijklopende curves. Dezelfde redenering als voor hennep is ook hier van toepassing.



Grafiek 6: Waterabsorptietest van grasisolatie (grafiektype B)

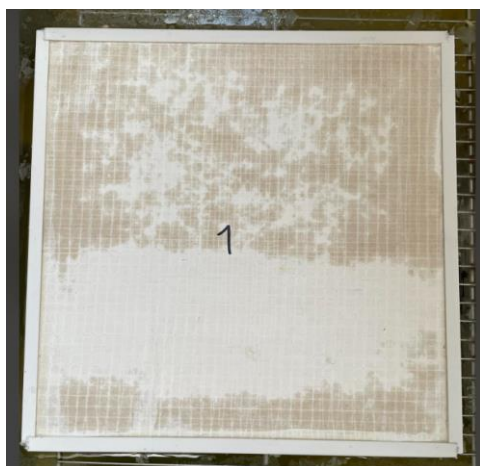
Grafiek 7, met name magnesiumoxide, vertoont afwijkende resultaten in vergelijking met voorgaande testen. Doordat de oppervlakteafwerking verschillend is, worden vier samples onderzocht. De twee samples waarbij de ruwe kant naar boven gericht is, vertonen hetzelfde verloop als grafiektype B subtype II. Het subtype II refereert naar het feit dat het water vroegtijdig het bovenoppervlak heeft bereikt, meer bepaald na een tijdspanne van 4 uren. Het verloop van de twee samples beschrijft een kromme en is nagenoeg identiek aan elkaar, wat de kans op foutieve metingen sterk reduceert. Echter kan volgens de norm geen waterabsorptiecoëfficiënt berekend worden voor dergelijk geval.

Vervolgens behoren de twee andere samples, waarvan de ruwe kant naar onder gericht is, tot grafiektype A subtype II. De grafiek beschrijft geen kromme maar heeft aanvankelijk een lineair verloop. Na de vierde natte weging, dit wil zeggen na een tijdspanne van vier uren, vertoont de curve een plotse daling. Dit wijst erop dat het water het bovenoppervlak heeft bereikt aangezien de magnesiumoxideplaat het punt van saturatie nadert. Voor deze gevallen kan wel een waterabsorptiecoëfficiënt berekend worden volgens de norm.



Grafiek 7: Waterabsorptietest van magnesiumoxideplaat (grafiektype A&B)

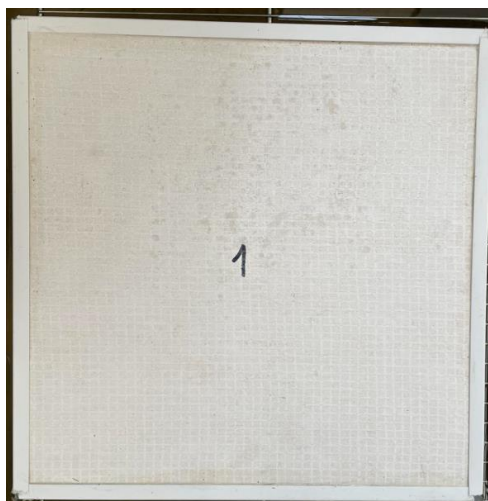
Op Figuur 49 tot en met Figuur 52 is het resultaat na 24 uren te zien. Het is opmerkelijk dat wanneer de ruwe, onafgewerkte kant in contact staat met het wateroppervlak, het water veel sneller geabsorbeerd wordt. Dit komt doordat de gladde, afgewerkte kant iets beter bestand is tegen vocht. Echter blijkt dit geen enorm groot verschil te maken, aangezien ook hier (zie Figuur 51 en Figuur 52) de eerste sporen van water zichtbaar zijn na 4 uren. Er kan geconcludeerd worden dat de magnesiumoxideplaten bestendig zijn tegen een kleine hoeveelheid water. Langdurige blootstelling aan vocht leidt tot vochtinfiltratie doorheen de platen.



Figuur 49: Waterabsorptie magnesiumoxide 1 met ruwe kant onderaan



Figuur 50: Waterabsorptie magnesiumoxide 2 met ruwe kant onderaan



Figuur 51: Waterabsorptie magnesiumoxide 1 met ruwe kant bovenaan



Figuur 52: Waterabsorptie magnesiumoxide 2 met ruwe kant bovenaan

Vervolgens werd de gezochte waterabsorptiecoëfficiënt bepaald. In paragraaf 2.6 werd een vergelijkend onderzoek uitgevoerd door zoveel als mogelijk technische fiches te verzamelen en de desbetreffende parameters op te lijsten. De zoektocht naar bestaande waterabsorptiecoëfficiënten verliep moeizaam. Echter werden enkele waarden teruggevonden. Zowel de experimentele waarden als de waarden afkomstig uit de literatuur zijn te vinden in Tabel 12.

Tabel 12: Vergelijking waterabsorptiecoëfficiënt A_w literatuur - experimenteel

Sample	$A_{w,literatuur}$ ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$)	$A_{w,experimenteel}$ ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$)	Sample	$A_{w,literatuur}$ ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$)	$A_{w,experimenteel}$ ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$)
Kurk 1	0,001433 0,04	0,0025	Hennep 1	1,50	0,0120
Kurk 2		-	Hennep 2		0,0134
Kurk 3		0,0031	Hennep 3		0,0087
Katoen 1	/	0,0220	Gras 1	/	0,0145
Katoen 2		0,0190	Gras 2		0,0187
Katoen 3		0,0229	Gras 3		0,0127
Houtwol 1	0,02 0,07	0,0264	Isohlas 1	/	0,0057
Houtwol 2		0,0265	Isohlas 2		0,0067
Houtwol 3		0,0264	Isohlas 3		0,0043
MgO ruw onder 1	/	0,0116	MgO ruw onder 2	/	0,0096

Allereerst wordt gecontroleerd of de grootteorde van de experimentele waarden in de lijn van de verwachtingen ligt. Onmiddellijk is duidelijk dat de experimentele waarden van de kurk- en houtwolisolatie qua grootteorde aansluiten bij de waarden uit de literatuur. Meer nog, de waarden zijn quasi gelijk aan één van de twee waarden uit de literatuur. Echter dient wel opgemerkt te worden dat de waarden uit de literatuur vrij verschillend zijn van elkaar, wat de betrouwbaarheid in vraag stelt. Bijkomstig werd ook een waarde teruggevonden voor hennepisolatie. De absorptiecoëfficiënt $A_{w,literatuur}$ bedraagt $1,5 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$. In vergelijking met alle andere waarden, zowel uit de literatuur als de eigen

experimentele waarden, lijkt dit een vrij hoge waarde te zijn. Daarom wordt deze waarde als onbetrouwbaar beschouwd en niet verder in overweging genomen.

Als de experimentele waarden onderling vergeleken worden, gaat de kurkisolatie gepaard met de kleinste waarde voor de waterabsorptiecoëfficiënt A_w . Tijdens het uitvoeren van de testen bleek dat het water niet echt kon infiltreren in de relatief harde kurkisolatie. Een verklaring hiervoor is het feit dat er quasi geen water uitlekte en dat de kurkisolatie ging opdrijven tijdens het uitvoeren van de test. Dit wijst erop dat de kurkisolatie eerder waterafstotend is en de infiltratie beperkt blijft tot de oppervlaktelagen. Dit kan te wijten zijn aan de compactheid en de eerder gesloten celstructuur van de kurkisolatie.

De overige biogebaseerde isolatiematerialen zijn minder samenhangend. Hiermee wordt bedoeld dat deze zijn opgebouwd uit allemaal vezels die in elkaar verweven zijn. Ontegensprekelijk speelt de dichtheid van het materiaal een rol in de absorptie. Houtwol wordt namelijk gekarakteriseerd door de hoogste dichtheid van ongeveer 60 kg/m^3 , terwijl isovlas de kleinste waarde aanneemt met een waarde van minimaal 15 kg/m^3 (zie Tabel 2). Wat blijkt is dat deze waarden respectievelijk gepaard gaan met de hoogste en laagste - met uitzondering van de kurkisolatie - waarde voor de waterabsorptiecoëfficiënt A_w . Dit kan verklaard worden doordat de opzuigkracht in een materiaal afhankelijk is van de poriënstructuur. Hoe fijner de poriënstructuur, hoe veerkrachtiger en dus hoe groter de opzuigkracht in het materiaal. Dit leidt ertoe dat wegens de compacte samenstelling van de houtwolvezels, en dus de hogere specifieke dichtheid, de houtwolisolatie de grootste opzuigkracht heeft.

Kortom speelt de porositeit van het materiaal een belangrijke rol. Materialen met een fijnere poriënstructuur – zoals houtwol – hebben over het algemeen een groter effectief oppervlak en kunnen bijgevolg meer water vasthouden. Te grote poriën – zoals bij gras en hennep – hebben een beperkt vermogen om water vast te houden, aangezien het er bij wijze van spreken gewoon terug kan uitstromen. Echter blijkt dat katoen een uitzondering is op deze regel. Ondanks een lage dichtheid wordt toch een relatief grote waterabsorptiecoëfficiënt A_w bekomen. Dit kan toegewezen worden aan de structuur van de katoenvezels zelf. Deze bevatten namelijk kleine holtes en openingen die in staat zijn om water vast te houden. Anderzijds werd ook opgemerkt dat de katoenisolatie gedurende de test het meest ontrafelde, waardoor het contactoppervlak met het water toenam. De waterabsorptiecoëfficiënt A_w voor de katoenisolatie wordt dus eerder als twijfelachtig beschouwd.

Vervolgens is het vanzelfsprekend dat alle samples van dezelfde soort normaal gezien gekenmerkt worden door eenzelfde waterabsorptiecoëfficiënt A_w . Uit de experimentele waarden kan geconcludeerd worden dat er slechts twee afwijkende waarden zijn, namelijk hennep 3 en gras 2. Dit kan te wijten zijn aan onnauwkeurige metingen. Alle andere waarden per isolatiesoort zijn vrij tot zo goed als volledig gelijkaardig. Dit bevestigt dat de testen goed zijn uitgevoerd en de resultaten betrouwbaar zijn.

Tot slot is het haast onmogelijk om voor magnesiumoxide treffende waarden te vinden voor de waterabsorptiecoëfficiënt A_w . Uit de resultaten kan opgemaakt worden dat magnesiumoxidebeplating

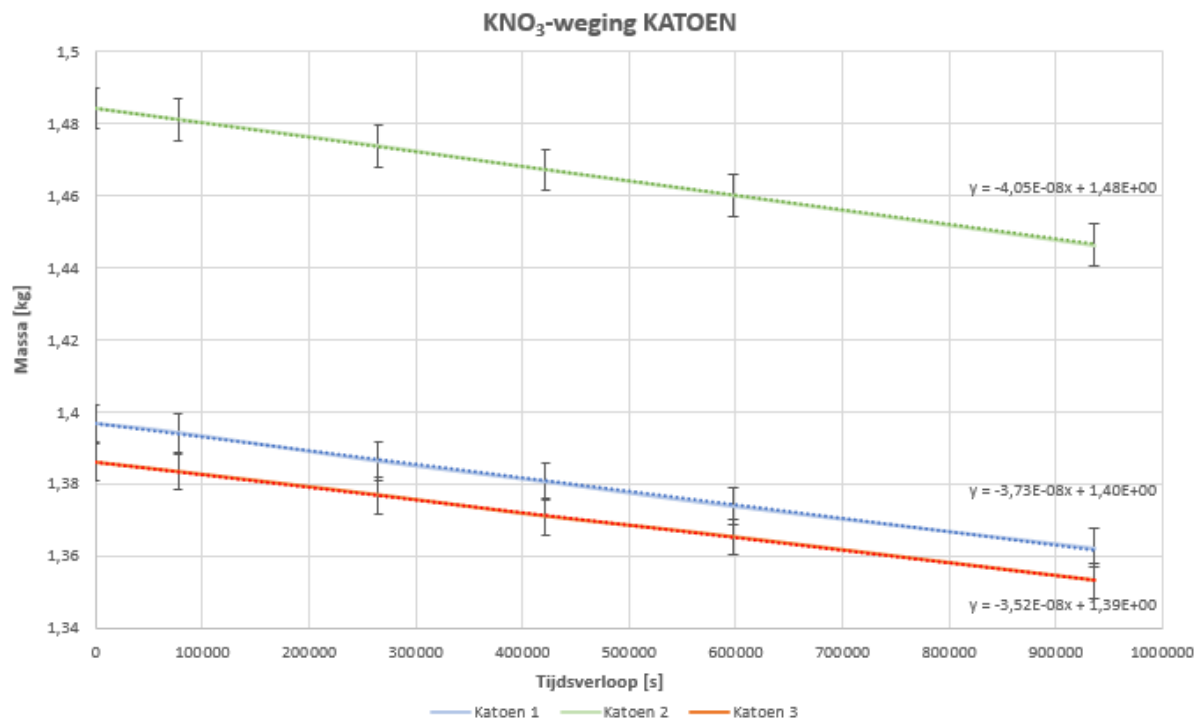
allerm minst bestand is tegen grote hoeveelheden water. Onmiddellijk na de blootstelling schiet de massa omhoog, wat aantoont dat het direct water/vocht opneemt. Het feit dat het water na iets minder dan vier uren het oppervlak bereikt, is grotendeels te wijten aan de beperkte dikte van het materiaal in vergelijking met de isolatiematerialen. Daarom moet de vraag gesteld worden of deze proefopstelling wel geschikt is voor magnesiumoxidebeplating of beplating in het algemeen.

6.1.2 Cuptest

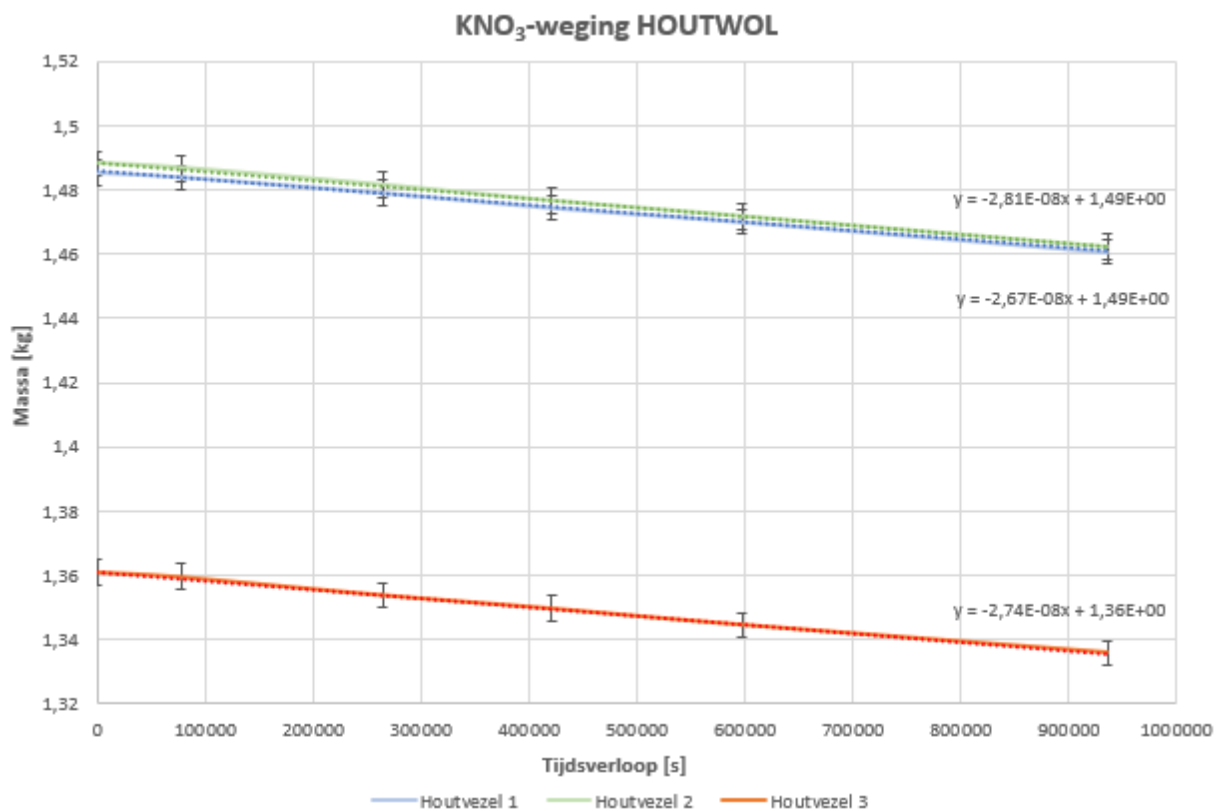
De resultaten van de tweede karakteristieke proef ter bepaling van het dampdiffusieweerstandsgetal μ zijn hieronder weergegeven. Om het dampdiffusieweerstandsgetal μ te bepalen werden de cups op regelmatige basis gewogen. Per isolatiemateriaal werd de massa in functie van de tijd geplot op een grafiek. De massa betreft dus de totale massa van een afgewerkte cup (zie Figuur 36). De massareductie is enkel te wijten aan het ééndimensionale damptransport van de KNO_3 -oplossing doorheen de verschillende materialen. De resultaten van elk onderzocht materiaal zijn terug te vinden op Grafiek 8 tot en met Grafiek 14. Hierop zijn andermaal foutbalken aangebracht die aantonen of de resultaten binnen de verwachte foutmarges liggen. Hoe kleiner deze foutbalken, hoe nauwkeuriger de resultaten.

Bijkomstig werd ook de trendlijn met functievoorschrift geplot. Indien de proef foutloos uitgevoerd is, moet namelijk een lineair verband waarneembaar zijn. Door middel van een trendlijn die een optimaal geschikte rechte lijn weergeeft op basis van een bepaalde gegevensset, kan onmiddellijk achterhaald worden of de proef correct is uitgevoerd. Met andere woorden betekent dit dat de trendlijn, weergegeven in stippellijn, en de curve die de resultaten weergeeft, in theorie moeten samenvallen. Alle resultaten, met uitzondering van kurk 1 (zie Grafiek 11) en magnesiumoxide 3 (zie Grafiek 14), liggen quasi volledig op de trendlijn op enkele kleine schommelingen na. Dit wijst op een correcte proefopstelling zonder noemenswaardige fouten.

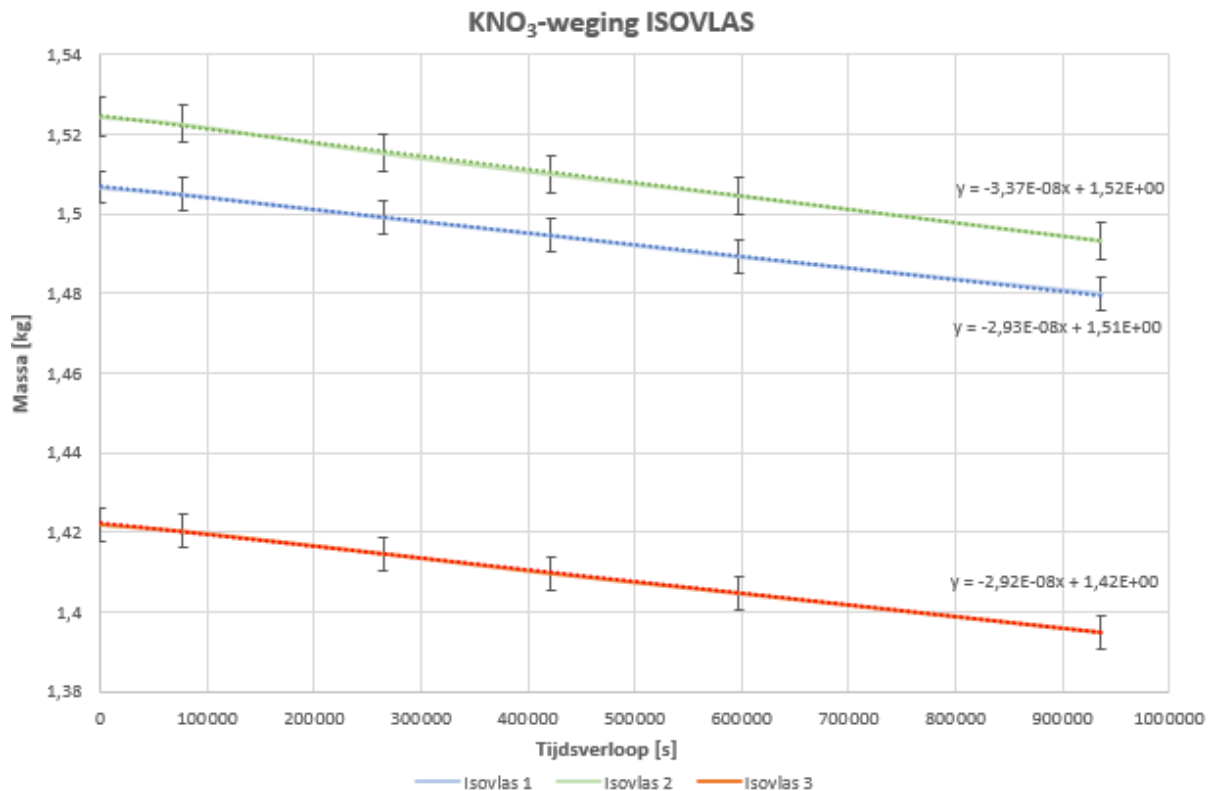
Deze trendlijn is gekoppeld aan een functievoorschrift wat de richtingscoëfficiënt bevat die nodig is voor het berekenen van de het dampdiffusieweerstandsgetal μ . In theorie moet de richtingscoëfficiënt van de drie verschillende samples per materiaal gelijk zijn. De keuze voor drie samples zorgt voor de nodige vergelijkingsmogelijkheden, wat het mogelijk maakt om afwijkende resultaten te achterhalen. Zodoende dient het derde sample in principe als controlemeting zodat in het beste geval steeds minimaal twee samples nagenoeg identieke resultaten vertonen. Elke grafiek bevat minstens twee verlopen die ongeveer eenzelfde richtingscoëfficiënt hebben, wat leidt tot representatieve resultaten.



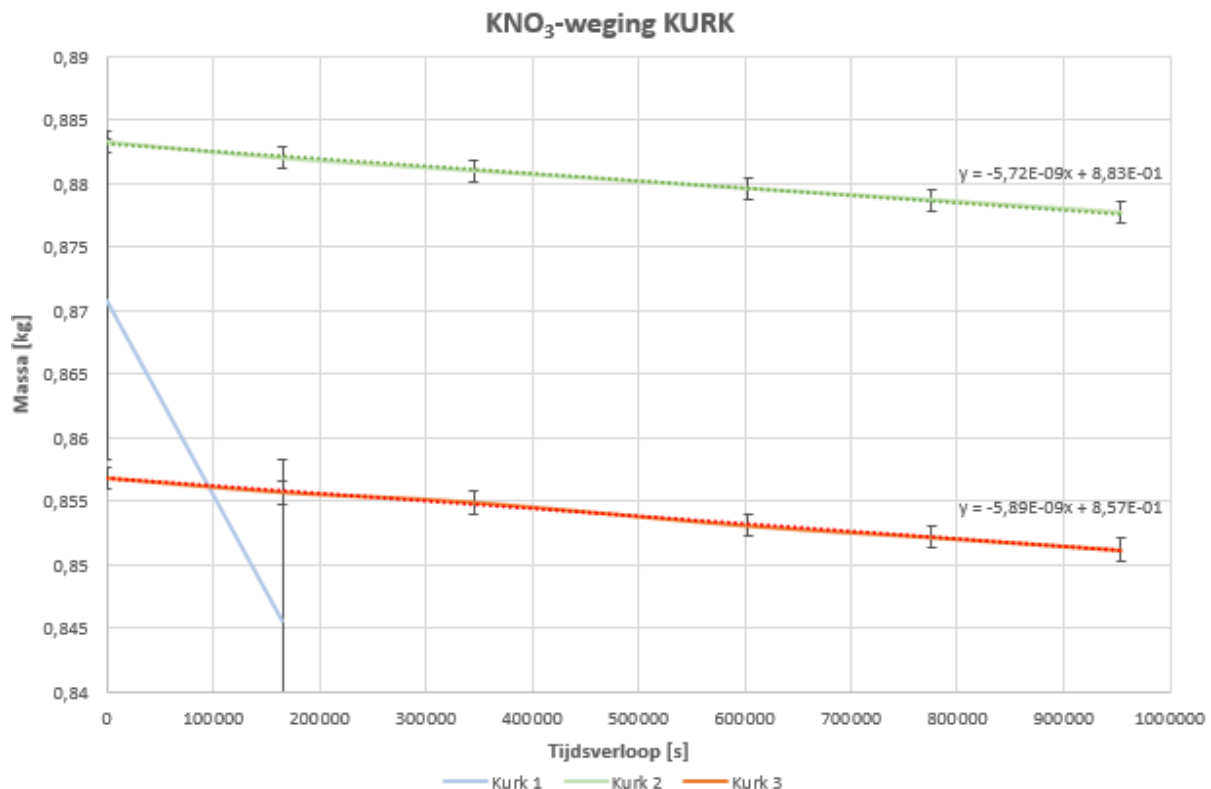
Grafiek 8: Cuptest KNO₃-weging van katoenisolatie



Grafiek 9: Cuptest KNO₃-weging van houtwolisolatie



Grafiek 10: Cuptest KNO₃-weging van isovlas



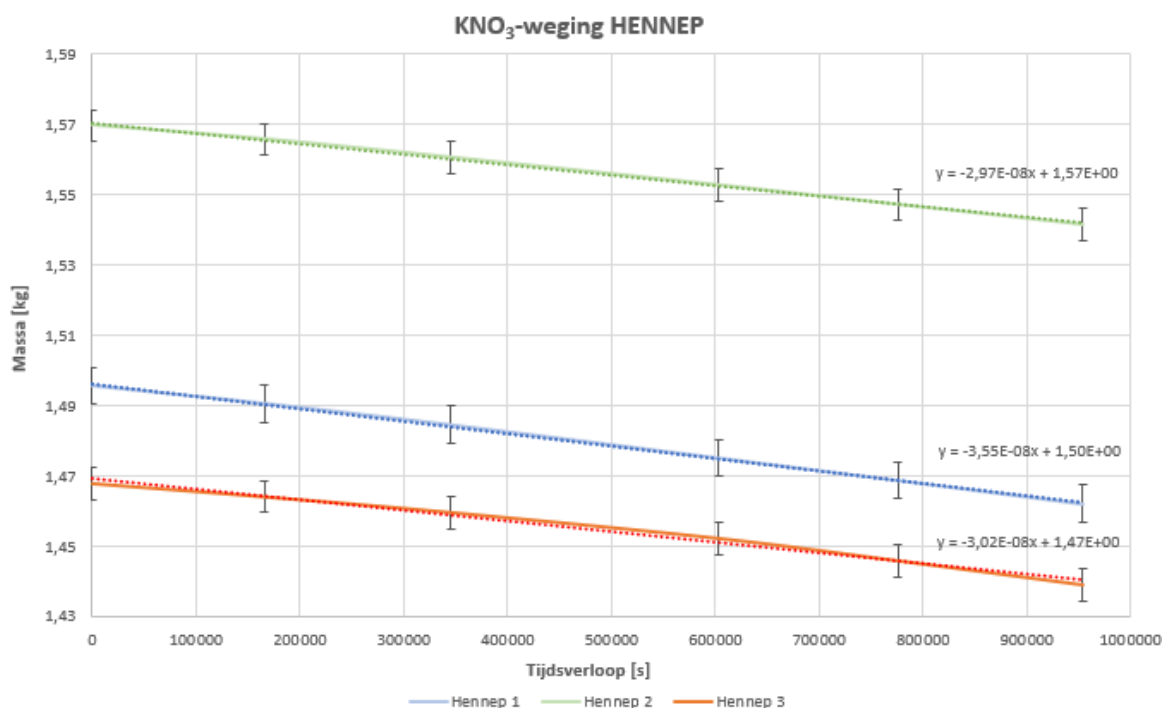
Grafiek 11: Cuptest KNO₃-weging van kurkisolatie

Zoals eerder vermeld vertoonde kurk 1 een afwijkend verloop. Ook de foutbalk op dit verloop is enorm groot wat er op wijst dat het resultaat niet relevant is ten opzichte van de andere twee samples. Dit valt logisch te verklaren vanwege een defecte PVC-buis, die duidelijk niet volledig dampdicht is afgesloten

(zie Figuur 53). De KNO_3 -oplossing vond niet enkel zijn weg naar de buitenomgeving doorheen het testsample, maar ook doorheen de slecht afgesloten verbinding tussen het deksel en de PVC-buis. Deze weging werd bijgevolg vroegtijdig gestopt.



Figuur 53: PVC-cup met lek

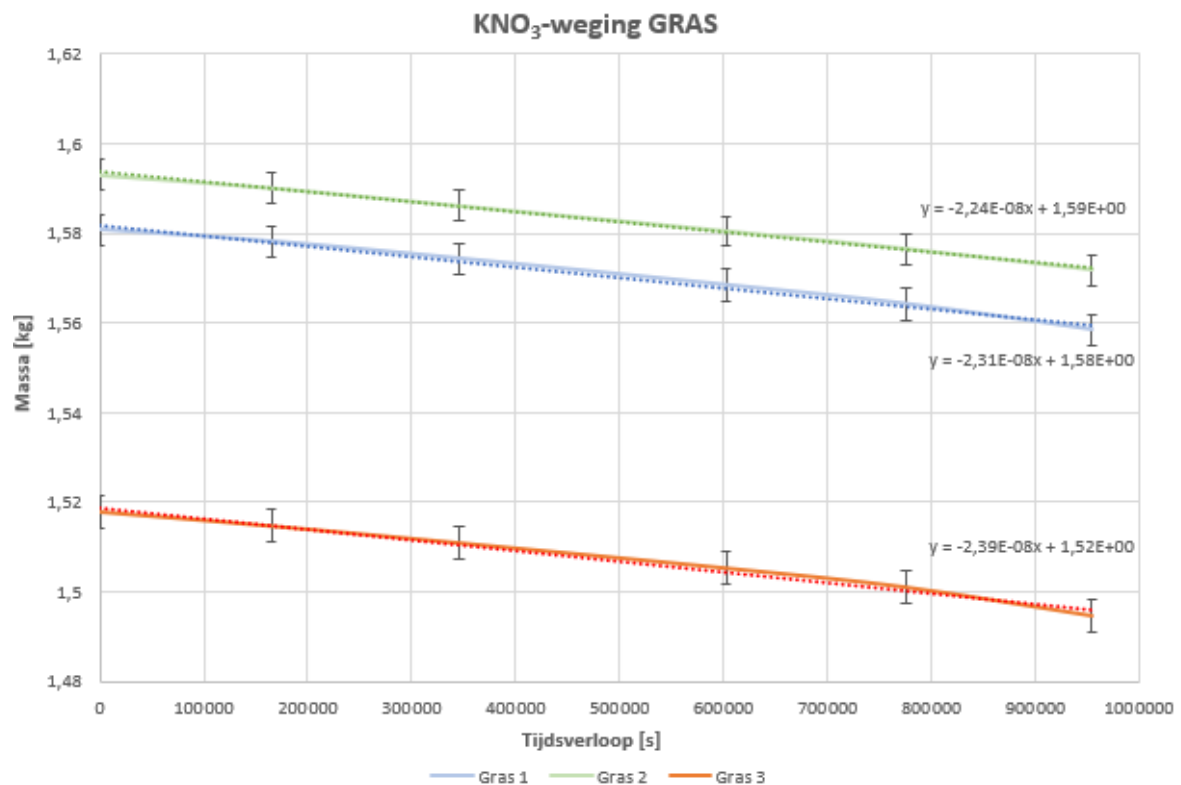


Grafiek 12: Cuptest KNO_3 -weging van hennepisolatie

Na zeven dagen in de tweede meetcampagne is visueel waarneembaar dat één cup met hennepisolatie ongewenste zoutkristallisatie vertoont aan het buitenoppervlak van de plexiglas koker (zie Figuur 54). Dit is ook te zien aan de afwijkende waarde voor de richtingscoëfficiënt van hennep 1 (blauwe curve) in Grafiek 12. De hogere richtingscoëfficiënt wijst op een hogere massareductie en dus meer damptransport. Dit zorgt ervoor dat finaal een lager dampdiffusieweerstandsgetal μ bekomen wordt (zie Tabel 14).

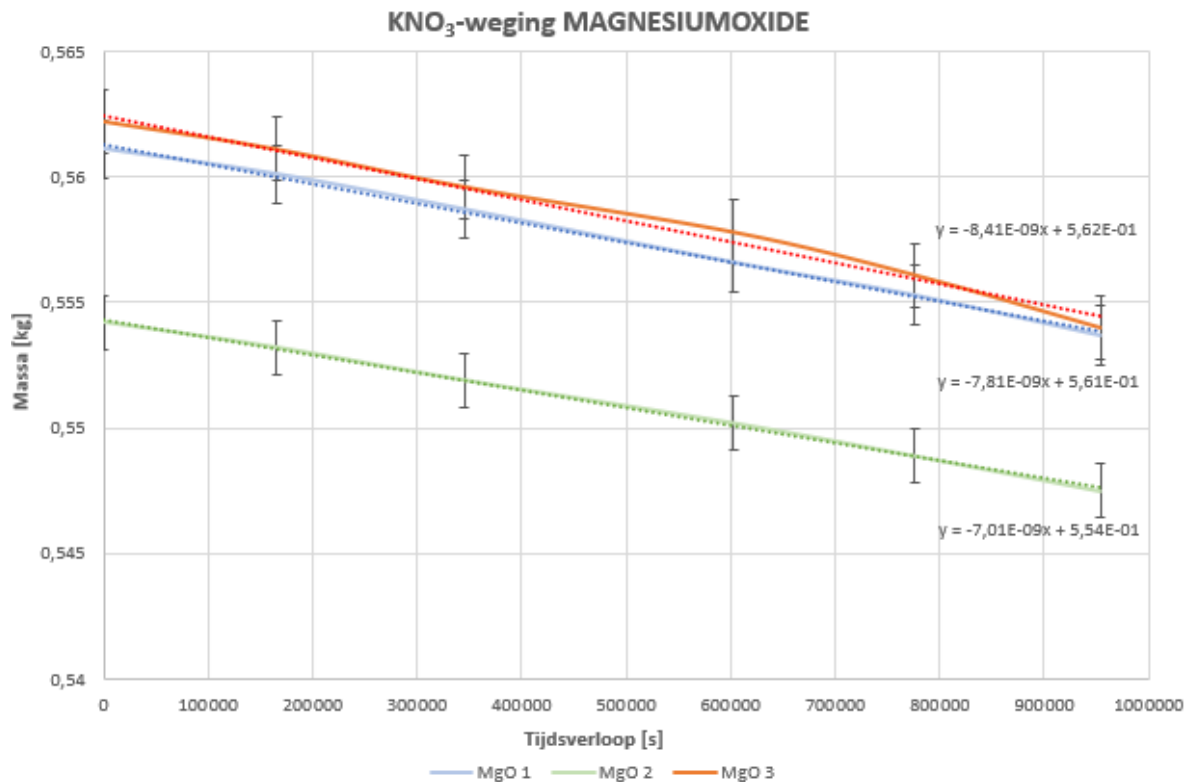


Figuur 54: Zoutkristallisatie aan buitenoppervlak plexiglas



Grafiek 13: Cuptest KNO₃-weging van grasisolatie

Op Grafiek 14 is te zien dat magnesiumoxide 3 (oranje curve) afwijkingen vertoont ten opzichte van de trendlijn (oranje stippellijn). In theorie zouden beide moeten samenvallen. Ondanks het feit dat er zorgvuldig te werk gegaan is, bestaat de kans op kleine verschuivingen van het plaatje tijdens het wegen. Dit probleem moet zich naar het einde toe gesteld hebben. Dit kan ook verklaren waarom de richtingscoëfficiënt merkkelijk hoger ligt dan de andere twee waarden. Er moet een extra opening zijn geweest waardoor de damp kon diffunderen. De twee andere verlopen vertonen minder schommelingen en worden als betrouwbaar beschouwd.



Grafiek 14: Cuptest KNO₃-wegin van magnesiumoxideplaat

In Tabel 13 en Tabel 14 is het berekeningsprincipe, met inbegrip van alle nodige waarden, weergegeven in paragraaf 5.1.2.2.

Tabel 13: Berekende waarden dampdiffusieweerstandsgetal μ volgens de norm deel 1

	Katoen			Houtwol			Isolvlas			Kurk		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
RV klimaatkast [%]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
RV KNO ₃ [%]	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
G (=rico) [kg/s]	3,73E-08	4,05E-08	3,52E-08	2,67E-08	2,81E-08	2,74E-08	2,93E-08	3,37E-08	2,92E-08	1,39E-06	5,72E-09	5,89E-09
A [m ²]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0049	0,0049	0,0049
g [kg/s*m ²]	3,7E-06	4,1E-06	3,5E-06	2,7E-06	2,8E-06	2,7E-06	2,9E-06	3,4E-06	2,9E-06	0,000283	1,17E-06	1,2E-06
p _{atm} [Pa]	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325
p [Pa]	2808,32	2808,32	2808,32	2808,32	2808,32	2808,32	2808,32	2808,32	2808,32	2808,321	2808,321	2808,32
Δp [Pa]	1235,66	1235,66	1235,66	1235,66	1235,66	1235,66	1235,66	1235,66	1235,66	1235,661	1235,661	1235,66
W [kg/s*m ² *Pa]	3E-09	3,3E-09	2,8E-09	2,2E-09	2,3E-09	2,2E-09	2,4E-09	2,7E-09	2,4E-09	2,29E-07	9,44E-10	9,7E-10
Z [s*m ² *Pa/kg]	3,3E+08	3,1E+08	3,5E+08	4,6E+08	4,4E+08	4,5E+08	4,2E+08	3,7E+08	4,2E+08	4370697	1,06E+09	1E+09
δ [kg/s*m*Pa]	2E-10	2,1E-10	1,9E-10	1,4E-10	1,5E-10	1,4E-10	1,5E-10	1,8E-10	1,5E-10	1,49E-08	6,14E-11	6,3E-11
δ_{air} [kg/s*m*Pa]	2E-10	2E-10	2E-10	2E-10	2E-10	2E-10	2E-10	2E-10	2E-10	2,02E-10	2,02E-10	2E-10
μ [-]	1,03	0,95	1,09	1,44	1,37	1,40	1,31	1,14	1,32	0,01	3,30	3,20
d [m]	0,049	0,048	0,049	0,057	0,058	0,058	0,060	0,059	0,057	0,040	0,040	0,040
Sd [m]	0,050	0,045	0,053	0,082	0,079	0,081	0,079	0,068	0,074	0,001	0,132	0,128

Tabel 14: Berekende waarden dampdiffusieweerstandsgetal μ volgens de norm deel 2

	Hennep			Gras			MgO		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
RV klimaatkast [%]	50	50	50	50	50	50	50	50	50
RV KNO ₃ [%]	94	94	94	94	94	94	94	94	94
G (=rico) [kg/s]	3,55E-08	2,97E-08	3,02E-08	2,31E-08	2,24E-08	2,39E-08	7,81E-09	7,01E-09	8,41E-09
A [m ²]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0057	0,0057	0,0057
g [kg/s*m ²]	3,6E-06	3E-06	3,02E-06	2,31E-06	2,24E-06	2,39E-06	1,38E-06	1,24E-06	1,48E-06
p _{atm} [Pa]	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325
p [Pa]	2808,32	2808,32	2808,321	2808,321	2808,321	2808,321	2808,321	2808,321	2808,321
Δp [Pa]	1235,66	1235,66	1235,661	1235,661	1235,661	1235,661	1235,661	1235,661	1235,661
W [kg/s*m ² *Pa]	2,9E-09	2,4E-09	2,44E-09	1,87E-09	1,81E-09	1,93E-09	1,11E-09	1E-09	1,2E-09
Z [s*m ² *Pa/kg]	3,5E+08	4,2E+08	4,09E+08	5,35E+08	5,52E+08	5,17E+08	8,98E+08	1E+09	8,34E+08
δ [kg/s*m*Pa]	1,9E-10	1,6E-10	1,59E-10	1,22E-10	1,18E-10	1,26E-10	7,24E-11	6,5E-11	7,8E-11
δ_{air} [kg/s*m*Pa]	2E-10	2E-10	2,02E-10	2,02E-10	2,02E-10	2,02E-10	2,02E-10	2,02E-10	2,02E-10
μ [-]	1,08	1,30	1,27	1,67	1,72	1,61	2,79	3,11	2,60
d [m]	0,080	0,080	0,079	0,110	0,110	0,111	0,009	0,009	0,009
S _d [m]	0,086	0,104	0,101	0,182	0,188	0,178	0,025	0,028	0,023

Eerst en vooral werd de proef uitgevoerd door gebruik te maken van de productiedikte van de verschillende materialen. Dit is van belang omdat een reductie van de productiedikte ervoor kan zorgen dat de structuur en de samenstelling verandert. Het spreekt voor zich dat een grotere dikte in het algemeen zorgt voor een hoger dampdiffusieweerstandsgetal μ . Echter kan niet met honderd procent zekerheid gesteld worden dat de dampdiffusieweerstand lineair toeneemt met de dikte. Dit komt doordat tal van andere factoren, zoals de structuur en de samenstelling van het materiaal, ook belangrijk zijn ter bepaling van de weerstand tegen damptransport. Hierdoor kunnen – met uitzondering van houtwol en isovlas - de resultaten onderling niet (eenduidig) vergeleken worden.

Desondanks kunnen houtwol en isovlas, die beide een productiedikte hebben van ongeveer 58 mm, wel onderling vergeleken worden. Indien de waarden geanalyseerd worden, blijkt dat de materialen met een fijnere poriënstructuur meer weerstand bieden tegen waterdampdiffusie. Hetzelfde kan gezegd worden over de dichtheid van een isolatiemateriaal: hoe hoger de dichtheid is, hoe hoger de weerstand tegen dampdiffusie. Houtwol heeft namelijk een relatief hoge dichtheid en een fijne poriënstructuur, waardoor de experimentele waarde voor het dampdiffusieweerstandsgetal μ relatief hoog is. Dit verklaart ook waarom de dampdiffusieweerstand van katoen vrij laag is. Daarnaast gaan de kurkisolatie en magnesiumoxideplaten gepaard met een relatief hoge dampdiffusieweerstand, ondanks de beperkte dikte. Beide bestaan uit een compacter geheel met een gesloten celstructuur wat het damptransport verhindert.

Bijkomstig worden de bijhorende S_d-waarden berekend. De S_d-waarde geeft aan hoe goed een materiaal in staat is om waterdamp door te laten. Hoe hoger de S_d-waarde, hoe beter het materiaal in staat is om damp tegen te houden en dus hoe dampremmender het materiaal is. De S_d-waarde wordt simpelweg bekomen door het dampdiffusieweerstandsgetal μ te vermenigvuldigen met de aangegeven dikte van het isolatiemateriaal. Zoals eerder vermeld is de gebruikte productiedikte onderling verschillend, waardoor de S_d-waarden in Tabel 13 en Tabel 14 andermaal niet onderling vergeleken kunnen worden. Kortom kan gesteld worden dat de S_d-waarde simpelweg gedefinieerd kan worden als het aantal meter lucht dat

overeenkomt met het desbetreffende materiaal. Zo heeft houtwol (met een dikte van 0,058 m) dezelfde dampdiffusie als een laag stilstaande lucht van 0,081 m.

Tot slot worden de waarden afgetoetst aan wat te vinden is in de literatuur (zie Tabel 15.) Algemeen zijn de experimentele waarden relatief laag in vergelijking met de waarden uit de literatuur. Desalniettemin komt er per isolatiesoort, met uitzondering van de magnesiumoxideplaat, steeds minimaal één waarde uit de literatuur overeen. De waarde uit de literatuur voor het dampdiffusieweerstandsgetal μ van magnesiumoxide wijkt echter te sterk af met eender welke waarde en wordt als onbetrouwbaar beschouwd.

Dit bevestigt opnieuw dat minstens twee experimentele waarden betrouwbaar zijn, zoals weergegeven in Tabel 15.

Tabel 15: Vergelijking dampdiffusieweerstandsgetal μ literatuur – experimenteel

	$\mu_{\text{literatuur}}$ [-]	$\mu_{\text{experimenteel}}$ [-]
Katoen	1 tot 5	1,03
	2,20	1,09
Houtwol	3,00	1,44
	2,00	1,40
Isovlas	1,00	1,31
	1 tot 2	1,32
Kurk	5 tot 30	3,30
	2 tot 10	3,20
Hennep	1 tot 2	1,30
	1,00	1,27
Gras	1,00	1,67
	1 tot 2	1,72
MgO	184,70	2,79
	/	3,11

6.2 Meetcampagne Mobble

In dit onderdeel worden alle resultaten met betrekking tot het testpaviljoen uitgebreid besproken en geanalyseerd. De ruwe data werden omgezet tot een Excel-bestand waarin de uitgelezen data werd omgerekend naar de juiste eenheid en grootteorde. Deze resultaten werden vervolgens geplot op grafieken zodat het verloop onmiddellijk zichtbaar is.

Er worden twee analyses uitgevoerd. In eerste instantie worden het droge en bevochtigde compartiment per biogebaseerd isolatiemateriaal met elkaar vergeleken met betrekking tot de temperatuur T [°C], de relatieve vochtigheid RV [%], de dampdruk p [Pa] en de warmtestroom ϕ [W/m²]. Daaropvolgend worden de verschillende isolatiematerialen onderling vergeleken. Zo kan enerzijds achterhaald worden wat het algemene verloop is voor en na bevochtiging en anderzijds wat het drogingspotentieel is van elk

isolatiemateriaal. Eveneens kan de thermische werking geëvalueerd worden om kan achterhaald worden of er al dan niet sprake is van een delay.

Elke grafiek bevat een referentie- en een analyseperiode. De referentieperiode loopt van het begin van de metingen tot het moment van bevochtigen, meer specifiek van 27/02/2023 tot 27/03/2023 15.00 u. De analyseperiode start dan op 27/03/2023 15.00 u tot 15/05/2023. Gedurende de analyse wordt de periode voor en na bevochtiging bestudeerd

Vooraleer de grafieken met betrekking tot de isolatiematerialen besproken worden, wordt eerst een overzicht gegeven van de gebruikte afkortingen (zie Tabel 16). De letters x en y geven telkens de van toepassing zijnde compartimentnummers weer, terwijl de letters i en e respectievelijk voor het ‘interiorsurface’ (= binnenoppervlak) en ‘exteriorsurface’ (= buitenoppervlak) staan.

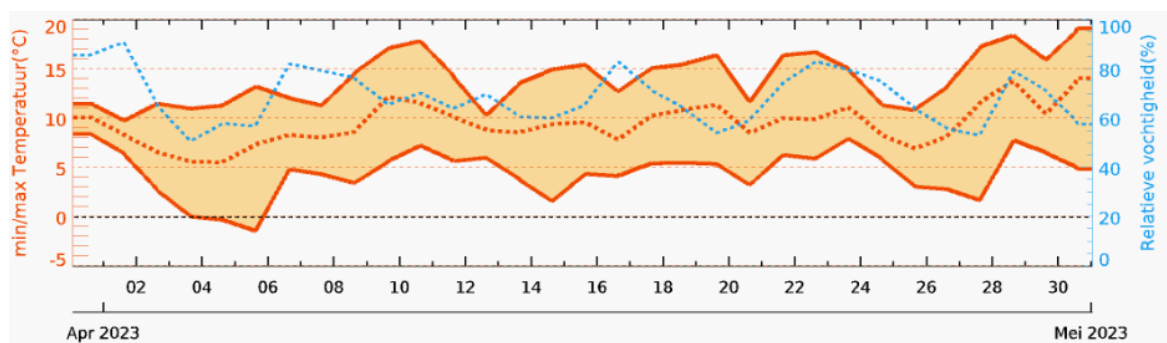
Tabel 16: Beschrijving afkortingen in grafieken van de in-situ metingen

Afkorting	Plaatsbeschrijving
T_iso_ix_droog	Temperatuur aan binnenoppervlak isolatie van droog compartiment x
T_iso_ex_droog	Temperatuur aan buitenoppervlak isolatie van droog compartiment x
T_iso_ix_nat	Temperatuur aan binnenoppervlak isolatie van bevochtigd compartiment x
T_iso_ex_nat	Temperatuur aan buitenoppervlak isolatie van bevochtigd compartiment x
ΔT_{iso_iy-x}	Temperatuurverschil aan binnenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
Gem_ΔT_iso_iy-x	Gemiddeld temperatuurverschil aan binnenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
ΔT_{iso_ey-x}	Temperatuurverschil aan buitenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
Gem_ΔT_iso_ey-x	Gemiddeld temperatuurverschil aan buitenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
RV_iso_ix_droog	Relatieve vochtigheid aan binnenoppervlak isolatie van droog compartiment x
RV_iso_ex_droog	Relatieve vochtigheid aan buitenoppervlak isolatie van droog compartiment x
RV_iso_ix_nat	Relatieve vochtigheid aan binnenoppervlak isolatie van bevochtigd compartiment x
RV_iso_ex_nat	Relatieve vochtigheid aan buitenoppervlak isolatie van bevochtigd compartiment x
ΔRV_{iso_iy-x}	Relatief vochtigheidsverschil aan binnenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
Gem_ΔRV_iso_iy-x	Gemiddeld relatief vochtigheidsverschil aan binnenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
ΔRV_{iso_ey-x}	Relatief vochtigheidsverschil aan buitenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
Gem_ΔRV_iso_ey-x	Gemiddeld relatief vochtigheidsverschil aan buitenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
p_iso_ix_droog	Dampdruk aan binnenoppervlak isolatie van droog compartiment x
p_iso_ex_droog	Dampdruk aan buitenoppervlak isolatie van droog compartiment x
p_iso_ix_nat	Dampdruk aan binnenoppervlak isolatie van bevochtigd compartiment x
p_iso_ex_nat	Dampdruk aan buitenoppervlak isolatie van bevochtigd compartiment x
Δp_{iso_iy-x}	Dampdrukverschil aan binnenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
Gem_Δp_iso_iy-x	Gemiddeld dampdrukverschil aan binnenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
Δp_{iso_ey-x}	Dampdrukverschil aan buitenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
Gem_Δp_iso_ey-x	Gemiddeld dampdrukverschil aan buitenoppervlak isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
$\Phi_{iso_x_doog}$	Warmtestroom doorheen isolatie van droog compartiment x
$\Phi_{iso_x_nat}$	Warmtestroom doorheen isolatie van bevochtigd compartiment x
Gem_Φ_iso_x_doog	Gemiddelde warmtestroom doorheen isolatie van droog compartiment x
Gem_Φ_iso_x_nat	Gemiddelde warmtestroom doorheen isolatie van bevochtigd compartiment x
$\Delta \Phi_{iso_ey-x}$	Warmtestroomverschil doorheen isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment
Gem_ΔΦ_iso_ey-x	Gemiddeld warmtestroomverschil doorheen isolatie tussen bevochtigd (y) en droog (x) compartiment

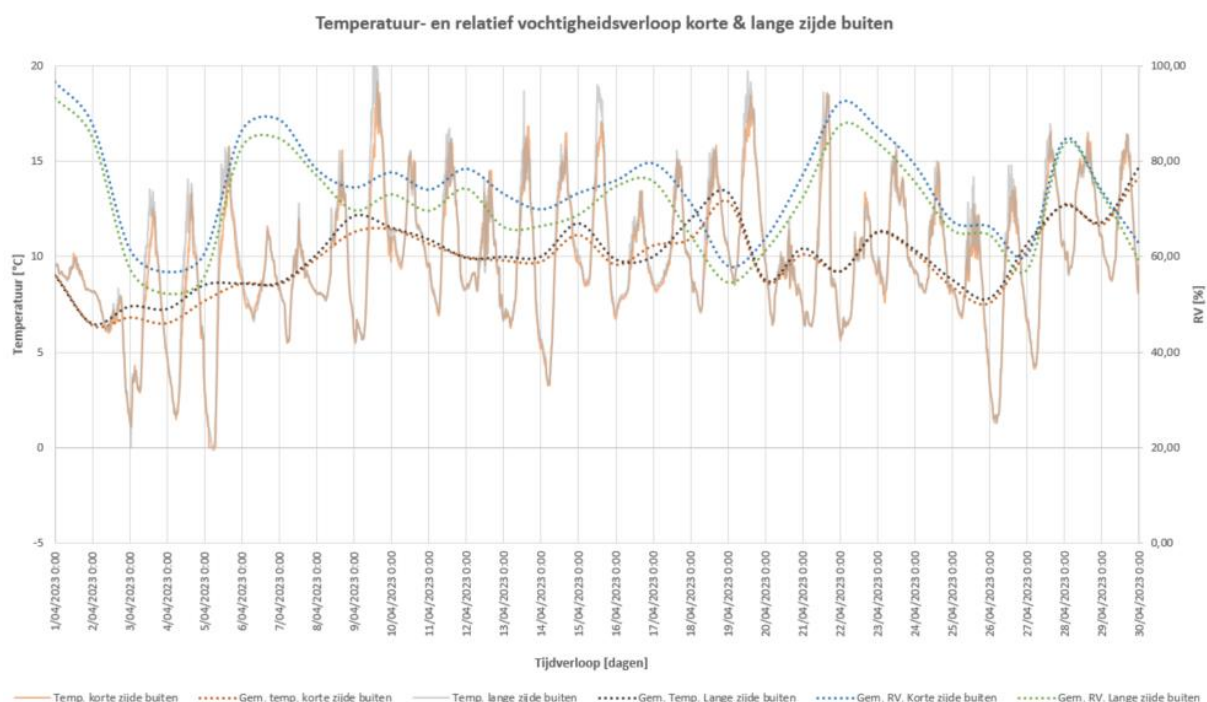
6.2.1 Weersomstandigheden

Ter controle van de uitgelezen data, verkregen door middel van de geïnstalleerde HOBO-apparatuur, wordt Meteoblue geraadpleegd. De meetcampagne nam welgeteld 11 weken in beslag. Als referentiekader wordt enkel de maand april bekeken. Op Figuur 55 wordt het verloop van de temperatuur (linkse as) en de relatieve vochtigheid (rechtse as) weergegeven. In april lag de maximumtemperatuur tussen de 10 °C en de 19 °C, terwijl de minimumtemperatuur tussen -1 °C en 8 °C lag. De gemiddeld relatieve vochtigheid schommelde tussen de 50 % en 80 %. Om de HOBO-resultaten hiermee te kunnen vergelijken, wordt een soortgelijke grafiek opgesteld.

Zo geeft Grafiek 15 de temperatuur en relatieve vochtigheid weer langs de korte en lange mobiele wand van het testpaviljoen. Het verloop van beide is gelijkaardig aan Figuur 55, waardoor kan besloten worden dat de HOBO-metingen betrouwbaar zijn. Doch verschillen de waarden tussen de korte en lange zijde licht. Dit komt omdat de korte zijde meer in schaduw ligt. Hierdoor is de temperatuur doorgaans lager en de relatieve vochtigheid hoger.



Figuur 55: Temperatuur en relatieve vochtigheid in april te Gent (Meteoblue, 2022)



Grafiek 15: Temperatuur en relatieve vochtigheid april te Gent (HOB0-resultaten)

6.2.2 Temperatuur

Per isolatiemateriaal worden de in-situ gemeten waarden geplot op een grafiek met op de y-as de temperatuur en op de x-as de tijd. Zo worden de dagelijkse schommelingen zichtbaar en kan een beeld geschetst worden van de voornaamste trends die zich voordoen. Om een idee te krijgen van de thermische werking van de verschillende isolatiematerialen wordt telkens een tweede grafiek opgesteld, waarbij het temperatuurverschil tussen het natte en het droge compartiment van elk biogebaseerd isolatiemateriaal genomen wordt. Andermaal wordt op de y-as de temperatuur uitgezet, terwijl de x-as de tijd voorstelt.

Algemeen valt het op dat er geen noemenswaardige verschillen op te merken zijn op vlak van de temperatuur aan het binnen- en buitenoppervlak van de isolatiematerialen na inbreng van een halve liter water. Belangrijk om weten is dat de temperatuur gemeten wordt op één specifiek punt. Dit punt bevindt zich ongeveer 60 centimeter onder de vochtbron. Dit wil zeggen dat alle resultaten enkel van toepassing zijn op deze hoogte. Het kan dus zijn dat het isolatiemateriaal in een ander punt wel een invloed ondervindt van het koude water. Echter kunnen daar geen uitspraken over gedaan worden wegens het gebrek aan resultaten.

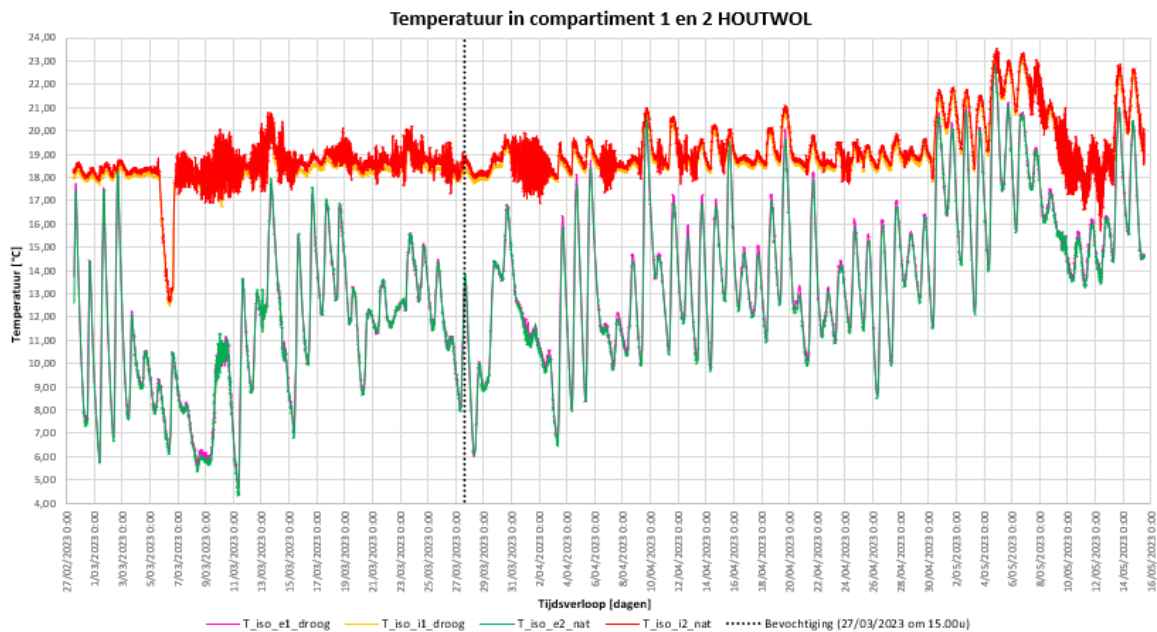
Bijkomstig is het ook vaak onduidelijk of het al dan niet effectief om een verschil gaat of eerder het gevolg van een onnauwkeurige meting. Ook geeft het weinig informatie over het drogingsproces dat zich voordoet in de verschillende isolatiematerialen. Globaal gezien doen zich telkens dezelfde trends voor waardoor de voornaamste zaken uitgebreid vermeld worden bij het eerste isolatiemateriaal houtwol (zie paragraaf 6.2.2.1). In de verdere bespreking volgt slechts een korte analyse, waarbij enkel de grafiek met het temperatuurverschil wordt weergegeven.

6.2.2.1 Houtwol

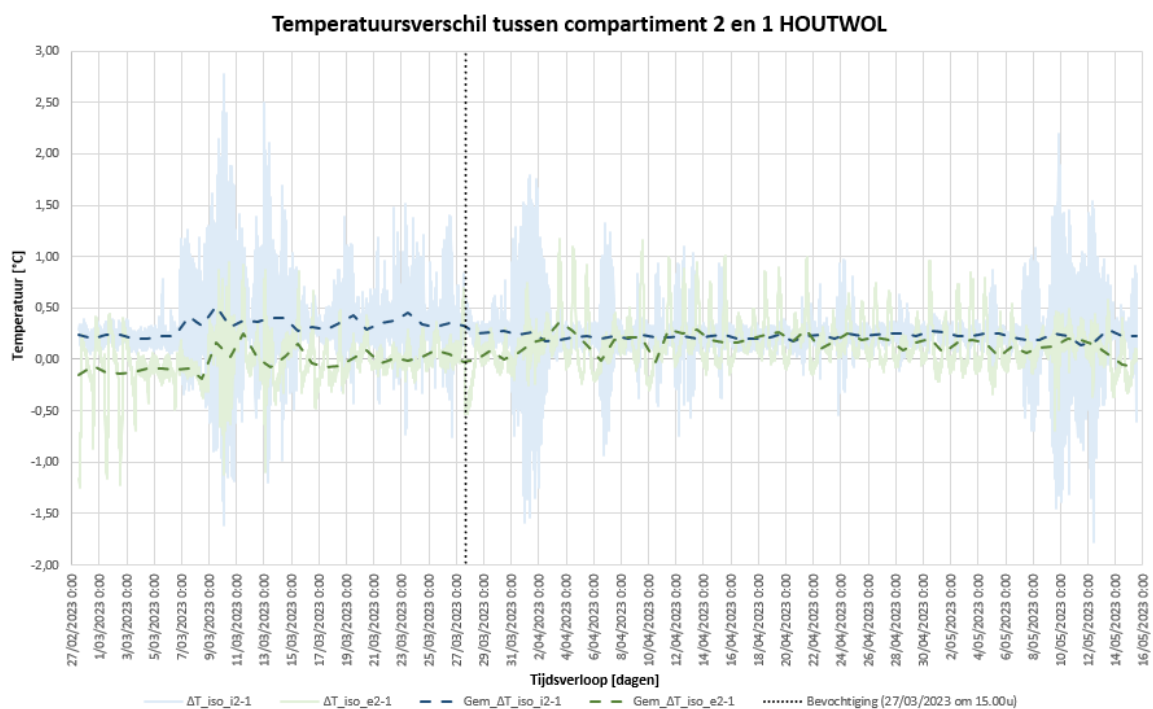
Op Grafiek 16 is te zien dat de temperatuur aan de warme zijde van de isolatie steeds hoger is in het natte compartiment 2. Echter is dit verschil miniem en kan dit te wijten zijn aan de nauwkeurigheid van de sensoren. Bovendien bevindt het natte compartiment 2 zich enerzijds dicht bij het verwarmingselement en anderzijds ondervindt het minder effect van de schaduwvorming ten gevolge van de boom. Hierdoor ontvangt het meer rechtstreeks invallend zonlicht, wat de temperatuur doet stijgen. Beide factoren kunnen ook hun impact hebben op het kleine verschil aan de binnenkant tussen beide compartimenten. Het grillig verloop is te danken aan de werking van de verwarming op koudere dagen. Ook na de bevochtiging, aangeduid door een zwarte stippellijn, blijft het temperatuurverloop gelijk. Hieruit kan besloten worden dat de toevoeging van het water weinig invloed heeft op temperatuur aan de warme zijde van de isolatie.

Ter verduidelijking wordt Grafiek 17 weergegeven. Indien er zich geen temperatuurverschil voordoet tussen het natte en droge compartiment, wordt een horizontale rechte lijn bekomen. Na de bevochtiging

wordt in de curve van het temperatuurverschil aan de koude zijde van de isolatie na een tijdspanne van ongeveer vier dagen een stijging waargenomen. Deze stijging bedraagt weliswaar slechts 0,40 °C. Echter kan dit niet het gevolg zijn van de waterinfiltratie. Het koude water zorgt namelijk voor een eventuele temperatuurdaling. Aangezien de temperatuur van het droge compartiment afgetrokken wordt van de temperatuur van het natte compartiment, zou een daling van het natte compartiment gepaard moeten gaan met een daling in de curve van het temperatuurverschil. Bijgevolg kan geconcludeerd worden dat deze stijging geen gevolg is van de bevochtiging, maar andermaal van onnauwkeurige metingen, weersinvloeden of omgevingsomstandigheden.

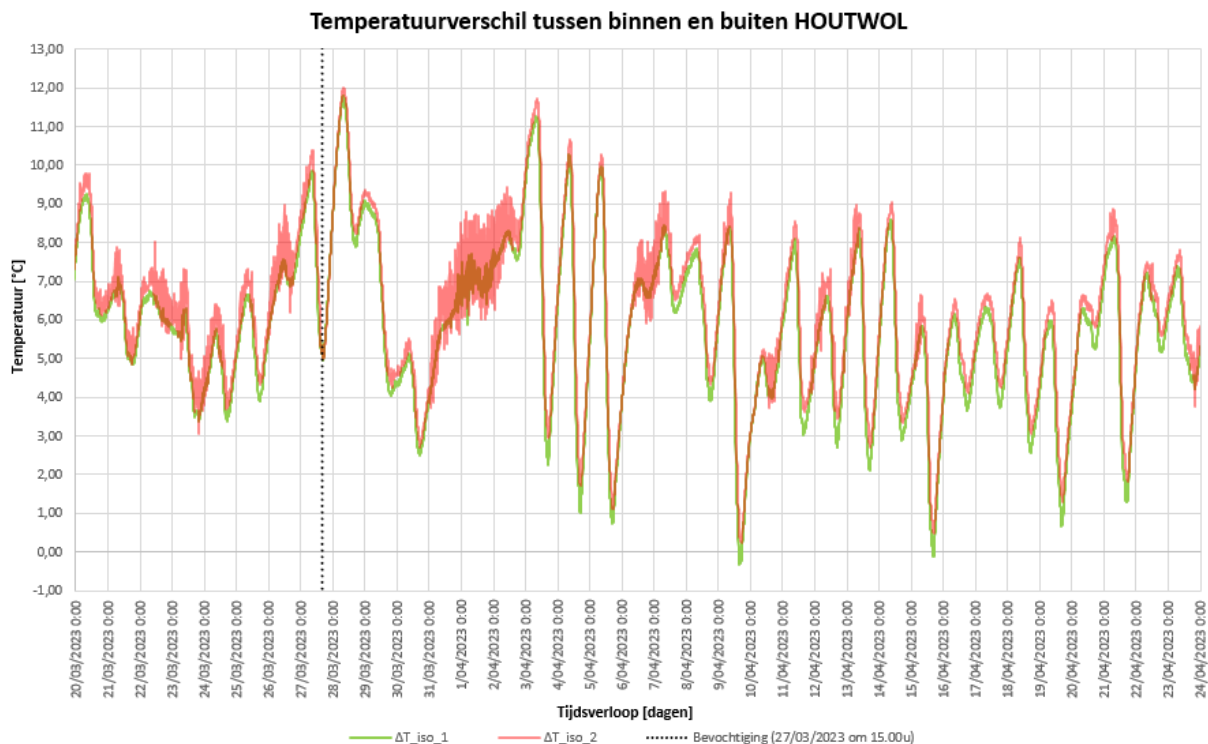


Grafiek 16: Temperatuur aan koude en warme zijde van de houtwolisolatie



Grafiek 17: Temperatuurverschil aan koude en warme zijde van de houtwolisolatie

Tot slot is het relevant om de temperatuurgradiënt ΔT te bepalen tussen de binnen- en buitentemperatuur van de isolatie in eenzelfde compartiment. Het is namelijk zo dat een verschil in de temperatuurgradiënt ΔT noodzakelijk is om een verandering in de warmtestroom doorheen de isolatie te veroorzaken. Uit Grafiek 18 blijkt dat beide curves, waarbij de groene en de rode curve respectievelijk symbool staan voor de temperatuurgradiënt ΔT in compartiment 1 en 2, steeds ongeveer 0,3 à 0,5 °C van elkaar afwijken. Enkel en alleen op het moment onmiddellijk na de bevochtiging is te zien dat beide curves nagenoeg op elkaar liggen. Er treedt dus wel degelijk een klein verschil op in de temperatuur als gevolg van de bevochtiging, maar het effect is na 24 uren niet meer zichtbaar. Dit zorgt ervoor dat er mogelijks een kortstondige toename van de warmtestroom plaatsvindt doorheen het natte compartiment (zie paragraaf 6.2.5.1) Het feit dat het temperatuurverschil zo klein is, is te wijten aan de omstandigheden op het moment van de bevochtiging. De temperatuur aan de koude zijde bedroeg namelijk 13,46 °C op het moment van de waterinfiltratie. Door het kleine temperatuurverschil met het water (ongeveer 12 °C) is het vanzelfsprekend dat er slecht kleine verschillen op te merken zijn.



Grafiek 18: Temperatuurgradiënt ΔT tussen binnen- en buitentemperatuur houtwolisolatie

6.2.2.2 Katoen, gras en hennep

Zowel voor de katoen-, gras- en hennepisolatie zijn telkens opnieuw dezelfde trends en ontwikkelingen in het temperatuurverloop van toepassing. Zo worden de grafieken met betrekking tot deze isolatiematerialen niet verder besproken. Deze zijn weergegeven in Bijlage A.

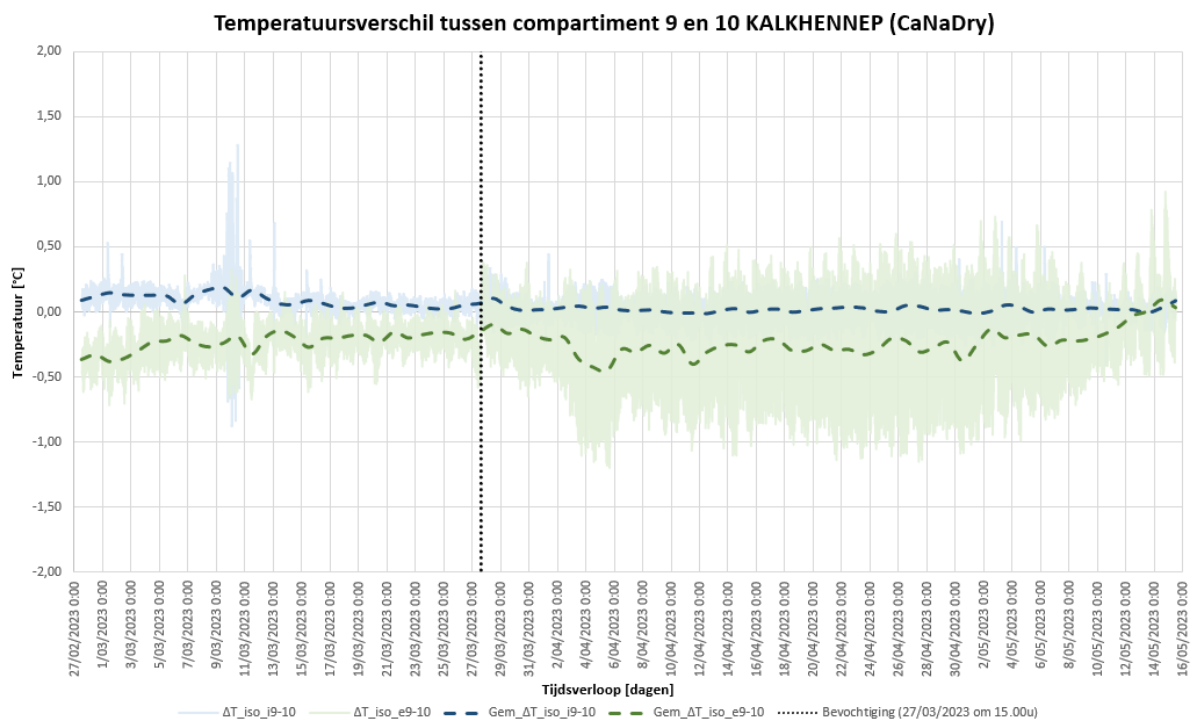
Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat de waarden aan het buitenoppervlak van de grasisolatie in compartiment 5 foutief zijn. De temperatuursensor werd op de verkeerde plaats aangebracht en meet

andermaal de waarden aan de warme zijde van de isolatie. Dit verklaart meteen het afwijkende verloop van de temperatuur aan de koude zijde van de isolatie.

6.2.2.3 Kalkhennep (CaNaDry)

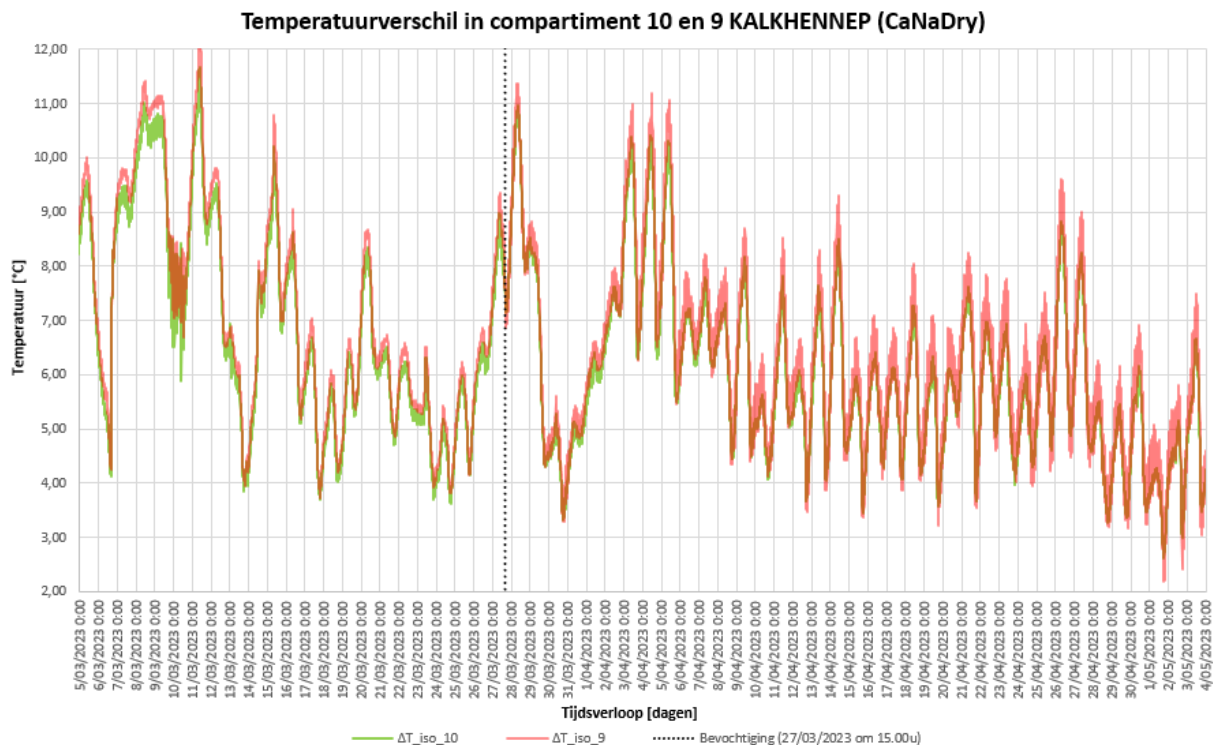
In Bijlage A is het temperatuurverloop van compartiment 9 en 10 te zien. Hier ligt de temperatuur aan de koude zijde van de isolatie lager dan bij alle voorgaande compartimenten. Dit komt omdat compartiment 9 en 10 zich in de korte mobiele wand – en dus meer in de schaduw - bevinden. De temperatuur aan de warme zijde van beide compartimenten is wel quasi gelijk, dit zowel voor als na de inbreng van een halve liter water. Dit wordt bevestigd door Grafiek 19, waar het temperatuurverschil verwaarloosbaar is. De kleine stijging van de blauwe curve (gem_ΔT_iso_i9-10) na het moment van bevochtiging is hiervan geen rechtstreeks gevolg. Het koude water brengt namelijk een eventuele temperatuurdaling met zich mee. Dit valt dus andermaal toe te wijzen aan de werking van de sensoren. Het bedraagt ook niet meer dan 0,2 °C, wat binnen de mogelijke foutmarge van de sensoren ligt.

Ook aan de koude zijde van de ingestorte kalkhennep (CaNaDry) is geen noemenswaardig verschil zichtbaar tussen beide compartimenten. In de zone vóór bevochtiging ligt de temperatuur van het droge compartiment duidelijk boven de temperatuur van het bevochtigde compartiment. De eerste uren (en dagen) na de bevochtiging houden de curves dezelfde trend aan. Echter is zowel op Grafiek 19 te zien dat op 3 april een daling van de temperatuur aan de koude zijde van het natte compartiment 9 plaatsvindt. Het lijkt eerder onwaarschijnlijk dat pas 6 à 7 dagen na de bevochtiging pas een verschil wordt opgemerkt als rechtstreeks gevolg van de bevochtiging. Andermaal kan dit verschil toegeschreven worden aan de meetnauwkeurigheid van de sensoren.



Grafiek 19: Temperatuurverschil aan koude en warme zijde van de CaNaDry

In Grafiek 20 wordt de temperatuurgradiënt ΔT tussen de warme en koude zijde van elk compartiment geplot. Hieruit blijkt dat beide curves aanvankelijk een verschil vertonen van 0,5 °C. Verder in de referentieperiode wordt dat verschil steeds kleiner, net zoals dat het geval is op het moment van de bevochtiging. Zodoende wordt er geen noemenswaardig verschil opgemerkt in het verloop als gevolg van de vochtinfiltratie. Uit de algemene trend, waarbij de temperatuurgradiënt ΔT van het natte en het droge compartiment naar elkaar toe nadert, moet dit een afname in het warmtestroomverschil tussen beide compartimenten veroorzaken. Dit wordt besproken in 6.2.5.3.



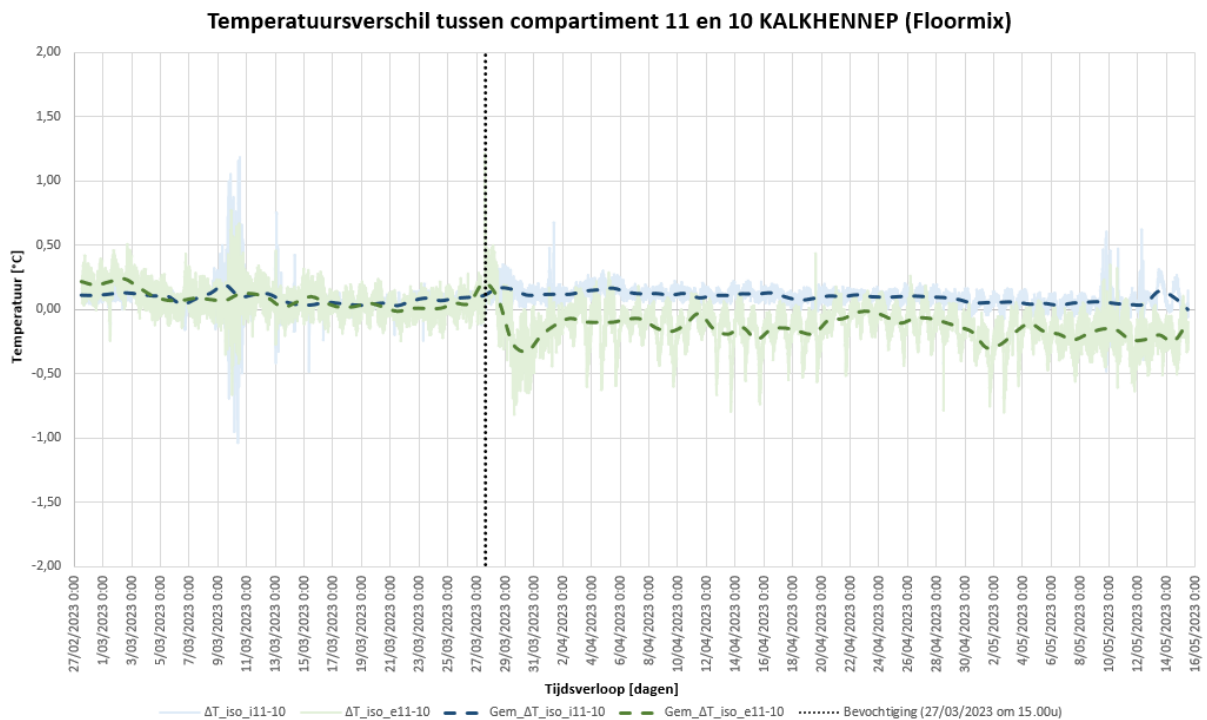
Grafiek 20: Temperatuurgradiënt ΔT tussen binnen- en buitentemperatuur CaNaDry

6.2.2.4 Kalkhennep (Floormix)

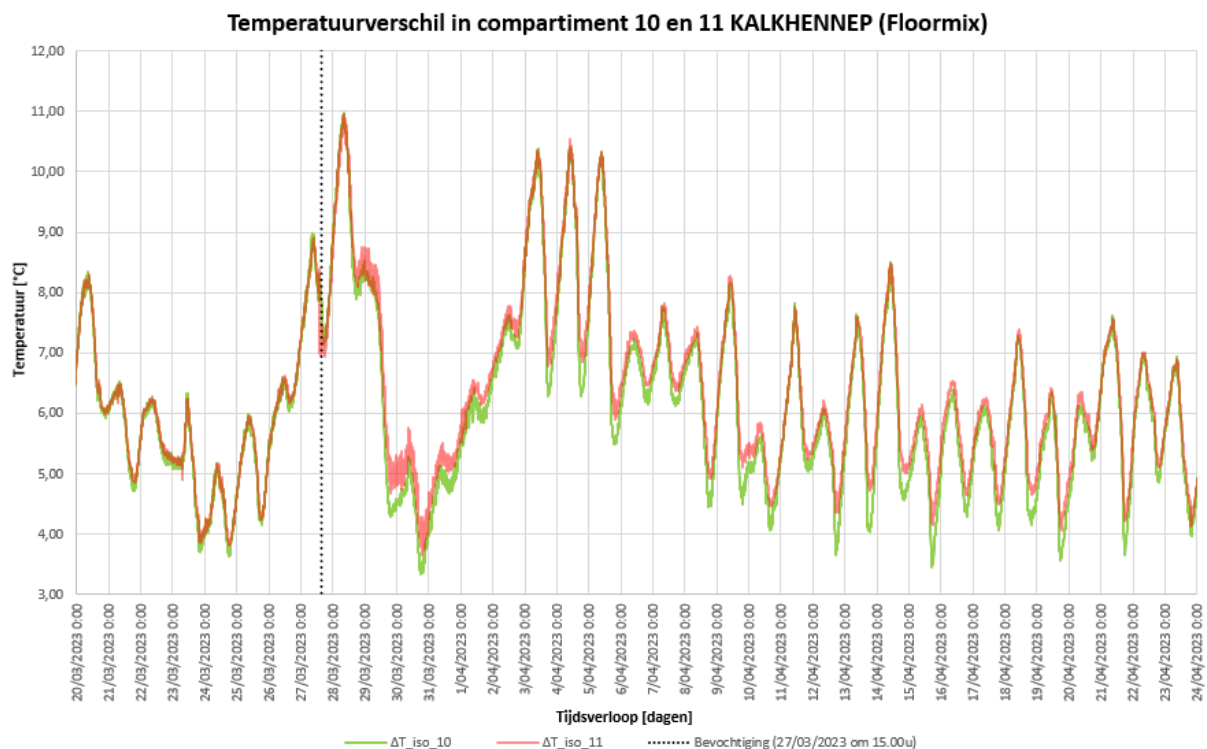
Het verloop van de temperatuur aan de warme zijde van de isolatie is gelijkaardig aan het verloop van de kalkhennep in compartimenten 9 en 10. Voor wat de buitenkant van de isolatie betreft, kan voor de eerste maal met honderd procent zekerheid gesteld worden dat het inbrengen van koud water een temperatuurverschil veroorzaakt. Op Grafiek 21 is te zien dat nagenoeg onmiddellijk na de bevochtiging een daling in het temperatuurverschil aan de koude zijde plaatsvindt van plusminus 0,4 °C. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het water wel degelijk een invloed uitoefent op de temperatuur aan de koude zijde van de kalkhennepisolatie in het natte compartiment 11 ter hoogte van de sensor.

In Grafiek 22 is andermaal de temperatuurgradiënt ΔT te zien tussen de warme en koude zijde van elk compartiment. Beide curves verlopen aanvankelijk nagenoeg identiek en naarmate de tijd vordert neemt het verschil tussen beide alsmaar meer toe. In vergelijking met klakhennep CaNaDry doet zich dus het omgekeerde voor, wat de resultaten sterk in twijfel trekt. Desalniettemin zou dit een algemene toename

in het warmtestroomverschil tussen beide compartimenten moeten veroorzaken. Dit is niet het geval, wat erop wijst dat ofwel de temperatuursensor ofwel de warmtestroomsensor niet optimaal functioneert en foutieve waarden genereert. Een andere verklaring werd hiervoor niet gevonden.



Grafiek 21: Temperatuurverschil aan koude en warme zijde van de Floormix



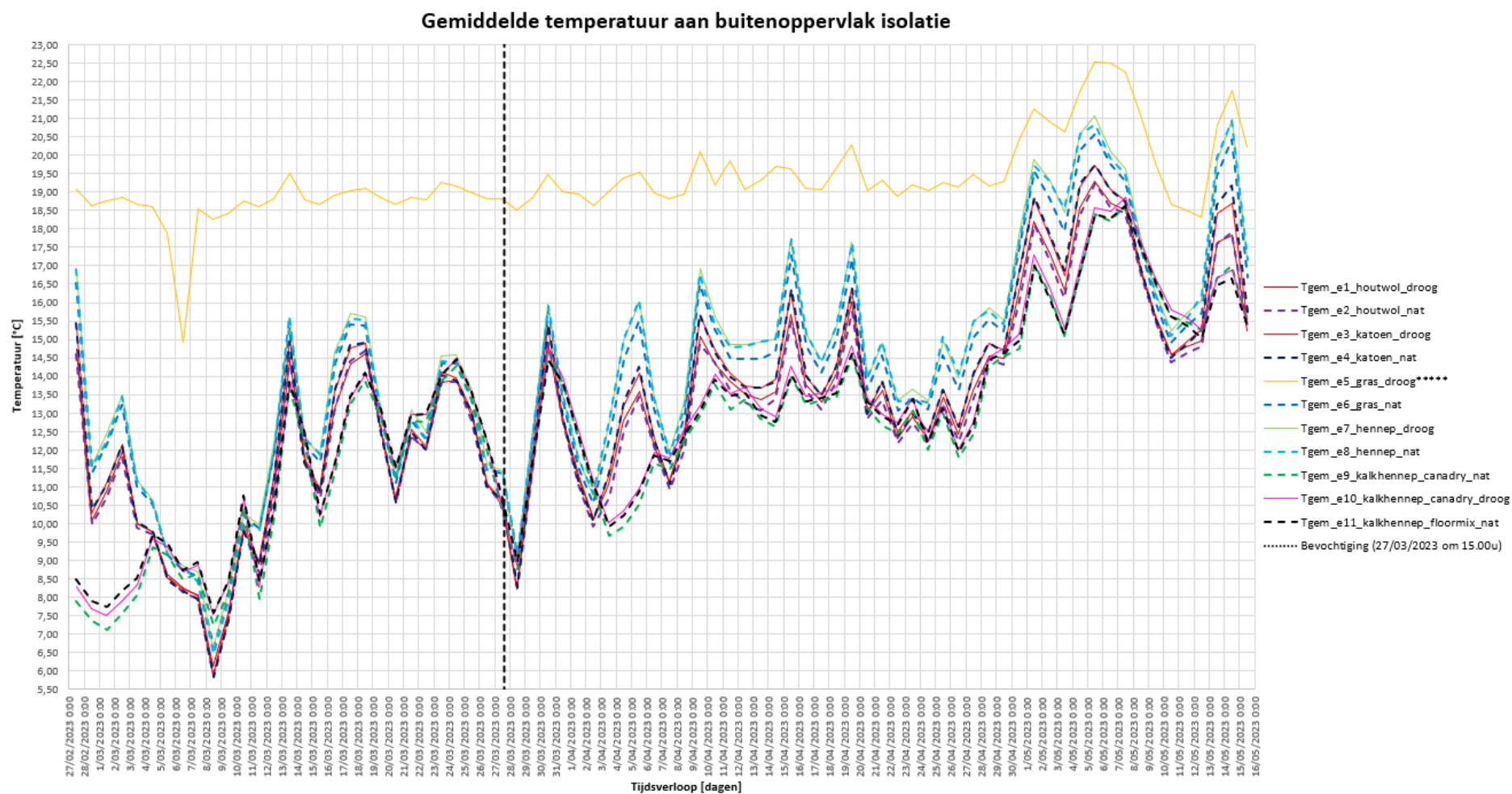
Grafiek 22: Temperatuurgradiënt ΔT tussen binnen- en buitentemperatuur Floormix

6.2.2.5 Vergelijking van alle compartimenten op vlak van de temperatuur

Om de verschillende isolatiematerialen onderling te kunnen vergelijken, worden Grafiek 23 en Grafiek 24 geplot. Hier wordt geopteerd om de daggemiddelde temperaturen aan de koude zijde van de isolatie te plotten. Uit de ruwe meetgegevens, met een datapunt om de tien minuten, wordt namelijk een grillig verloop met enkele kleine uitschieters verkregen. Het grillige verloop is zichtbaar in de grafieken die de gegevens bevatten van één specifiek isolatiemateriaal, waardoor het dus volstaat om een algemeen verloop te hebben. Dit komt ook de leesbaarheid ten goede. Over het algemeen worden betrouwbare en bovenal realistische waarden verkregen.

Eerst en vooral kan nu duidelijk aangetoond worden dat de temperatuur aan de koude zijde van de isolatiematerialen (zie Grafiek 23) lager ligt voor de compartimenten die zich in de korte zijde bevinden (compartiment 9-11). Bijkomstig kan geconcludeerd worden dat het verschil verhoudingsgewijs groter wordt, wanneer de buitentemperatuur toeneemt. Eerder werd verklaard dat de invloed van de oriëntatie en de omgevingsfactoren een belangrijke rol kunnen spelen op de meetresultaten. Wanneer de temperatuur stijgt – en dus meestal de zon schijnt – vindt er een grotere temperatuurstijging plaats in de lange zijde. Dit is rechtstreeks het gevolg van invallend zonlicht. Daarbovenop wordt het direct zonlicht dat naar de avond toe kan invallen op de korte zijde, geblokkeerd door een naastliggende boom en een groot gebouw (zie Figuur 38). Kortom bereikt het zonlicht nagenoeg nooit de korte zijde. Dit staat in schril contrast met de lange zijde die zuidelijk georiënteerd is en weinig hinder ondervindt van omgevingselementen.

Het moment juist voor de bevochtiging is een dalende trend van de temperatuur aan de koude zijde van de isolatie zichtbaar. Ditzelfde verloop wordt aangehouden op het moment van bevochtiging en kort daarna. Dit is enkel en alleen, met uitzondering van de gestorte kalkhennep in compartiment 11, het gevolg van de dalende buitentemperatuur. Dat de temperatuur geen invloed ondervindt door de inbreng van koud water, werd besproken bij voorgaande paragrafen.



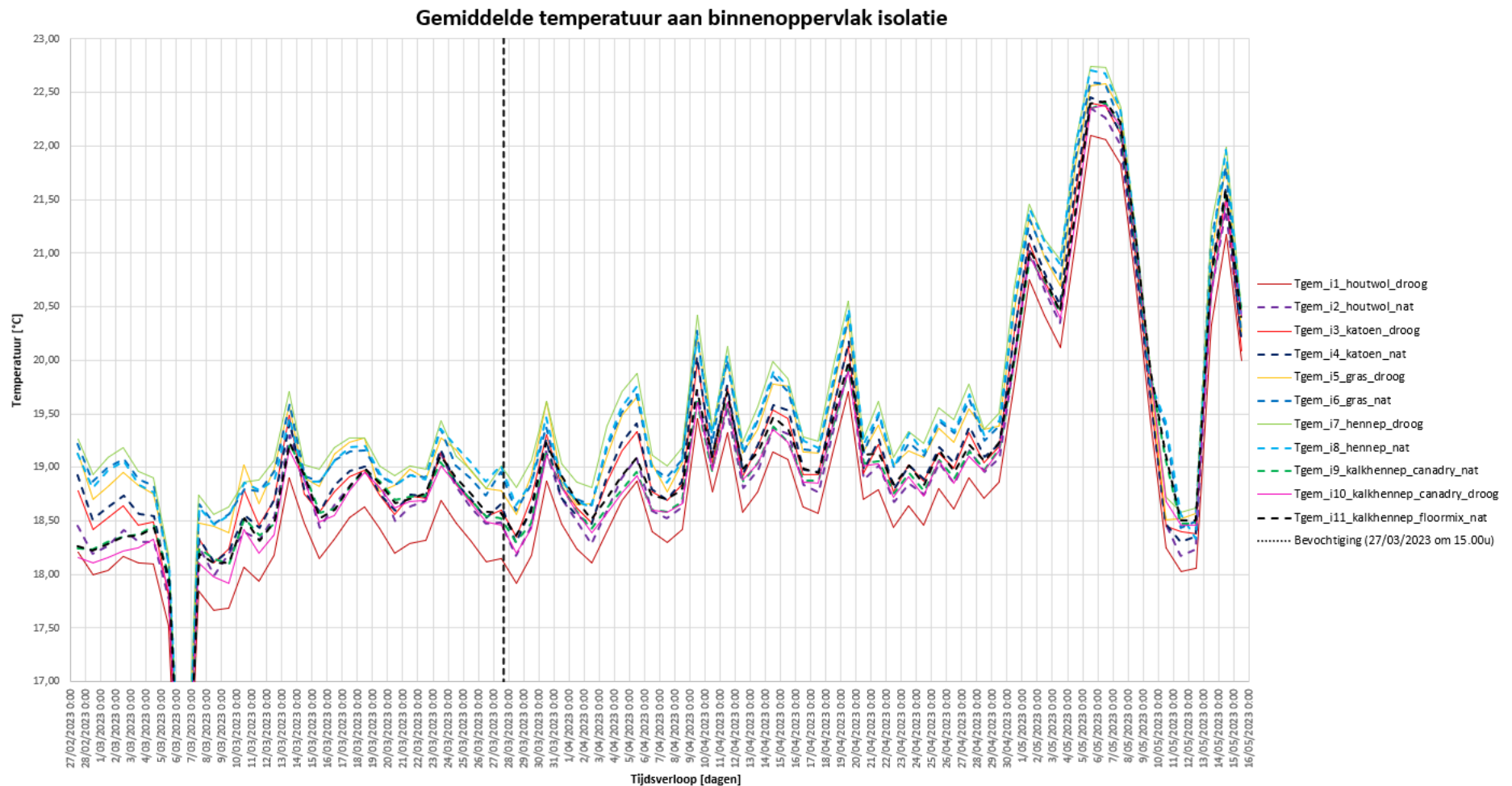
Grafiek 23: Gemiddelde temperatuur aan de koude zijde van de isolatie voor alle compartimenten

In tegenstelling tot de gemiddelde temperatuur aan de koude zijde van de isolatie, volstaat het bij de gemiddelde temperatuur aan de warme zijde van de isolatie niet om quasi uitsluitend rekening te houden met de weersomstandigheden. Ondanks het feit dat gestreefd wordt naar een constant binnenklimaat, blijkt dit niet honderd procent het geval te zijn. Op Grafiek 24 is te zien dat compartiment 7 en 8 over de volledige lijn de hoogste temperatuur hebben. Dit kan verklaard worden doordat deze zich het dichtst bij het elektrisch verwarmingselement bevinden. De capaciteit en de draaicirkel van de ventilator, die instaat voor een gelijkmatige verdeling van de warme lucht, is eerder beperkt. Hierdoor vertonen de verst gelegen compartimenten een lagere temperatuur aan de warme zijde van de isolatie.

Desalniettemin spelen andermaal de weersomstandigheden een bepalende rol. Uit de resultaten van de temperatuur aan de warme zijde van de isolatie wordt dezelfde trend waargenomen als bij de temperatuur aan de koude zijde van de isolatie. De temperatuurschommelingen van de buitentemperatuur schommelen namelijk enorm. Hoewel de isolatie uiteraard beschikt over een (goed) isolerend vermogen, is het niet in staat om de grote schommelingen op te vangen.

Uit de resultaten blijkt ook dat de temperatuur aan de warme zijde van compartiment 1 relatief veel afwijkt van de rest. Ter hoogte van compartiment 2, waar ook houtwol gebruikt is, wijkt de gemiddelde temperatuur verhoudingsgewijs veel minder af. Er kan geconcludeerd worden dat de metingen in compartiment 1 niet honderd procent nauwkeurig uitgevoerd zijn. Dit kan het gevolg zijn van een slecht functionerende sensor.

Algemeen kan geconcludeerd worden dat op de hoogte van de sensor – ongeveer 60 centimeter onder de vochtbron – geen opmerkelijke verschillen gedetecteerd worden met betrekking tot de temperatuur. Echter is deze conclusie enkel van toepassing op deze specifieke hoogte en kunnen geen uitspraken gedaan worden over de temperatuur in een punt dat dichterbij de vochtbron is. Bijgevolg kan weinig afgeleid worden uit deze resultaten met betrekking tot het drogingspotentieel van de verschillende isolatiematerialen.



Grafiek 24: Gemiddelde temperatuur aan de warme zijde van de isolatie voor alle compartimenten

6.2.3 Relatieve vochtigheid

Per isolatiemateriaal worden de in-situ gemeten waarden geplot op een grafiek met op de y-as de relatieve vochtigheid en op de x-as de tijd. Zo worden de dagelijkse schommelingen zichtbaar en kan een beeld geschetst worden van de voornaamste trends die zich voordoen. Een hypothese die gesteld kan worden is dat na bevochtiging de relatieve vochtigheid gaat stijgen om na verloop van tijd terug de oorspronkelijke toestand te bereiken. Andermaal is het van belang om in het achterhoofd te houden dat de resultaten slechts voor één specifiek punt op 60 centimeter onder de vochtbron van toepassing zijn. Verder in het verslag worden alle compartimenten met elkaar vergeleken.

Belangrijk om weten is dat de relatieve vochtigheid omgekeerd evenredig is aan de temperatuur. Dit houdt in dat wanneer de temperatuur stijgt, de relatieve vochtigheid afneemt. De verklaring hiervoor is dat bij een lagere temperatuur de verhouding tussen het vochtgehalte aanwezig in de lucht en het verzadigd vochtgehalte veel kleiner is dan bij een hoge temperatuur.

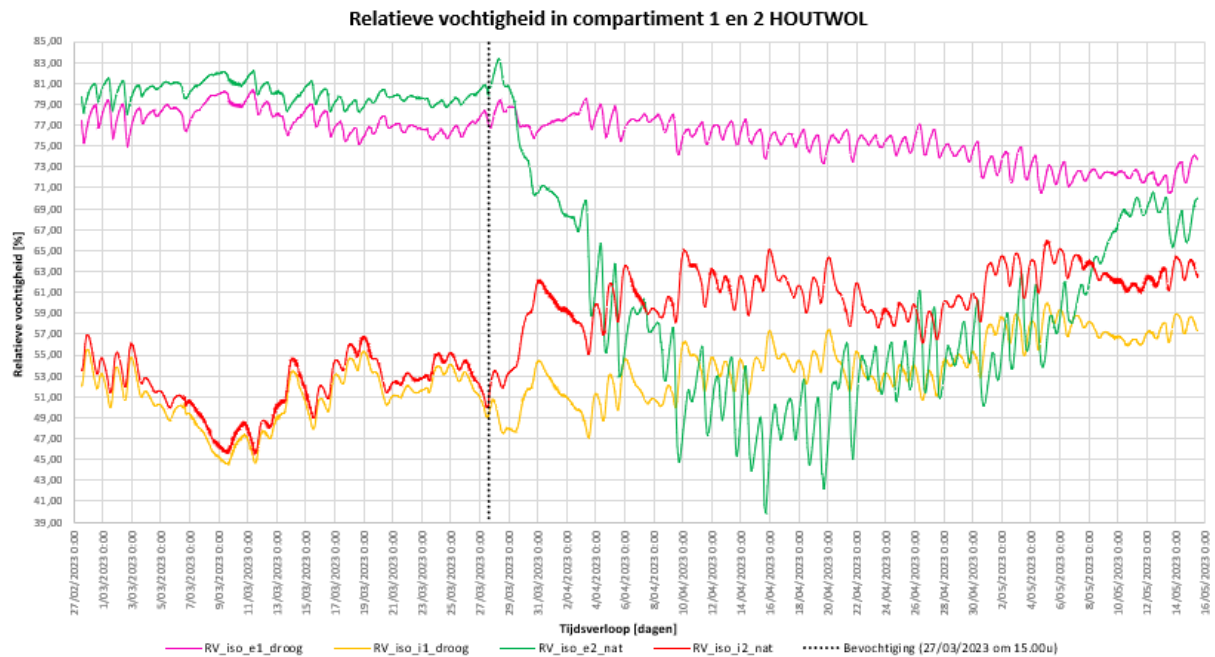
6.2.3.1 Houtwol

Op Grafiek 25 vertoont de curve voor de relatieve vochtigheid aan de koude zijde van de isolatie van het bevochtigde compartiment 2 afwijkende resultaten. In werkelijkheid is het enige mogelijke gevolg dat de relatieve vochtigheid toeneemt, na het toevoegen van water. Echter daalt de curve met ongeveer 35 % tot een minimale relatieve vochtigheid van plusminus 40 %. Vanaf 18 april gaat de curve weer in stijgende lijn en dit tot het einde van de meetperiode. Ondanks het afwijkende verloop kan gesteld worden dat de oorspronkelijke toestand na een droogperiode van ongeveer 50 dagen niet bereikt is. Een eventuele verklaring voor het afwijkende verloop kan zijn dat de sensor tilt is geslagen na rechtstreeks contact met één of meerdere waterdruppels.

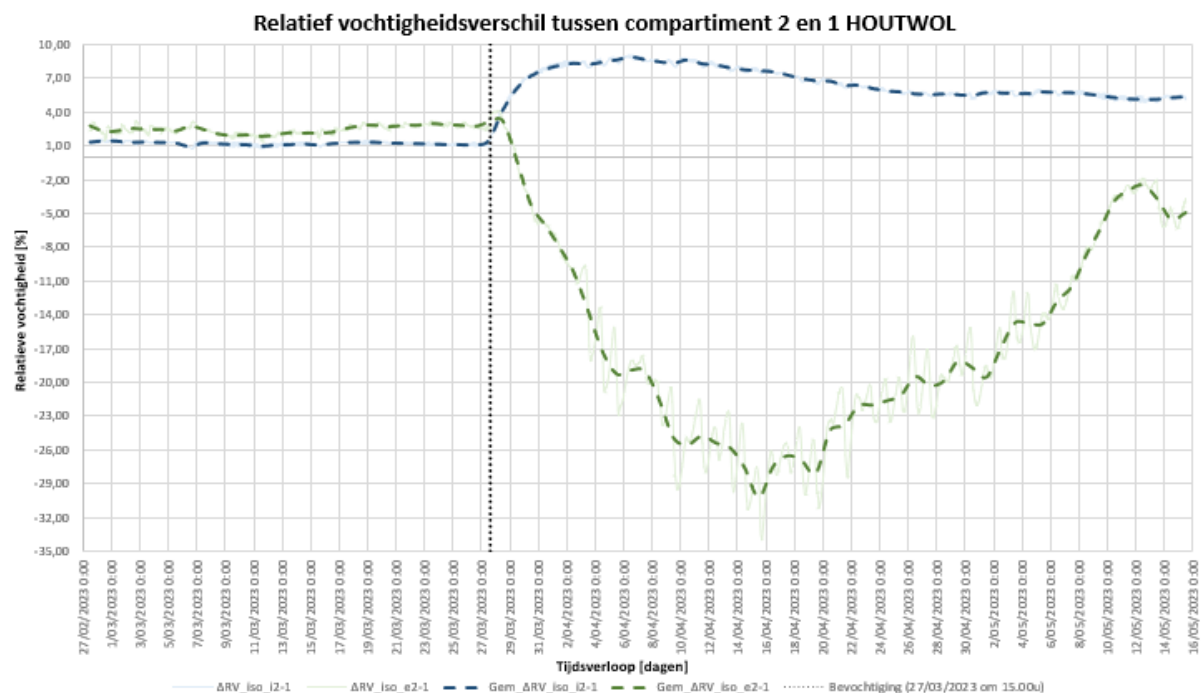
De curve voor de relatieve vochtigheid aan de koude zijde van de isolatie voor het droge compartiment 1 heeft wel een realistisch verloop. Er is over de volledige lijn een lichte daling waarneembaar, wat het gevolg is van de stijgende buitentemperatuur. Verdere conclusies zijn niet aan de orde wegens de onbetrouwbare gegevens van de sensor in het natte compartiment 2.

De curves met betrekking tot de relatieve vochtigheid aan de warme zijde van de isolatie liggen wel in de lijn van de verwachtingen. Quasi onmiddellijk is te zien dat de relatieve vochtigheid in het natte compartiment toeneemt in vergelijking met het droge compartiment. Waar de curves in de referentieperiode vóór de bevochtiging nagenoeg dezelfde waardes aannamen, wordt de afstand tussen beide curves na bevochtiging plots groter. Ongeveer 3,5 dagen na de bevochtiging is het grootste verschil waarneembaar van 8 %. In het droge compartiment bedraagt de relatieve vochtigheid namelijk 55 %, terwijl dit in het natte compartiment 63 % is. Naarmate de tijd vordert – en ook de buitentemperatuur toeneemt – verkleint het verschil in relatieve vochtigheid aan een traag tempo. Na

een droogperiode van 50 dagen is de oorspronkelijke situatie nog niet bereikt, maar is het maximale verschil van 8 % wel gereduceerd tot 6%. Dit is ook duidelijk te zien op Grafiek 26.



Grafiek 25: Relatieve vochtigheid aan de koude en warme zijde van de houtwolisolatie



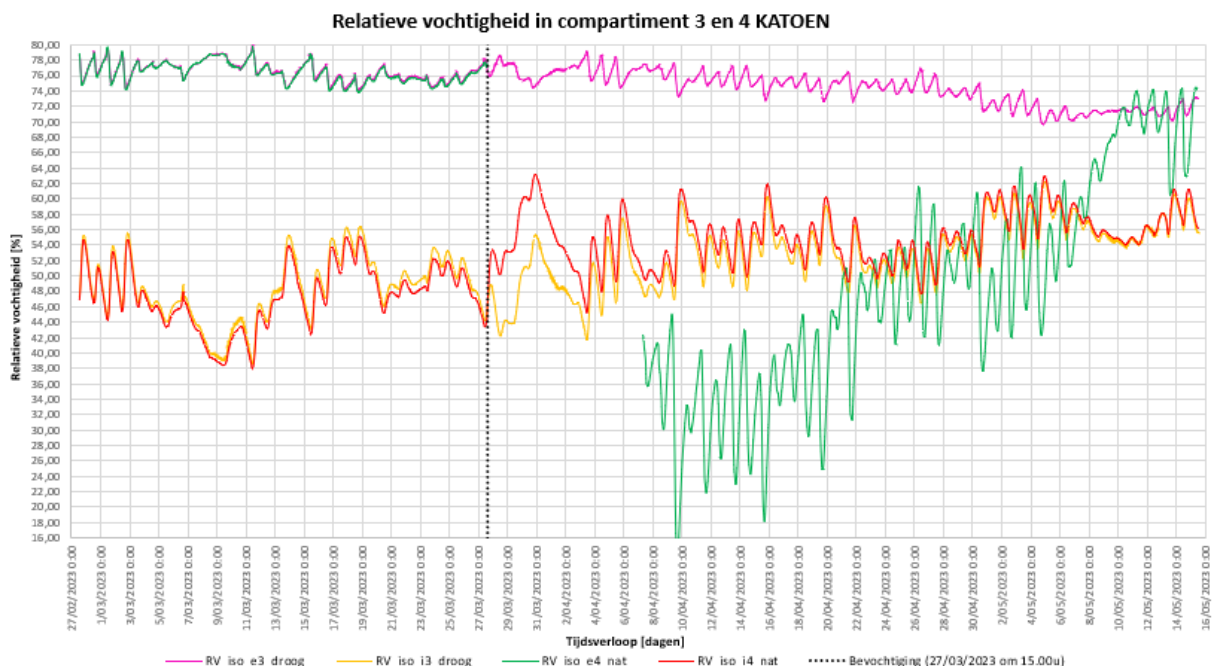
Grafiek 26: Relatief vochtigheidsverschil aan de koude en warme zijde van de houtwolisolatie

6.2.3.2 Katoen

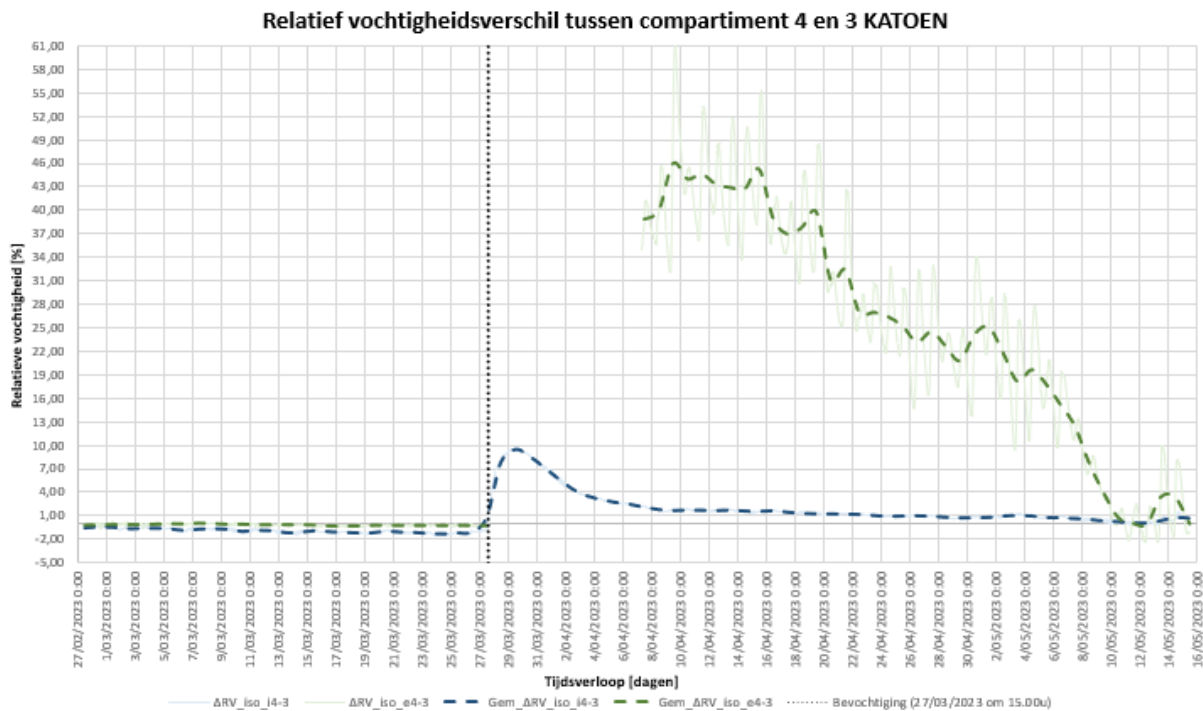
Op Grafiek 27 is het verloop van de relatieve vochtigheid aan de koude en warme zijde van de katoenisolatie te zien. Opnieuw levert de sensor foutieve waarden voor het bevochtigde compartiment 4 aan de koude zijde van de isolatie. Eerder werd verklaard dat dit mogelijks het gevolg is van

rechtstreeks contact met één of meerdere waterdruppels. Aangezien dit tweemaal op rij voorkomt, lijkt de kans op toeval eerder klein. Zo kan gesteld worden dat het water zich in dit geval voornamelijk gaat verspreiden naar de buitenkant van de isolatie. Aangezien er slechts meetgegevens beschikbaar zijn op één bepaalde hoogte, kan geen analyse gevormd worden over het afgelegde traject van het water. Wegens het (extreem) afwijkende verloop wordt het eerste stuk van de curve, na invoegen van het water, niet geplot. Dit is ook duidelijk te zien op Grafiek 28, dewelke het relatief vochtigheidsverschil weergeeft in functie van de tijd. Hierop is te zien dat ondanks het afwijkende verloop het verschil nagenoeg terug gelijk is aan de oorspronkelijke situatie voor bevochtiging. Echter blijft ook op het einde zich een grillig verloop voordoen, wat de betrouwbaarheid in twijfel trekt.

In eerste instantie is voor de relatieve vochtigheid aan de warme zijde van de isolatie een gelijkaardig verloop te zien als dat van houtwol. Ook hier is nagenoeg geen delay aanwezig en wordt het effect van de bevochtiging onmiddellijk waarneembaar. Andermaal wordt het grootste verschil in relatieve vochtigheid waargenomen na ongeveer 3,5 dagen en bedraagt dit 8 % (respectievelijk 56 % en 64%). Echter verloopt de droging op een verschillende manier. Zo wordt geconstateerd dat tien dagen na bevochtigen (rond 8 april) het verschil quasi volledig is weggewerkt. Dit is eenvoudig waar te nemen op Grafiek 28. Echter is de initiële toestand nog niet bereikt en verloopt de droging vanaf 8 april uiterst traag in vergelijking met de eerste 10 dagen. Zo kan vastgesteld worden dat het overgrote gedeelte aan vocht snel diffundeert uit de katoenisolatie, maar dat het laatste beetje zeer geleidelijk uit de katoenisolatie verdwijnt. De oorspronkelijke toestand wordt dus niet (volledig) bereikt na een droogperiode van 50 dagen.



Grafiek 27: Relatieve vochtigheid aan de koude en warme zijde van de katoenisolatie



Grafiek 28: Relatief vochtigheidsverschil aan de koude en warme zijde van de katoenisolatie

6.2.3.3 Gras

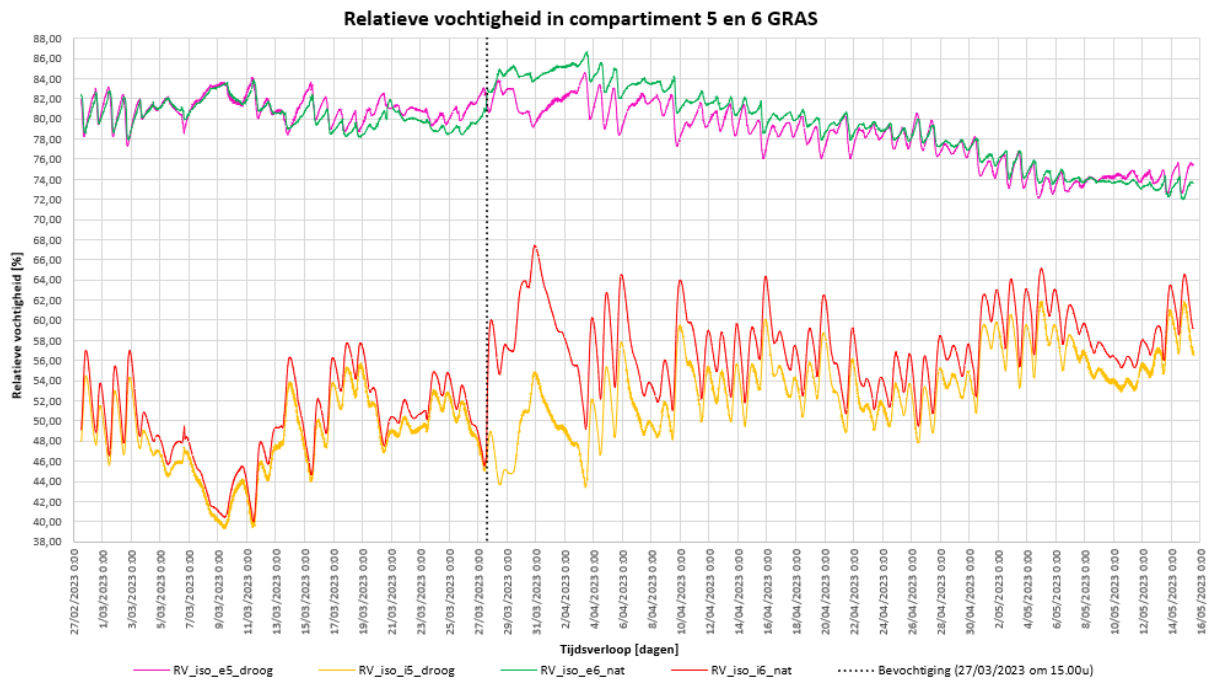
Grafiek 29 geeft het verloop van de relatieve vochtigheid aan de koude en warme zijde van de grasisolatie weer. Eerst en vooral worden ook realistische waarden bekomen aan de koude zijde van de isolatie in het natte compartiment. Opmerkelijk is dat de curves voor de RV aan de koude zijde van de isolatie rond 14 maart plots een klein verschil vertonen. Echter blijft het verschil binnen de meetnauwkeurigheid van de sensor van 3,5 %, waardoor dit als verwaarloosbaar beschouwd wordt.

Voor het tijdstip van bevochtiging loopt de curve van het natte compartiment 6 onder de curve van het droge compartiment 5. Op het moment van de bevochtiging wordt dit quasi onmiddellijk omgekeerd en loopt de groene curve boven de paarse. Opnieuw lijkt er geen sprake te zijn van een delay. In de eerste dagen na bevochtiging is het verschil in relatieve vochtigheid tussen beide compartimenten duidelijk waarneembaar, met een maximaal verschil van 4,5 %. Zowel op Grafiek 29 als op Grafiek 30 is te zien dat rond de periode van 12-15 mei het relatief vochtgehalte aan de koude zijde van de isolatie de oorspronkelijke toestand heeft bereikt. Met andere woorden heeft het ongeveer 48 dagen geduurd vooraleer het toegevoegde water het isolatiemateriaal volledig verlaten heeft.

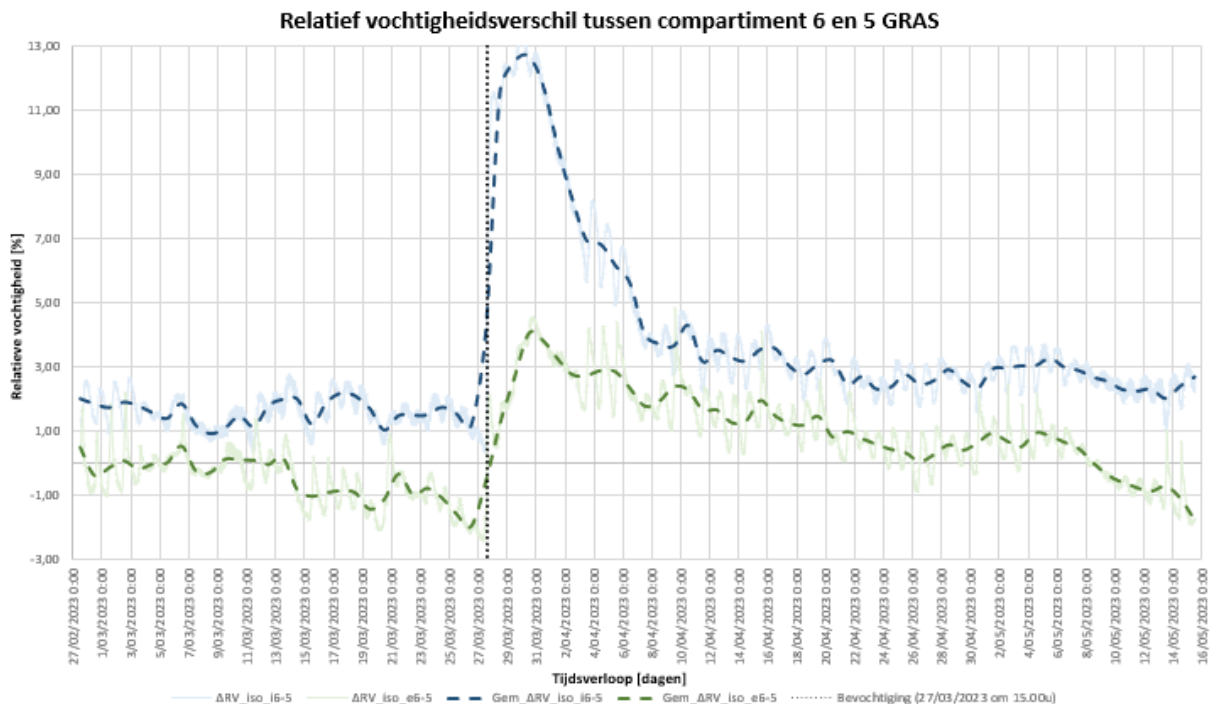
De relatieve vochtigheid aan de warme zijde van de isolatie stijgt meer dan de reeds beschreven isolatiematerialen na toevoeging van water. Aanvankelijk doet zich wel een relatief grote meetfout voor. Beide sensoren genereren een waarde die ongeveer 2 % van elkaar afwijken. Hiermee rekening houdend wordt een verschil waargenomen van 10 % als gevolg van de waterinfiltratie. Gedurende een periode van zo'n tien dagen wordt dit verschil gereduceerd en vindt dus een droging plaats. Vervolgens verloopt de uitdroging aan de binnenkant van de grasisolatie eerder langzaam. Rekening houdend met het initiële

verschil van 2 % RV wordt geconstateerd dat de oorspronkelijke toestand bereikt wordt na een tijdsperiode van ongeveer 48 dagen. Dit is dus op hetzelfde moment waarop de buitenkant van de isolatie is uitgedroogd.

Dit wil dus zeggen dat ter hoogte van de sensor – enkel en alleen hier – de oorspronkelijke toestand is bereikt. Dit betekent dat bijvoorbeeld in een hoger gelegen punt dicht bij de vochtbron de initiële toestand nog niet bereikt kan zijn. Kortom kan het zijn dat slechts een deel van het totale pakket aan grasisolatie volledig is uitgedroogd.



Grafiek 29: Relatieve vochtigheid aan de koude en warme zijde van de grasisolatie



Grafiek 30: Relatief vochtigheidsverschil aan de koude en warme zijde van de grasisolatie

6.2.3.4 Hennep

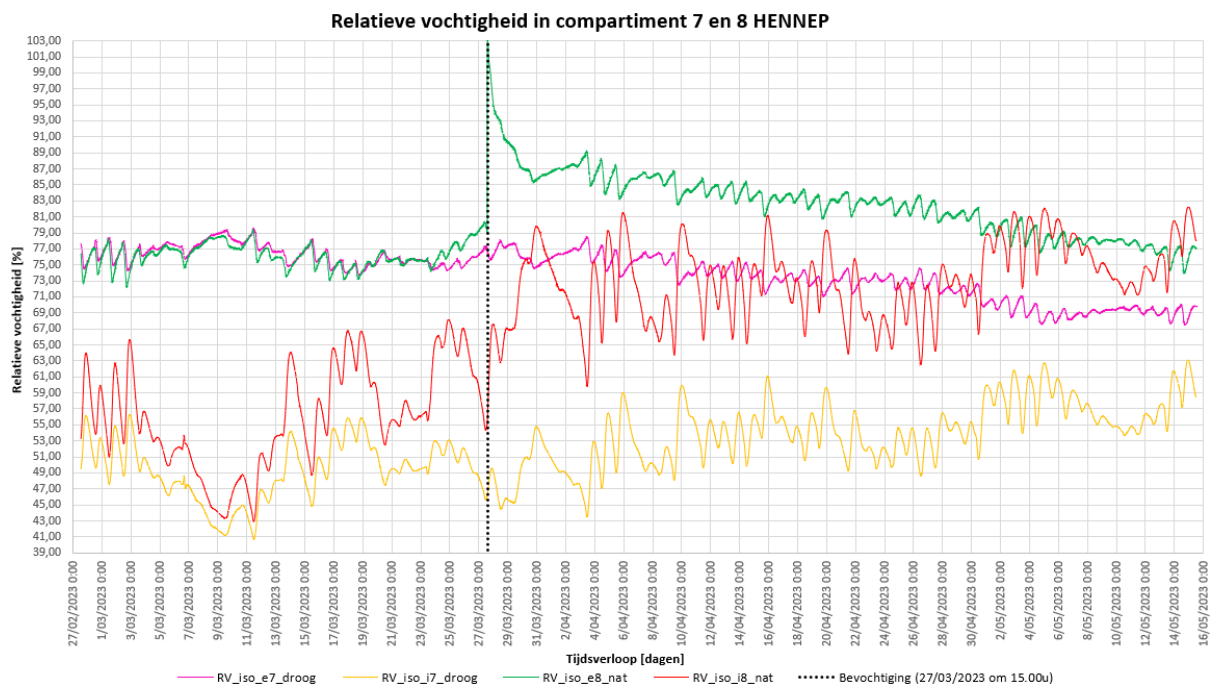
Het eerste wat de aandacht trekt op Grafiek 31 is dat zich vóór de bevochtiging een stijging voordoet in de curve van de RV aan de buitenkant van de hennepisolatie in het natte compartiment 8. Echter heeft dit een logische verklaring. Aanvankelijk werd een eerste poging ondernomen op 23 maart om de gewenste hoeveelheid van 0,5 l water in te brengen. Dit bleek geen sinecure te zijn met het materiaal dat op dat moment voor handen was en de poging werd gestaakt. Echter blijkt uit de resultaten dat toch een kleine hoeveelheid water geïnfiltreerd is in compartiment 8. In totaal is dus iets meer dan de berekende 0,5 l aan water geïnfiltreerd.

Verder is op Grafiek 32 te zien dat relatieve vochtigheid aan de buitenkant van de hennepisolatie onmiddellijk en met een enorme sprong de hoogte ingaat bij het natte compartiment 8 als gevolg van de vochtinfiltratie. De waarde voor de relatieve vochtigheid overstijgt zelfs even de maximale 100 %, wat betekent dat de lucht verzadigd is met waterdamp. Bijgevolg is de sprong niet volledig realistisch. Opnieuw kan aangenomen worden dat de sensor in direct contact is geweest met water, maar deze keer niet tilt is geslagen. Voor de eenvoud wordt uitgegaan van een maximale waarde gelijk aan 95 %. Vervolgens vindt een sterke daling plaats, gespreid over een periode van ongeveer 3,5 dagen. Eens het verschil in snel tempo teruggebracht is tot ongeveer 10 %, daalt de curve verder aan een opvallend traag tempo. Na het afronden van de meetcampagne is te zien dat de oorspronkelijke toestand voor het bevochtigen allerm minst bereikt is. Het verschil bedraagt namelijk nog steeds 8 %.

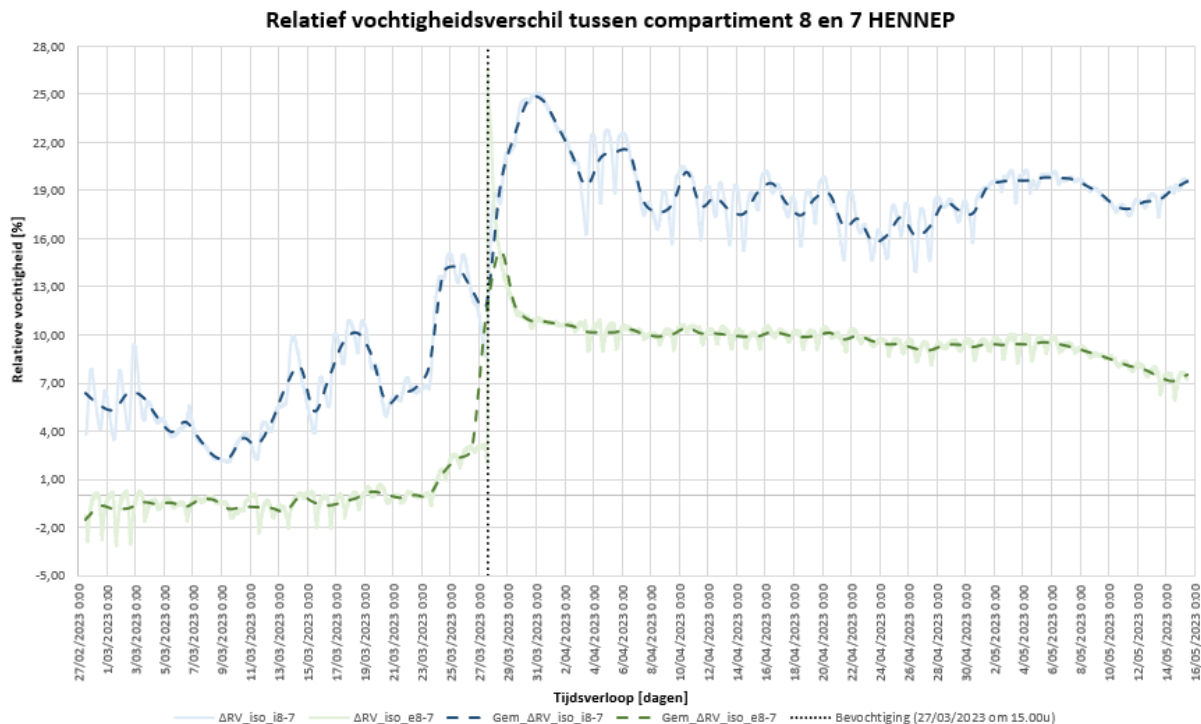
Aan de warme zijde van de hennepisolatie doen zich in vergelijking met alle andere curves buitenproportionele schommelingen voor. De aanvaardbare meetnauwkeurigheid van de sensoren

bedraagt slechts 3,5 %, terwijl zich hier soms een verschil van 8 % voordoet tussen beide curves in de referentieperiode. Via Meteoblue (2023) werd gecontroleerd of het in de periodes van 9, 14 en 17-23 maart – waarin het verschil tussen de curves maximaal is - frequent geregend heeft. Een uitvoerings- of ontwerpfout kan namelijk leiden tot accidentele vochtinfiltratie, wat kan verklaren waarom op deze tijdstippen het verschil toeneemt. Echter blijkt dat het tijdens die periode quasi niet geregend heeft. In de vorige meetcampagne, uitgevoerd door L. Lambrechts (2022), blijkt dit probleem zich niet te stellen. Er is hiervoor dus geen onderbouwde verklaring te vinden.

Desalniettemin is wel duidelijk waarneembaar dat op het moment van bevochtiging de relatieve vochtigheid stijgt aan de binnenkant van de hennepisolatie in het natte compartiment 8. Andermaal is geen sprake van een delay. Vervolgens doet zich hetzelfde verloop voor als aan de buitenkant van de hennepisolatie. Eens het maximaal relatief vochtigheidsverschil is bereikt, daalt het verschil snel met ongeveer 5 % over een tijdsverloop van ongeveer 5 à 6 dagen. Vervolgens blijft het verschil schommelen rond de 19 %, inclusief het initiële verschil voor de bevochtiging. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het drogingsproces absoluut nog niet voltooid is na een droogperiode van 50 dagen.



Grafiek 31: Relatieve vochtigheid aan de koude en warme zijde van de hennepisolatie

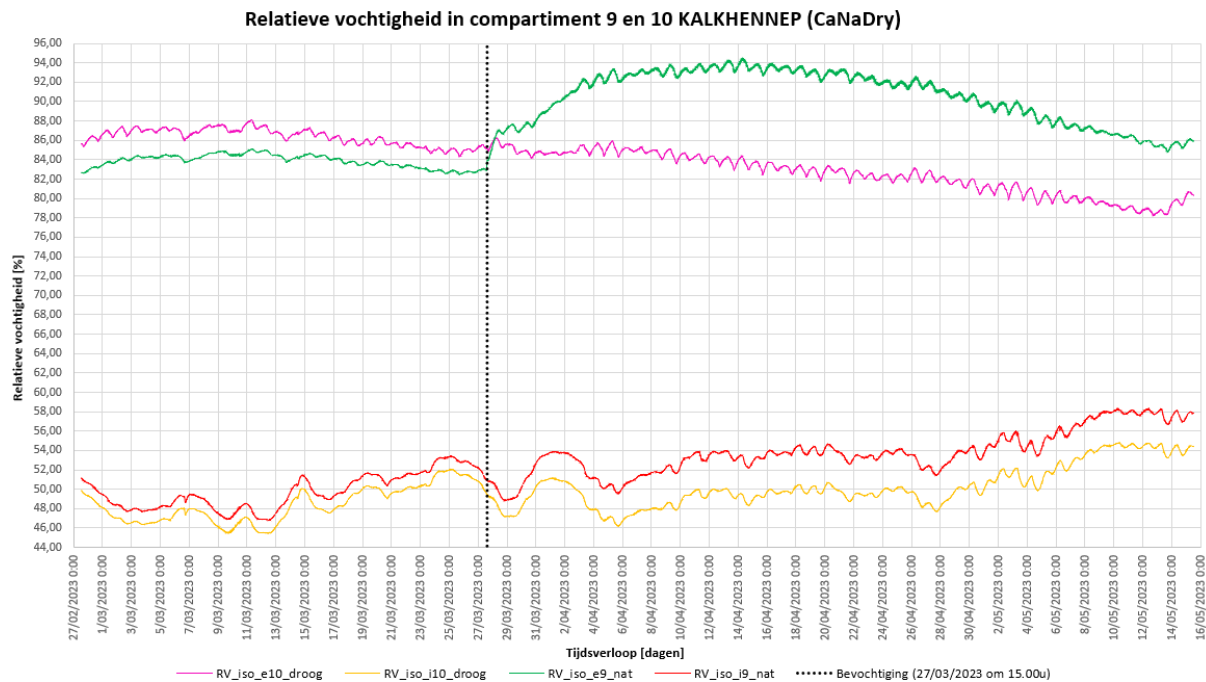


Grafiek 32: Relatief vochtigheidsverschil aan de koude en warme zijde van de hennepisolatie

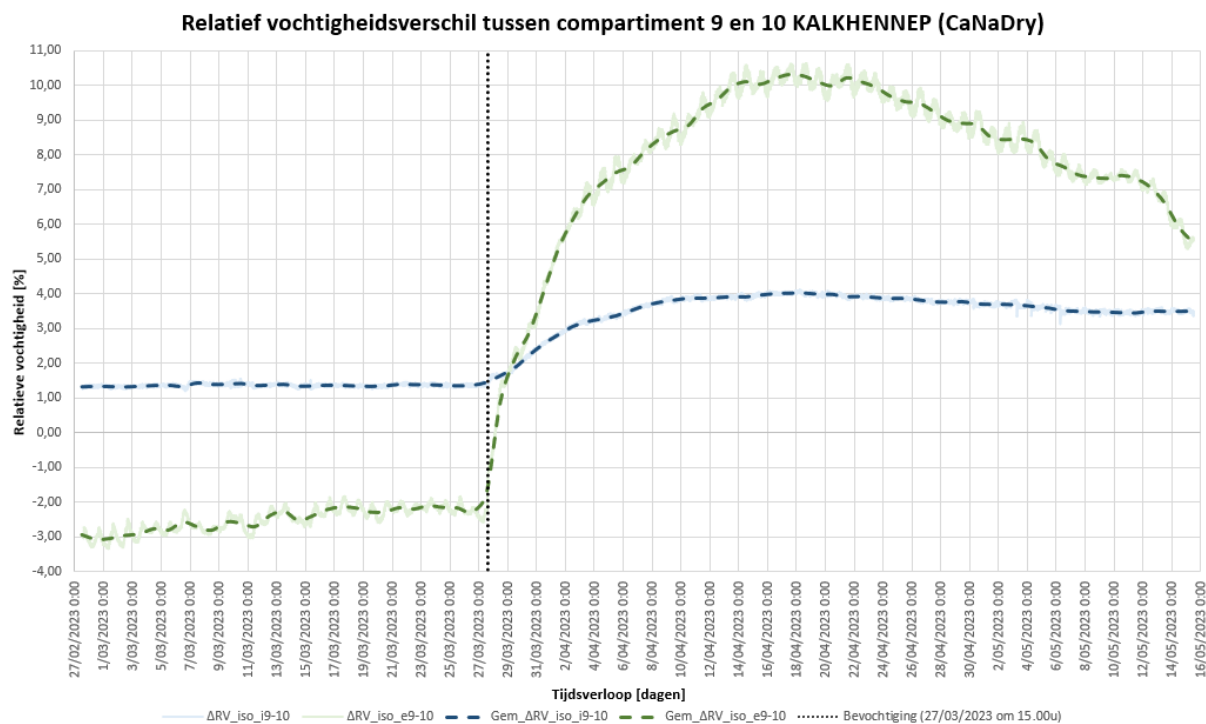
6.2.3.5 Kalkhennep (CaNaDry)

Indien Grafiek 33 grondig geanalyseerd wordt, is te zien dat de maximale relatieve vochtigheid pas bereikt wordt na een tijdspanne van 21 dagen na bevochtigen. De stijging is des te opvallender bij de kalkhennepcompartimenten door de nadelige oriëntatie. Eens de maximale waarde (18 april) is bereikt, startte een zonnige periode. Echter verloopt het drogingsproces zeer geleidelijk. Dit is enerzijds het gevolg van de lagere (buiten)temperatuur aan het buitenoppervlak van de kalkhennepisolatie, en anderzijds van de specifieke eigenschappen die gepaard gaan met de gestorte kalkhennepisolatie. Er is dus totaal nog geen sprake van volledige uitdroging na een periode van 50 dagen.

Om een beter beeld te kunnen krijgen van het effect van de bevochtiging, wordt Grafiek 34 opgesteld. Hierop is duidelijk te zien dat er wel degelijk een verschil optreedt aan de warme zijde van de isolatie, weliswaar eerder beperkt. Naast het feit dat er slechts een maximaal verschil van 2,5 % waarneembaar is, is ook de tijdspanne, nodig voor het bereiken van dit maximale verschil, relatief lang. Pas na 22 dagen komt dit verschil tot stand, wat doet vermoeden dat de gestorte kalkhennep het vocht goed buffert en traag vrijgeeft. Vanaf dit moment neemt het verschil langzaam terug af. Na een totale droogperiode van 50 dagen kan gesteld worden dat de initiële situatie allerm minst bereikt is. Dat de droging in vergelijking met enkele andere materialen relatief traag verloopt, kan deels te wijten zijn aan het feit dat de buitentemperatuur lager ligt aan de korte mobiele wand. Ontegensprekelijk speelt de buitentemperatuur een rol in het drogingsproces.



Grafiek 33: Relatieve vochtigheid aan koude en warme zijde van kalkhennepisolatie (CaNaDry)



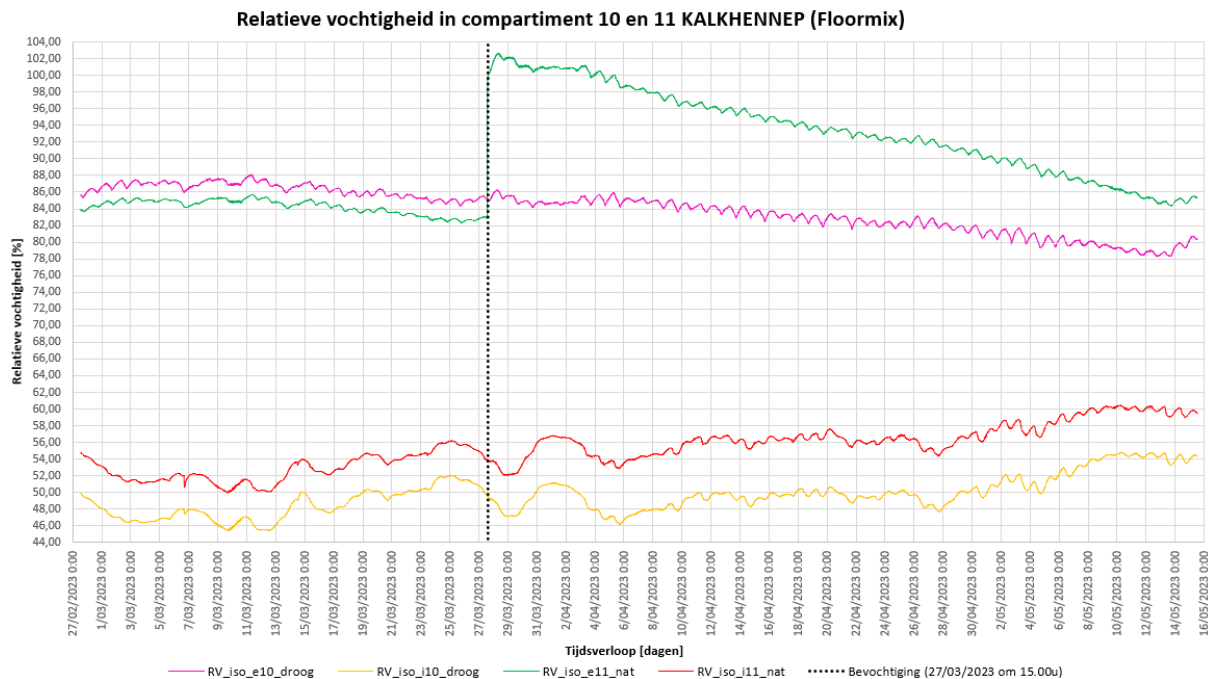
Grafiek 34: Relatief vochtigheidsverschil aan koude en warme zijde kalkhennepisolatie (CaNaDry)

6.2.3.6 Kalkhennep (Floormix)

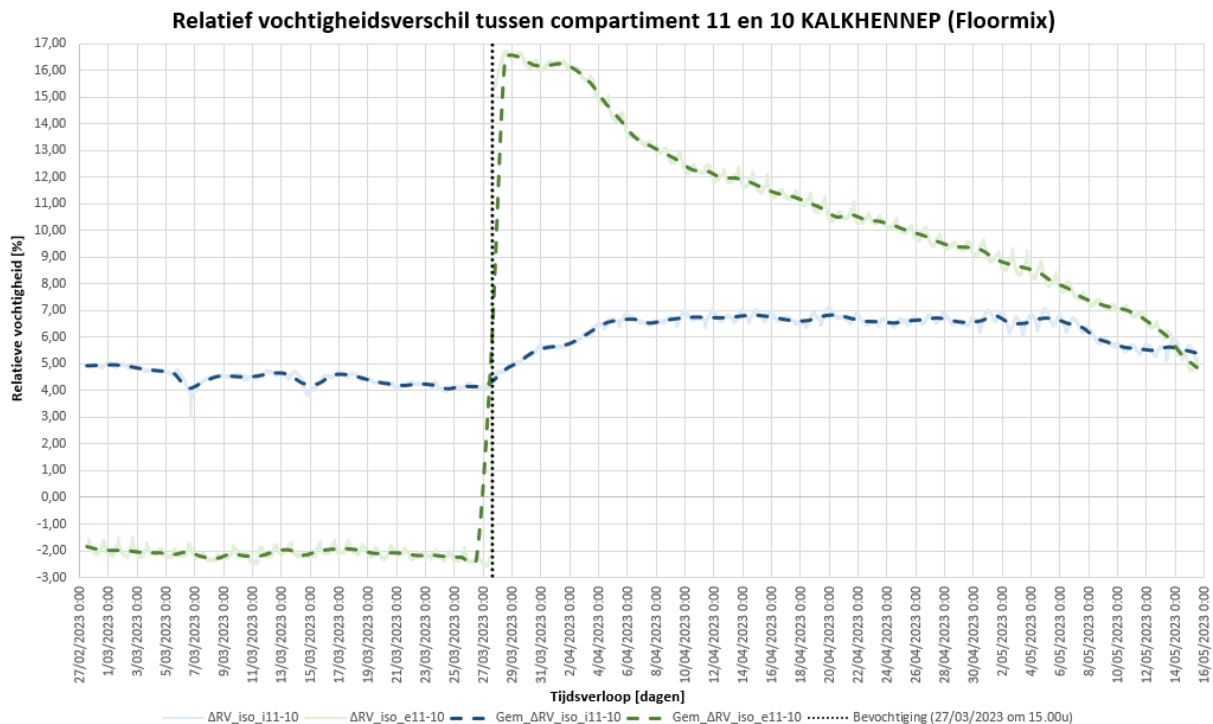
De resultaten met betrekking tot de relatieve vochtigheid aan de buitenzijde van de gestorte Floormix (zie Grafiek 35) staan in contrast met de resultaten van CaNaDry (zie Grafiek 33). Er wordt verwacht dat ook hier zich een trage stijging zou voordoen omwille van de vochtbuffering van het materiaal. Echter is dit niet het geval en worden de trends van de eerste isolatiematerialen terug waargenomen. Een verklaring voor het afwijkende gedrag – in vergelijking met CaNaDry- kan toe te wijzen zijn aan het

feit dat het gaat om gestorte of ingeblazen isolatie. Dergelijke soort van isolatie gaat zich na verloop van tijd zetten. Dit kan ook gepaard gaan met een vorm van 'scheurvorming', waardoor er kanaaltjes ontstaan in de isolatie. Hierdoor kan het vocht zich aan een ijl tempo diffunderen langsheen dergelijke kanaaltjes. Zo kan de sensor door toedoen van deze kanaaltjes in rechtstreeks contact gekomen zijn enkele waterdruppels. Dit zorgt ervoor dat de relatieve vochtigheid snel tot boven de 100 % gaat stijgen. Opnieuw is dit in werkelijkheid niet mogelijk, de reden hiervoor is eerder beschreven. Vervolgens wordt wel dezelfde evolutie waargenomen in vergelijking met CaNaDry. Zo neemt de relatieve vochtigheid wel terug af maar gebeurt dit traag en wordt de oorspronkelijke toestand opnieuw nog niet bereikt na een droogperiode van 50 dagen.

In tegenstelling tot de relatieve vochtigheid aan de buitenzijde van de kalkhennepisolatie (Floormix), doet zich identiek hetzelfde voor als bij CaNaDry aan de binnenzijde van de kalkhennepisolatie op vlak van relatieve vochtigheid. Andermaal dient Grafiek 36 in rekening gebracht te worden om het effect waar te kunnen nemen. Ook hier wordt de initiële toestand niet opnieuw bereikt.



Grafiek 35: Relatieve vochtigheid aan koude en warme zijde van kalkhennepisolatie (Floormix)



Grafiek 36: Relatief vochtigheidsverschil aan koude en warme zijde kalkhennepisolatie (Floormix)

6.2.3.7 Vergelijking van alle compartimenten op vlak van de relatieve vochtigheid

Gedurende de gehele meetcampagne ligt de relatieve vochtigheid voor de compartimenten in de korte wand hoger. Dit kan logisch verklaard worden door de oriëntatie van de korte zijde die quasi geen direct invallend zonlicht ontvangt. Door het omgekeerd evenredig verband tussen de temperatuur en relatieve vochtigheid, leidt dit dus tot een hogere hoeveelheid aan waterdamp. Dit komt uiteraard het droogproces van de gestorte kalkhennep isolatie niet ten goede. Dit verklaart deels waarom de gestorte kalkhennepisolatie uitermate traag uitdroogt en na een droogperiode van 50 dagen de initiële toestand nog niet bereikt heeft.

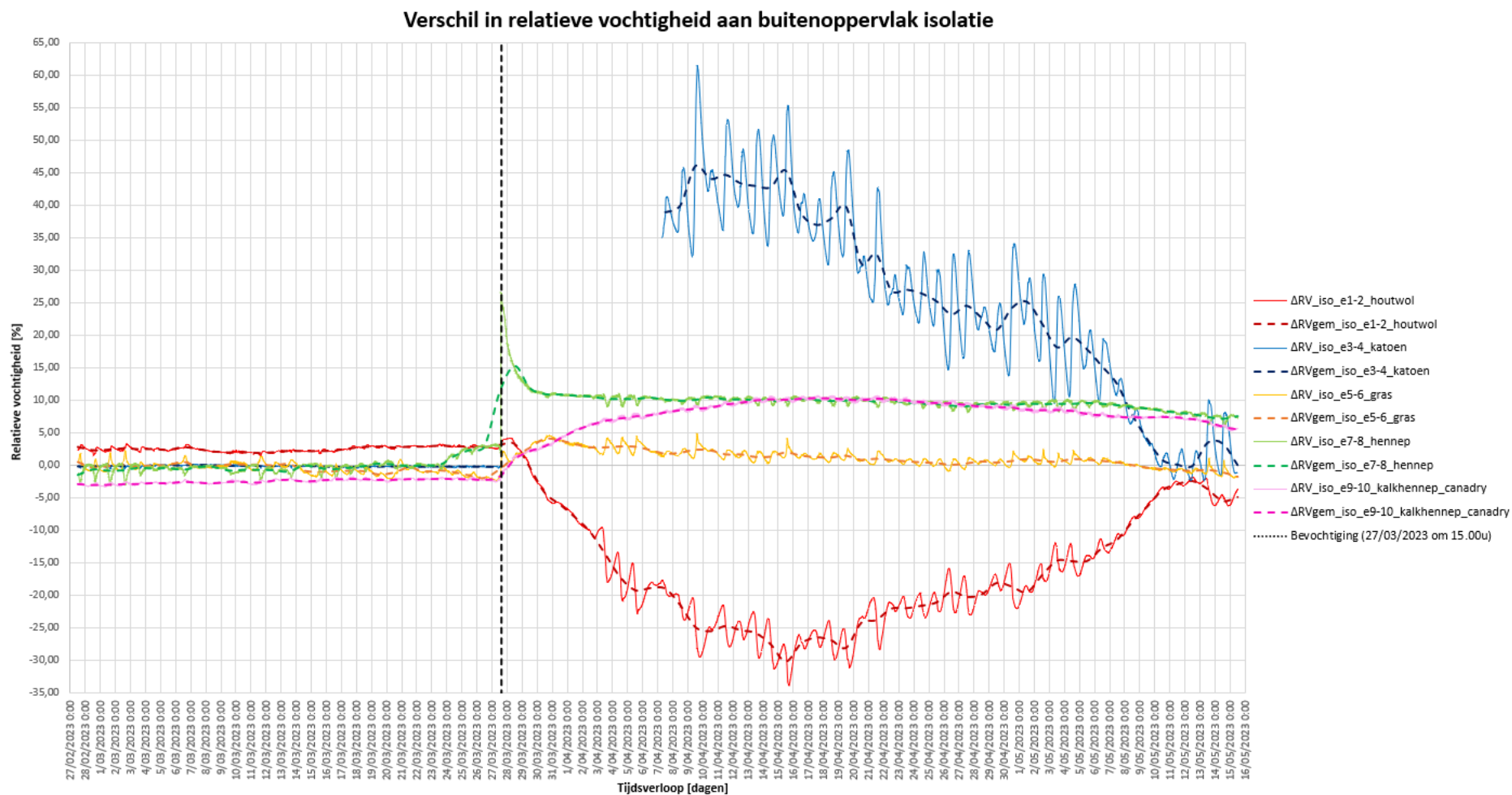
Uit de analyse blijkt dat de gestorte kalkhennep in de korte wand relatief traag terugkeert naar de situatie voor bevochtiging (zie ook Grafiek 33). De gestorte kalkhennep heeft namelijk een relatief hoge densiteit, waardoor het over het algemeen in theorie meer vocht kan bufferen. Echter kan dit ook een negatief effect hebben op het drogingsproces. Het neemt namelijk meer tijd in beslag vooraleer het vocht volledig kan verdampen. Bijkomstig kan een hogere densiteit de luchtstroom beperken, waardoor de verdampingssnelheid vertraagt. Op deze manier kan verklaard worden waarom de gestorte kalkhennepisolatie over het algemeen trager terugkeert naar de oorspronkelijke situatie in vergelijking met de isolatiematten die doorgaans een lagere densiteit hebben. Eveneens ligt dit aan de basis van het minder schommelende verloop. De isolatiematten kunnen het vocht dus sneller afvoeren.

Kortom kan gesteld worden dat na blootstelling aan een bepaalde hoeveelheid water, het water zich voor de isolatiematerialen op een verschillende manier gaat diffunderen. In gestorte isolatie (9-11) wordt het

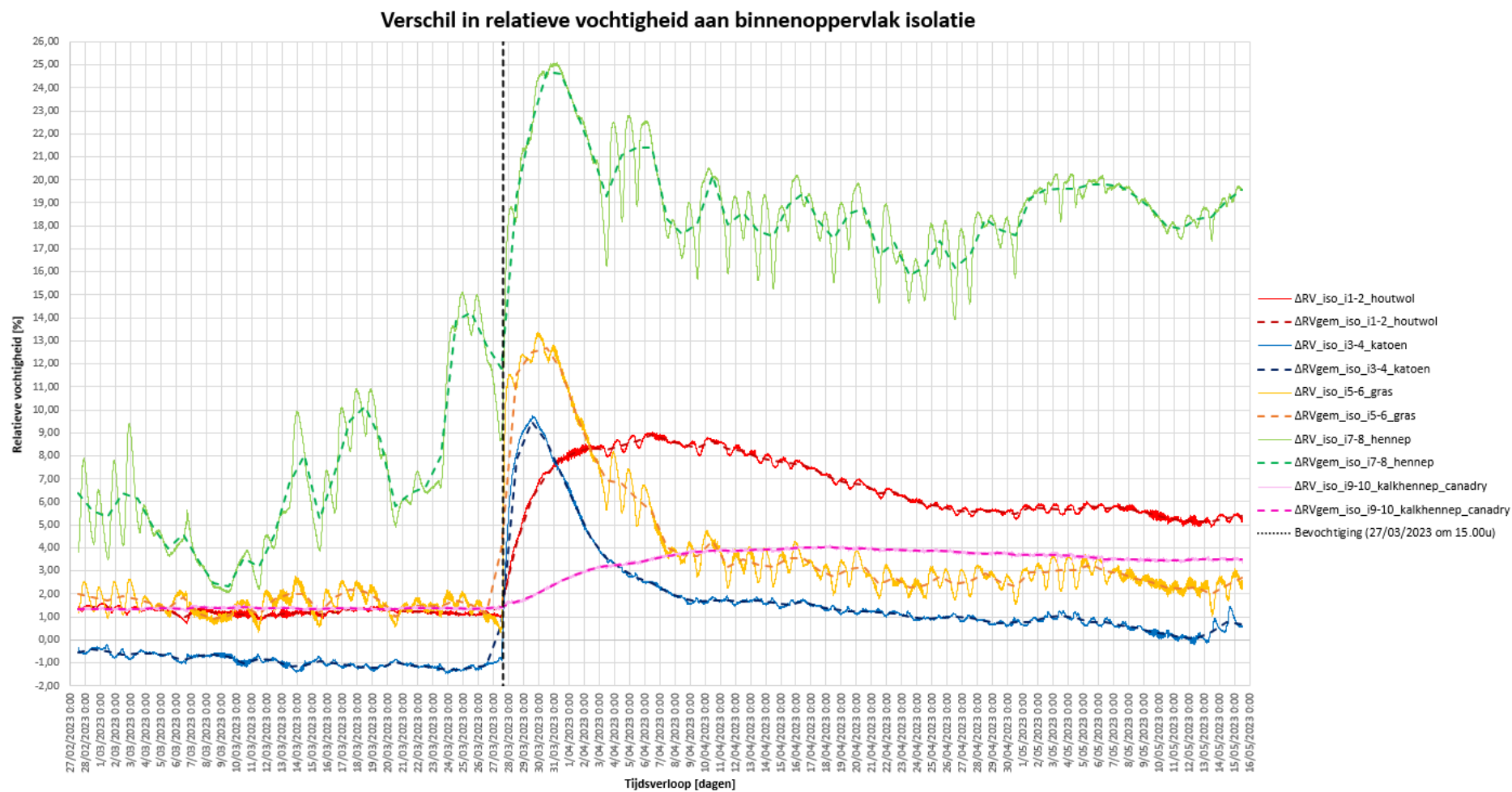
vocht lokaal gebufferd en verspreidt het zich dus traag en over een relatief klein volume. Bij isolatiematten (1-8) daartegenover verloopt dit veel sneller. Door de grote spreiding – en dito snellere en grotere stijging van de RV ter hoogte van de sensoren – kan het droogproces onmiddellijk van start gaan. Zo wordt de begintoestand relatief snel opnieuw bereikt en is het water volledig verwijderd uit het compartiment.

Indien de vergelijking gelegd wordt tussen het binnen- en buitenoppervlak, wordt algemeen een grotere stijging in de relatieve vochtigheid waargenomen aan de koude zijde van de isolatie. Dit wijst erop dat het water zich voornamelijk verspreidt naar de buitenkant toe. Dit kan het gevolg zijn van de plaatsing van de infiltratiebuisjes, die mogelijks niet voldoende diep in de isolatie zijn aangebracht. Dit fenomeen wordt in de verf gezet doordat de sensor in het natte compartiment van houtwol en katoen tilt slaat kort na de bevochtiging. Het water verplaatste zich naar alle waarschijnlijkheid in ijl tempo tot op het niveau van de sensor. Dit bevestigt andermaal de hypothese dat het vocht zich vrijwel onmiddellijk verspreidt over een groot volume bij de isolatiematten.

Het enige materiaal waarvoor geconcludeerd kan worden dat de initiële toestand terug is bereikt, is grasisolatie. Zowel op Grafiek 37 als op Grafiek 38 is te zien dat het verschil voor de relatieve vochtigheid aan beide kanten van de isolatie even groot is als dit voorafgaand aan de bevochtiging. Dit betekent dus dat ter hoogte van de sensor – en dus enkel hier – kan gesteld worden dat de grasisolatie volledig is uitgedroogd. Weliswaar nam dit welgeteld 48 dagen in beslag. Een algemeen besluit omtrent de buffereigenschap van de verschillende biogebaseerde materialen staat verder in het verslag vermeld



Grafiek 37: Relatief vochtigheidsverschil aan koude zijde van de isolatie voor alle compartimenten



Grafiek 38: Relatief vochtigheidsverschil aan warme zijde v.d. isolatie voor alle compartiment

6.2.4 Dampdruk

De dampdruk is relevant aangezien het afhangt van zowel de temperatuur als de hoeveelheid waterdamp aanwezig in de lucht. Hoe hoger de dampdruk, hoe meer waterdamp in de lucht en dus hoe hoger het vochtgehalte. Het verschaft dus iets meer informatie over het absoluut vochtgehalte.

Echter wordt niet opnieuw in detail ingegaan op elk afzonderlijk onderdeel, aangezien zowel de temperatuur en zeker de relatieve vochtigheid reeds uitgebreid aan bod kwamen. De dampdruk is namelijk afhankelijk van deze twee grootheden. Zodoende wordt enkel uitgebreid ingegaan op compartimenten 9 en 10, waar elke sensor realistische waarden genereert en het verloop binnen de lijn van de verwachtingen ligt. De overige grafieken, van toepassing op elk specifiek isolatiemateriaal, worden toegevoegd als Bijlage C. Vervolgens wordt wel een algemene vergelijking gelegd tussen alle compartimenten om de voornaamste verbanden en bijhorende verklaringen neer te schrijven.

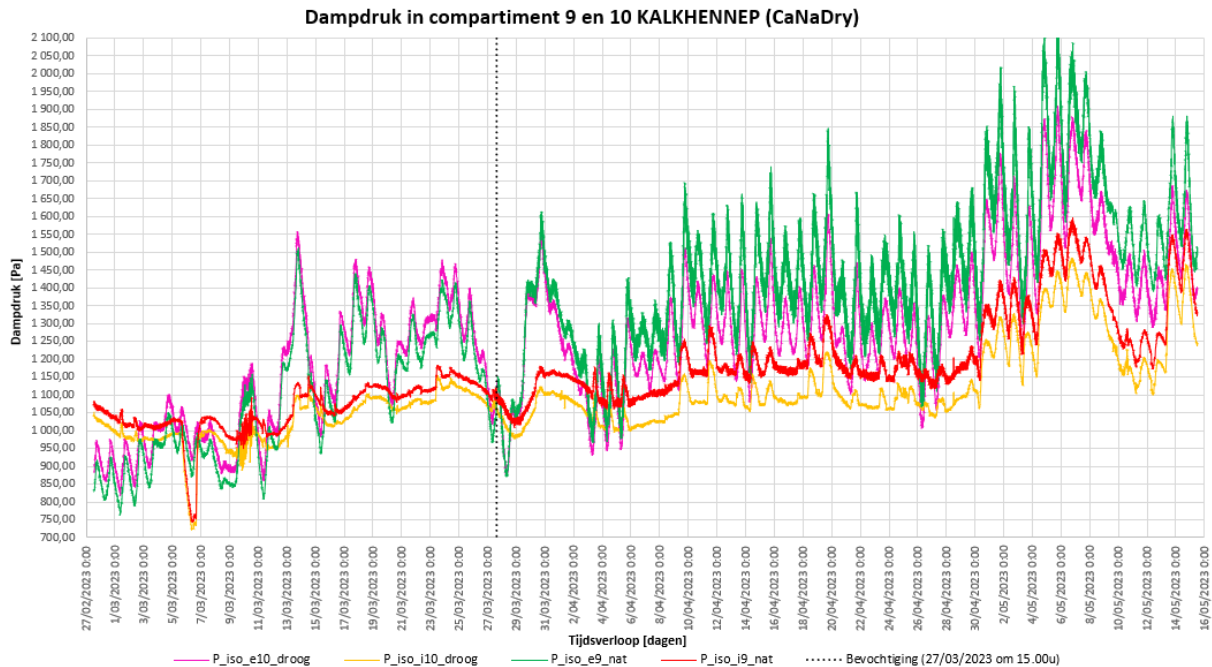
6.2.4.1 Kalkhennep (CaNaDry)

Voor de bespreking wordt andermaal gebruik gemaakt van twee grafieken. Op Grafiek 39 is de dampdruk in functie van de tijd weergegeven. Hierbij is het van belang om extra te benadrukken dat compartiment 9 – dus het laagste cijfer - het natte compartiment voorstelt. Bijkomstig wordt het dampdrukverschil ook weergegeven op Grafiek 40.

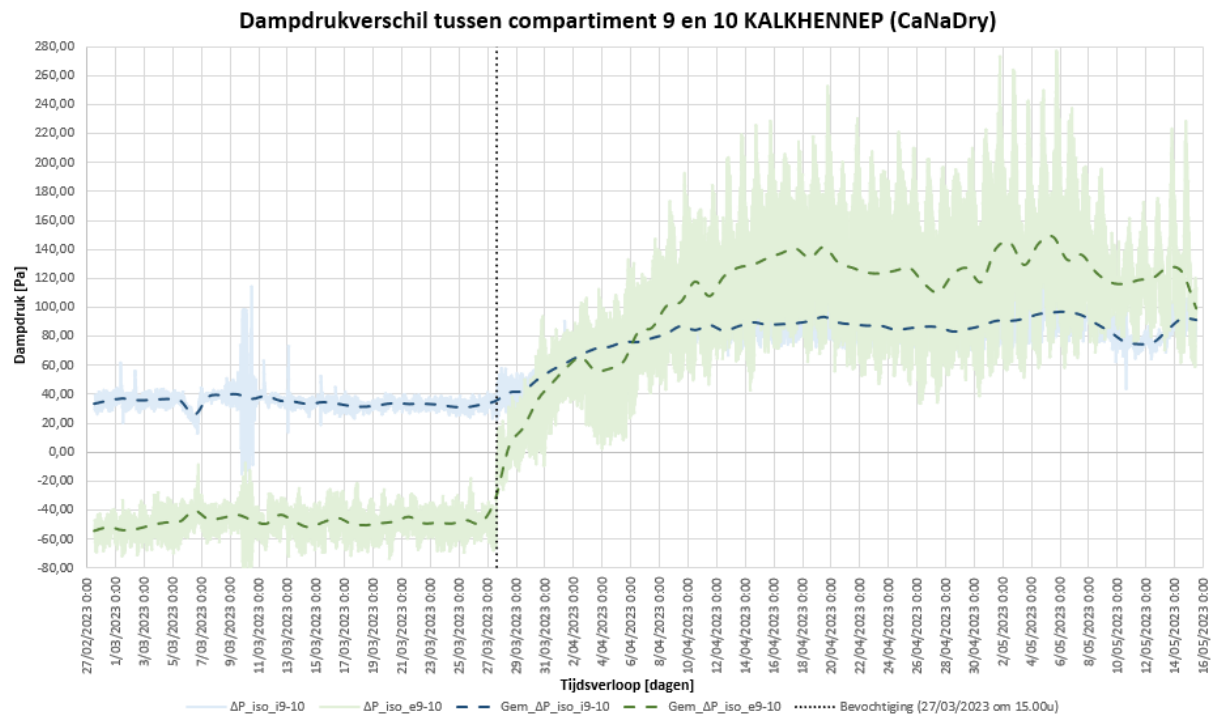
Op moment van bevochtiging schiet de dampdruk aan de buitenkant van de kalkhennepisolatie (CaNaDry), gekoppeld aan het natte compartiment, de hoogte in. Waar de groene curve ($P_{iso_e9_nat}$) zich in de referentieperiode onder de roze curve ($P_{iso_e10_droog}$) bevindt, stijgt de dampdruk in het natte compartiment tot een stuk boven de dampdruk in het droge compartiment. De dampdruk aan de buitenkant van het natte compartiment 9 stijgt met ongeveer 170 Pa ten opzichte van het droge compartiment 10. Dit komt overeen met wat zich voordoet op vlak van de temperatuur en de relatieve vochtigheid. Respectievelijk werd (vereenvoudigd) een constante temperatuur waargenomen en schiet de relatieve vochtigheid sterk de lucht in. Beide gecombineerd zorgt voor een toename van de dampdruk.

Aan de binnenkant van de kalkhennepisolatie is het effect van de bevochtiging op de dampdruk minder groot. Desalniettemin is ook een duidelijke toename van de dampdruk waarneembaar in het natte compartiment 9. Dit wordt geïllustreerd door Grafiek 40, waar zich een stijgende trend voordoet in de curve onmiddellijk na het moment van bevochtigen. Dit wijst erop dat het water zich langzaam verspreidt in het materiaal in de richting van het binnenoppervlak waardoor de dampdruk geleidelijk aan stijgt tot een maximale toename van ongeveer 55 Pa. Dit is het rechtstreekse gevolg van de goede vochtbuffering van de kalkhennepisolatie.

Kortom verschaft de dampdruk een beeld van het absolute vochtgehalte door zowel de relatieve vochtigheid als de temperatuur in rekening te brengen. Dezelfde conclusie kan gesteld worden als bij de analyse van de relatieve vochtigheid. De initiële toestand is allerm minst opnieuw bereikt na een droogperiode van 50 dagen.



Grafiek 39: Dampdruk aan de koude en warme zijde van de kalkhennepisolatie (CaNaDry)



Grafiek 40: Dampdrukverschil aan de koude en warme zijde van de kalkhennepisolatie (CaNaDry)

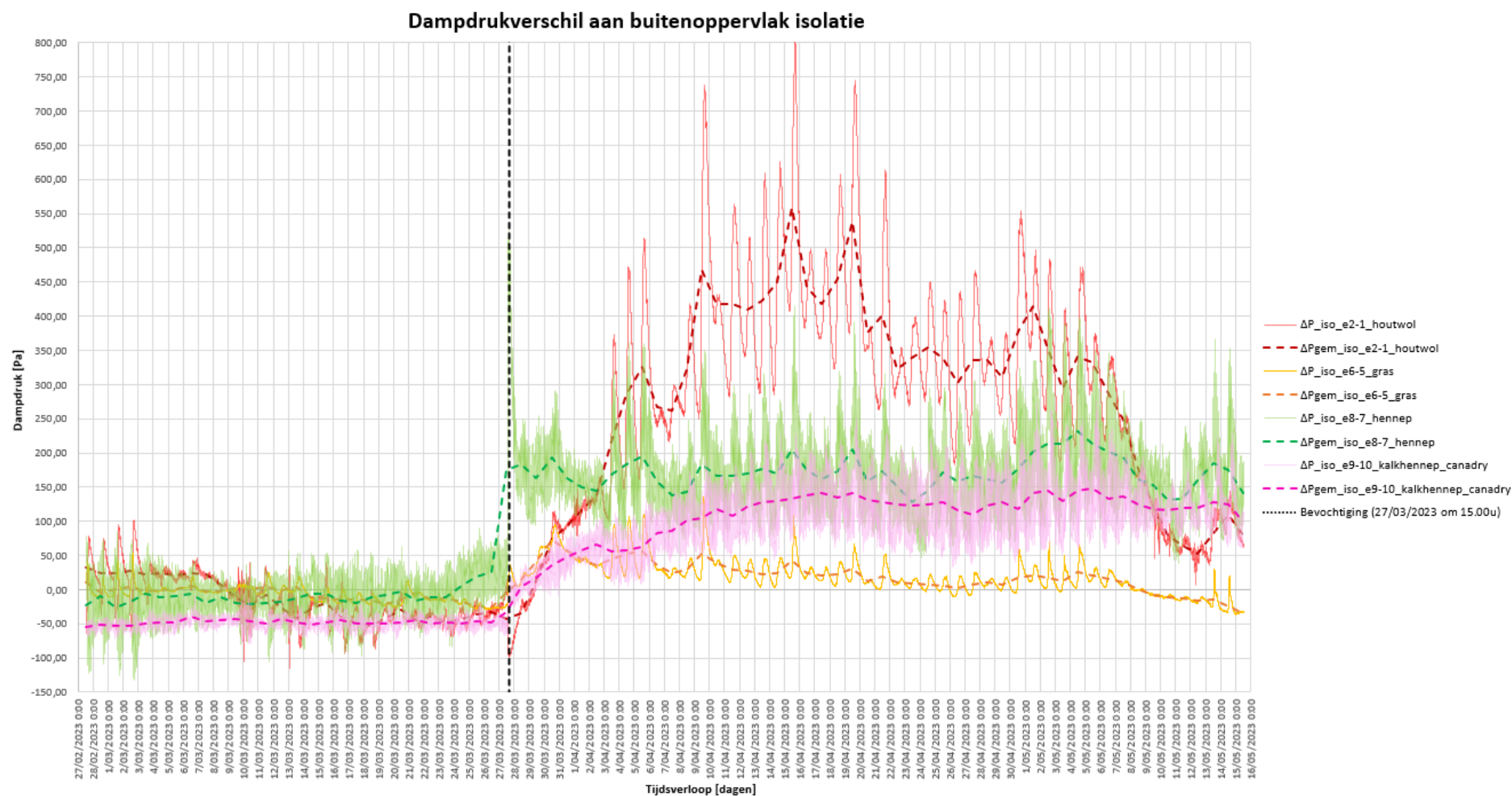
6.2.4.2 Vergelijking van alle compartimenten op vlak van de dampdruk

De algemene trends en conclusies, beschreven in paragraaf 6.2.3.7, zijn ook van toepassing op de dampdruk. Desalniettemin wordt het dampdrukverschil tussen het natte en droge compartiment aan de buitenkant van elk isolatiemateriaal overzichtelijk geplot op Grafiek 41 en Grafiek 42. Hierbij is ter bepaling voor de dampdruk aan de buitenkant van de grasisolatie in compartiment 5 gebruik gemaakt van de temperatuur voor compartiment 6 om de foutieve meting op te vangen. Bijkomend wordt het dampdrukverschil aan de buitenkant van de katoenisolatie buiten beschouwing gelaten wegens foutieve meetwaarden. Algemeen kan verwacht worden dat de dampdrukverschillen aan de koude en warme zijde van de isolatie gaan toenemen na de bevochtiging tot een maximaal punt, waarna het droogproces gestart wordt.

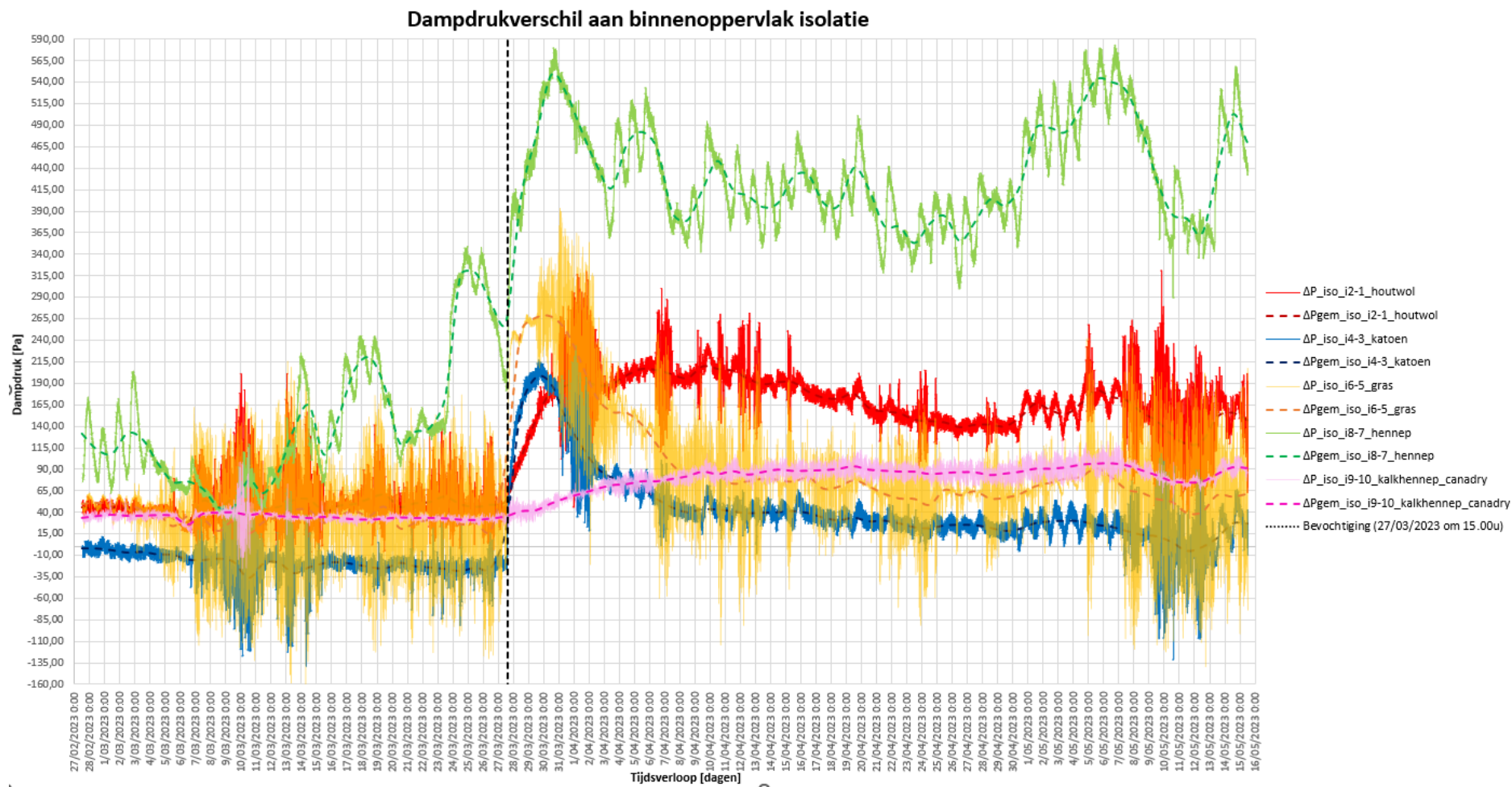
De dampdruk kan aanzien worden als een maatstaaf voor de druk die wordt uitgeoefend door waterdamp in een afgesloten ruimte. Een isolatiemateriaal met een hogere buffercapaciteit is dus in staat het vocht beter op te nemen en eveneens vast te houden, en het terug af te geven wanneer de omstandigheden dit vereisen. Alle isolatiematerialen vertonen dus een zekere vorm van vochtbuffering, aangezien geen enkel materiaal het vocht even snel vrijgeeft als dat het opgenomen wordt.

Over het algemeen wordt vastgesteld dat de toename in de dampdruk voor elk isolatiemateriaal, met uitzondering van gras, groter is aan de koude zijde van de isolatie. Daarnaast is eveneens de stijging van de dampdruk, en in alle gevallen ook de relatieve vochtigheid, het grootst aan de koude zijde van de isolatie, behalve voor gras. Voor gras wordt namelijk geconstateerd dat de dampdruk (net zoals de relatieve vochtigheid) aan het binnenoppervlak het grootst wordt. Dit kan verklaren waarom enkel de grasisolatie, binnen een droogperiode van 50 dagen, volledig uitgedroogd is. Doordat het water zich grotendeels aan de warme zijde van de isolatie bevindt, wordt het droogproces versneld doordat de gemiddelde dagtemperatuur ongeveer 7 °C hoger ligt dan aan de koude zijde van isolatie.

Indien de isolatiematten enerzijds en de gestorte kalkhennep anderzijds vergeleken worden, kan andermaal vastgesteld worden dat het maximale dampdrukverschil vrij laat bereikt wordt. Waar het dampdrukverschil bij de isolatiematten onmiddellijk de hoogte inschiet, is dit allerm minst het geval bij de ingestorte kalkhennep. Dit wijst erop dat kalkhennep het vocht uitermate goed kan reguleren en kan een rechtstreeks gevolg zijn van de hogere dichtheid. Na verloop van tijd verspreidt het vocht zich over het compartiment, waardoor de grote verschillen in dampdruk eerder beperkt blijven. Door de trage vrijgave van het vocht is ook een langere droogperiode vereist. De initiële toestand is namelijk nog helemaal niet terug bereikt. Hetzelfde kan gezegd worden – weliswaar in mindere mate – over houtwol- en hennepisolatie in vergelijking met de andere twee soorten isolatiematten.



Grafiek 41: Dampdrukverschil aan koude zijde van alle isolatiematerialen



Grafiek 42: Dampdrukverschil aan warme zijde van alle isolatiematerialen

6.2.5 Warmtestroom

De warmtestroom doorheen een isolatiemateriaal is een maat voor de warmteoverdracht of de -flux doorheen het materiaal. De zin van de warmtestroom is afhankelijk van de temperatuur aan beide kanten van de isolatie. Het spreekt voor zich dat getracht wordt om de warmtestroom zo laag mogelijk te houden. In wat volgt, wordt kort besproken welk verloop zich voordoet.

De analyse wordt opnieuw uitgevoerd door middel van grafieken waarbij de warmtestroom wordt weergegeven in functie van de tijd. Verder is het aangewezen om een tweede grafiek te plotten die het warmtestroomverschil weergeeft tussen het droge en natte compartiment. Zo kan achterhaald worden of effectief een invloed wordt uitgeoefend door het geïnfiltreerde vocht op de warmtestroom ter hoogte van de sensor. Hierbij zijn de gegevens omwille van de interne klok van de DaqPro met 18 uren opgeschoven. Dit wil zeggen dat het volledige pakket aan gegevens ten opzichte van de tijd-as 18 uren achterloopt. Echter geeft dit geen invloed op de resultaten.

Zoals reeds vermeld in paragraaf 6.2.2 werd de temperatuurgradiënt ΔT tussen de warme en koude zijde van de isolatie ook geplot. Beide zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden: als er een verschil optreedt in de warmtestroom, moet er hoe dan ook een temperatuurverschil optreden.

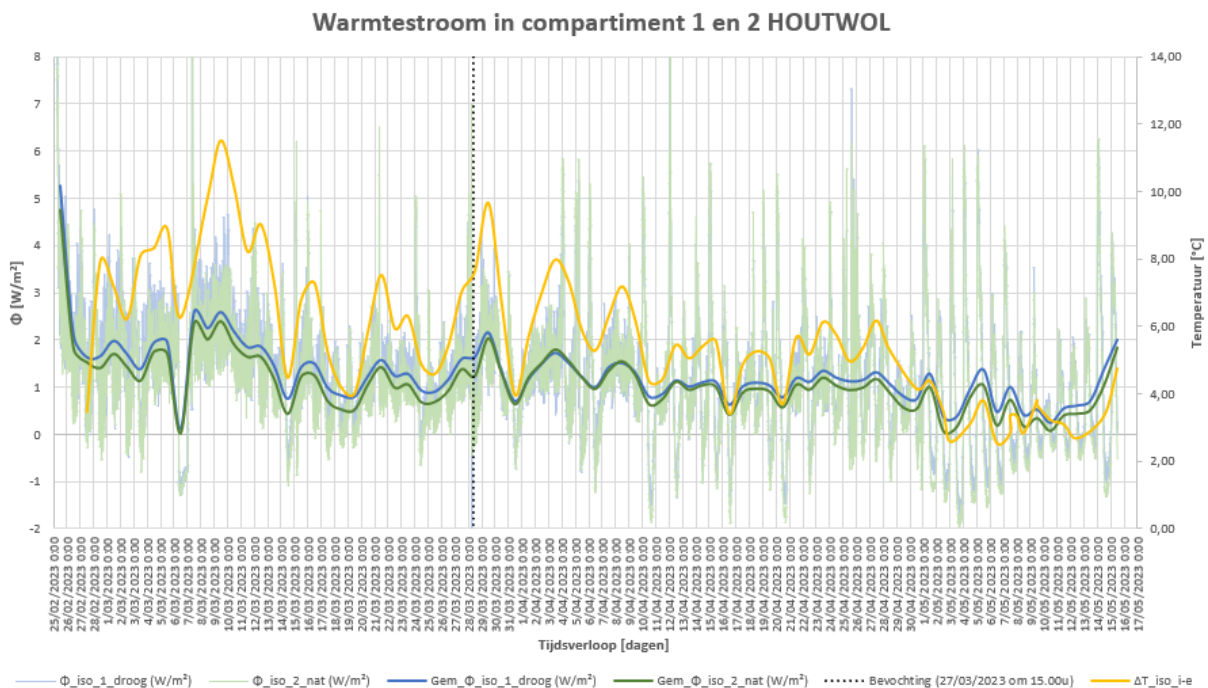
6.2.5.1 Houtwol

Grafiek 43 geeft het verloop van de warmtestroom doorheen de houtwolisolatie weer in functie van de tijd. In de referentieperiode verloopt de warmtestroom grotendeels van binnen naar buiten, doordat het overgrote deel van de waarden positief is. Op 6 maart is een opmerkelijk daling te zien. Dit komt doordat de verwarming die dag is uitgevallen en de Mobble binnenin volledig is afgekoeld.

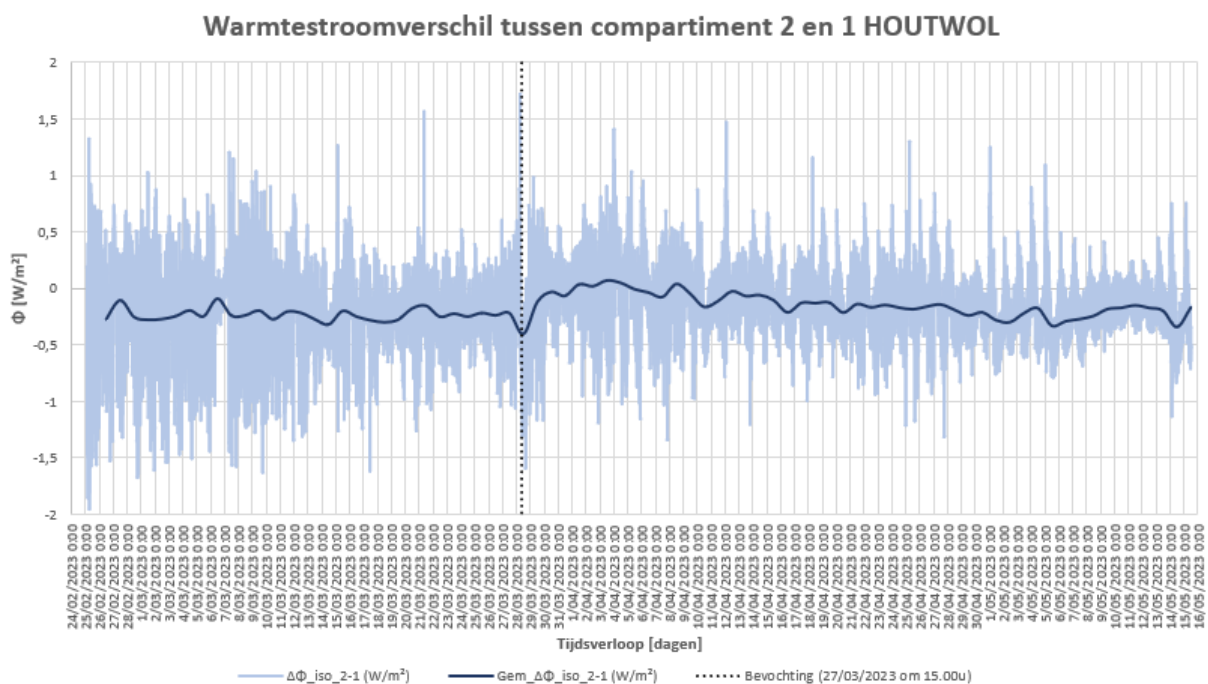
Hierop is ook te zien dat naarmate de tijd toeneemt, de warmtestroom kleiner wordt en frequent negatieve waarden aanneemt. Dit komt doordat de buitentemperatuur toeneemt, waardoor het temperatuurverschil tussen binnen en buiten kleiner wordt. Bijkomstig zijn grote (positieve) pieken waarneembaar in de resultaten. Dit komt doordat het temperatuurverschil in de nacht veel groter is dan overdag. Over de volledige meetperiode worden dus grotere warmtestromen vastgesteld 's nachts dan overdag. Verder wordt opgemerkt dat de warmtestroom in het bevochtigde compartiment, met betrekking tot de minima (overdag dus), groter is dan deze voor het droge compartiment. Omgekeerd, op enkele uitschieters na, is de warmtestroom 's nachts in het droge compartiment groter dan het natte compartiment.

Op basis van Grafiek 44 kan achterhaald worden of er significante verschillen optreden als gevolg van de vochtinfiltratie. Op het moment van de bevochtiging is een duidelijke stijging te zien in het warmtestroomverschil tussen de twee houtwolcompartimenten. Aangezien de warmtestroom bepaald wordt door middel van de temperatuurgradiënt ΔT en de warmteweerstand R , moet er zich een verschil

in de temperatuur voordoen tussen de warme en koude zijde van het natte compartiment. Dit is ook effectief het geval (zie Grafiek 18). Het duurt net iets meer dan een maand vooraleer het kleine verschil in warmtestroom van plusminus 0,3 W/m² terug gelijk is aan de initiële toestand.



Grafiek 43: Warmtestroom doorheen houtwolisolatie



Grafiek 44: Warmtestroomverschil houtwolisolatie

6.2.5.2 Katoen, gras en hennep

Aangezien hetzelfde fenomeen zich telkens herhaalt in de temperatuurgradiënt ΔT tussen de warme en koude van alle compartimenten, herhaalt deze trend zich telkens opnieuw voor de warmtestroom. Daarom wordt voor katoen, gras en hennep verwezen naar de analyse in paragraaf '6.2.5.1 Houtwol'.

In Bijlage D zijn de bijhorende grafieken terug te vinden. Algemeen geldt dat hoe minder invloed het vocht uitoefent op de warmtestroom, hoe effectiever de isolatie is. Dit betekent namelijk dat er minder warmteoverdracht plaatsvindt. In vergelijking met een stijging in de warmtestroom van $0,3 \text{ W/m}^2$ in het natte compartiment van de houtwolisolatie, wordt een iets grotere stijging van $0,3$ à $0,4 \text{ W/m}^2$ waargenomen bij de katoenisolatie. Nadien duurt het ongeveer tien dagen vooraleer het warmtestroomverschil opnieuw zijn oorspronkelijk waarde aanneemt van om en bij de 0 W/m^2 .

Deze trend zet zich verder waarbij een maximale toename in het natte compartiment van gras en hennep van respectievelijk $0,5$ en $0,8 \text{ W/m}^2$ wordt waargenomen, wat een iets grotere stijging is dan bij de katoenisolatie. Na de snelle toename duurt het respectievelijk ongeveer 10 en 14 dagen vooraleer het warmtestroomverschil opnieuw zijn oorspronkelijk waarde aanneemt en er geen sprake meer is van effect op de warmtestroom.

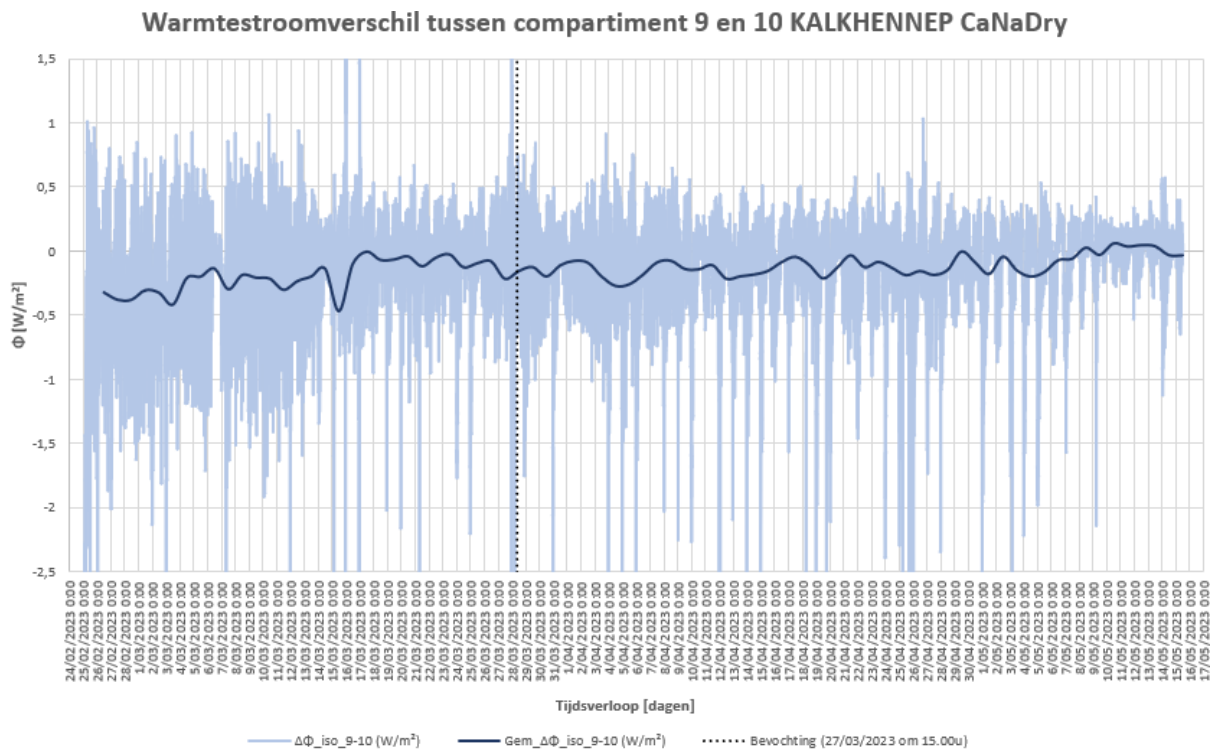
Hieruit kan geconcludeerd worden dat de bevochtiging een invloed uitoefent op de thermische prestatie van zowel houtwol-, katoen-, gras- en hennepisolatie. Zo presteert de hennepisolatie minder goed ten opzichte van katoen en gras aangezien een grotere stijging wordt waargenomen, die over een lange periode zorgt voor een verhoogde warmteoverdracht.

6.2.5.3 Kalkhennep (CaNaDry)

Wat kalkhennep betreft, wordt in vergelijking tot de vier voorgaande isolatiematerialen nagenoeg geen effect waargenomen van de vochtinfiltratie op de warmtestroom. Ondanks het feit dat het water effectief het niveau van de sensor bereikt (zie 6.2.3.5), wordt er geen hogere warmtestroom gedetecteerd. In paragraaf 6.2.3.5 met betrekking tot de relatieve vochtigheid is te zien dat de maximale waarde pas 22 dagen na de bevochtiging wordt bereikt. Doordat het vocht zich geleidelijk aan verspreidt in het compartiment door toedoen van een goede vochtbuffering, is geen kortstondige stijging in de warmtestroom waarneembaar. Het toont aan dat kalkhennep over relatief goede thermische capaciteit beschikt. Compartiment 11, gevuld met ingestorte kalkhennep (Floormix), wordt buiten beschouwing gelaten.

Echter is wel te zien dat het warmtestroomverschil tussen compartiment 9 en 10 ongeveer $0,4 \text{ W/m}^2$ bedraagt. Naarmate de tijd vordert, wordt dit verschil gereduceerd tot nagenoeg 0 W/m^2 . Dit is een te wijten aan de temperatuur. Zoals gezegd is de warmtestroom afhankelijk van de temperatuurgradiënt ΔT tussen de warme en koude zijde van de isolatie. Op Grafiek 20 is te zien dat aanvankelijk een klein verschil wordt opgemerkt tussen beide compartimenten wat betreft de temperatuurgradiënt ΔT , en

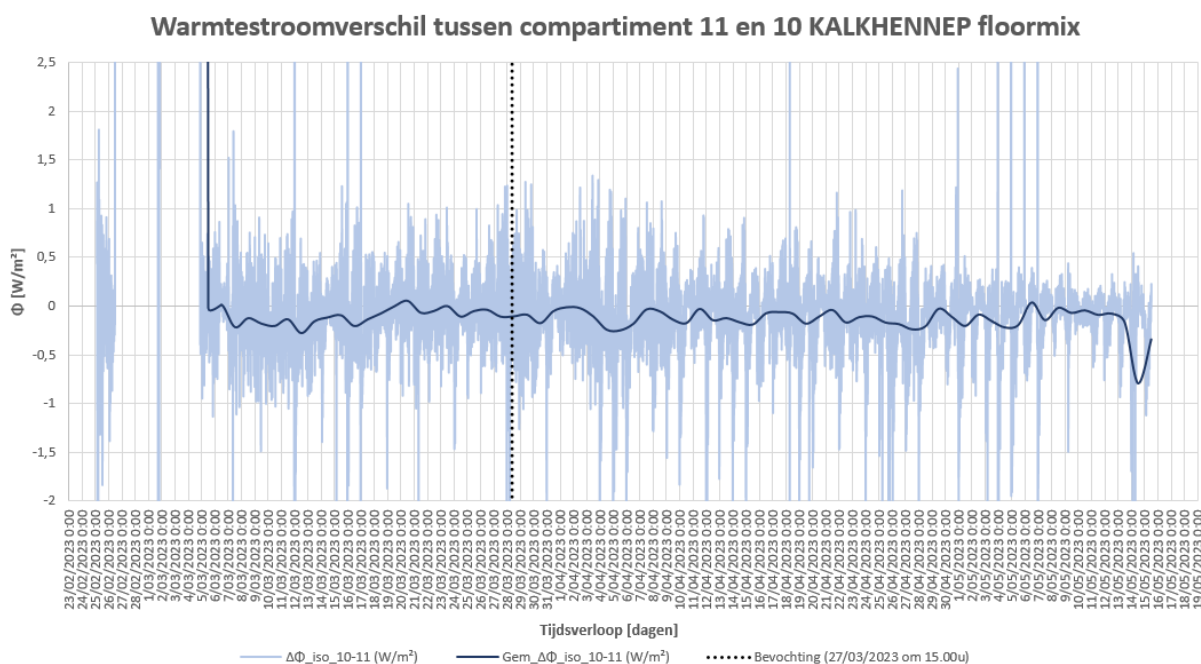
naarmate de tijd vordert wordt dit verschil quasi weggewerkt. Beide resultaten liggen dus in de lijn van de verwachtingen.



Grafiek 45: Warmtestroomverschil kalkhennepisolatie (CaNaDry)

6.2.5.4 Kalkhennep (Floormix)

Over het algemeen toont de Floormix afwijkende resultaten. Uit de analyse van de temperatuurgradiënt ΔT blijkt dat er naarmate de tijd vordert een verschil stelt tussen beide compartimenten. Dit zorgt normaal gezien, zoals wel het geval is bij de CaNaDry, voor een toename in het warmtestroomverschil tussen beide compartimenten. Echter is dit niet het geval, wat de betrouwbaarheid van de resultaten in vraag stelt. Dit kan te wijten zijn aan slechte metingen. Zo vertoont Grafiek 46 afwijkende resultaten in de warmteflux, wat kan wijzen op een gebrekkige plaatsing van de warmtestroomsensor aan de binnenkant van de wandopbouw. Een ander verklaring voor het afwijkende gedrag werd niet gevonden.



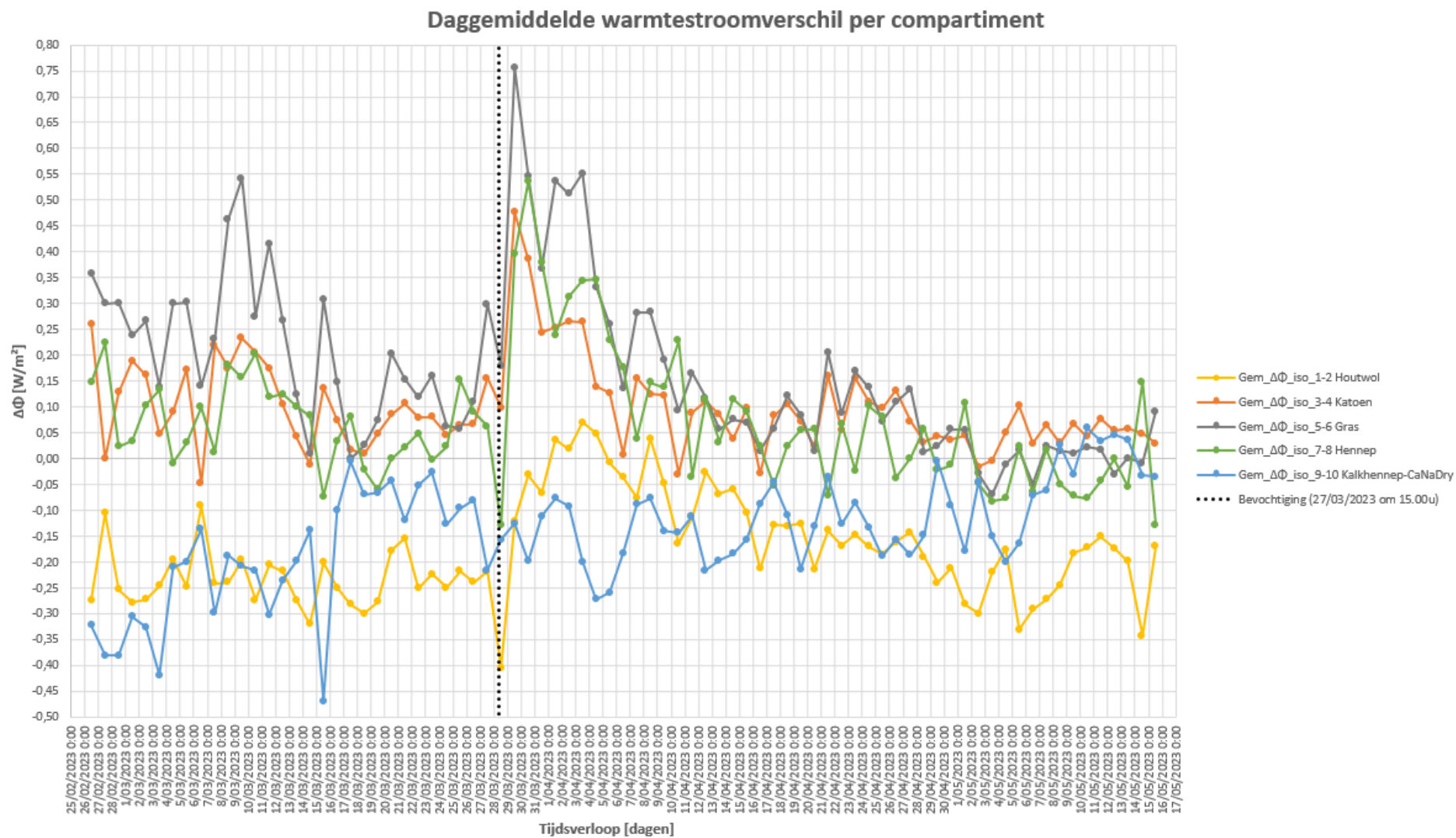
Grafiek 46: Warmtestroomverschil kalkhennepisolatie (Floormix)

6.2.5.5 Vergelijking van alle compartimenten op vlak van de warmtestroom

Globaal kan gesteld worden dat in de periode vóór de waterinfiltratie over het algemeen een positieve warmtestroom wordt gemeten en kan verklaard worden door de koude buitentemperatuur op dat moment. Dit betekent dat er een warmteoverdracht plaatsvindt van binnen naar buiten. Naarmate de tijd vordert, doet er zich een dalende trend voor. Door het warmere weer evolueerde de warmtestroom tot positieve waarden gedurende de nachten en negatieve waarden op het warmste moment van de dag.

Grafiek 47 vergelijkt de dagdagelijkse gemiddelde warmtestroomverschillen tussen het bevochtigde en het droge compartiment van elk isolatiemateriaal. De isolatiematerialen die zich in de lange zijde bevinden, vertonen dezelfde trend: na de waterinfiltratie stijgt het warmtestroomverschil. Dit wijst erop dat de warmtestroom telkens toeneemt in het natte compartiment als gevolg van de bevochtiging. Hennep en gras geven de grootste stijging weer, gevolgd door katoen. Een andere opvallende trend is dat de stijging van het warmtestroomverschil voor gras, katoen en hennep telkens één dag duurt vooraleer een daling plaatsvindt, terwijl dit voor houtwol twee dagen duurt. Dit kan te wijten zijn aan de hogere vochtbuffering van de houtwolisolatie. De daling verloopt vervolgens voor gras, katoen en hennep gelijkaardig. Daartegenover, na de significante stijging van houtwol, daalt het verloop slechts op een traag tempo.

Het verloop van het warmtestroomverschil van kalkhennep (CaNaDry) is eerder constant. Er is dus niet echt sprake van een toename in het warmtestroomverschil ten gevolge van de vochtinfiltratie. Echter evolueert het warmtestroomverschil wel nagenoeg naar 0 W/m², doordat het verschil in de temperatuurgradiënt ΔT afneemt na verloop van tijd. De kalkhennepisolatie is dus minder gevoelig aan een verhoogde warmteoverdracht doorheen de constructie als gevolg van accidentele waterinfiltratie.



Grafiek 47: Warmtestroomverschil van alle isolatiematerialen

6.3 Resultaten Delphin

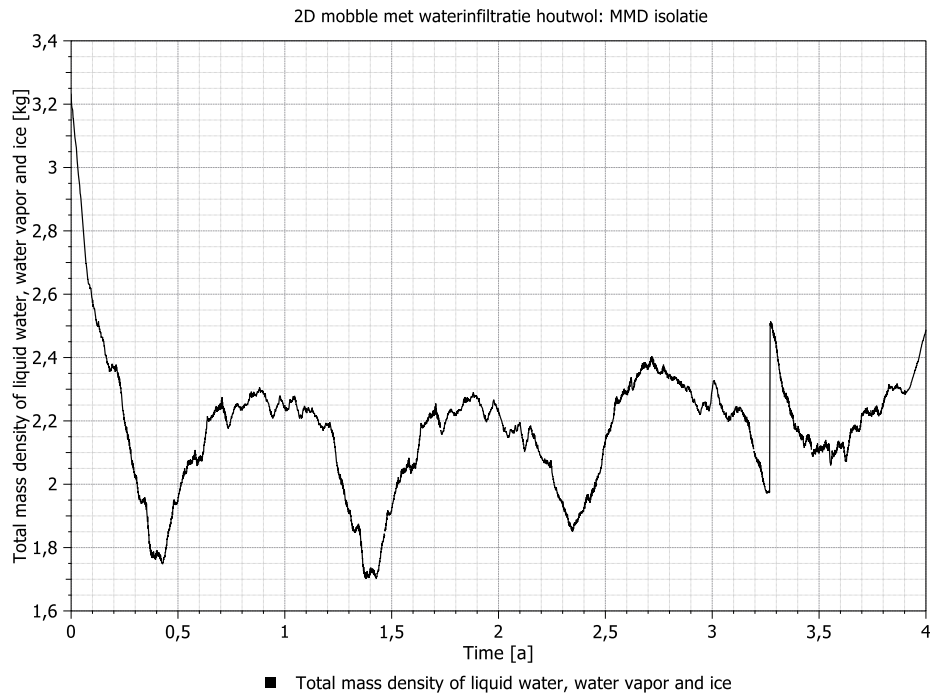
De resultaten uit de HAM-simulaties in Delphin 6.1 – in combinatie met Postproc – maken het mogelijk om het vochttransport over het volledige compartiment te analyseren. Het geeft een inkijk in de manier waarop het vocht zich diffundeert doorheen de volledige wandopbouw. Zo kan het drogingspotentieel van elk biogebaseerd isolatiemateriaal in kaart gebracht worden.

In wat volgt worden de resultaten met betrekking tot houtwol uitgebreid geanalyseerd. Aangezien in de vier onderzochte biogebaseerde isolatiematerialen, namelijk houtwol, katoen, gras en hennep, zich telkens dezelfde trends voordoen, wordt slechts eenmalig een diepgaande analyse besproken. Omdat het verloop van de isolatiematerialen zich anders afspeelt naarmate de tijd lengt, worden de vier verschillende natte simulaties vervolgens onderling vergeleken op vlak van droging. Zo kan het drogingspotentieel ten opzichte van elkaar geëvalueerd worden. Bijkomstig worden de simulaties vergeleken met de eerder uitgevoerde in-situ meetcampagne van L. Lambrechts (2022). De toegevoegde klimaatfile bevat namelijk de data die van toepassing is op deze meetcampagne. Zo wordt in de simulaties ook het water geïnfiltreerd op exact dezelfde dag als dat het geval was in de eerste meetcampagne.

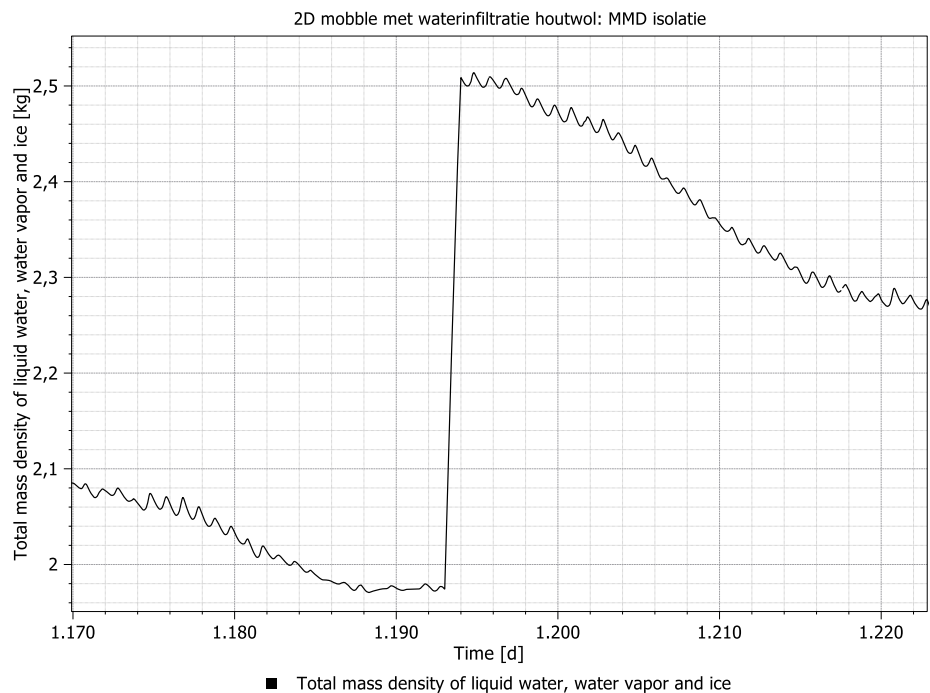
Zoals gezegd in de methodiek werd trial en error toegepast om in de vier afzonderlijke, natte simulaties telkens ongeveer 0,5 l water te infiltreren. Dit bleek geen sinecure en al snel bleek dat Delphin moeilijkheden ondervond indien de instroomtijd ingesteld werd op de werkelijke 30 seconden. Dit kwam namelijk in conflict met de saturatie en zorgde voor een error in de software. Bijgevolg werd geopteerd om de inbreng van het water te spreiden over een volledige dag. Zodoende treedt nog steeds verzadiging op en werd aan het einde van de dag – afhankelijk van de grootte van de vochtbron qua oppervlak – overal een halve liter water geïnfiltreerd.

6.3.1 Totale waterinfiltratie

Aan de hand van de output file ‘moisture mass density (MMD)’, wat de verhouding van de hoeveelheid water ten opzichte van het totaal volume materiaal betekent, wordt gecontroleerd of er effectief 0,5 l water geïnfiltreerd is. Grafiek 48 geeft het totale verloop weer van de MMD van 01/01/2019 tot 31/12/2022, waarop ook de stabilisatieperiode te zien is. Grafiek 49 zoomt in op het moment waarop het water geïnfiltreerd is. Hierop is duidelijk te zien dat 0,5 l water wordt toegevoegd. Omdat het moeilijk is exact 0,5 l te infiltreren omwille van verschillende parameters (zie paragraaf 5.3), worden waarden binnen het bereik van [0,48;0,52] l aanvaard.



Grafiek 48: Totale MMD in functie van de tijd met betrekking tot houtwol



Grafiek 49: Totale MMD in functie van de tijd met betrekking tot houtwol (ingezoomd)

6.3.2 Analyse vochttransport en drogingspotentieel

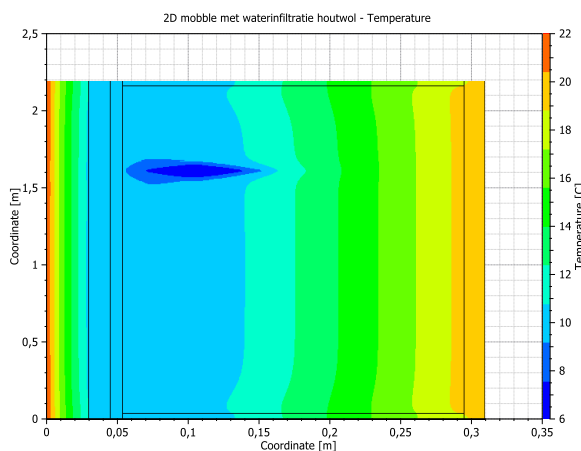
Vervolgens wordt het verloop van het geïnfiltreerde water nader bestudeerd door toedoen van de 'colormap'. Op deze manier kan geanalyseerd worden wat er dag per dag gebeurt met het vocht op elke locatie in de volledige constructie.

6.3.2.1 Temperatuur

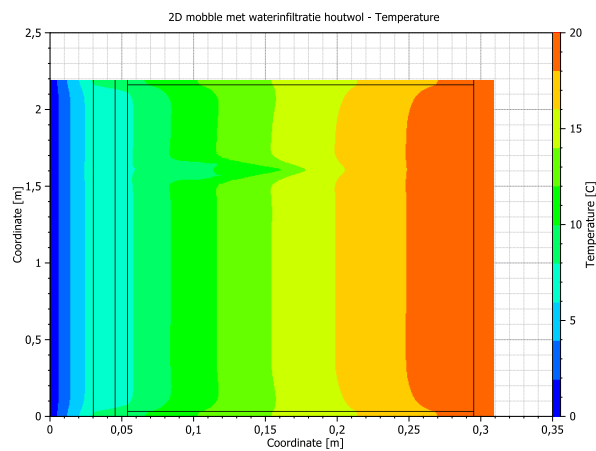
Allereerst wordt de temperatuur onderzocht, echter blijkt dat hier weinig uit opgemaakt kan worden. De temperatuur van het ingevoegde water past zich namelijk snel aan de heersende temperatuur aan en de bijhorende schommelingen. Deze ‘snelle’ aanpassing dient genuanceerd te worden, aangezien de vochtinfiltratie gespreid wordt over één dag. Dit wil zeggen dat het vocht geleidelijk aan infiltreert en dus voldoende tijd heeft om zich aan te passen aan de omstandigheden. Indien de volledige hoeveelheid in 30 seconden wordt toegevoegd, zal het effect op de temperatuur iets groter zijn.

Grafiek 50 en Grafiek 51 geven het moment weer respectievelijk 12 uren en 24 uren na de aanvang van de infiltratie. Tijdens de vochtinbreng (Grafiek 50) is te zien dat een lokaal temperatuurverschil optreedt als gevolg van het koude water. Dit blijkt van korte duur te zijn. Na 24 uren (Grafiek 51), dus het moment waarop de totale 0,5 l is toegevoegd, is te zien dat de temperatuur op de plaats van het lek zich quasi volledig heeft hersteld. Dit komt overeen met de bevindingen omtrent de temperatuur uit de meetcampagne in de praktijk. Ter hoogte van de sensor (1 m) wordt geconstateerd dat de temperatuur quasi geen invloed ondervindt.

Het is vanzelfsprekend dat Grafiek 50 een momentopname is overdag, aangezien de temperatuur aan het buitenoppervlak (links) het hoogste is. Het tegenovergestelde geldt voor Grafiek 51.



Grafiek 50: Temperatuur 12 uren na aanvang van de infiltratie (overdag)



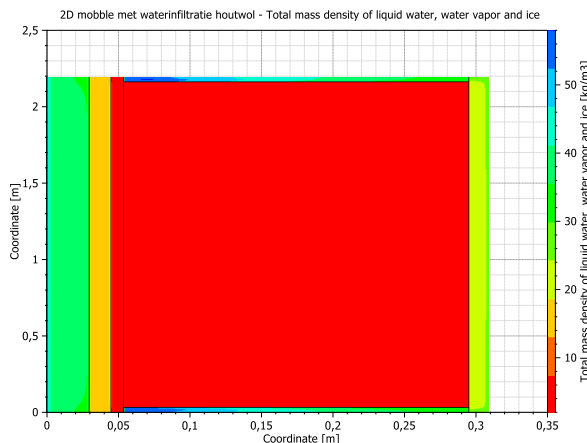
Grafiek 51: Temperatuur 24 uren na aanvang van de infiltratie (nacht)

6.3.2.2 MMD en relatieve vochtigheid

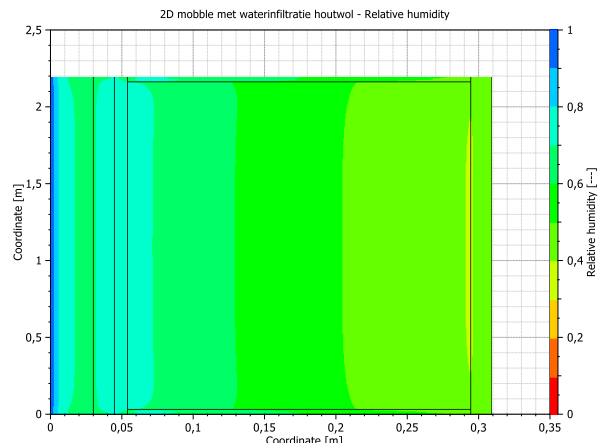
Grafiek 52 en Grafiek 53 geven respectievelijk de MMD en relatieve vochtigheid weer de dag vóór het invoegen van het water. Deze dag komt over vier jaar overeen met dag 1193, hierop is de volledige wand ook met zekerheid gestabiliseerd. Op Grafiek 52 is te zien dat de buitenafwerking uit kurkstrips (links) de grootste MMD heeft. Dit is logisch te verklaren aangezien het in direct contact staat met het relatief vochtig buitenklimaat. Echter is te zien dat de LVL-balken een hogere MMD hebben, maar hiermee wordt geen rekening gehouden. Het model in Delphin is namelijk een vereenvoudiging van de

realiteit, waarmee bedoeld wordt dat de dak- en vloerstructuur buiten beschouwing worden gelaten. Voor aanvang van de vochtinfiltratie wordt de isolatie gekenmerkt met de laagste MMD en bevindt er zich nagenoeg geen vocht in de houtwolisolatie.

Grafiek 53 geeft weer dat de relatieve vochtigheid aan de buitenkant van de wand (kurkstrips) het hoogst is en afneemt naarmate opgeschoven wordt naar de binnenkant van de wand. Verder is de relatieve vochtigheid aan de OSB-plaat ongeveer 50 %, wat iets hoger ligt dan de ingestelde waarde voor de RV aan de binnenkant van de wandopbouw van 48,14 %.



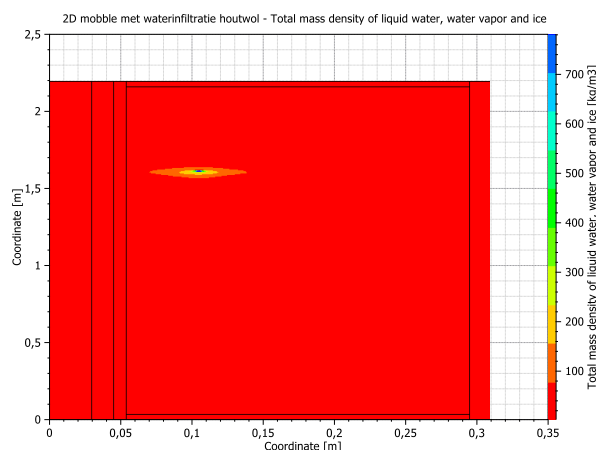
Grafiek 52: MMD op de dag vóór het invoegen van water



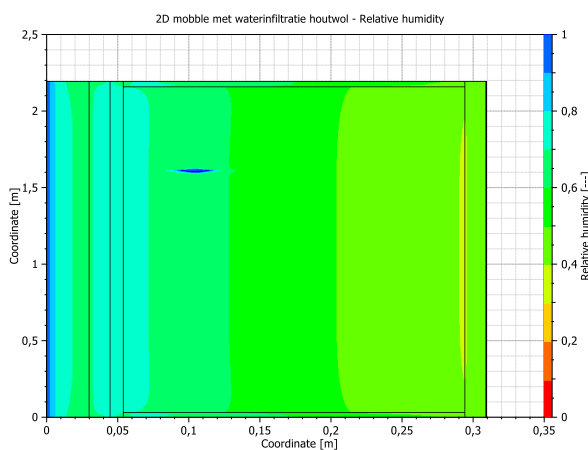
Grafiek 53: Relatieve vochtigheid op de dag vóór het invoegen van water

Om het vochttransport te kunnen evalueren worden telkens beide grafieken weergegeven naarmate de tijd en zo ook het drogingsproces vordert. Zo kan geanalyseerd worden welke weg wordt afgelegd en hoe de droging effectief verloopt. De eerstvolgende fase is het moment waarop het water geïnfilteerd wordt. Op Grafiek 54 is te zien dat er zich ter hoogte van de vochtbron plaatselijk vocht bevindt. Het donkerblauwe centrum wil zeggen dat er op dat ogenblik saturatie optreedt. Er is dus lokaal 780 kg/m^3 ($= W_{\text{sat}}$) water aanwezig, af te leiden uit de legende rechts op Grafiek 54. Dit betekent dat geen grotere hoeveelheid water, of dezelfde hoeveelheid met een kortere instroomtijd, kan worden ingevoegd omdat de maximale capaciteit in dat punt bereikt is. De rest van Grafiek 54 is rood gekleurd. Dit is in relatie tot de plaatselijk hoge concentratie en wijst erop dat het vocht zich bij het moment van bevochtigen niet onmiddellijk gaat verspreiden over de isolatie. Met andere woorden kan gesteld worden dat de houtwolisolatie het water lokaal buffert.

Op Grafiek 55 is ook duidelijk te zien dat op de plaats van het lek de relatieve vochtigheid verhoogt tot maximaal 100 %. Dit wil zeggen dat de hoeveelheid aan vocht op dat moment even groot is als de maximaal beschikbare hoeveelheid aan vocht.



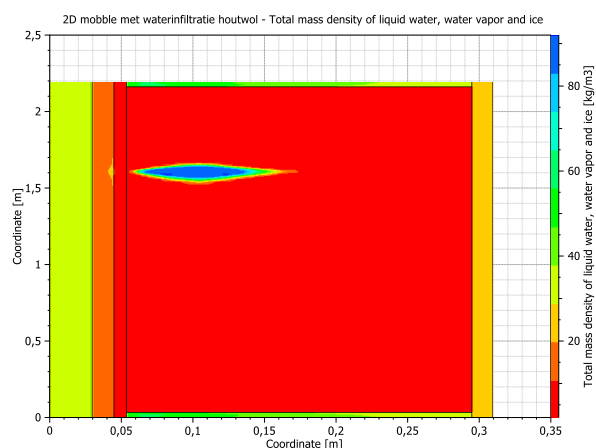
Grafiek 54: MMD op moment van invoegen 0,5 l water



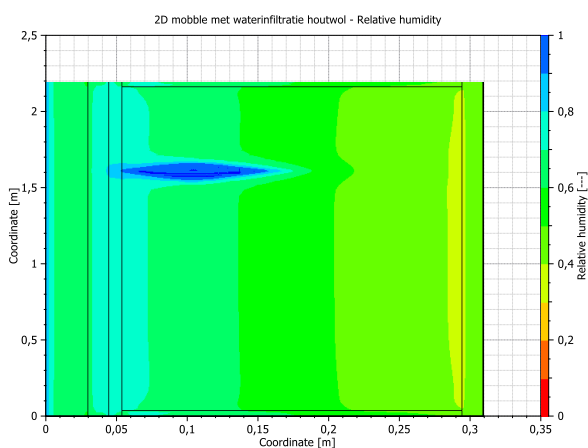
Grafiek 55: Relatieve vochtigheid op moment van invoegen 0,5 l water

Één dag na het moment waarop er zich 0,5 l water in de isolatie bevindt, wordt waargenomen op Grafiek 56 dat het water zich maximaal heeft verspreid. Dit is een relatief klein volume in vergelijking met het totale volume van de isolatie. De simulatie toont dus aan dat de houtwolisolatie beschikt over een goed vermogen om vocht lokaal te bufferen. Echter dient deze weergave wel genuanceerd te worden. Zoals gezegd is het water in de praktijk geïnfiltreerd in slechts 30 seconden. Dit betekent dat eenzelfde hoeveelheid quasi in één keer het compartiment instroomt. Dit kan een invloed hebben op de diffusie van het water, aangezien het vocht zich sneller moet verplaatsen bij het optreden van verzadiging. Het water gaat in de simulatie dus niet veel zakken als gevolg van de gravitaire werking.

Grafiek 57 bevestigt deze stelling. Op het moment dat een halve liter water geïnfiltreerd is, wordt geen effect waargenomen ter hoogte van de sensoren op 1 meter hoogte. In realiteit is dit allerm minst het geval. Vanaf dit moment kan vereenvoudigd gesteld worden dat het droogproces van start is gegaan. Aanvankelijk bevindt het droogfront zich dus hoofdzakelijk aan de koude zijde van de isolatie.



Grafiek 56: MMD 24 uren na volledige infiltratie 0,5 l water

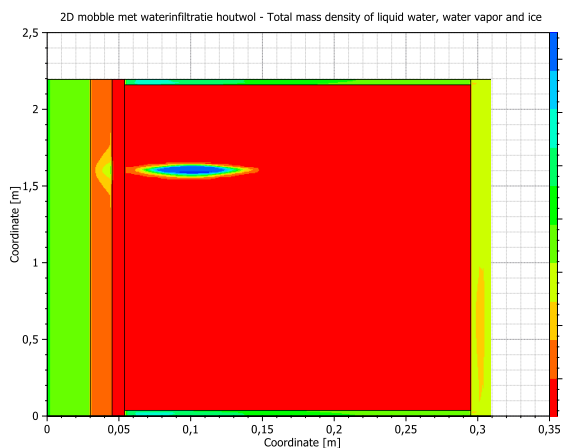


Grafiek 57: Relatieve vochtigheid 24 uren na volledige infiltratie 0,5 l water

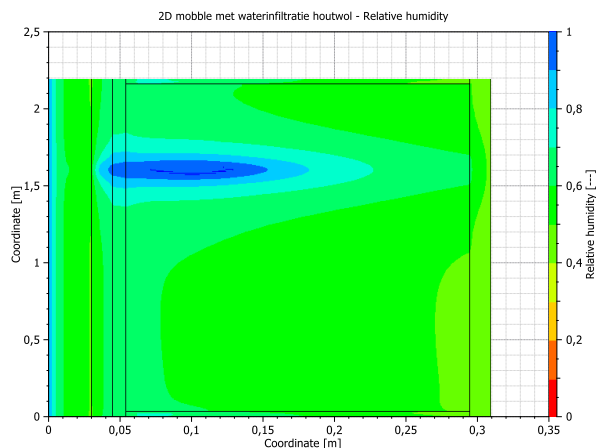
Nadat het water volledig geïnfiltreerd is, gaat het vocht geleidelijk de constructie proberen verlaten. Naast het feit dat in Grafiek 58 het oppervlak verkleind is en de MMD op de plaats van het lek gezakt is met ongeveer 10 kg/m^3 , zijn er geen noemenswaardige verschillen op te merken met Grafiek 58.

Doordat de maximale MMD gezakt is met 10 kg/m^3 , is een deel van het water overgegaan in damp. Op Grafiek 59 is te zien dat de damp zich geleidelijk aan verspreidt over een groter volume. Ter hoogte van het lek verspreidt de waterdamp zich voornamelijk in horizontale richting. Bijkomstig is er ook een toename van de relatieve vochtigheid zichtbaar over de hoogte aan de koude zijde van de houtwolisolatie. Dit fenomeen is te wijten aan de positie van het buisje. Het uiteinde van het buisje – dat dienst doet als vochtbron – bevindt zich slechts 5 cm in de isolatie, terwijl de isolatiedikte 24 cm bedraagt. Het vocht concentreert zich dus veel meer aan de koude zijde van de isolatie. Dit strookt volledig met de algemene trend die zich voordoet bij de experimentele resultaten.

Dit proces herhaalt zich voortdurend in de tijd, waarbij de MMD gestaag afneemt en de waterdamp zich steeds meer verspreidt doorheen de houtwolisolatie en een weg naar buiten de constructie vindt. Het is dus zinloos om dit moment nogmaals te analyseren.



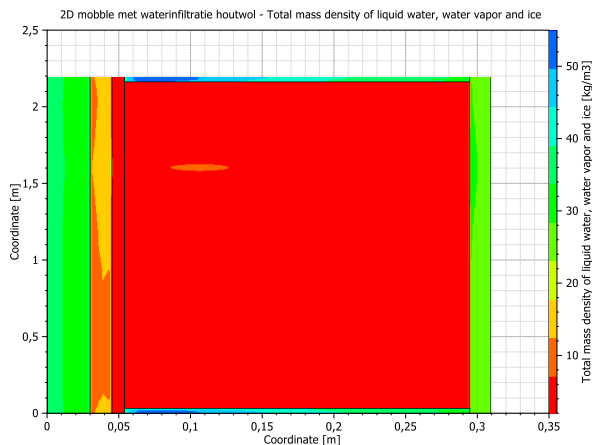
Grafiek 58: MMD 15 dagen na volledige infiltratie 0,5 l water



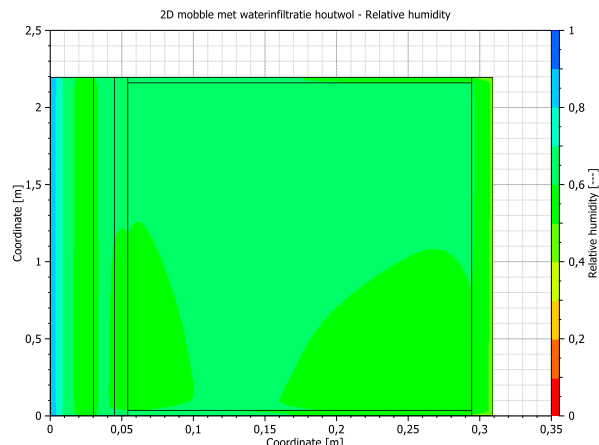
Grafiek 59: Relatieve vochtigheid 15 dagen na volledige infiltratie 0,5 l water

Grafiek 60 toont dat 39 dagen na de vochtinfiltratie nog slechts een klein restant overblijft van het water in vloeibare toestand. Vanaf dag 40 in het drogingsproces kan gesteld worden dat vocht volledig is overgegaan in waterdamp.

Wat de relatieve vochtigheid in de constructie betreft, is deze alles behalve al teruggekeerd naar de oorspronkelijke toestand. Zo geeft Grafiek 61 de toestand weer na 93 dagen. Daar is duidelijk te zien dat er zich nog waterdamp bevindt in de houtwolisolatie, en dit ongeveer 53 dagen nadat het water volledig is overgegaan in waterdamp. Er kan dus gesteld worden dat het vocht relatief snel volledig in waterdamp overgaat, maar de waterdamp allerminst snel diffundeert uit de constructie.



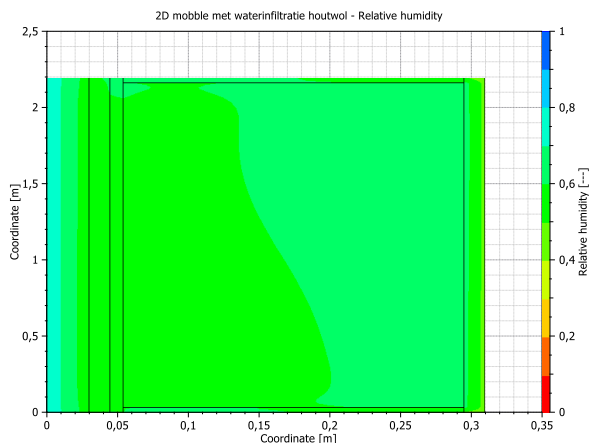
Grafiek 60: MMD 39 dagen na infiltratie van 0,5 l water



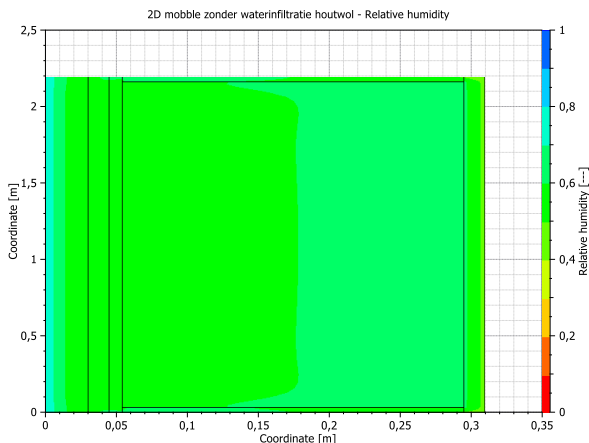
Grafiek 61: Relatieve vochtigheid 93 dagen na infiltratie van 0,5 l water

Vanaf de 94^e dag na bevochtiging is te zien dat de ‘colormap’ van de relatieve vochtigheid tussen de natte (Grafiek 62 en Grafiek 64) en droge simulatie (Grafiek 63 en Grafiek 65) in elkaars verlengde liggen. Waar de ‘trechtersvorm’ in Grafiek 61 nog duidelijk het gevolg is van de vochtinfiltratie, kan nu enkel en alleen op basis van de ‘colormap’ geen uitsluitsel gegeven worden of de waterdamp, afkomstig van de vochtbron, volledig verdwenen is uit de constructie. Desalniettemin wordt wel opgemerkt dat het volume aan verhoogde concentratie waterdamp in de natte toestand iets groter is.

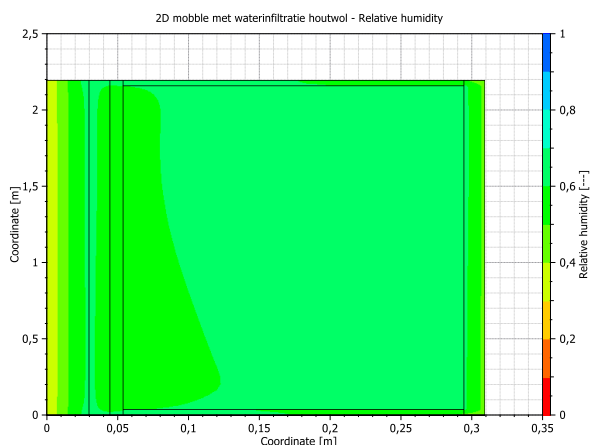
Wat hier wel opvalt, is dat de waterdamp zich voornamelijk bevindt aan de warme zijde van de houtwolisolatie. Dit is te verklaren doordat de gemiddelde temperatuur aan de warme zijde hoger ligt dan aan de koude zijde door de grote temperatuurverschillen ’s nachts. De relatieve vochtigheid is over het algemeen hoger aan de kant van de hoogste temperatuur wanneer de temperatuur aan beide zijden van de isolatie verschillend is. Dit komt doordat warme lucht meer waterdamp kan bevatten dan koude lucht. Naarmate de dag vordert – en de temperatuur terug toeneemt aan de koude zijde van de isolatie – is te zien dat de waterdamp zich diffundeert in de richting van de buitenomgeving (Grafiek 62 ten opzichte van Grafiek 63). Er kan dus geconcludeerd worden de uitdroging aanvankelijk voor plaatsvindt aan de koude zijde van de houtwolisolatie aan een relatief snel tempo. Het restant aan waterdamp droogt vervolgens grotendeels uit aan de warme zijde van de isolatie aan een traag tempo.



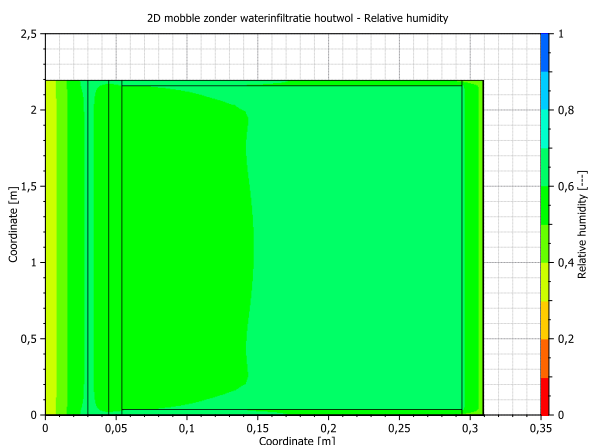
**Grafiek 62: Relatieve vochtigheid natte toestand
(dag 1288 om 7 uur 's ochtends)**



**Grafiek 63: Relatieve vochtigheid droge toestand
(dag 1288 om 7 uur 's ochtends)**



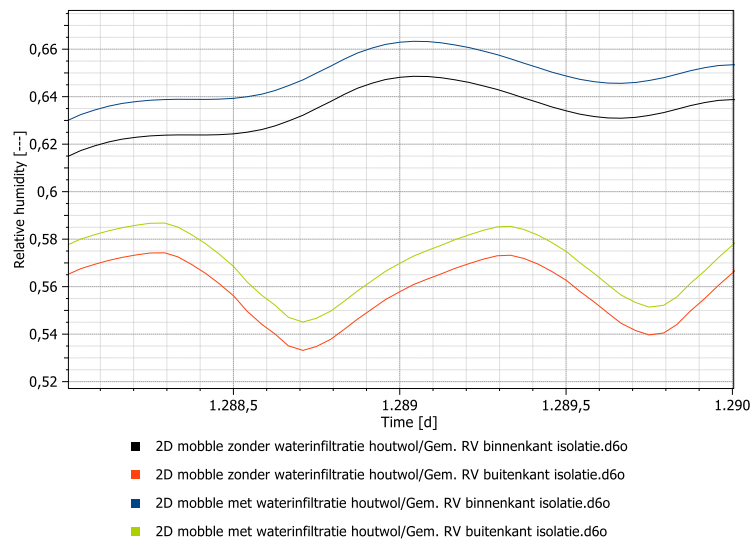
**Grafiek 64: Relatieve vochtigheid natte toestand
(dag 1288 om 17 uur 's middags)**



**Grafiek 65: Relatieve vochtigheid droge toestand
(dag 1288 om 17 uur 's middags)**

Om te achterhalen of al dan niet nog waterdamp ten gevolge van de vochtinfiltratie aanwezig is, wordt gefocust op het verloop van de gemiddelde relatieve vochtigheid op dag 1288 aan beide zijden van de houtwolisolatie (zie Grafiek 66). Hier kan vastgesteld worden dat er voor zowel de koude als warme zijde van de isolatie nog steeds een verschil is van ongeveer 1,5 % tussen de droge en natte toestand. Dit wil zeggen dat de waterdamp dus nog steeds niet helemaal uit de isolatie is verdwenen. Dit verschil van 1,5 % neemt vanaf dit punt traag af. Wanneer naar het eindpunt op dag 1460 van de simulatie gekeken wordt, is nog steeds een miniem verschil waarneembaar van ongeveer 0,05 %. Kritisch kan dus gesteld worden dat de uitdroging nog steeds niet volledig voltooid is.

Dit kan verklaard worden doordat aan de binnenkant van de constructie gebruik gemaakt wordt van een relatief dampdicht materiaal (OSB3). Doordat na verloop van tijd de waterdamp zich voornamelijk concentreert aan de warme zijde, wordt de diffusie uit de constructie aanzienlijk bemoeilijkt. Dit verklaart eveneens waarom het eerste deel van het drogingsproces veel sneller verloopt. De waterdamp kan namelijk relatief eenvoudig diffunderen doorheen het dampopen materiaal (MgO-beplating) aan de koude zijde van de isolatie.



Grafiek 66: Gemiddelde RV aan beide zijden van de houtwolisolatie (nat en droog)

Indien de overige isolatiematerialen, namelijk katoen, gras en hennep, onderling vergeleken worden, wordt quasi een identiek verloop in de tijd verkregen. Hierdoor wordt slechts eenmaal uitgebreid ingegaan op het specifieke vochttransport en bijhorende drogingspotentieel, aangezien hetzelfde van toepassing is op kleine verschillen in de tijd na. Bijgevolg wordt de vergelijking gemaakt tussen de verschillende onderzochte isolatiematerialen in volgende paragraaf.

6.3.2.3 Vergelijking onderzochte isolatiematerialen

Op analoge wijze wordt voor elk isolatiemateriaal bepaald hoe lang het duurt vooraleer het water in vloeibare toestand verdwenen is en de relatieve vochtigheid terugkeert naar hetzelfde verloop als zich voordoet in de droge situatie. Uit de resultaten in Tabel 17 kan geconcludeerd worden dat het verschil tussen de verschillende biogebaseerde isolatiematerialen beperkt is.

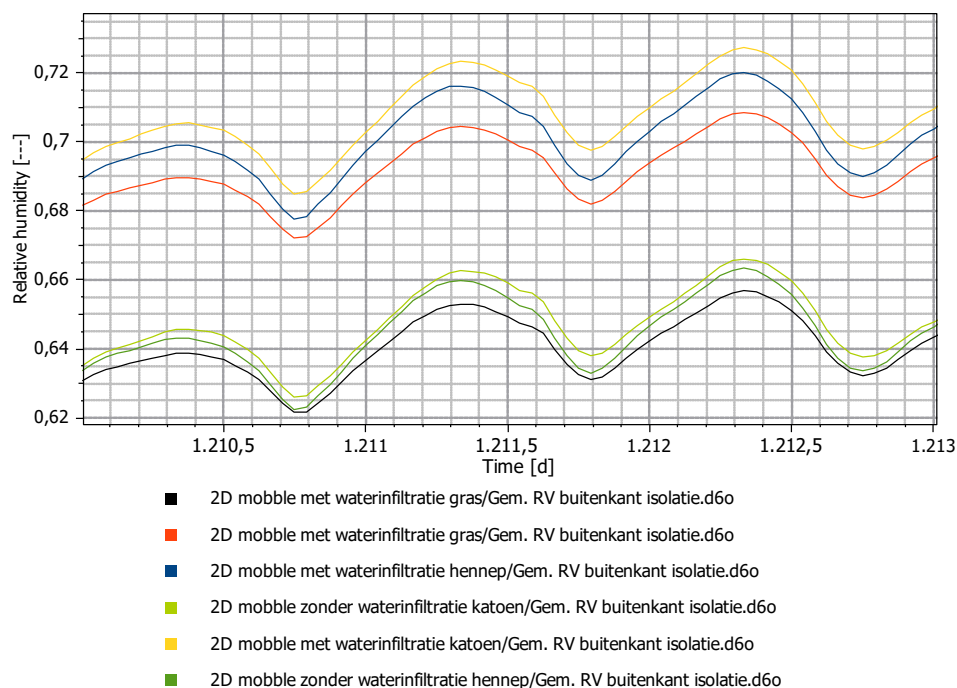
Houtwol en katoen gaan respectievelijk gepaard met de grootste en kleinste buffercapaciteit omwille van het aantal dagen vooraleer het vloeibare water volledig is overgegaan in waterdamp. Doordat het vocht in de houtwolisolatie langer geconcentreerd blijft ter plaatse van de vochtbron, kan het minder snel verdampen. Bijkomstig kan geconcludeerd worden dat zich nagenoeg een identiek verloop voordoet wat betreft de relatieve vochtigheid. Hieruit kan besloten worden dat de parameters, toegekend aan de materialen, bijzonder weinig invloed hebben op het drogingspotentieel van de isolatiematerialen. Het enige verschil in de simulaties is namelijk de parameters van het isolatiemateriaal.

Tabel 17: Aantal dagen tot verdwijnen MMD en RV

	Aantal dagen	
	MMD	RV
Houtwol	40	94
Katoen	35	92
Gras	39	96
Hennep	36	95

Het verschil in gemiddelde relatieve vochtigheid aan de koude zijde van de verschillende biogebaseerde materialen, met uitzondering van houtwol, is te zien op Grafiek 67. Hierbij is de benaming voor de zwarte curve foutief en is het wel degelijk ‘zonder’ waterinfiltratie. Zoals reeds vermeld zijn de enige verschillen de parameters, meer bepaald de waterabsorptiecoëfficiënt A_w , de dichtheid ρ , de specifieke warmte c , het dampdiffusieweerstandsgetal μ en de warmtegeleidingscoëfficiënt λ .

Ongeveer 15 dagen na de bevochtiging is een verschil van ongeveer 2 % tussen katoen- en grasisolatie waarneembaar in gemiddelde relatieve vochtigheid aan de koude zijde. Ditzelfde fenomeen is van toepassing voor de dampdruk. Kortom kan andermaal gesteld worden dat het vochttransport en de droging voor de verschillende isolatiematerialen miniem afwijken van elkaar.



Grafiek 67: Verschil in relatieve vochtigheid aan koude zijde van katoen-, gras- en hennepisolatie

6.3.3 Vergelijking met meetcampagne van L. Lambrechts (2022)

Op bepaalde vlakken komen de in-situ meetresultaten niet overeen met de gesimuleerde resultaten. In de simulaties wordt namelijk geen rekening gehouden met de oriëntatie van de compartimenten en de invloed van omgevingsfactoren (schaduwvorming). Uit de analyse van de in-situ metingen werd namelijk geconstateerd dat de invloed hiervan aanzienlijk is. Bijkomstig is de instroomtijd sterk afwijkend. Waar de halve liter water in werkelijkheid in 30 seconden wordt toegevoegd, wordt dit in de simulaties gespreid over een hele dag.

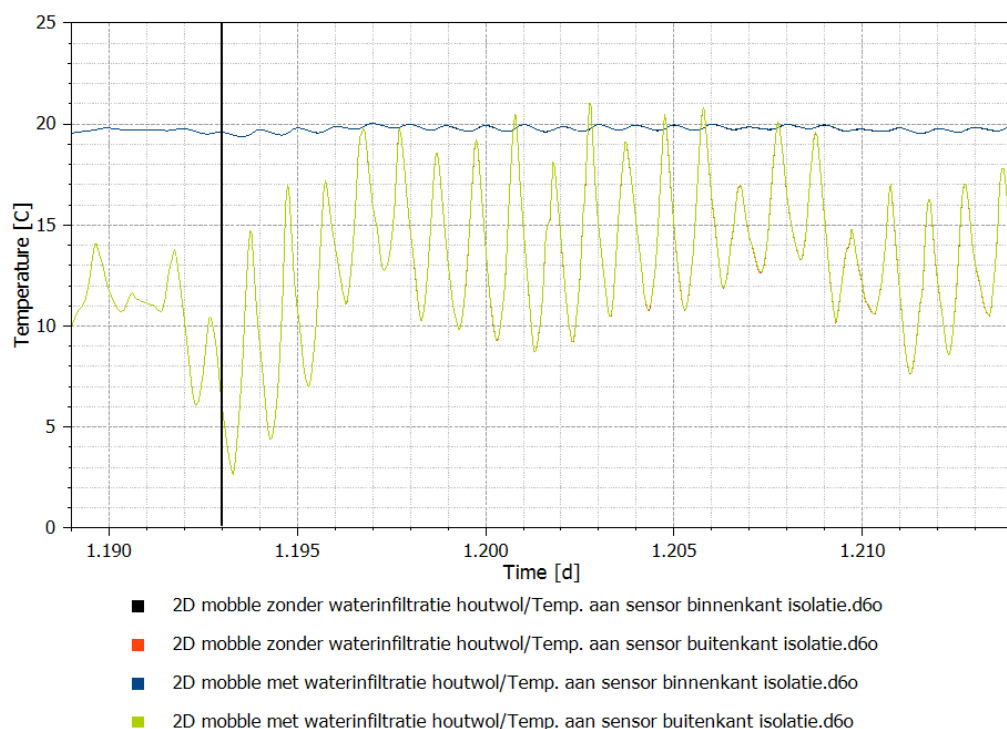
Alhoewel Delphin door middel van algoritmen en geavanceerde rekenmodellen rekening houdt met de verandering in materiaaleigenschappen als gevolg van degradatie, wordt uitgegaan van een optimale samenstelling en structuur. Echter werd bij de plaatsing van het buisje overal handmatig een opening aangebracht in de isolatie. Ongewild kan dit zorgen voor veranderingen in de samenstelling en de

structuur. Hierdoor kan het vocht ter plaatse van de bron eenvoudiger wegstromen en zich verspreiden over een groter volume. Bovendien gaat het materiaal zich aanpassen aan de omstandigheden, wat eventueel ook kan zorgen voor een wijziging in de poriënstructuur. Om te achterhalen of deze vorm van degradatie effectief optreedt, is verder onderzoek nodig.

6.3.3.1 Temperatuur

In de simulaties is quasi geen effect op de temperatuur ter hoogte van de sensor waargenomen (zie Grafiek 68). Zowel aan de koude als aan de warme zijde van de isolatie wordt in de gesimuleerde resultaten geen noemenswaardig verschil opgemerkt. Dit komt enerzijds door lange instroomtijd waardoor het water aan een te traag tempo wordt ingevoerd en het zich quasi direct kan aanpassen aan de heersende omstandigheden. Bijkomend bereikt het water de sensor enkel onder de vorm van waterdamp, waarbij een daling in de temperatuur niet aan de orde is.

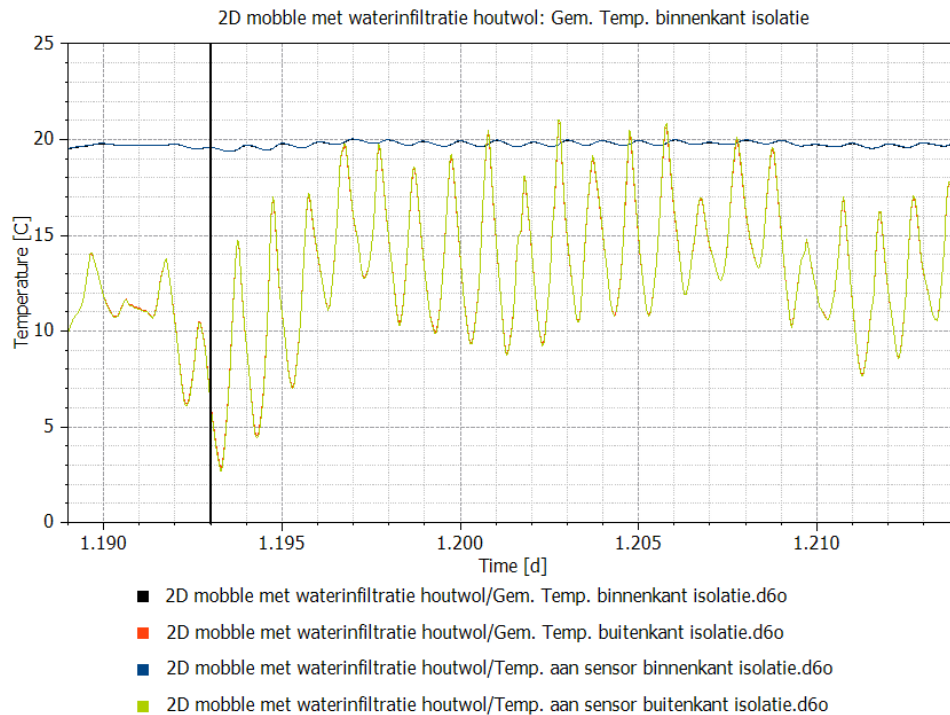
Uit de experimentele waarden werd wel een klein verschil waargenomen. Lambrechts L. (2022) beweerde dat dit niet het geval was, maar dit is een misopvatting. Er is namelijk sprake van een warmtestroomverschil door toedoen van de vochtinfiltratie. Als er een verschil in de warmtestroom optreedt, dan moet er ook een verschil zitten op de temperatuurgradiënt ΔT . Dit wordt aangetoond in de analyse van de experimentele waarden van de tweede meetcampagne (zie paragraaf 6.2.2).



Grafiek 68: Temperatuur aan koude en warme zijde houtwolisolatie (Delphin)

Verder werd de vraag gesteld of het water eventueel een grotere invloed uitoefent op een andere locatie aan de buitenkant van de isolatie. In Grafiek 69 wordt de vergelijking gelegd tussen de gemiddelde temperatuur en de temperatuur gemeten ter hoogte van de sensor in Delphin. Echter blijkt dat hierin

andermaal geen verschil wordt opgemerkt. Dit bevestigt de hypothese dat het water voldoende snel op temperatuur komt zodat geen significante verschillen optreden. Bij de in-situ metingen kan het water dus niet snel genoeg volledig op temperatuur komen, en wordt een klein verschil waargenomen ter hoogte van de sensor.



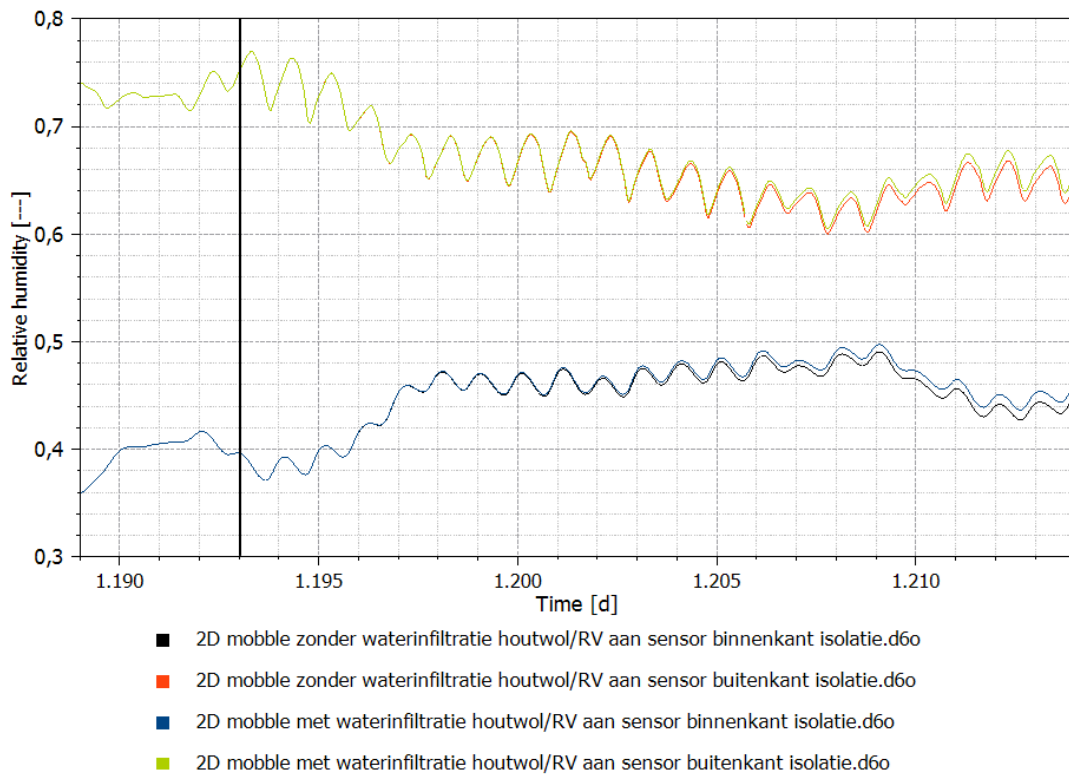
Grafiek 69: Vergelijking temperatuur gemiddeld en aan sensor met waterinfiltratie (Delphin)

6.3.3.2 Relatieve vochtigheid

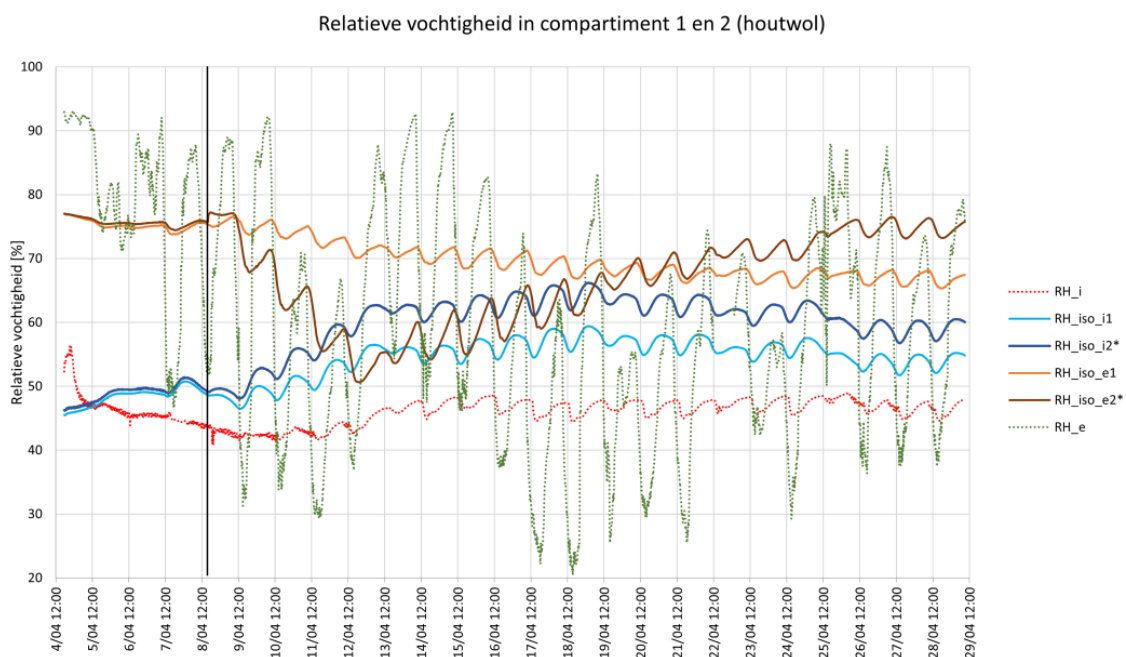
In beide meetcampagnes vertoonde de sensor aan de koude zijde van het natte compartiment een verkeerd verloop. Dit werd toegeschreven aan het feit dat de sensor onmiddellijk na de bevochtiging in contact kwam met één of meerdere waterdruppels. Echter strookt dit niet met de simulatie, aangezien er pas na een delay van vijf dagen een verschil wordt opgemerkt. Op Grafiek 70 is namelijk te zien dat pas op dag 1198 een noemenswaardig verschil tussen het natte en droge compartiment zichtbaar is. Dit wijst erop dat ter hoogte van de sensor op 1 m geen onmiddellijk effect van het water optreedt.

Voorts kan wel geconcludeerd worden dat zowel aan de warme als koude zijde eenzelfde verloop wordt opgemerkt, die qua grootteorde wel afwijkt (zie Grafiek 70 en Grafiek 71). Waar in de simulatie aan de warme en koude zijde een relatief vochtigheidsverschil wordt opgemerkt van respectievelijk 2,5 en 3 %, bedraagt dit in de experimentele meetgegevens 7 en 20 %. Dit kan te wijten zijn aan het feit dat het vochttransport zich op een andere manier manifesteert in de werkelijkheid, voornamelijk kort na de bevochtiging als gevolg van de eerder omschreven oorzaken. Over de effectieve droogtijd kunnen echter geen uitspraken gedaan worden. Het staat vast dat de beginsituatie allerm minst terug bereikt wordt bij de in-situ meetcampagne na een droogperiode van 50 dagen. In beide situaties wordt vastgesteld dat het overschot aan waterdamp heel moeizaam diffundeert uit de constructie.

Bijkomend bevindt het vocht zich na ongeveer 94 dagen voornamelijk aan warme zijde van de isolatie (zie Grafiek 62). Dit resulteert bijgevolg ook in een hogere relatieve vochtigheid aan de warme zijde van de isolatie (zie Grafiek 66). Dit staat in contrast met de in-situ resultaten. Op Grafiek 71 is te zien dat de relatieve vochtigheid aan de koude zijde van de isolatie steeds hoger ligt dan aan de warme zijde. Dit wordt ook zo waargenomen in de tweede in-situ meetcampagne, die loopt over een langere droogperiode van 50 dagen. Dit bevestigt dat het vochttransport op een andere manier verloopt.

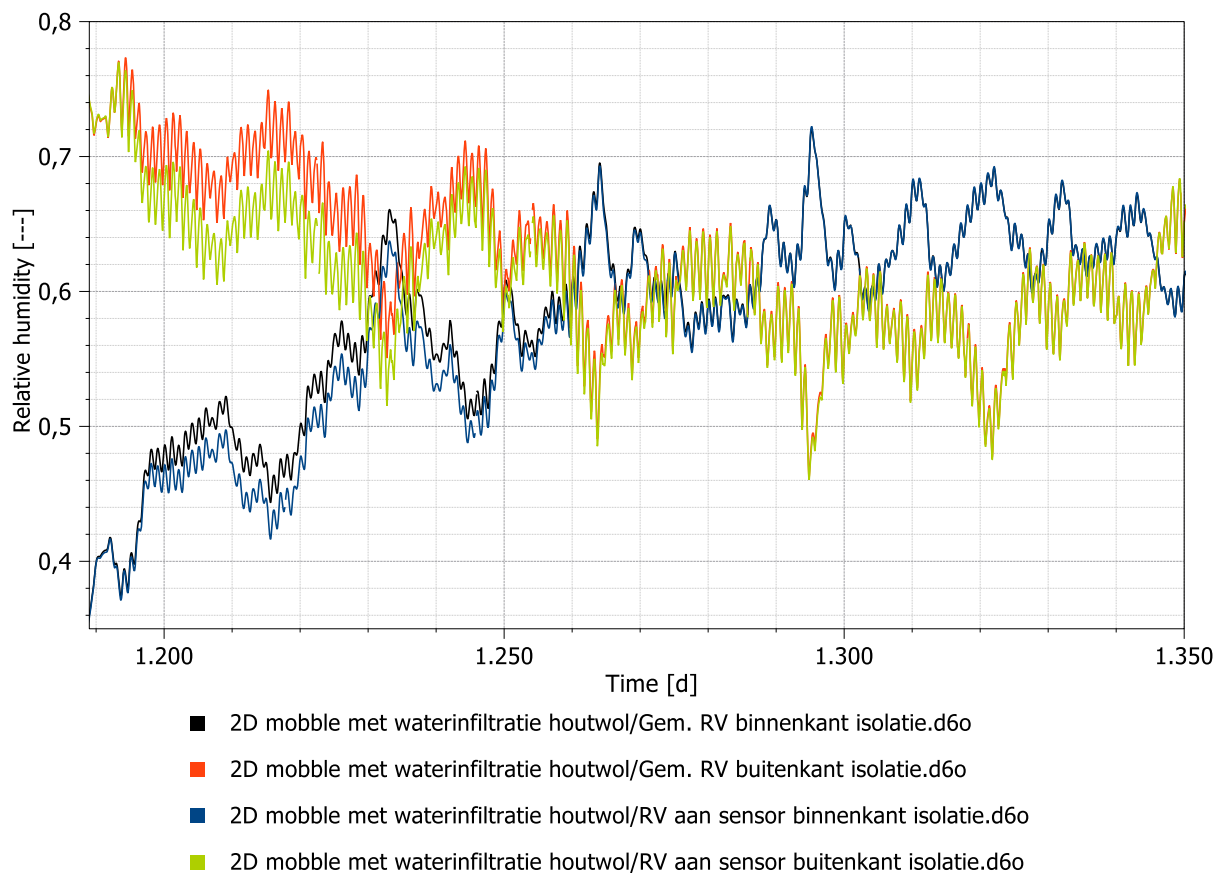


Grafiek 70: RV aan koude en warme zijde houtwolisolatie (Delphin)



Grafiek 71: RV aan de koude en warme zijde houtwolisolatie (L. Lambrechts, 2022)

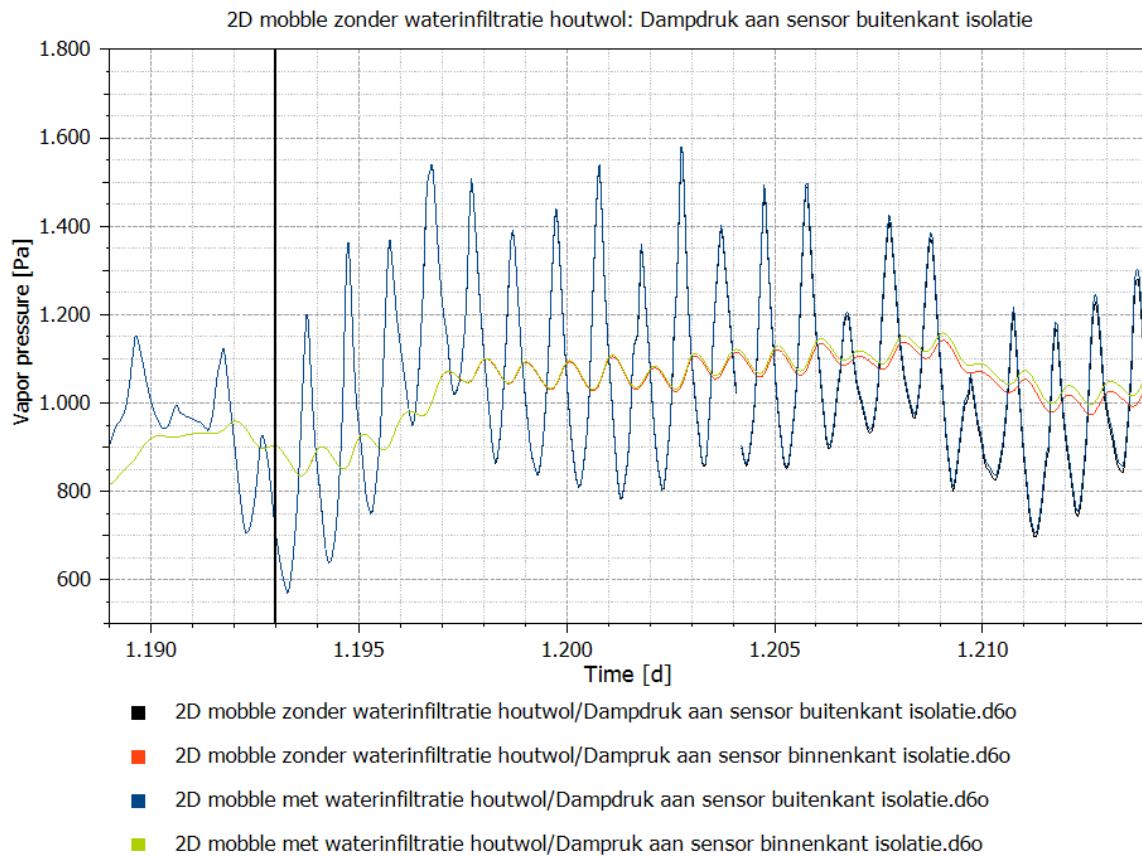
Tot slot worden op Grafiek 72 de gemiddelde relatieve vochtigheid over het volledige oppervlak en de relatieve vochtigheid ter hoogte van de sensor aan de koude en warme zijde van de isolatie geplot. Zo kan achterhaald worden hoe de relatieve vochtigheid ter hoogte van de sensor in relatie staat tot de gemiddelde relatieve vochtigheid. Dit toont aanvankelijk een groot verschil aan tussen het gemiddelde en de positie van de sensor op 1 m hoogte. Vervolgens neemt dit verschil af, wat betekent dat de waterdamp zich na verloop van tijd gelijkmatig verdeelt in de hoogte. Dit komt tot stand na ongeveer 94 dagen. Ook kan gesteld worden dat de delay bij de curves die symbool staan voor de gemiddelde relatieve vochtigheid veel korter is, wat wijst op een snellere detectie van het vocht in een punt dichterbij de vochtbron.



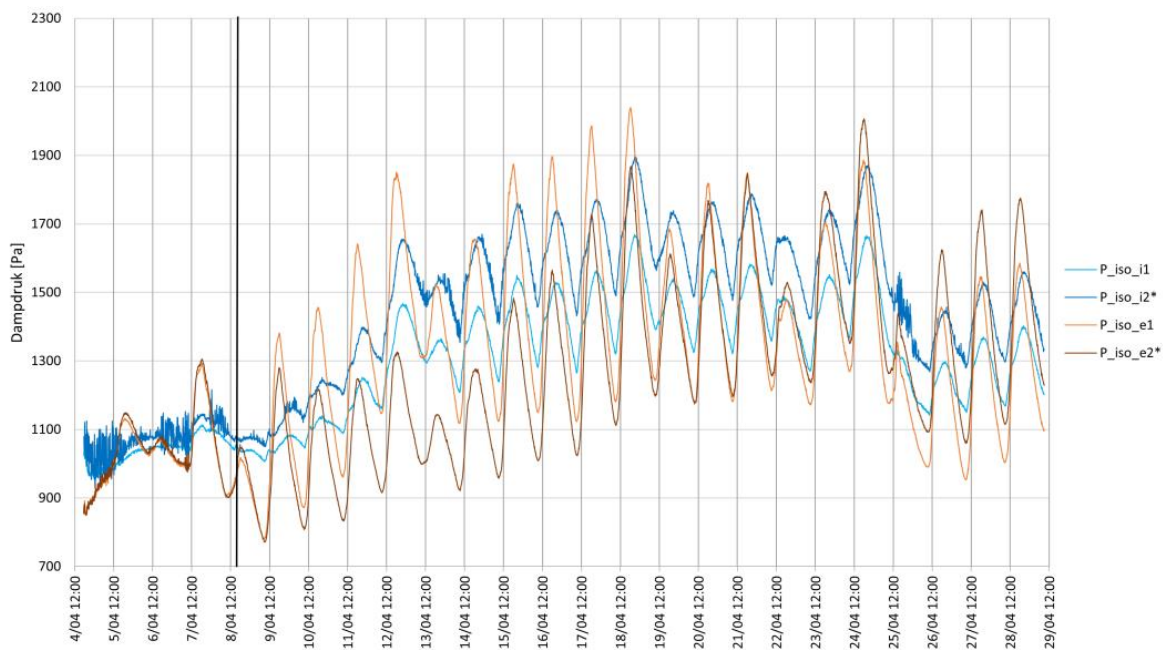
Grafiek 72: RV aan sensor tegenover gemiddelde RV aan het gehele oppervlak

6.3.3.3 Dampdruk

Identiek hetzelfde kan geconcludeerd worden met betrekking tot de dampdruk ter hoogte van de sensor. Andermaal is hetzelfde verloop te zien tussen de gesimuleerde resultaten (Grafiek 73) en de in-situ gemeten waarden (Grafiek 74). Enkel het optredende verschil tussen het natte en droge compartiment ligt qua grootteorde niet in dezelfde lijn. Andermaal is er sprake van een delay bij de gesimuleerde waarden. Indien de gemiddelde dampdruk aan koude en warme zijde wordt geplot wordt ook hier hetzelfde vastgesteld als bij de relatieve vochtigheid. Daarom wordt hier niet verder op ingegaan.



Grafiek 73: Dampdruk aan de koude en warme zijde van de houtwolisolatie (Delphin)

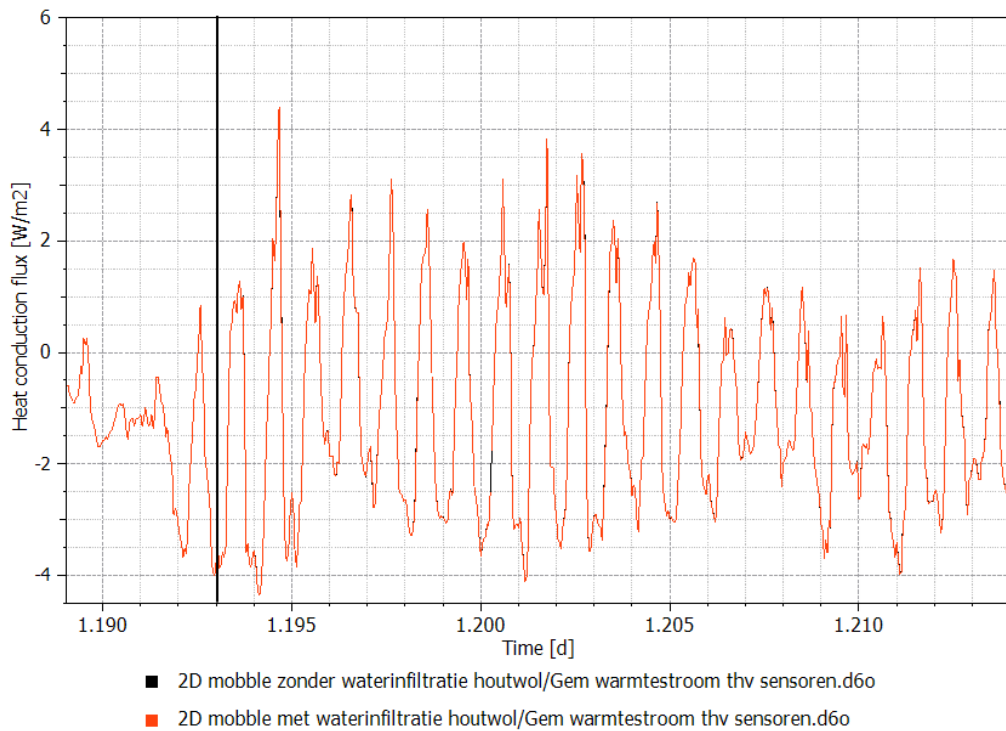


Grafiek 74: Dampdruk aan de koude en warme zijde van de houtwolisolatie (L. Lambrechts, 2022)

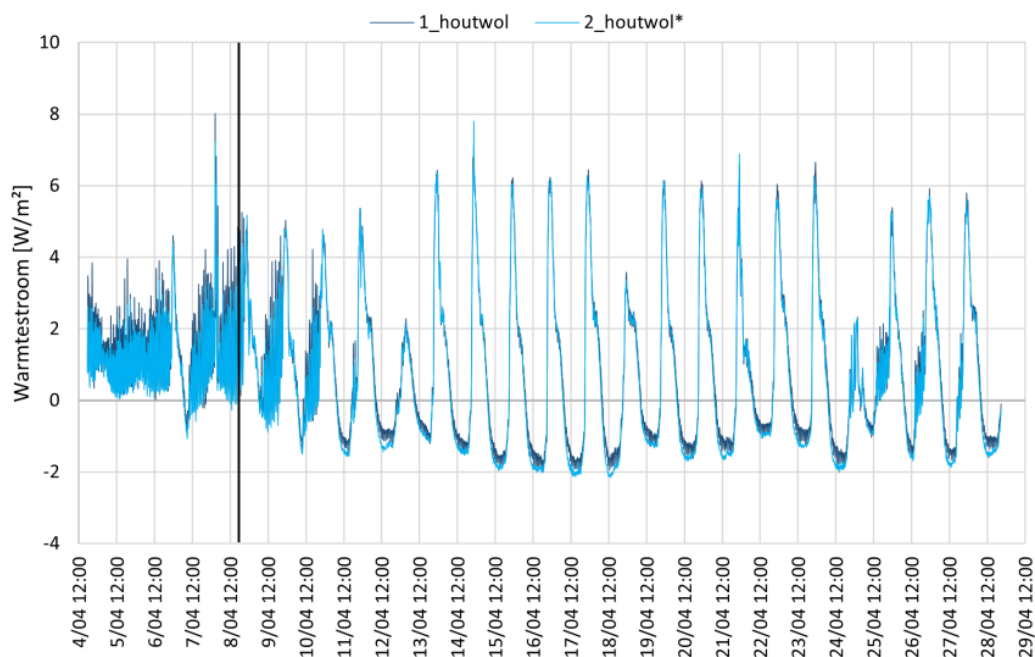
6.3.3.4 Warmtestroom

Wat de warmtestroom betreft, is in de simulatie ter hoogte van de sensor geen verschil waarneembaar tussen het natte en droge compartiment (zie Grafiek 75), terwijl dit bij de in-situ metingen wel het geval is (zie Grafiek 76). Het valt ook op dat de warmtestroom voor de in situ-meting gemiddeld rond de 1

W/m^2 ligt, echter geeft de simulatie gemiddeld ongeveer -1 W/m^2 . Een mogelijke verklaring hiervoor is het feit dat in Delphin de richting van de warmtestroom niet gekozen kan worden. Hiermee wordt bedoeld de in-situ resultaten bekomen worden door middel van de buitentemperatuur af te trekken van de binnentemperatuur. Dit kan in Delphin omgekeerd zijn, waardoor het verschil in absolute waarde identiek is, maar het teken verschillend. Voorts worden dezelfde dagdagelijkse schommelingen waargenomen, maar liggen de gesimuleerde waarden iets lager.



Grafiek 75: Warmtestroom doorheen houtwolisolatie (Delphin)



Grafiek 76; Warmtestroom doorheen houtwolisolatie (L. Lambrechts, 2022)

7 Conclusie

De toegankelijkheid tot en de implementatie van biogebaseerde isolatiematerialen wordt voornamelijk belemmerd door een gebrek aan kennis. Daarom was het hoofddoel van dit onderzoek enerzijds de hygrothermische eigenschappen van enkele biogebaseerde materialen, die blootgesteld werden aan een accidentele waterinfiltratie, in kaart te brengen en anderzijds inzicht te krijgen in het drogingspotentieel.

Allereerst werden de specifieke eigenschappen, meer bepaald de waterabsorptiecoëfficiënt A_w en het dampdiffusieweerstandsgetal μ , van de verschillende biogebaseerde materialen bepaald. Wat de waterabsorptiecoëfficiënt A_w betreft, gaat de kurkisolatie gepaard met de kleinste waarde van $0,0031 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$. Dit kan te wijten zijn aan de compactheid en de eerder gesloten celstructuur. Hierdoor blijft de waterinfiltratie beperkt tot de oppervlaktelagen. De overige biogebaseerde isolatiematerialen bestaan uit vezels en hebben bijgevolg een andere, minder samenhangende, structuur. Houtwol ($A_w = 0,0265 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) en isovlas ($A_w = 0,0055 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) gekarakteriseerd door respectievelijk de hoogste en laagste dichtheid. Algemeen wordt vastgesteld dat de opzuigkracht in een materiaal afhankelijk is van de poriënstructuur. Hoe fijner de poriënstructuur is, hoe veerkrachtiger en dus hoe groter de opzuigkracht is in het materiaal. Daartegenover, te grote poriën – zoals bij gras ($A_w = 0,0145 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) en hennep ($A_w = 0,0120 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) zorgen voor een beperkt vermogen om water vast te houden, aangezien het er bij wijze van spreken gewoon terug kan uitstromen. Echter bleek dat katoen een uitzondering is op deze regel. Ondanks een lage dichtheid wordt toch een relatief grote waterabsorptiecoëfficiënt ($A_w = 0,0220 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) bekomen. Tot slot is de magnesiumoxidebeplating allerm minst bestand tegen langdurige blootstelling aan water, onder andere wegens de beperkte dikte van het materiaal.

Het dampdiffusieweerstandsgetal μ wordt beïnvloed door de gehanteerde, ongelijke productiedikte tijdens de proef. Hierdoor kunnen – met uitzondering van houtwol en isovlas - de resultaten onderling niet (eenduidig) vergeleken worden. Dit komt doordat een toename van de dikte niet in lineair verband staat met de toename van het dampdiffusieweerstandsgetal μ . Er wordt vastgesteld dat de materialen met een fijnere poriënstructuur en een hogere dichtheid meer weerstand bieden tegen waterdampdiffusie. Dit is het geval voor houtwol ($\mu = 1,44$) in vergelijking met isovlas ($\mu = 1,32$), die beide eenzelfde dikte hebben van 5,8 cm. Verder gaat de grasisolatie gepaard met een relatief hoge waarde voor μ , namelijk 1,72. Dit is grotendeels te wijten aan de dikte van het monster van 11 cm. Verder presteert kurk andermaal uitermate goed met een waarde voor het dampdiffusieweerstandsgetal μ van 3,30. In vergelijking met de literatuur liggen de waarden in dezelfde grootteorde.

Omtrent de meetcampagne kan eerst en vooral gesteld worden dat het drogingspotentieel sterk afhankelijk is van de weersomstandigheden, de oriëntatie en de mogelijke schaduwvorming als gevolg van omgevingselementen. Er was over het algemeen namelijk een duidelijk verschil in de resultaten tussen de korte en lange mobiele wand. Het temperatuurverschil tussen het bevochtigde en droge compartiment was miniem, doordat het temperatuurverschil tussen het water en de heersende

omstandigheden niet groot was. Desalniettemin is er wel een klein verschil opgemerkt in de temperatuurgradiënt ΔT tussen beide compartimenten. Hierdoor doet zich over het algemeen een kleine stijging voor in de warmtestroom doorheen de verschillende compartimenten. Met uitzondering van kalkhennep, ondervond elk isolatiemateriaal een toename in de warmteoverdracht als gevolg van de accidentele waterinfiltratie. Zo presteerde de hennepisolatie het slechts met een toename in de warmtestroom van $0,8 \text{ W/m}^2$, terwijl houtwolisolatie het best presteerde met een toename van $0,5 \text{ W/m}^2$. Hoe dan ook heeft dit een nadelige invloed op de thermische werking aangezien meer warmte wordt overgedragen. Het feit dat kalkhennep geen toename in de warmtestroom ondervindt, kan te wijten zijn aan de lagere temperatuur in de wand op het moment van waterinfiltratie. Waar de temperatuur in de lange mobiele wand aan de koude zijde van de isolatie schommelde rond de $13,5 \text{ }^\circ\text{C}$ op het moment van bevochtiging, was dit slechts ongeveer $10,7 \text{ }^\circ\text{C}$ in de korte wand. Vermoedelijk lag de temperatuur van het water tussen deze twee waarden in, waardoor het water op het moment dat de sensor bereikt werd, al afgekoeld was.

Daarnaast vertoonden alle bevochtigde compartimenten een toename in relatieve vochtigheid als gevolg van de waterinfiltratie. Er is geen sprake van een delay, wat betekent dat onmiddellijk na de bevochtiging de relatieve vochtigheid aan de buitenkanten van de isolatie de hoogte ingaat. Na analyse blijkt dat de isolatiematten, met name houtwol, katoen, gras en hennep, het vocht minder goed bufferen ten opzichte van de gestorte kalkhennep. Een snellere verspreiding van het vocht beïnvloedt het droogproces, meer bepaald de droogtijd, op een gunstige manier. Dit komt doordat een isolatiemateriaal met een hogere buffercapaciteit beter in staat is om vocht op te nemen en vast te houden. Een hoge bufferwaarde zorgt dus voor een tragere verspreiding van het vloeibare water, waardoor het minder snel in waterdamp overgaat en zich minder snel uit de constructie kan verwijderen. Uit de in-situ metingen blijkt dat de oorspronkelijke situatie enkel en alleen terug is bereikt voor de grasisolatie. Dit is grotendeels het gevolg van het afwijkende vochttransport van het water. Doordat het water zich voornamelijk verplaatste in de richting van de warme zijde, waar de gemiddelde temperatuur hoger ligt en het vocht sneller volledig overgaat in waterdamp, wordt het droogproces versneld.

Qua vochttransport en bijhorend drogingspotentieel gaat de vloeibare substantie voor de houtwolisolatie na ongeveer 40 dagen volledig over tot waterdamp. Aanvankelijk is de verdere verspreiding van de waterdamp vooral zichtbaar aan de koude zijde van de isolatie als gevolg van de positie van de vochtbron, wat ook het geval is in de werkelijkheid. Vervolgens verplaatst het vochtfront zich na ongeveer 94 dagen naar de warme zijde van de houtwolisolatie. Dit komt doordat de gemiddelde temperatuur hier hoger ligt dan aan de koude zijde en warme lucht een grotere vochtcapaciteit heeft dan koude lucht. Dit betekent ook dat naarmate de dag vordert – en de temperatuur terug toeneemt aan de koude zijde van de isolatie – de waterdamp zich diffundeert in de richting van de buitenomgeving. Het restant aan waterdamp droogt dus grotendeels uit naar binnen toe, maar heeft het moeilijk om de constructie definitief te verlaten aangezien hier een dampdicht materiaal (OSB3) is voorzien.

Honderd dagen na de vochtinfiltratie is er nog steeds een verschil van 1,5 % relatieve vochtigheid tussen de droge en natte toestand. Na 266 dagen is nog steeds een miniem verschil waarneembaar van ongeveer 0,05 %. Kritisch kan dus gesteld worden dat de uitdroging nog steeds niet volledig voltooid is. Hetzelfde is van toepassing op katoen-, gras- en hennepisolatie met lichte wijzigingen in de tijd.

In de simulaties wordt het vocht namelijk uitermate goed gebufferd, wat ervoor zorgt dat een delay optreedt van ongeveer 5 dagen. In realiteit is dit helemaal niet het geval, wat wijst dat het vocht zich veel sneller verspreidt over de isolatie. Zodoende wordt het verschil ook veel groter. Bij houtwol doet zich een relatief vochtigheidsverschil aan de koude en warme zijde voor van respectievelijk 18 % en 6 %, terwijl dit in de simulatie ter hoogte van de sensor slechts 3 % en 2,5 % bedraagt. In simulaties wordt namelijk geen rekening gehouden met de oriëntatie van de compartimenten en de invloed van omgevingsfactoren (schaduwvorming). Bijkomstig de instroomtijd sterk afwijkend en wordt uitgegaan van een optimale samenstelling en structuur. Echter werd bij de plaatsing van het buisje handmatig een opening aangebracht in de isolatie, wat ongewild kan zorgen voor veranderingen in de samenstelling en de structuur. Hierdoor kan het vocht ter plaatse van de bron eenvoudiger wegstromen en zich verspreiden over een groter volume. Dit komt doordat het vocht pas na 6 dagen de sensor bereikt in de vorm van waterdamp, waarbij de temperatuur al volledig is aangepast aan de heersende omstandigheden. Zodoende treedt er ook geen warmtestroomverschil op ter hoogte van de sensor.

Verder onderzoek is nodig om te achterhalen welke vorm van degradatie er opgetreden is in de isolatie, die het vochttransport en de uitdroging beïnvloeden. Ook de vereenvoudiging tot een puntbron om accidentiele waterinfiltratie te analyseren, geeft slechts een benadering van de realiteit. Op die manier kan gesteld worden dat een spreiding van een halve liter water over een volledige dag meer aansluit bij een realistische situatie bij neerslag. Desalniettemin is verder onderzoek aangewezen om te achterhalen hoe een bepaalde hoeveelheid water op een snellere manier geïnfiltreerd kan worden in de simulaties.

8 Duurzaamheidsreflectie

Duurzaamheidsuitdagingen domineren steeds meer de maatschappelijke en politieke agenda's. Niet alleen de klimaatcrisis manifesteert zich nadrukkelijk op de voorgrond, maar ook biodiversiteitsverlies, toenemende sociale ongelijkheid, armoede, waterschaarste, enz.

Daarom stelden de Verenigde Naties de Duurzame Ontwikkelingsdoelstellingen of Sustainable Development Goals (SDG's) op. De 17 SDG's, die gekoppeld worden aan 169 targets, vormen een actieplan om de planeet terug op koers richting duurzaamheid te plaatsen tegen 2030. Om tot een gegronde duurzaamheidsreflectie te komen is het aangewezen om te illustreren hoe dit onderzoek in relatie staat tot deze SDG's. In wat volgt, wordt geanalyseerd aan welke (sub)doelstellingen deze masterproef een positieve bijdrage levert.

SDG 3: Goede gezondheid en welzijn

3.9: Tegen 2030 in aanzienlijke mate het aantal sterfgevallen en ziekten verminderen als gevolg van gevaarlijke chemicaliën en de vervuiling en besmetting van lucht, water en bodem (Verenigde Naties, n.d.)

Het gebruik van biogebaseerde isolatiematerialen kan enerzijds zorgen voor een gecontroleerd en bovenal gezonder binnenklimaat (Korjenic et al., 2011). Bijkomstig bevatten de klassieke, synthetische isolatiematerialen steeds een aanzienlijke hoeveelheid aan giftige stoffen die enerzijds bij de verwerking en anderzijds bij een brand kunnen vrijkomen (Omgeving Vlaanderen, n.d.). Dit brengt logischerwijs de nodige gezondheidsrisico's met zich mee. In biogebaseerde isolatiematerialen worden deze schadelijke stoffen tot een absoluut minimum beperkt. Een overschakeling is een gunstige transitie in het behalen van de vooropgestelde doelstelling. Het achterhalen van de hygrothermische werking en het drogingspotentieel, wat een belangrijke factor speelt in het ontstaan van giftige stoffen ten gevolge van schimmels, helpt mee tot het realiseren van deze transitie. Zodoende draagt het bij tot het reduceren van de gezondheidsrisico's.

SDG 12: Verantwoorde consumptie en productie

12.2: Tegen 2030 het duurzame beheer en het efficiënte gebruik van natuurlijke hulpbronnen realiseren (Verenigde Naties, n.d.).

Het spreekt voor zich dat dit onderzoek kadert binnen de overgang naar het frequent en efficiënt gebruik van natuurlijke hulpbronnen. Biogebaseerde isolatiematerialen worden voornamelijk bekomen uit materiaal van biologische oorsprong, wat betekent dat de materialen afkomstig zijn uit de natuur. Door gebruik te maken van organische en hernieuwbare grondstoffen vermindert de afhankelijkheid van niet-hernieuwbare bronnen. Het bepalen van de specifieke hygrothermische eigenschappen draagt bij tot de overgang naar een efficiënter gebruik van natuurlijke hulpbronnen in de bouwsector.

12.5: Tegen 2030 de afvalproductie aanzienlijk beperken via preventie, vermindering, recyclage en hergebruik (Verenigde Naties, n.d.).

Biogebaseerde bouwmaterialen kunnen ook bijdragen aan het verminderen van de afvalstroom, aangezien deze bestaan uit biologisch afbreekbare materialen. Zodoende kunnen bio-gebaseerde materialen aan het einde van hun levensduur op een natuurlijke manier worden afgebroken. Bijkomstig is het zelf mogelijk om de biogebaseerde materialen te recyclen door deze opnieuw te verwerken tot nieuwe isolatieproducten. Dit sluit de materiaalcyclus en minimaliseert de afvalstroom. Bijgevolg kan dit onderzoek ook op vlak van de afvalproductie een rol van betekenis spelen.

12.8: Tegen 2030 garanderen dat mensen overal beschikken over relevante informatie over en zich bewust zijn van duurzame ontwikkeling en levensstijlen die in harmonie zijn met de natuur (Verenigde Naties, n.d.).

In een tijd waarbij de nood aan duurzame ontwikkelingen en innovatieve oplossingen steeds duidelijker worden, is het onderzoeken van biogebaseerde isolatiematerialen interessant. Volgens Schik et al. (2022) is de onbekendheid en het gebrek aan kennis bij de afnemers enerzijds het gevolg van onduidelijke specificaties en/of eigenschappen van de producten en anderzijds is er weinig informatie en vakkennis voor handen over de toepassing en het onderhoud van biogebaseerde bouwmaterialen. De resultaten uit dit onderzoek dragen hun steentje bij tot het in kaart brengen van de specifieke hygrothermische eigenschappen en het drogingspotentieel van de onderzochte biogebaseerde isolatiematerialen. Zo kan op termijn alle relevante informatie verzameld worden en wordt de algemene kennis omtrent dergelijke isolatiematerialen verruimd.

SDG 13: Klimaatactie

Dit onderzoek valt niet specifiek binnen één subdoelstelling te kaderen op vlak van 'Klimaatactie'. Tegen 2050 wil Europa de uitstoot met 80 % reduceren tegenover het niveau van 1990. Om dit doel te verwezenlijken moet de EU vooruitgang boeken op het pad naar een uitstootarme samenleving (Verenigde Naties, n.d.). Zo zorgt bijvoorbeeld het bannen van fossiele brandstoffen uit de bouwsector voor een positieve evolutie. De overgang van synthetische isolatiematerialen, afkomstig van fossiele brandstoffen, naar biogebaseerde isolatiematerialen kan alleen maar toegejuicht worden. Bijkomend moet de energie-efficiëntie drastisch toenemen. Biogebaseerde isolatiematerialen gaan gepaard met een relatief lage ingebedde energie, wat de klimaatdoelstellingen ten goede komt.

Met de resultaten uit dit onderzoek wordt getracht de kennis omtrent biogebaseerde isolatiematerialen te verruimen, zodat de drempel tot het frequent gebruik beetje bij beetje weggewerkt wordt. Kortom hebben biogebaseerde (isolatie)materialen het potentieel om een belangrijke bijdrage te leveren aan het verminderen van de ecologische voetafdruk van de bouwsector en het bevorderen van een circulaire economie. Het is van vitaal belang om deze materialen verder te ontwikkelen en te integreren in de bouwpraktijk om verder te bouwen aan een duurzame toekomst.

9 Referentielijst

- Advanced Sensing Technologies*. (2010). Honeywell.
<https://sps.honeywell.com/us/en/products/advanced-sensing-technologies>
- Arce Rectala, M., Garcia Morales, S., & van den Bossche, N. (2017). Experimental assessment of rainwater management of a ventilated facade. *Journal of Building Physics*, 1–30.
- Arman, M. (2010). Simple Demonstration of the Seebeck Effect *Science Time Education*.
<https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ925482.pdf>
- ASHRAE. (2016). *Asrae Standard 160 - Criteria for moisture-control design analysis in buildings*.
- Behroozi, F. (2022). A Fresh Look at the Young-Laplace Equation and Its Many Applications in Hydrostatics. *Physics Teacher*, 60(5), 358-361. <https://doi.org/10.1119/5.0045605>
- Benzaama, M. H., Rajaoarisoa, L., Boukhelf, F., & El Mendili, Y. (2022). Hygrothermal transfer modelling through a biogebaseerde building material: Validation of a switching-linear model. *Journal of Building Engineering*, 55. <https://doi.org/ARTN 10469110.1016/j.jobbe.2022.104691>
- Brambilla, A., & Sangiorgio, A. (2020). Mould growth in energy efficient buildings: Causes, health implications and strategies to mitigate the risk. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 132. <https://doi.org/ARTN 11009310.1016/j.rser.2020.110093>
- Bouwvocht*. (n.d.). vocht-info.be. <https://www.vocht-info.be/oorzaken/bouwvocht/>
- C. Brischke, (2017), "5.4 Moisture performance," in *Performance of Biogebaseerde Building Materials*, Woodhead Publishing, pp. 277-285. doi:10.1016/B978-0-08-100982-6.00005-7.
- Collet, F., Achchaq, F., Djellab, K., Marmoret, L., & Beji, H. (2011). Water vapor properties of two hemp wools manufactured with different treatments. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1079-1085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.069>
- Coupillie, C., Steeman, M., Van den Bossche, N., & Maroy, K. (2017). Evaluating the hygrothermal performance of prefabricated timber frame facade elements used in building renovation. *11th Nordic Symposium on Building Physics (Nsb2017)*, 132, 933-938.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.727>
- Curran, M. A. (2010). Biobased Materials *Biocurr*.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471238961.biobcurr.a01>
- Dampdiffusie en dampdiffusieweerstand (Z-waarde)*. (n.d.). Joostdevree.
https://www.joostdevree.nl/shtmls/dampdiffusie.shtml?fbclid=IwAR2ksp18QIRNuayRev-LsRvM8SwqweRYv7WfMBw0Ai_w1O8sAH-pwy6PGyM
- De Brabandere, L. (2021). *Capillary imbibition in cementitious materials: effect of salts and exposure condition* Ghent]. Ghent. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/003/014/541/RUG01-003014541_2021_0001_AC.pdf

- De Jonghe, S. (2005). *VOCHTTRANSPORTEIGENSCHAPPEN VAN CAPILLAIRE ONDERDAKMATERIALEN* Ghent]. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/001/311/857/RUG01-001311857_2010_0001_AC.pdf
- De Mets, T. (2017). *Deliverable D3-3 Syntheserapport: 'Innovatie voor Gevelrenovatie'*. Renofase. <https://www.renofase.be/wp-content/uploads/2013/12/2017.01.26-Syntheserapport-Innovatie-voor-Gevelrenovatie.pdf>
- De Wolf, C. (2016). *Catherine De Wolf: Waarom berekenen architecten de milieu-impact van bouwmaterialen?* Architectura. <https://www.architectura.be/nl/nieuws/catherine-de-wolf-waarom-berekenen-architecten-de-milieu-impact-van-bouwmaterialen/>
- De Wolf, C., Hoxha, E., & Fivet, C. (2020). Comparison of environmental assessment methods when reusing building components: A case study. *Sustainable Cities and Society*, 61. <https://doi.org/ARTN 10232210.1016/j.scs.2020.102322>
- Douguet, E., Wagner, F. (2021). Milieuvoordelen (impact) van hergebruik in de bouwsector. https://www.nweurope.eu/media/15815/bookletfcibenl-1_milieuvoordelen_impact.pdf
- Ecomat. (2014). *GEËXPANDEERDE KURKPLATEN*. <https://ecomat.be/bestandenbank/ecomat-kurkisolatieplaten.pdf>
- Farrell, P. S. E. (1999). The hysteresis effect. *Human Factors*, 41(2), 226-240. <https://doi.org/Doi 10.1518/001872099779591259>
- Fino, R., Tadeu, A., & Simoes, N. (2018). Influence of a period of wet weather on the heat transfer across a wall covered with uncoated medium density expanded cork. *Energy and Buildings*, 165, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.020>
- Geldof, L. (2016). *Kwantificatie van waterinfiltratie bij raamaansluitingen* Ghent. Ghent. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/300/910/RUG01002300910_2016_0001_AC.pdf
- Gryson, B., & Dewachter, L. (2019). *Evaluatie van het drogingspotentieel van houtskeletwanden bij accidentele waterinfiltratie* Ghent]. Ghent. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/785/879/RUG01002785879_2019_0001_AC.pdf
- Hall, M. R., & Casey, S. (2012). Hygrothermal behaviour and occupant comfort in modern earth buildings. *Energy and Buildings*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090263500022>
- Hansen, K., Rode, C., De Place Hansen, E., Padfield, T., Kristiansen, F., (1999). Experimental investigation of the hygrothermal performance of insulation materials, Buildings VIII
- Hennep isolatie - natuurlijk, ecologisch, effectief.* (n.d.). Lets-Rebuild. <https://nl.lets-rebuild.com/hemp-insulation-natural-ecological-effective-7873#Diffusie-open,%20goede%20warmte-%20en%20geluidsisolerende%20eigenschappen>
- Hoang, C. P., Kinney, K. A., Corsi, R. L., & Szaniszló, P. J. (2010). Resistance of green building materials to fungal growth. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64(2), 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.11.001>

- Industore. (2012). GEVOLGEN VAN TOXINE IN DE BOUW ONDERSCHAT. <https://www.industore.nl/nieuws/toxine-bouw-adembescherming>
- Inwendige condensatie (2019). beSteel. <https://be-steel.eu/wikisteel/inwendige-condensatie/>
- J. V. Acker and S. Palanti, (2017), "5.3 Durability," in *Performance of Biogebaseerde Building Materials*, Woodhead Publishing, pp. 257-277. doi:10.1016/B978-0-08-100982-6.00005-7.
- Koh, C. H., Gauvin, F., Schollbach, K., & Brouwers, H. J. H. (2022). Investigation of material characteristics and hygrothermal performances of different biogebaseerde insulation composites. *Construction and Building Materials*, 346. <https://doi.org/ARTN12844010.1016/j.conbuildmat.2022.128440>
- Kooiman, M. (2018). Een onderzoek naar de effecten van duurzame woningbouw op de residuele grondwaarden. <https://www.pasbv.nl/wp-content/uploads/2018/06/PAS-2018-Rapport.pdf>
- Korjenic, A., Petranek, V., Zach, J., & Hroudova, 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>
- Kurkfabriek. (n.d.). *kurk & kokos de natuurlijke thermische en akoestische isolatie*. https://www.kurk.be/media/files/Brochure_KVA_ISOLATIE_210x280_NL:FR_2019_SITE_LR.pdf
- Lagniau, J., & Veraverbeke, M. (2018). *Impact van accidentele waterinfiltraties op het hygrothermisch gedrag van houtskeletwanden* Ghent]. Ghent. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/494/873/RUG01002494873_2018_0001_AC.pdf
- Lambrechts, L. (2022). *Experimenteel onderzoek naar het hygrothermisch gedrag van natuurlijke isolatiematerialen in houtskeletwanden: Het effect van waterinfiltratie op het drogingspotentieel en de thermische prestaties* UGent]. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/003/063/549/RUG01-003063549_2022_0001_AC.pdf
- Lammerse, V. (2020). *CO2-UITSTOOT VAN DE BOUW BEREIKT RECORDHOOGTE*. SCIENTIAS. <https://scientias.nl/co2-uitstoot-van-de-bouw-bereikt-recordhoogte/>
- Latif, E., Tucker, S., Ciupala, M. A., Wijeyesekera, D. C., & Newport, D. (2014). Hygric properties of hemp bio-insulations with differing compositions. *Construction and Building Materials*, 66, 702-711. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.021>
- Lerma, C., Borrás, J. G., Mas, A., Torner, M. E., Vercher, J., & Gil, E. (2021). Evaluation of Hygrothermal Behaviour in Heritage Buildings through Sensors, CFD Modelling and IRT. *Sensors*, 21(2). <https://doi.org/ARTN56610.3390/s21020566>
- MAGOXX. (2021). *Summary of Test reports MAGOXX®board*. <https://www.magoxx.nl/wp-content/uploads/2022/12/2022-TDS-MAGOXX-9mm-grijs.pdf>
- Meeusen, J. (2006). *Na-isolatie van spouwmuren* University of Ghent]. Ghent. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/001/311/790/RUG01-001311790_2010_0001_AC.pdf

Ökologisch Bauen & renovieren. (2013). BUND.

https://issuu.com/bundbawue/docs/leseprobe_bund-jahrbuch_2013

Potentie van biogebaseerde materialen in de bouw. (2019). <https://circulairebouweconomie.nl/wp-content/uploads/2019/07/CBE-Eindrapportage-potentie-biogebaseerde-materialen-NIBE-juli-2019.pdf>

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+moistbuf+revised.pdf>

Roels, S., International Energy, A., Executive committee on energy conservation in, b., & community, s. (2008). *Experimental analysis of moisture buffering*. International Energy Agency.

Schik, W., Meijer, K., Verkerk, D., Paardekooper, D., Grim, L., & Peek, T. (2022). De urgente belofte van biobased bouwen. *ARCADIS*, 96. <https://circulairebouweconomie.nl/wp-content/uploads/2022/12/De-urgente-belofte-van-biobased-bouwen-Transitieteam-CBE-RVO-RWS-dec-2022.pdf>

SDG 3 - Verzeker een goede gezondheid en promoot welzijn voor alle leeftijden. (n.d.). Verenigde Naties. <https://unric.org/nl/duurzame-ontwikkelingsdoelstellingen/sdg-3/>

SDG 12 - Verzeker duurzame consumptie- en productiepatronen. (n.d.). Verenigde Naties. <https://unric.org/nl/duurzame-ontwikkelingsdoelstellingen/sdg-12/>

SDG 13 - Neem dringend actie om klimaatverandering en haar impact te bestrijden. (n.d.). Verenigde Naties. <https://unric.org/nl/duurzame-ontwikkelingsdoelstellingen/sdg-13/>

Sensors supporting the energy transition. (2021). <https://www.hukseflux.com/>

Steeman, M. (2010). *Hygrothermal Modelling for Building Energy Simulation Applications*.

Steeman, M. (2019). *Bouwfysica*.

Steeman, M., van den Bossche, N., Calle, K. (2020). Drying Potential of Wood Frame Walls Subjected to Accidental Water Infiltration. <https://doi.org/10.23967/dbmc.2020.039>

Steskens, S., Loncour, X., Acke, A., Wijnants, J., Roels, S. & Vereecken, E. (2012). Binnenisolatie van Buitenmuren. <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/12196>

STO. (2022). *Technisch informatieblad Sto-Houtvezel isolatieplaat M 042*. https://datamaster.sto-net.com/webdocs/0000/SDB/techdoc_out_renamed/TechnicalDataSheet_Sto-Houtvezel_isolatieplaat_M_042_stomp_0214_NL_02_03.PDF

Tazelaar, K. (2017). Ontwerpen met vezels en 'bio' polymeren https://www.coebbe.nl/app/uploads/2019/01/K.-Tazelaar-_Biocomposieten-Ontwerpen-met-vezels-en-biopolymeren.pdf

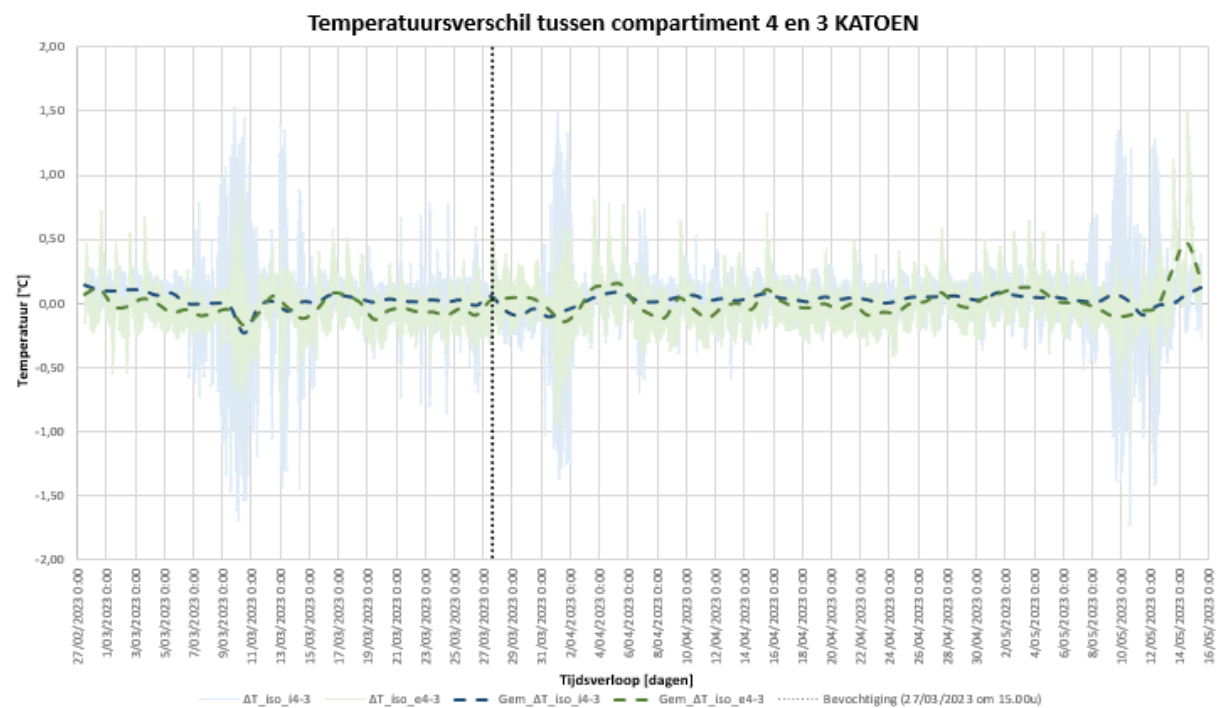
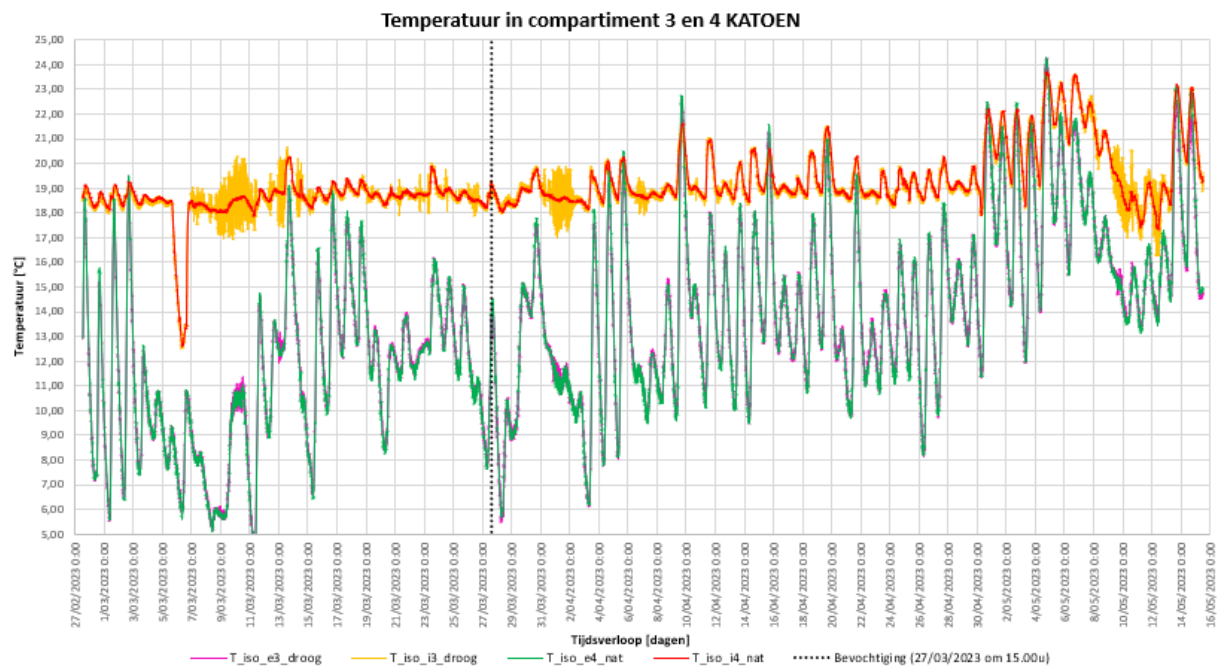
Technische voorlichting nr. 252 (2014).

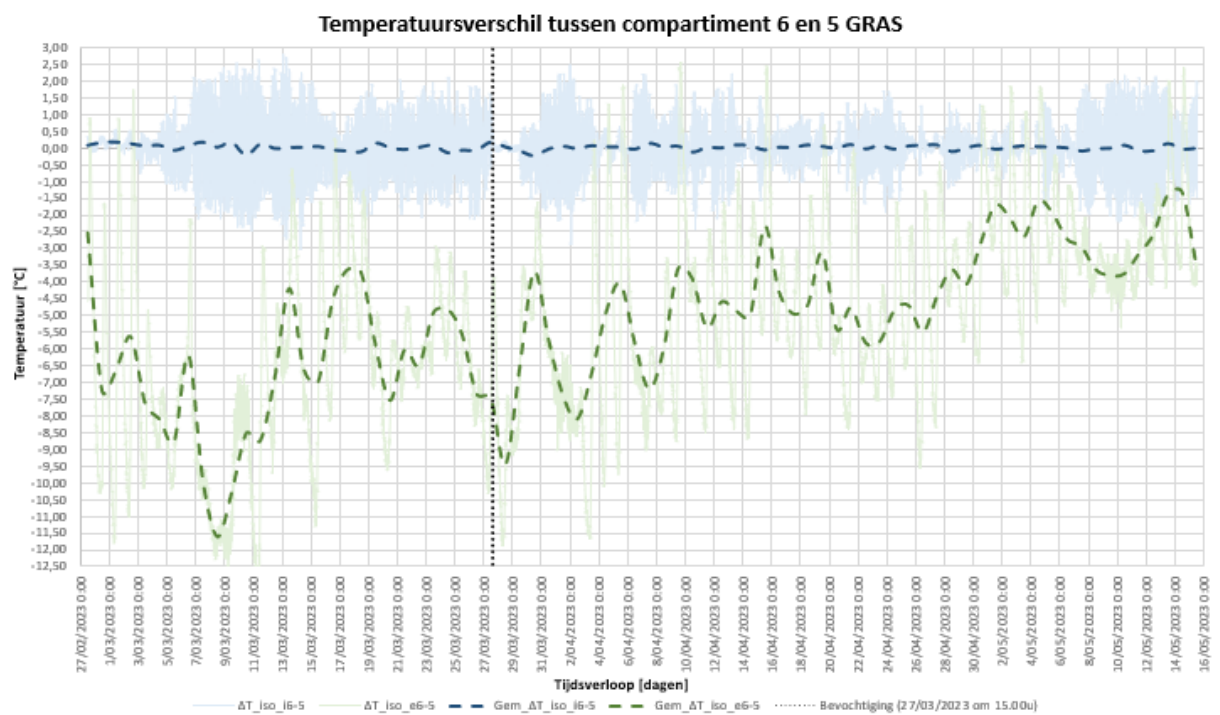
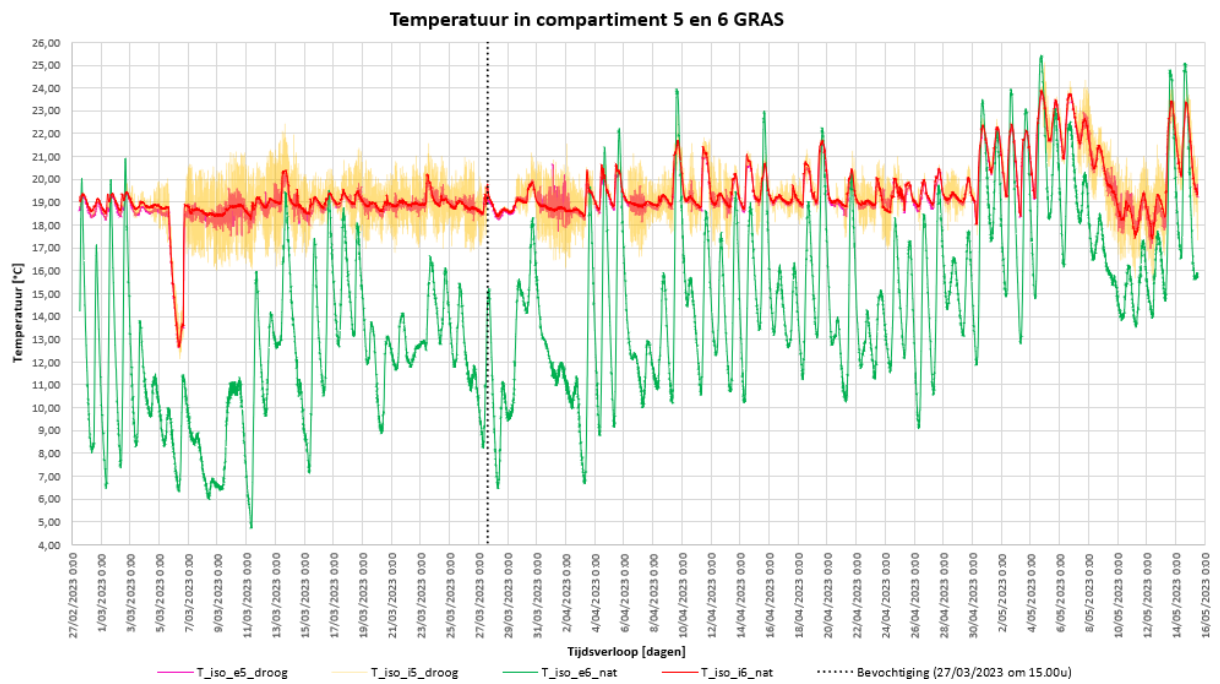
https://www.buildwise.be/umbraco/Surface/PublicationItem/DownloadFile?file=31000%2Fnl%2Fprotected%2FTVN_252.pdf

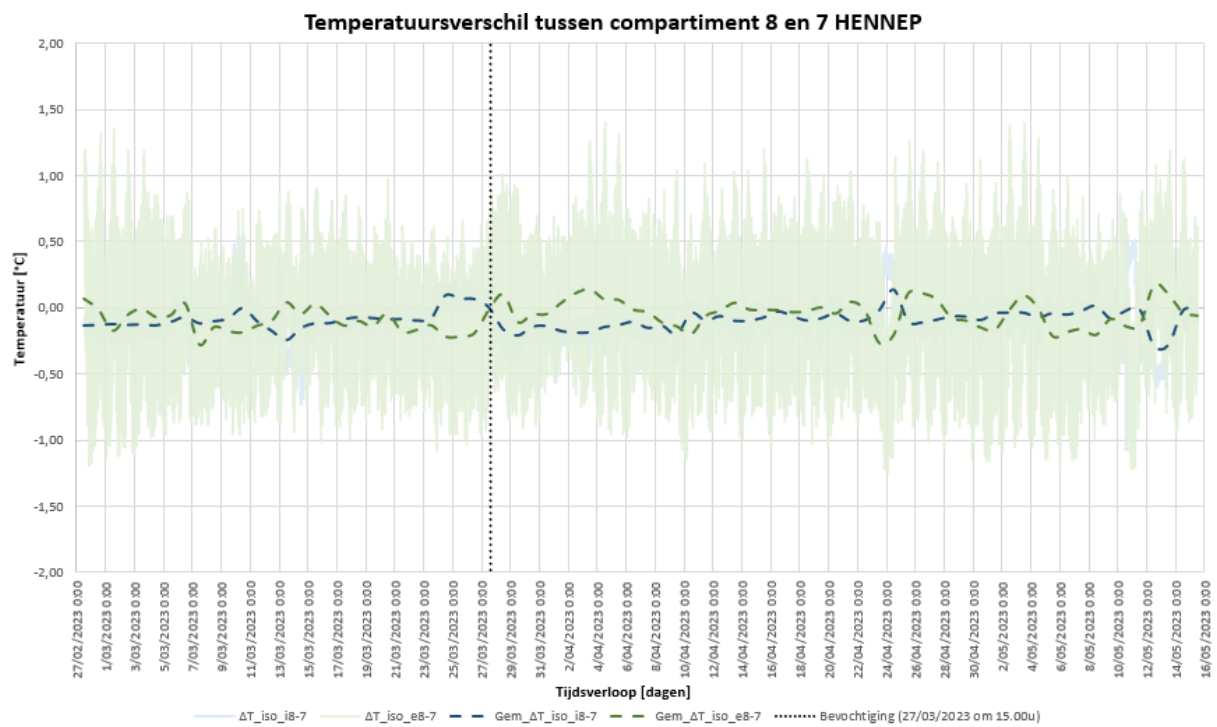
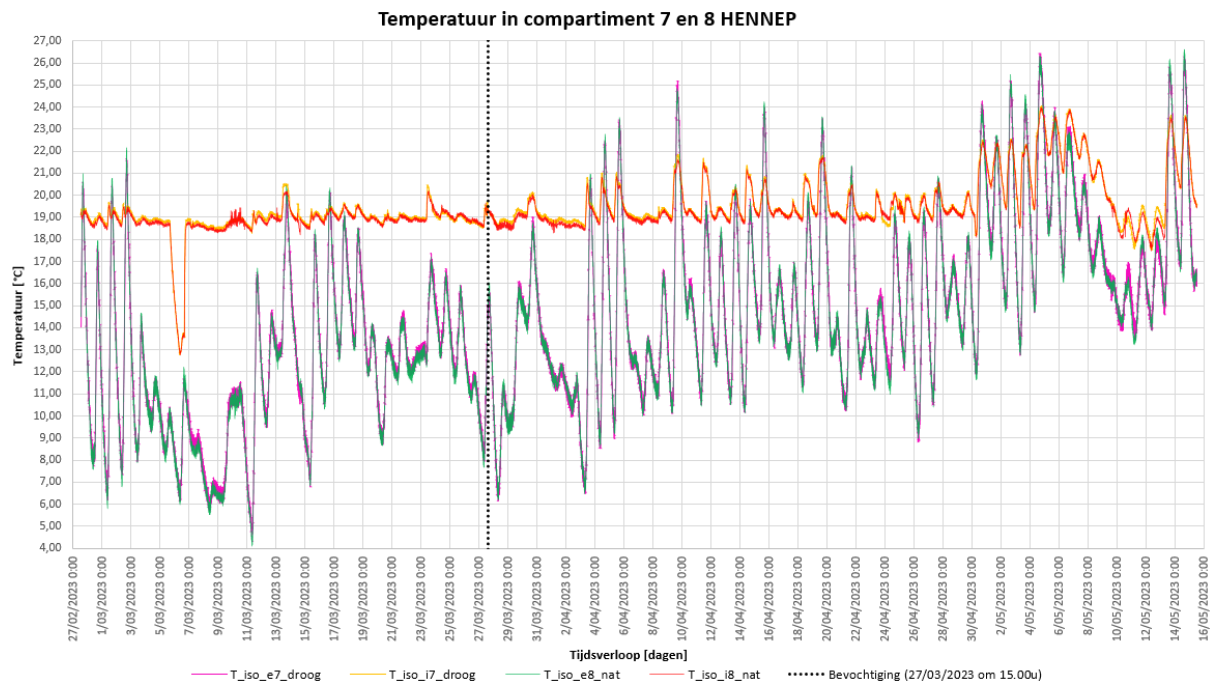
- Transitie van België naar een klimaatneutrale maatschappij in 2050. (2019). 2050.be.
<https://klimaat.be/2050-nl>
- Vandenbergh, D. (n.d.). *Lambda-waarde van alle materialen*. Lambda.
<https://www.lambda.be/nl/energietips/lambda-waarde-van-alle-materialen>
- Vanden Haute, N. (2021). Ontwerp en uitvoering van een circulair en biogebaseerd testpaviljoen voor practicumdoeleinden Ghent]. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/003/063/885/RUG01-003063885_2022_0001_AC.pdf
- Van Goethem, S. (2014). *Rainwater runoff on building facades: numerical simulations and analysis of wetting patterns* Ghent]. Ghent.
https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/153/536/RUG01002153536_2014_0001_AC.pdf
- Vanhaecke, A. (2006). *Houtrot door schimmels: een verkennend onderzoek met Ramanspectroscopie* University of Ghent]. Ghent.
https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/001/241/348/000010265954_2021_0001_AC.pdf
- Verelst, R. (2014). *Hygrothermisch gedrag van compacte platte daken in passiehuizen* University of Ghent]. Ghent. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/153/674/RUG01-002153674_2014_0001_AC.pdf
- Viitanen, H., & Ojanen, T. (2007). Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials.
https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2007%20B10%20papers/162_Viitanen.pdf
- Voerman, B. (2013). *De thermohygrische prestatie van uitwendige scheidingsconstructies van herbestemd historisch (monumentaal) erfgoed - een generiek onderzoek naar de diversiteit aan detailoplossingen van uitwendige scheidingsconstructies van herbestemd (historisch) monumentaal erfgoed en de thermohygrische prestatie van deze 'veel voorkomende' detailoplossingen* Eindhoven]. <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46929976/755789-1.pdf>
- Volf, M., Divis, J., & Havlik, F. (2015). Thermal, moisture and biological behaviour of natural insulating materials. *6th International Building Physics Conference (Ibpc 2015)*, 78, 1599-1604.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.219>
- Wat is adsorptie? (n.d.). DESOTEC. <https://www.desotec.com/nl/carbonology/carbonology-academy/wat-adsorptie>
- Weer Archief Gent. (2023). Meteoblue.
https://www.meteoblue.com/nl/weer/historyclimate/weatherarchive/gent_belgi%C3%ab_2797656?fcstlength=1m&year=2023&month=4
- Willem, P. (2020). *HOUTBOUW IN BRUSSEL*. Leefmilieu Brussel.
https://leefmilieu.brussels/sites/default/files/user_files/pres-210107-bois-1-2-phys-nl.pdf
- Zitten er gevaarlijke isocyanaten in polyurethaan-isolatiemateriaal? (n.d.). Omgeving Vlaanderen.
<https://omgeving.vlaanderen.be/nl/zitten-er-gevaarlijke-isocyanaten-in-polyurethaan-isolatiemateriaal>

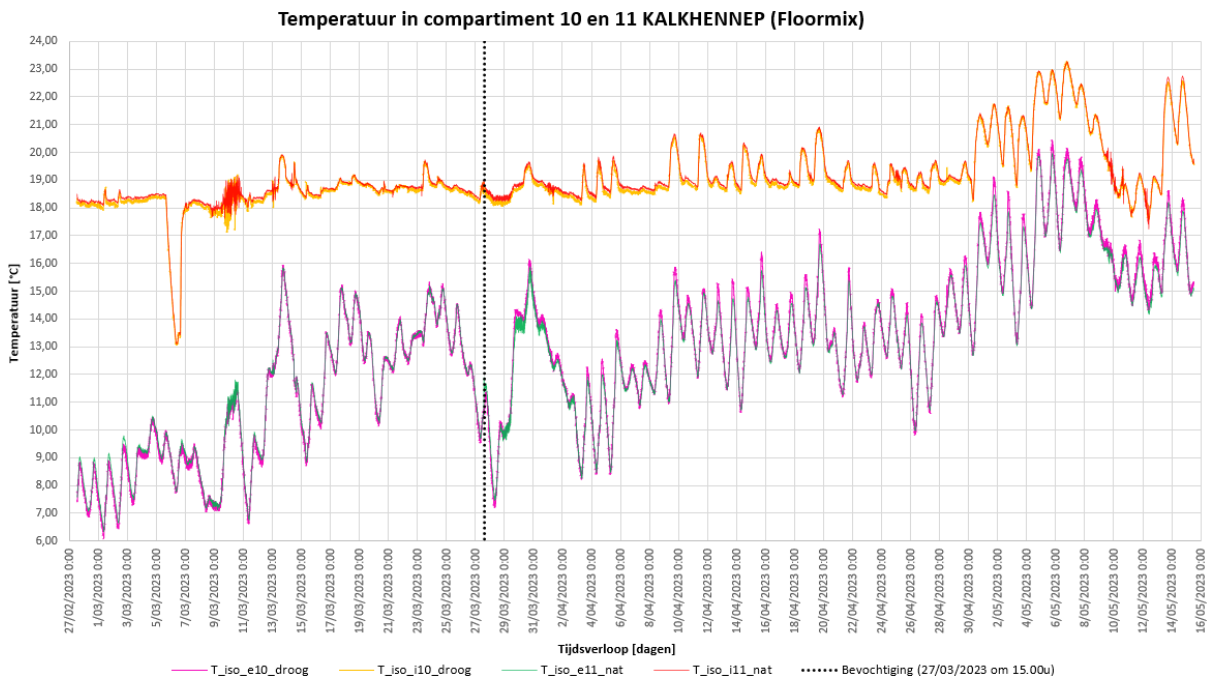
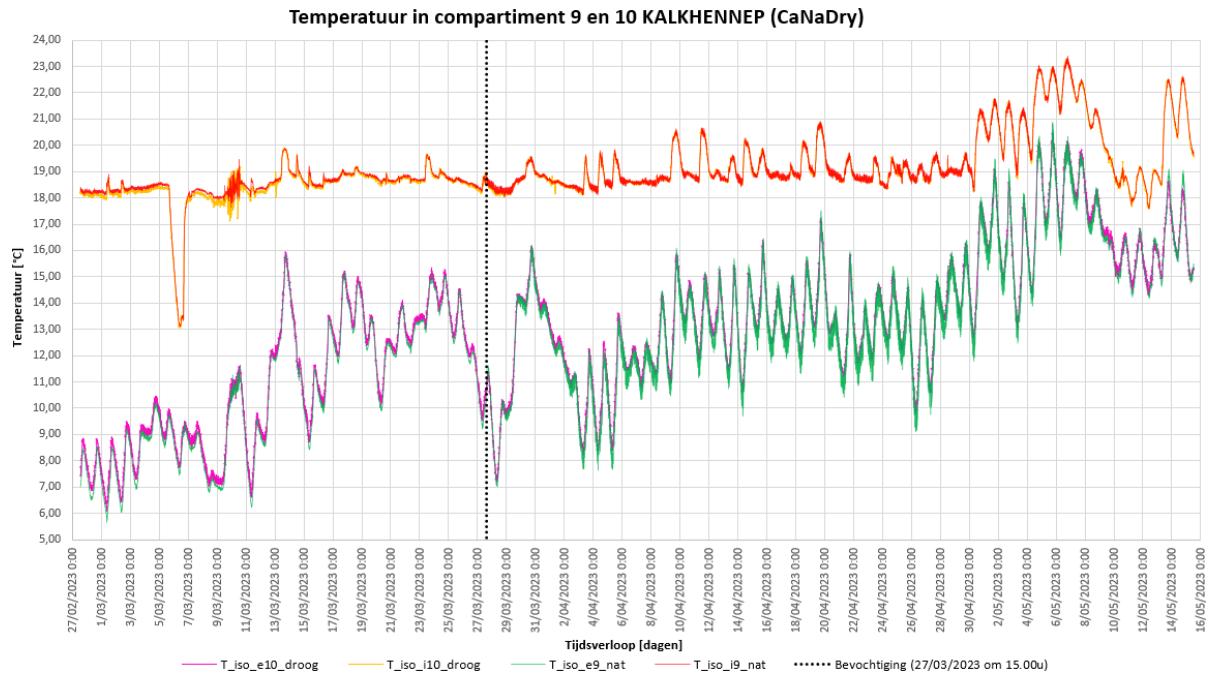
10 Bijlagen

Bijlage A: Experimentele resultaten meetcampagne: grafieken m.b.t. temperatuur

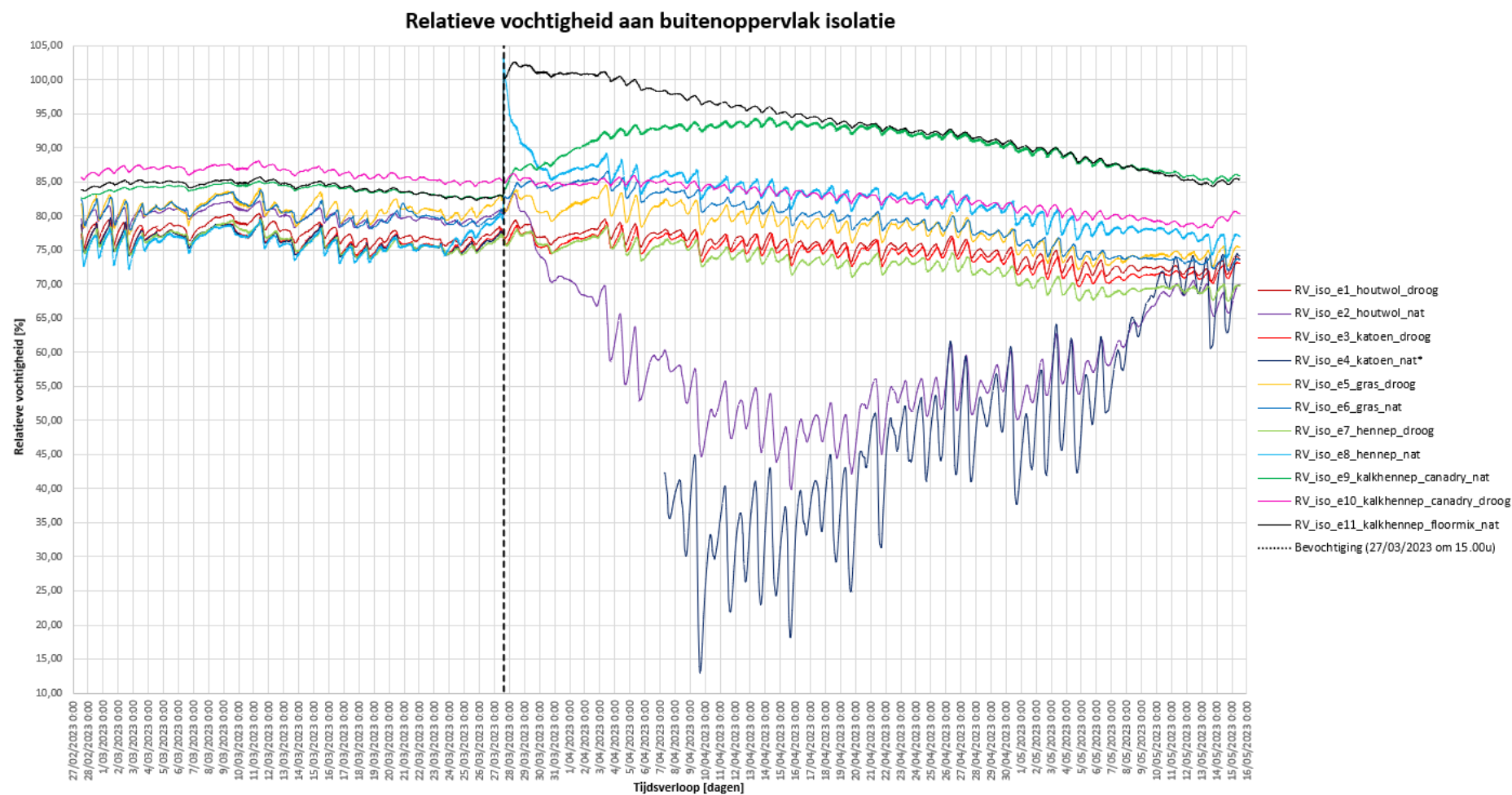




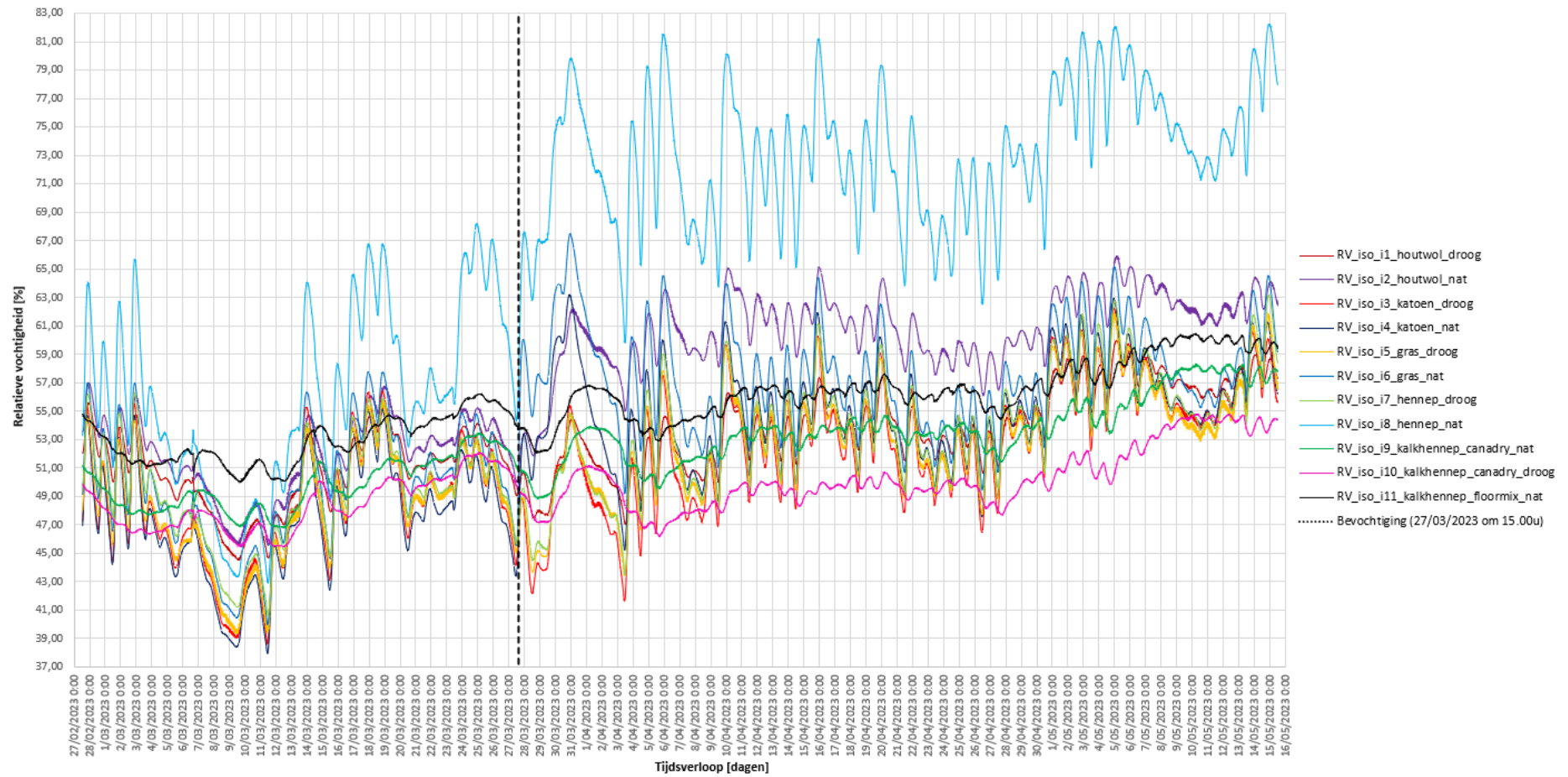




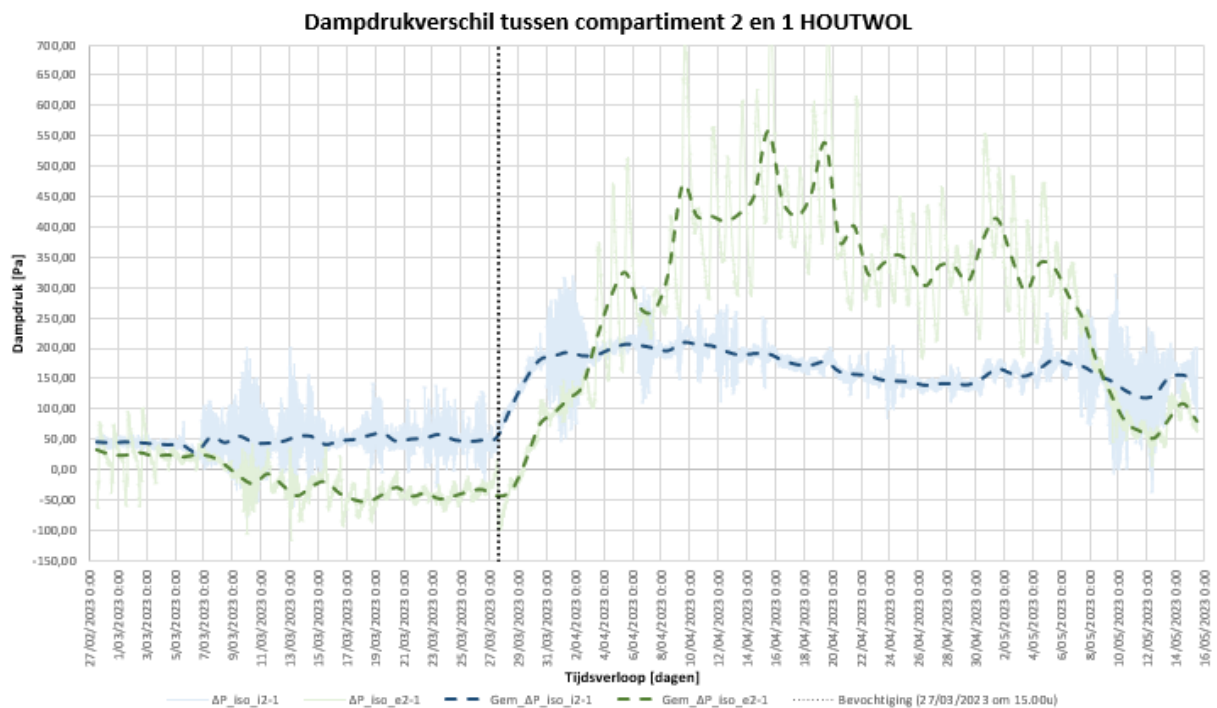
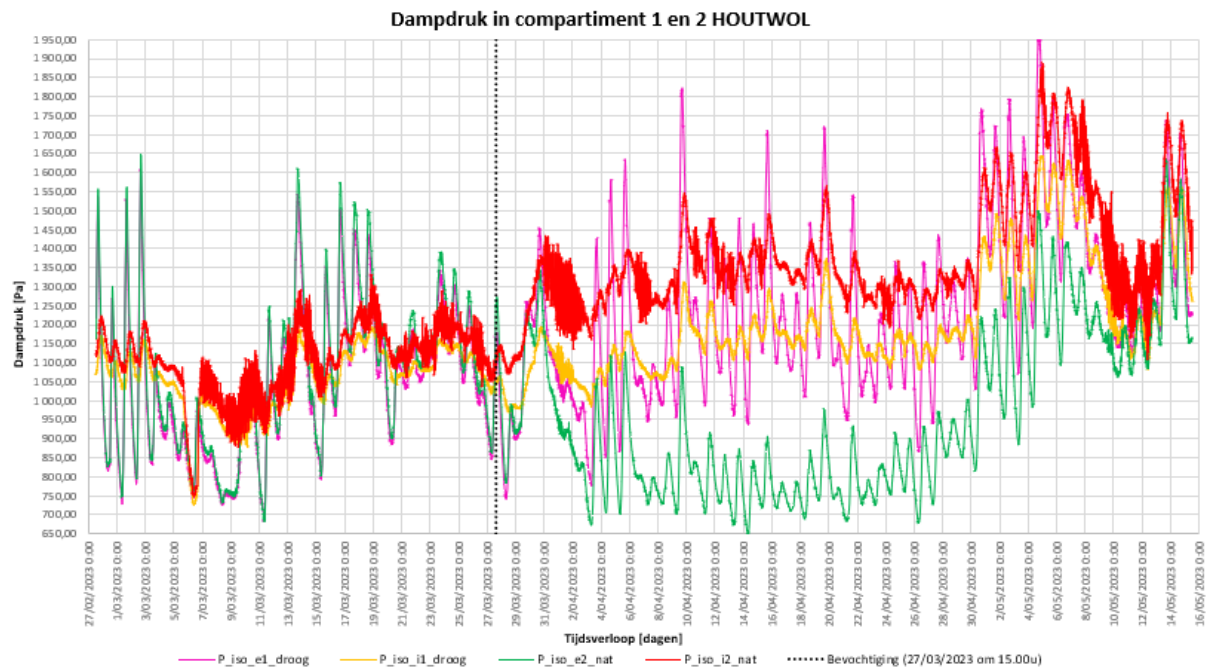
Bijlage B: Experimentele resultaten meetcampagne: grafieken relatieve vochtigheid

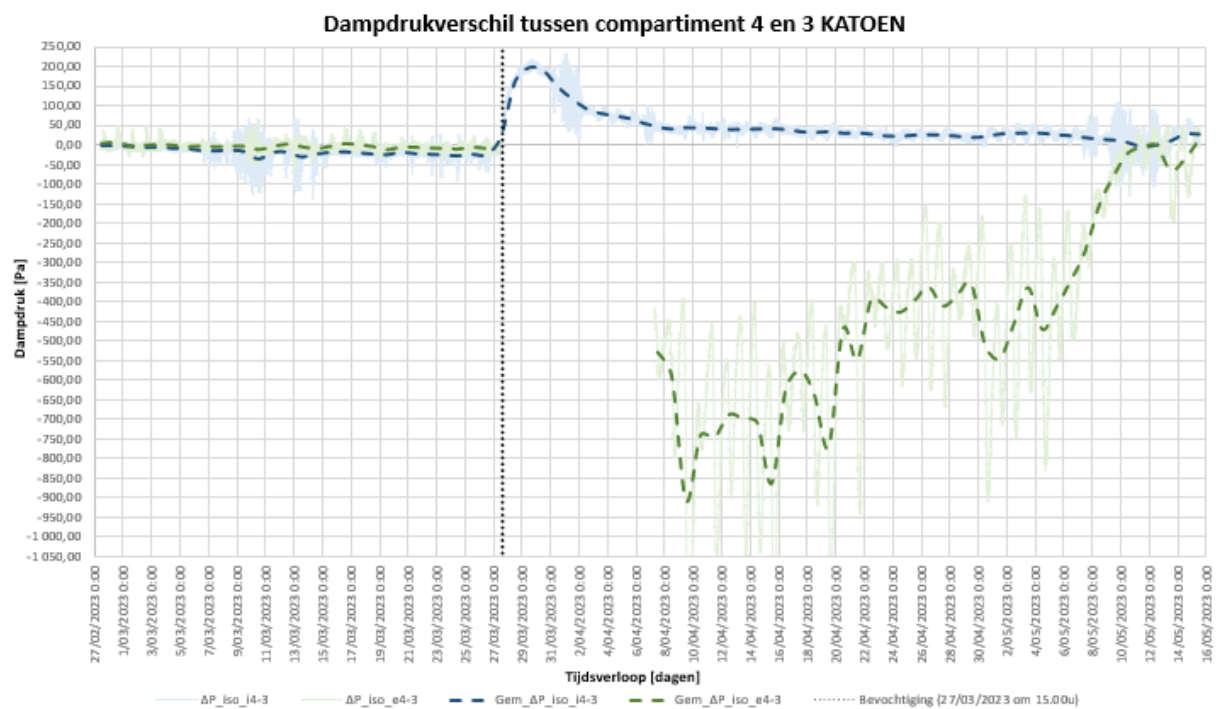
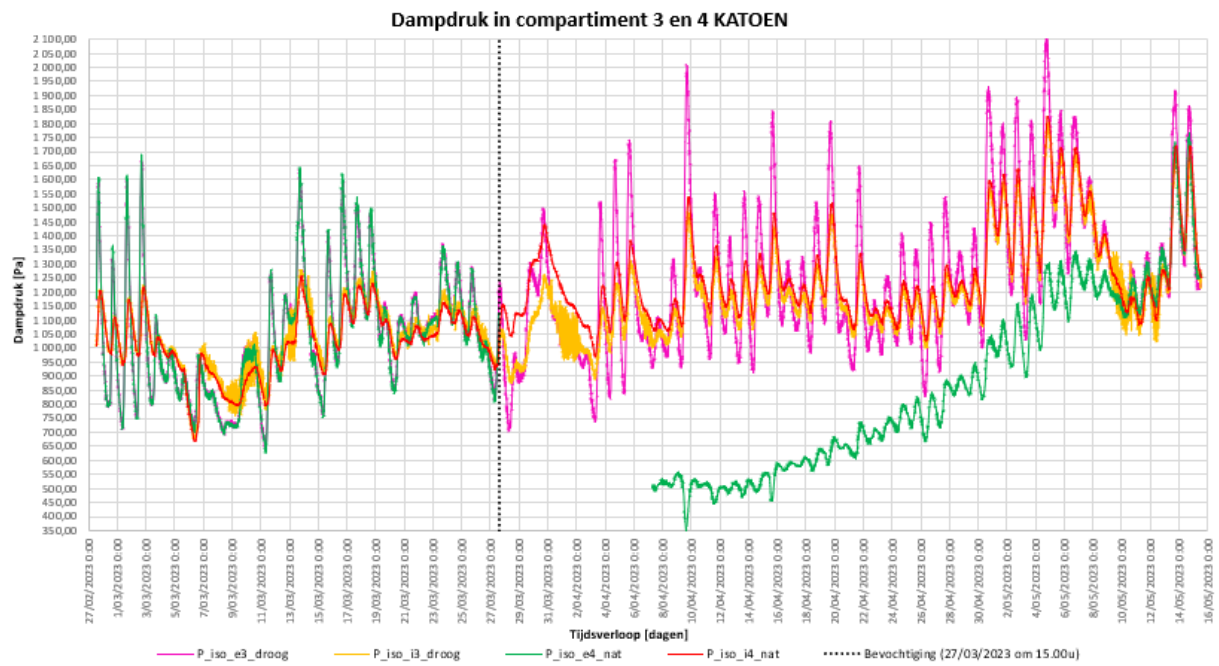


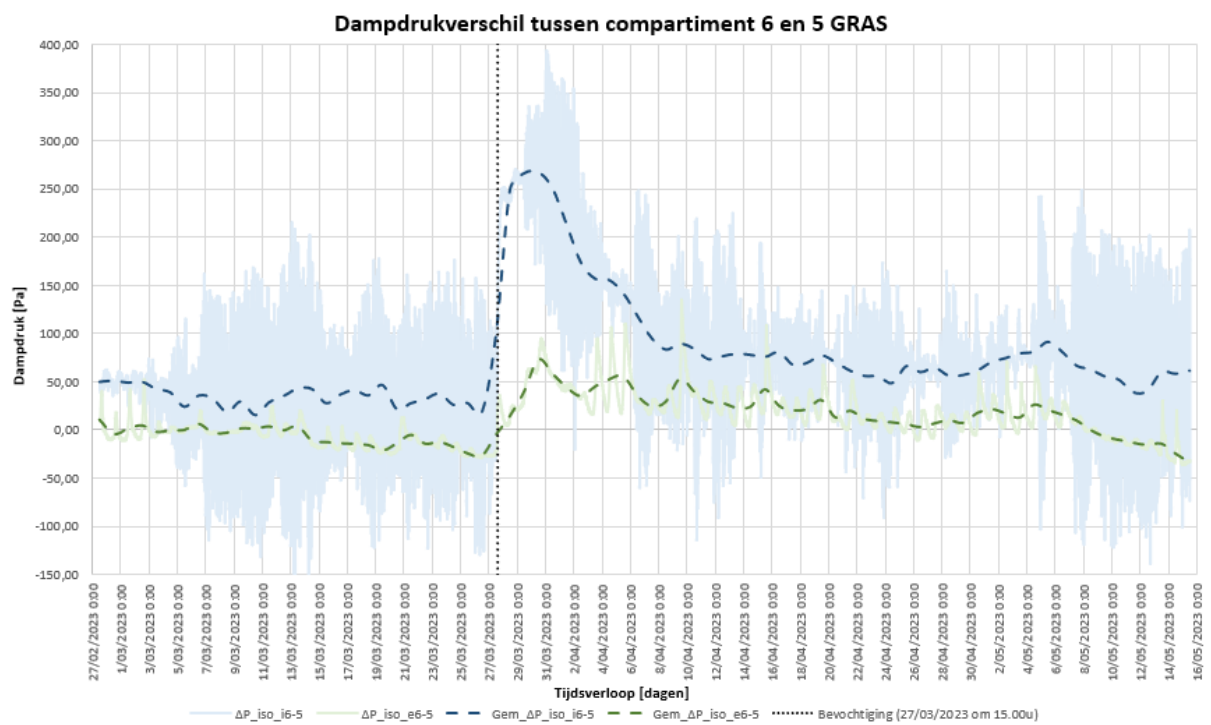
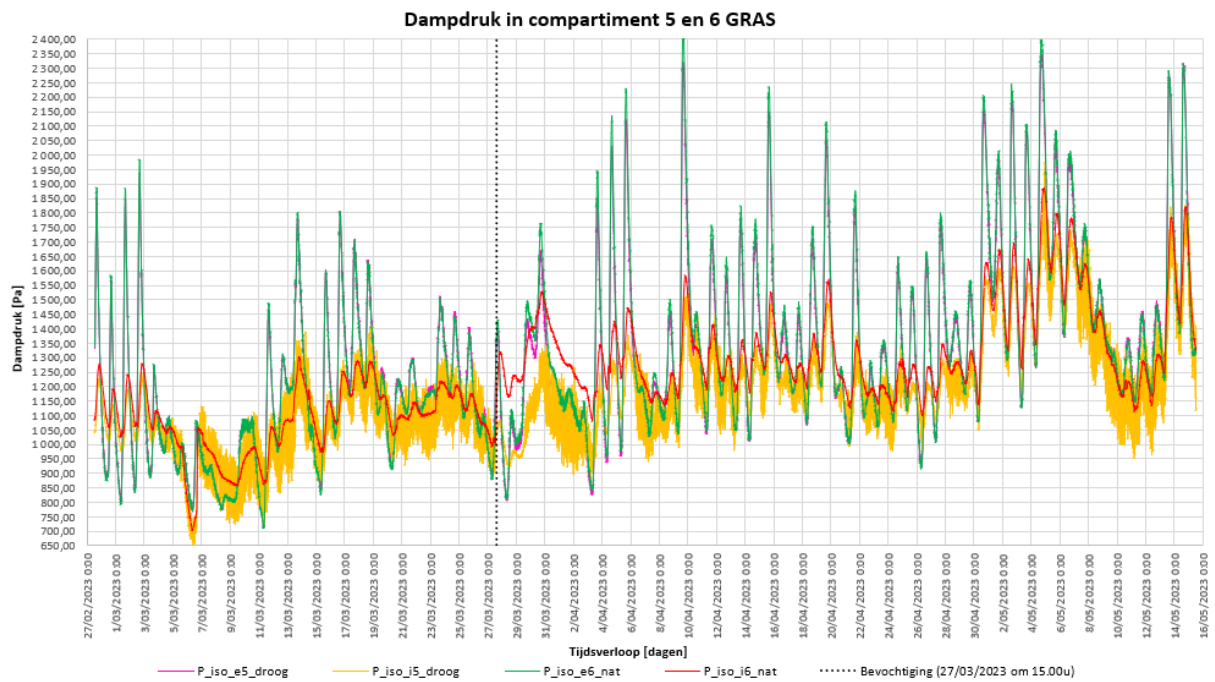
Relatieve vochtigheid aan binnenoppervlak isolatie

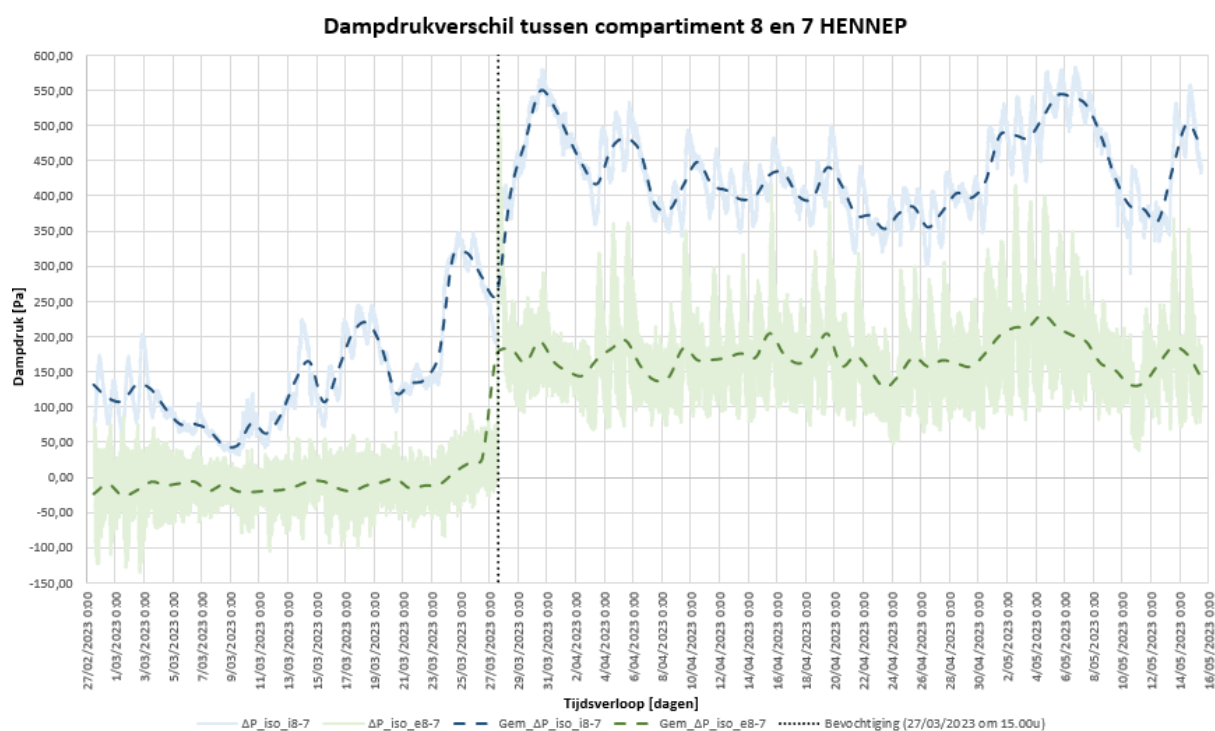
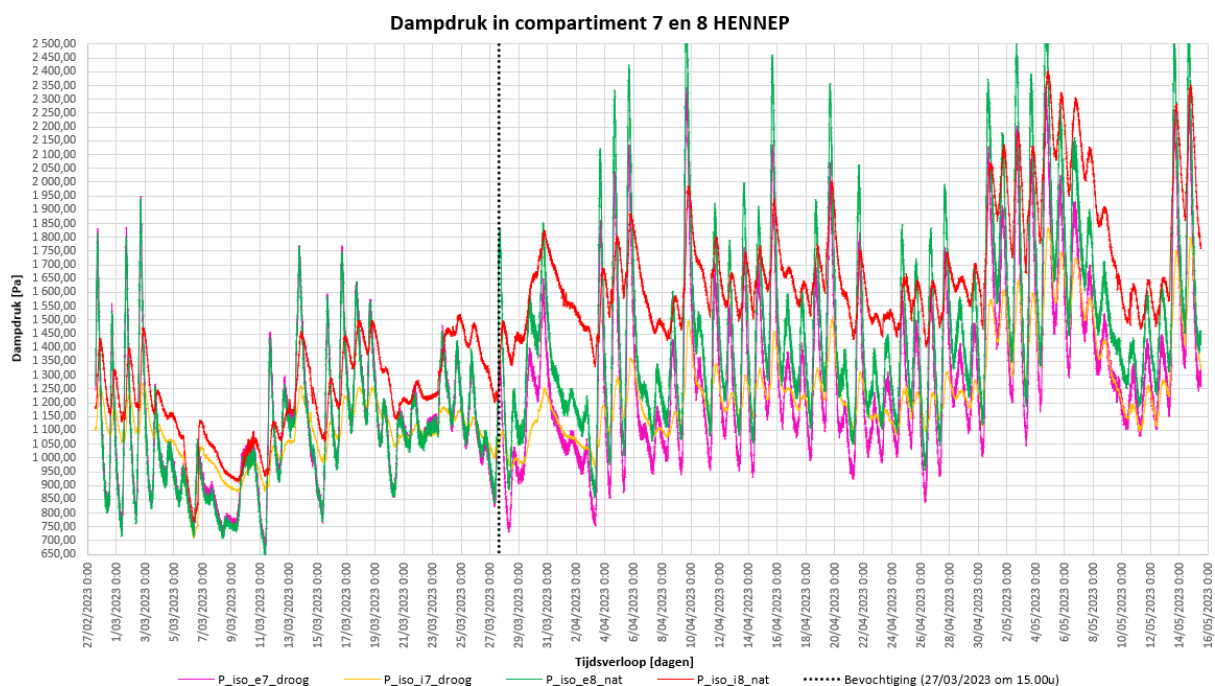


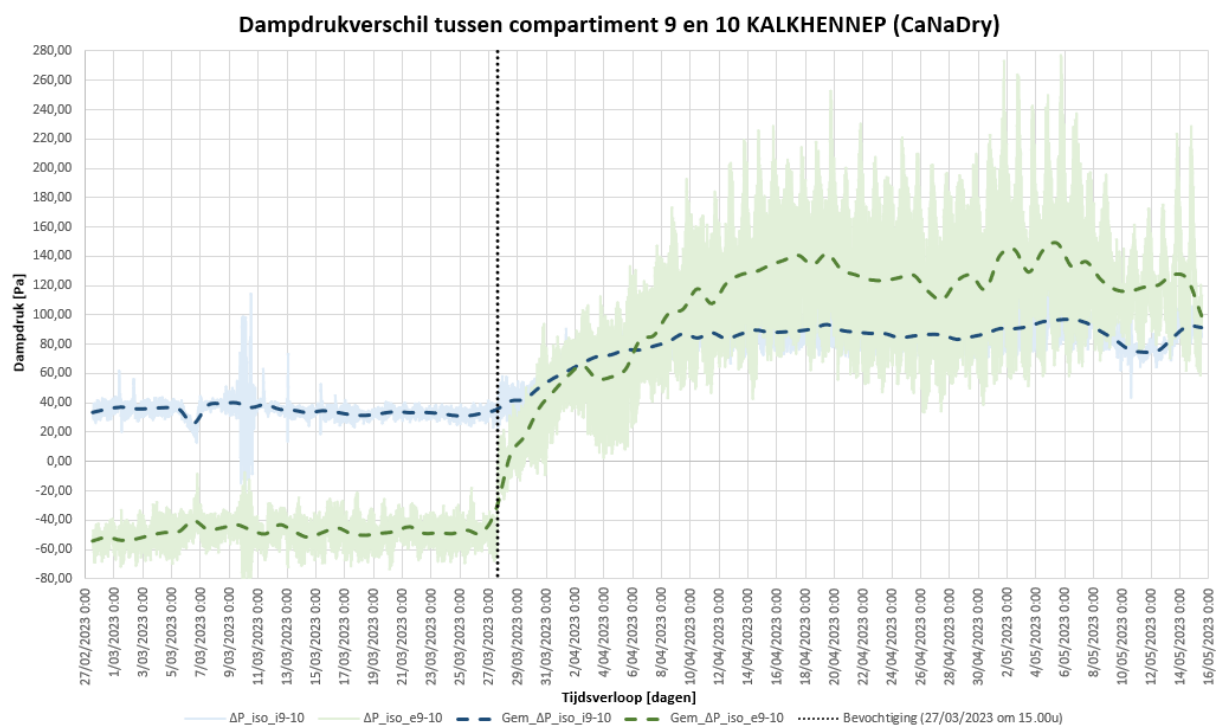
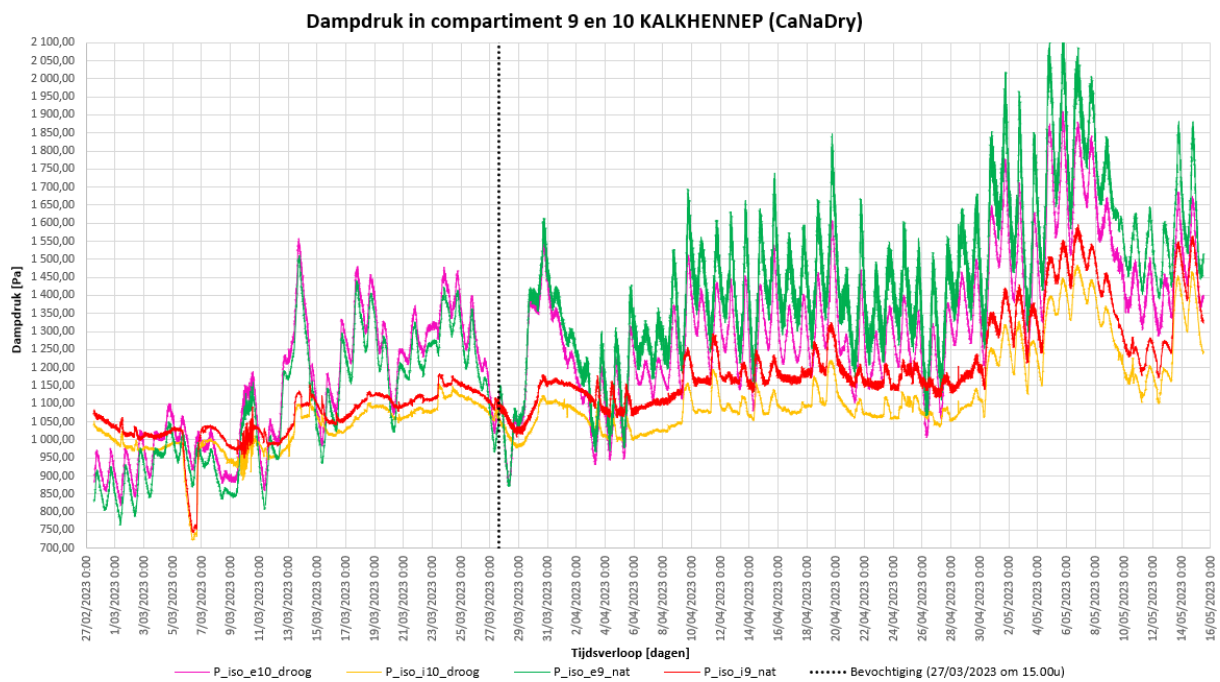
Bijlage C: Experimentele resultaten meetcampagne: grafieken dampdruk

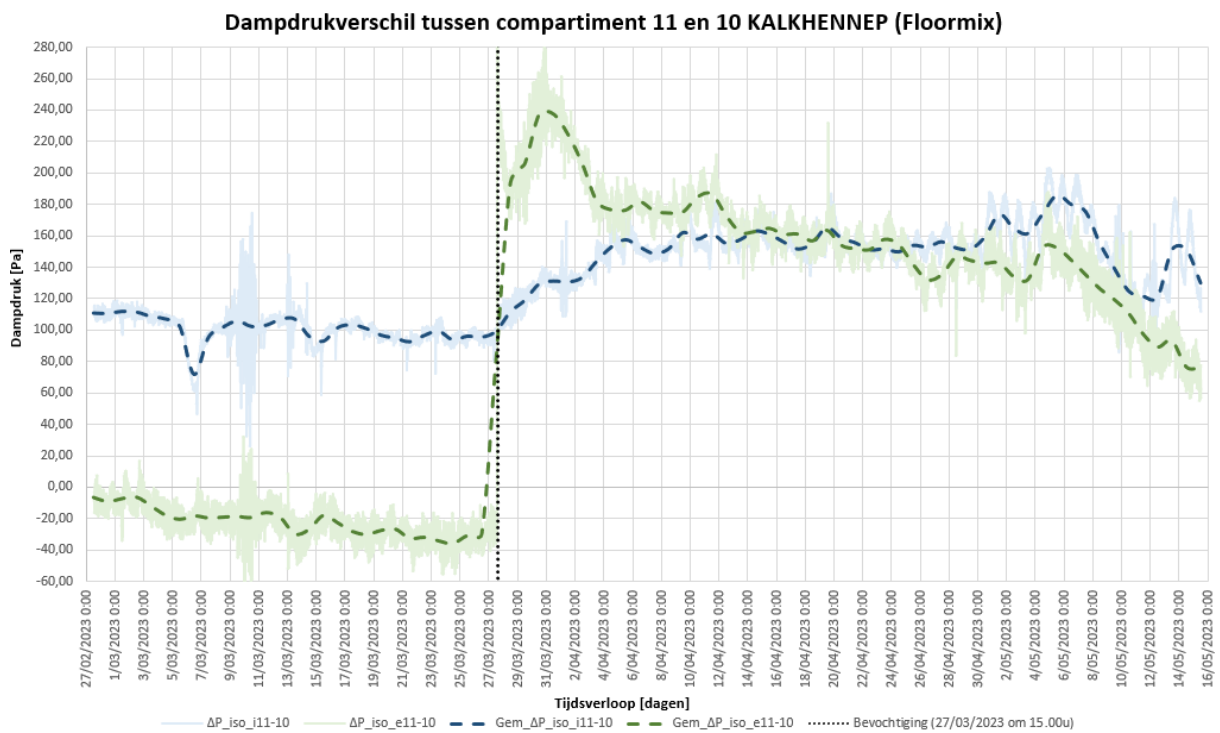
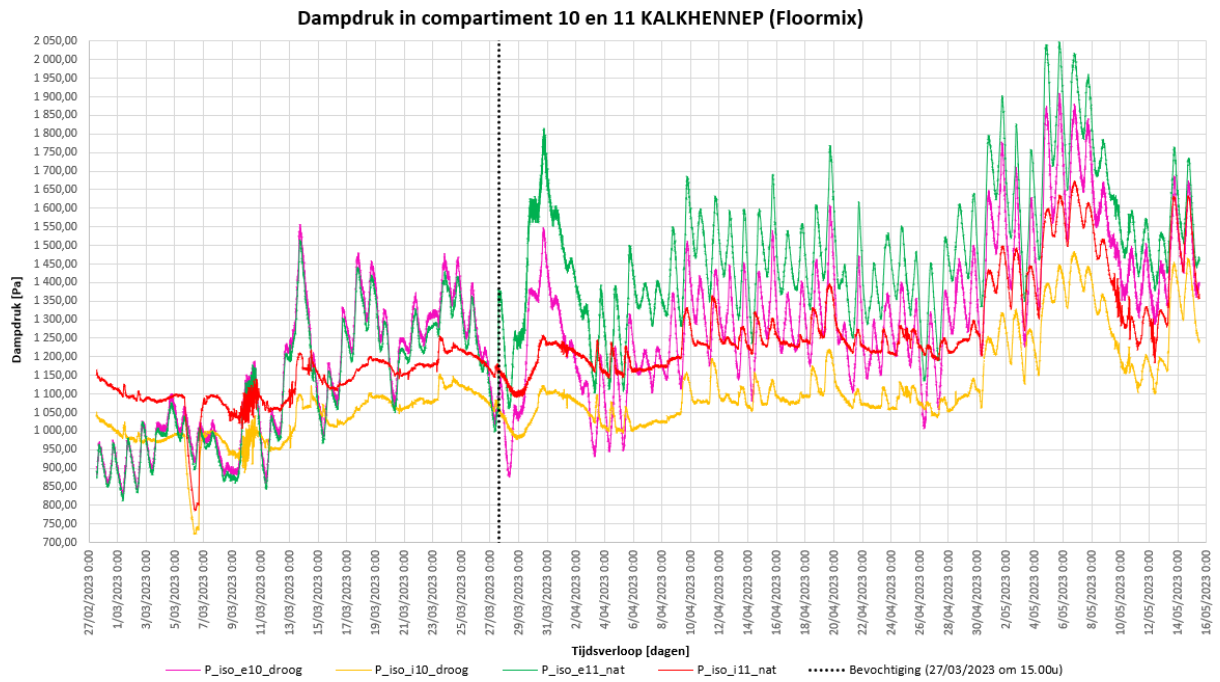






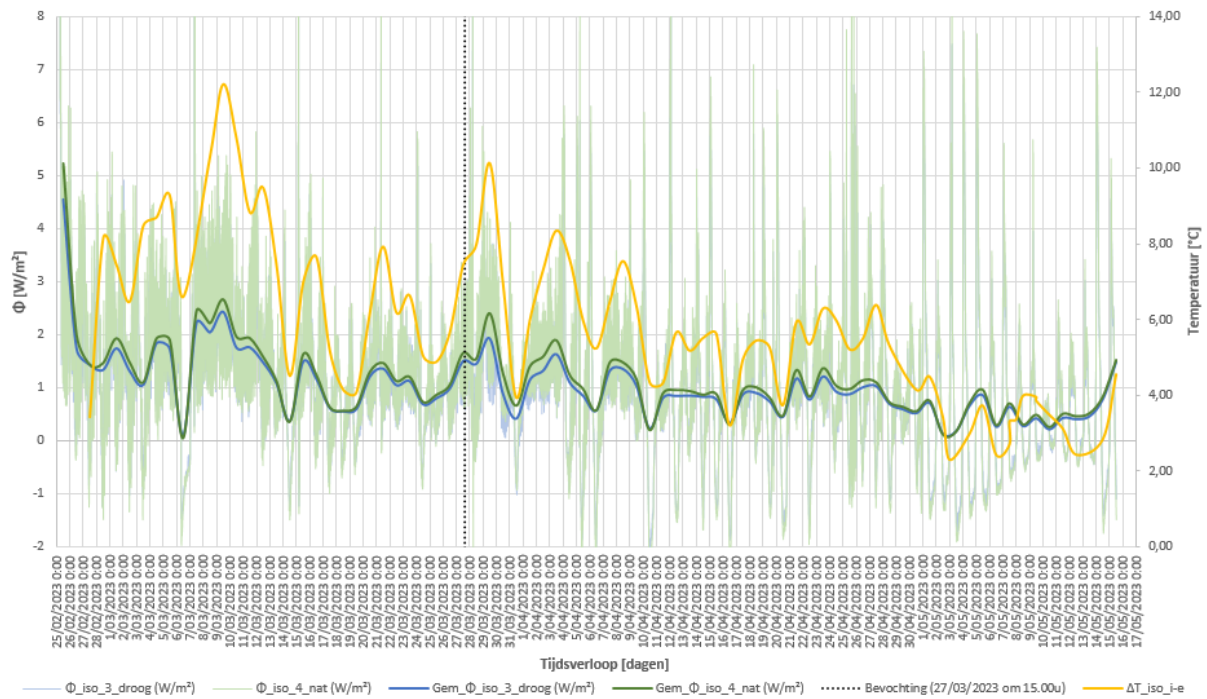




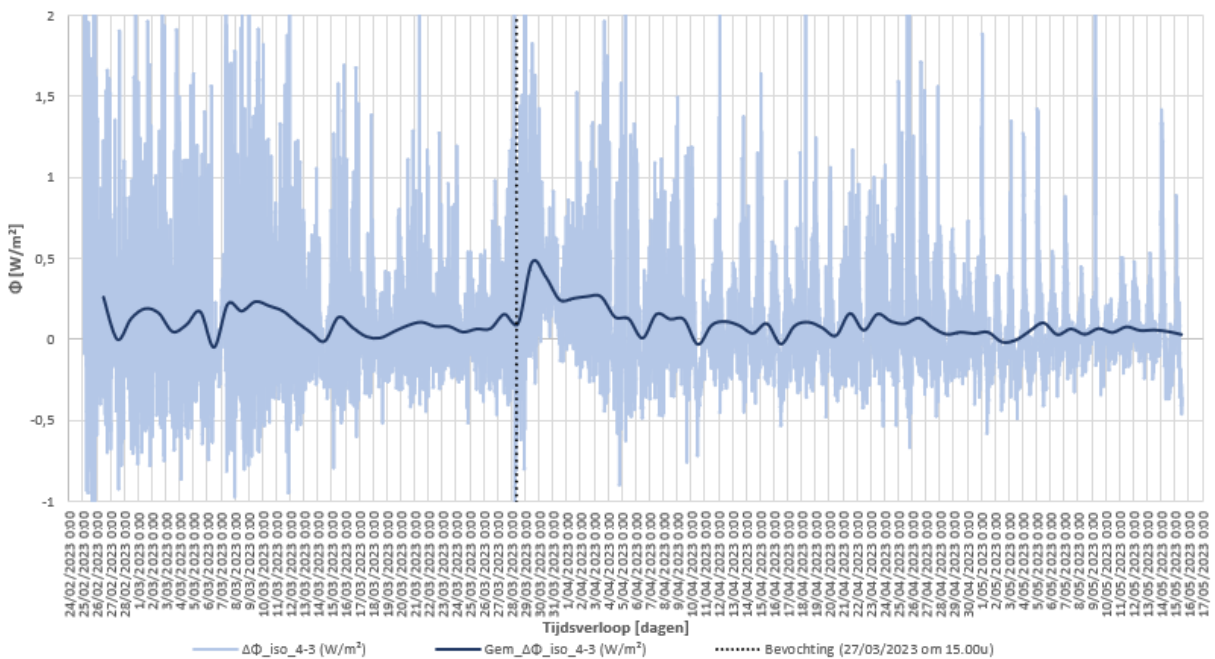


Bijlage D: Experimentele resultaten meetcampagne: grafieken warmtestroom

Warmtestroom in compartiment 3 en 4 KATOEN



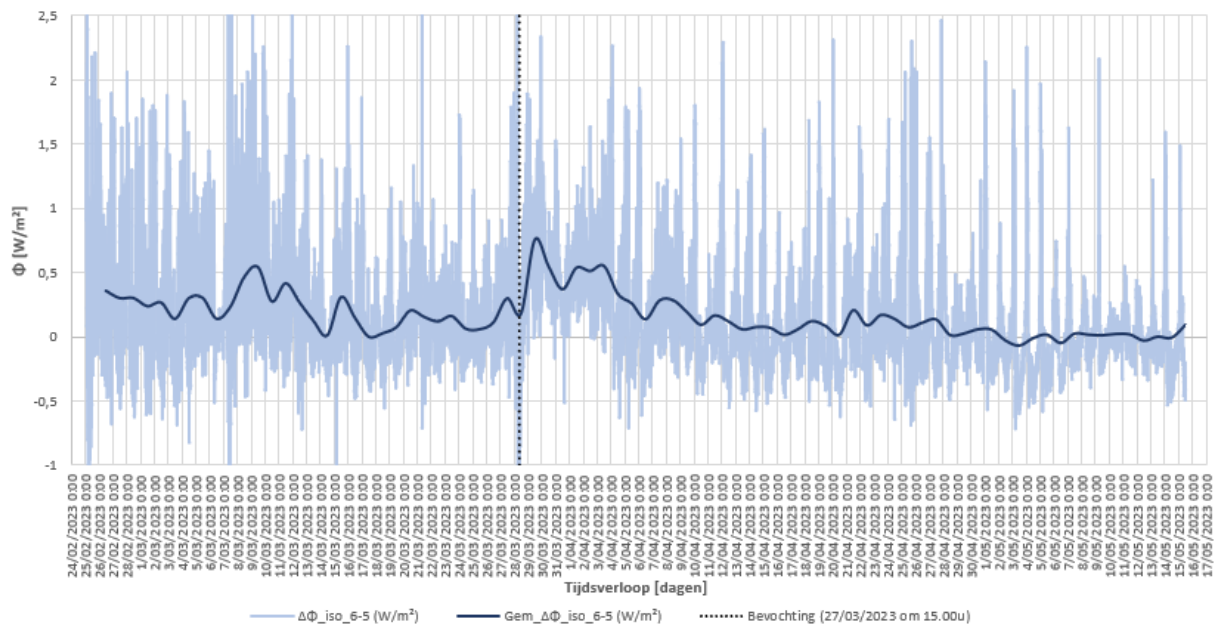
Warmtestroomverschil tussen compartiment 4 en 3 KATOEN



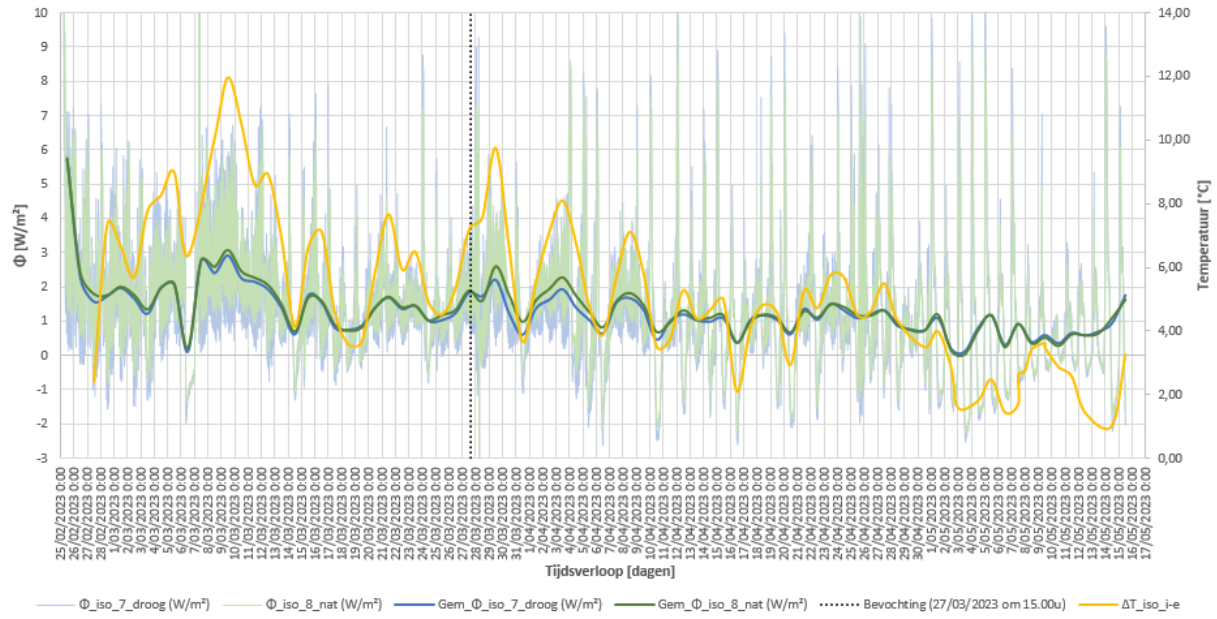
Warmtestroom in compartiment 5 en 6 GRAS



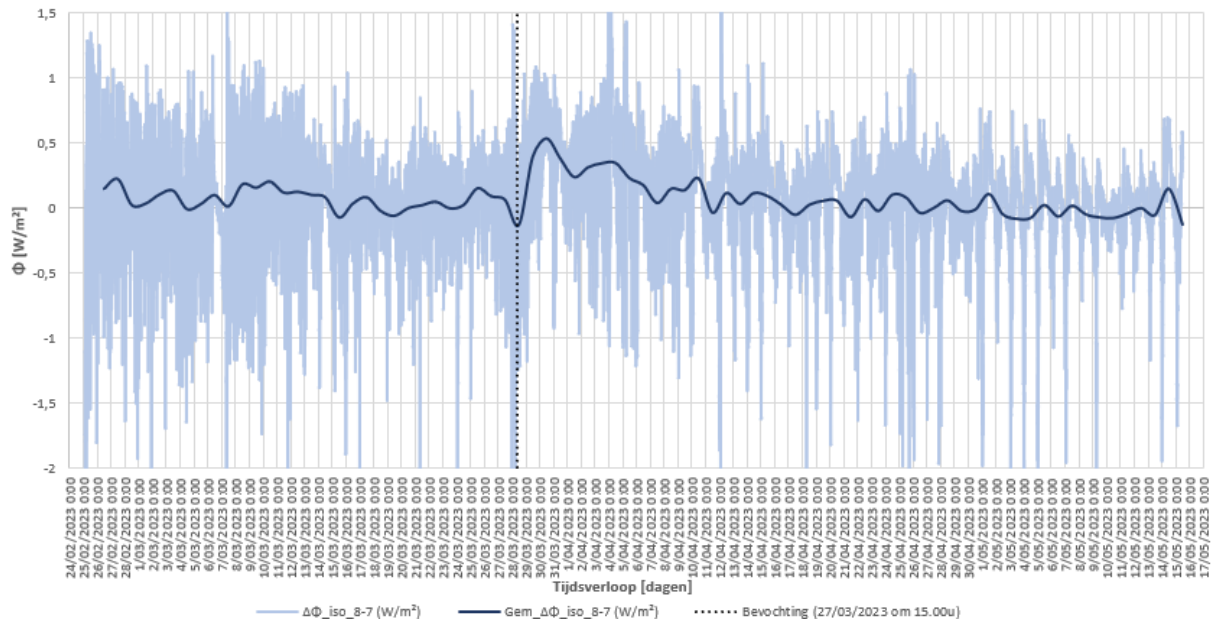
Warmtestroomverschil tussen compartiment 6 en 5 GRAS



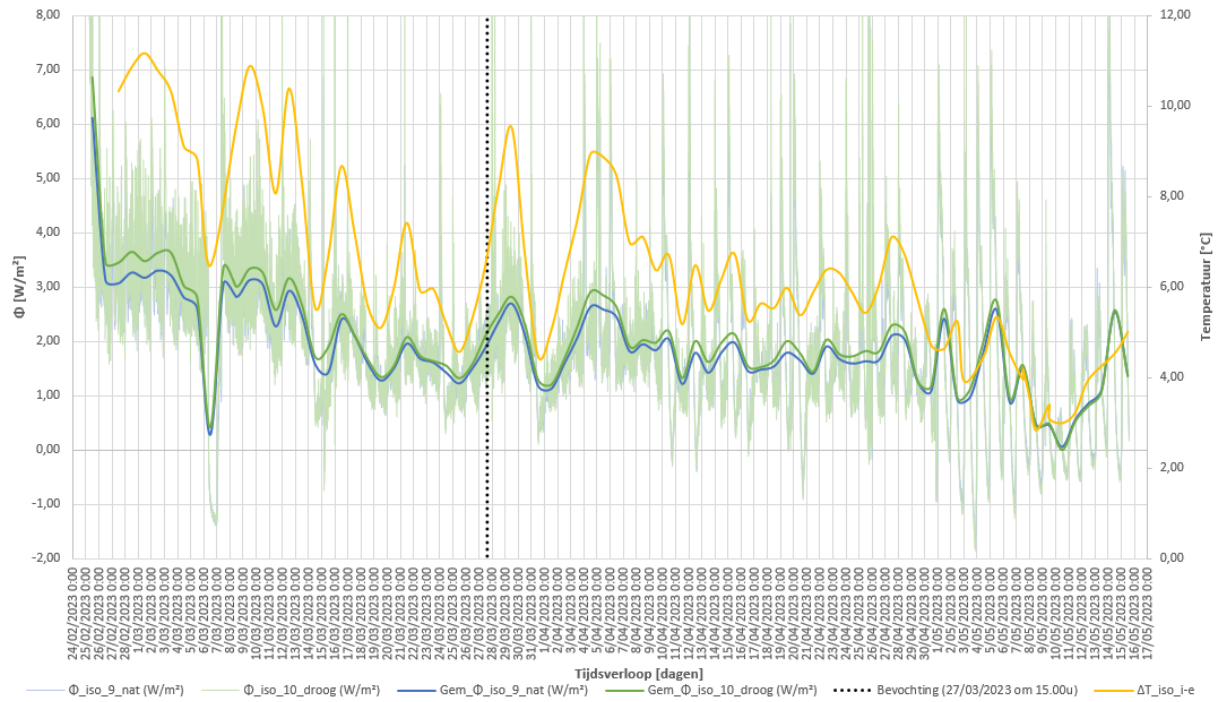
Warmtestroom in compartiment 7 en 8 HENNEP



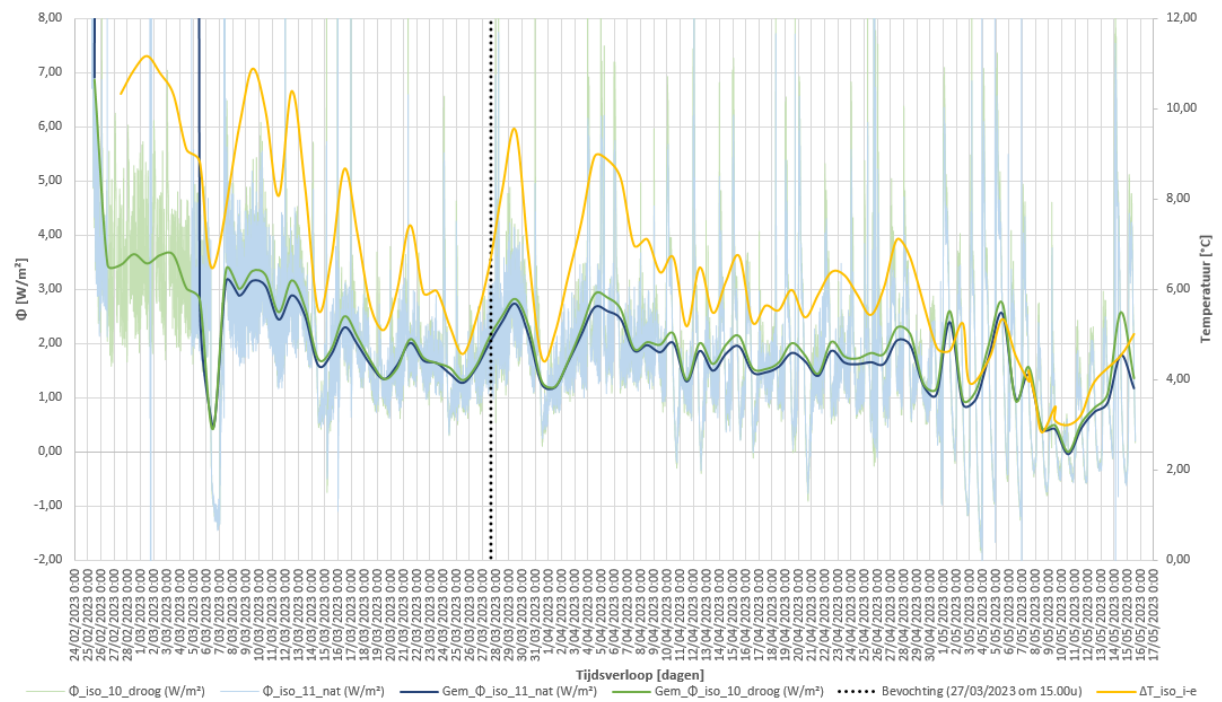
Warmtestroomverschil tussen compartiment 8 en 7 HENNEP



Warmtestroom in compartiment 9 en 10 KALKHENNEP CaNaDry



Warmtestroom in compartiment 10 en 11 KALKHENNEP floormix



Bijlage E: Delphin

