

Hygrothermisch gedrag van ETICS-systemen bij houtskeletbouw

Ilse Verhaeghe

Promotoren: prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche, prof. Jan Moens

Begeleiders: Kim Carbonez, ir.-arch. Glenn De Meersman

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

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. ir. Arnold Janssens

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2015-2016



Hygrothermisch gedrag van ETICS-systemen bij houtskeletbouw

Ilse Verhaeghe

Promotoren: prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche, prof. Jan Moens

Begeleiders: Kim Carbonez, ir.-arch. Glenn De Meersman

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

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. ir. Arnold Janssens

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2015-2016



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

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

Ilse Verhaeghe, 1 juni 2016

I. VOORWOORD

'Een catalogus van bouwgebreken' leek mij van in het begin een boeiend onderwerp door zijn directe link met de bouwpraktijk. Schadegevallen zijn dagelijkse kost en het onderzoeken van de fouten is dan ook van cruciaal belang om in de toekomst zo correct mogelijk te kunnen bouwen. Gaandeweg is het onderzoek geëvolueerd naar ETIC-systemen en is er een interessante wisselwerking ontstaan tussen theoretisch en praktisch onderzoek.

Een masterproef schrijf je natuurlijk niet alleen, vandaar dat ik een aantal mensen wil bedanken die geholpen hebben dit tot een goed einde te brengen.

Allereerst wil ik mijn promotor Nathan Van Den Bossche bedanken voor het beantwoorden van al mijn vragen en het opvolgen van mijn onderzoek. Bedankt voor de opbouwende kritiek en nieuwe inzichten. Kim, je was een grote hulp in die eerste maanden van mijn masterproef.

Mijn ouders en mijn zussen verdienen een grote bedanking voor al het geduld, alle steun en aanmoediging gedurende de voorbije vijf jaar. Aan mijn lieve vrienden, een welgemeende dankuwel; jullie zijn de beste!

En als laatste wil ik Emiel bedanken voor je onvoorwaardelijk luisterend oor en je positieve ingesteldheid. Zonder jou was dit niet gelukt. Bedankt!

Ilse Verhaeghe, 1 juni 2016

II. ABSTRACT

Binnen de context van 'Een catalogus van bouwgebreken', werd er gezocht naar een eenduidige manier om schadegevallen te typeren en op te lijsten. Als resultaat hiervan werd een Matlabprogramma ontwikkeld om schadegevallen in te geven a.d.h.v. een aantal parameters en hieruit statistische informatie te halen.

Hierna werd er verder gefocust op de toepassing van ETICS op houtskeletbouw en hun uitdrogingsgedrag. ETIC-systemen worden in de laatste jaren steeds meer toegepast op houtskeletbouw. De kennis van uitvoering is hierover echter kleiner dan bij massiefbouw. Er gebeuren dan ook dikwijls fouten waardoor er vocht ongevraagd in de gevel kan. Wanneer vocht zich ophoopt in een houtskelet, kan dit leiden tot houtrot of schimmel. Het is daarom van groot belang dat het vocht snel mogelijk uit de muur verdwijnt. Het onderzoek van deze masterproef is een onderzoek naar welke parameters de uitdroging bevorderen of verhinderen. Wanneer heeft men de beste kans op uitdroging zonder dat de constructie gevaar loopt? Een hele reeks parameters komen aan bod: oriëntatie, soort pleister, soort isolatie, coatings, kleur enz. De dampdiffusieweerstand en de vochttopslagcapaciteit van de materialen blijken een cruciale rol te spelen in het hygrothermisch gedrag van een constructie. Als vuistregel wordt het volgende gehanteerd: De dampdiffusieweerstand van de materialen moet toenemen van buiten naar binnen, met binnen de grootste dampdichtheid. Zo kan het vocht migreren naar buiten. Dit zien we dan ook vaak terugkomen als verklaring waarom één constructie beter presteert dan een andere. Andere belangrijke parameters zijn o.a. het initiële vochtgehalte, keuze van de materialen, oriëntatie e.d. Aan de hand van een aantal schadegevallen wordt duidelijk dat de problematiek wel degelijk actueel is.

Trefwoorden

Bouwgebreken, Houtskelet, hygrothermisch gedrag, ETICS, simulaties, WUFI

Hygrothermal behaviour of an ETIC-system

Timber frame constructions

Ilse Verhaeghe

Supervisor(s): prof. dr. ir.-arch. N. Van Den Bossche,
Ir.-arch. Kim Carbonez

Abstract – This paper investigates the application of ETICS on a timber frame construction and its hygrothermal consequences. It consists of a theoretical part and a practical part where the influence of several parameters on the hygrothermal behaviour are analyzed.

Keywords: ETICS, hygrothermal, WUFI

I. INTRODUCTION

The first goal of this master thesis was to find a way to compose a catalogue of deficiencies in Belgium. This part of the thesis was in collaboration with Lieselot Geldof and Kjartan Van Den Brande. In order to reach this goal, several hundreds of cases were given to us by different organizations and firms. We developed a matlabprogram where everyone can fill in cases of deficiencies and failure by formulating the key parameters that define the deficiency. The output of this program can give us insight in the statistics of the deficiencies.

II. SIMULATIONS

In the context of this catalogue, one specific type of deficiencies is highlighted: ETICS on a timber frame construction. ETICS on timber frame constructions is a fairly new practice in Belgium, although it's widely applied on timber frames in America and Australia. It had led to a fair amount of deficiencies. The question rises how vulnerable the timber frame is to moisture. Which factors influence the hygrothermal behavior the most and in which way? This is examined by simulating different

constructions in different conditions by the HAM-simulation program WUFI.

III. PARAMETERS

A first conclusion is the importance of a correct building practice. Mistakes and water infiltration can lead to serious damage of the timber frame. Wooden materials are sensitive to mold growth and rotting. For the different parameters is checked whether or not there is danger for wood decay. There are no fixed criteria for plaster materials. Several factors can indicate damage, such as cracking, blistering, mould etc.

The different parameters that were tested and simulated lead to different moisture contents. An important difference between WUFI and older simulation programs is that WUFI takes into account the long wave radiation. This can lead to night time overcooling and surface condensation. The different orientations play an important role in the hygrothermal behavior. A north façade had the least amount of direct sunlight and therefore dries the slowest. The southern facade dries the fastest. Adding a coating to the outer surface can flatten the oscillatory course of the moisture content. The adhering fraction of rain lowers with the application of a coating.

A correct choice of materials is expected to play an important role in the hygrothermal behaviour of ETICS. Different isolating materials are tested. Depending on the expected initial moisture contents, some materials may be more appropriate than others. In general, you could say that mineral wool

allows a faster drying of the construction due to its low water vapour diffusion resistance factor μ in comparison with for example EPS, which has a much higher μ -value. Cellulose has the highest moisture storage capacity.

The initial moisture content has a crucial role. The ETIC-system may only be installed when the substrate is dry (and flat and clean). The substrate must have reached his equilibrium moisture content (EMC) before applying the finishing layer. Saturated materials take years to reach the EMC and by that time wood decay is very likely to have occurred.

Other parameters, such as the color of the finishing layer etc. are also examined through the total moisture contents and moisture contents in the different layers. This is for general cases. There can be specific cases, where these 'secondary' parameters can play a crucial role in the drying potential of a construction.

The relative humidity and temperature are two parameters who must be taken into account when looking to a construction with ETICS. They define whether or not there will be condensation in the wall or on the inner or outer surface.

Water infiltrations can be dimensioned to accord to realistic situations in terms of wind velocity and pressure difference between outside and inside. These infiltrations can be simulated and the effects are studied. Is there a

risk for mould growth? Generally there is no risk when the infiltrations occur behind the plaster layer. When the infiltrations take place behind the isolation layer, the construction is no longer able to dry as desired.

IV. IN PRACTICE

A few cases are discussed more in detail to see how is dealt with the deficiencies in real life.

V. CONSIDERATION

This master thesis is only a beginning research and is certainly not complete. We also have to bear in mind that WUFI is only a simulation program, and the results are only an indication of the expected moisture contents. The real moisture contents can differ due to differences in climate or if the as built construction is different from the planned construction.

VI. CONCLUSION

It can be concluded that several parameters, some more than maybe expected, have an influence on the hygrothermal behavior. Wood is sensitive to high moisture contents and must be able to dry out as fast as possible. ETIC-systems are good systems as long as they are executed perfectly.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to acknowledge the suggestions of Nathan Van Den Bossche and Kim Carbonez.

III. INHOUDSTAFEL

1. INLEIDING	1
2. EEN CATALOGUS VAN BOUWGEBREKEN	2
2.1. SITUERING	2
2.2. CATALOGUS IN MATLAB	4
3. ETIC-SYSTEMEN	12
3.1. INLEIDING	12
3.2. ETIC-SYSTEMEN IN BELGIË	12
3.3. OPBOUW	13
3.3.1. Ondergrond	13
3.3.2. Lijm of kleefmortel	14
3.3.3. Isolatiemateriaal	14
3.3.4. Wapeningslaag	15
3.3.5. Afwerklaag	15
3.3.6. Verflaag (eventueel)	16
3.4. PLEISTERBESTANDDELEN	16
3.5. SOORTEN PLEISTER	16
3.6. ETIC-SYSTEMEN BIJ EEN HOUTSKELETBOUW	17
3.6.1. Schadeprecedenten	18
3.6.2. Regelgeving	20
4. AANSLUITINGSDetails ETIC-SYSTEMEN	22
4.1. MUURVOET	23
4.2. DAKRAND	25
5. VOCHTOPSLAG	27
5.1. INLEIDENDE BEGRIPPEN	27
5.2. WUFI	30
5.2.1. Vochttransport in WUFI	30
5.2.2. Vochtopslagfunctie benaderen	32
6. EVALUEREN VAN HYGROTHERMISCHE PRESTATIES: CRITERIA	33
6.1.1. SCHADECRITERIA VOOR HOUTSKELETBOUW	34
6.1.2. SCHADECRITERIA VOOR PLEISTER	34
7. SIMULATIES	49
7.1. SIMULATIESOFTWARE	49

7.2.	OPBOUW HOUTSKELETBOUW	51
7.3.	INVOER IN WUFI	53
7.4.	PARAMETERS	53
7.4.1.	Evalueren van de impact op de warmteflux	54
7.4.2.	Lange golfstraling	59
7.4.3.	Invloed van oriëntatie op uitdroging	71
7.4.4.	Coatings	73
7.4.5.	Invloed van soort pleister	79
7.4.6.	Invloed van soort isolatie op uitdroging	85
7.4.7.	Invloed van initieel vochtgehalte op uitdroging	95
7.4.8.	Datum van uitvoering	101
7.4.9.	Soort dampscherm	104
7.4.10.	Aanwezigheid van een elektrospouw	109
7.4.11.	Invloed van kleur op uitdroging	111
7.4.12.	Invloed van binnenklimaat	113
7.4.13.	Waterinfiltraties	117
8.	CASE STUDIES	131
8.1.	WAASMUNSTER	131
8.2.	LEEUWERGEM	140
8.3.	Schadegeval Marke	144
9.	BEDENKINGEN	149
10.	BESLUIT	151
11.	BIBLIOGRAFIE	153
12.	FIGURENLIJST	155
13.	TABELLENLIJST	159

IV. LIJST MET AFKORTINGEN EN SYMBOLEN

AFR	Adhering Fraction of Rain
AQC	Agence Qualité Construction
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
ATG	Agrément Technique / Technische Goedkeuring
CIB	Conseil International du Bâtiment
EMC	Equilibrium Moisture Content
EPS	Geëxpandeerd polystyrene (Expanded PolyStyreen)
ETAG004	Guideline for Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems With Rendering
ETICS	External Thermal Insulation Composite System
FLIR	Forward Looking InfraRed
GWW	Grond-, Weg- en Waterbouw
HAM	Heat Air Moisture
LIM	Lowest Isopleth for Mould
M%	Massaprocent
MEWS	Moisture Management for Exterior Wall Systems
MW	Minerale wol
NZS	New Zealand Standard
OSB	Oriented Strand Board
RV	Relatieve vochtigheid
TV	Technische Voorlichting
WTCB	Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf
WUFI	Wärme und Feuchte Instationär

a	[W/mK ²]	Factor afhankelijk van de temperatuur
a	[-]	Kortegolf-absorptiecoëfficiënt van het oppervlak
b	[-]	Benaderingsfactor
CP	[Pa]	Condensatiepotentieel
C_{pe}	[-]	Drukcoëfficiënt exterieur, afhankelijk van geometrie van gebouw
C_{pi}	[-]	Drukcoëfficiënt interieur, standaard = -0,3
$c_r(z)$	[-]	Factor die rekening houdt met de terreinruwheid
d_i	[m]	Dikte van de laag
g_{atm}	[-]	Atmosferische fractie
g_{terr}	[-]	Aardse fractie
I	[W/m ²]	Netto straling op het oppervlak
I_s	[W/m ²]	Kortegolfzonnestraling invallend op het oppervlak
I_l	[W/m ²]	Langegolfstraling invallend op het oppervlak
I_e	[W/m ²]	Langegolfstraling uitgezonden door het oppervlak
$I_{l,atm}$	[W/m ²]	Atmosferische langegolfstraling
$I_{l,terr}$	[W/m ²]	Aardse langegolfstraling
$I_{l,refl}$	[W/m ²]	Atmosferische langegolfstraling gereflecteerd door de grond
$I_{s,dir}$	[W/m ²]	Directe zonnestraling
$I_{s,diff}$	[W/m ²]	Diffuse zonnestraling
$I_{s,refl}$	[W/m ²]	Zonnestraling gereflecteerd door de grond
k_r	[-]	Terreinfactor
m	[g]	Initiële massa
m_0	[g]	Massa na droging
$M\%$	[%]	Massaprocent
$P_{v(air)}$	[Pa]	Partiële dampdruk van de lucht
$P_{sat(surf)}$	[Pa]	Verzadigingsdampdruk van het oppervlak
u	[M%]	Massaprocent vocht
U	[W/m ² K]	Warmtedoorgangscoefficient
S_d	[m]	Equivalente luchtlaagdikte
v_b	[m/s]	Basiswindsnelheid
$w(\varphi)$	[kg/m ³]	Vochtgehalte overeenkomstig met RV φ
w_f	[kg/m ³]	Evenwichtsvochtgehalte (free water saturation)
w_{80}	[kg/m ³]	Vochtgehalte overeenkomstig met een RV van 80%
w_{max}	[kg/m ³]	Maximale vochtgehalte
z_0		Lengte van de ruwheid
α_e	[W/m ² K]	Warmteovergangscoefficient buitenoppervlak
α_i	[W/m ² K]	Warmteovergangscoefficient binnenoppervlak
ε	[-]	Langegolf emissiecoëfficiënt (=absorptiecoëfficiënt) van het oppervlak
φ	[-]	Relatieve vochtigheid
λ	[W/mK]	Warmtegeleidingscoëfficiënt
$\lambda(\theta)$	[W/mK]	Warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal op tijdstip t
λ_0	[W/mK]	Warmtegeleidingscoëfficiënt bij een temperatuur $\theta = 10^\circ\text{C}$
μ	[-]	Waterdampdiffusieweerstand
$\Theta_{s,min}$	[°C]	Minimale oppervlaktetemperatuur
Θ_i	[°C]	Binnentemperatuur
Θ_e	[°C]	Buitentemperatuur

1. INLEIDING

‘Een catalogus van bouwgebreken’ was het oorspronkelijke onderwerp van deze masterproef. Dit is een zeer uitgebreid thema dat handelt over alle mogelijke schadegevallen in alle categorieën en uitvoeringsfases van het bouwproces.

Er werden cases verzameld van verschillende schade-experts en op basis hiervan werden criteria vastgelegd aan de hand waarvan men schadegevallen eenduidig kan aangeven. Er werd hiervoor een Matlabprogramma geschreven in samenwerking met Lieselot Geldof en Kjartan Van Den Brande.

Na deze inwerking in het onderwerp, splitsten we ons op en begonnen we elk een eigen onderzoek; in mijn geval over ETIC-systemen op houtskeletbouw. (ETICS: External Thermal Insulation Composite Systems).

ETIC-systemen zijn al sinds de jaren '70 één van de voornaamste afwerkingen van constructies in België. De traditionele spouwmuur beheerst nog steeds de bouwmarkt als ondergrond, maar de laatste jaren worden ETIC-systemen ook steeds vaker toegepast op houtskeletbouw. Precedenten uit Amerika en Nieuw-Zeeland leren dat dit echter niet altijd zonder problemen verloopt. Vochtproblemen zijn een belangrijk aandeel van de huidige uitdaging bij het bouwproces. In dit specifiek geval is er nog maar weinig onderzoek naar verricht. Een houtskelet is, meer dan baksteen, heel gevoelig aan vocht. Er zijn verschillende schadegevallen bekend in Amerika en ver daarbuiten. Ook in België duiken de schadegevallen meer en meer op nu de bouwwijze aan populariteit wint.

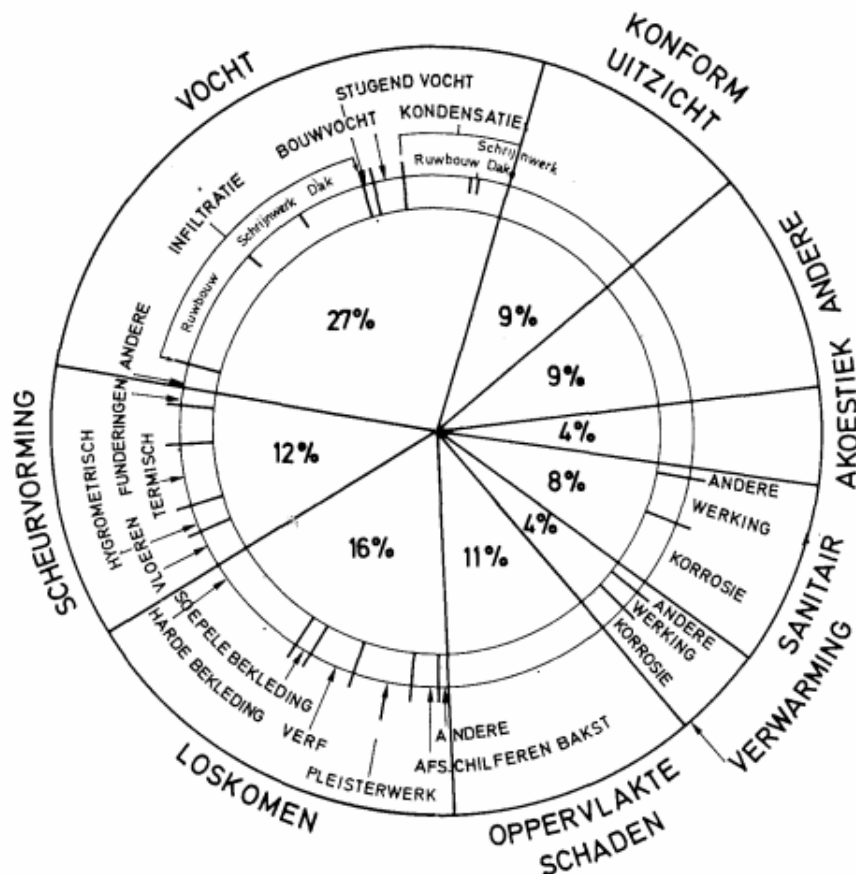
Welke factoren spelen een rol bij het uitdrogen van een muur en welke invloed hebben verschillende parameters? Wanneer heeft men te maken met een gevaarlijke situatie voor het houtskelet en het ETIC-systeem? Dit zijn vragen waarop ik probeer een antwoord te formuleren.

Het onderzoek werd verricht d.m.v. het simulatieprogramma WUFI. Men moet dus in gedachten houden dat dit onderzoek kan verschillen van de realiteit en dat simulaties nooit de precieze werkelijke omstandigheden kunnen voorspellen. De resultaten moeten dan ook met de nodige zorg bekeken worden.

2. EEN CATALOGUS VAN BOUWGEBREKEN

2.1. SITUERING

Het onderzoek van deze masterproef past in het ruimer kader van een onderzoek naar de mogelijkheid om een catalogus van bouwgebreken op te stellen. Er is hier in België nog geen algemeen overzicht van wat de meest voorkomende bouwgebreken zijn en welke fouten het vaakst gemaakt worden. Ook de oorzaken van de gebreken en hun gevolgen worden onderzocht. Het WTCB (Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf) is een organisatie die bezig is met het formuleren van voorschriften voor een goede uitvoeringspraktijk en heeft dus ook al de nodige informatie verzameld. Deze werd echter nog niet uitgebreid gebundeld om een volledig overzicht te bekomen dat gebaseerd is op reële gevallen.



Figuur 1: Overzicht schadegevallen uit 1974-1975 door WTCB

Het WTCB heeft in het verleden al grafieken uitgegeven over de verdeling van schadegevallen, maar de data zijn verouderd en de bouwpraktijk is in de laatste decennia ook veel ingewikkelder geworden. Er wordt dus toegewerkt naar gelijkaardige data, maar dan meer up to date.

In verschillende andere landen zijn er al catalogussen uitgebracht of is er al een aanzet gegeven tot het eenduidig aangeven van gebreken.

AQC (Frankrijk)

In Frankrijk verzamelt het AQC (Agence Qualité Construction) gegevens over schadegevallen door middel van in te vullen fiches. Op basis van deze gegevens wordt statistische informatie verkregen waarmee men gebreken in gebouwen wil voorkomen en de kwaliteit van constructies wil verbeteren. Hiervoor ontwikkelt het AQC zowel technische als praktische leermiddelen om iedereen die in de bouw staat te helpen met hun dagelijkse praktijk.

CIB (Internationaal)

Het CIB verenigt meer dan 5000 experts uit ongeveer 500 deelnemende organisaties (CIB = International Council for Research and Innovation in Building and Construction). Een CIB-commissie is een wereldwijd netwerk van experts die onderzoek doen in een bepaald gebied van het bouwen en op regelmatige basis samenkomen om informatie uit te wisselen. De CIB- W086 doet onderzoek naar de pathologie van gebouwen en bestaat uit ongeveer 50 leden.

SBRCurnet (Nederland)

Samen met externe bouw- en GWW-professionals (Grond-, Weg- en Waterbouw) doet SBRCURnet onderzoek naar actuele bouwthema's. Hierbij stimuleren ze innovatie en leggen ze de opgedane kennis vast via standaarden. De opgedane kennis wordt gedeeld, toepasbaar gemaakt en vastgelegd via standaarden waardoor de kennis ook echt gebruikt wordt in de praktijk. SBRCURnet heeft gedurende tien jaar 430 schadegevallen geregistreerd en geordend.

België

In België bestaat er nog geen catalogus die alle mogelijke voorkomende bouwgebreken behandelt op een zelfde manier. Enkele honderden cases van gebreken werden aangereikt door verschillende schade-experts zoals onder andere Bureau Bouwtechniek, Koen Van De Velde, Cibor en Willco. De schadedossiers van de experts verschillen echter sterk in lay-out en gegevens, waardoor het heel moeilijk is om ze met elkaar te vergelijken.

Een overzicht van veel gemaakte fouten zou een handige tool kunnen zijn voor toekomstige ontwerpers en aannemers en biedt een overzicht van aandachtspunten.

Om tot zo'n overzicht te komen, is er een eerste aanzet gegeven door in Matlab een programma te ontwikkelen waarin de cases kunnen worden ingevoerd op basis van enkele criteria. Deze criteria zijn grotendeels gebaseerd op de classificaties die ze in Frankrijk gebruiken en vermeld worden in het document '*Sycodès 2014: Pathologie*' van het AQC[1].

Zij hebben een standaardformulier ontwikkeld dat moet ingevuld worden wanneer er schade of een gebrek wordt vastgesteld. Op basis van een aantal vastliggende vragen kan heel snel gedetecteerd worden in welke schadecategorie iets thuishoort.

Het uiteindelijke doel van het Matlabprogramma is om ook tot zo'n standaardprocedure te komen die heel snel kan uitwijzen wat voor schade het is en wat de gevolgen zijn. Zo wordt er een database aangelegd van de meest voorkomende gebreken. Dit zorgt er op zijn beurt dus voor dat men weet waarop men moet letten bij ontwerp en uitvoering.

2.2. CATALOGUS IN MATLAB

Het verkennende onderzoek en het verder ontwikkelen van het Matlabprogramma werd uitgevoerd in samenwerking met Lieselot Geldof en Kjartan Van Den Brande.

Door een aantal parameters vast te leggen van gegevens die moeten worden ingevoerd, kan een eenduidige manier bekomen worden van ingeven van schadegevallen. Op deze manier is het veel eenvoudiger om conclusies te trekken. Een nadeel is wel dat niet voor elk project dezelfde gegevens voorhanden zijn, en de invoer soms dus incompleet is.

Er werd verder gewerkt op een Matlabprogramma met basisinterface van Kim Carbonez (zie figuur 2). De parameters zijn grotendeels gebaseerd op de indeling van het AQC uit Frankrijk.

The screenshot shows a Matlab window titled 'Interface' with a sub-window 'Untitled 1'. The interface contains several input fields and buttons for case information:

- Original file:** A text field labeled 'Filename' and a 'Select File...' button.
- Case Information:**
 - Case number:** A text field labeled 'Type or 0...'.
 - YOC:** A text field labeled 'Type or 0...'.
 - YOR:** A text field labeled 'Type or 0...'.
 - YOD:** A text field labeled 'Type or 0...'.
 - Expert:** A dropdown menu with 'Cibor' selected.
 - Type of building:** A dropdown menu with 'house' selected.
 - Building Part:** A dropdown menu with 'sustainability' selected.
 - Exact location:** A dropdown menu with 'Circulation around the bui...' selected.
 - Specification:** A dropdown menu with 'Circulation around the bui...' selected.
 - Actuator:** A dropdown menu with 'water - infiltration' selected.
 - Total cost:** A text field labeled 'Type or 0...'.
 - Adjustments:** A text field labeled 'Type or 0...'.
 - Material damage:** A text field labeled 'Type or 0...'.
 - Immaterial damage:** A text field labeled 'Type or 0...'.
 - Delayed building cost:** A text field labeled 'Type or 0...'.
- Buttons:** 'Store in table', 'Suffix filename...', 'All stored?' (checkbox), and 'WriteToFile'.

Below the form is a table with the following columns: N°, YOC, YOR, YOD, Expert, TOB, Building part, Exact location, Specification, Actuator, Total Cost (€), % Adj., % Mat., % Imm., % Delay. The table has 4 rows of data.

N°	YOC	YOR	YOD	Expert	TOB	Building part	Exact location	Specification	Actuator	Total Cost (€)	% Adj.	% Mat.	% Imm.	% Delay.
1														
2														
3														
4														

Figuur 2: Basismodel Matlab, Kim Carbonez

In deze interface kan je een aantal basisgegevens invullen zoals het jaar van constructie, renovatie, type gebouw enz. Daarnaast kan je ook de oorzaak en het gevolg van de schade aangeven en welke kosten dit alles met zich meebrengt.

Bij het aanpassen van de interface hebben we een aantal parameters uitgebreid of toegevoegd en hebben we gezocht naar een logische volgorde van ingeven. Dit had tot doel de interface overzichtelijker te maken en zorgt voor een gemakkelijker gebruik.

We starten met het ingeven van een aantal basisgegevens. Nadien wordt het steeds specifieker, waarbij er de mogelijkheid is om zelf nog een aantal zaken extra uit te leggen.

Interface

Untitled 1

File Dataset

Filename

Select File...

CASE INFORMATION

Expert

Unknown

Case Reference (N°)

Type or 0...

Year Of Construction

Type or 0...

Year Of Renovation

Type or 0...

Year Of Damage

Type or 0...

Project Owner

Unknown

Type Of Building

Unknown

Construction

Building Part

Unknown

Exact location

unknown

Building part

Unknown

Specification

Choose...

Specification

Choose...

Damage

Unknown

Actuator - Large scale

Unknown

Origin

Unknown

Damage Accumulation

Unknown

Exposure

Orientation

Unknown

Height of damage location

Unknown

Degree of Shelter

Unknown

Occasion of occurrence

Unknown

Additional Damage Information

Bad Workmanship

Unknown

Specification 2

Choose...

Specification 3

Choose...

Liability Percentage

Architect

Type % or 0

Contractor

Type % or 0

Client/Owner

Type % or 0

Adjustments

Type or 0...

Material damage

Type or 0...

Immaterial damage

Type or 0...

Delayed building cost

Type or 0...

SAVE CASE INFORMATION

Store in table

Remove Last Case

All stored?

WriteToFile

Recall Case

Recall from CaseCatalogue

Cases

Parameter

from

...

to

...

Recall!

Rename!

PREVIEW

	Exp	CaseReference	YOC	YOR	YOD	PO	TOB	BP1	Sp1.	EL	BP2	Sp	Dam	ALS	Orig	DA...	Orie	DH	Dos	Occ	Spe...	Spe...	Spe...	TC€	AC%	MC%	IC%	DC%	LA	LCo	LCI	
1																																
2																																
3																																
4																																

Figuur 3: Finaal model Matlab

Een groot verschil met het basismodel is de mogelijkheid om een schadegeval in een knoop aan te geven. Bij het doornemen van de verschillende schadedossiers werd immers vastgesteld dat schade vaak optreedt in een aansluiting tussen twee bouwdelen of in een bouwknop. Door de optie 'Construction' uit te breiden met de keuzes 'surface' of 'joint with' kan de locatie specifiekere worden aangeduid en kunnen op termijn ook juistere conclusies getrokken worden.

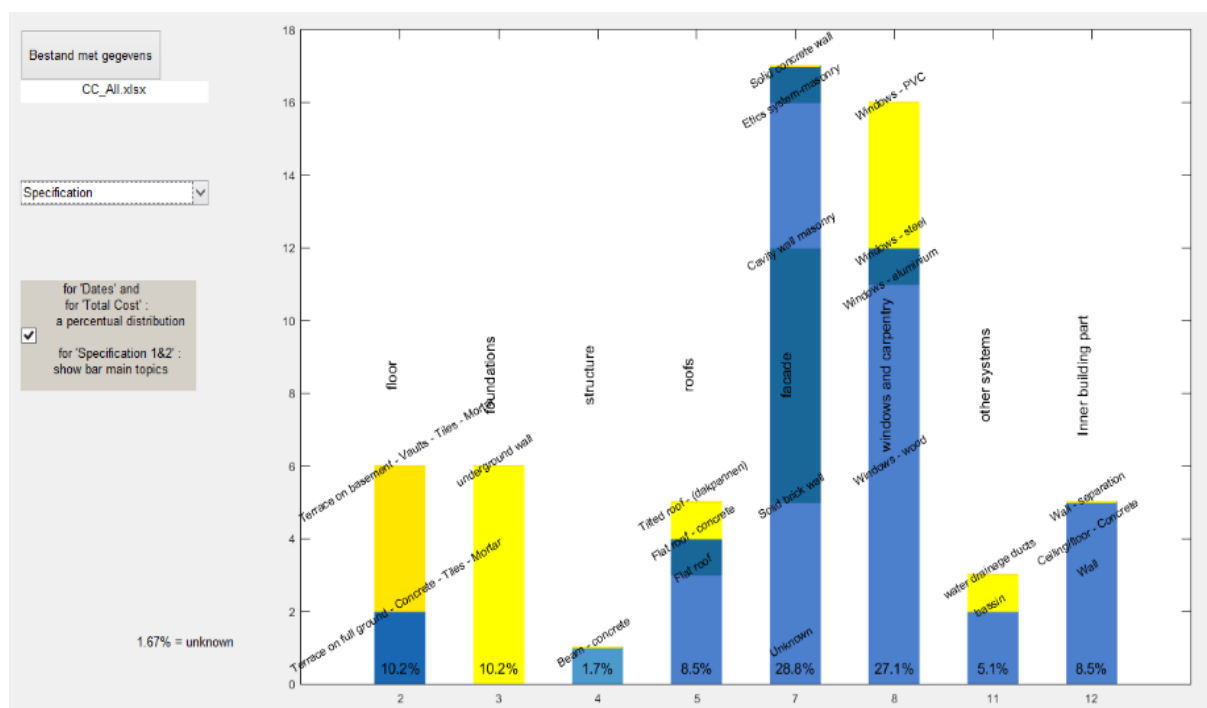
Bij het onderdeel 'Damage' (schade) kan er op verschillende schalen ingegeven worden wat nu precies de schade is en of dat in connectie staat met andere schadefenomenen.

Bij 'Additional Damage Info' kunnen zaken naar keuze verder gespecificeerd worden. Indien de schade bijvoorbeeld het gevolg is van slechte uitvoering, kan dat meer in detail ingevuld worden.

'Exposure' is een nieuw onderdeel en geeft aan in welke omgeving het gebouw zich bevindt. Voorbeelden van invulopties zijn oriëntatie, hoogte van de schade, hoe beschut het gebouw is e.d.

Een ander nieuw element is dat de verantwoordelijkheid van architect, aannemer en eigenaar kan ingegeven worden. Dit is vooral van toepassing bij schadegevallen waarbij het gerecht is tussengekomen.

Alle cases worden weggeschreven naar een Excelbestand waaruit dan statistische gegevens kunnen gehaald worden. Deze worden omgezet in grafieken.



Figuur 4: Output van de ingevulde cases

Bovenstaande figuur is zo'n voorbeeld van een output. Dit is een overzicht van de statistische gegevens van alle cases die tot nu toe ingevoerd zijn. Er is aangegeven in hoeveel procent van de gevallen er problemen zijn aan de muren, funderingen, daken... (de balken) en meer specifiek waar (de verschillende kleuren). Zo is er in 27,1% van de

ingevoerde cases een probleem aan de ramen, waarvan het overgrote deel van de problemen voorkomt bij houten ramen en slechts een klein deel bij bijvoorbeeld aluminium ramen. Zo wordt op een snelle manier duidelijk wat de probleemgevallen zijn. Dit programma en zijn output wordt representatiever naarmate er meer en meer cases worden ingevoerd.

In de toekomst is het de bedoeling om het programma te verdelen onder verschillende schade-experts om zo te komen tot een standaardprocedure bij het aangeven van schadegevallen. Zo kan er een overzicht bekomen worden van de meest voorkomende gebreken met oorzaken en gevolgen. Dit kan ons heel veel leren over welke aandachtspunten er zijn bij het uitvoeren van een constructie.

Binnen de context van 'een catalogus van bouwgebreken' wordt er één type schadegevallen uitgelicht: schadegevallen bij ETIC-systemen, en dan specifiek bij de toepassing op een houtskeletbouw. Uit de studie van de cases bleek dat veel van de schadegevallen te maken hebben met vochtinfiltratie. België heeft een uitgebreide cultuur van woningbouw met pleistersystemen, oftewel ETICS. Deze systemen zijn echter gevoelig aan waterinfiltraties. Het verdere onderzoek gaat hier dieper op in.

3. ETIC-SYSTEMEN

3.1. INLEIDING

ETIC-systemen zijn buitengevelisolatiesystemen met een pleisterafwerking. Ze worden toegepast op verticale gevels bij een grote verscheidenheid aan projecten. Het systeem heeft de laatste jaren veel aan populariteit gewonnen in België, maar ook ver daarbuiten. In verschillende Europese landen is het de vaakst toegepaste gevelafwerking. Er is de laatste jaren dan ook steeds meer onderzoek verricht naar de voor- en nadelen van het systeem.

Het WTCB heeft al verschillende publicaties uitgegeven die hierover handelen en in samenwerking met een aantal andere partijen in de pleisterwereld werd het 'Technisch Handboek[2]' uitgegeven als eerste technische leidraad. Dit handboek gaat voornamelijk uit van ETICS op metselwerk. Voor houtskeletbouw zijn er maar weinig technische richtlijnen te vinden.

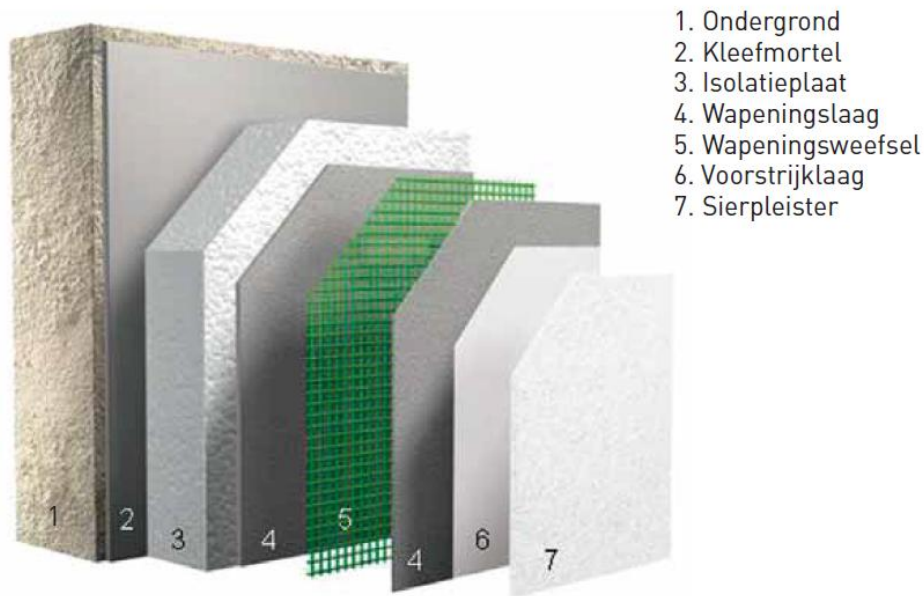
3.2. ETIC-SYSTEMEN IN BELGIË

De eerste toepassing van ETIC-systemen in België vond plaats na de oliecrisis in de jaren '70. De toepassing was echter niet meteen wijd verspreid en daar zien Dirckx en Grégoire [3] twee grote redenen voor.

De eerste belangrijke reden was dat België een lange bouwtraditie van de spouwmuur kende. Tot aan de jaren '70 werd er niet of nauwelijks geïsoleerd. Toen bleek dat de thermische prestaties ondermaats waren, was de oplossing snel gevonden: het opvullen van de spouw met isolatie. Pleistersystemen werden met een zekere argwaan bekeken. Dit was dan ook meteen de tweede reden: ETIC-systemen hadden een onzeker imago. Doordat er nog maar zo weinig ervaring mee was, was het onduidelijk of de vakmannen wel de kennis hadden om een correcte plaatsing uit te voeren. Tegenwoordig is het vertrouwen in het systeem danig toegenomen en wordt het dan ook vaak toegepast.

3.3. OPBOUW

Het aanbrengen van een ETIC-systeem is op zich vrij eenvoudig. Men bevestigt isolatiepanelen op de structurele ondergrond a.d.h.v. verlijming, pluggen of profielen. Op de isolatiepanelen komt de pleisterafwerking met een wapeningsweefsel. [4]



Figuur 5: Opbouw van een ETIC-systeem

De verschillende onderdelen van een ETIC-systeem zijn weergegeven op Figuur 5 en worden hieronder uitgebreider toegelicht.

3.3.1. Ondergrond

De ondergrond is de basis van het systeem. Op deze ondergrond wordt de isolatie aangebracht. De dragende ondergronden die in België het vaakst voorkomen zijn baksteen, beton, betonstenen, cellenbeton en kalkzandstenen. Recenter worden gevelisolatiesystemen ook vaker toegepast op houtskeletbouw.

De dragende ondergrond moet aan een aantal eisen voldoen voor men er een ETIC-systeem op mag aanbrengen. Een belangrijke eis is dat het materiaal zijn evenwichtsvochtgehalte moet bereikt hebben. De ondergrond moet ook droog, proper en voldoende draagkrachtig zijn. Uitzettingsvoegen in de ondergrond moet men overnemen in het gevelisolatiesysteem teneinde scheurvorming te voorkomen.

3.3.2. Lijm of kleefmortel

De lijm of kleefmortel dient om de isolatieplaten te bevestigen aan de ondergrond. De isolatieplaten kunnen echter ook op andere manieren worden bevestigd aan de ondergrond, m.b.v. bijvoorbeeld pluggen.

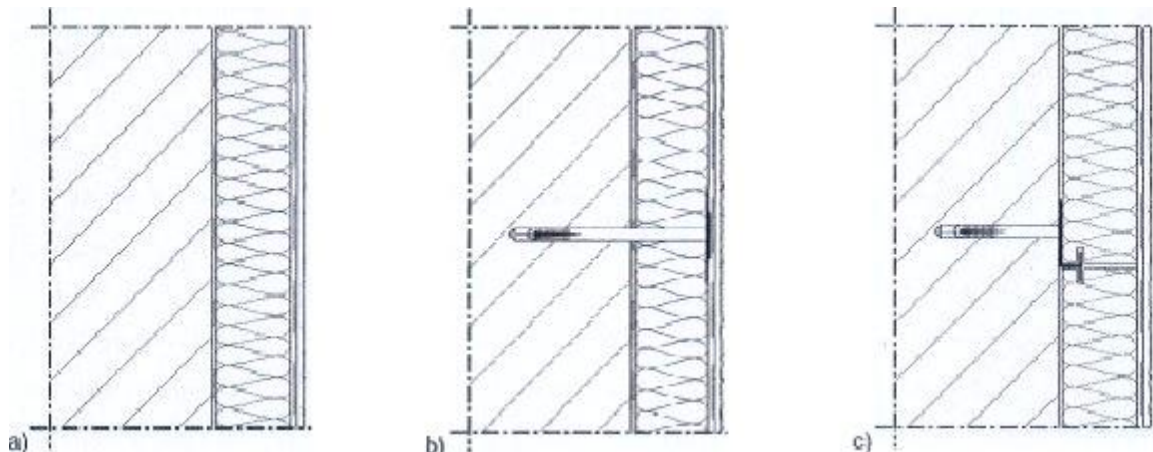
3.3.3. Isolatiemateriaal

De isolatie bij een ETIC-systeem wordt aan de buitenzijde van de dragende muur geplaatst. Het binnenklimaat rekent dus op de thermische traagheid van de draagmuur. De dragende constructie ondergaat dus geen grote temperatuurverschillen en is bijgevolg minder onderhevig aan risico op scheurvorming door thermische schommelingen.

De meest gangbare isolatiematerialen bij ETIC-systemen zijn geëxpandeerd polystyreen (EPS) en minerale wol (MW).

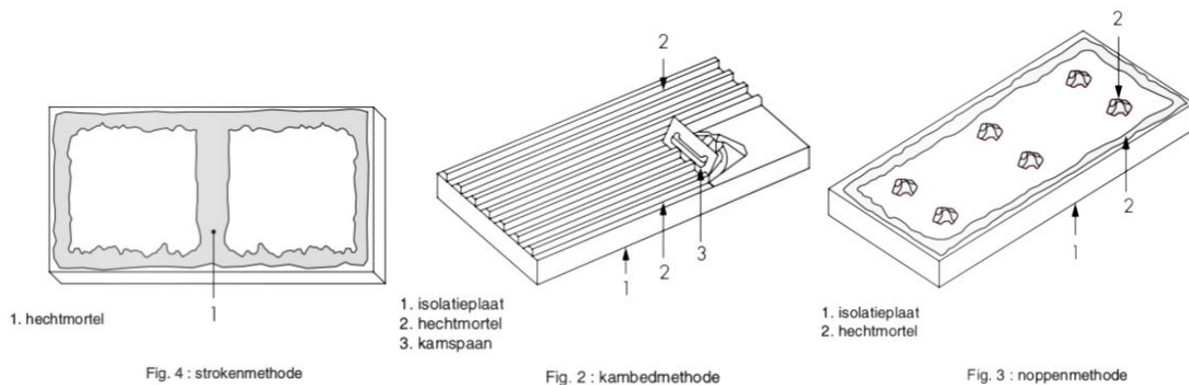
Bij MW wordt er een onderscheid gemaakt tussen twee types. Er zijn soorten waarbij de vezels evenwijdig lopen met het oppervlak (slab type) en soorten waarbij de vezels loodrecht op het oppervlak liggen (lamella type). Bij dit laatste type is de weerstand tegen een trekkracht groter.

De mechanische weerstand van MW neemt echter sterk af bij een toenemend vochtgehalte, waardoor men nog steeds het vaakst voor EPS-isolatie kiest. MW is echter onbrandbaar en heeft een kleinere dampdiffusieweerstand dan EPS. Het is dus een meer dampdoorlatend materiaal.



Figuur 6: De drie bevestigingsmethodes van isolatieplaten op de structuur

Er bestaan drie methodes om isolatie te bevestigen aan een ondergrond. Bij de eerste methode verlijmt men de platen m.b.v. hechtingsmortel (figuur 6a). Een aandachtspunt hierbij is dat er geen hechtmortel aan de zijkant van de platen mag komen zodat ze mooi naast elkaar kunnen worden geplaatst. De hechtmortel beslaat minstens 40% van het oppervlak en wordt ofwel volledig, in stroken ofwel in noppen aangebracht. Zie onderstaande afbeeldingen (Figuur 7).



Figuur 7: De verschillende verkleavingsmethodes

De tweede methode is de mechanische bevestigingsmethode (figuur 6c). Een derde methode is de combinatie van verlijming en bijkomende mechanische bevestigingen (figuur 6b).

3.3.4. Wapeningslaag

Bij de afwerking met de pleister wordt er een wapeningslaag aangebracht. De wapeningslaag bestaat uit:

- Een grondlaag die wordt aangebracht op de volledige isolatie. Het wapeningsnet wordt hierin verwerkt. De grondpleister wordt toegepast in 1 of 2 lagen en heeft een dikte tussen de 3 en 20 mm.
- Een wapeningsnet: het verzekert de mechanische sterkte en zorgt voor de verdeling van de thermische spanningen over de grondlaag. Er bestaan twee types wapeningsnetten. Standaard wordt gebruik gemaakt van een soepel en licht synthetisch fijnmazig net. Het tweede type is het pantserweefsel. Dit is een stijver en dikker weefsel en wordt altijd gebruikt in combinatie met het eerste type. Het wordt vooral toegepast als er verwacht wordt dat de pleister onderhevig gaat zijn aan regelmatige schokbelasting.

Het nut van een wapening in de pleister i.v.m. scheurvorming is tweeledig:

- Uitstellen van de groei van een macroscheur
- Verbeteren van het gedrag na een scheur

Er bestaat een minimum wapeningspercentage waaronder het al dan niet toevoegen van wapening geen effect heeft. Hoe beter de hechting, hoe lager dit percentage. De hechting heeft echter ook maar tot een bepaalde hoogte invloed. Vanaf een zekere kwaliteit van hechting, levert extra hechting geen verbetering van de materiaalkarakteristieken meer op.

3.3.5. Afwerklaag

De afwerklaag bestaat uit een voorstrijklaag en de eigenlijke sierpleister. Deze laag bepaalt het uitzicht en de bescherming van de pleister. Er zijn verschillende mogelijkheden qua kleur en structuur.

3.3.6. Verflaag (eventueel)

Een coating op de pleisterafwerking kan grote invloed hebben op het gedrag van de pleister. Dit wordt verder nog uitgebreider besproken wanneer de parameters voor het hygrothermisch gedrag onderzocht worden (zie hoofdstuk 7).

3.4. PLEISTERBESTANDDELEN

Pleisters worden opgebouwd uit de volgende bestanddelen [4]:

- **Bindmiddelen:** De drie hoofdsoorten zijn bouwkalk, synthetische bindmiddelen en cement.
- **Vulstoffen:** Voornamelijk zand, geëxpandeerde mineralen en kunstofkorrels. Ze reageren niet met het pleistermengsel, maar hebben een invloed op de hoeveelheid water die nodig is voor de verwerking. Een continue korrelverdeling vermindert de hoeveelheid water en bindmiddel die nodig is voor het aanmaken van de pleister. Bij zand geldt dat hoe grover het zand is, hoe minder water er vereist is, maar ook hoe moeilijker verwerkbaar de mortel wordt. De resulterende bepleistering zal echter wel een goede mechanische sterkte hebben en slechts beperkt krimpen.
- **Aanmaakwater**
- **Hulpstoffen:** Bij pleisters worden het vaakst plastificeerders, waterwerende producten of hechtharsen gebruikt. Ze verbeteren de eigenschappen van de pleister.
- **Pigmenten:** Ze zorgen voor de kleur van de pleisterlaag
- **Vezels**

3.5. SOORTEN PLEISTER

Een ETIC-systeem kan afgewerkt worden met verschillende soorten pleisters. Afhankelijk van de fabrikant wordt er een andere opdeling in soorten gemaakt. Elke fabrikant heeft ook zijn eigen specifieke samenstellingen die aan de pleisters unieke eigenschappen geeft. In het algemeen kan men een aantal hoofdcategorieën onderscheiden.

- **Minerale pleisters:** dit zijn de pleisters met de hoogste dampdoorlaatbaarheid; hun diffusieweerstandsgetal μ is kleiner dan dat van de kunstharspleisters. Ze zijn ook stugger. Ze worden echter steeds minder gebruikt.

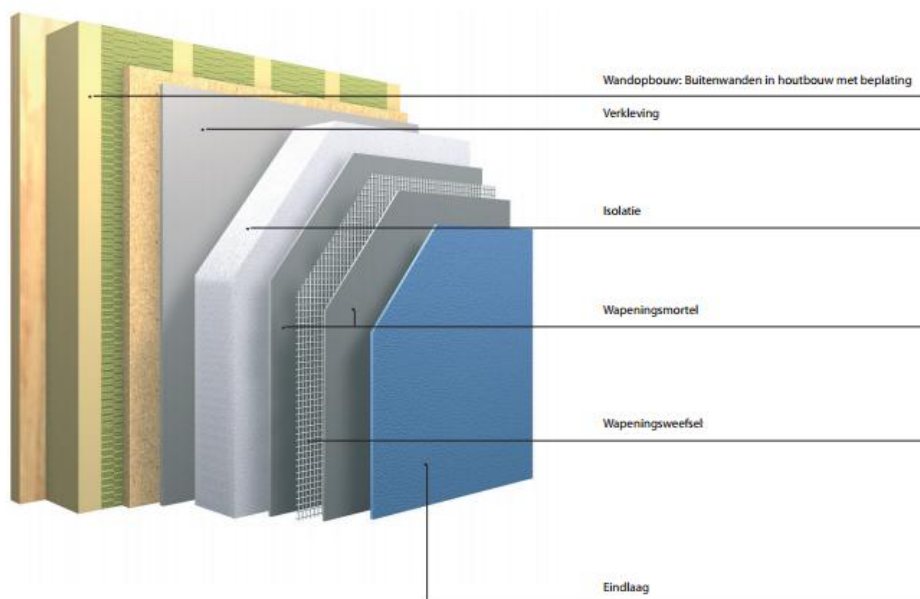
- Vaker gaat men **kunstharsgebonden pleisters** gebruiken. Deze kunnen nog onderverdeeld worden in silicaatpleisters, siliconenpleisters en acrylaatgebonden pleisters. Ze zijn elastischer en minder dampdoorlatend dan de minerale pleisters.

De verschillende eigenschappen van de pleisters doet de vraag rijzen of deze een significante invloed hebben op het uitdrogingsgedrag van een gevelopbouw met ETICS.

3.6. ETIC-SYSTEMEN BIJ EEN HOUTSKELETBOUW

ETIC-systemen worden al 50 jaren toegepast in Europa. Het is pas de laatste jaren dat het echter vaker en vaker wordt toegepast op houtstructuren. In België worden gevelisolatiesystemen nog niet frequent toegepast op een houten constructie, onder andere om de te verwachten hygrische bewegingen. Een wapeningsnet is dan ook bijna verplicht om scheurvorming en het loskomen van de bepleistering te voorkomen. Figuur 8 geeft de opbouw van een ETIC-systeem op houtskeletbouw weer. Een houten constructie is ook extra gevoelig aan waterschade onder de vorm van houtrot of schimmel. Kleine hoeveelheden water zijn voor baksteen- en betonstructuren geen probleem omdat ze in staat zijn het water te absorberen en te herverdelen zonder dat het schade toebrengt aan de structuur. Dezelfde hoeveelheid water in een houtstructuur is echter al gauw problematisch.

In theorie is een ETIC-systeem een perfect waterdicht systeem en hoeft men dus niet te vrezen voor waterinfiltraties die tot schade kunnen leiden. De theorie is echter perfecter dan de praktijk. Die leert ons dat er nog te vaak wel water binnendringt in het gevelsysteem en daar schade aanricht. Bij ETICS sijpelt het water vaak binnen aan niet goed uitgevoerde details zoals dakoverstekten, raamaansluitingen en dergelijke.



Figuur 8: ETICS op houtskeletbouw

Aan de hand van een aantal voorbeelden wordt duidelijk dat er nog heel wat problemen zijn bij pleistersystemen op een houtstructuur. De toepassing met bijhorende uitdagingen vormen dus een actueel vraagstuk.

3.6.1. Schadeprecedenten

Er hebben zich de laatste jaren verschillende schadegevallen voorgedaan bij ETICS op houtskeletbouw. Vooral in Amerika is houtskeletbouw een zeer vaak gebruikte constructietechniek. Het is dan ook normaal dat er relatief gezien meer schadegevallen optreden dan in België en Europa, waar houtskeletbouw in combinatie met ETICS redelijk nieuw is.

3.6.1.1. Brits-Colombia Canada

Een eerste onderzoek naar schadegevallen met houtskeletbouw is uitgevoerd in Brits-Colombia in Canada. Er werd een onderzoek verricht naar 46 gebouwen van acht jaar oud of jonger[5]. Ze zijn opgebouwd uit een houten structuur en hebben allemaal niet meer dan vier verdiepingen. 37 gebouwen hadden een probleem. Een probleemgebouw wordt als volgt gedefinieerd: Gebouwen waarbij er een vochtprobleem in de muren, vloeren of buitengevel resulteerde in een schade die meer dan \$10.000 aan herstellingen vereiste. Controlegebouwen zijn gebouwen waarbij er de laatste vijf jaar geen vochtproblemen optraden.

Materiaalgebruik

Het houtskelet van deze woningen bedraagt 38 op 89 mm of 38 op 140 mm. Als bekleding is er sprake van pleisterwerk of gevelplaten uit vinyl of hout. OSB-beplating (Oriented Strand Board) en plywoodplaten werden ook gebruikt. De ramen zijn voornamelijk aluminium ramen zonder thermische onderbreking. De ramen zijn vaak niet waterdicht afgesloten met de gevelbekleding.

Gerapporteerde problemen

In totaal werden er 193 problemen gedetecteerd. Bijna alle problemen situeerden zich rond details zoals raamaansluitingen, perforaties en daken. De lekkage situeerde zich aan de oppervlakte, maar de schade strekte zich veel verder uit. De natte zones konden het water niet snel genoeg afvoeren en droogden niet snel genoeg uit om schade te vermijden.

- Ramen: 25 % van de problemen
 - De raamprofielen zijn niet waterdicht in de hoeken (in verstek gezaagd: water lekt)
 - Aansluiting tussen raam en muur is niet waterdicht
 - Slecht gebruik van waterslabben aan de bovenkant van de ramen en de dorpels
 - Slechte installatie van dampscherm
- Waterslabben: 25 % van de problemen
- Aansluiting van balkons, terrassen e.d. : 17 % van de problemen
- Overige 33 %: aansluiting dak-muur, slecht uitgevoerde dakgoten, regenpijpen enz.

De uitkraging aan het dak is ook van groot belang. Het rapport meldt een grote afname aan problemen, naarmate de uitkraging toeneemt. Onderstaande tabel duidt aan welke uitkraging bij welke type bekleding voorkomt bij de onderzochte gebouwen.

Table 1. Distribution of overhang widths by cladding type.

Overhang Width Range (mm)	0	1-300	301-600	Over 600
Stucco-clad walls	44%	35%	16%	5%
Vinyl-clad walls	23%	8%	54%	15%
Wood-clad walls	50%	30%	20%	0%
Other clad walls	17%	50%	33%	0%
All cladding types	39%	31%	25%	6%

Figuur 9: Dakoverstekten

Uit de tabel valt af te leiden dat hoe groter de dakoversteek is, hoe minder er problemen optreden bij pleistergevels. Een voldoende grote dakoversteek is dus belangrijk. De volgende tabel geeft aan hoe water binnendringt voorbij de buitenbekleding van een gebouw en zo de structuur bereikt.

Table 2. Path of water penetration through the sheathing paper.

Path through Sheathing Paper	Percent of Total Symptoms
No exterior sheathing	14%
Discontinuities	30%
Material degradation	11%
No or reversed lap	10%
At flashing	16%
At penetration	16%
Other	3%

Figuur 10: Oorzaken van waterinfiltratie

Het wordt duidelijk dat wanneer er onderbrekingen in de waterdichtingen zitten, of het materiaal gedegradéerd is, er grote kans is op waterinfiltraties. Uit het onderzoek bleek ook dat de bepleisterde structuren proportioneel gezien meer verschillende problemen kenden dan de andere soorten. 84 % van alle raamgerelateerde problemen deden zich voor bij pleistersystemen (60 % van de onderzochte huizen waren bepleisterd).

3.6.1.2. NIEUW-ZEELAND

Een grootschalig schadegeval uit Nieuw-Zeeland[6] onderstreept het belang van volledige en correcte regelgevingen en normeringen omtrent het gebruik van ETICS. Zonder helemaal in detail te treden, wordt het schadegeval kort uitgelegd.

De meeste huizen in Nieuw-Zeeland worden opgetrokken in een lichte houtconstructie. In de jaren '80 kreeg men te maken met een enorme eigendomsboom. Er was heel veel werk in de bouwsector, maar te weinig materiaal voorhanden en het bouwen van woningen duurde te lang. Er werden daardoor verschillende nieuwe technieken en materialen ontwikkeld die al snel, te snel, op de markt kwamen. Twee van deze nieuwe technieken zijn de pleistersystemen Dryvit en Insulcad. Ze kregen een technische goedkeuring alvorens er uitgebreide testen op werden uitgevoerd. Dit leidde tot de snelle verspreiding van de systemen die eigenlijk nog niet voldeden aan alle technische eisen. Eén van de heikele punten was de stevigheid van het pleisterwerk. Pleister op een metselwerk vormt een stijf geheel. Pleister op houtconstructies is echter een ander verhaal. Ze werkten met panelen waarop de pleister werd aangebracht, maar deze waren niet voldoende stijf. Ook de waterdichting stond nog helemaal niet op punt. Zo werden er bijvoorbeeld geen slabben gebruikt aan raam- en deuropeningen.

Dit leidde in de jaren '90 al snel tot veel schadegevallen, die maar gedeeltelijk werden aangepakt. De uiteindelijke druppel die de emmer deed overlopen was de uitgave van de NZS 3602 (New Zealand Standard) in 1995 waarin het gebruik van onbehandeld hout werd toegelaten. Door de slechte waterdichting kon het water de constructie binnendringen en werden houtskeletten rot op minder dan twee jaar tijd. De opeenstapeling van blunders leidde tot miljoenen, zo niet miljarden euro schade en veel constructies die niet meer te redden vielen.

Uit deze voorbeelden van schadegevallen kan geconcludeerd worden dat een houtstructuur heel gevoelig is voor vochtinfiltraties en dat een juiste installatie dan ook cruciaal is. Indien er toch problemen optreden, moeten deze zo snel mogelijk grondig worden aangepakt om verdere schade te voorkomen.

3.6.2. Regelgeving

Het voorbeeld uit Nieuw-Zeeland toont het belang van correcte regelgeving aan. In Europa worden aan materialen die geschikt zijn voor het bouwproces een technische goedkeuring toegekend sinds mei 2014. De goedkeuring draagt de naam ETA (European Technical Approval). Een ETIC-systeem moet eerst goedgekeurd worden voor het op de markt wordt toegelaten. Er wordt een ETA afgeleverd voor elke combinatie van type isolatie en grondmortel. De ETAG 004 (Guideline for European Technical Approval of ETICS, [7])beschrijft de testen waaraan het systeem moet voldoen om een Europese goedkeuring te krijgen. Er worden zes vereisten opgesteld:

- Mechanische weerstand en stabiliteit
- Brandveiligheid

- Hygiëne, gezondheid en omgeving
 - Waterabsorptie
 - Waterdichting
 - Impactweerstand
 - Waterdampdoorlaatbaarheid
 - Thermische karakteristieken
 - Vrijkomen van gevaarlijke bestanddelen
- Gebruiksveiligheid
 - Hechtsterkte
 - Weerstand tegen windbelasting
- Bescherming tegen geluid
n.v.t. want de akoestische eisen gelden voor de volledige wandopbouw, niet enkel voor het ETIC-systeem.
- Thermische prestaties

De regels die uit de ETAG004 volgen gaan ervan uit dat de levensduur van een ETICS minstens 25 jaar bedraagt, op voorwaarde dat het goed onderhouden wordt. Het schadegedrag van pleister wordt uitgebreider besproken in 6.2.

Er bestaat ook een Belgisch goedkeuringsorgaan: de BUtgb (Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw). Zij kunnen als aanvulling op de ETA een ATG uitgeven (Agrément Technique / Technische Goedkeuring). Dit is ook een technische goedkeuring. Deze tonen dat de testen voorgeschreven door de ETAG 004 zijn uitgevoerd voor desbetreffende gevelpleistersysteem en dat dit systeem geschikt is voor ons klimaat. Een ATG laat ook toepassingen toe die niet onder de ETAG 004 vallen, indien er voldoende testen zijn op uitgevoerd. Een producent van gevelpleistersystemen moet in staat zijn de nodige goedkeuringen en certificaten voor te leggen.

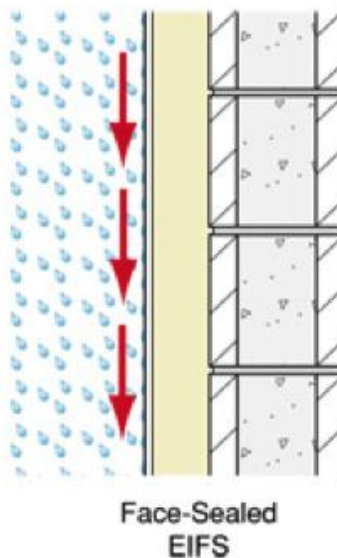
4. AANSLUITINGSDetails ETIC-SYSTEMEN

Het allergrootste aandachtspunt bij ETIC-systemen is de waterdichtheid. Hiermee staat of valt het hele systeem. Uit vorige schadegevallen blijkt duidelijk dat vochtproblemen het vaakst aanleiding geven tot schade.

Algemeen bestaan er drie vormen van waterdichting:

- **Drainage**: Er is de mogelijkheid om water dat in de structuur dringt, af te voeren
- **'Face sealed'**-dichting: het oppervlak is perfect waterdicht, waardoor er geen water in de structuur kan.
- **'Mass buffering'**: de muren hebben een grote dikte en kunnen daar vocht in bufferen zonder dat er problemen optreden.

ETIC-systemen horen thuis in de tweede categorie. Het buitenoppervlak wordt beschouwd als een waterdichte laag. Hiertoe is het heel belangrijk dat alle aansluitingen dan ook waterdicht zijn afgewerkt. Een ETIC-systeem is er niet op voorzien dat er water binnendringt achter de buitenste laag. In Amerika worden gedraineerde ETICS ook toegepast, maar deze worden hier buiten beschouwing gelaten omdat ze in Europa niet voorkomen.



Figuur 11: ETICS is een face sealed systeem

Het WTCB heeft een aantal standaard aansluitingen opgenomen in TV (Technische Voorlichting) 209: buitenbepreisteringen[4]. Elke fabrikant heeft zijn eigen aansluitingen. Als men ze echter naast elkaar plaatst, wordt duidelijk dat deze weinig tot niets verschillen. De meeste fabrikanten geven details uit voor metselwerk. Voor houtskeletbouw zijn er slechts weinig te vinden. Dit is hoogst waarschijnlijk een van de oorzaken waarom er fouten gebeuren tegen de installatie van pleistersystemen op houtskeletbouw. Er is geen algemene detailbundel voorhanden. De details die hieronder zijn opgenomen, zijn slechts een paar van de vele mogelijke oplossingen. Enkele basisregels moeten gerespecteerd worden omtrent

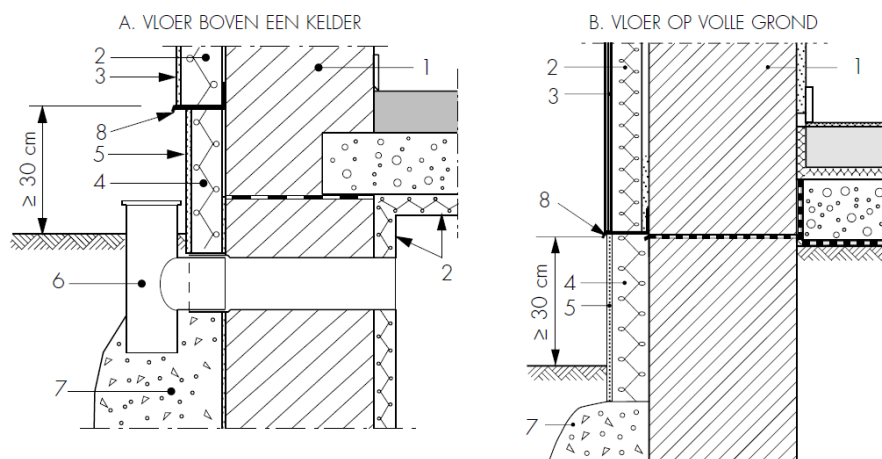
waterdichting en doorlopende isolatie, maar daarnaast is de ontwerper vrij om het detail naar zijn of haar hand te zetten.

4.1. MUURVOET

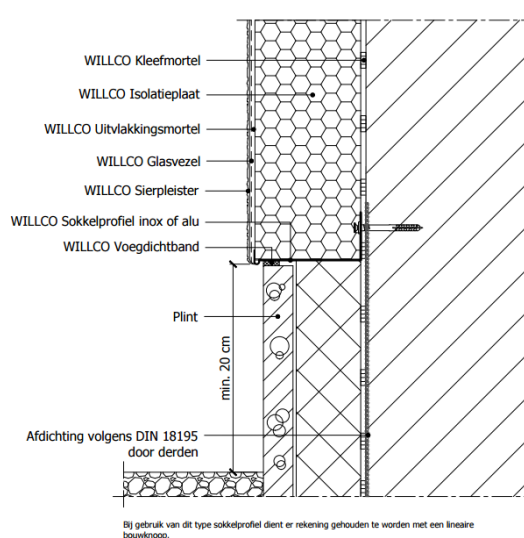
Als de muren in contact komen met de grond moet de bepleistering minimum op 30 cm boven het maaiveld starten (zie figuur 12). Men gebruikt een vochtbestendig isolatiemateriaal met een juist afdichtingsysteem. In praktijk is dit vaak XPS- isolatie. (XPS = geëxtrudeerd polystyreen).

Afb. 20 Isolatie van de muurvoet.

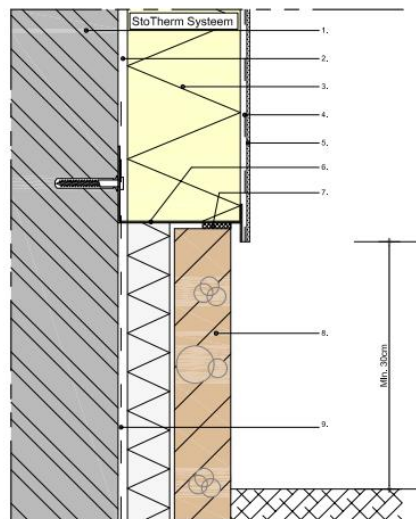
1. Volle muur
2. Isolatiemateriaal
3. Buitenbepleistering
4. Vochtbestendig isolatiemateriaal, bv. XPS-schuim
5. Vochtbestendige mechanische bescherming
6. Ventilatiekanaal
7. Drainering
8. Startprofiel



Figuur 12: Muurvoet, WTCB



Figuur 13: Muurvoet, fabrikant 1



- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| 1. Ondergrond | 6. Sto-Sokkelprofiel Aluminium |
| 2. Verfijning | 7. Sto-Afdichtband |
| 3. Isolatie | 8. Plint |
| 4. Wapeningslaag met glasweefsel | 9. Bitumen / dichting |
| 5. Afwerkingslaag | |

Figuur 14: Muurvoet, fabrikant 2

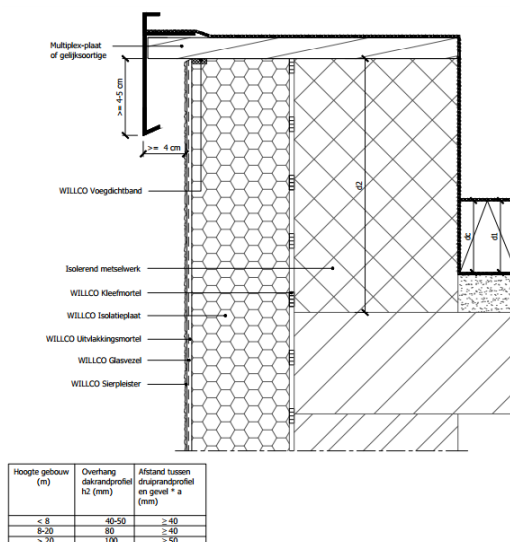


Figuur 15: Risico's bij een foutief uitgevoerde muurvoet

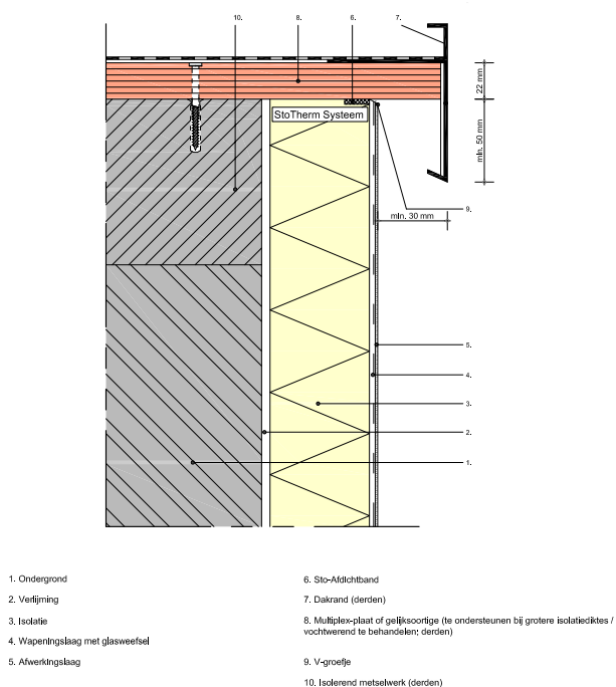
Beide knopen van de fabrikanten zijn gelijk aan de voorgeschreven knoop uit de TV 209. Bij foutief uitgevoerde muurvoeten bestaan er verschillende risico's. Bovenstaande foto's duiden er twee aan: scheurvorming en vervuiling.

4.2. DAKRAND

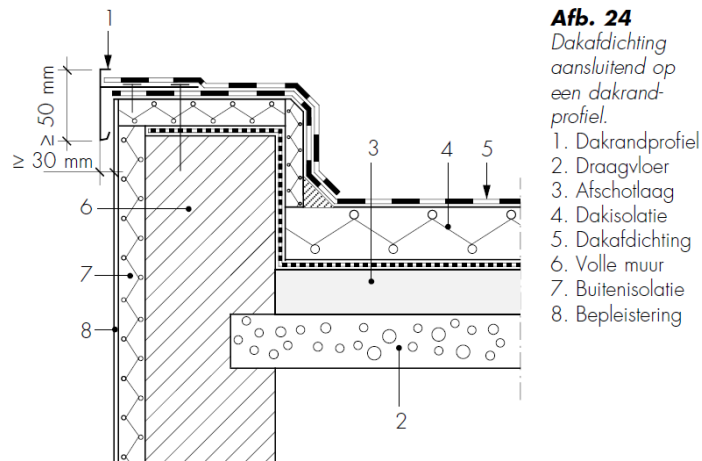
De dakrand moet waterdicht afgewerkt zijn zodat het isolatiesysteem waterdicht blijft. Dit kan door de dakafdichting door te trekken en aan te sluiten op een dakrandprofiel of te bedekken met een muurkap van natuursteen of van metaal. De oversteek moet minstens 30 mm bedragen zodat het water niet langs de gevel afstroomt. Het profiel is minstens 50 mm hoog en schermt de rand af.



Figuur 16: Dakrand, fabrikant 1



Figuur 17: Dakrand, fabrikant 2



Figuur 18: Dakrand, WTCB

Het eerste detail (Figuur 16) schrijft een grotere dakoversteek dan strikt noodzakelijk voor. Het gaat uit van een dakoversteek van minstens 40mm, terwijl maar 30mm vereist is. De isolatie wordt ook niet volledig over de dakrand doorgetrokken. In plaats daarvan wordt in beide fabrikantendetails een isolerend metselwerkblok ingevoegd om koudebruggen te vermijden.

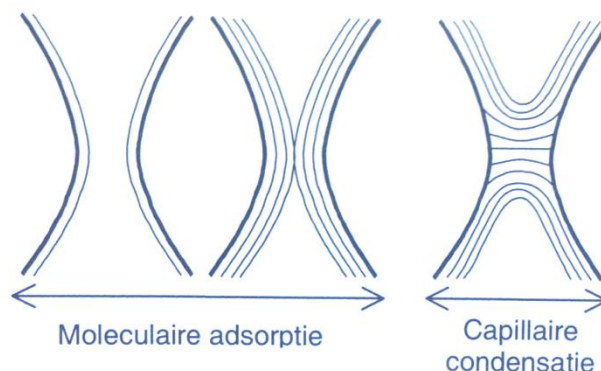
5. VOCHTOPSLAG

5.1. INLEIDENDE BEGRIPPEN

Het hygrothermisch gedrag bepaalt in belangrijke mate de levensduur en schadegedrag van een ETIC-systeem. Het gaat erover hoe vocht binnendringt in de gevel, zich verdeelt en er weer uit verdwijnt. Om dit te snappen, moeten er een aantal vochtmechanismes verduidelijkt worden. [8]

Het vochtgehalte van een materiaal wordt voornamelijk bepaald door de relatieve vochtigheid van de lucht. De hygroscopiciteit van poreuze materialen is het gevolg van de intermoleculaire krachten tussen de waterdampmoleculen onderling (cohesie) en tussen de waterdampmoleculen en de poriënwallen (adhesie). Twee processen zorgen voor vochtopname:

- Moleculaire adsorptie
- Capillaire condensatie



Figuur 19: Vochtopname van poreuze materialen

Moleculaire adsorptie

De waterdampmoleculen hechten zich als een dun waterlaagje op het poriënoppervlak door de adhesie tussen de waterdampmoleculen en poriënwallen. Dit proces wordt sterk beïnvloed door de poriënverdeling van het materiaal en komt voornamelijk voor bij lage luchtvochtigheid. Fijnporeuze materialen nemen meer vocht op doordat materialen met kleine poriën meer poriënoppervlak hebben.

Capillaire condensatie

Dit is het condenseren van vochtige lucht boven een hol wateroppervlak. Wanneer de dikte van de geadsorbeerde waterlaagjes toeneemt, gaan ze op een zeker moment contact maken. Ter plaatse van de overgang met nog niet volledig gevulde poriën ontstaan holle watermenisci.

Door de grotere resulterende kracht op de watermoleculen boven een hol wateroppervlak, is de dampdruk van de verzadigde lucht kleiner dan de verzadigingsdruk die geldt boven een vlak wateroppervlak. Hoeveel kleiner die druk is, is afhankelijk van de kromtestraal van de

meniscus en dus van de grootte van de poriëndiameter. Hoe kleiner de poriëndiameter, hoe kleiner de verzadigingsdampdruk boven de meniscus in de porie.

De intermoleculaire krachten zorgen ervoor dat vochtige lucht die in contact komt met een watermeniscus in isotherme omstandigheden kan condenseren, zelfs bij een relatieve vochtigheid lager dan 100%. De condensatie zal stoppen wanneer de dampdruk van de lucht gelijk is aan de verzadigingswaarde boven de meniscus.

De relatieve vochtigheid bepaalt dus in welke poriën capillaire condensatie optreedt en dus wat het evenwichtsvochtgehalte in het materiaal is. Verder in dit onderzoek worden er simulaties uitgevoerd met het simulatieprogramma WUFI (Wärme und Feuchte Instationär) en daarbij kan worden opgemerkt dat het vochtgehalte voor elk materiaal inderdaad wordt gegeven in functie van de relatieve vochtigheid. Men verkrijgt zo de vochttopslagcurve.

Bij hogere relatieve vochtigheden worden steeds wijdere poriën gevuld en zal het evenwichtsvochtgehalte dus toenemen, tot bij 100% relatieve vochtigheid alle poriën volledig gevuld zijn.

Hygroscopiciteit

Het vochtgehalte van poreuze materialen zal dus toenemen in functie van de relatieve vochtigheid van de omgevingslucht, zelfs als er geen bron van vloeibaar water aanwezig is. Bepaalde materialen, zoals bijvoorbeeld baksteen en de meeste isolatiematerialen, hebben een heel gering aandeel kleine poriën en worden niet-hygroscopische materialen genoemd. Hun hygroscopische vochtgehalte neemt pas merkbaar toe wanneer de relatieve omgevingsvochtigheid zeer hoog is.

Materialen op basis van cement of organische materialen zoals hout zijn wel hygroscopisch en bevatten een groot hygroscopisch vochtgehalte, ook al is de relatieve vochtigheid laag.

Damptransport

Bij poreuze materialen die droog zijn of weinig vocht bevatten, gebeurt het vochttransport hoofdzakelijk onder de vorm van damp. Dit transport gebeurt veel trager dan transport van vloeibaar water. De dampdiffusieweerstand μ is een grootheid die aangeeft hoe snel het damptransport doorheen het materiaal is. Deze coëfficiënt geeft aan hoeveel keer groter de dampdiffusieweerstand van een materiaal laag is in vergelijking met de dampdiffusieweerstand van een luchtlaag van dezelfde dikte in identieke omstandigheden. Materialen met een μ -waarde van dezelfde grootte-orde als lucht noemt men dampdoorlatend of dampopen ($1 \text{ à } 10$). Materialen met een grotere waarde zijn dampremmend (bv $\mu=100$) of dampdicht ($\mu \rightarrow \infty$).

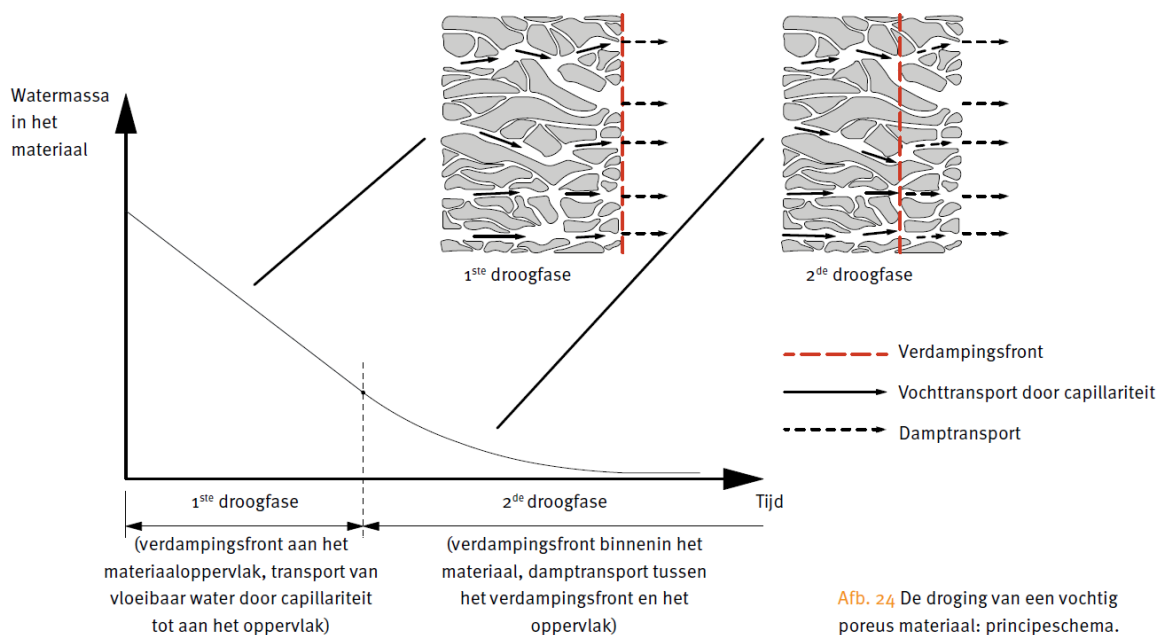
Ze is afhankelijk van de hoeveelheid open poriën per oppervlakte-eenheid van het materiaal, van de afstand die afgelegd moet worden in het poriënnetwerk per dikte-eenheid van het materiaal, van de tortueusiteit van het poriënnetwerk en van de relatieve omgevingsvochtigheid.

Droogproces

Het droogproces van een vochtig poreus materiaal verloopt steeds in twee fasen en wordt bepaald door de eigenschappen van het poriënnetwerk. [9] (Zie Figuur 20)

Tijdens de eerste fase droogt het materiaal snel en constant. Het water verplaatst zich onder zijn vloeibare vorm tot aan het materiaaloppervlak en daar verdampst het. Als de aanvoer van water door capillariteit naar het oppervlak groot genoeg is, zal de verdampingssnelheid en bijgevolg dus ook de droogsnelheid enkel beïnvloed worden door de omgevingsomstandigheden.

Tijdens de tweede fase vertraagt de droogsnelheid. De verdamping vindt niet langer plaats aan het materiaaloppervlak, maar binnenin het poriënnetwerk. Het water wordt dan als damp getransporteerd van het verdampingsfront tot aan het materiaaloppervlak. Dit transport verloopt een heel stuk trager dan het capillaire vochttransport.



Figuur 20: De droging van een vochtig poreus materiaal: principeschema

Het is vanzelfsprekend dat de aanwezigheid van vocht kan leiden tot verschillende problemen en schade. De duurzaamheid en het uitzicht worden aangetast, maar vaak leiden ook het comfort en de gezondheid van de bewoners onder vochtproblemen. Algemeen kan vocht onder meer leiden tot scheurvorming, schimmel, houtrot, onthechting van materialen, oppervlaktecondensatie, corrosie enz. In het volgende hoofdstuk worden deze uitgebreider besproken en wordt er naar criteria gezocht om te kunnen bepalen wanneer schade zal optreden.

5.2. WUFI

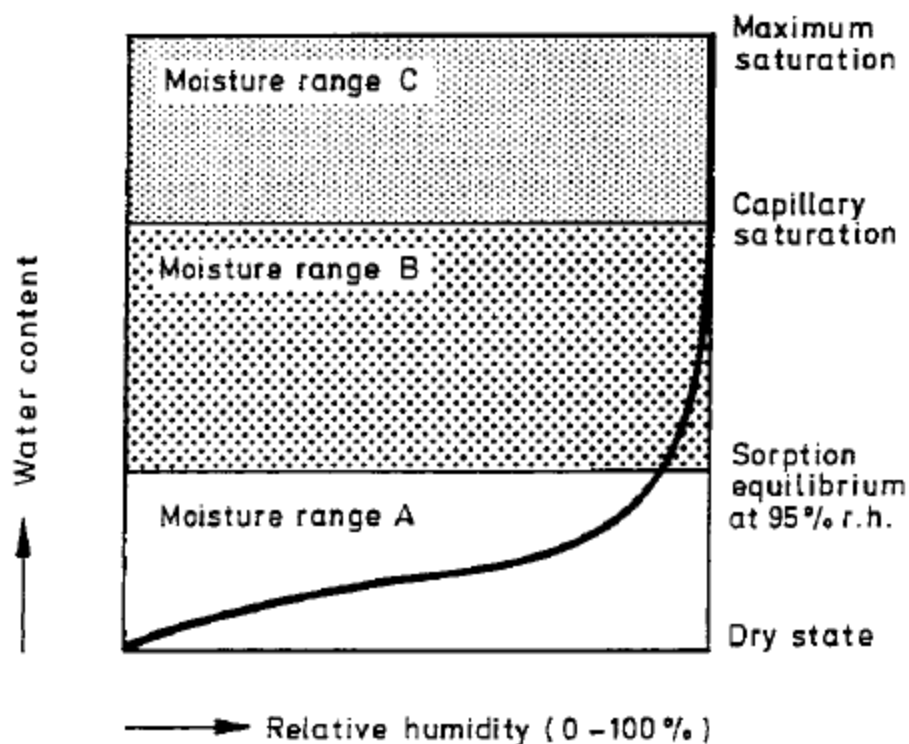
Om het hygrothermisch gedrag van ETICS te bestuderen wordt gebruikt gemaakt van WUFI. WUFI (Wärme Und Feuchte Instationär) is een Duits HAM-simulatieprogramma (Heat Air Moisture) ontwikkeld door het IBP Fraunhofer Instituut. Hartwig Künzle is één van de belangrijkste grondleggers van het programma.

5.2.1. Vochttransport in WUFI

Bij WUFI zijn de drijvende mechanismen achter het vochttransport de waterdampdiffusie en oppervlakediffusie, waarbij deze laatste afhankelijk is van de relatieve vochtigheid.

Men onderscheidt drie vochtregio's :[10]

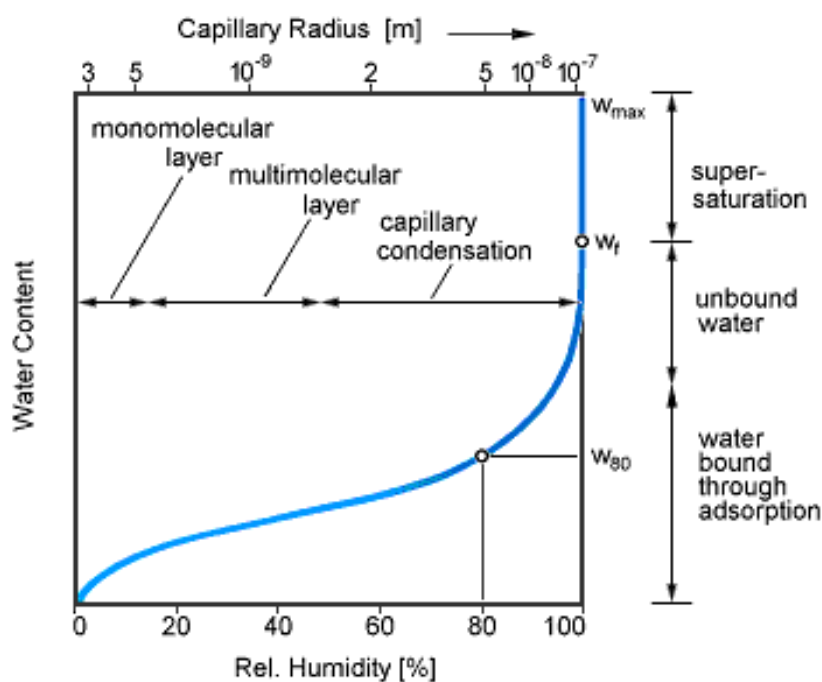
- **Regio 1: De hygroscopische regio:** Deze regio reikt van de droge toestand tot het evenwichtsvochtgehalte bij ongeveer 95 % relatieve vochtigheid. (Range A op Figuur 21)
- **Regio 2: De capillaire regio:** Deze regio gaat verder tot de 'free water saturation' (vrije waterverzadiging). Hogere waterinhouden zijn enkel mogelijk door een druk aan te brengen (Range B).
- **Regio 3: De oververzadigde regio:** de regio kan niet meer door normale opzuiging van water bereikt worden. Deze regio heeft geen evenwichtstoestand en de relatieve vochtigheid is altijd 100 % (Range C).



Figuur 21: De drie vochtregio's

In een poreus hygroscopisch materiaal wordt water opgenomen in de poriën tot er een evenwichtsvochtgehalte bereikt is. De vochtcurve geeft aan welk vochtgehalte het materiaal bereikt bij een zekere relatieve vochtigheid. De afhankelijkheid van de temperatuur is verwaarloosbaar.

Een capillair-actief materiaal dat in aanraking komt met water zal water opnemen tot het zijn vrije verzadigingswaarde w_f bereikt. Dit vochtgehalte komt overeen op de curve met een relatieve vochtigheid van 100%. Deze waarde is voor elk materiaal in de materiaaleigenschappen van WUFI opgegeven. Doordat lucht gevangen wordt in de poriënstructuur, is de vrije verzadiging kleiner dan het maximaal vochtgehalte $w_{\max}$ dat bepaald wordt door de porositeit. Vochtgehaltenes die w_f overschrijden worden gerekend tot het oververzadigd gebied. Een andere waarde die WUFI opgeeft is de w_{80} -waarde die overeenkomt met een relatieve vochtigheid van 80% (zie Figuur 22).



Figuur 22: Vochtcurve WUFI

In WUFI wordt de vochttopslagcurve voor elk materiaal beschreven bij de materiaaleigenschappen door middel van een tabel met vochtgehaltenes corresponderend met hun relatieve vochtigheid. Tussen de gegeven waarden past WUFI de lineaire interpolatie toe.

WUFI laat vochtgehaltenes in de oververzadigde regio toe, maar in dit gebied is er geen vaste relatie tussen relatieve vochtigheid en vochtgehalte. De relatieve vochtigheid is altijd 100% en het vochtgehalte varieert tussen w_f en $w_{\max}$. Het vochtgehalte is dus in dit geval niet afhankelijk van de relatieve vochtigheid, maar wordt bepaald door de randvoorwaarden: het stijgt bij condensatie en daalt bij verdamping.

5.2.2. Vochtopslagfunctie benaderen

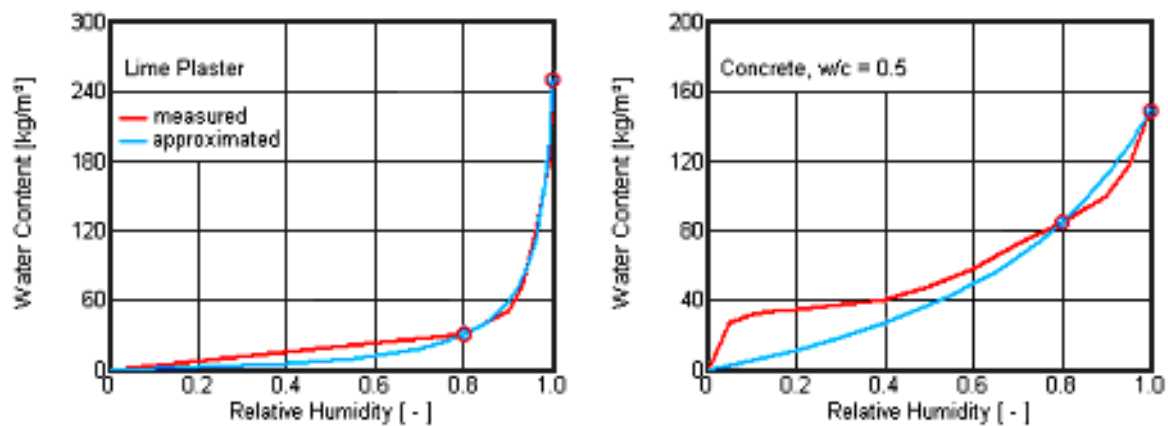
De opslagcurve kan men benaderend beschrijven a.d.h.v. volgende functie:

$$w(\varphi) = w_f \cdot \frac{(b-1) \cdot \varphi}{b - \varphi}$$

Met:

- $w(\varphi)$ Vochtgehalte overeenkomstig met RV φ [kg/m³]
- w_f Vochtgehalte bij evenwichtsvochtgehalte [kg/m³]
- φ Relatieve vochtigheid [-]
- b benaderingsfactor [-]

Op deze manier is het voldoende om de w_{80} en w_f waarde te kennen om de vochtcurve te benaderen in WUFI. Dit is echter niet voor alle materialen even correct. Onderstaande figuur toont twee benaderingen. De linkse benadering komt goed overeen met de gemeten vochtopslagcurve, maar de rechtse wijkt veel af. Hierdoor kunnen simulaties lichtjes verschillen van de werkelijke omstandigheden.



Figuur 23: Benadering van de vochtcurve

6. EVALUEREN VAN HYGROTHERMISCHE PRESTATIES: CRITERIA

De hygrothermische prestaties van een ETICS evalueren is niet zo eenvoudig. Er zijn geen algemene criteria die van toepassing zijn voor elk afzonderlijk geval. Elk materiaal heeft zijn eigen criteria. Er zijn wel een aantal standaard richtlijnen:

- Het vochtgehalte mag zich in de loop van de tijd niet opstapelen in de constructie. Als er water in de gevel condenseert, moet het kunnen uitdrogen. Als het vochtgehalte blijft stijgen, ontstaan er op termijn waarschijnlijk problemen.
- De bouwmaterialen die in aanraking komen met vocht mogen niet beschadigd zijn (door bijvoorbeeld corrosie of schimmelgroei). Men moet ook opletten voor vorstschade.

De Duitse norm DIN 4108-3 [11] voegt er nog een aantal richtlijnen aan toe

- Het vochtgehalte dat condenseert in een muur of een dak mag de waarde van 1 kg/m² niet overschrijden. Dit is eigenlijk een arbitraire voorwaarde, die echter wel getest kan worden in WUFI. Hiervoor start men de berekening met het normale evenwichtsvochtgehalte voor een relatieve vochtigheid van 80%. Vervolgens kijkt men of het eindvochtgehalte de startwaarde met meer dan 1 kg/m² overschrijdt.
- Op de oppervlakken van de materialen die niet capillair-actief zijn, mag het vochtgehalte niet meer dan 0,5 kg/m² stijgen. Dit is bedoeld om aflopend vocht te vermijden dat ergens in de constructie zou kunnen accumuleren en schade zou kunnen veroorzaken.
- De toename van het vochtgehalte in hout mag niet meer dan 5 massaprocent (M%) bedragen en de toename van het vochtgehalte in materialen die op hout gebaseerd zijn niet meer dan 3 M%. Ook deze voorwaarden zijn arbitrair.

Er zijn dus geen vaste richtlijnen, maar er kan wel een rangschikking gemaakt worden van het beste geval tot het slechtste geval. Op basis daarvan kunnen er dus keuzes gemaakt worden voor een zo goed mogelijke opbouw in de opgegeven situatie. Om te weten wanneer iets schadelijk is, is het belangrijk om te weten wat alle mogelijke schadecriteria voor de verschillende materialen zijn.

6.1.1. SCHADECRITERIA VOOR HOUTSKELETBOUW

Een regel bij hout is dat er een gevaar is op houtrot of schimmelvorming wanneer het vochtgehalte de 20% overstijgt, en dit gedurende een langere tijd. De precieze criteria zijn:

- Voor schimmelvorming: de ondergrens is 20 massaprocent en 5°C gedurende minimum 720 uur.
- Voor houtrot: de ondergrens is 25 massaprocent en 10°C gedurende minimum 168 uur.

Deze schadecriteria zijn echter enkel bekend voor hout. Men moet er rekening mee houden dat plaatmaterialen vaak extra behandeld zijn tegen schimmels en rot, waardoor men andere criteria gaat krijgen. Het risico ligt in werkelijkheid dus waarschijnlijk een stuk lager.

Deze criteria kunnen na simulaties in WUFI gemakkelijk gecontroleerd worden. Als het vochtgehalte overal onder de 20 M% blijft, loopt het houtskelet geen gevaar.

6.1.2. SCHADECRITERIA VOOR PLEISTER

Schadecriteria voor pleisters zijn niet zo gemakkelijk te achterhalen. Er bestaat geen standaard vochtgehalte waar de pleister niet over mag gaan. Het is bijgevolg dus ook moeilijk om via WUFI een juiste analyse te maken over wanneer een pleister niet meer zal voldoen.

Scheurvorming is het duidelijkste schadefenomeen. Dit is wel afhankelijk van spanningsopbouw die op zijn beurt afhankelijk is van temperatuursschommelingen en het vochtgehalte. Onrechtstreeks is er dus wel een risico op schadevorming door het vochtgehalte, maar doordat de spanningen in de pleister niet worden aangegeven door WUFI, is het moeilijk om conclusies te trekken op basis van een simulatie.

Er zijn een aantal parameters die kunnen wijzen op een degradatie van de pleister. In de paper van Ximenes et al. [12] wordt er een onderscheid gemaakt tussen verschillende schadecategorieën.

- **Verlies van continuïteit/integriteit**

- Scheuren
- Degradatie van de verstevigde hoekprofielen
- Openingen tussen de materialen

- **Vlekken, kleurveranderingen en textuurveranderingen**

- Vlekken door aflopend water
- Oxidatievlekken
- Schimmel

- **Verlies van aanhechting**
 - Blaasvorming
 - Loskomen
- **Defecten in verbindingen**
 - Specifiek tussen de verschillende isolatieplaten
 - Zichtbare openingen tussen de platen
 - Onvlak
 - Scheuren in verbindingen

Hieronder worden er een aantal gebreken uitgebreider besproken.

6.1.2.1. HET LOSKOMEN VAN DE ETIC-SYSTEMEN: BINDING

In de ETAG 004[7] worden verschillende eisen gesteld aan de bindingsterkte tussen de verschillende lagen van de pleister. Er zijn een aantal tests ontwikkeld die de bindingssterkte kunnen opmeten waaruit een aantal richtlijnen volgen.

Volgens ETAG004 moeten de onderstaande hechtvlakken worden getest.

- Hechtsterkte tussen de grondpleister en het isolatiepakket: 0,08 N/mm²
- Hechtsterkte tussen de hechtmortel en de dragende muur
 - Droge toestand: 0,25 N/mm²
 - Na contact met water
 - 0,08 N/mm² na 2 uren uit het water
 - 0,25 N/mm² na 7 dagen uit het water
- Hechtsterkte tussen de hechtmortel en het isolatiepakket
 - Droge toestand: 0,08 N/mm²
 - Na contact met water
 - 0,03 N/mm² na 2 uren uit het water
 - 0,08 N/mm² na 7 dagen uit het water

Breuk zal voorkomen wanneer deze eisen niet gerespecteerd worden. De simulaties laten de berekening van deze bindingskrachten echter niet toe, waardoor het op basis van de uitkomst van de simulaties moeilijk te voorspellen valt wanneer een ETIC-systeem zou kunnen loskomen. Experimenteel onderzoek kan hier meer uitsluitsel over geven.

6.1.2.2. SCHIMMEL EN ALGENGROEI

Eva Barreira heeft onderzoek [13, 14] gedaan naar het voorkomen van algengroei bij ETIC-systemen. In dit onderzoek is één van de hoofdoorzaken de nachtelijke onderkoeling. Een paar aandachtspunten zijn volgens haar dan ook het hygrothermisch gedrag van de gevel en de warmte-uitwisseling tussen de buitenste laag van het ETIC-systeem en de atmosfeer. Ook de oriëntatie en het lokale klimaat spelen een grote rol op de uitdrogingscapaciteit- en snelheid.

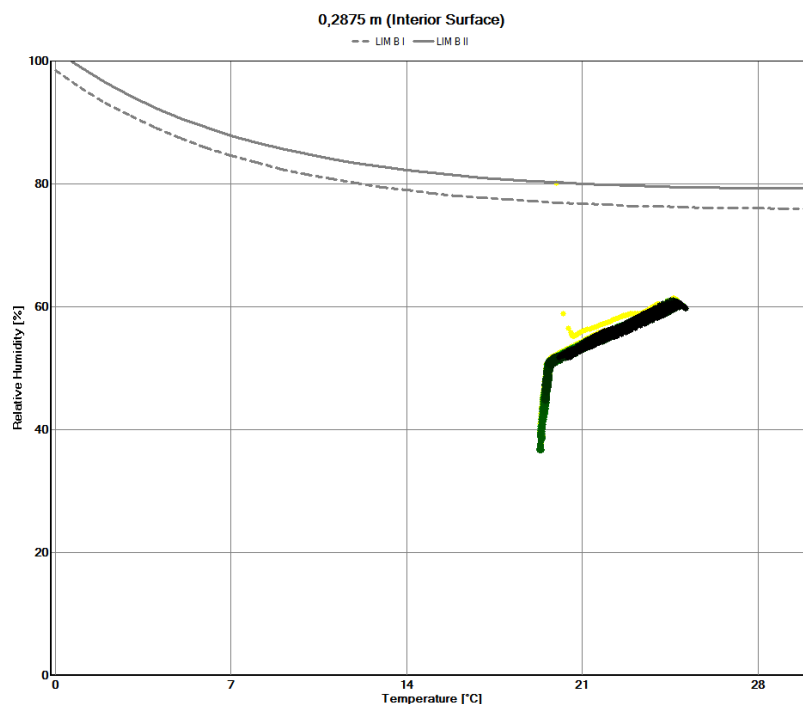
Voor schimmel zijn er een aantal duidelijke schadecriteria beschikbaar. In de cursus Bouwfysica van de Universiteit Gent [8] worden ze als volgt beschreven.

Schimmelgroei ontstaat op poreuze ondergronden op drie voorwaarden:

- De ondergrond bevat voldoende voedingsstoffen voor schimmelontwikkeling
- Het oppervlak heeft een voldoende hoge temperatuur en vochtigheid en
- Deze voorwaarden zijn gedurende een voldoende lange tijd vervuld

Standaard wordt een relatieve vochtigheid van 80% als ondergrens genomen. Uit schadedossiers van Bureau Bouwtechniek blijkt dat zij rekenen met volgende vuistregel: De voorwaarde opdat schimmels ontstaan is een goede (poreuze) ondergrond en een lage oppervlaktetemperatuur die lang en regelmatig genoeg voorkomt (gedurende een periode van 1 tot 2 maanden, meer dan 6 uur per dag).

De ontwikkelingsvoorwaarden voor schimmelgroei worden vastgelegd in isopleet-diagramma, die de nodige temperatuur en vochtigheid beschrijven voor een bepaalde ontwikkelingssnelheid. WUFI geeft ook isopleten weer.



Figuur 24: Isopleet uit WUFI

Een voorbeeld van een isopleet is Figuur 24. Elk punt in de grafiek stelt een hygrothermische conditie op een bepaald tijdstip voor. De kleur van elk punt geeft aan op welk tijdstip in de berekening deze conditie voorkwam. In het begin van een simulatie zijn de punten geel, daarna worden ze alsmaar donkerder groen en de laatste punten uit de simulatie zijn zwart. Zo is het mogelijk trends te herkennen op lange termijn.

Er zijn ook twee limietcurves: LIM B I en de LIM B II. Onder deze twee curves wordt er normaal geen schimmeligroei verwacht. Als de hygrothermische condities zich gedurende langere tijd boven de curves bevinden, kan er schimmeligroei optreden. Dit is echter niet zeker, want de groei is van nog een aantal andere criteria afhankelijk. Aan het buitenoppervlak geldt bijvoorbeeld dat de weersomstandigheden de schimmeligroei kunnen verhinderen. Dat kan bijvoorbeeld door grote blootstelling aan UV-straling en hoge temperaturen of door het afwassen door de regen.

Deze isopleten geven dus eigenlijk meer een indicatie over waar verder onderzoek nodig is. (daar waar de isopleten langdurig boven de limietcurves gaan).

LIM B I: milieuvriendelijk materiaal, gemakkelijk afbreekbaar

LIM B II: materiaal met een poreuze structuur, bv. Pleister, minerale materialen, sommige houtsoorten, isolatiematerialen die niet tot I behoren enz.

Isopleten zijn echter niet de enige modellen die schimmeligroei voorspellen. In de paper van onderzoekers aan de KULeuven [15] worden verschillende schimmelmodellen tegen elkaar afgewogen. Elk model is gebaseerd op zijn eigen veronderstellingen en experimenten. In een deel van de modellen wordt enkel rekening gehouden met de temperatuur en de relatieve vochtigheid RV. Er zijn echter nog andere zaken die meespelen zoals het materiaal en de tijd waarin het materiaal wordt blootgesteld aan de omstandigheden waarin schimmel zich kan ontwikkelen. Dit kan dus tot verschillende conclusies leiden, afhankelijk van het gekozen model.

Temperatuursfactor τ

Volgende vergelijking wordt gebruikt om het risico op schimmel te evalueren:

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

Met

$\theta_{s,min}$	Minimale oppervlaktetemperatuur [°C]
θ_i	Binnentemperatuur [°C]
θ_e	Buitentemperatuur [°C]

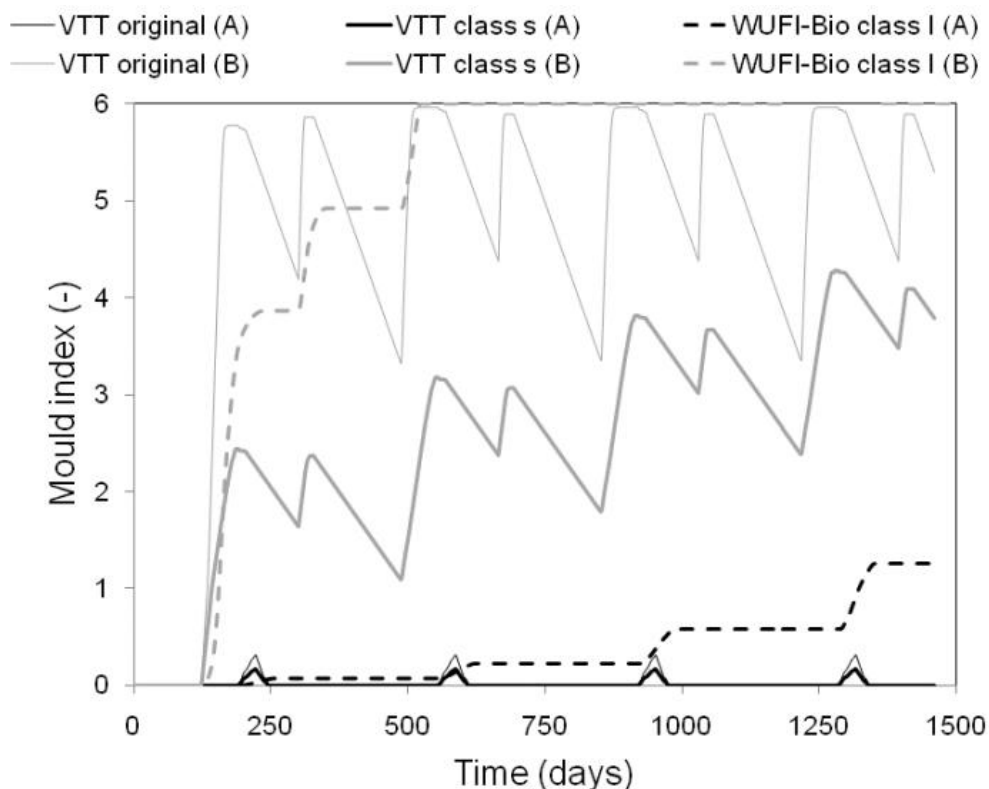
Een factor van 0,7 is gerelateerd aan een schimmelrisico van 5%, wat een aanvaardbare waarde is. Een lagere factor is onaanvaardbaar. Dit wordt gebruikt in combinatie met de standaardwaarde van 80 % RV. Dit is echter een heel eenvoudig model. Dit is ook eerder om een snelle indicatie van eventuele problemen te verkrijgen.

VTT model

Het VTT model is een empirisch model dat ontwikkeld werd door Hukka en Viitanen, gebaseerd op regressieanalyse van meetdata. De schimmelgroei wordt uitgedrukt in een schimmelindex M die gaat van 0 tot 6, waarbij M=1 meestal als aanvaardbare grens wordt aangenomen. In dit model wordt er een kritische relatieve vochtigheid bepaald waarbij er schimmelgroei kan ontstaan.

WUFI

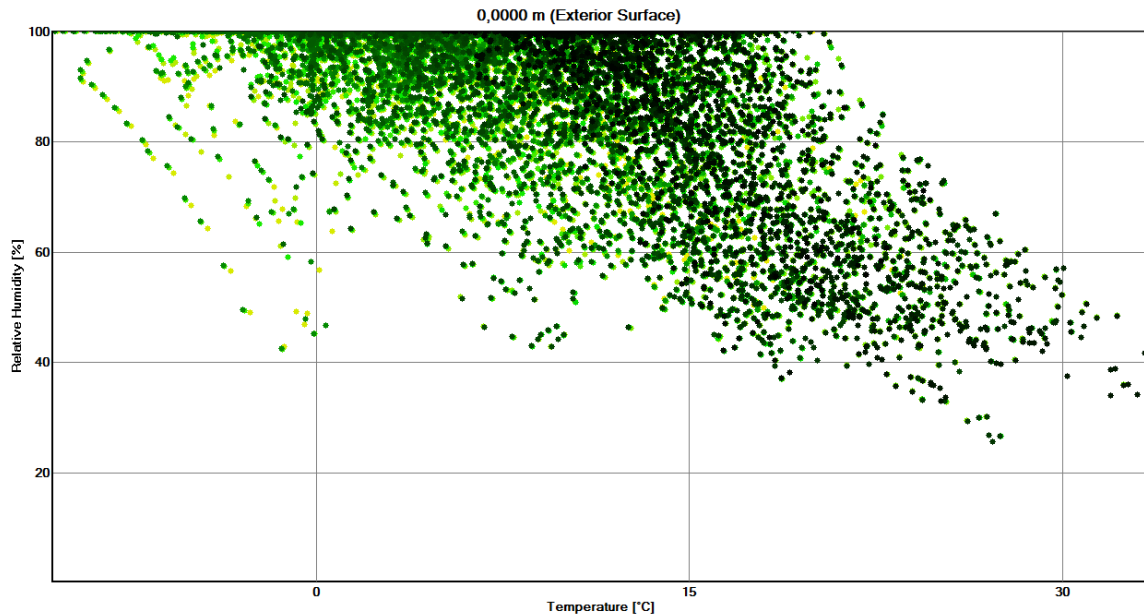
Hoe werkt dit nu in WUFI? WUFI houdt, i.t.t. het VTT-model geen rekening met het feit dat de schimmelindex kan afnemen wanneer de omstandigheden niet meer geschikt zijn voor schimmelgroei. WUFI drukt op een denkbeeldige pauzeknop en op het moment dat alle voorwaarden weer voldaan zijn, gaat de groei weer verder (zie Figuur 25). Dit klopt niet volledig. Het kan zijn dat de voedingsbodem wordt afgespoeld door de regen of wordt vernietigd door de UV-straling. Hierdoor kan het zijn dat WUFI de situatie nadeliger inschat dan in werkelijkheid het geval is. De isopleten moeten dus met de nodige zorg bestudeerd worden en niet zomaar voor waar aanvaard worden.



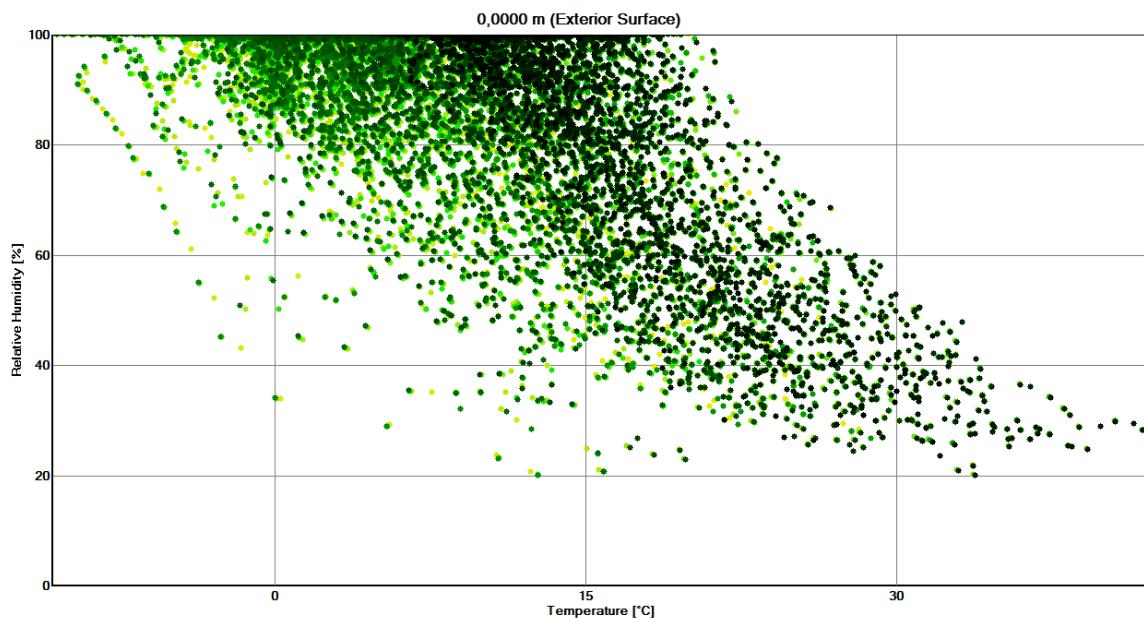
Figuur 25: schimmelindex voor het VTT-model en WUFI

Algen kunnen tegen langere droge periodes en beginnen weer te groeien wanneer er opnieuw voldoende vochtigheid aanwezig is. Algen hebben echter ook voedingsstoffen nodig om te groeien. Dit is iets dat afhangt van de afwerkingslaag.

Noordgevels zijn het gevoeligst aan schimmelgroei omdat ze zich het langst in de schaduw bevinden en dus langer koud en ook natter zijn. Als we de isopleten voor het buitenoppervlak bekijken (Figuren 26 en 27), zien we dat dit inderdaad klopt. Het zijn isopleten voor simulaties van 10 jaar.



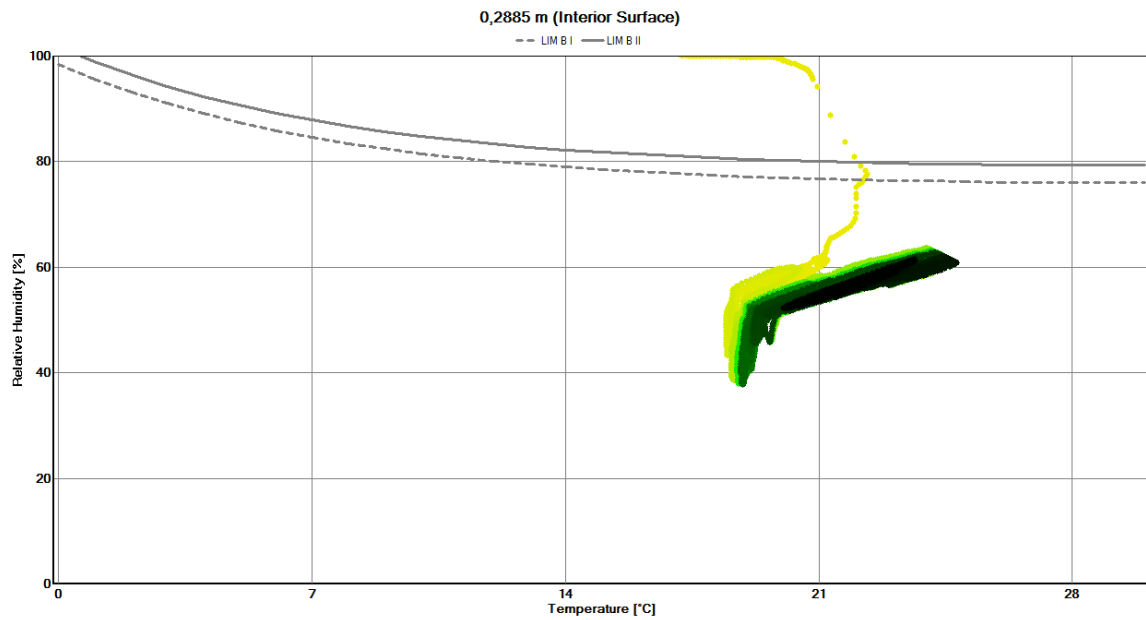
Figuur 26: Isopleet aan het buitenoppervlak van een noordelijke gevel



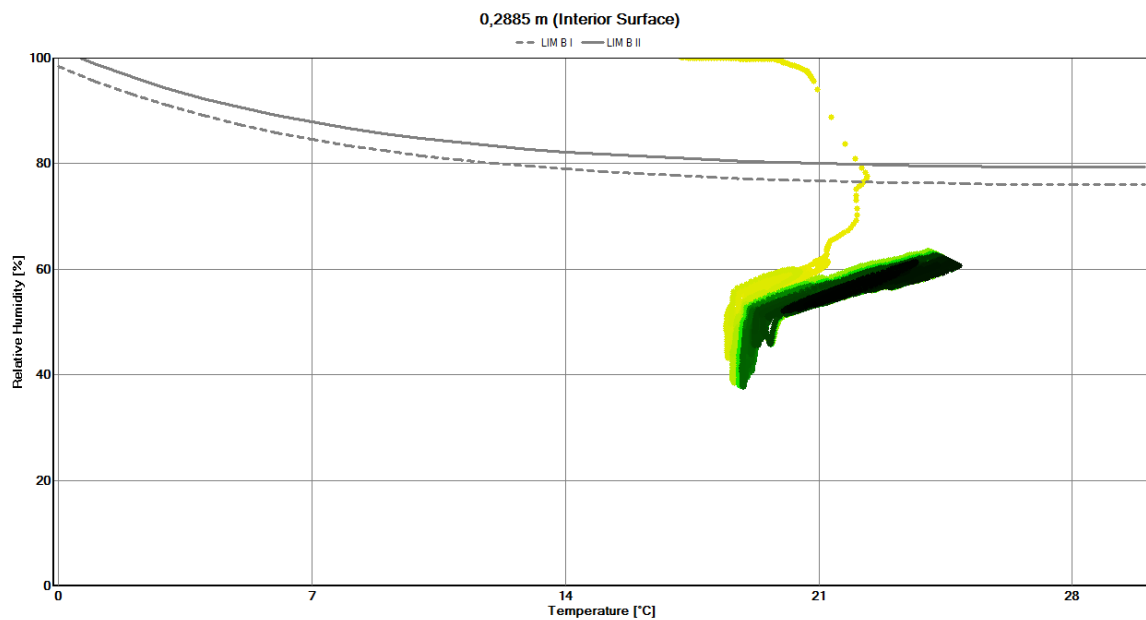
Figuur 27: Isopleet aan het buitenoppervlak van een zuidelijke gevel

Bij een noordelijke oriëntatie zal de relatieve vochtigheid op het oppervlak op termijn hoger zijn en de temperatuur lager (de donkerste punten zijn de nieuwste). Bij een zuidelijke oriëntatie is de relatieve vochtigheid lager en de temperatuur hoger. Het oppervlak droogt dus beter uit ten gevolge van de zonnestraling die het sneller en meer opwarmt.

Aan het binnenoppervlak is er geen merkbaar verschil tussen de verschillende oriëntaties (Figuren 28 en 29). Op termijn lijkt er ook geen risico te zijn voor schimmelvorming op het binnenoppervlak, zoals af te lezen is op onderstaande figuren.



Figuur 28: Isopleet aan het binnenoppervlak van een noordelijke gevel

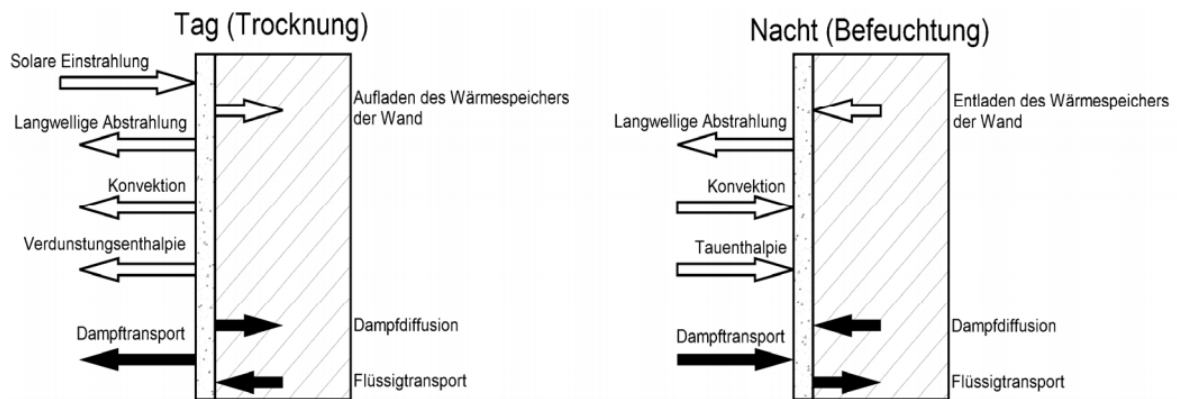


Figuur 29: Isopleet aan het binnenoppervlak van een zuidelijke gevel

Wel valt op dat de donkere punten steeds meer opschuiven naar rechtsboven, naar een hogere temperatuur en ook hogere relatieve vochtigheid. Als deze trend aanhoudt, kan er op heel lange termijn eventueel wel schimmel optreden.

6.1.2.3. ONDERKOELINGSVERSCHIJNSEL

Op een zonnige dag wordt de pleister en de daaronderliggende constructie door de zonnestraling opgewarmd. Daardoor verhoogt de dampdruk in de constructie en dit leidt tot een uitdroging van het oppervlak doordat vocht wordt afgegeven aan de buitenlucht en door dampdiffusie in de koudere zones van de wand. 's Nachts valt de zonnestraling weg en kan onderkoeling optreden.



Figuur 30: De thermische (witte pijlen) en hygrische (zwarte pijlen) effecten op een muur met pleisterafwerking gedurende dag en nacht

Langegolfstraling tussen het buitenoppervlak en de atmosfeer zorgen 's nachts voor een onderkoelingverschijnsel. De oppervlaktetemperatuur van het ETIC-systeem daalt en er kan zich condensatie vormen op het oppervlak wanneer de oppervlaktetemperatuur lager is dan het dauwpunt. Als het niet snel genoeg weer uitdroogt en er gedurende langere tijd vocht op en in het oppervlak blijft, stijgt het risico op algengroei.

Zelfs als de temperatuur niet laag genoeg zakt om tot condensatie te leiden, leidt de nachtelijke afkoeling tot een grotere toename van het oppervlaktevochtgehalte door het opnemen van waterdamp. Het pleister neemt hierbij vocht op uit de buitenlucht alsook door diffusie uit de warmere ondergrond[16]. Het verschijnsel wordt verder nog uitgebreider aangehaald.

Het onderkoelingverschijnsel heeft volgens Barreira[14] de meest ernstige gevolgen voor bouwdelen met een substantiële thermische isolatie, die de warmtegeleiding doorheen de muur tegenhoudt of toch sterk vermindert. Daardoor is de buitenoppervlakte 's nachts kouder dan bij constructies zonder isolatie. De warmte van het binnenklimaat bereikt het buitenoppervlak niet. Ook constructies waarvan de buitenste dunne laag een kleine thermische inertie heeft, lopen groter gevaar volgens Barreira. Dit is het geval bij ETIC-systemen. De buitenste pleisterlaag bedraagt slechts 3 tot 15 mm en is dus onderhevig aan grote temperatuurschommelingen. Hieruit concludeert ze dus dat gevelconstructies met ETIC-systemen gevoelig zijn aan dit onderkoelingverschijnsel en er dus aandachtig moet naar gekeken worden.

6.1.2.4. BLAASVORMING

Wanneer er vocht achter de afwerkingpleister binnendringt, kan dit leiden tot blaasvorming. Dit is ook het geval wanneer gebruik wordt gemaakt van bv. een dampdichte verf. Door de dampdichtheid is het onmogelijk voor het vocht in de muur om uit te drogen naar buiten en kan het dus niet uit de gevel weg. De kans bestaat dat het zich ophoopt achter de verflaag en zo dus blazen vormt. Door de blaasvorming kan de pleister zijn aanhechting verliezen en loskomen. (zie later case study Leeuwergerm).

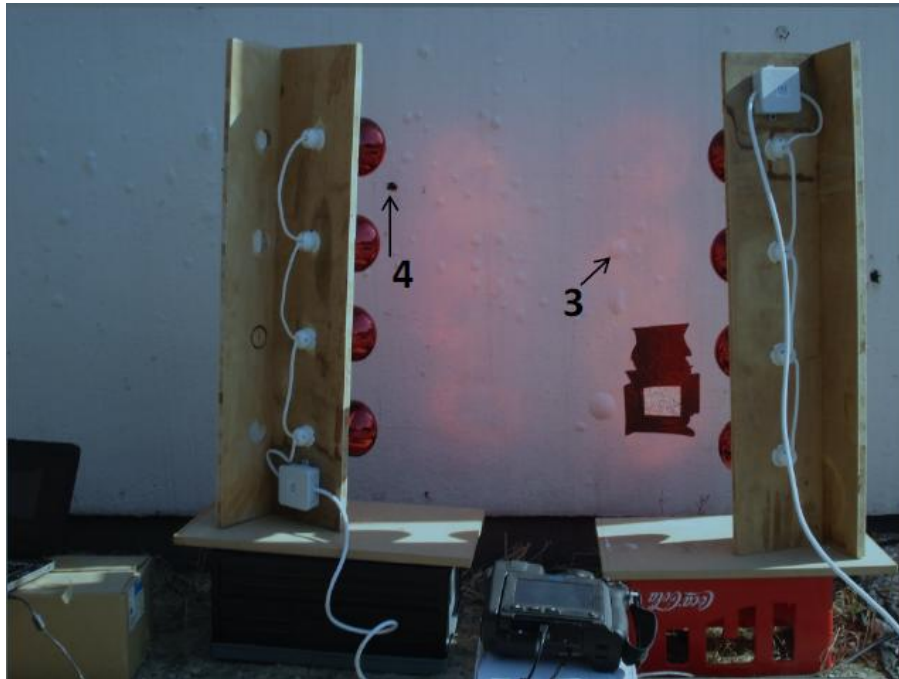
Er bestaat geen enkel criterium voor de vorming van blazen.

Aan de hand van een schadegeval in Lint[17], dat onderzocht werd door Bureau Bouwtechniek en Universiteit Gent in 2014, wordt duidelijk dat blaasvorming een reëel probleem is. Het betreft een woning in Lint die blaasvorming vertoont op het zadeldak, de zuidwest- en noordoostgevel. De andere gevels zijn gevrijwaard gebleven van blaasjes. Dit doet het vermoeden rijzen dat de blaasvorming het gevolg is van beregening en afwatering van het zadeldak. De gevel bestaat uit een cementering op EPS-platen, afgewerkt met zwarte epoxyhars en witte verf. Zowel onder de witte als zwarte afwerkinglaag komen blaasjes tevoorschijn.

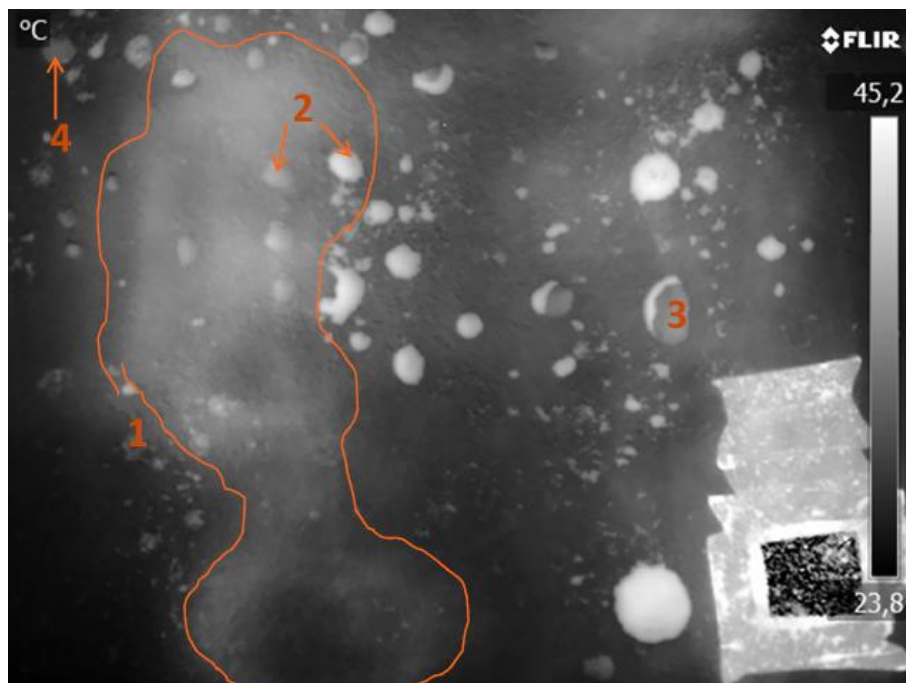


Figuur 31: Blaasvorming op de gevel

Met behulp van thermografie werd onderzocht wat de inhoud van de blaasjes was. De muur werd opgewarmd a.d.h.v. infraroodlampen. Vochtinsluitsels zouden trager moeten opwarmen dan de rest van de gevel en luchtinsluitsels net sneller. Dit zou kunnen zichtbaar zijn op de infraroodbeelden.



Figuur 32: Opstelling van de infraroodlampen



Figuur 33: Infraroodbeeld bij bestraling door infraroodlampen

De blaasjes zijn duidelijk te zien op de infraroodbeelden. Volgende zones en of soorten blaasjes kunnen onderscheiden worden in Figuur 33.

- 1) Zone met intensievere bestraling van de IR-lampen.
- 2) Blaasjes worden niet gelijkmatig opgewarmd: intensievere bestraalde blaasjes lijken een lagere oppervlaktetemperatuur te hebben
- 3) Blaasje met ruw (donkerder) en glad (lichter) gedeelte
- 4) Opeengebarsten blaasje

De foto's worden vergeleken met de gemeten vochtgehaltes. Het temperatuursverschil tussen de blaasjes en de rest van het oppervlak worden uitgezet in grafieken om te proberen de inhoud van de blaasjes te achterhalen. De conclusie is niet eenduidig. Hoogst waarschijnlijk bevatten de blaasjes water, maar een aantal factoren maken het niet mogelijk 100% zeker te besluiten. De emissiviteit van de buitenste laag is niet gekend en de FLIR-software (Forward Looking InfraRed) en de technische fiche van de fabrikant spreken elkaar tegen. Zonder hier uitsluitsel over te hebben, is het gissen naar een correcte conclusie.

Het duidt wel op het belang van het probleem van blaasvorming. Een eerste stap in het voorkomen van blaasjes op het oppervlak is het aanbrengen van een dampopen i.p.v. dampdichte verf. Een vuistregel schrijft voor dat de dampdichtheid van de materialen van binnen naar buiten moet afnemen om condensatie in de constructie te vermijden.

6.1.2.5. VORSTSCHADE

Vorstschade is een fenomeen dat veroorzaakt wordt door een combinatie van factoren. De schade wordt gelinkt aan de volgende drie aspecten volgens Dirckx en Grégoire[3]:

- Aanwezigheid en bevriezen van water in de poriën
- Vervormingen die worden tegengehouden
- Het afnemen van bepaalde mechanische eigenschappen

Water in de poriën

Doordat water uitzet bij bevriezing kunnen er grote spanningsconcentraties ontstaan in het materiaal wanneer deze uitzetting wordt verhinderd. Het fenomeen is afhankelijk van de temperatuur en het verzadigd vochtgehalte van het materiaal. Wanneer er een kritiek vochtgehalte bereikt wordt dat afhankelijk is van het materiaal, kan de uitzetting schade veroorzaken. Onder dit kritieke vochtgehalte, kan er nog water getransporteerd worden naar dichtbijgelegen lege poriën en kan zo de schade voorkomen worden.

Door de druk bevriest het water op een lagere temperatuur dan water in vrije lucht (daar is de bevriezingstemperatuur 0°C). Er zijn ook zouten in het water aanwezig die zorgen voor een lagere bevriezingstemperatuur. Dit kan al gauw leiden tot een bevriezingstemperatuur van -3°C tot -5°C. De snelheid van de temperatuurschommelingen en de manier van bevriezen (in één of meerdere richtingen) spelen ook een rol, samen met de karakteristieken van het materiaal.

Verhinderde vervormingen

Een materiaal dat onderhevig is aan hygrothermische veranderingen kan vervormen. Als die vervormingen worden verhinderd, kan er spanning in het materiaal opgebouwd worden. Dat kan leiden tot schade wanneer de spanning de weerstand van het materiaal overschrijdt.

Het afnemen van mechanische eigenschappen

Sommige mechanische eigenschappen van een materiaal kunnen slechter zijn onder bepaalde omstandigheden. Zo presteert een materiaal vaak minder goed in natte toestand dan in droge toestand. Zo houdt WUFI rekening met de afhankelijkheid van de

warmtegeleidingscoëfficiënt λ van de vochtinhoud. Minerale wol heeft in droge toestand bijvoorbeeld een λ -waarde van 0,04 W/mK en bij een waterinhoud van 200 kg/m³ al een λ -waarde van 0,07 W/mK.

De drie voorgaande factoren komen vaak samen voor. Het bevriezen van water in de poriën kan leiden tot vervormingen en spanningen indien de vervormingen verhinderd worden. Opgelegde vervormingen door hygrothermische veranderingen, kunnen ook leiden tot spanningen en vroegtijdig falen van het materiaal als de mechanische eigenschappen verslechterd zijn. Ook het vermoeiingseffect speelt een rol. Na een aantal vorst-dooicycli kan schade toenemen.

Volgens Künzel [16] komt vorstschade relatief meer voor bij milde winters, wanneer na lange regenperiodes, korte vorstperiodes volgen. Ook de oriëntatie en zonnestraling spelen een grote rol.

De ETAG004[7] schrijft testmethodes en richtlijnen voor vochtopname. Een systeem wordt als onaanvaardbaar beschouwd als de waterabsorptie van de pleisterlaag meer dan 1 kg/m² per 1u bedraagt. Het wordt als vorstbestendig beschouwd wanneer de waterabsorptie na 24u minder dan 0,5 kg/m² bedraagt. Vorstschade kan optreden als 90% van de poriën gevuld zijn.

Deze norm is echter verouderd volgens Dirckx en Grégoire [3] en er komt kritiek op. De methode zou ook niet aangepast zijn aan het Belgische klimaat. Daarom doen ze een voorstel tot nieuwe testmethodes en nieuwe normen omtrent vorstbestendigheid en hygrothermisch gedrag. Deze 'normen' zijn nog niet goedgekeurd dus er wordt verder geen rekening mee gehouden.

6.1.2.6. SCHEUREN

Scheurvorming in een ETIC-systeem moet vermeden worden. De buitenste laag van een ETIC-systeem wordt immers aanzien als een perfecte waterbarrière. Wanneer er dus scheuren zijn in de pleister, kan het aflopend regenwater binnendringen, wat op termijn heel nefaste gevolgen zou kunnen hebben voor het goed functioneren van het systeem.

Een pleister is een hygroscopisch materiaal. Dit zorgt dat elk punt in de pleister wordt gekarakteriseerd door een vochtgehalte in evenwicht met de relatieve vochtigheid in het beschouwde punt. De relatieve vochtigheid is hierbij sterk afhankelijk van de temperatuur. Bij temperatuurschommelingen zal dus een hygrisch proces in werking treden. Er zullen naast de thermische vervormingen en spanningen steeds ook hygrische vervormingen en spanningen optreden. Een wand is opgebouwd uit een aantal verschillende materialen met elk hun eigen karakteristieken. Deze gaan ervoor zorgen dat er sterke verschillen zitten op de beginvervormingen van de wand. Het verloop van de hygrische beginvervormingen over de dikte van de pleister is ook niet-uniform omwille van de traagheid van het vochttransport. De verschillende lagen hangen echter wel aan elkaar, waardoor er een inwendig spanningsveld ontstaat. De grootste trekspanning ontstaat in de buitenste zone van de pleister bij bezonning en droging. Er kunnen microscheuren optreden. Bij herhaalde belasting neemt de schadezone toe en kan er zich daadwerkelijk een scheur aan het

buitenoppervlak vormen. Pleisters zijn onderhevig aan vermoeiingsschade en vertonen een progressieve beschadiging van de materiaalstructuur onder cyclische belasting. De scheur groeit vervolgens verder van buiten naar binnen over de volledige dikte van de pleister. Ze groeit ook verder in het vlak.

De duurzaamheid van de pleister moet volgens Carmeliet[18] beschouwd worden als de kans dat de pleister een levensduur t bereikt zonder een faalcriterium te overschrijden of een grensgedrag te bereiken. Als faalcriterium kan één van de volgende criteria gehanteerd worden :

- De initiatie van een scheur aan het buitenoppervlak
- De vorming van een macroscheur over de gehele dikte van de pleister
- Het overschrijden van een vooropgestelde scheurlengte of scheurwijdte

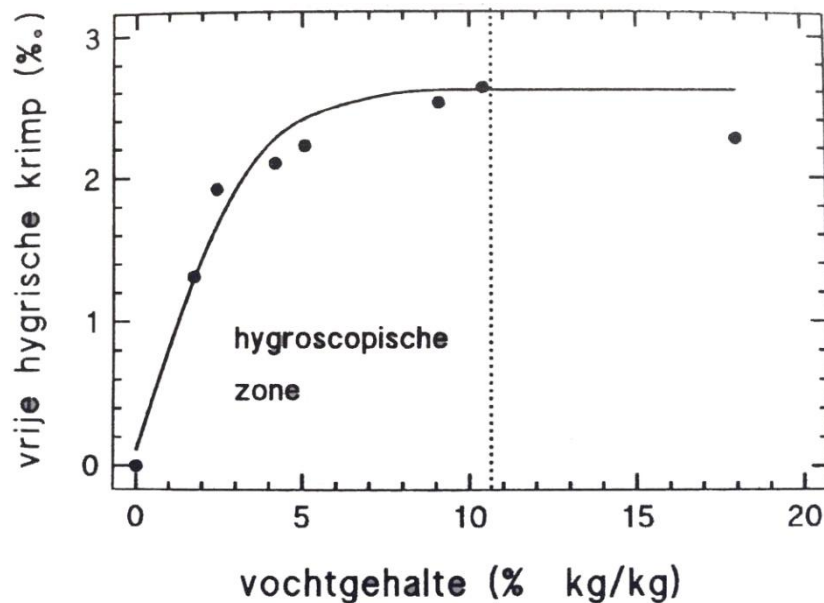
Warmte- en vochttransport kunnen in dit geval niet losgekoppeld worden:

- Door een temperatuursverandering treedt er ook een verandering in dampdruk op. Daardoor ontstaat er een vochttransport.
- Er ontstaat ook een vochttransport doordat de oppervlaktespanning van water verandert onder invloed van de temperatuurswijzigingen.
- Vochttransport betekent ook dat er warmtetransport is. Massaverplaatsing houdt immers een transport van enthalpie in.
- Sommige thermische eigenschappen zijn functie van het vochtgehalte (bijvoorbeeld de warmtegeleidingscoëfficiënt).
- Sommige hygrische eigenschappen zijn functie van de temperatuur.

Watertransport in pleister is het (mogelijke) gevolg van volgende factoren:

- Beregening
- Oppervlaktecondensatie bij onderkoeling
- Inwendige condensatie
- Droging van initieel aanwezig bouwvocht

Het inwendig spanningsveld en het optreden van de schade in de pleister worden sterk beïnvloed door het verloop van de vrije hygrische krimp in functie van het vochtgehalte (zie Figuur 34)[18].



Figuur 34: De vrije hygrische krimp in functie van het vochtgehalte

Bij hogere vochtgehaltes is de vrije hygrische krimp nagenoeg constant. De grootste verschillen in krimp treden op in de hygroscopische zone. Hieruit concludeert Carmeliet dat het optreden van watertransport in de pleister slechts tot geringe inwendige spanningen zal leiden.

De pleister is slechts een dunne laag en heeft een kleine thermische inertie. Ze is dus onderhevig aan veel en snelle temperatuurschommelingen. De verschillende oriëntaties en bezonning kunnen hier een grote rol in spelen. Het verschil tussen de minimum- en maximumtemperatuur per jaar bedraagt zo'n 60°C voor een witte pleister en tot 80°C voor een donkere pleister [19]. De temperatuursverschillen kunnen leiden tot spanningen.

De schommelingen van de temperatuur alleen zijn echter niet voldoende om scheurvorming te verklaren volgens Nannen en Gertis [20]. Ook de dagelijkse schommelingen in de RV spelen zoals hiervoor gezegd een belangrijke rol volgens Carmeliet [18]. De schommelingen in relatieve vochtigheid dringen slechts traag door de pleisterlaag en worden gedempt. Dit leidt tot belangrijke spanningen in de pleister. Om scheurvorming te vermijden of te vertragen worden wapeningsnetten aangebracht die de spanning moeten verdelen.

Testen hebben uitgewezen dat de grootste dimensieveranderingen voorkomen bij minerale pleisters in droge omgevingen met een lage RV. Kleine volumeveranderingen doen zich voor bij kunstharsgebonden pleisters in droge klimaten. [21]

Algemeen werd vastgesteld dat er geen scheuren werden gedetecteerd bij lengteveranderingen kleiner dan 4 mm/m. Bij meer dan 7mm/m begon er schade op te treden bij de minerale pleisters. Het gebruik van een wapeningsnet verkleinde de lengteveranderingen met ongeveer 50%.

IMPACTBESTENDIGHEID

Het ETIC-systeem moet bestand zijn tegen schokken van kleine, harde voorwerpen zoals bijvoorbeeld stenen of mensen die tegen de muur leunen. De impactbestendigheid wordt grotendeels gerealiseerd door het wapeningsweefsel. Indien nodig kan er een tweede weefsel aangebracht worden. Op basis van een aantal proeven (impacttest en perforatietest volgens ISO 7892[22] worden de ETICS onderverdeeld in vier klassen:

- Klasse 0: Zone gemakkelijk toegankelijk voor het publiek op grondniveau, die frequent blootgesteld wordt aan harde schokken
- Klasse I: Zone gemakkelijk bereikbaar voor het publiek op grondniveau en blootgesteld aan impact van harde schokken die toevallig voorkomen, maar niet aan abnormaal ruw gebruik
- Klasse II: Zone blootgesteld aan impact van geworpen voorwerpen, in openbare plaatsen waar de hoogte van het systeem de grootte van de impact beperkt; of op lagere niveaus waar de toegang tot het gebouw beperkt is tot diegenen die er belang bij hebben zorgzaam te zijn
- Klasse III: Zone waar het onwaarschijnlijk is dat er schade optreedt door normale impact van mensen of door geworpen voorwerpen.

7. SIMULATIES

7.1. SIMULATIESOFTWARE

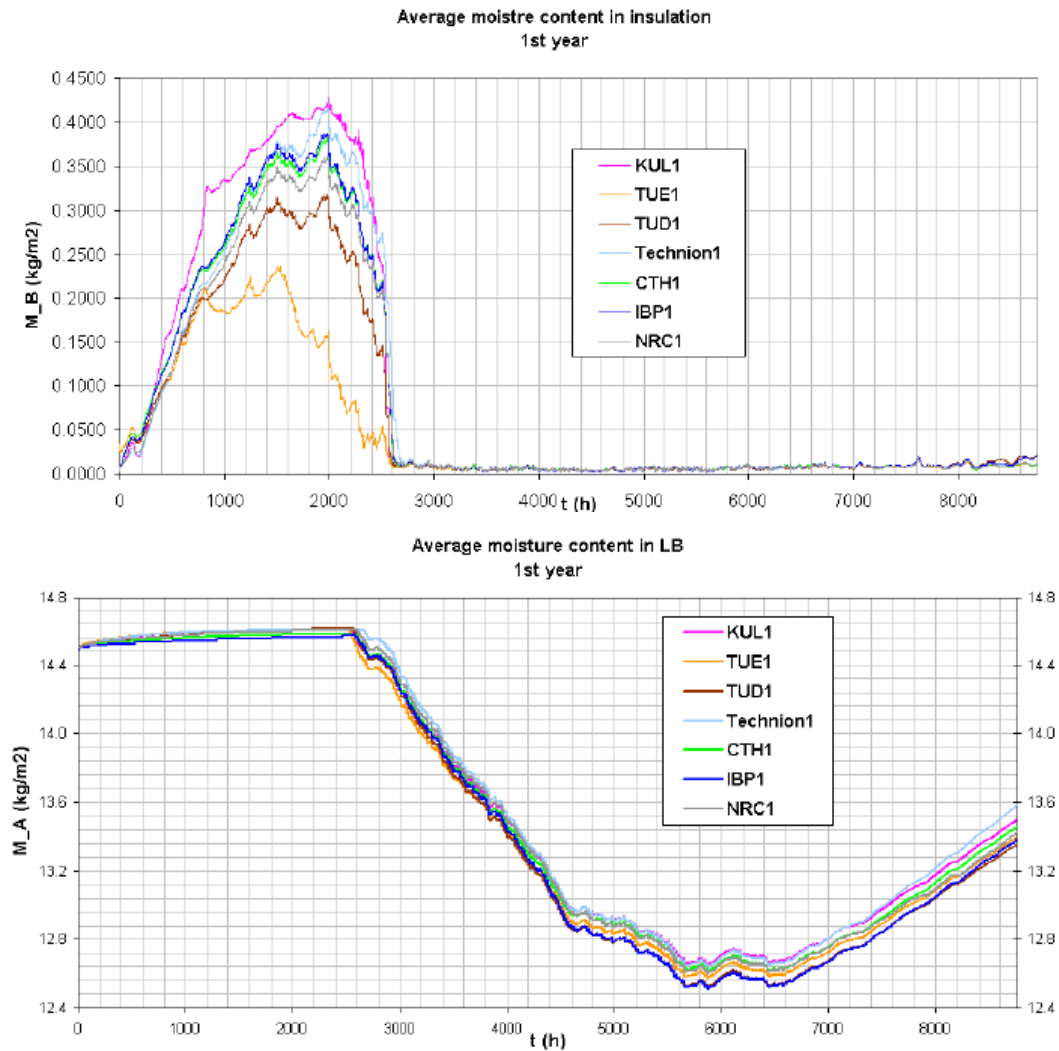
Er zijn een aantal HAM-simulatieprogramma's (Heat-Air-Moisture) op de markt die toestaan om de hoeveelheid vocht in een constructie nauwkeurig in te geven en daaruit het hygrothermisch gedrag voor de volgende jaren te bepalen. Voorbeelden van deze programma's zijn onder meer WUFI en Delphin. Verschillende programma's leiden echter tot verschillende resultaten, dus bekomen resultaten moet altijd met de nodige voorzichtigheid worden benaderd. Om dit aan te tonen is er in 2002 een project opgestart onder de naam HAMSTAD [23, 24] om verschillende simulatieprogramma's te analyseren en resultaten met elkaar te vergelijken. De simulaties bestuderen een aantal vaste constructies en bekijken het vochttransport doorheen deze constructies.

HAM-simulaties zijn een verderzetting van het eenvoudige Glasermodel. Het model van Glaser is slechts beperkt toepasbaar als men het heeft over de voorspelling en analyse van vochtprestaties van gebouwen. Daarom is de basis van het HAMSTAD project om het bestaande simulatiemodel te verbeteren en accurater te maken.

Verschillende universiteiten werken hiervoor samen en gaan vijf basisproblemen analyseren en nadien de resultaten vergelijken. Deze gaan over warmte, lucht en vocht.

- De eerste case gaat over interne condensatie op het contactoppervlak tussen twee materialen.
- De tweede gaat over de verdeling van vocht in een materiaal onder isotherme omstandigheden. Vochtbewegingen worden veroorzaakt door plotselinge veranderingen in relatieve vochtigheid van de omgeving.
- De derde case handelt over een luchtstroom door een éénlagig materiaal. Vochttransport wordt in grote mate veroorzaakt door de luchtstroom en ook door de vocht- en temperatuurgradiënten over de laag.
- De vierde behandelt vochtverdeling in een muur met een hygroscopisch afwerkingmateriaal. De muur wordt blootgesteld aan relatieve vochtigheid, warmte en vochtbronnen aan het binnen- en buitenoppervlak.
- De vijfde en laatste probleemstelling behandelt vochtverdeling in een muur met capillair actieve binnenisolatie.

Voor elk geval worden een aantal vaste data, materiaaleigenschappen en randcondities opgegeven. Ook wordt opgelegd wat de bekomen output (bv. Verloop van het vochtgehalte) moet zijn en over welke tijdsspanne de simulaties moeten lopen ten einde de resultaten met elkaar te kunnen vergelijken.



Figuur 35: Resultaten van de simulaties door de verschillende universiteiten op basis van dezelfde formules en invoergegevens

Men kan concluderen dat de resultaten ongeveer overeenkomen, maar toch hier en daar verschillen vertonen. Resultaten van simulaties mogen dus nooit voor 100 % als waar aanzien worden, daar het ook maar voorspellingen zijn die afhankelijk zijn van de rekenmethode waarop ze gebaseerd zijn. En zelfs als de rekenmethode hetzelfde is, zoals hier het geval is, komen verschillende softwareprogramma's toch tot lichtjes andere resultaten. De verschillen duiken meestal op tijdens het nat worden en het uitdrogen van de constructie.

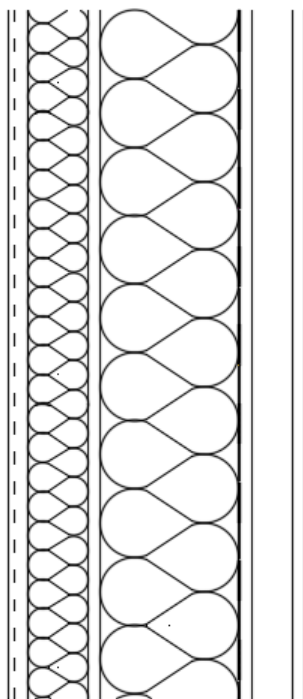
Men moet in gedachten houden dat de simulaties uitgevoerd worden door zeer ingewikkelde niet-lineaire processen. In principe homt het puur neer op het oplossen van wiskundige vergelijkingen om tot een resultaat te komen, maar in het echt is dit gecompliceerder. Verschillen in oplossingsalgoritmen, densiteiten van de mesh e.d. leiden tot (licht) verschillende resultaten. De resultaten van simulaties kunnen dus nooit volledig voor waar aangenomen worden.

7.2. OPBOUW HOUTSKELETBOUW

Voor de simulaties wordt er uitgegaan van een standaardopbouw van een houtskeletbouw met een ETIC-systeem. Dit bestaat uit, van buiten naar binnen:

- Pleisterlaag: dikte afhankelijk van soort pleister	3 à 15 mm
- EPS of MW (geëxpandeerd polystyreen):	60 mm
- OSB plaat :	12 mm
- Houtskelet 140 mm x 38 mm, opgevuld met cellulose-isolatie of MW	140 mm
- Dampscherm	1 mm
- OSB:	12 mm
- Eventueel elektrospouw:	40 mm
- Gipskartonplaat:	12.5 mm

De verschillende materialen kunnen nog veranderd worden. Zo worden de simulaties ook eens gedaan met minerale wol i.p.v. EPS, zonder elektrospouw, met minerale wol i.p.v. cellulose isolatie enz. De totale dikte van de constructie bedraagt (afhankelijk van de dikte van de aangebrachte pleister) 28,5 cm tot ongeveer 30 cm.



Figuur 36: Standaard opbouw van het houtskelet waarmee de simulaties zijn uitgevoerd

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gebruikte materialen met hun belangrijkste eigenschappen.

	ρ	Porositeit	c	λ	μ	Aangebrachte dikte	Sd	Capillair vochtgehalte
Materiaal	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]	[mm]	[m]	[kg/m ³]
Minerale pleister	1900	0,24	850	0,8	25	10	0,25	210
Kunstharsgebonden pleister	1100	0,12	850	0,7	1000	3	3	100
Pleister WUFI - buitenlagen	1310	0,36	850	0,87	8	4+1	0,04	192
Pleister WUFI - binnenlagen	1219	0,3	850	0,25	10,8	14+1	0,162	160
EPS	15	0,95	1500	0,04	30	6	0,18	44,79
MW	60	0,95	850	0,04	1,3	6 of 14	0,0078 of 0,0182	44,79
Cellulose	70	0,95	2500	0,04	1,5	14	0,021	500
OSB	615	0,9	1500	0,13	175	12	2,1	636
Gipskartonplaat	850	0,65	850	0,2	8,3	12,5	0,10375	400
Luchtlaag	1,3	0,999	1000	0,23	0,38	40	0,0152	/
Dampscherm	130	0,001	2300	2,3	5000	1	5	47,1

Tabel 1: Overzicht van de gesimuleerde materialen met hun belangrijkste eigenschappen

7.3. INVOER IN WUFI

Er worden een aantal basis aannames gedaan om de simulaties te kunnen uitvoeren.

- Er wordt standaard gesimuleerd over een periode van 3 jaar, tenzij uitdrukkelijk anders vermeld en ingegeven. Om sommige effecten te bekijken wordt er gesimuleerd over 10 of zelfs 25 jaar.
- Elke laag in WUFI wordt voorzien van een meetpunt zodat de relatieve vochtigheid, vochtgehalte en temperatuur in iedere laag op elk moment kunnen bepaald worden.
- Voor de materiaaleigenschappen worden de eigenschappen uit de materiaaldatabase gebruikt. Deze eigenschappen kunnen in realiteit lichtjes verschillen van de opgegeven eigenschappen, maar daar wordt in dit onderzoek abstractie van gemaakt (Zie Tabel 1).
- De simulaties gelden voor een gebouwhoogte tot 10 m; dit is dus voldoende om woningen met houtskeletbouw te omvatten
- Er wordt geen coating aangebracht, tenzij anders vermeld.
- De simulaties starten op 1 oktober 2016, tenzij anders vermeld.
- Het buitenklimaat van de simulaties is de weerfile van Brussel.
- Het binnenklimaat gaat uit van binnenklimaatklasse 3, tenzij anders vermeld.

7.4. PARAMETERS

Elke simulatie wordt berekend a.d.h.v. een aantal ingegeven parameters. Wat is echter de invloed van deze parameters en in welke mate bepalen zij het resultaat? In WUFI kan men een groot aantal parameters laten variëren. Er zijn een aantal belangrijke eigenschappen waarvan onderzocht kan worden welke invloed ze hebben op het hygrothermisch gedrag van een gevel.

In[13] stellen Barreira en Freitas een lijst op van de belangrijkste:

- Eigenschappen van de buitenste laag: vochtdiffusiviteit, waterdampweerstand, emissiviteit, absorptie van zonnestraling, dikte, warmtegeleidingcoëfficiënt λ ...
- Kenmerken van de gevel: oriëntatie, hoogte, totale thermische weerstand
- Buitenklimaat: temperatuur, relatieve vochtigheid, zonnestraling, atmosferische straling, windsnelheid, windrichting en regen
- Hygrothermische condities van het binnenklimaat: temperatuur en relatieve vochtigheid.

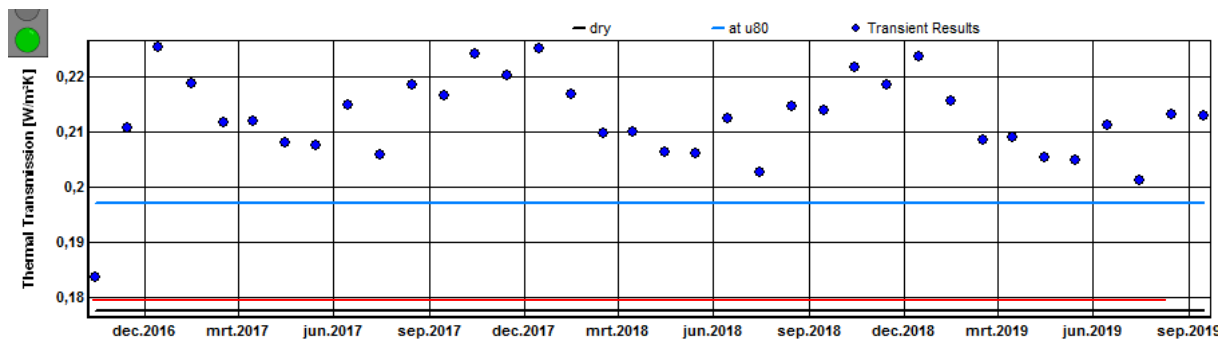
Sommige eigenschappen zijn gemakkelijk te onderzoeken, andere zijn eerder een combinatie van verschillende parameters. Men moet altijd in het achterhoofd houden dat de simulatie nooit de perfecte realiteit zal voorspellen, maar er wel een goede indicatie van geeft. Uit dit lijstje en uit het programma zijn er een aantal parameters gedestilleerd.

7.4.1. Evalueren van de impact op de warmteflux

De warmtedoorgangscoefficiënt U geeft het thermische gedrag van de muur aan. De definitie van deze coëfficiënt gaat als volgt: hoeveelheid warmte die in een stationaire toestand doorheen een bouwdeel gaat, gedeeld door de oppervlakte en het temperatuurverschil tussen de binnen- en de buitenomgeving aan weerszijden van het betrokken bouwdeel[25]. Het bepaalt welke warmteweerstand een gevelopbouw heeft en hoe de muur de temperatuursgradiënt tussen binnen en buiten kan opvangen. De U -waarde wordt grotendeels bepaald door de dikte van de isolatie en de soort isolatie.

Als eis voor de U -waarde geldt $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ voor een gevel. De totale U -waarde van een hiervoor geschetste gevelopbouw bedraagt ongeveer $U=0,179 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dit voldoet ruimschoots aan de eis.

Een U -waarde is een waarde voor warmtetransport in stationaire toestand, terwijl er in werkelijkheid natuurlijk fluctuaties optreden. Daarom wordt hier bekeken in welke mate het werkelijk warmtetransport van de vereenvoudigde berekening aan de hand van een U -waarde afwijkt. Dit wordt eens bekeken voor een standaardopbouw met EPS, cellulose-isolatie. Uit onderstaande grafiek en tabel is duidelijk dat de 'gecorrigeerde' U -waarden doorheen het jaar variëren. De waarde bij maand 0 is hierbij de U -waarde op de startdatum van de simulaties en sluit aan bij de stationaire toestand.



Figuur 37: Verloop van de U -waarde i.f.v. de tijd

Op bovenstaande grafiek wordt de U -waarde gegeven in functie van de tijd. Het is duidelijk dat de U -waarde van een volledig droog materiaal (rode lijn) veel lager ligt dan de U -waarde voor een materiaal bij een relatieve vochtigheid van 80% (blauwe lijn) en bij een typisch ingebouwd vochtgehalte (donkerblauwe punten).

Maand	U [W/m²K]	Maand	U [W/m²K]
0	0,184	18	0,206
1	0,211	19	0,206
2	0,225	20	0,213
3	0,219	21	0,203
4	0,212	22	0,2015
5	0,212	23	0,214
6	0,208	24	0,222
7	0,208	25	0,219
8	0,215	26	0,224
9	0,206	27	0,216
10	0,219	28	0,209
11	0,217	29	0,209
12	0,224	30	0,205
13	0,22	31	0,205
14	0,225	32	0,211
15	0,217	33	0,201
16	0,21	34	0,213
17	0,21	35	0,213

Tabel 2: Verloop van de U-waarde

Uit dit voorbeeld blijkt dat U-waarde gedurende de simulatieperiode ruimschoots blijft voldoen aan de eis van 0,24 W/m²K. Hoe komt het echter dat de U-waarde schommelt? De U-waarde is duidelijk afhankelijk van het vochtgehalte. De U-waarde voor een volledig droog materiaal ligt een stuk lager dan wanneer er rekening wordt gehouden met het vocht in de muur. Is dit echter enkel door het vochtgehalte?

De standaardformule om de U-waarde te berekenen is de volgende:

$$U = \left(\frac{1}{\alpha_e} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_i} \right)^{-1} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Met

- α_e Warmteovergangscoefficiënt buitenoppervlak [W/m²K]
- α_i Warmteovergangscoefficiënt binnenoppervlak [W/m²K]
- d_i Dikte van de laag [m]
- λ_i Warmtegeleidingscoëfficiënt [W/mK]

In WUFI is de λ -waarde van een materiaal afhankelijk van zowel het vochtgehalte als van de temperatuur. Bekijk men dit eens voor het materiaal EPS.

Vochtgehalte (kg/m ³)	λ (W/mK)
0	0,04
10	0,04
20	0,04
50	0,042
100	0,049
200	0,071
300	0,10
400	0,14
500	0,18
600	0,24
700	0,31
800	0,40
900	0,52
950	0,60

Temperatuur (°C)	λ (W/mK)
-20	0,034
80	0,054

Tabel 3: Warmtegeleidingcoëfficiënt i.f.v. vochtgehalte en temperatuur

Uit de bovenstaande tabellen van de materiaaleigenschappen van EPS blijkt duidelijk dat de warmtegeleidingscoëfficiënt wijzigt i.f.v. het vochtgehalte en de temperatuur. Tussen de verschillende waarden, interpoleert WUFI lineair. De temperatuur heeft hier slechts een kleine invloed op de λ -waarde als men dat vergelijkt met de invloed van het vochtgehalte. De vergelijking van de vochttopslagcurves voor de verschillende materialen komt verder nog aan bod.

Standaard wordt er met de λ -waarde voor 10°C en een droog materiaal gerekend. In het geval van EPS is dit 0,04. Voor de overgangsweerstanden worden de waarden $R_e = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ en $R_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ aangenomen.

De warmtegeleidingscoëfficiënt in functie van de temperatuur wordt berekend met behulp van volgende vergelijking:

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \cdot a \cdot (\theta - 10^\circ\text{C})$$

Met

- $\lambda(\theta)$ Warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal op tijdstip t [W/mK]
- λ_0 Warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal bij een temperatuur $\theta = 10^\circ\text{C}$ [W/mK]
- a Factor afhankelijk van de temperatuur [W/mK²]
- θ Temperatuur [°C]

De berekening van de U-waarde volgens de standaardformule geeft dezelfde waarde als de waarde die uit WUFI volgt (0,179W/m²K).



Figuur 38: Berekening van U-waarde volgens WUFI

WUFI berekent de U-waarde op dezelfde manier. De waarde die op deze manier bekomen wordt is de waarde voor een droog materiaal.

NAAM	DIKTE (m)	λ (W/mK)
Mineral plaster	0,01	0,8
EPS	0,06	0,04
OSB	0,0125	0,13
Cellulose fiber	0,14	0,04
OSB	0,0125	0,13
Air layer	0,04	0,23
Gypsum board	0,0125	0,2
Totale dikte	0,2875	
	Re	0,04
	Ri	0,13
	R	5,57757
	U (W/m ² K)	0,17929

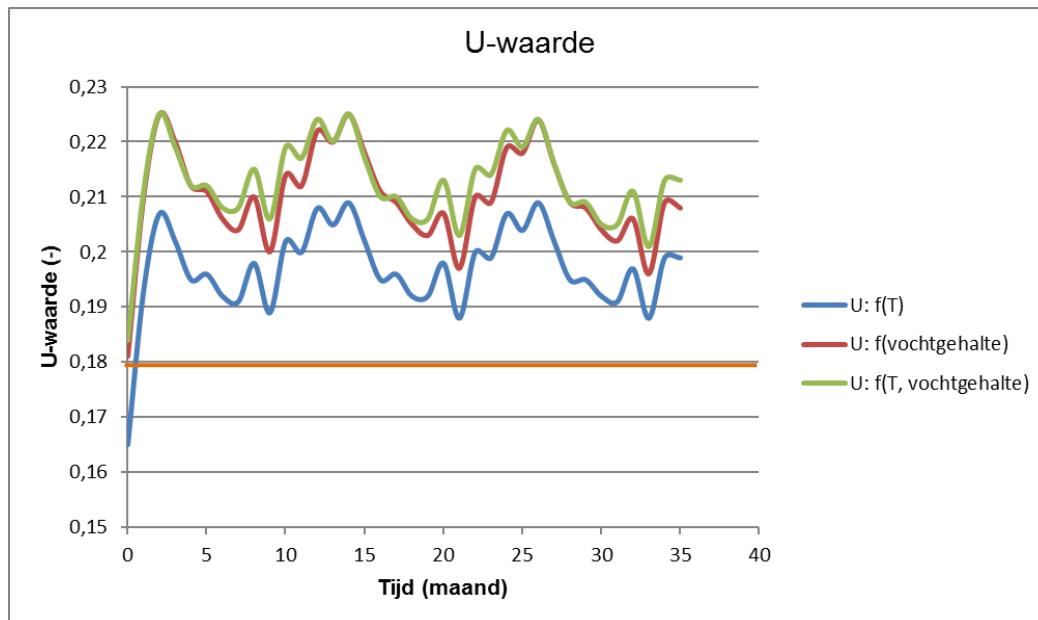
Tabel 4: Berekening U-waarde

Wat is echter de meest bepalende factor voor de U-waarde? Het vochtgehalte of de temperatuur? Dit kan onderzocht worden door de U-waarde eens enkel temperatuursafhankelijk te berekenen en eens enkel afhankelijk van het vochtgehalte. Wanneer de U-waarde onafhankelijk van de temperatuur wordt berekend, wordt er uitgegaan van een standaardwaarde van 10°C. Bij een vochtongafhankelijke constructie wordt er een droog materiaal verondersteld. Een volledig droog materiaal is echter een illusie. Er zal altijd iets van vocht aanwezig zijn.

Maand	U [W/m ² K] Totaal	U [W/m ² K] Temp. Afh.	U [W/m ² K] Vocht afh.	Maand	U [W/m ² K] Totaal	U [W/m ² K] Temp. Afh.	U [W/m ² K] Vocht afh.
0	0,184	0,165	0,181	18	0,206	0,192	0,205
1	0,211	0,193	0,21	19	0,206	0,192	0,203
2	0,225	0,207	0,225	20	0,213	0,198	0,207
3	0,219	0,202	0,22	21	0,203	0,188	0,197
4	0,212	0,195	0,212	22	0,215	0,2	0,21
5	0,212	0,196	0,211	23	0,214	0,199	0,209
6	0,208	0,192	0,206	24	0,222	0,207	0,219
7	0,208	0,191	0,204	25	0,219	0,204	0,218
8	0,215	0,198	0,21	26	0,224	0,209	0,224
9	0,206	0,189	0,2	27	0,216	0,202	0,216
10	0,219	0,202	0,214	28	0,209	0,195	0,209
11	0,217	0,2	0,212	29	0,209	0,195	0,208
12	0,224	0,208	0,222	30	0,205	0,192	0,204
13	0,22	0,205	0,22	31	0,205	0,191	0,202
14	0,225	0,209	0,225	32	0,211	0,197	0,206
15	0,217	0,202	0,218	33	0,201	0,188	0,196
16	0,21	0,195	0,211	34	0,213	0,199	0,209
17	0,21	0,196	0,209	35	0,213	0,199	0,208

Tabel 5: U-waarde afhankelijk van vochtgehalte en temperatuur

De drie startwaarden verschillen van de berekende waarde doordat er andere λ -waardes gebruikt worden. Bij de berekening wordt er uitgegaan van een volledig droog materiaal. Voor de simulaties wordt er gestart bij de vochtgehaltes van de materialen voor 80% relatieve vochtigheid. Voor de totale U-waarde wordt de waarde voor een droog materiaal en een temperatuur van 10°C gebruikt. Voor de temperatuurafhankelijke U-waarde wordt uitgegaan van een droog materiaal, maar is de λ -waarde wel afhankelijk van de temperatuur. Voor de vochtafhankelijke U-waarde wordt er gerekend met een constante temperatuur, maar variërend vochtgehalte. Dit leidt tot het volgende verloop.



Figuur 39: U-waarde i.f.v. vochtgehalte en temperatuur

Uit dit verloop van de U-waarde blijkt duidelijk dat het vochtgehalte het meest bepalend is voor de U-waarde. Wanneer de temperatuursafhankelijkheid immers wordt uitgezet, blijft de U-waarde bijna gelijk aan de initiële bekomen waarde. Wanneer echter de vochtafhankelijkheid wordt uitgezet, daalt de U-waarde merkbaar.

De U-waarde kent een schommelend verloop, met de hoogste waarden in de winter. Dit is vergelijkbaar met het verloop van het vochtgehalte. Ook hier vinden de pieken in de winter plaats (zie verder). Hoe meer vocht er wordt opgenomen in de muur, hoe meer de warmtegeleidingscoëfficiënt λ gaat stijgen, hoe nefaster dit is voor de muur. Een stijgende temperatuur zorgt voor een snellere uitdroging.

7.4.2. Lange golfstraling

7.4.2.1. Algemeen

De temperatuur op het buitenoppervlak van een constructie wordt in grote mate beïnvloed door warmtefluxen. Er bestaat de warmteflux door conductie in de gevel, convectie met de buitenlucht, maar minstens even belangrijk is het effect van straling.

In verschillende hygrothermische modellen wordt enkel de kortegolfstraling meegerekend. Het is echter voorbarig om de langegolfstraling te negeren of te vereenvoudigen. Hierdoor worden de oppervlaktetemperaturen niet realistisch gesimuleerd en kan men geen juiste en/of volledige conclusies trekken.

De langegolfstraling leidt tot het fenomeen van 'nachtelijke onderkoeling' waarbij de oppervlaktetemperatuur van de gevel 's nachts daalt tot onder de dauwpuntstemperatuur van de buitenlucht, waardoor er zich condens vormt op het oppervlak. Dit kan belangrijk zijn om het risico op inwendige condensatie beter te bestuderen.

7.4.2.2. Simulaties

Het Fraunhofer IBP Instituut heeft een gedetailleerd stralingsmodel[26] ontwikkeld dat moet toelaten dat de temperatuur van het buitenoppervlak zo correct mogelijk berekend wordt. Dit model is verwerkt in het simulatieprogramma WUFI.

Volgende vergelijking geeft alle belangrijke stralingstermen aan:

$$I = a \cdot I_s + \varepsilon \cdot I_l - I_e$$

Met:

I	Netto straling op het oppervlak [W/m ²]
a	Kortegolf-absorptiecoëfficiënt van het oppervlak [-]
I _s	Kortegolf-zonnestraling invallend op het oppervlak [W/m ²]
ε	Langegolf emissiecoëfficiënt (=absorptiecoëfficiënt) van het oppervlak [-]
I _l	Langegolfstraling invallend op het oppervlak [W/m ²]
I _e	Langegolfstraling uitgezonden door het oppervlak [W/m ²]

Een positieve waarde van I leidt tot de opwarming van het oppervlak en een negatieve waarde leidt tot afkoeling van het oppervlak. De kortegolfstraling (de zonnestraling) en de langegolfstraling kunnen op hun beurt nog eens onderverdeeld worden:

$$I_s = I_{s,dir} + g_{atm} \cdot I_{s,diff} + g_{terr} \cdot I_{s,refl}$$

Met:

I _{s,dir}	Directe zonnestraling [W/m ²]
g _{atm}	Atmosferische fractie [-]
I _{s,diff}	Diffuse zonnestraling [W/m ²]
g _{terr}	Aardse fractie [-]
I _{s,refl}	Zonnestraling gereflecteerd door de grond [W/m ²]

$$I_l = g_{atm} \cdot I_{l,atm} + g_{terr} \cdot (I_{l,terr} + I_{l,refl})$$

Met:

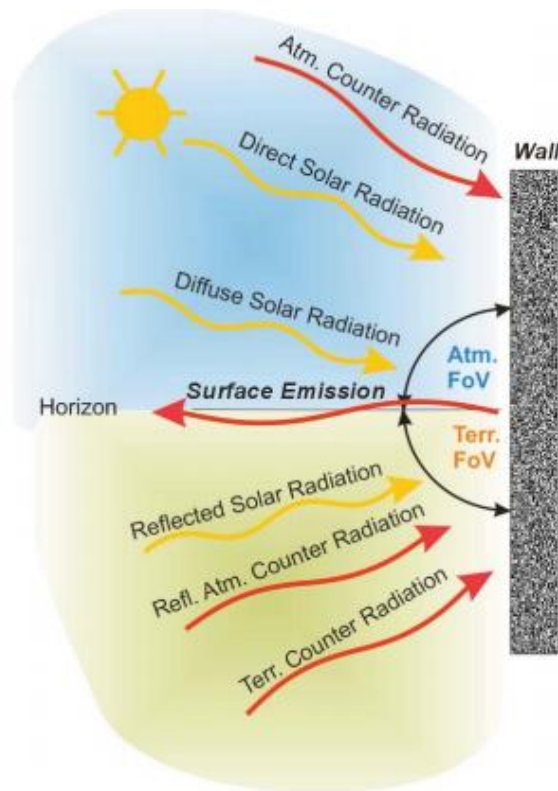
I _{l,atm}	Atmosferische langegolfstraling [W/m ²]
I _{l,terr}	Aardse langegolfstraling [W/m ²]
I _{l,refl}	Atmosferische langegolfstraling gereflecteerd door de grond [W/m ²]

G_{atm} en g_{terr} worden als volgt berekend:

$$g_{atm} = \cos^2 \frac{\beta}{2}$$

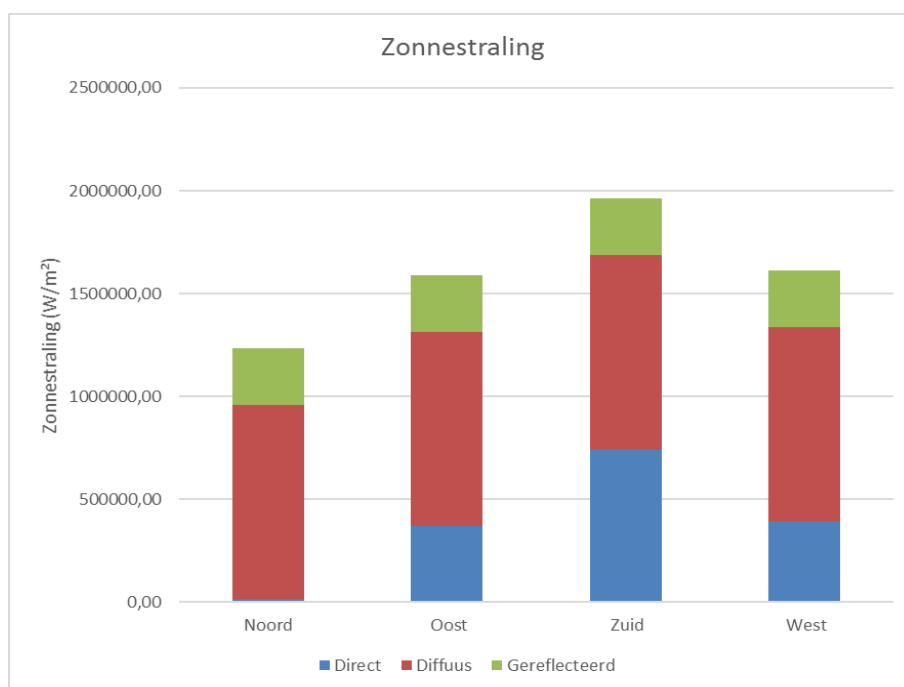
Met β de hoek van het oppervlak (90° voor een verticale wand)

$$g_{terr} = 1 - g_{atm}$$



Figuur 40: Stralingsbalans

Uit de analyse van de klimaatdata van Brussel blijkt dat de aandelen van de verschillende stralingscomponenten van de zonnestraling verschillen per oriëntatie. Zoals verwacht is het aandeel van directe zonnestraling op een noordelijke gevel heel gering, terwijl deze op een zuidelijke gevel net heel groot is. De totale gecumuleerde zonnestraling wordt als volgt verdeeld over de verschillende oriëntaties bij de gevel.



Figuur 41: Aandeel van de verschillende soorten straling bij zonnestraling voor de oriëntaties

Het absolute aandeel van de diffuse en gereflecteerde zonnestraling is voor elke oriëntatie gelijk. Het verschil zit hem in de directe straling. Het aandeel hiervan is bij een Noordelijke oriëntatie heel gering, terwijl dit bij de Zuidelijke oriëntatie ruim één derde is.

Er zal een netto verlies van de thermische straling richting de lucht optreden, terwijl de stralingsbalans met de andere aardse voorwerpen ongeveer in evenwicht is. Dit heeft tot resultaat dat de stralingsbalansmeestal negatief is en dit vooral 's nachts, waar de zonnestraling geen bijdrage meer levert. Dit leidt tot de nachtelijke onderkoeling die condensvorming tot gevolg heeft.

Het condensatiepotentieel van een oppervlak ten gevolge van onderkoeling wordt door Barreira als volgt gedefinieerd:

$$CP = P_v(air) - P_{sat}(surface)$$

Met

CP	Condensatiepotentieel [Pa]
$P_v(air)$	Partiële dampdruk van de lucht [Pa]
$P_{sat}(surface)$	Verzadigingsdampdruk van het oppervlak [Pa]

Als de partiële dampdruk van de lucht groter is dan de verzadigingsdampdruk van het oppervlak, zal er condensatie optreden. Het vocht van het natte oppervlak gaat weer verdampen wanneer de verzadigingsdampdruk van het oppervlak hoger is dan de partiële dampdruk van de lucht. Wanneer dit uitdrogen niet snel genoeg plaatsvindt en het oppervlak gedurende langere periode nat blijft, groeit het risico op schimmelgroei.

Het onderkoelingsverschijnsel heeft volgens Barreira[13] de meest ernstige gevolgen voor bouwdelen met een aanzienlijke thermische isolatie, die de warmtegeleiding doorheen de muur tegenhoudt of toch sterk vermindert, en op elementen waarvan de buitenste dunne laag een kleine thermische inertie heeft, zoals het geval is bij ETIC-systemen. De dunne lagen zullen veel temperatuurswisselingen kennen en dus sneller afkoelen en opwarmen. Bij een muur met een dikke laag isolatie, zal er 's nachts minder warmtetransport zijn van binnen naar buiten. Het buitenoppervlak zal dus kouder zijn dan bij een muuropbouw met geringe isolatie. Hieruit concludeert ze dus dat een gevelopbouw met een ETIC-systeem gevoelig is aan dit onderkoelingsverschijnsel en er dus aandachtig moet naar gekeken worden.

De exterieure overgangscoefficiënt α wordt in WUFI als volgt berekend:

- Voor een constructie die niet gericht is naar de hoofdwindrichting:

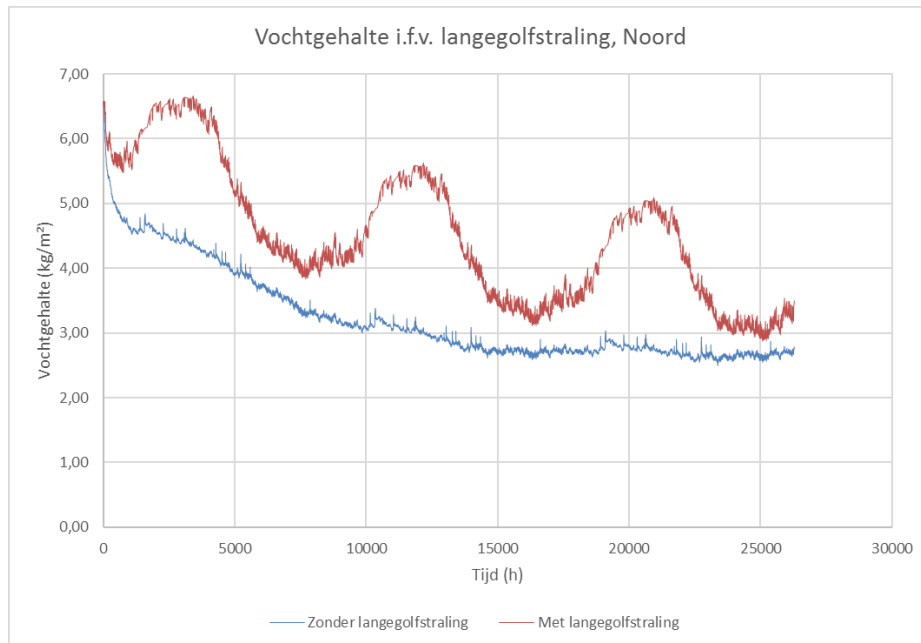
$$\alpha = 0,33 \cdot v_{wind} + 4,5 + 6,5 \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

- Voor een constructie gericht naar de hoofdwindrichting:

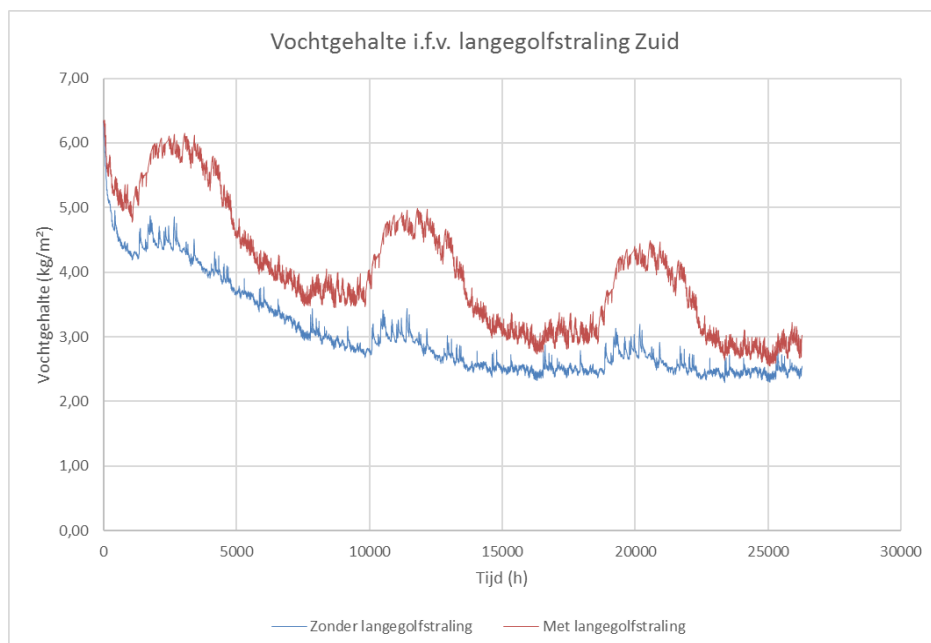
$$\alpha = 1,6 \cdot v_{wind} + 4,5 + 6,5 \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

4,5 W/m²K is de convectieve overgangscoefficiënt en 6,5 W/m²K de overgangscoefficiënt voor straling. Om de langegolfstraling mee te rekenen reduceert men de overgangscoefficiënt door de overgangscoefficiënt van de straling weggelaten. De overgangscoefficiënt aan de binnenkant wordt niet gewijzigd.

Om de invloed van langegolfstraling na te gaan, worden er verschillende simulaties uitgevoerd voor de gevelopbouw die hierboven beschreven werd (zie Figuur 36). De simulaties lopen over drie jaar en starten op 1 oktober 2016. De pieken op onderstaande grafieken vinden dus plaats in de winter. De grafieken geven het totale vochtgehalte in de muur aan in kg/m² i.f.v. de tijd.

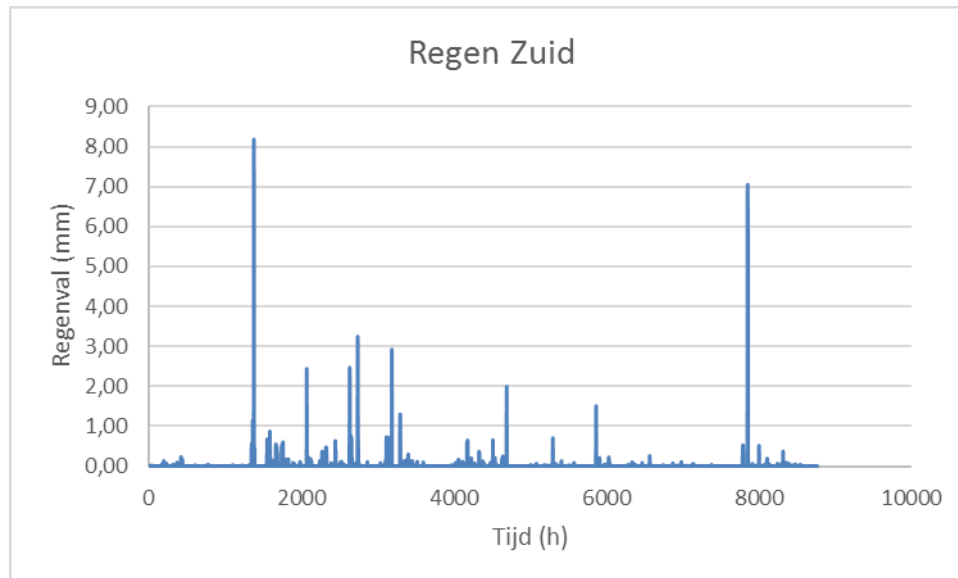


Figuur 42: Vochtverloop van een noordelijke gevelopbouw onder invloed van de langegolfstraling



Figuur 43: Vochtverloop van een zuidelijke gevelopbouw onder invloed van de langegolfstraling

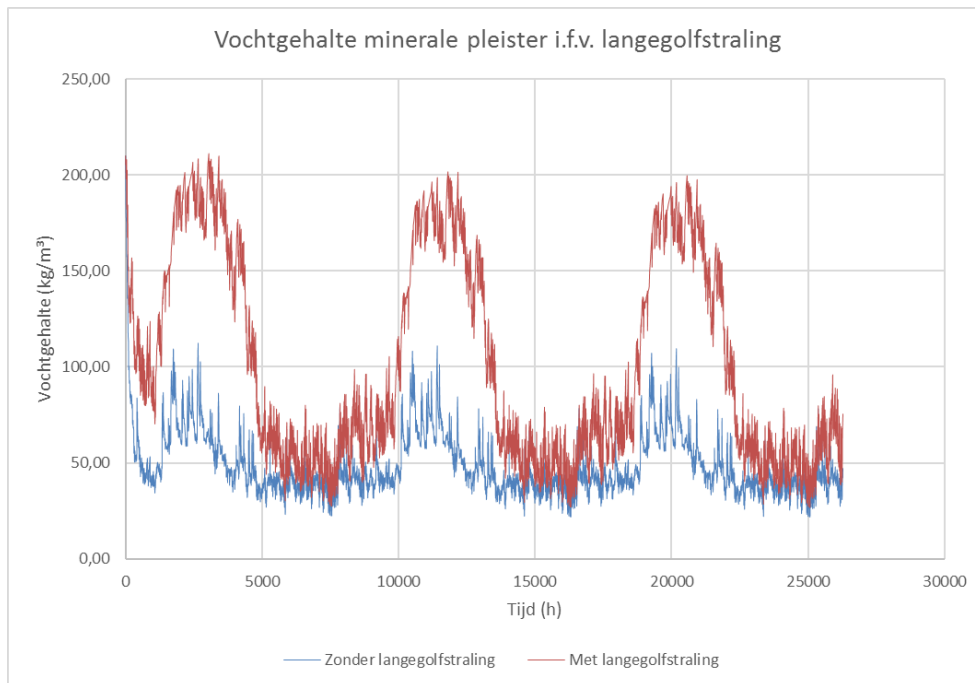
Uit de grafieken blijkt duidelijk dat de langegolfstraling wel degelijk wordt meegerekend in WUFI als men het totale vochtgehalte in de muur bekijkt. De grafiek vlakt uit wanneer de langegolfstraling wordt uitgezet. Wel valt op dat de langegolfstraling veel meer invloed lijkt te hebben in de wintermaanden dan in de zomermaanden. In de zomermaanden zijn beide grafieken redelijk gelijklopend. De kleine pieken zijn te wijten aan regendagen.



Figuur 44: Regen in het Zuiden

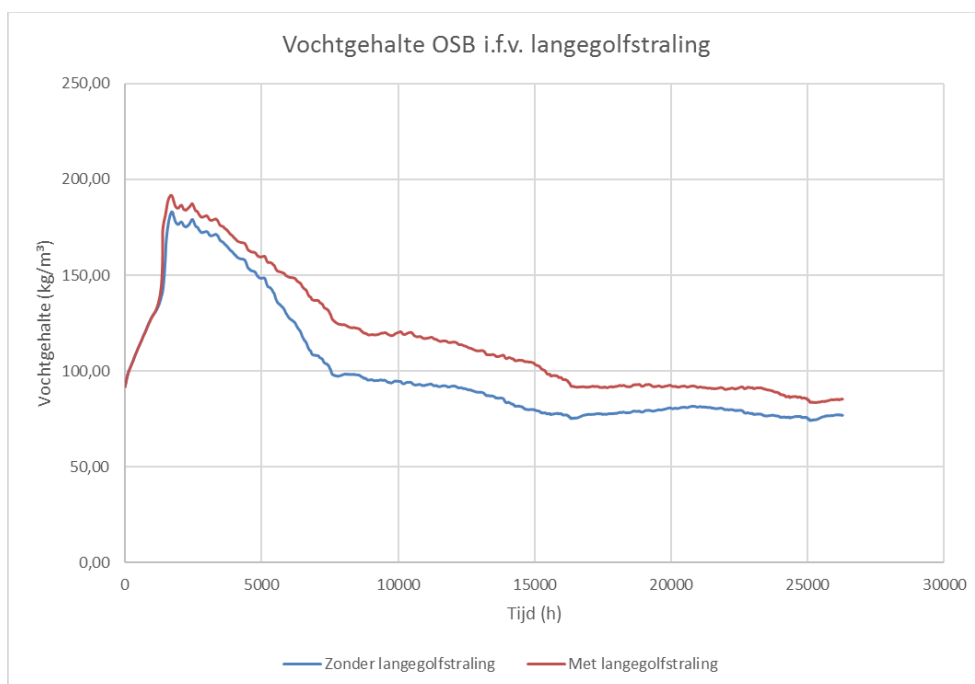
Uit de regengrafiek (Figuur 44) valt duidelijk af te leiden dat er in de winter de grootste pieken van regenval worden genoteerd. De pieken lopen gelijk aan de pieken in de grafieken van de langegolfstraling. De golven van de winter zijn duidelijk leesbaar. Ook wanneer de langegolfstraling wordt uitgezet, zijn er nog lichte stijgingen merkbaar in de wintermaanden. Doordat er meer slagregen valt in de winter, wordt er ook iets meer vocht opgenomen in de muur.

Waar heeft de langegolfstraling echter het meeste effect? Waar in de muur verschilt het vochtgehalte het meest? Wanneer het vochtgehalte in de verschillende lagen wordt bestudeerd is duidelijk dat de grootste gradiënten zich in de buitenste lagen bevinden. Aan de binnenkant van de muur heeft de langegolfstraling geen invloed meer.

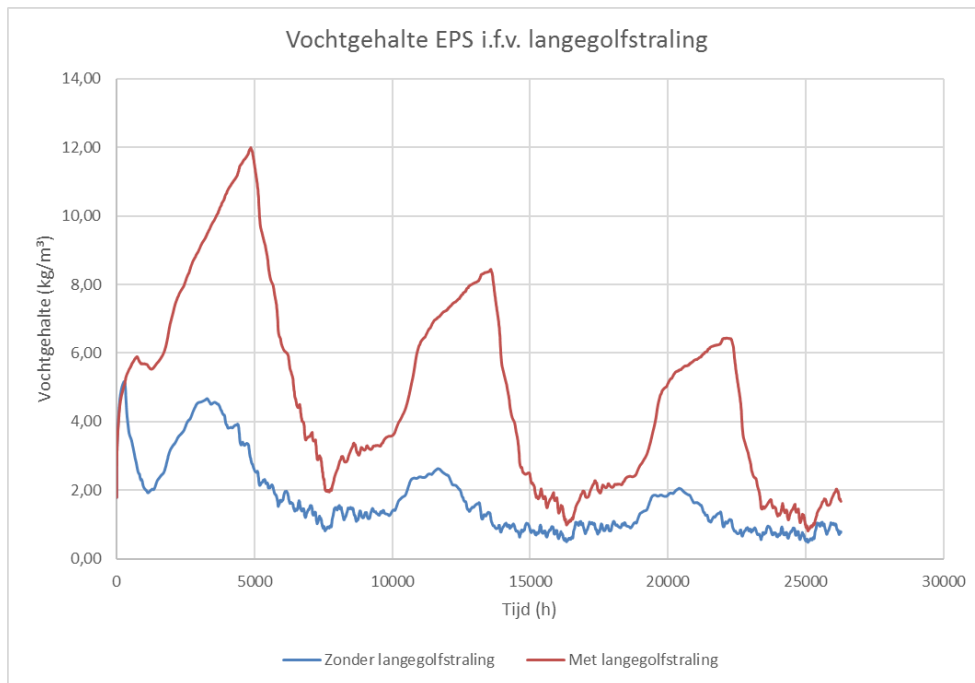


Figuur 45: Vochtgehalte van de pleisterlaag bij een zuidelijke gevelopbouw o.i.v. langegolfstraling

De materialen die het meest beïnvloed worden door de langegolfstraling zijn de pleisterlaag (minerale pleister, 10 mm) en de OSB-plaat. Bij de pleisterlaag gaat het over een verschil in vochtgehalte op de piekmomenten van meer dan 100 kg/m³, dus voor een pleisterdikte van 10mm is dit 1 kg verschil in vochtgehalte tussen met en zonder langegolfstraling. OSB en pleister hebben een veel hogere vocht opnamecapaciteit dan de isolatiematerialen.



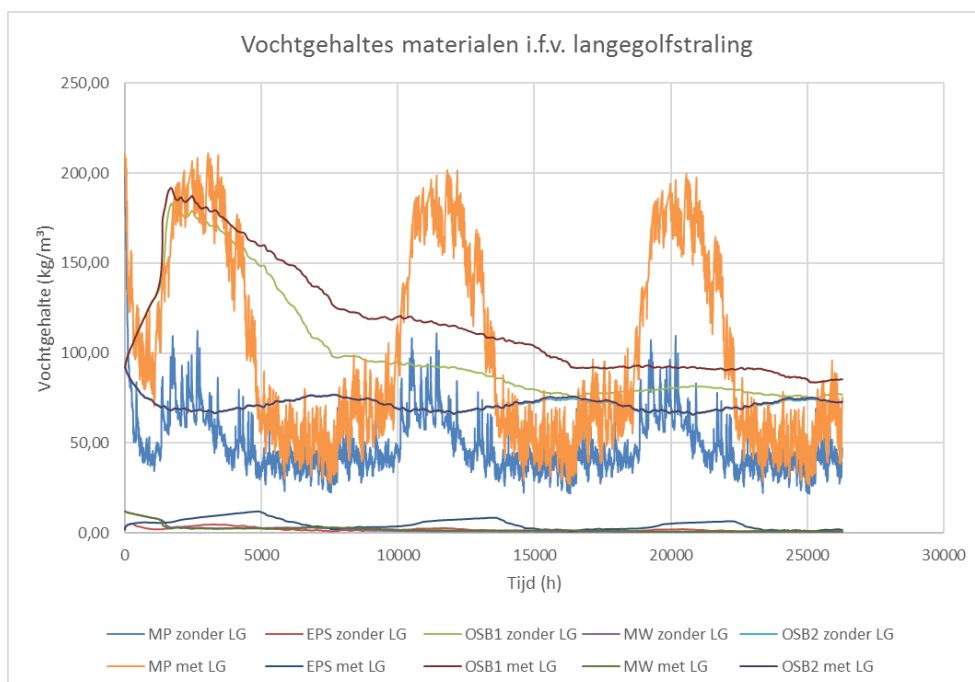
Figuur 46: Vochtgehalte van de buitenste OSB-plaat bij een zuidelijke gevelopbouw o.i.v. langegolfstraling



Figuur 47: Vochtgehalte van de EPS-isolatie bij een zuidelijke gevelopbouw o.i.v. langegolfstraling

EPS ondervindt slechts een klein absoluut verschil (enkele kg/m²). EPS neemt dan ook slechts weinig vocht op. EPS is een dampdicht materiaal. Relatief gezien wordt EPS wel nog erg beïnvloed door de langegolfstraling.

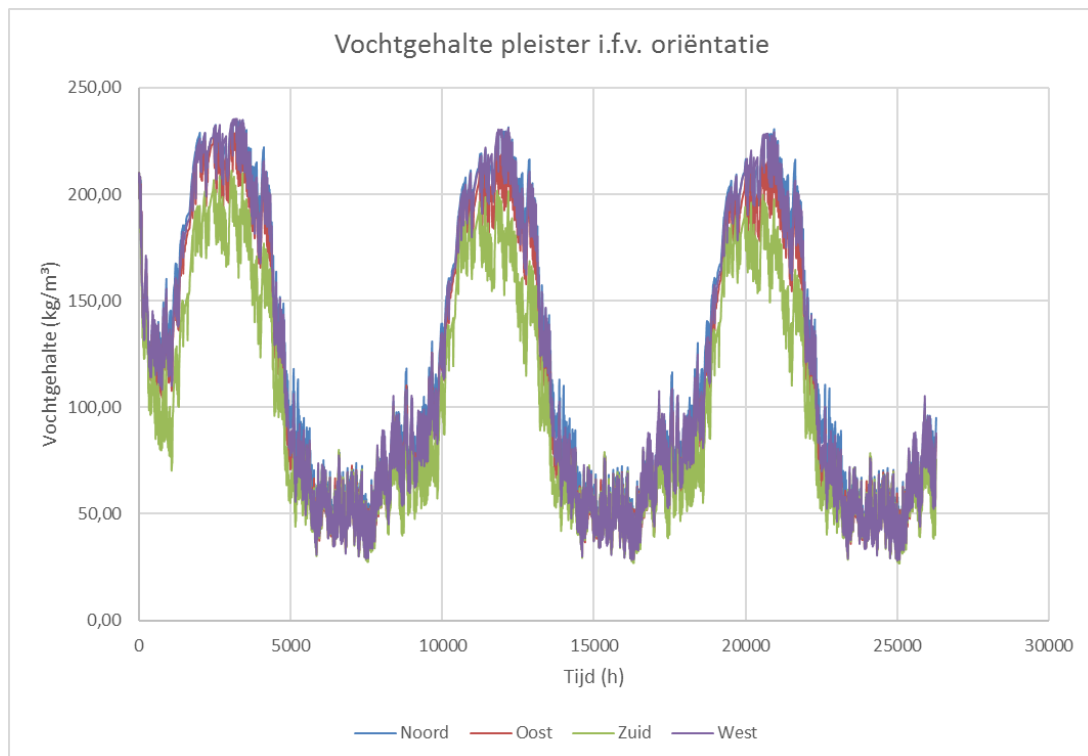
Aan de binnenzijde van de constructie heeft de langegolfstraling zo goed als geen invloed meer op het vochtgehalte. Wanneer we alle materialen samenbrengen op één grafiek, wordt duidelijk welke materialen de grootste invloed hebben op het totale vochtgehalte van de structuur.



Figuur 48: vochtgehalte in de verschillende lagen met en zonder langegolfstraling

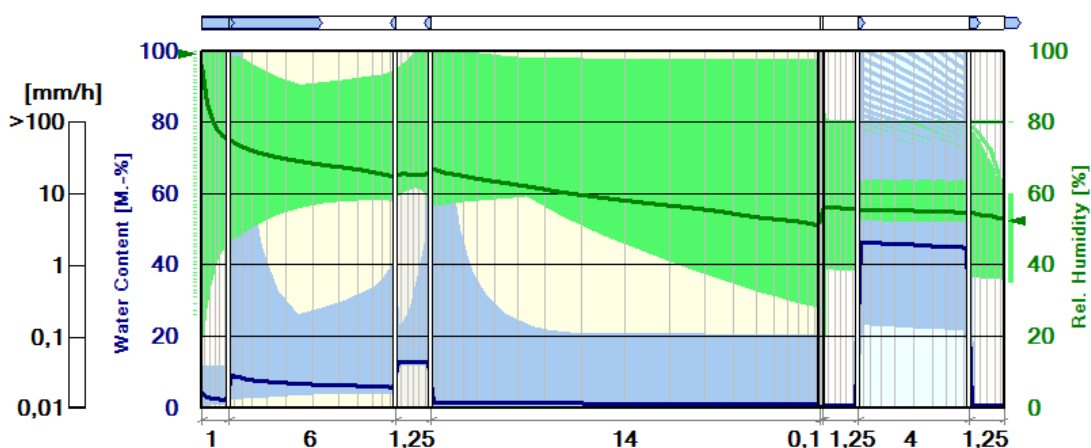
Minerale pleister en de OSB-plaat nemen duidelijk meer vocht op dan de andere materialen. Het zijn echter twee dunne lagen waardoor het totale vochtgehalte per m² over de hele muur toch nog relatief laag ligt. In de dikke lagen isolatie EPS en MW wordt nauwelijks vocht opgeslagen.

Wanneer de pleisterlaag nu eens in de verschillende oriëntaties wordt beschouwd, wordt duidelijk dat het vochtgehalte het minste schommelt en lager is bij een zuidelijke oriëntatie, zoals verwacht. De andere oriëntaties lopen redelijk gelijkaardig.

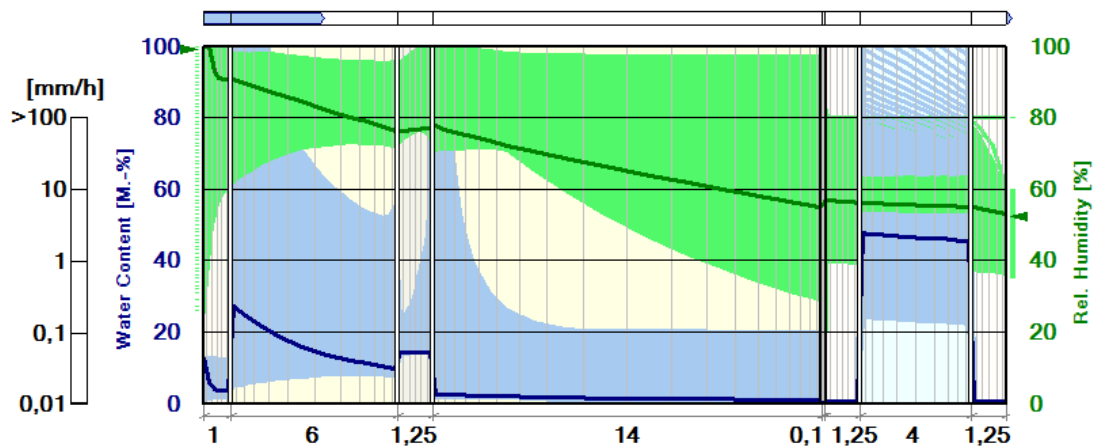


Figuur 49: Vochtgehalte van de pleisterlaag o.i.v. langegolfstraling voor de verschillende oriëntaties.

De langegolfstraling heeft dus de grootste invloed op de buitenste lagen. De lagen die het grootste absolute verschil in vochtgehalte ondergaan zijn de materialen die ook het grootste vochttopslagpotentieel hebben.



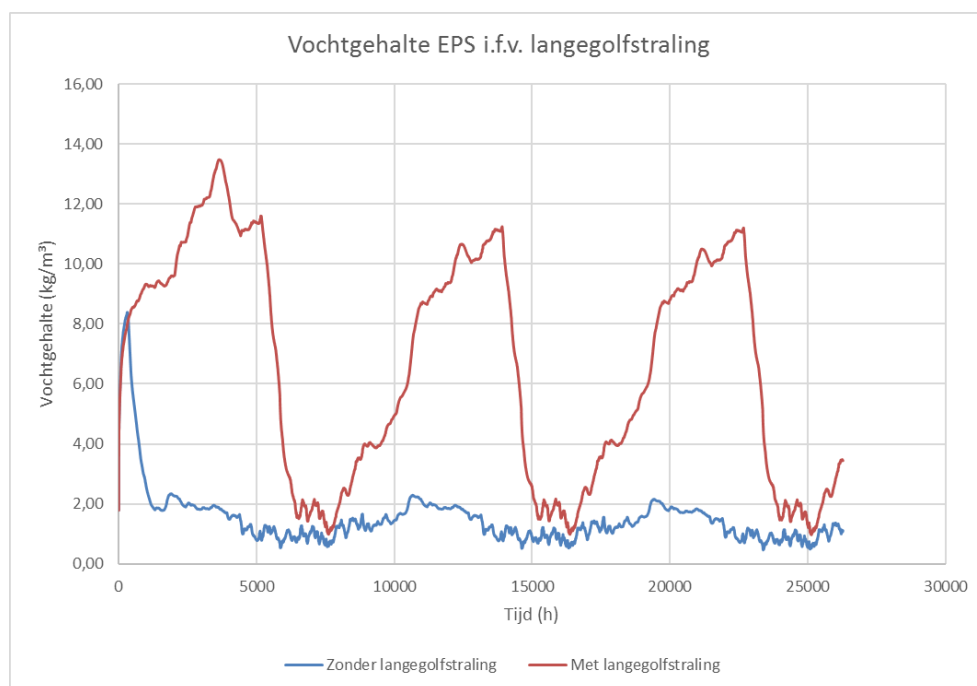
Figuur 50: Uitdrogingsprofiel zonder langegolfstraling



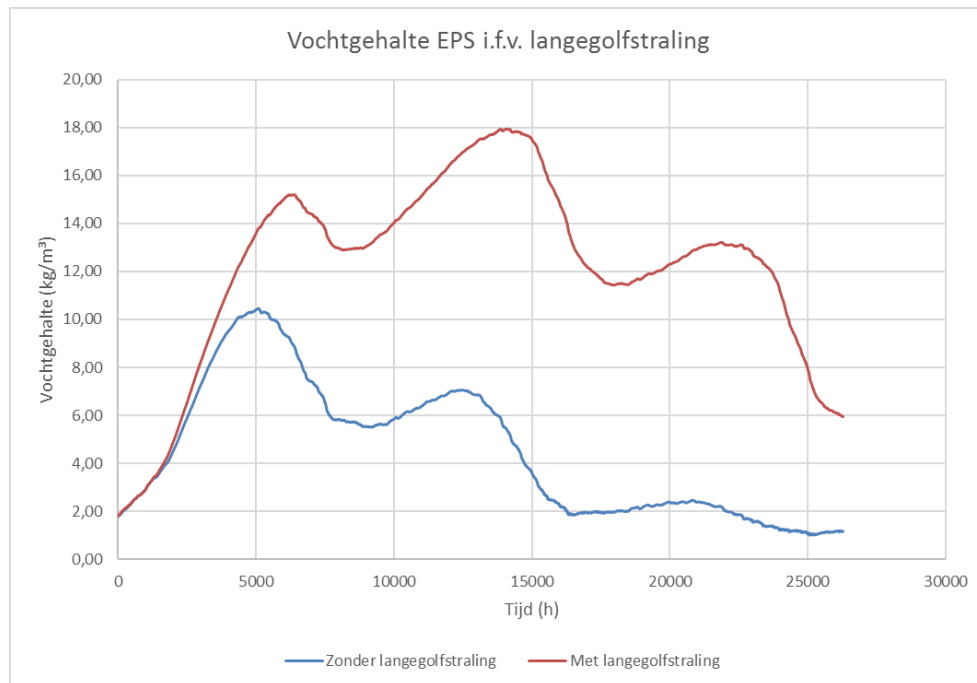
Figuur 51: Uitdrogingsprofiel met langegolfstraling

Ook in de uitdrogingsprofielen is een gelijkaardige trend te zien. In de buitenste materialen is duidelijker een hoger vochtgehalte merkbaar in het geval met de langegolfstraling (Figuur 51) dan in het geval zonder langegolfstraling (Figuur 50). (De linkerkzijde is de buitenzijde, de rechterzijde de binnenzijde).

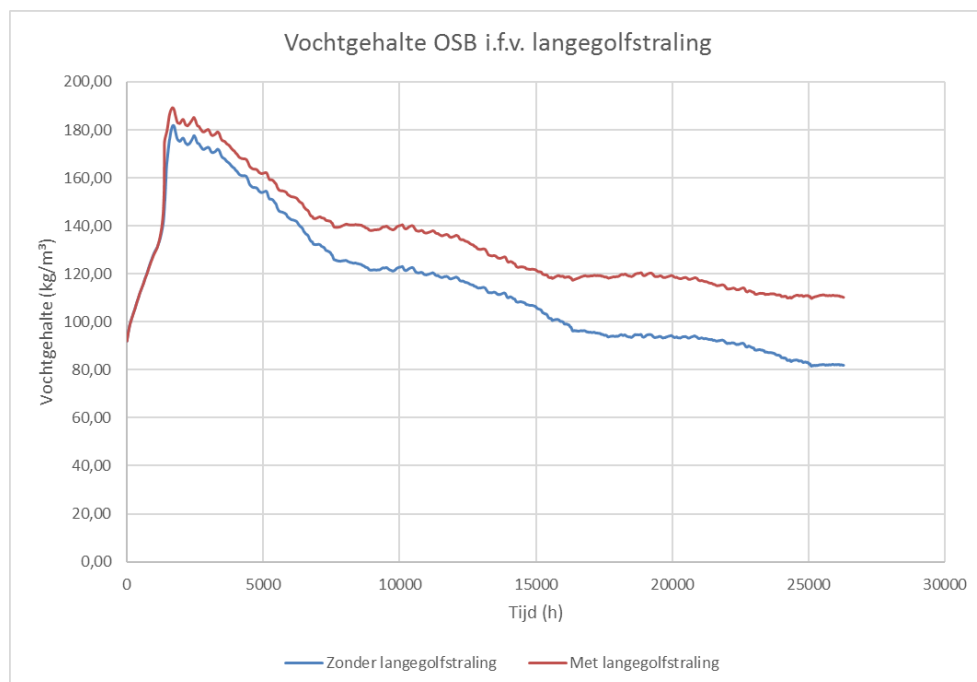
Wanneer er in de EPS-laag een dampdichte laag wordt aangebracht, kan men dezelfde trends waarnemen. Deze dampdichte laag verhindert het vochttransport van de buitenzijde naar binnen. De lagen bezitten ook hier een hoger vochtgehalte wanneer er rekening wordt gehouden met de langegolfstraling (Figuren 52 t.e.m.54).



Figuur 52: Vochtgehalte EPS (buitenste laag) i.f.v. langegolfstraling



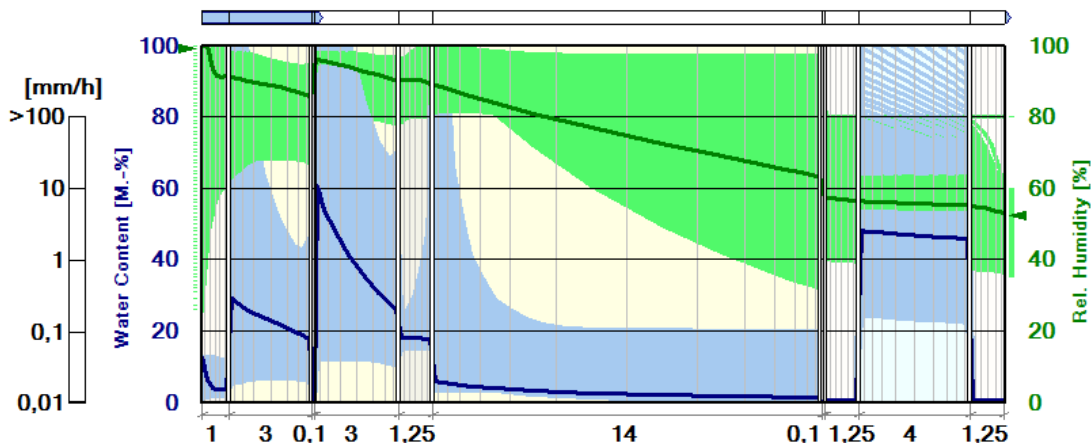
Figuur 53: Vochtgehalte EPS (binnenste laag) i.f.v. langegolfstraling



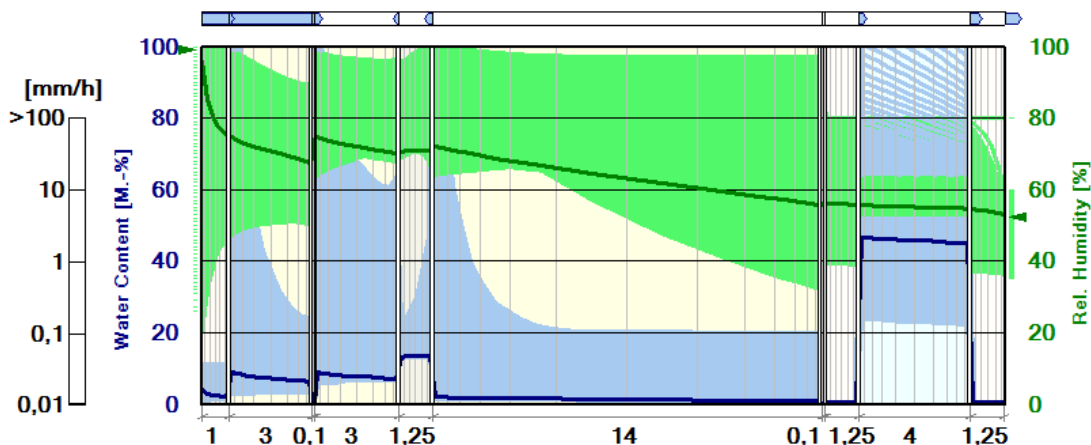
Figuur 54: Vochtgehalte OSB i.f.v. langegolfstraling

Op het uitdrogingsprofiel is ook duidelijk te zien dat de relatieve vochtigheid doorheen de constructie hoger ligt bij het geval waar er wel rekening wordt gehouden met langegolfstraling (Figuur 55). Dus zelfs met een dampscherm, lijkt de langegolfstraling nog invloed uit te oefenen op de lagen erachter. Het wordt echter onwaarschijnlijk dat het hogere vochtgehalte in de dieper gelegen lagen te wijten is aan de uitdroging van de buitenste

pleisterlaag naar binnen. De langegolfstraling heeft een invloed op het warmtetransport doorheen de muur. De overgangscoefficiënt is groter wanneer er rekening wordt gehouden met de langegolfstraling. De muur kan minder snel uildrogen. De relatieve vochtigheid blijft gedurende de uildroging hoger.



Figuur 55: Uildrogingsprofiel voor een constructie met langegolfstraling na simulatie van 3 jaar



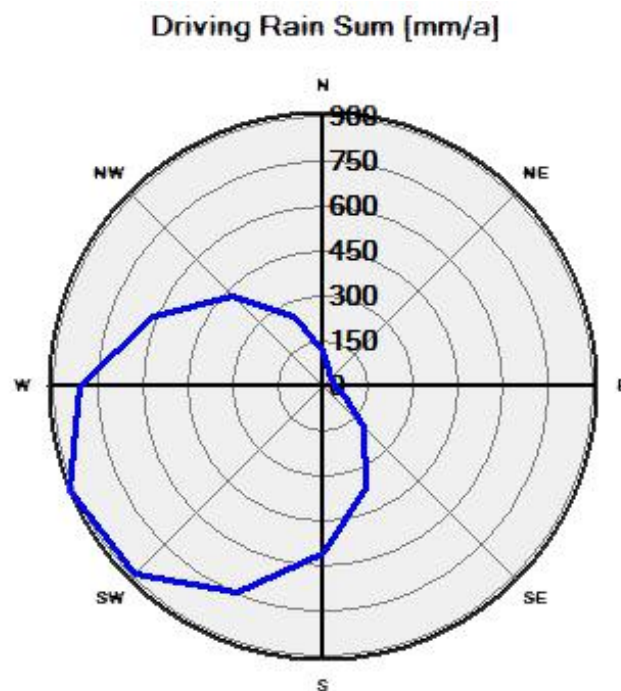
Figuur 56: Uildrogingsprofiel voor een constructie zonder langegolfstraling na simulatie van 3 jaar

Dit zijn de resultaten van het onderzoek bij een minerale pleisterafwerking. Deze pleisterafwerking heeft echter een grote dampdoorlaatbaarheid in vergelijking met de kunstharsgebonden sierpleisters. Is het effect nog altijd even voelbaar bij een veel dampdichtere afwerkingslaag? De simulaties worden ook eens uitgevoerd met een kunstharsgebonden pleister als afwerking. Hier kunnen dezelfde conclusies getrokken worden als in de opbouw met minerale pleister. Het vochtgehalte vertoont een gelijkaardig patroon gedurende de duur van de simulaties.

7.4.3. Invloed van oriëntatie op uitdroging

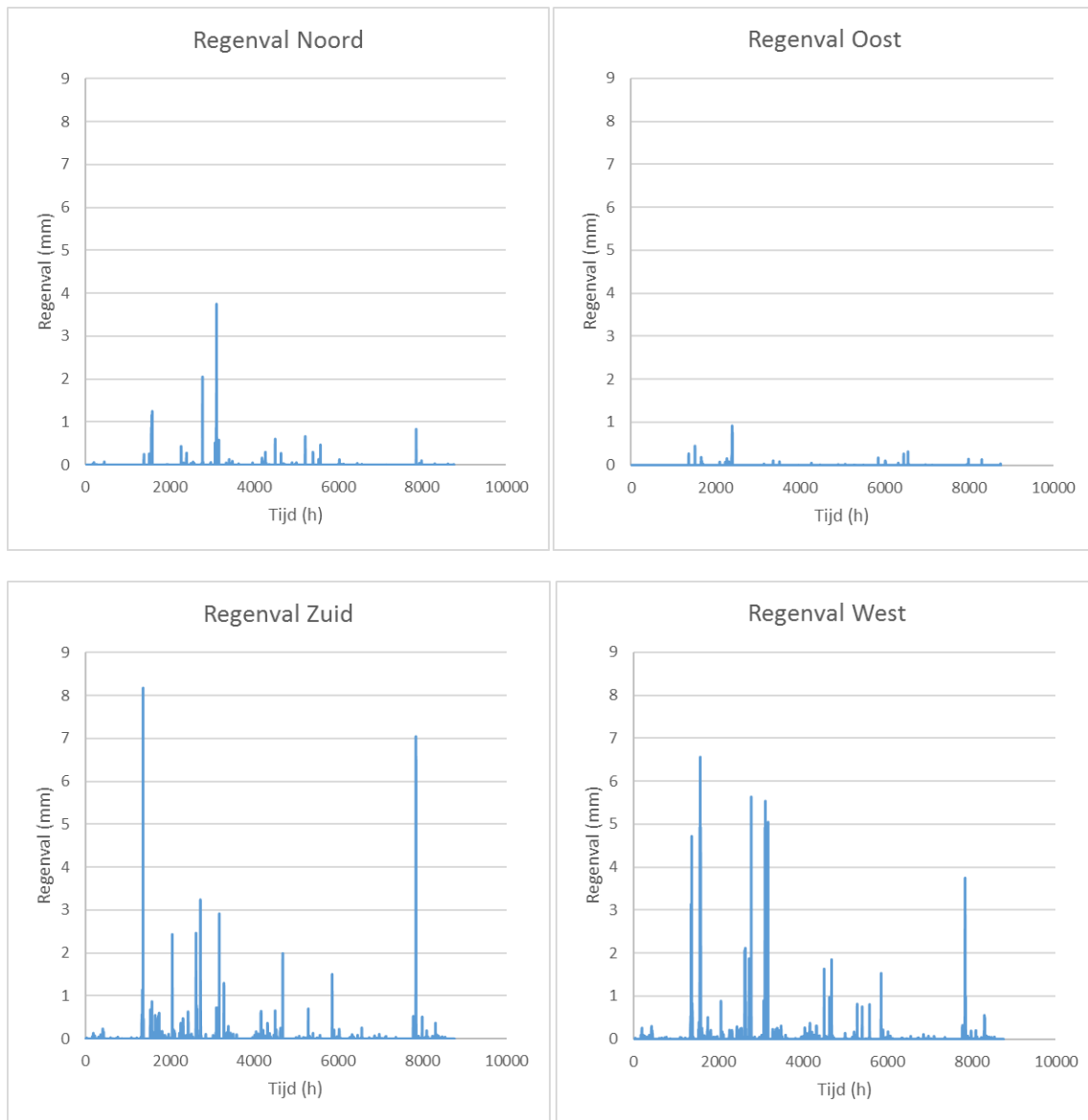
Er valt een verschil te verwachten voor de verschillende oriëntaties, wat ook al bleek uit de resultaten van de simulaties rond langegolfstraling. Er heersen verschillende klimaatcondities op de verschillende gevels in functie van de oriëntatie. De zonnestraling werd hierboven al beschreven en daaruit blijkt duidelijk, zoals verwacht, dat een zuidelijke gevel meer zonnestraling opvangt dan de andere windrichtingen.

Voor de slagregen kan een gelijkaardige analyse worden uitgevoerd. Vooral de zuidgevel en de westgevel zijn onder de invloed van de slagregen (Zie Figuur 57). Dit is omdat er in ons Belgisch klimaat voornamelijk zuidwesten en westenwinden voorkomen. Dat hangt dan samen met Atlantische depressies en bijbehorende neerslagzones die van west naar oost over ons land schuiven. Ze hebben gemiddeld ook een hogere snelheid dan noordelijke en oostelijke winden. [27]



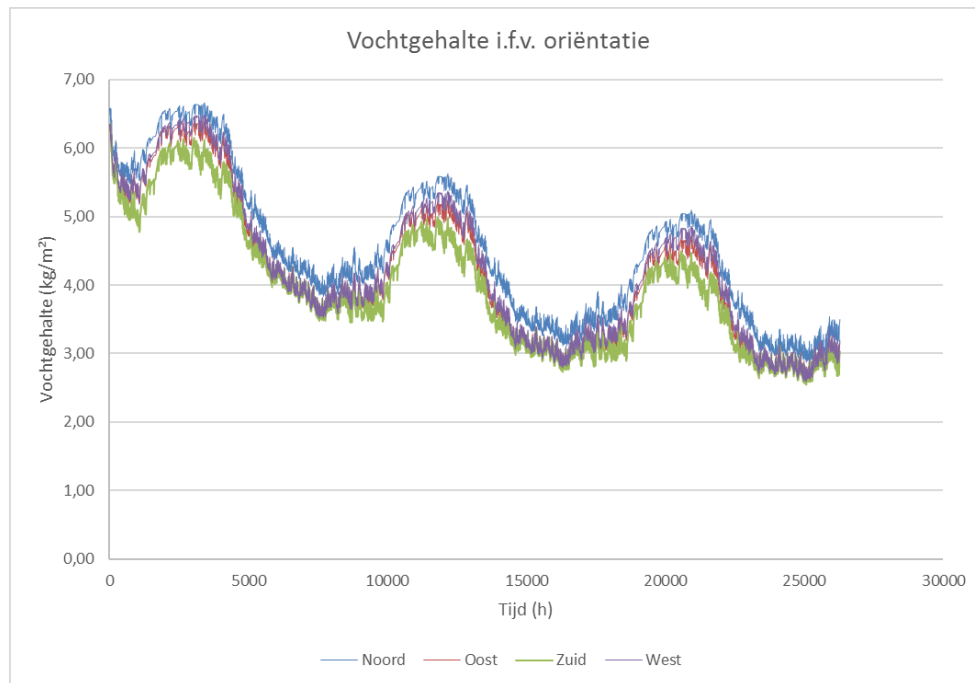
Figuur 57: Slagregen i.f.v. de verschillende oriëntaties

Wanneer men de regenval per oriëntatie apart bekijkt, is duidelijk dat een Oostelijke gevel het minst te verduren zal krijgen van slagregen en een Zuidgevel het meest (Figuur 58).



Figuur 58: Slagregen i.f.v. de oriëntatie op jaarbasis

Het verschil in slagregen op de verschillende oriëntaties is groot. Een noordgevel en oostgevel vangen veel minder slagregen op dan een zuid- of westgevel.



Figuur 59: Vochtgehalte i.f.v. oriëntatie

Dezelfde opbouw (zie Figuur 36) wordt beschouwd in de vier hoofdwindrichtingen. De Zuidgevel droogt initieel het sterkste uit en het vochtgehalte blijft ook voor de hele periode van de simulatie het laagst. De andere gevels reageren gelijklopend. Zonnestraling zorgt er op de zuidgevel voor dat het sneller gaat uitdrogen. Het aandeel directe zonnestraling is er immers zeer groot, zie figuur 41. De invloed van de slagregen is niet zo duidelijk af te lezen uit bovenstaande grafiek. Die invloed wordt duidelijker wanneer er met een coating wordt gewerkt die de slagregenopname vermindert. Coatings kunnen zorgen voor een reflectie van de zonnestraling en houden een deel van de slagregen tegen. Staan deze de uitdroging dan in de weg?

7.4.4. Coatings

De muren kan men afwerken met een coating. Er kan een verlaag aangebracht worden op een ETIC-systeem. Deze verlaag moet voldoen aan de voorschriften uit de norm NBN EN 1062-1[28]. De norm beschrijft de technische en esthetische criteria. Voor elk criterium zijn er klassen opgesteld die de keuze voor een geschikte verf kunnen vergemakkelijken.

De verf kan zowel een decoratieve als beschermende functie vervullen. Zo kan een verf bijvoorbeeld de ontwikkeling van algen en mossen of vuilafzettingen tegengaan. Ze vertragen de aantasting van de gevel; ze sluiten ze echter niet volledig uit. Hiertoe voegen ze bijvoorbeeld schimmeldodende producten toe aan de verf. Recent zijn ook de superhydrofobe verven ontwikkeld: ze beschikken over een microruwheid. Het water vloeit veel gemakkelijker over het oppervlak en neemt het vuil van op het oppervlak mee[29].



Figuur 60: Superhydrofoob oppervlak

De vervuiling van gevels kan m.b.v. coatings vertraagd worden, maar niet helemaal verhinderd worden. Het is belangrijk om het systeem goed te onderhouden en in verschillende gevallen ook de verf regelmatig opnieuw aan te brengen om een optimale werking te verzekeren.

De overschildering van een ETICS zorgt vooreen wijziging van de globale water- en waterdampdoorlaatbaarheid van het pleistersysteem. Wanneer er een verflaag wordt aangebracht op een ETICS, verhoogt de totale waterdichtheid van het systeem. De eisen van de ETAG 004 moeten gerespecteerd blijven.

Dit wordt a.d.h.v. volgende tabellen geïllustreerd:

Karakteristiek van het pleistersysteem	Isolatie uit geëxpandeerd polystyreen (EPS)	Isolatie uit minerale wol (MW)
Waterdoorlaatbaarheid	$< 1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$	
Waterdampdoorlaatbaarheid (S_d)	$\leq 2,0 \text{ m}$	$\leq 1,0 \text{ m}$

Tabel 6: Eisen uit de ETAG 004 m.b.t. de water- en waterdampdoorlaatbaarheid van ETICS

Voorbeeld van Impact	Waterdampdiffusieweerstand S_d		
	Voorbeeld 1	Voorbeeld 2	Voorbeeld 3
Aanwezig pleistersysteem	0,2 m	0,7 m	0,7 m
Nieuwe verflaag	0,1 m (klasse V1)	0,2 m (klasse V2)	0,5 m (klasse V2)
Globaal systeem	0,3 m	0,9 m	1,2 m
Naleving van het waterdampdiffusieweerstandscriterium in geval van een Isolatie uit minerale wol	Ja	Ja	Nee
Naleving van het waterdampdiffusieweerstandscriterium in geval van een Isolatie uit geëxpandeerd polystyreen	Ja	Ja	Ja

Tabel 7: Voorbeelden van de impact van verf op de globale waterdampdiffusieweerstand van het pleistersysteem

De totale waterdampdiffusieweerstand S_d van het ETIC-systeem met verf moet voor EPS onder de 2m blijven en voor MW onder 1m (Zie Tabel 6). S_d is de equivalente luchtlaagdikte van de verflaag. Voor een verf met $S_d = 1\text{m}$, heeft een luchtlaag van 1m een zelfde waterdampdiffusieweerstand als de verflaag. Tabel 7 toont de impact van het aanbrengen van een verflaag op de globale waterdampdiffusieweerstand van het pleistersysteem.

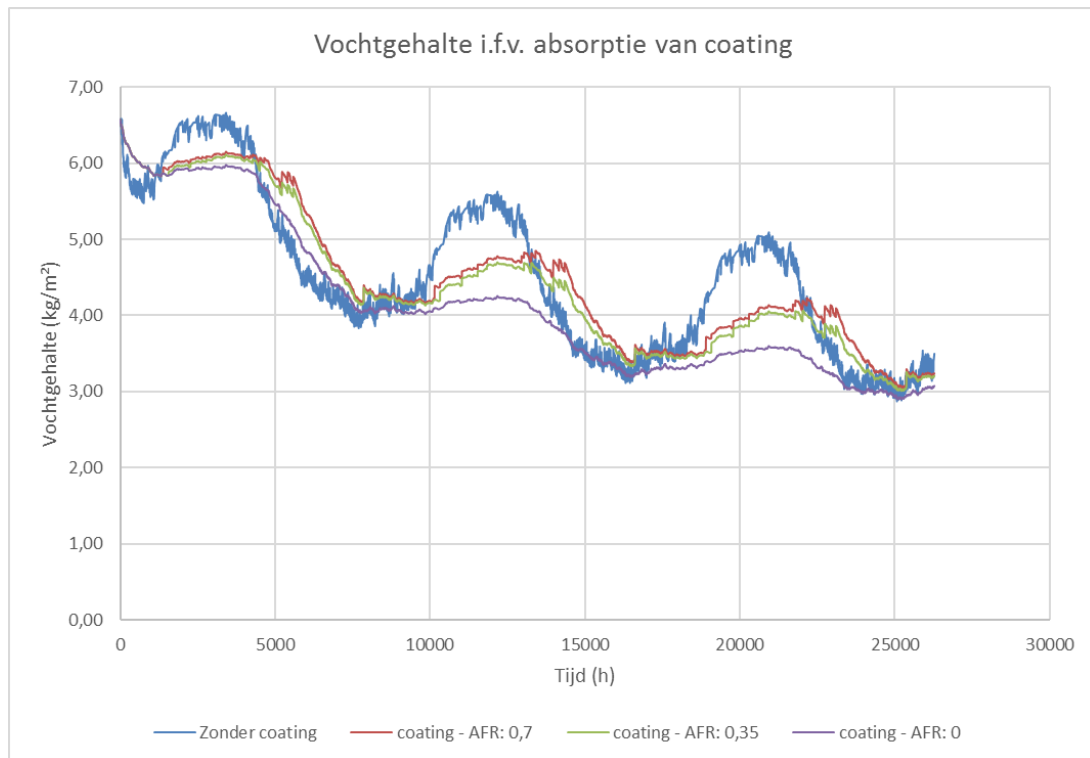
Een ander aandachtspunt is de verenigbaarheid tussen de verf en het pleistersysteem. Niet elke afwerkpleister gaat samen met om het even welke verf. De verenigbaarheid kan afgelezen worden uit onderstaande tabel. Enig vooronderzoek van de grondlaag is dus wel vereist.

Hoofdbindmiddel van de nieuwe verf	Hoofdbindmiddel van het afwerkpleister				
	Acrylaat	Siloxaan	Silicaat	Cement	Kalk
Acrylaat	✓	✓	X (*)	✓	X (*)
Siloxaan	✓	✓	✓	✓	✓
Silicaat	X	X	✓	✓	✓
(*) Tenzij er een specifieke grondlaag aangebracht werd.					

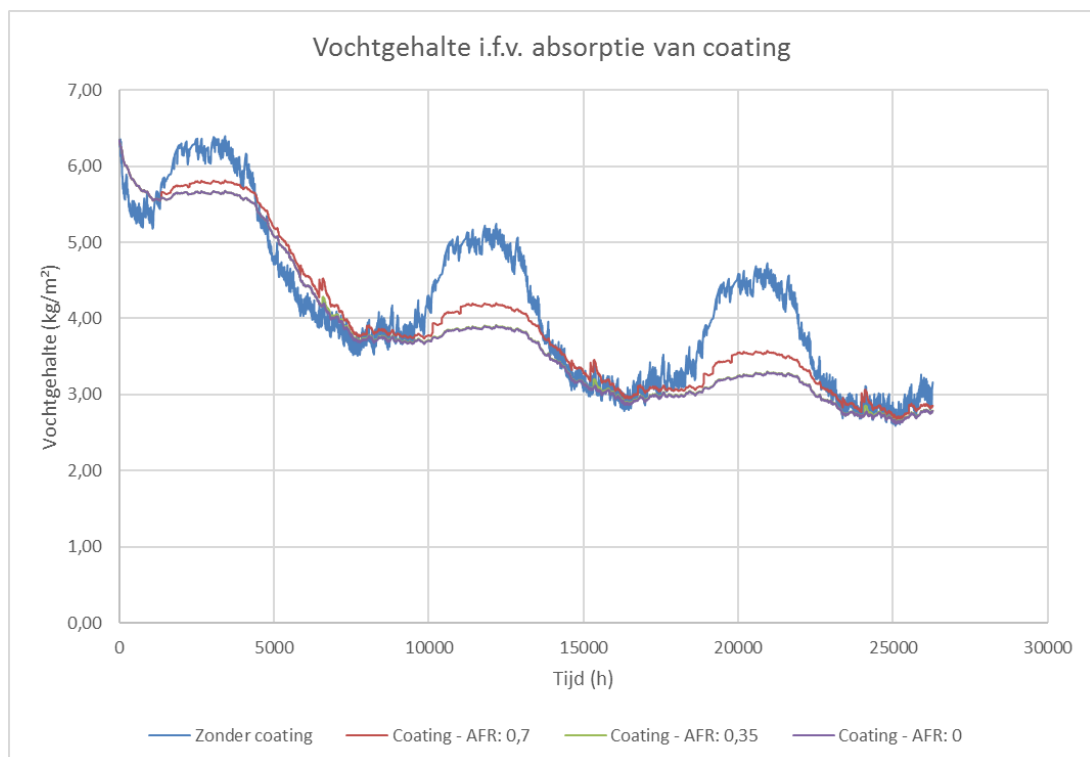
Tabel 8: Verenigbaarheid tussen het hoofdbindmiddel van de verf en dat van het ETIC-systeem

WUFI rekent coatings niet mee als een aparte, dunne laag, maar kent een aparte dampdiffusieweerstand toe aan het oppervlak. De muur krijgt dus een extra S_d -waarde. De S_d -waarde voor een coating op een pleisterlaag is in WUFI gelijk aan 0,2m. Voor een muur waar geen coating op wordt aangebracht, is de extra S_d -waarde = 0m. Er bestaan verschillende soorten coatings, die elk hun eigen S_d -waarde aan de gevel toevoegen. Het algemene principe blijft echter gelijk.

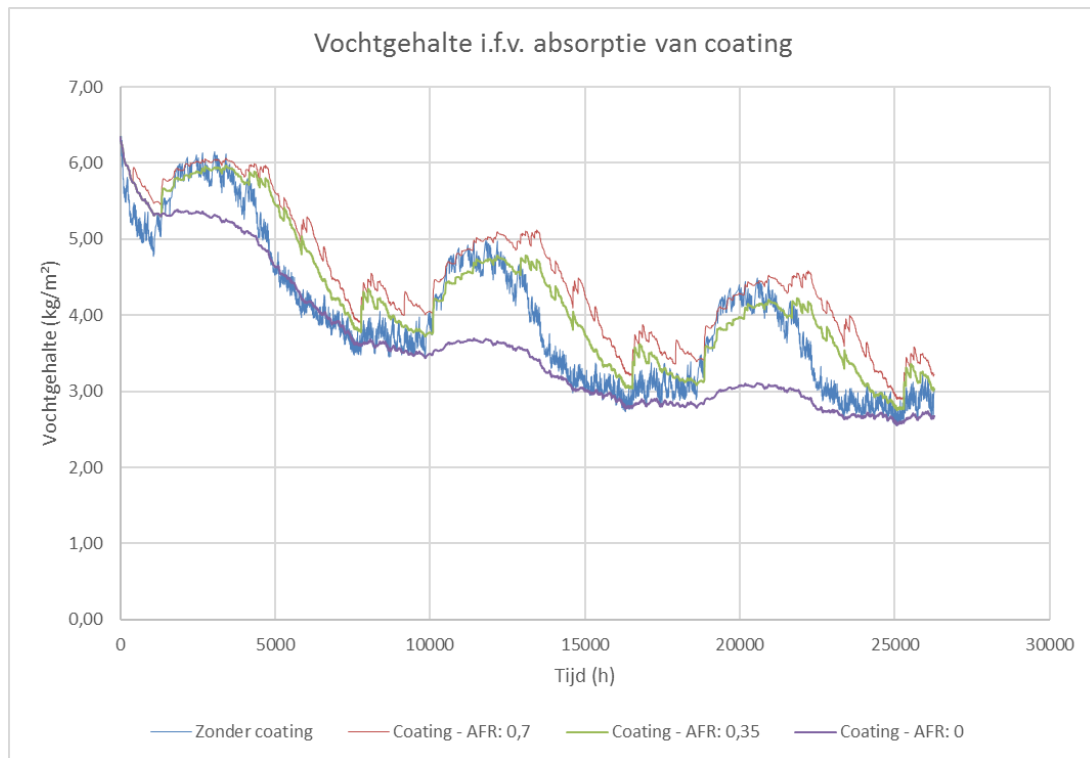
De optie 'Adhering fraction of rain AFR' houdt ermee rekening dat een deel van de regen die invalt op het oppervlak, weerkaatst wordt en niet capillair wordt opgezogen. Bij verticale oppervlakken is dat standaard een waarde van 0,7 (70% van de regen blijft aan het oppervlak kleven). Het aanbrengen van een coating heeft invloed op deze waarde. WUFI raadt aan om bij het aanbrengen van een coating de ARF op 0 te zetten of toch op zijn minst te verminderen. De invloed hiervan kan afgelezen worden in onderstaande grafieken (Figuren 61 – 64).



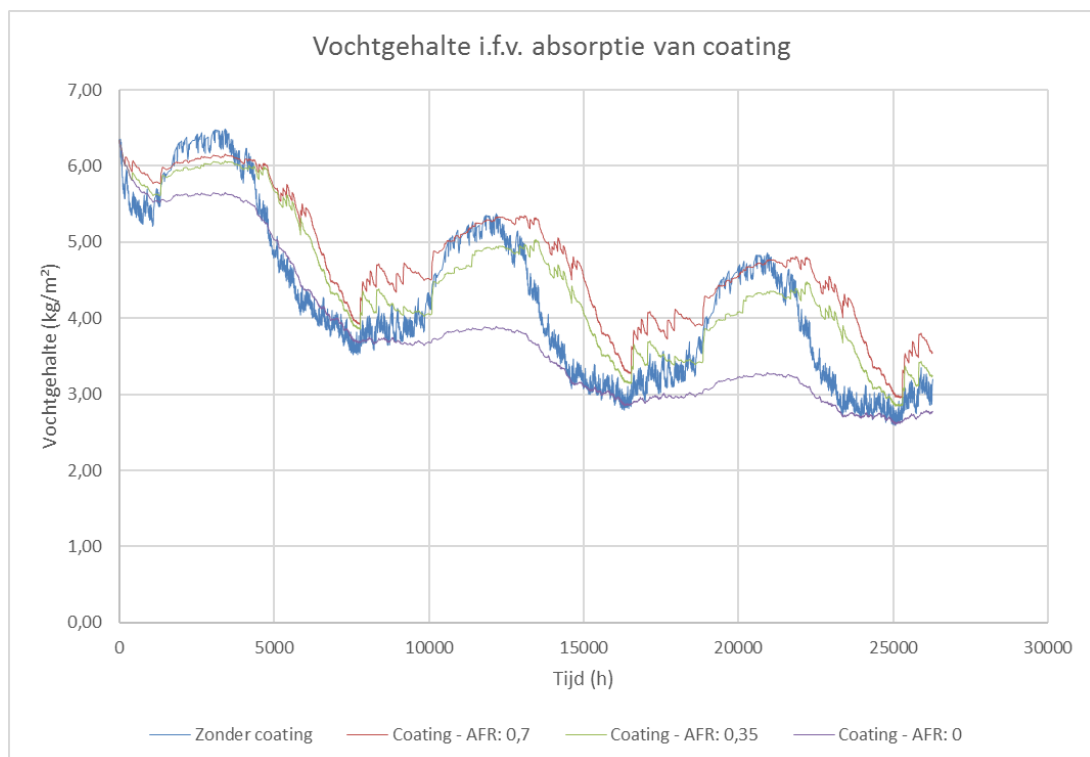
Figuur 61: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van een coating en de absorptiefactor van de coating voor een noordelijke gevelopbouw.



Figuur 62: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van een coating en de absorptiefactor van de coating voor een oostelijke gevelopbouw



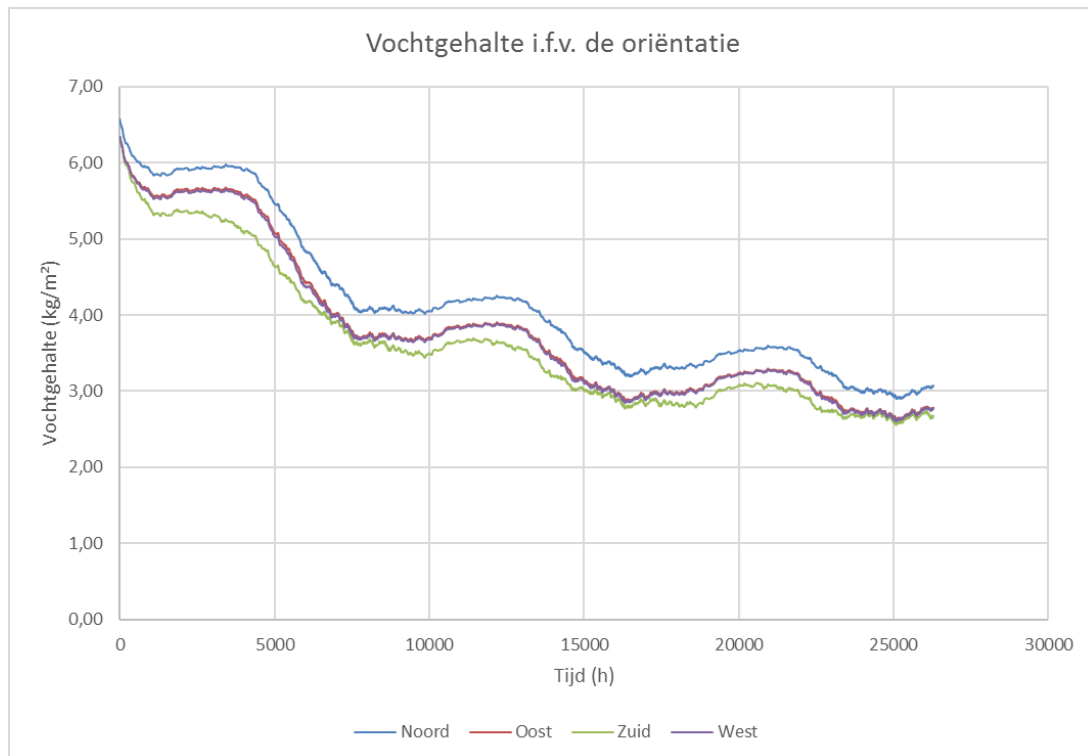
Figuur 63: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van een coating en de absorptiefactor van de coating voor een zuidelijke gevelopbouw



Figuur 64: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van een coating en de absorptiefactor van de coating voor een westelijke gevelopbouw

De vochtcurves worden bij het toevoegen van een coating duidelijk uitgevlakt wanneer de $AFR = 0$ wordt genomen, d.w.z. dat er geen slagregen wordt opgenomen. Wanneer de coating wordt toegevoegd, maar de AFR wordt niet aangepast, wordt duidelijk dat een

coating niet zoveel invloed uitoefent op het vochtgehalte in de zuidelijke en westelijke georiënteerde gevel. De coating zorgt wel voor een kleine tijdsverschuiving in de pieken van het vochtgehalte. Dit is te wijten aan de bijkomende diffusieweerstand $S_d = 0,2$ m. In de Noordelijke en Oostelijke gevel verschilt het echter dan weer niet veel welke AFR er wordt ingesteld. Dit verschil in oriëntaties kan verklaard worden door het verschil in slagregen op de verschillende gevels. De zuidelijke en westelijke gevel zijn meer onderhevig hieraan en krijgen grotere hoeveelheden regen te verwerken. Dit leidt dus tot een absoluut vochtverschil dat groter is dan in de andere oriëntaties. Wanneer er van dit vochtgehalte slechts een fractie wordt opgenomen, leidt dit tot grotere verschillen dan op bijvoorbeeld de noordelijke gevel, waar een fractie van een kleine hoeveelheid slagregen weinig verschil maakt.



Figuur 65: Vochtgehalte i.f.v. de oriëntatie bij een gevelopbouw met een coating

Uit deze grafiek blijkt dat het effect van de oriëntatie, dat beschreven werd in paragraaf 7.4.3, ook blijft gelden, wanneer er gebruik wordt gemaakt van een coating. De zuidelijke gevel gaat initieel het sterkst uitdrogen en het vochtgehalte in deze gevel blijft over de hele duur van de simulaties het laagst.

7.4.5. Invloed van soort pleister

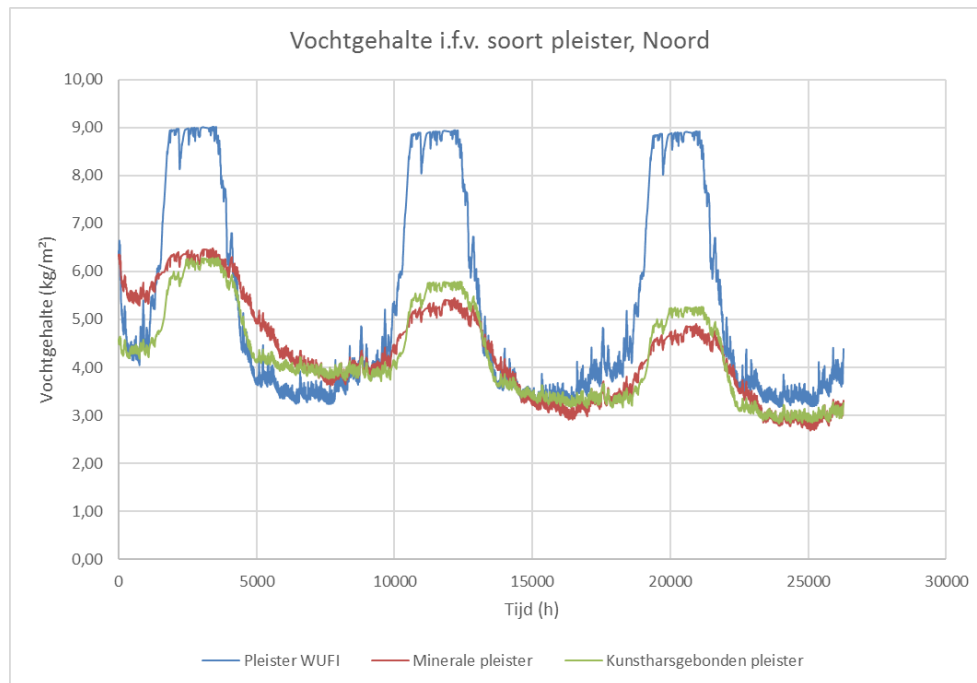
Er bestaat een heel breed gamma aan afwerkingspleisters. Ze hebben elk hun eigen karakteristieken. De simulaties worden uitgevoerd met drie soorten: de standaard ingebouwde 4-laagse pleister uit WUFI, een kunstharsgebonden pleister en een minerale pleister.

	ρ	Porositeit	c	λ	μ	dikte	Sd	Capillair vochtgehalte
Materiaal	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]	[mm]	[m]	[kg/m ³]
Minerale pleister	1900	0,24	850	0,8	25	10	0,25	210
Kunstharsgebonden pleister	1100	0,12	850	0,7	1000	3	3	100
Pleister WUFI - buitenlagen	1310	0,36	850	0,87	8	4+1	0,04	192
Pleister WUFI - binnenlagen	1219	0,3	850	0,25	10,8	14+1	0,162	160

Tabel 9: Materiaaleigenschappen van de verschillende pleisters

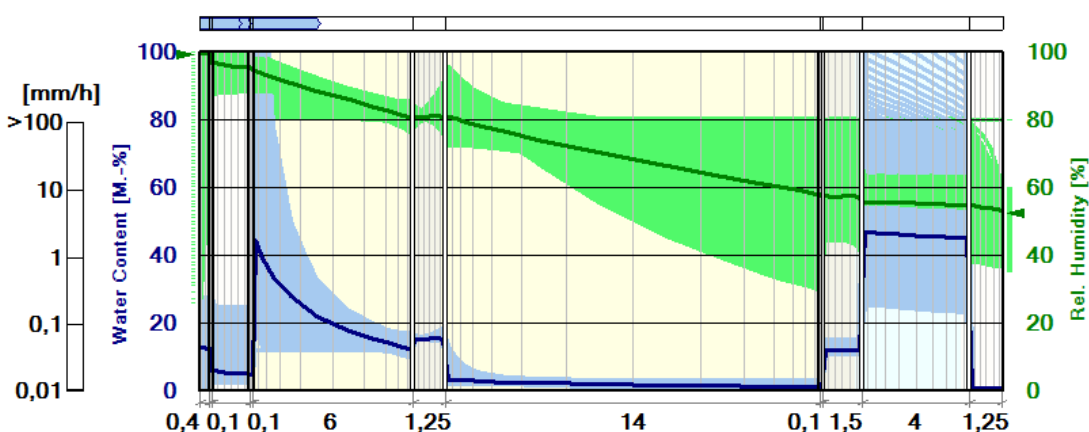
We zien dat de kunstharsgebonden pleister duidelijk de grootste dampdiffusieweerstand μ heeft. Dit is de meest voorkomende pleister. De warmtecapaciteit c is voor alle materialen dezelfde en ook de warmtegeleidingcoëfficiënt λ verschilt niet veel van elkaar. De porositeit van de kunstharsgebonden pleister is drie keer zo klein als die van de pleister uit WUFI, en twee keer zo klein als minerale pleister. Het capillair vochtgehalte is bij kunstharsgebonden pleister het kleinst.

Men moet wel opmerken, ter vollediging, dat de pleisters niet met dezelfde dikte worden aangebracht. WUFI suggereert voor elk van de pleisters een standaarddikte. Voor de minerale pleister is dit 10mm, voor de kunstharsgebonden pleister slechts 3mm en voor de 4-laagse pleister in totaal 20mm. Men verkrijgt volgend verloop van het vochtgehalte in de volledige muur.



Figuur 66: Vochtgehalte i.f.v. de soort pleister voor een noordelijke gevelopbouw

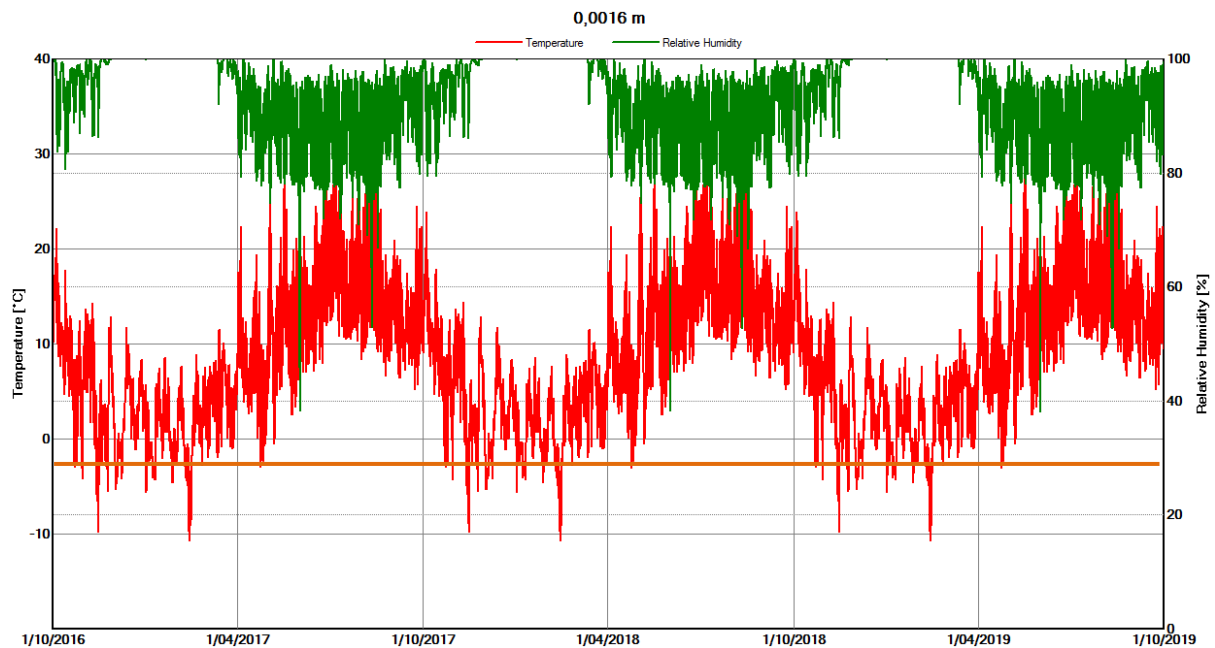
Daarbij kan men duidelijk zien dat het vochtgehalte bij de kunstharsgebonden pleister en minerale pleister minder pieken kent en gemiddeld dus ook lager is. Hoewel de opbouwen met minerale pleister een initieel hoger vochtgehalte hebben, drogen ze sneller uit dan de gevelopbouwen met kunstharsgebonden pleister. De pieken liggen al na 1 jaar lager. De grote dampdichtheid van de kunstharsgebonden pleister kan hier aan de basis liggen van het hogere vochtgehalte. De dampdiffusieweerstand is 12 keer groter dan die van de minerale pleister. De constructie lijkt in de winter bij de WUFI-pleister regelmatig verzadigd te zijn. Bekijken we dit eens meer in detail.



Figuur 67: Uitdrogingsprofiel van de constructie met de standaardpleister uit WUFI

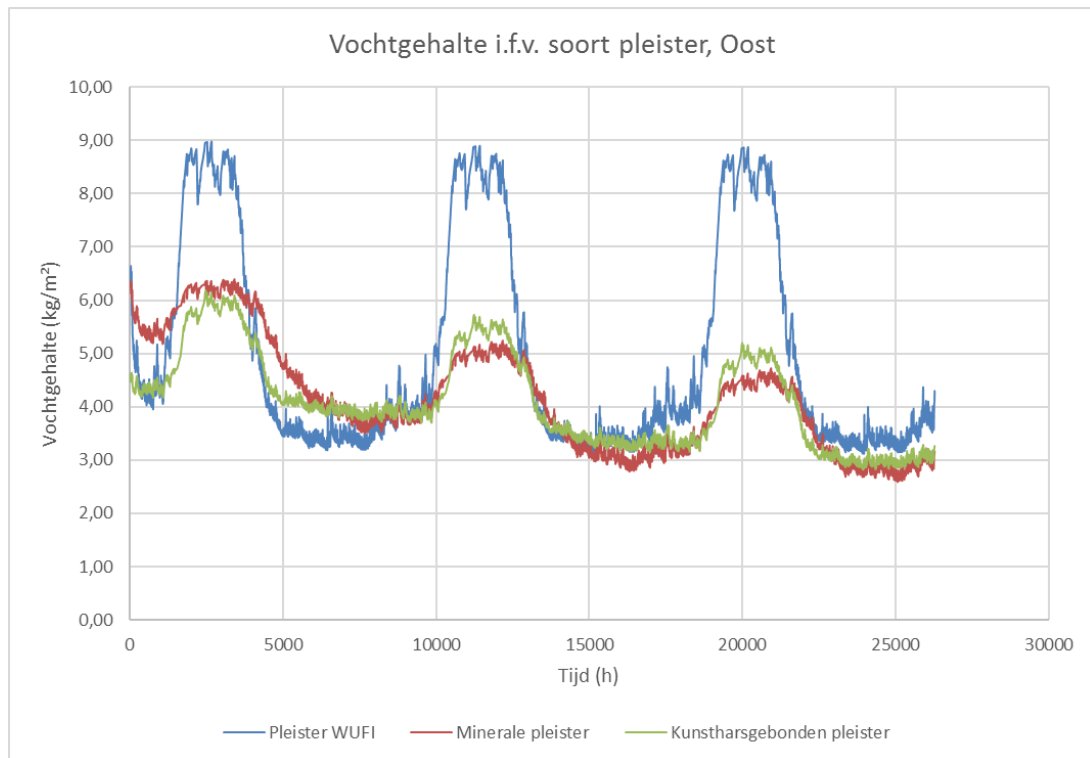
Het vocht in de isolatielaag kan niet goed uitdrogen en bereikt aan de binnenzijde van de pleisterlaag geregeld een relatieve vochtigheid van 100%. Er is gevaar op inwendige condensatie als de temperatuur onder de dauwpuntstemperatuur zakt.

Er moet ook nagegaan worden of de pleisterlaag, die ook geregeld tot 100 % relatieve vochtigheid gaat, gevaar loopt voor vorstschade. Hiervoor wordt het temperatuursverloop in de pleisterlaag onderzocht.

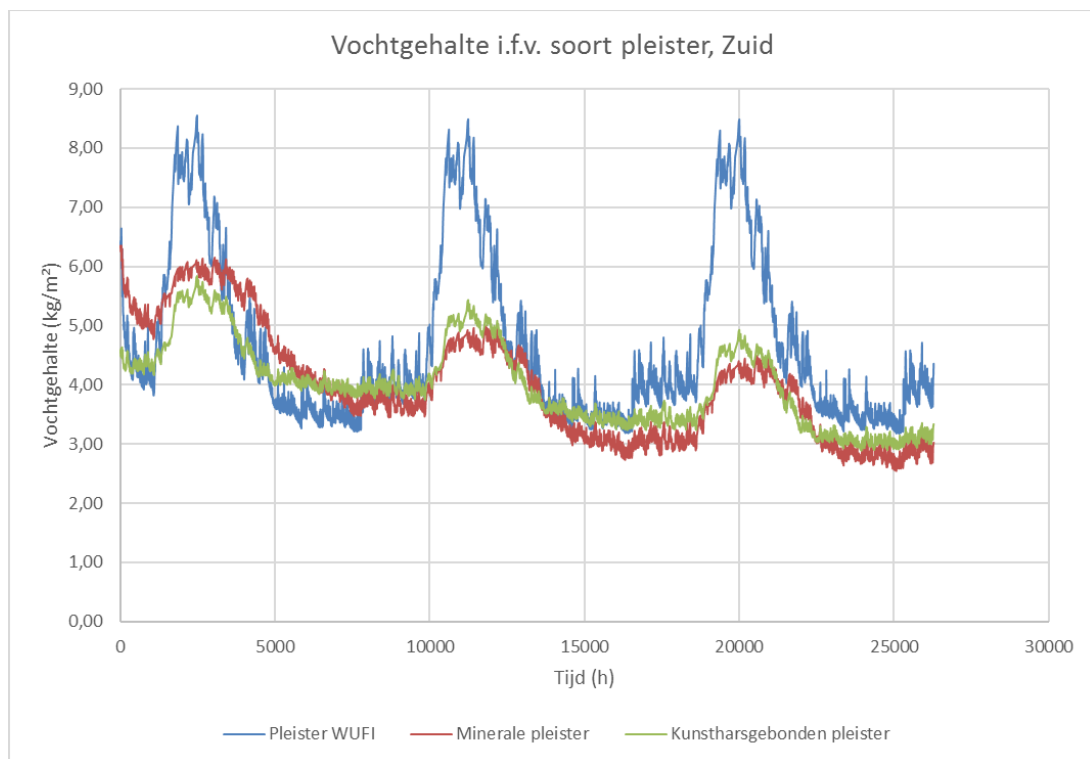


Figuur 68: Verloop van de temperatuur en relatieve vochtigheid in de pleisterlaag over een periode van 3 jaar

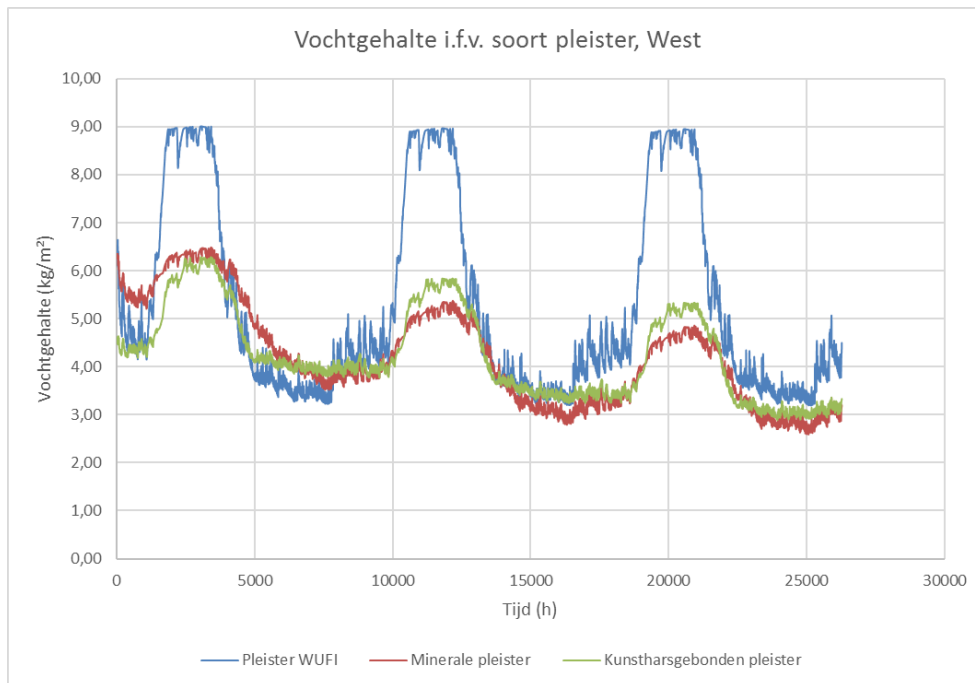
Er treden verschillende vorst-dooicycli op in de wintermaanden. De oranje horizontale lijn duidt op de grens waar we spreken van vorst. Er is niets bekend over de eventuele vorstbestendigheid van de standaard pleister van WUFI. Hierdoor is het dus moeilijk te voorspellen of er ook werkelijk vorstschade zal optreden. Normaal moet elk materiaal in het labo getest worden voor zijn vorst/dooibestendigheid, maar dit is een door WUFI gegenereerd materiaal en er zijn geen data voorhanden.



Figuur 69: Vochtgehalte i.f.v. soort pleister voor een oostelijke gevelopbouw



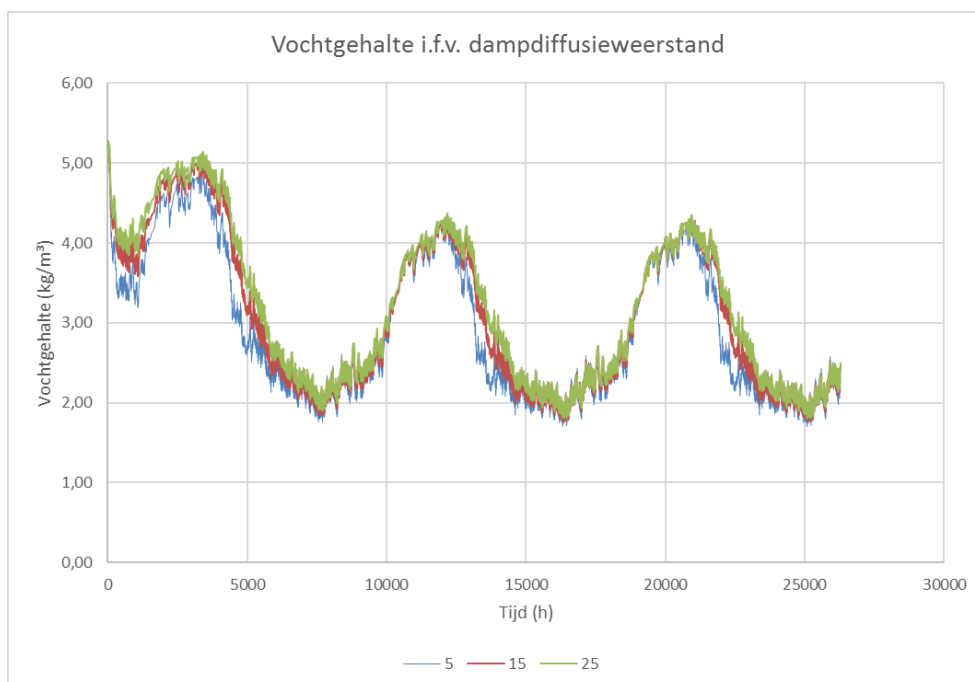
Figuur 70: Vochtgehalte i.f.v. soort pleister voor een zuidelijke gevelopbouw



Figuur 71: Vochtgehalte i.f.v. soort pleister voor een westelijke gevelopbouw

Dezelfde trends keren terug in alle windrichtingen. De verzadiging lijkt echter enkel voor te komen in de noordelijke en westelijke oriëntatie. Daarbij kan nog eens worden opgemerkt dat het totale vochtgehalte het laagst is in de zuidelijke oriëntatie. De pieken drogen ook sneller uit dan in de andere oriëntaties.

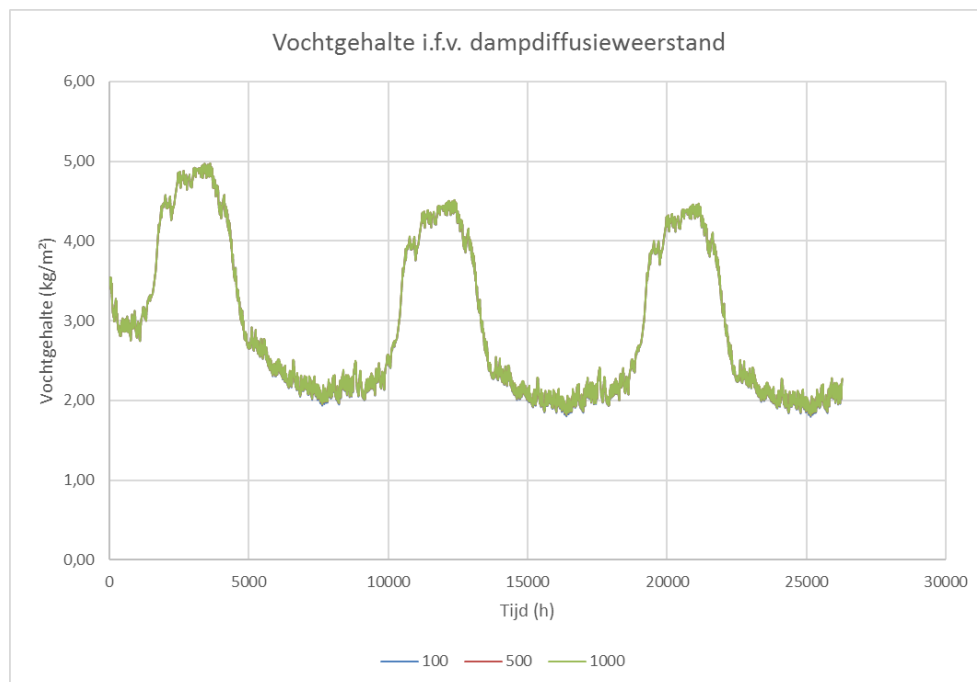
De dampdiffusieweerstand van de pleisterlaag kan in werkelijkheid een beetje verschillen van de waarden uit WUFI. Voor een minerale pleister wordt de dampdiffusieweerstand eens veranderd naar lagere waarden: 5 en 15.



Figuur 72: Vochtgehalte i.f.v. de dampdiffusieweerstand van minerale pleister

Het verschil in vochtgehalte is echter klein. Wel valt op dat door een lagere dampdiffusieweerstand de constructie een beetje sneller uitdroogt.

Dit wordt ook eens bekeken voor de dampdiffusieweerstand van een kunstharsgebonden pleister. De waarde die WUFI opgeeft is $\mu = 1000$. Onderstaande grafiek toont het vochtgehalte bij lagere dampdiffusieweerstanden.



Figuur 73: Vochtgehalte i.f.v. de dampdiffusieweerstand van kunstharsgebonden pleister

Er is geen merkbaar verschil tussen het vochtgehalte bij de verschillende dampdiffusieweerstanden.

7.4.6. Invloed van soort isolatie op uitdroging

Standaard maakt men bij ETIC-systemen gebruik van EPS of minerale wol (MW). Deze twee materialen hebben echter verschillende eigenschappen. In het houtskelet wordt vaak cellulose of MW toegepast.

Minerale wol is een onbrandbaar isolatiemateriaal met een warmtegeleidingscoëfficiënt λ rond 0,035 tot 0,04 W/mK. Wat minerale wol onderscheidt van andere isolatiematerialen is zijn grote dampdoorlaatbaarheid. De diffusieweerstand wordt in WUFI als $\mu = 1,3$ aangenomen, wat bijna gelijkstaat aan een luchtlaag, die een diffusieweerstand heeft van $\mu=1$. Bij minerale wol kan het bouwvocht dat nog in de constructie aanwezig is na de oplevering sneller uitdrogen naar buiten dan bij EPS, dat een veel grotere diffusieweerstand heeft gaande van 20 tot 100.

Sommige isolatiematerialen, zoals XPS, PUR en PIR hebben een grotere thermische uitzettingscoëfficiënt dan EPS en MW en maken het daardoor moeilijker om er een wapeningsnet of basislaag op aan te brengen zodat het systeem na verloop van tijd niet begint te scheuren [30]. Sommige van deze isolatiematerialen, zoals PU en PIR, hebben de neiging om na verloop van tijd vocht te absorberen en vast te houden. Dit verandert de thermische en waterdichte eigenschappen. Het is daarom dat deze isolatiematerialen tot op vandaag nog niet gebruikt worden bij ETIC-systemen.

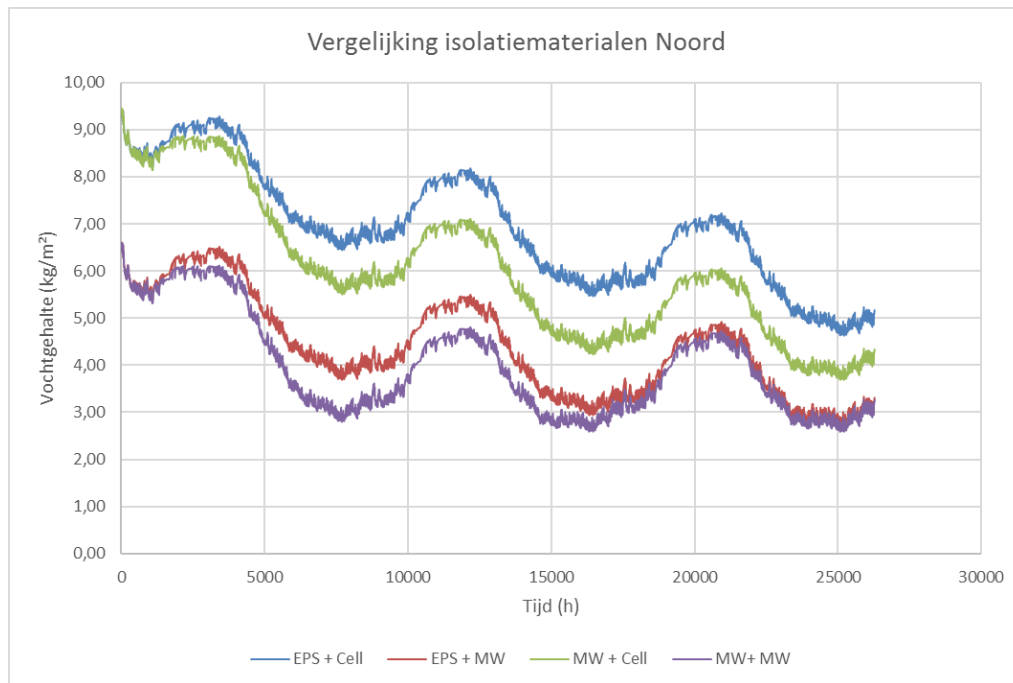
De eigenschappen van de verschillende isolatiematerialen zijn in onderstaande tabel (Tabel 10) opgelijst. Daaruit blijkt dat ze gelijkaardige eigenschappen hebben, met uitzondering van de dampdichtheid van EPS, die hoger ligt dan bij de andere materialen. De massadichtheid ρ ligt dan weer lager dan bij de andere materialen. MW heeft de laagste warmtecapaciteit c . Ze hebben allemaal dezelfde warmtegeleidingscoëfficiënt λ .

Materiaal	ρ	porositeit	c	λ	μ
	(kg/m ³)	(m ³ /m ³)	(J/kgK)	(W/mK)	(-)
EPS	15	0,95	1500	0,04	30
MW	60	0,95	850	0,04	1,3
cellulose fiber	70	0,95	2500	0,04	1,5

Tabel 10: Materiaaleigenschappen van de onderzochte isolatiematerialen

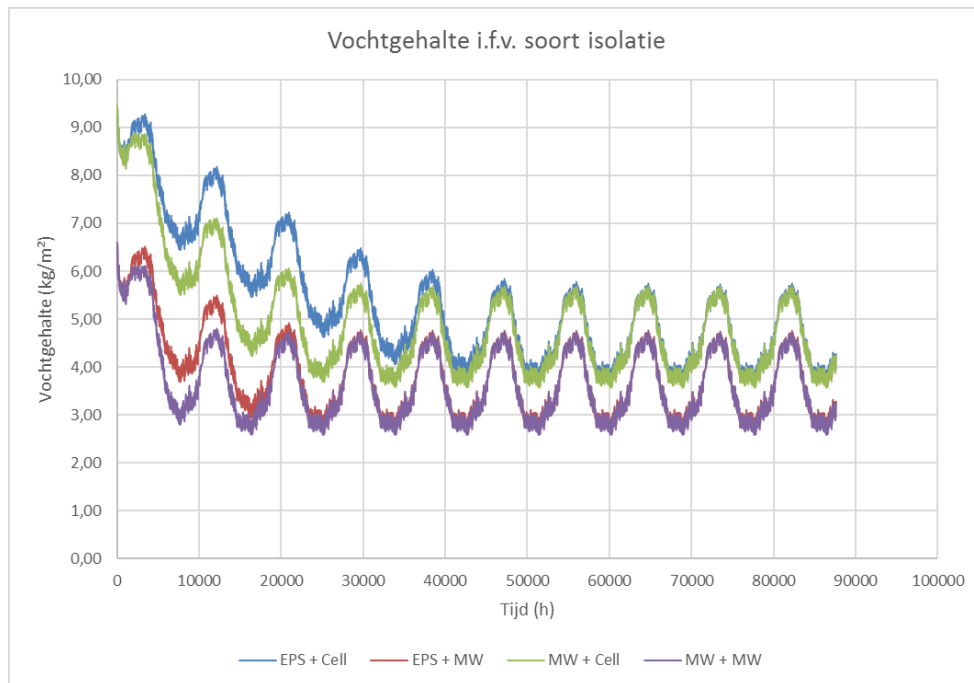
De simulaties worden uitgevoerd in vier combinaties en lopen over drie en tien jaar. Ze starten op 1 oktober 2016.

- EPS buiten het houtskelet en cellulose (in grafieken afgekort als 'cell') in het houtskelet
- EPS buiten het houtskelet en minerale wol (MW) in het houtskelet
- MW buiten het houtskelet en cellulose in het houtskelet
- MW buiten en in het houtskelet



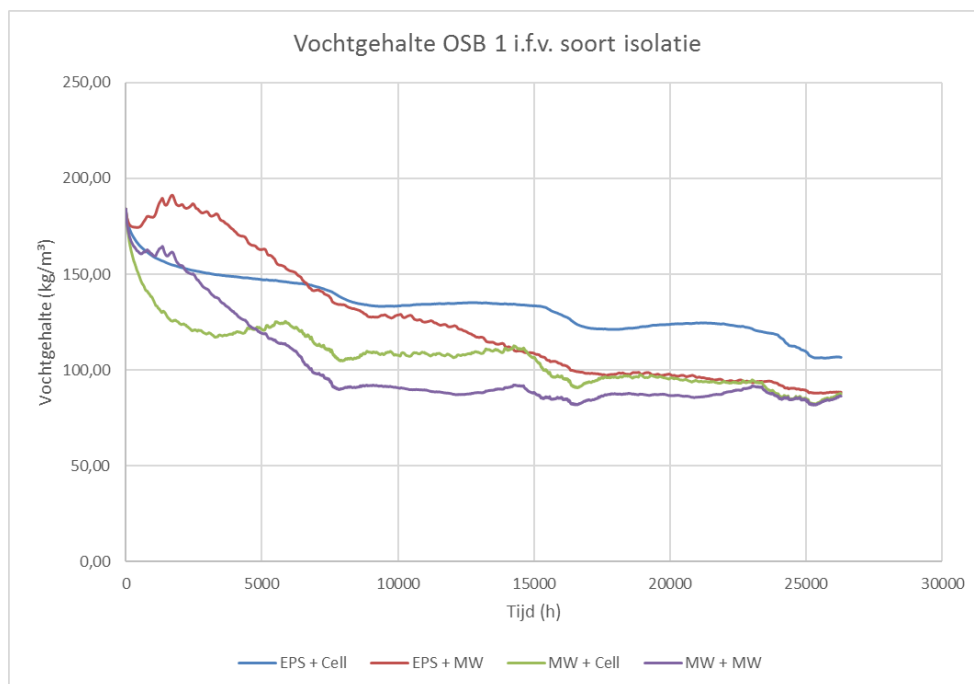
Figuur 74: Vergelijking van vochtgehalte i.f.v. isolatiematerialen, Noord

Er is duidelijk een verschil op te merken in de uitdrogingscapaciteit van de verschillende opbouwen. De gevelopbouwen met cellulose hebben een hoger initieel vochtgehalte en blijven gedurende een aantal jaar ook dit hogere vochtgehalte aanhouden. De opbouwen met minerale wol drogen sneller uit dan die met EPS. Dit is op het eerste zicht niet zo gemakkelijk te verklaren met de dampdiffusieweerstand. De opbouwen die immers het snelste uitdrogen zijn de opbouwen die minerale wol tussen het houtskelet hebben i.p.v. cellulose. De dampdiffusieweerstand verschilt slecht 0.2. Het hoger vochtgehalte is te wijten aan het feit dat cellulose het isolatiemateriaal is dat het meeste vocht kan opslaan. Cellulose heeft een hogere EMC80-waarde (Equilibrium Moisture Content) dan minerale wol en EPS.



Figuur 75: Vochtgehalte i.f.v. isolatie over een periode van 10 jaar

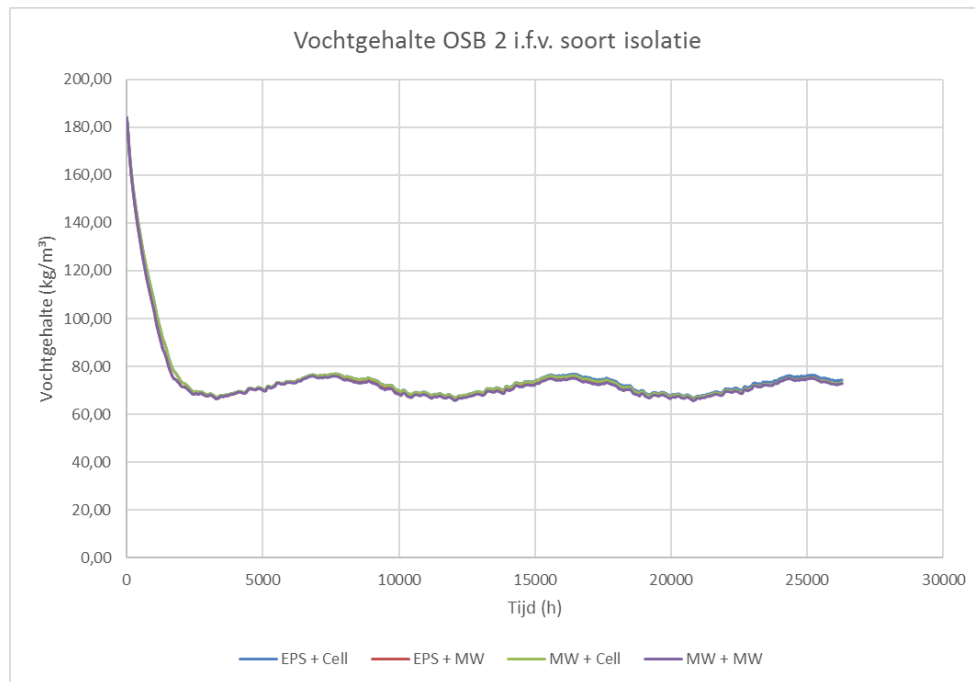
Op termijn verkleint het verschil wel tussen de verschillende opbouwen. Zolang in de eerste jaren dus het kritieke vochtgehalte in de verschillende lagen van de constructie niet overschreden worden, is de keuze van isolatiemateriaal gelijk. Wanneer er echter een groot initieel vochtgehalte kan verwacht worden, is minerale wol te verkiezen boven cellulose. Onderstaande grafieken onderzoeken welk effect de verschillende isolatiematerialen hebben op het vochtgehalte in de verschillende materialen van de gevelopbouw.



Figuur 76: Vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat i.f.v. gekozen isolatiematerialen

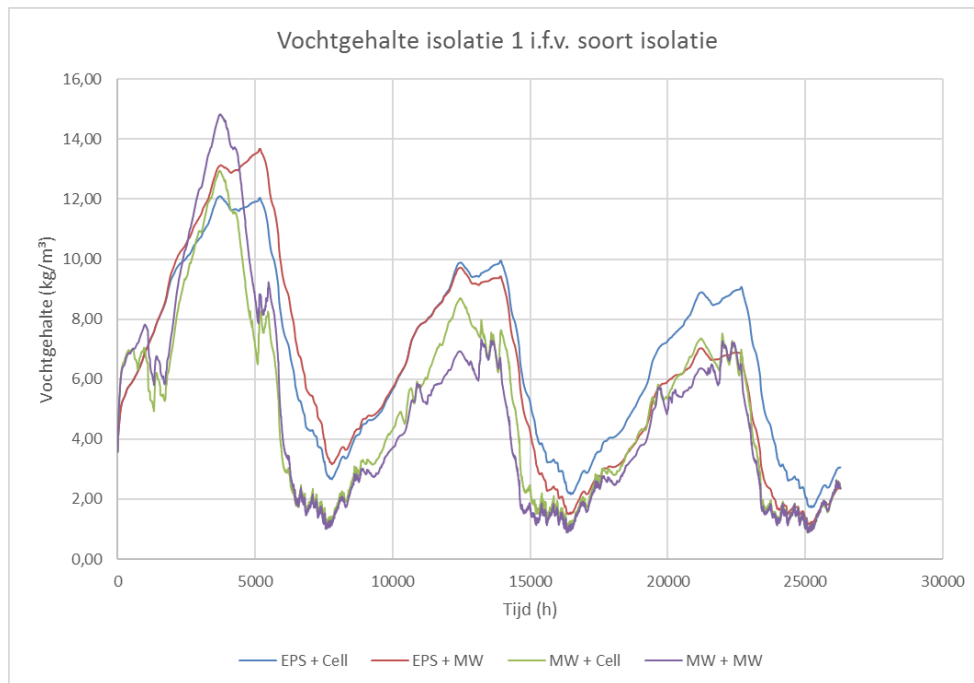
Het vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat wordt duidelijk beïnvloed door de keuze van de isolatiematerialen. De opbouwen met EPS aan de buitenzijde zorgen voor een hoger

vochtgehalte in de OSB-plaat. Dit is logisch. Het vocht wil van binnen naar buiten migreren en moet door deze OSB-plaat naar de isolatielaag. Wanneer deze isolatielaag EPS is, dat een grote dampdichtheid heeft, wordt het vocht slechts trager doorgelaten. De opbouw met EPS + MW heeft in het begin het hoogste vochtgehalte in de OSB-plaat. Door de minerale wol in het houtskelet wordt het vocht snel doorgelaten tot in de OSB-plaat, waar het wordt tegengehouden door de EPS-isolatie.



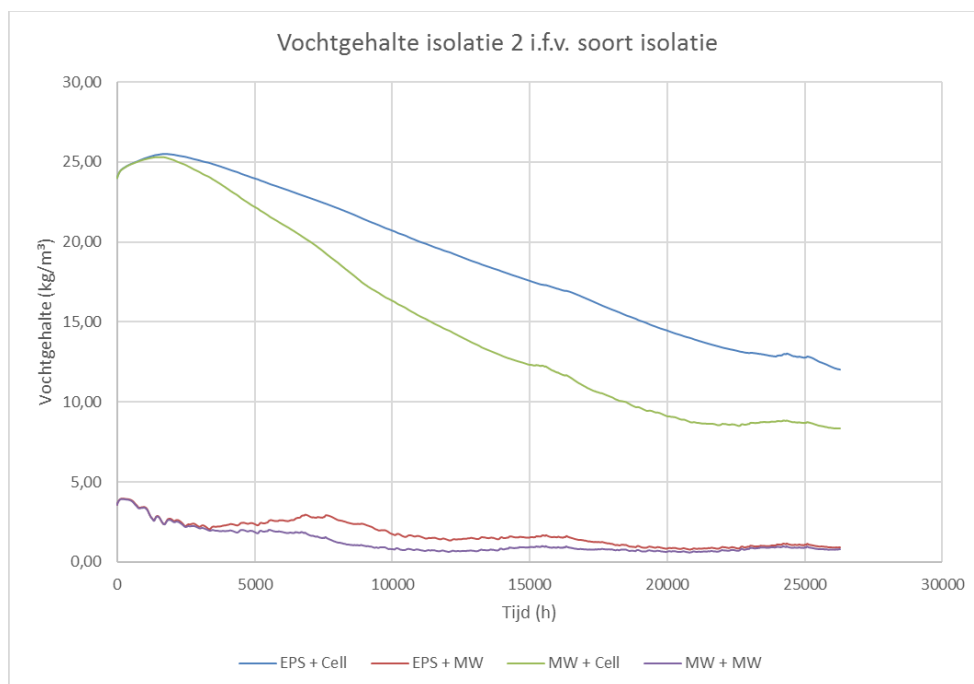
Figuur 77: Vochtgehalte in de binnenste OSB-plaat i.f.v. de gekozen isolatiematerialen

Het vochtgehalte in de binnenste OSB-plaat is niet onderhevig aan grote verschillen afhankelijk van de gekozen isolatiematerialen. We kunnen ook eens het vochtgehalte in de isolatielagen bekijken. Het resultaat valt af te lezen op onderstaande grafiek (Figuur 78).



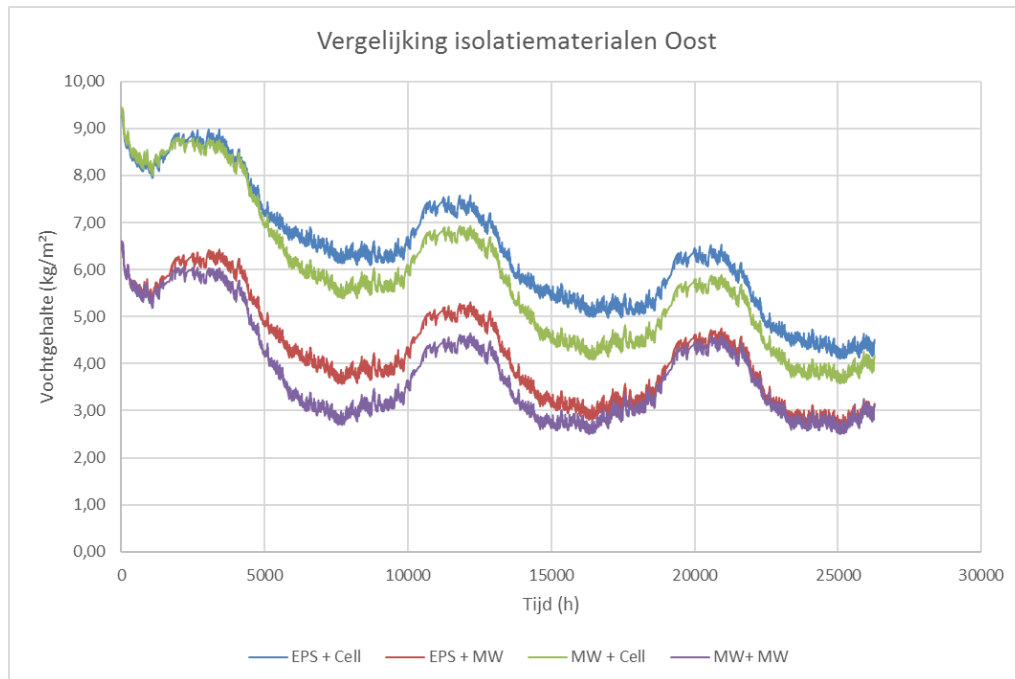
Figuur 78: Vergelijking van vochtgehalte in de buitenste isolatielaag i.f.v. isolatiematerialen

Als het vochtgehalte in de buitenste isolatielaag beschouwd wordt, valt op dat het vochtgehalte bij de opbouw met tweemaal minerale wol in het begin sneller stijgt dan de andere opbouwen. Dit kan verklaard worden door het feit dat dit de meest dampopen constructie is en het initieel vocht uit de hele constructie dus het snelst uitdroogt naar buiten, waardoor er dus tijdelijk een hoger vochtgehalte genoteerd wordt.

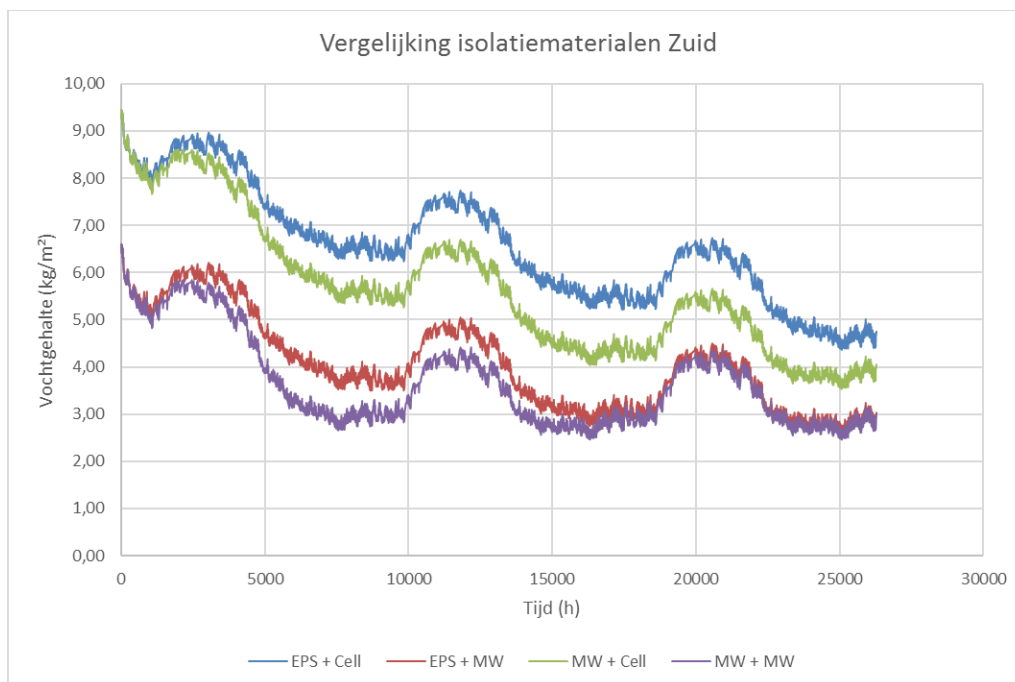


Figuur 79: Vergelijking van vochtgehalte in de binnenste isolatielaag i.f.v. isolatiematerialen

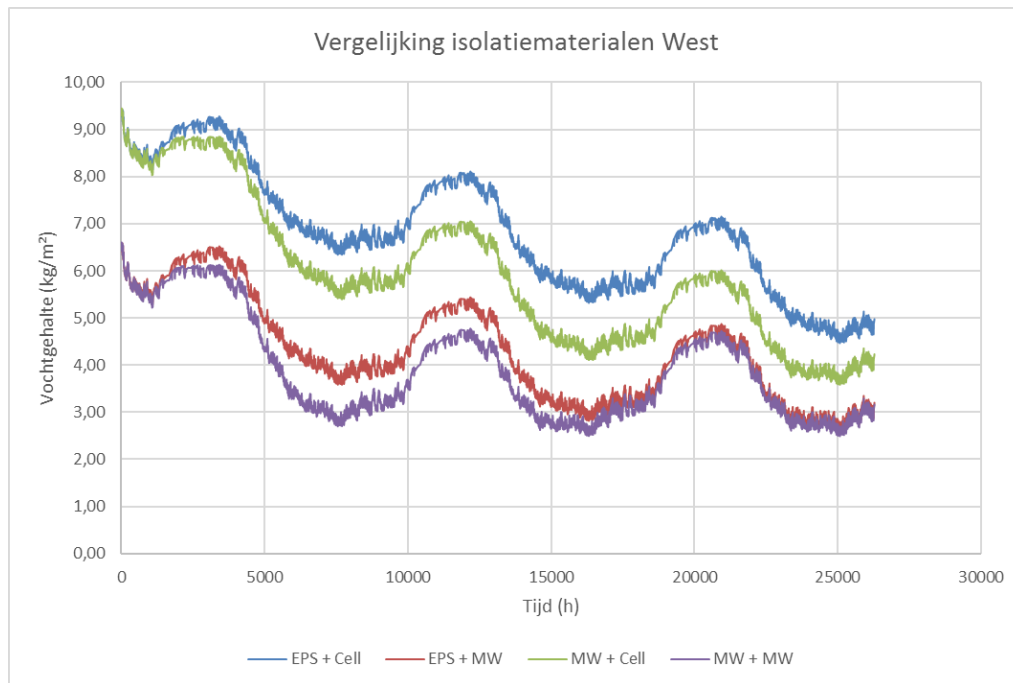
De vochtgehaltenes in de opbouwen met cellulose liggen beduidend hoger dan bij die met MW tussen het houtskelet (Zie Figuur 79). Het schommelleffect is zo diep in de constructie niet meer merkbaar. Voor alle oriëntaties kunnen dezelfde conclusies getrokken worden. De keuze voor een isolatiemateriaal wordt crucialer wanneer hogere initiële vochtgehaltenes verwacht worden. (Zie 7.4.7. over initieel vochtgehalte).



Figuur 80: Vergelijking van vochtgehalte i.f.v. isolatiematerialen, Oost



Figuur 81: Vergelijking van vochtgehalte i.f.v. isolatiematerialen, Zuid



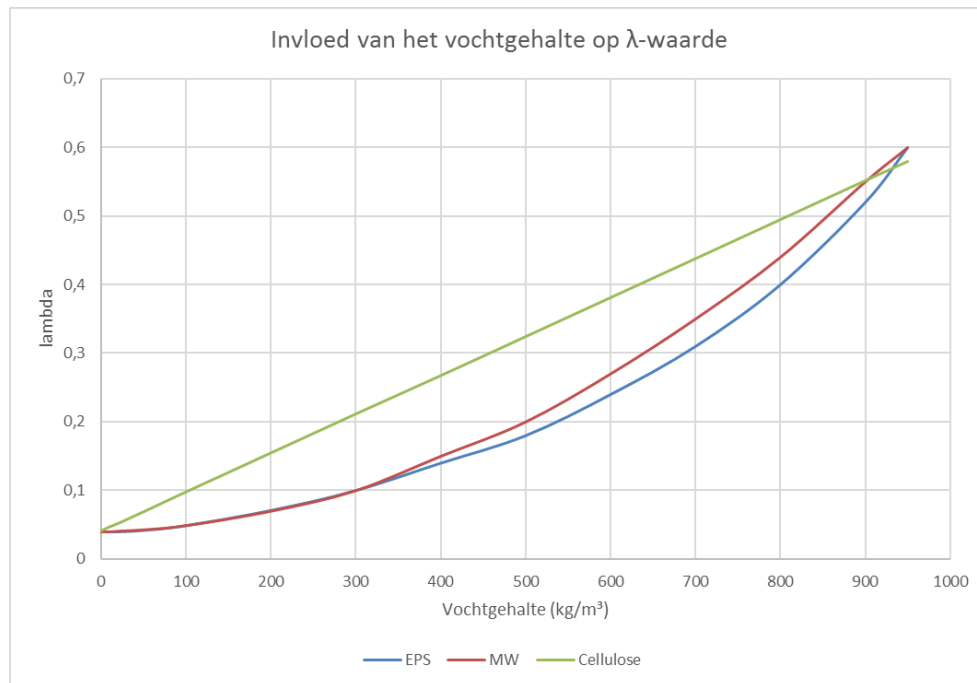
Figuur 82: Vergelijking van vochtgehalte i.f.v. isolatiematerialen, West

In alle oriëntaties zijn dezelfde trends zichtbaar (zie Figuren 80-82).

De keuze van het isolatiemateriaal heeft ook een invloed op de warmtegeleidingcoëfficiënt λ . Naargelang er meer vocht wordt opgeslagen in het isolatiemateriaal, gaat de λ -waarde immers gaan toenemen volgens het verloop weergegeven op Figuur 83

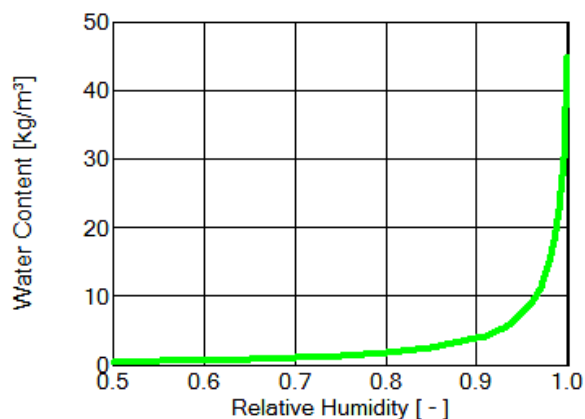
	EPS	MW	Cellulose
Water content (kg/m³)	Thermal conductivity (W/mK)	Thermal conductivity (W/mK)	Thermal conductivity (W/mK)
0	0,04	0,04	0,04
10	0,04	0,04	0,046
20	0,04	0,041	0,051
50	0,042	0,043	0,068
100	0,049	0,049	0,097
200	0,071	0,07	0,154
300	0,1	0,1	0,211
400	0,14	0,15	0,267
500	0,18	0,2	0,324
600	0,24	0,27	0,381
700	0,31	0,35	0,438
800	0,4	0,44	0,495
900	0,52	0,55	0,552
950	0,6	0,6	0,58

Tabel 11: Lambdawaardes voor de verschillende vochtgehaltes i.f.v. het vochtgehalte

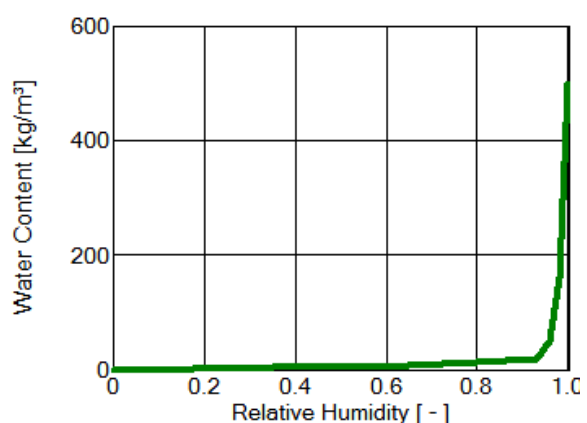


Figuur 83: Invloed van het vochtgehalte op de warmtegeleidingscoëfficiënt voor de verschillende isolatiematerialen

Bij cellulose is er een rechtevenredig verband tussen het vochtgehalte en de λ -waarde.



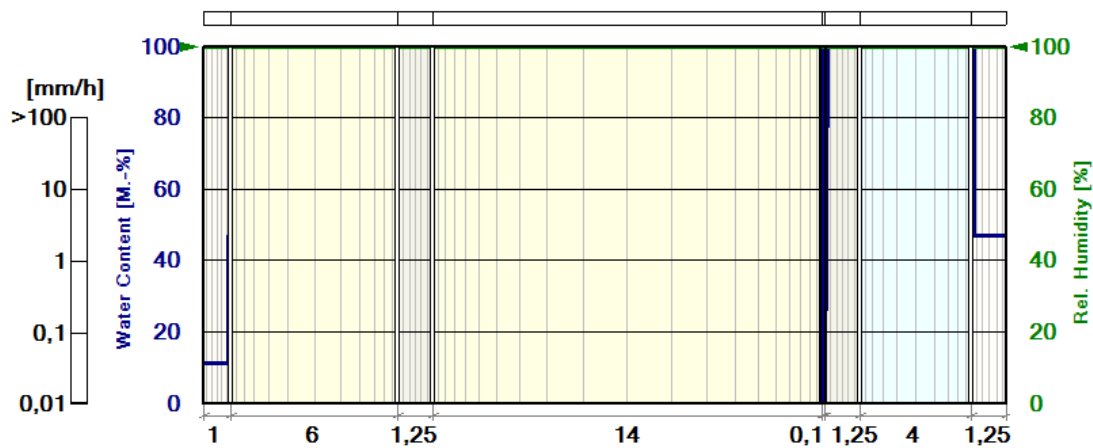
Figuur 84: Vochttopslagcurve van cellulose



Figuur 85: Vochttopslagcurve van EPS

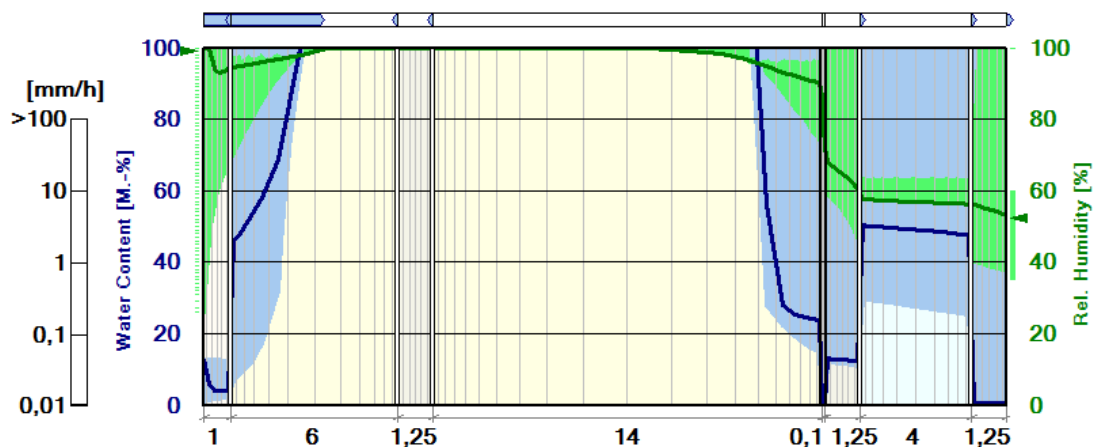
De vochttopslagcurves voor EPS en MW zijn ongeveer identiek. Die van cellulose is anders. Cellulose heeft een veel hogere opslagcapaciteit dan de andere isolatiematerialen en zal hogere vochtgehaltes bereiken bij gelijke relatieve vochtigheid. Cellulose zal bijgevolg dus ook sneller een hogere warmtegeleidingscoëfficiënt bereiken.

De uitdrogingsprofielen bevestigen bovenstaande conclusies over de snelheid van uitdroging (Figuren 86-90). De beginsituatie is in alle beschouwde gevallen gelijk. We vertrekken vanaf een constructie waarbij de materialen verzadigd zijn met hun capillair vochtgehalte, voor een relatieve vochtigheid van 100%. Deze initiële vochtwaardes zullen in praktijk (bijna) nooit voorkomen, maar verduidelijken het uitdrogingsgedrag.



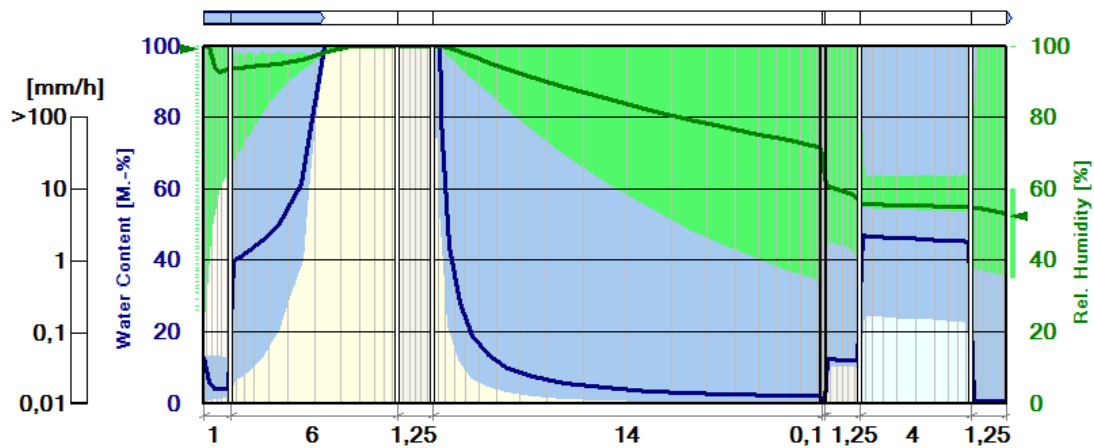
Figuur 86: Profiel van het vochtgehalte en de relatieve vochtigheid aan de start van de simulaties

Figuur 86 toont de startsituatie waarbij alle materialen verzadigd zijn. Na drie jaar verkrijgen we volgende profielen voor de verschillende combinaties van isolatiematerialen.



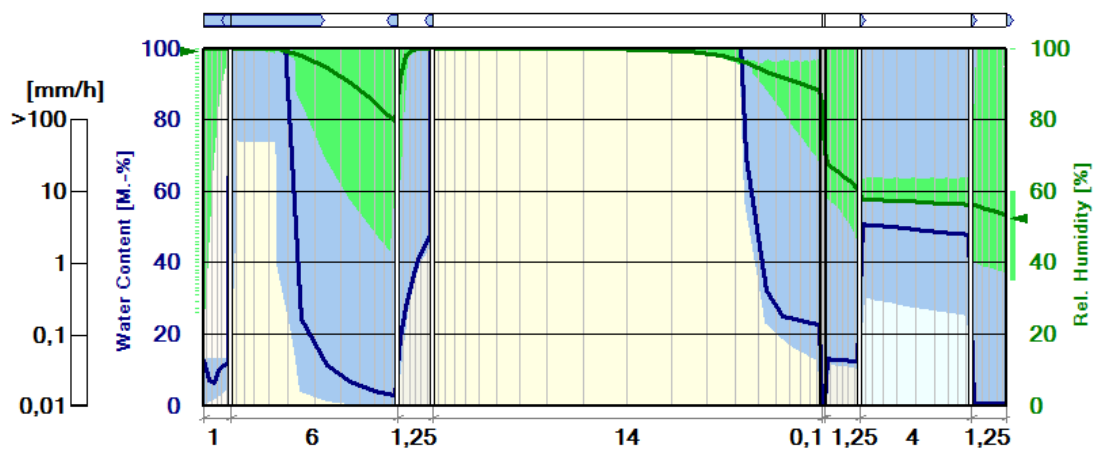
Figuur 87: Uitdroging na drie jaar van een constructie met EPS + Cellulose

Bij de combinatie van EPS met cellulose zien we duidelijk dat het vocht maar traag uitdroogt. Het effect van uitdroging is na drie jaar echter nog niet over de volledige breedte van de isolaties merkbaar. Daarvoor is er nog veel meer tijd nodig. Bijgevolg zal de OSB-plaat tussen de isolatielagen ook nog zijn capillaire vochtgehalte bevatten en dus groot risico lopen op schimmelvorming.



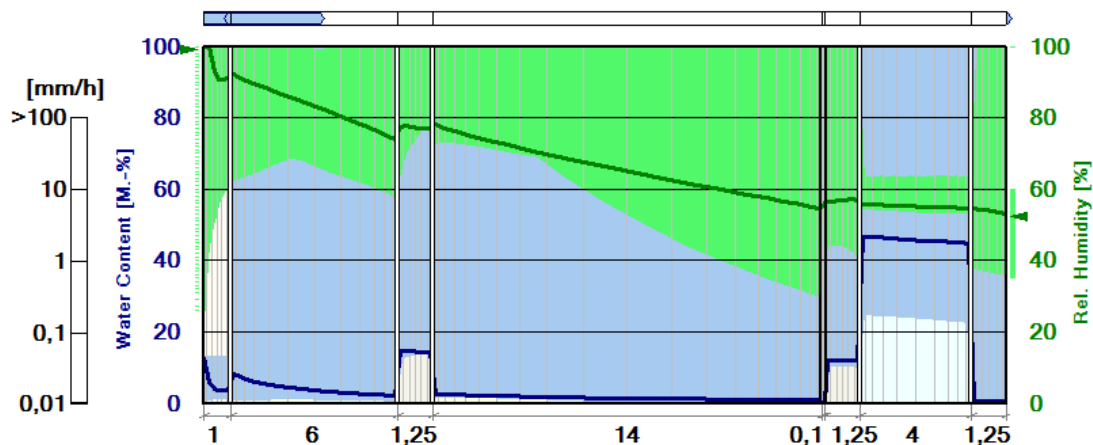
Figuur 88: Uitdroging na drie jaar van een constructie met EPS + MW

Door de grotere dampdoorlaatbaarheid van minerale wol is dit isolatiemateriaal na drie jaar zo goed als over de volledige dikte uitgedroogd. Doordat de EPS echter zo dampdicht is, kan dit niet vlot genoeg naar buiten uitdrogen. De OSB-plaat staat dan ook nog erg vochtig en kan aanleiding geven tot schade.



Figuur 89: Uitdroging na drie jaar van een constructie met MW + Cellulose

De isolatiematerialen zijn nog niet volledig uitgedroogd. De cellulose droogt maar heel langzaam uit. De minerale wol droogt iets sneller uit naar buiten. De binnenkant van de minerale wol is het eerst uitgedroogd. Door zijn grote dampdoorlaatbaarheid migreert het vocht van de binnenzijde naar de buitenzijde. Dus er passeert voortdurend vocht aan de buitenste zijde. Hierdoor zal de buitenzijde het traagst uitdrogen. De OSB-plaat is na drie jaar ook langzaam aan het uitdrogen.



Figuur 90: Uitdroging na drie jaar van een constructie met MW + MW

Bij twee keer minerale wol is het vochtgehalte over de volledige breedte van de isolatielagen gezakt en uitgedroogd. Ook de OSB-plaat bereikt, op dit tijdstip een waarde onder de 20 massaprocent.

7.4.7. Invloed van initieel vochtgehalte op uitdroging

Het initieel vochtgehalte speelt een grote rol in het hygrothermisch gedrag van een constructie. Vlak na de opbouw is er vaak nog bouwvocht aanwezig in de constructie. Dit moet de kans krijgen om uit te drogen.

Daarom eist men dat voor het aanbrengen van een ETIC-systeem de dragende constructie moet uitgedroogd zijn. Het materiaal moet zijn evenwichtsvochtgehalte bereikt hebben (in functie van de porositeit van de ondergrond en de relatieve vochtigheid RV). Welke gevolgen heeft het echter indien dit niet het geval is? Zeker in het geval van een houtskeletbouw is vocht in de constructie een nadelige situatie.

Standaard gaat WUFI uit van een initieel vochtgehalte bij een relatieve vochtigheid van 80%. Door te simuleren bij een initieel vochtgehalte bij een relatieve vochtigheid van 100% in elk materiaal, wordt de een zeer nadelige situatie onderzocht. Bij een relatieve vochtigheid van 100% is het capillair vochtgehalte bereikt. Dit laat echter buiten beschouwing dat materialen ook oververzadigd kunnen zijn en meer vocht kunnen opnemen dan hun capillair vochtgehalte bij $RV = 100\%$.

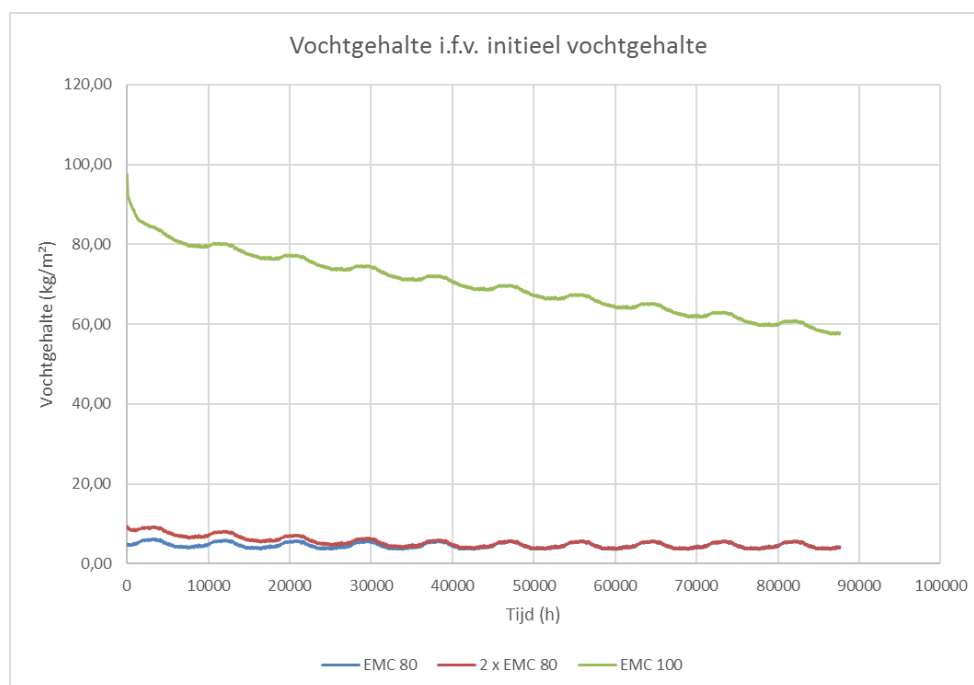
In tegenstelling tot de standaard startwaarden van 80% schrijven de normen andere regels voor voor het simuleren van het initiële vochtgehalte. ASHRAE160 [31] schrijft voor dat voor alle bouwmaterialen, behalve beton, het initieel vochtgehalte gelijk moet zijn aan twee keer de EMC80-waarde. Bij beton is dit twee keer de EMC90-waarde. Indien er specifieke maatregelen worden getroffen om het nat worden van de constructie tijdens de uitdrogingsfase te voorkomen, worden de EMC80 en EMC90-waarde gebruikt, zonder die te verdubbelen (Dit zijn de waarden die WUFI standaard aangeeft).

De simulaties worden uitgevoerd voor een initieel vochtgehalte van EMC80, twee keer EMC80 en EMC100, wat overeenkomt met het capillair vochtgehalte (relatieve vochtigheid van 100%). Tabel 12 geeft de initiële vochtgehaltenes per materiaal.

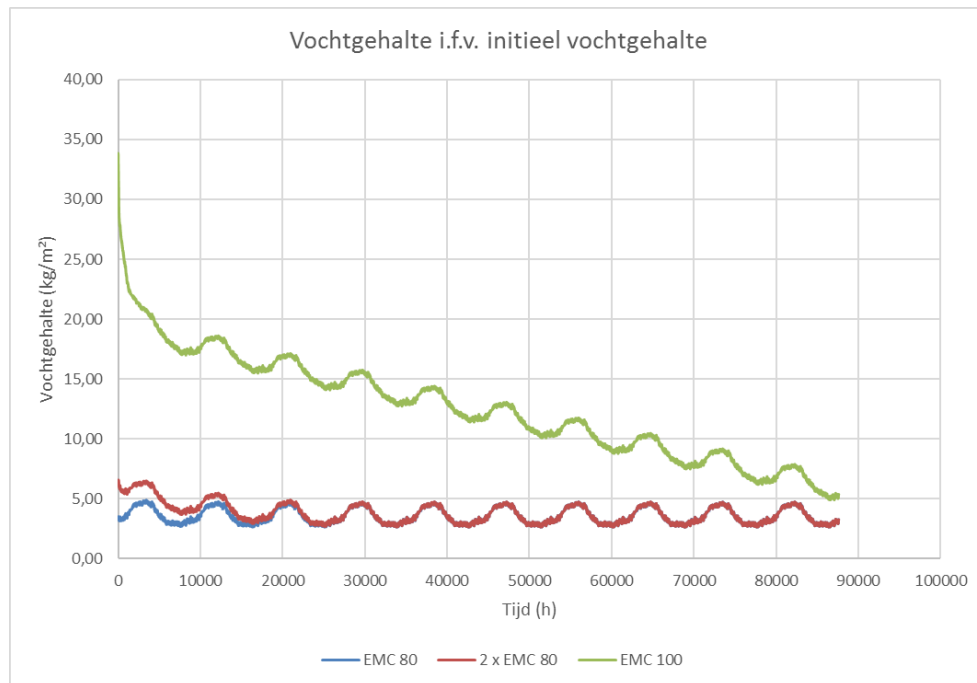
Materiaal	EMC80 (kg/m ³)	2 x EMC80 (kg/m ³)	EMC100 (kg/m ³)
Minerale pleister	45	90	210
Kunstharsgebonden pleister	10	20	100
EPS	1,79	3,58	44,79
Minerale wol	1,79	3,58	44,79
Cellulose	12	24	500
OSB	92	184	636
Dampscherm	0	0	0,05
Gipskartonplaat	6,3	12,6	400
Luchtlaag	1,88	3,76	47,1

Tabel 12: De geteste initiële vochtwaardes

De simulaties worden uitgevoerd over een periode van 10 jaar. De verschillende combinaties van isolatiematerialen worden bestudeerd.

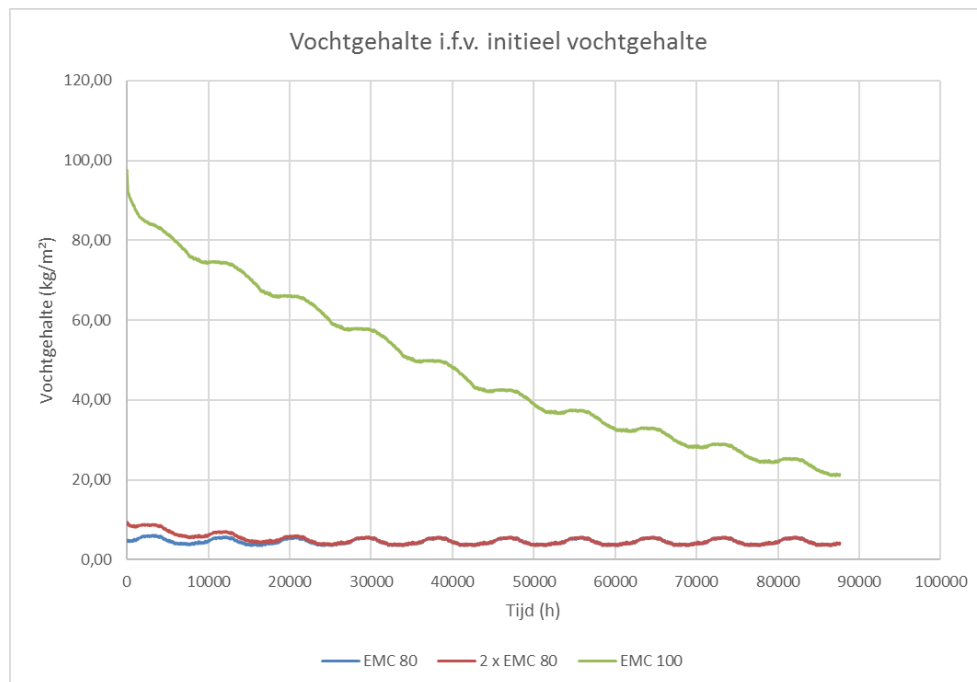


Figuur 91: Het vochtgehalte i.f.v. het initiële vochtgehalte in een houtskeletbouw met EPS en Cellulose-isolatie over een periode van 10 jaar



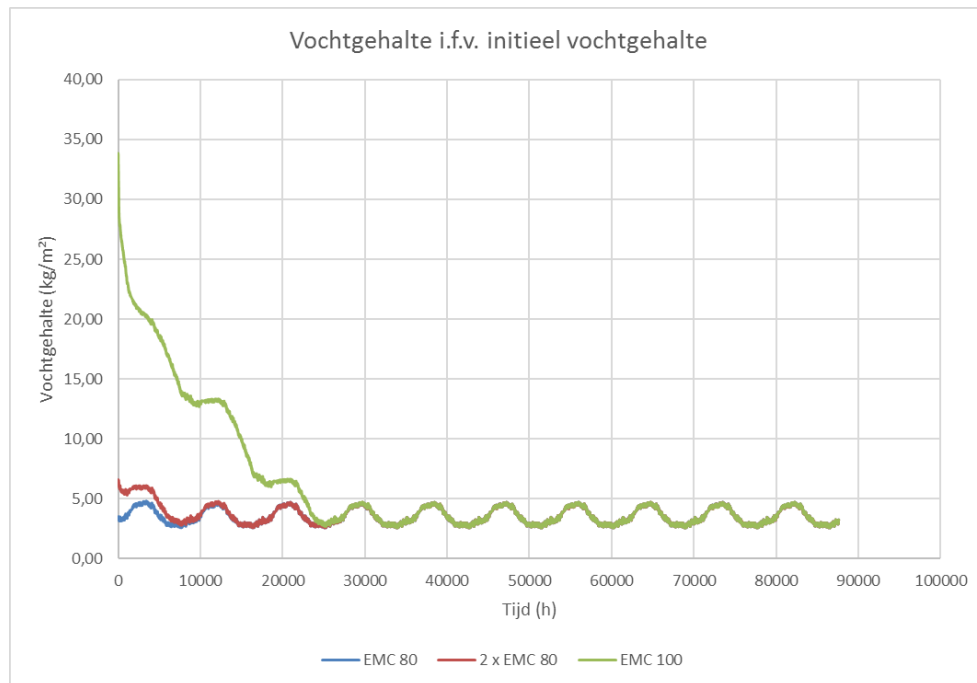
Figuur 92: Het vochtgehalte i.f.v. het initiële vochtgehalte in een houtskeletbouw met EPS en MW over een periode van 10 jaar

Wanneer er gewerkt wordt met MW daalt het vochtgehalte sneller en is het totale vochtgehalte ook lager (Figuur 92). Dit komt doordat cellulose (Figuur 91) een grote vocht opslagcapaciteit heeft, terwijl deze van EPS en MW eerder beperkt is.



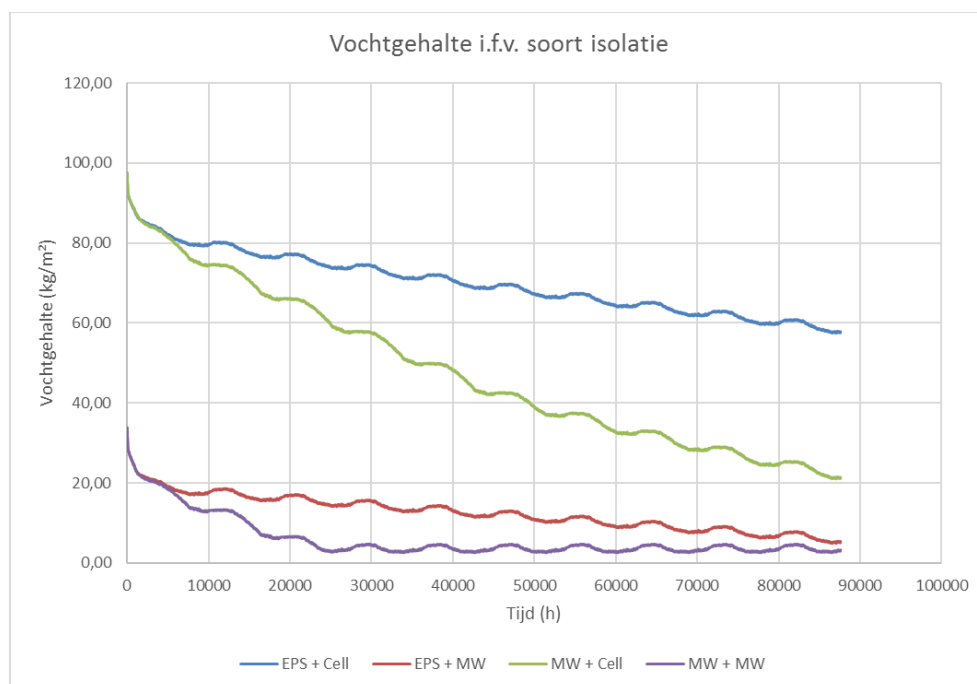
Figuur 93: Het vochtgehalte i.f.v. het initiële vochtgehalte in een houtskeletbouw met MW en Cellulose-isolatie over een periode van 10 jaar

Het geval met MW en Cellulose is gelijkaardig aan de eerste opbouw met EPS en Cellulose. Het is door de cellulose dat het vochtgehalte hoger is dan bij de andere twee opbouwen.



Figuur 94: Het vochtgehalte i.f.v. het initiële vochtgehalte in een houtskeletbouw met twee keer MW als isolatie

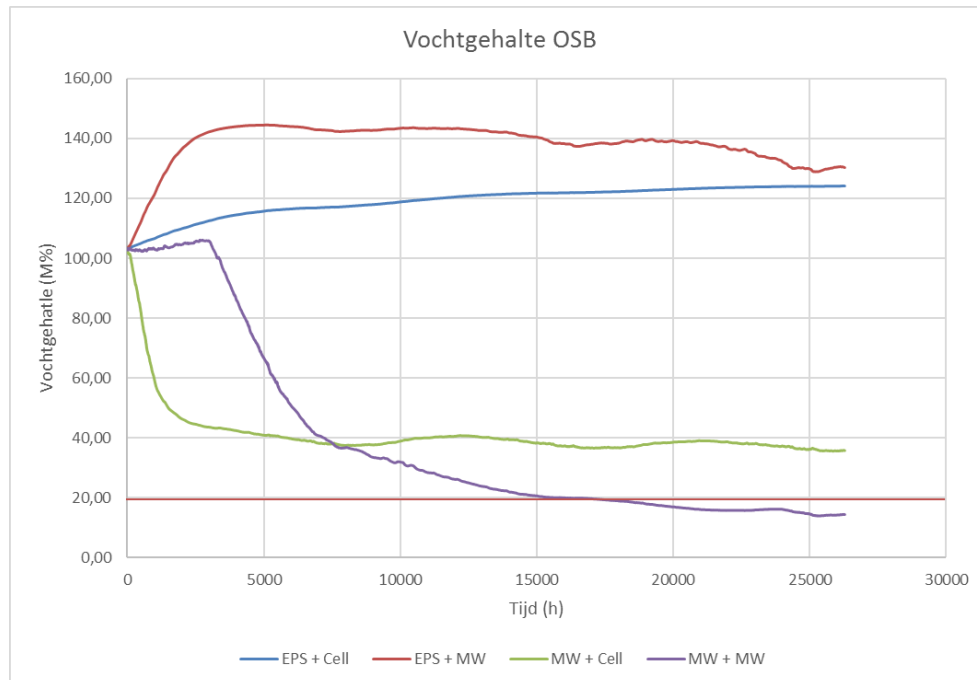
Het verschil tussen een op voorhand afgedekte constructie (EMC 80) of niet (2 x EMC 80), is slechts klein en is na een jaar weggewerkt. Het is duidelijk dat de constructie met een initieel vochtgehalte van 100% in alle materialen onmogelijk in staat is snel uit te drogen. Het duurt in het beste geval een aantal jaren voor de constructie een evenwichtsvochtgehalte bereikt (Figuur 94).



Figuur 95: Vochtgehalte bij opbouw met verschillende isolatiematerialen bij een initiële vochtigheid van 100% over een periode van 10 jaar

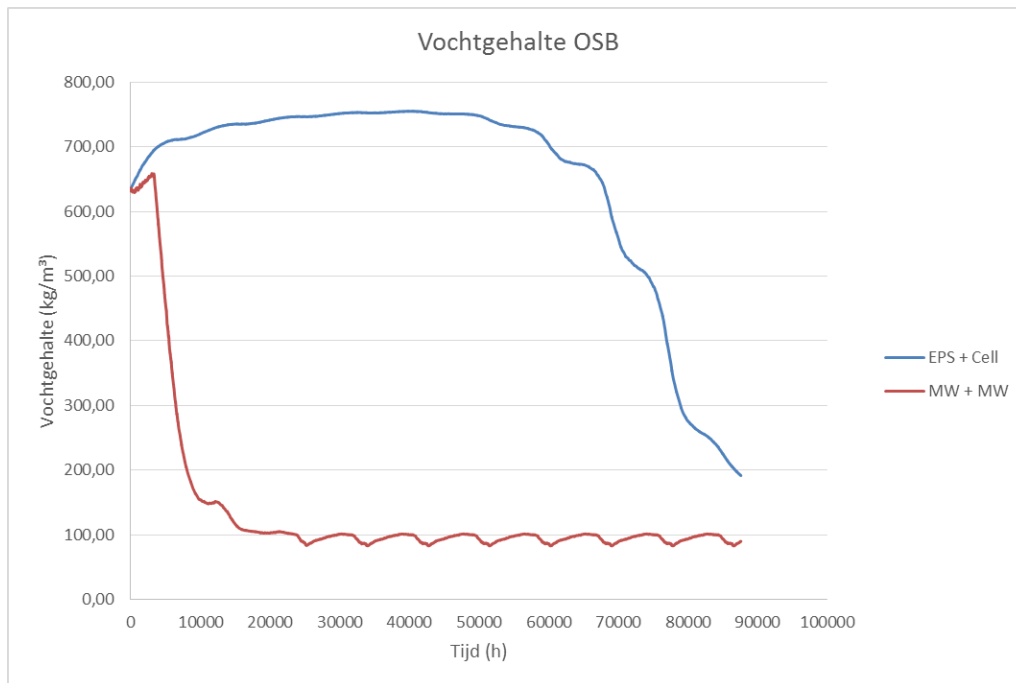
Uit Figuur 95 blijkt dat het vochtgehalte bij een gevelopbouw met twee maal minerale wol zich het snelst herstelt bij een initiële vochtigheid van 100%. MW is dan ook het meest dampopen materiaal en zal het vocht het snelst laten uitdrogen.

Uit figuur 95 blijkt ook dat de opbouw met EPS en Cellulose op termijn het meeste vocht vasthoudt. Als men gaat kijken naar de precieze verdeling van het vocht in de lagen is duidelijk dat OSB initieel nog meer vocht opzuigt, terwijl de meeste andere materialen gaan uitdrogen.



Figuur 96: Vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat i.f.v. de gekozen isolatiematerialen, bij een initieel vochtgehalte van de materialen van 100 % (capillair vochtgehalte)

De OSB-plaat is het meest schadegevoelig. Wanneer er wordt uitgegaan van een initieel vochtgehalte van 100%, dit komt overeen met het capillaire vochtgehalte van de materialen, kan men bovenstaand verloop van het vochtgehalte bestuderen (Figuur 96). De rode lijn op 20 M% geeft de grens aan waaronder OSB moet blijven om geen schimmelrisico te lopen. Op termijn komt enkel de opbouw met twee maal minerale wol onder deze grens. Deze trend is te zien voor alle windrichtingen. Wanneer er wordt gekeken op langere termijn, krijgen we volgende trend:

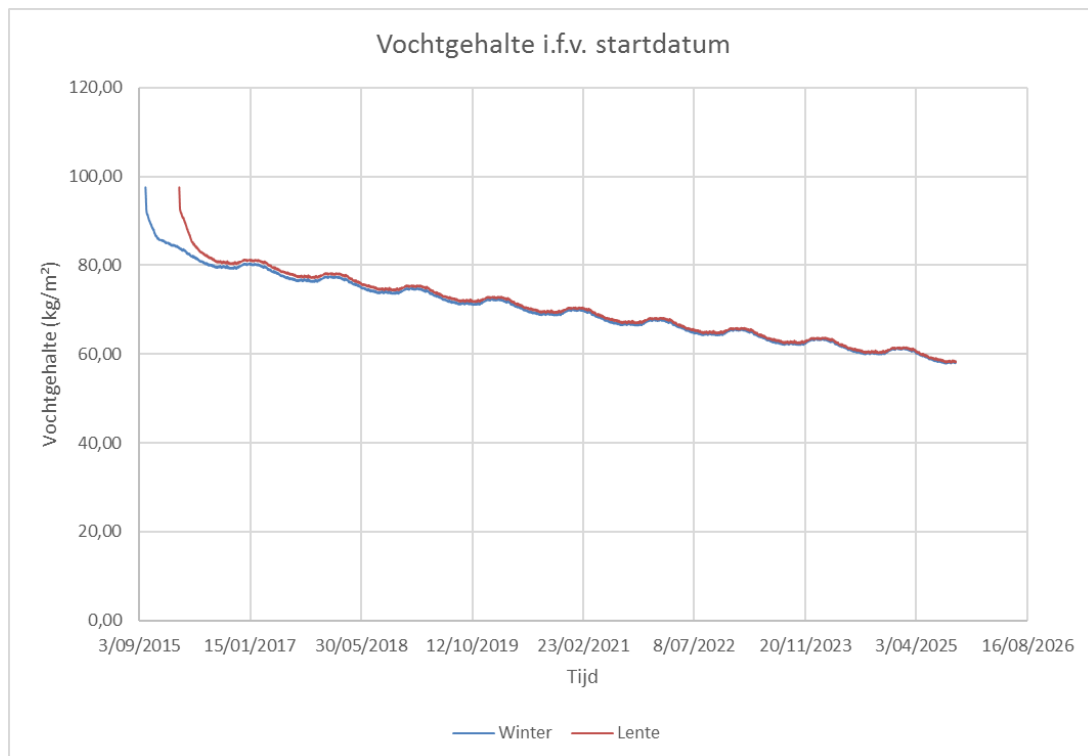


Figuur 97: Vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat i.f.v. de gekozen isolatiematerialen, bij een initieel vochtgehalte van 100%

Bovenstaande grafiek duidt duidelijk aan dat bij de opbouw met EPS en cellulose het vochtgehalte in de OSB-plaat initieel gaat stijgen en pas na een aantal jaren begint uit te drogen. Dit is heel nefast. Wanneer de constructie wordt opgetrokken met MW kan het vocht veel sneller uitdrogen. Dit kan door de grotere dampdoorlaatbaarheid van MW. Hierdoor blijft het vocht niet vastzitten in de plaat, maar kan het naar buiten migreren. Het stagneert bij een vochtgehalte van 100 kg/m³. Dit komt overeen met een vochtgehalte in massaprocent van minder dan 20 M%. Dit is een goede waarde. De waarde wordt echter pas na meer dan 2 jaar bereikt, waardoor de kans bestaat dat er toch schade optreedt.

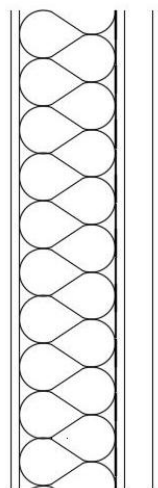
7.4.8. Datum van uitvoering

Kan de startdatum van de simulaties, dus de constructiedatum van de gevel ook een invloed hebben op het hygrothermisch gedrag? We starten van een initieel verzadigde structuur. De startdatum ligt eens in de winter en eens in de lente.



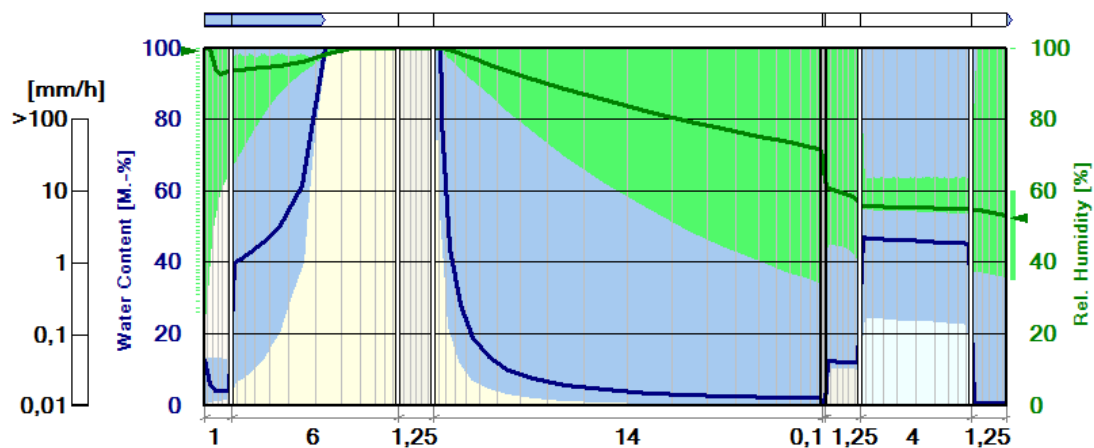
Figuur 98: Vochtgehalte i.f.v. startdatum

De grafiek vertoont geen merkbaar verschil tussen de twee startdata. De simulatie gestart in de lente bereikt al gauw de vochtgehaltes die de in de winter gebouwde constructie bereikt. We kunnen eens onderzoeken of het voordeliger is om een initieel verzadigde (of zeer vochtige) basisconstructie te laten uitdrogen om pas in de lente de afwerking (het ETIC-systeem) erop aan te brengen.



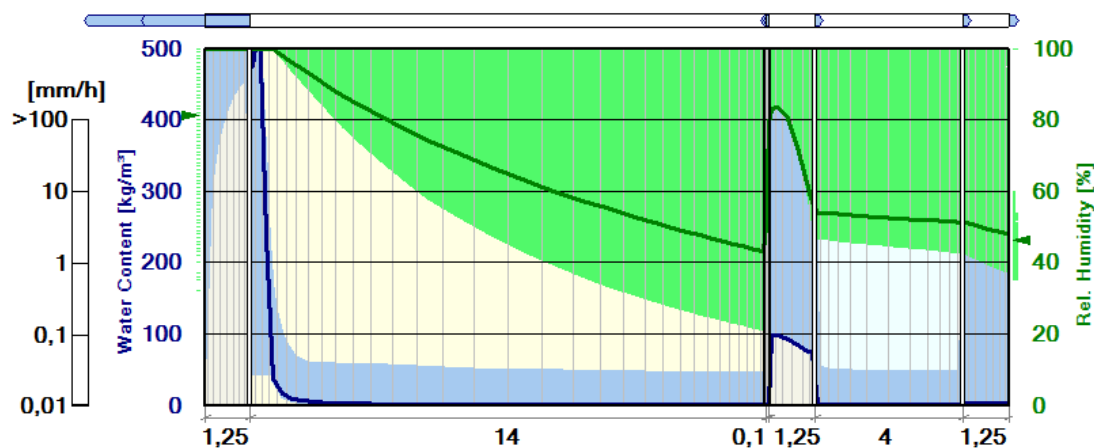
Figuur 99: Basisconstructie zonder buitenste isolatielaag en pleister

Het uitdrogingsprofiel voor een volledige constructie, opgebouwd in de winter, ziet er na 3 jaar, op 1 oktober 2019 als volgt uit:



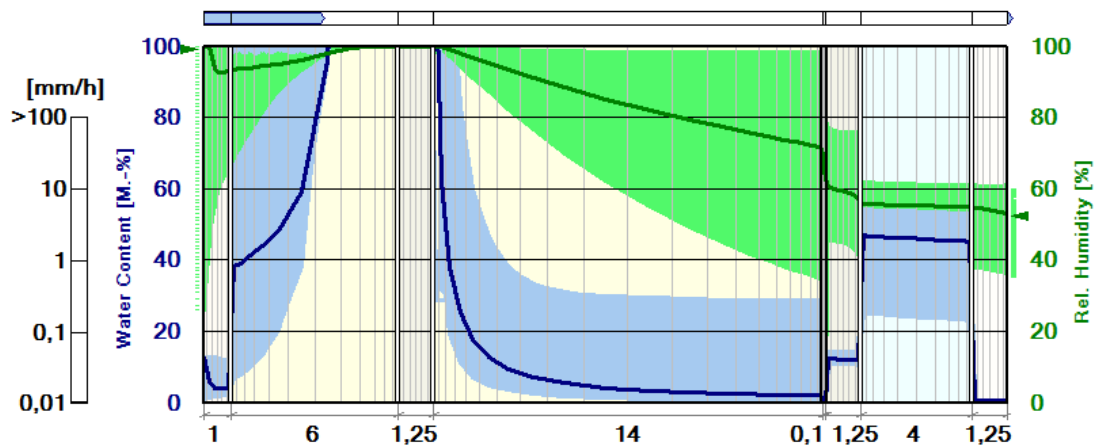
Figuur 100: Uitdrogingsprofiel op 1 oktober 2019 voor een simulatie met startdatum 1 oktober 2016

De basisconstructie wordt verondersteld gebouwd te zijn voor de winter en de simulatie hiervoor start op 1 oktober 2016. Op 1 maart 2017 is het uitdrogingsprofiel als volgt:



Figuur 101: Uitdrogingsprofiel op 1 maart 2017 voor een simulatie met startdatum 1 oktober 2016

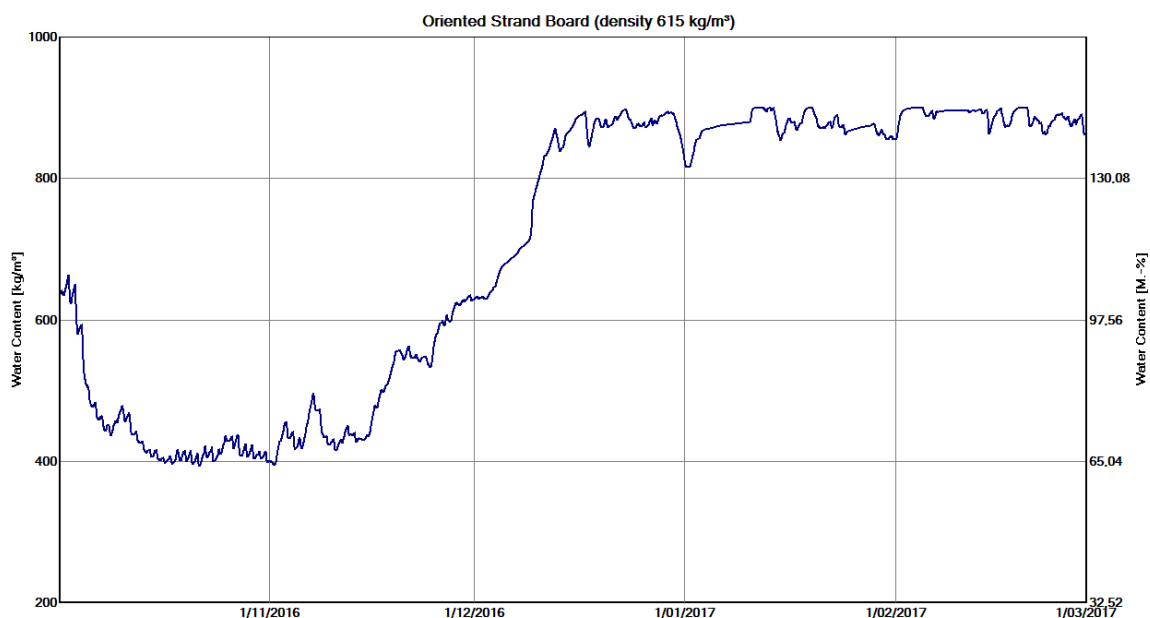
Door de grote dampdichtheid van de OSB-plaat krijgt de constructie niet veel kans om snel uit te drogen naar buiten. De minerale wol is wel zo goed als volledig uitgedroogd. Wanneer de vochtgehalten na de eerste simulaties worden gebruikt als startwaardes bij de simulatie die start vanaf de lente, is Figuur 102 het resultaat. De simulatie start nu op 1 maart 2017 en loopt tot 1 oktober 2019.



Figuur 102: Uitdrogingsprofiel op 1 oktober 2019 voor een simulatie met startdatum 1 maart 2017 en de initiële vochtgehaltes bekomen uit de vorige simulatie

Bovenstaand profiel kan nu vergeleken worden met figuur 100. In de EPS-laag (de buitenste isolatielaag) kan een heel klein verschil in vochtgehalte opgemerkt worden. De OSB-plaat is in beide gevallen verzadigd. Veel effect lijkt het dus bij deze opbouw niet te hebben.

Als we het vochtgehalte van de OSB-plaat in detail bekijken bij de simulatie van de basisconstructie zien we dat het vochtgehalte nog gaat stijgen, i.p.v. uitdrogen. Dit is omdat al het vocht uit de constructie naar buiten wil. De dampdichtheid van OSB verhindert dit voor een deel, waardoor er een vochttopstapeling is in de OSB-plaat.



Figuur 103: Vochtgehalte in de OSB-plaat bij een simulatie van een basisconstructie over een periode van enkele maanden

Ook wanneer enkel met een initieel verzadigde OSB-plaat wordt gewerkt en de andere materialen een EMC80-waarde hebben, stijgt het vochtgehalte in de OSB-plaat naar meer dan 130 massaprocent (Figuur 103). Wachten met het aanbrengen van de afwerking lijkt dus in dit geval niet zo veel zin te hebben.

7.4.9. Soort dampscherm

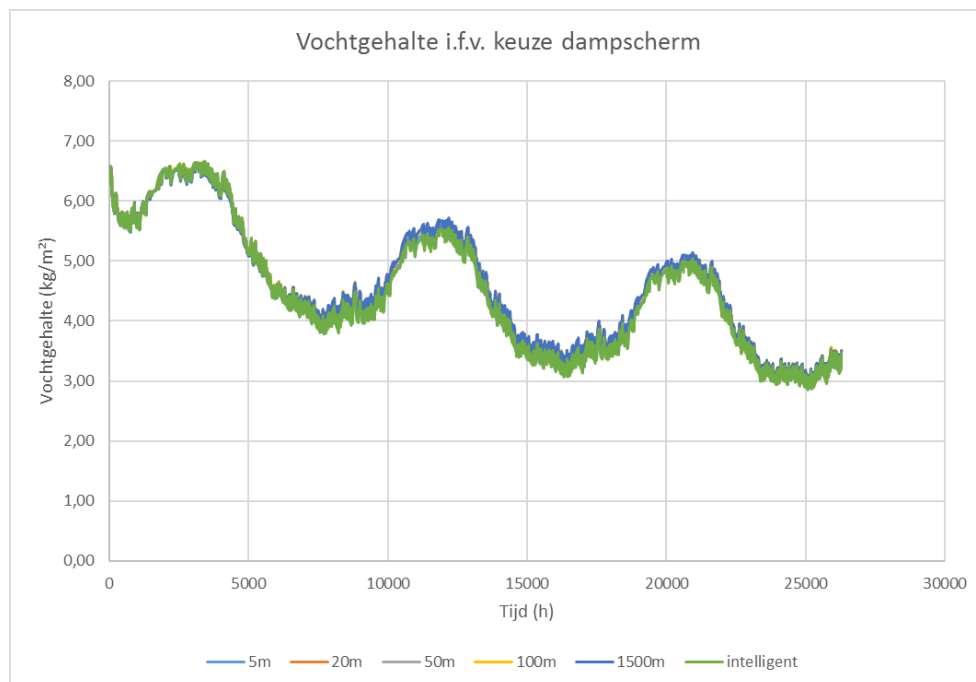
De simulaties worden eens uitgevoerd met verschillende dampschermen. De Sd-waardes worden gevarieerd, en er wordt ook een opbouw gesimuleerd met een intelligente damprem.

Een intelligente damprem zal tijdens de winter als een dampscherm functioneren[32]. De relatieve vochtigheid van de omgeving van de folie is dan laag waardoor de Sd-waarde van de folie hoog wordt. Het vocht uit interieur kan dus niet via dampdiffusie in de wand terecht komen. Als er zich toch vocht zou accumuleren in de constructie tijdens de winter, zal dit vocht door de hogere buitentemperatuur in de zomer naar de binnenkant van de isolatie migreren. De relatieve vochtigheid rond de folie stijgt dan en dit zorgt ervoor dat de folie dampopener wordt zodat het vocht doorheen de folie de constructie kan verlaten.

RV	μ	Sd
[%]	[-]	[m]
0	26000	26
0,175	26000	26
0,25	16000	16
0,5	6900	6,9
0,725	1500	1,5
0,9	320	0,32
0,975	250	0,25

Tabel 13: De waterdampdiffusieweerstand i.f.v. de relatieve vochtigheid voor een intelligent dammscherm

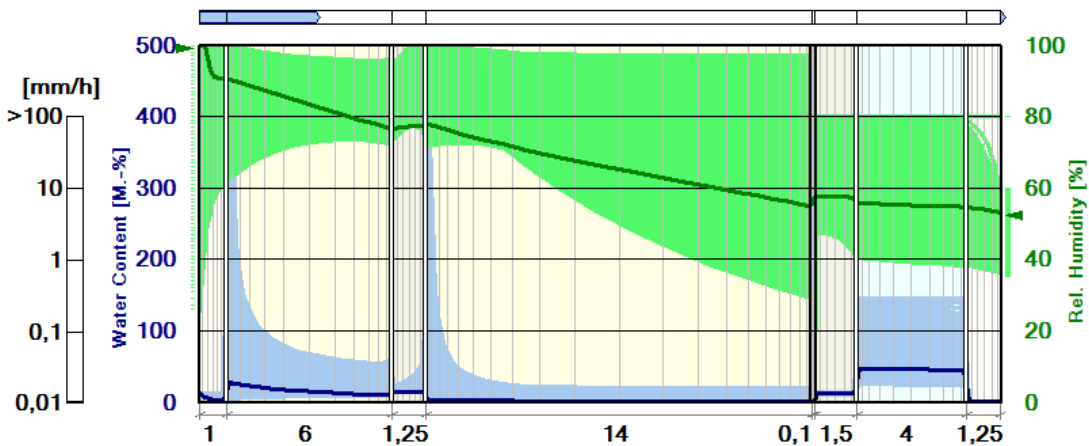
Bovenstaande tabel geeft de waterdampdiffusieweerstand van het intelligent dampscherm in functie van de relatieve vochtigheid.



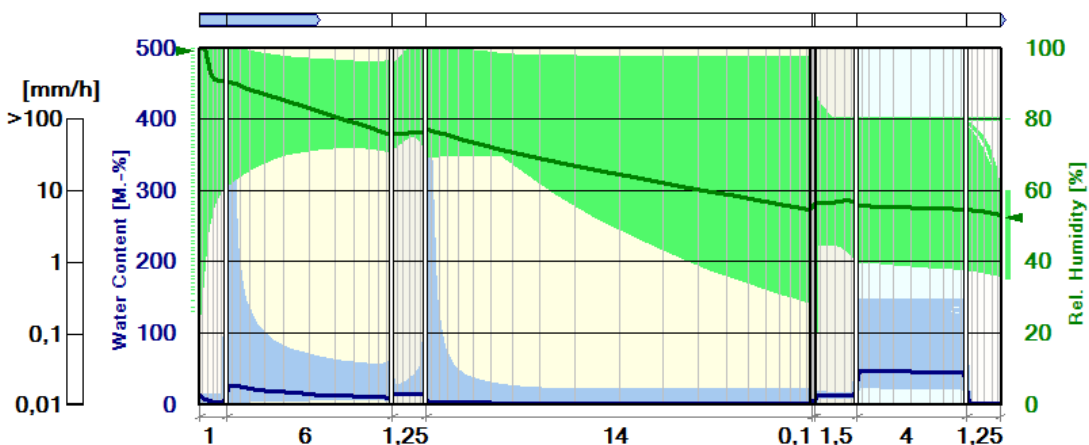
Figuur 104: Vochtgehalte i.f.v. de keuze van het dampscherm

Het absolute verschil in vochtgehalte t.g.v. een andere keuze van dampscherm is eerder klein. Bij een intelligent dampscherm is het vochtgehalte in de constructie een beetje kleiner.

We zoomen eens in op het uitdrogingsprofiel van de muur om de omgeving van het dampscherm te vergelijken bij een gewoon en intelligent dampscherm. Het profiel is een profiel na 3 jaar uitdroging.

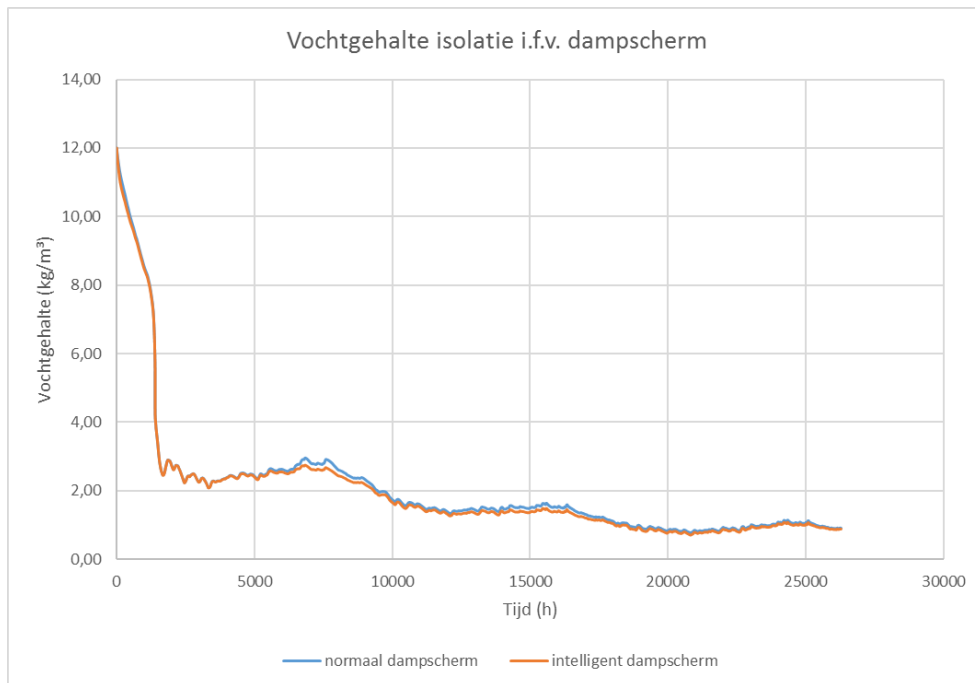


Figuur 105: Uitdrogingsprofiel van een muuropbouw met een dampscherm met $sd = 1500m$

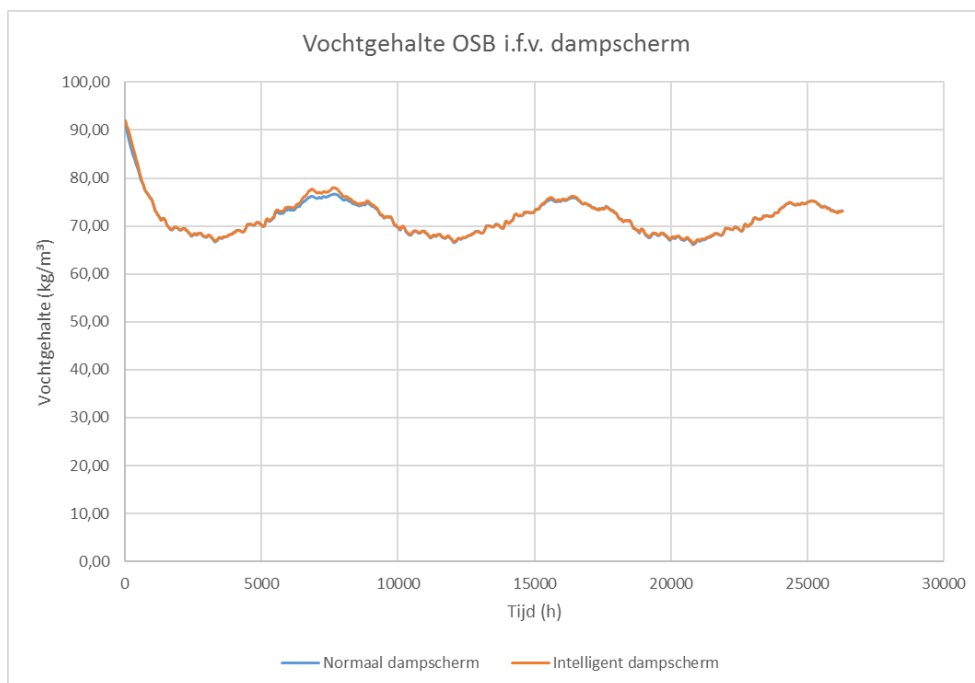


Figuur 106: Uitdrogingsprofiel van een muuropbouw met een intelligent dampscherm

Er lijkt weinig verschil te zitten in het profiel en in de vochtgehalten in de muur door de keuze van een ander soort dampscherm. Dit wordt bevestigd wanneer de vochtgehalten in de OSB-plaat en isolatieplaat in het houtskelet vergeleken worden bij verschillende dampschermen (Figuren 107 en 108).

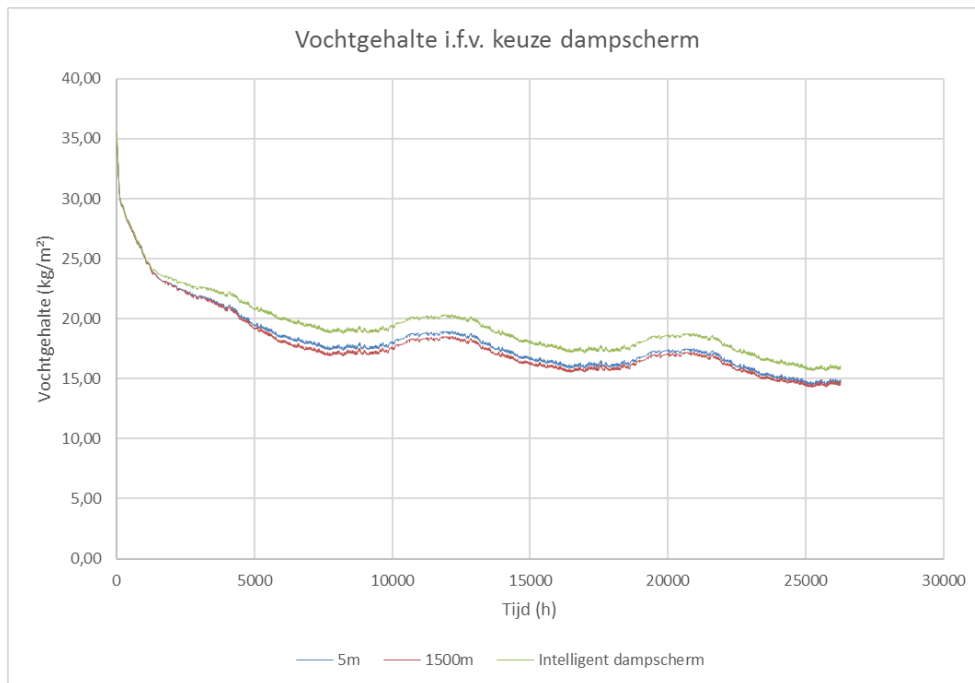


Figuur 107: Vochtgehalte in de binnenste isolatielaag i.f.v. het gekozen dampscherm



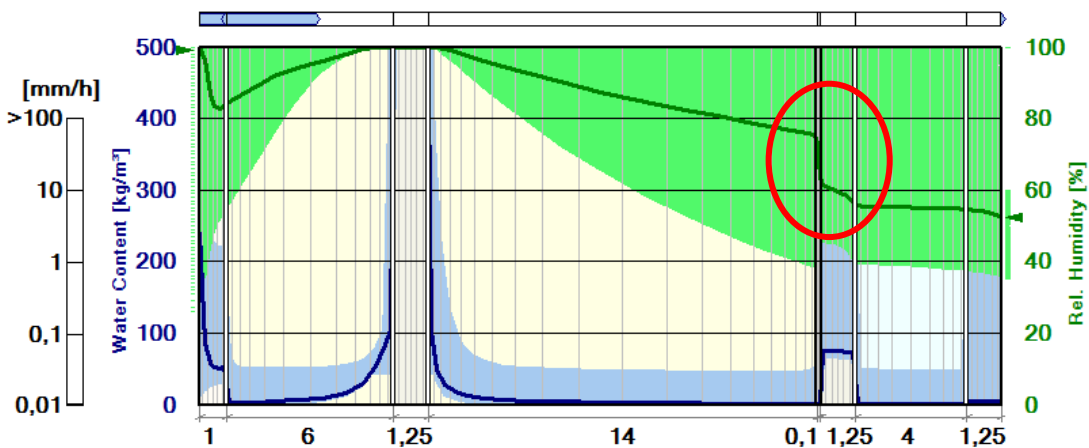
Figuur 108: Vochtgehalte in de binnenste OSB-plaat i.f.v. het gekozen dampscherm

Dit is echter bij standaard initiële vochtgehaltes. Zorgt een hoger initieel vochtgehalte voor een groter verschil? Dezelfde opbouw wordt eens gesimuleerd met verzadigde materialen, dus met een initieel vochtgehalte van EMC100.

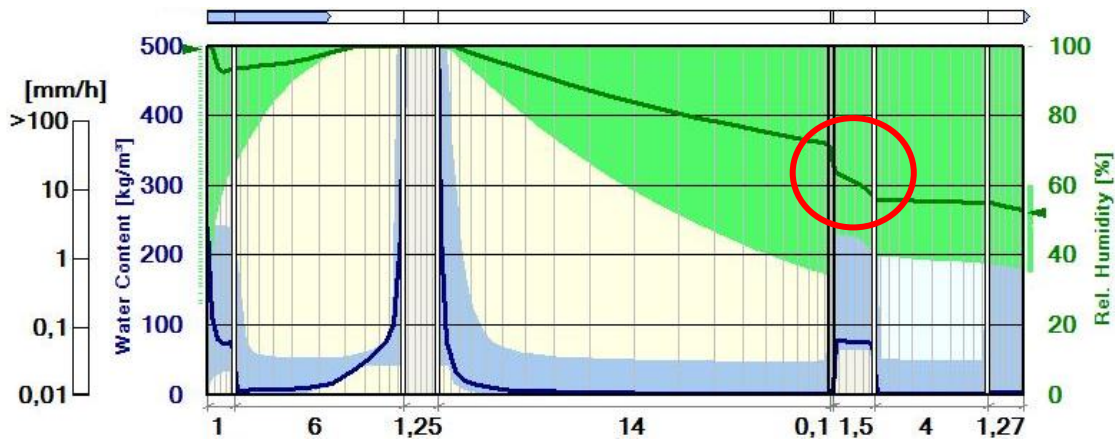


Figuur 109: Vochtgehalte i.f.v. de keuze van het dampscreen bij een initieel verzadigde constructie, EPS + MW

Bij een initieel vochtgehalte van 100% relatieve vochtigheid, lijkt het intelligente dampscreen net nadeliger te werken. De waterdampdiffusieweerstand van het intelligente dampscreen bij een relatieve vochtigheid van 100% is dan ook een stuk lager dan bij een normaal dampscreen (0,25m tegenover 5m of meer). De uitdrogingsprofielen na drie jaar zien er als volgt uit.



Figuur 110: Uitdrogingsprofiel na 3 jaar voor een gewoon dampscreen

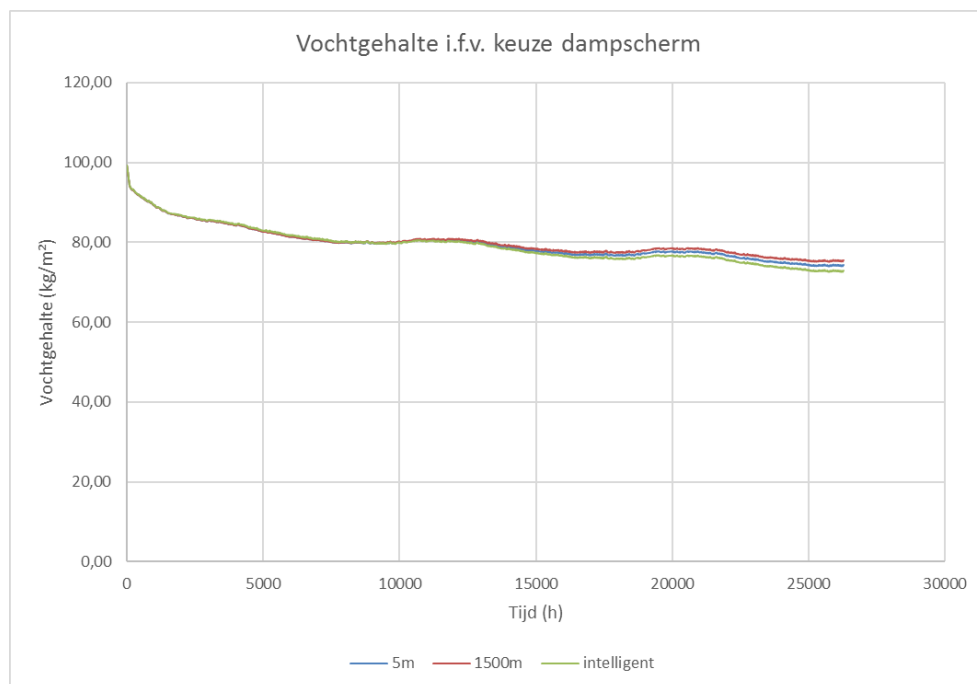


Figuur 111: Uitdrogingsprofiel na drie jaar voor een intelligent dampscherm

De relatieve vochtigheid aan de binnenzijde van de isolatielaag bereikt iets lagere waarden bij een intelligent dampscherm (Figuur 111) in vergelijking met de binnenzijde van de isolatielaag bij een gewoon dampscherm (Figuur 110). Het verschil in relatieve vochtigheid tussen de minerale wol en de OSB-plaat is bij het intelligente dampscherm kleiner dan bij een standaard dampscherm. De relatieve vochtigheid maakt een kleinere sprong door het dampscherm (rode cirkels).

In het geval van EPS met MW werkt een intelligent dampscherm dus beter dan een normaal dampscherm bij normale vochtgehaltes; bij hoge vochtgehaltes zakt de dampdiffusieweerstand zienderogen en werkt het in extreme gevallen zelfs negatief.

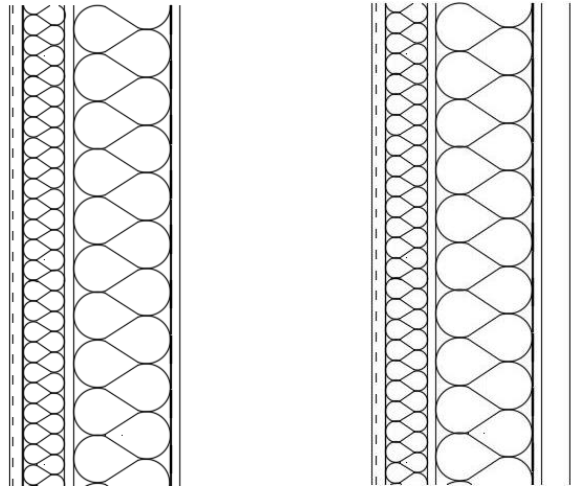
Bij EPS en cellulose is de keuze voor een intelligent dampscherm bij hoge vochtgehaltes wel positief. Het verschil in vochtgehaltes i.f.v. de keuze van het dampscherm is echter klein.



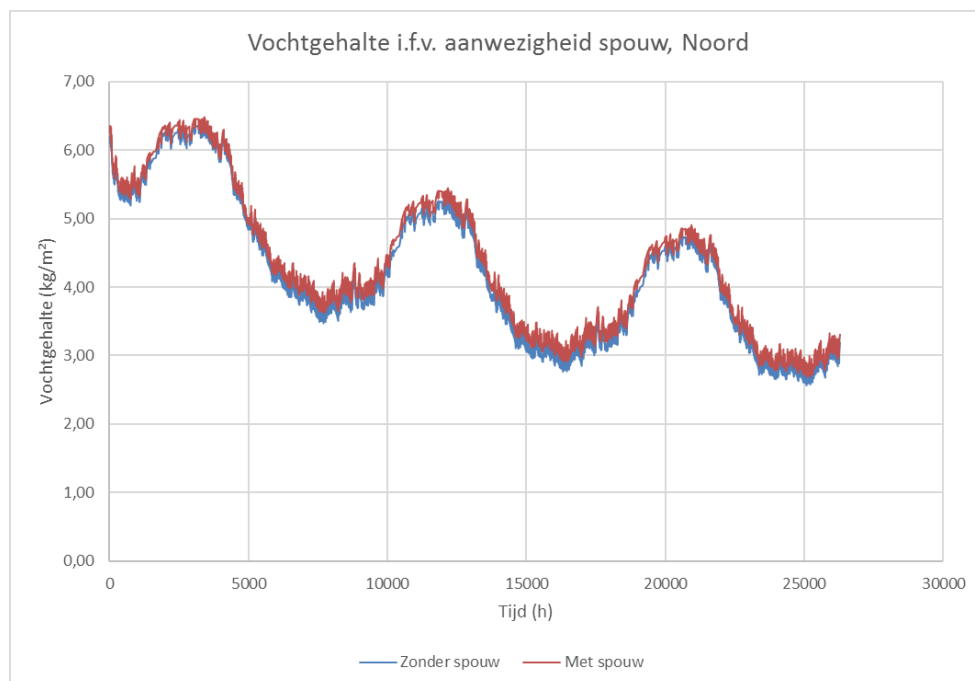
Figuur 112: Vochtgehalte i.f.v. de keuze van het dampscherm bij een initieel verzadigde constructie, EPS + Cellulose

7.4.10. Aanwezigheid van een elektrospouw

Vaak wordt er bij houtskeletbouw aan de binnenkant nog een elektrospouw toegevoegd om leidingen e.d. in kwijt te kunnen zonder de structuur aan te tasten. Heeft deze elektrospouw een noemenswaardige invloed op de uitdrogingscapaciteit?

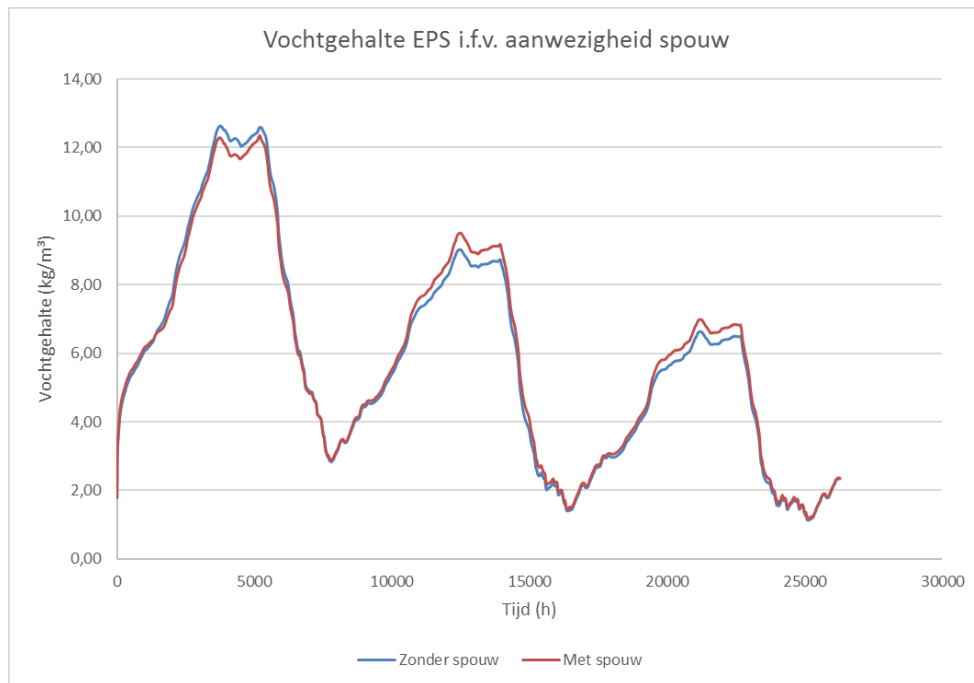


Figuur 113: Opbouw zonder en met elektrospouw

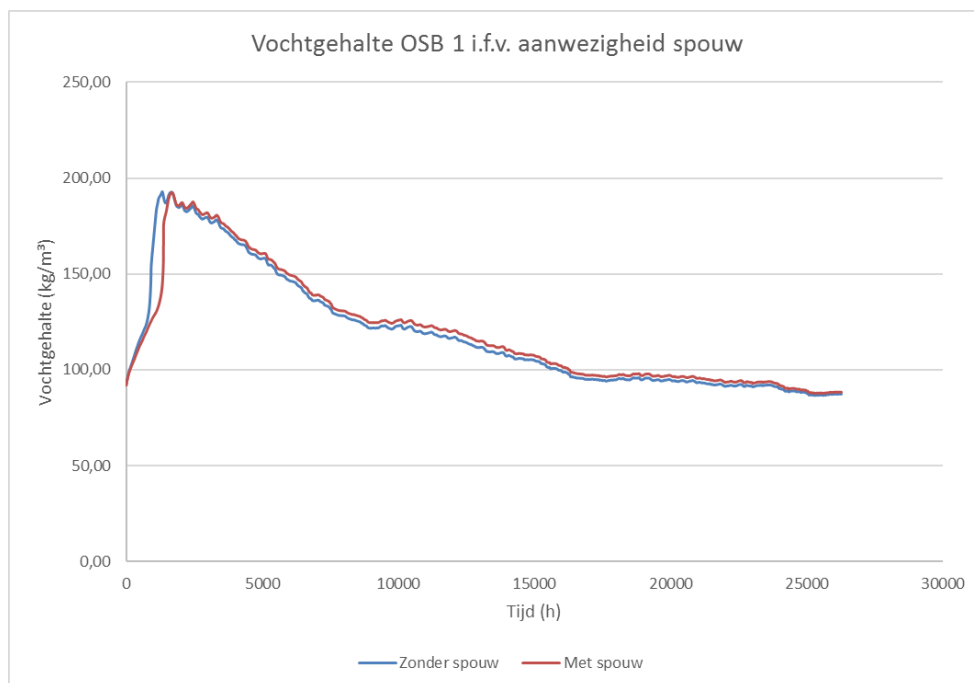


Figuur 114: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van een elektrospouw bij een noordelijke gevel

In alle oriëntaties tekent zich hetzelfde patroon af. Het vochtgehalte in een gevelopbouw met elektrospouw ligt iets hoger dan het vochtgehalte in een opbouw zonder spouw. Is dit enkel het extra vocht uit de extra materialen, of gaat het vocht ook elders in de constructie hoger zijn? Dit kan men bestuderen door het vochtgehalte in elke laag onder de loop te nemen.



Figuur 115: Vochtgehalte in EPS i.f.v. de aanwezigheid van een elektrospouw bij een noordelijke constructie



Figuur 116: Vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat i.f.v. de aanwezigheid van een elektrospouw bij een noordelijke constructie

Hierdoor zien we dat de verschillende materialen op zich ook meer vocht in zich dragen. Het vocht bevindt zich dus niet louter in de luchtspouw en de nieuwe OSB-plaat. De constructie heeft een extra dampdiffusieweerstand door de extra materialen waardoor de constructie trager uitdroogt.

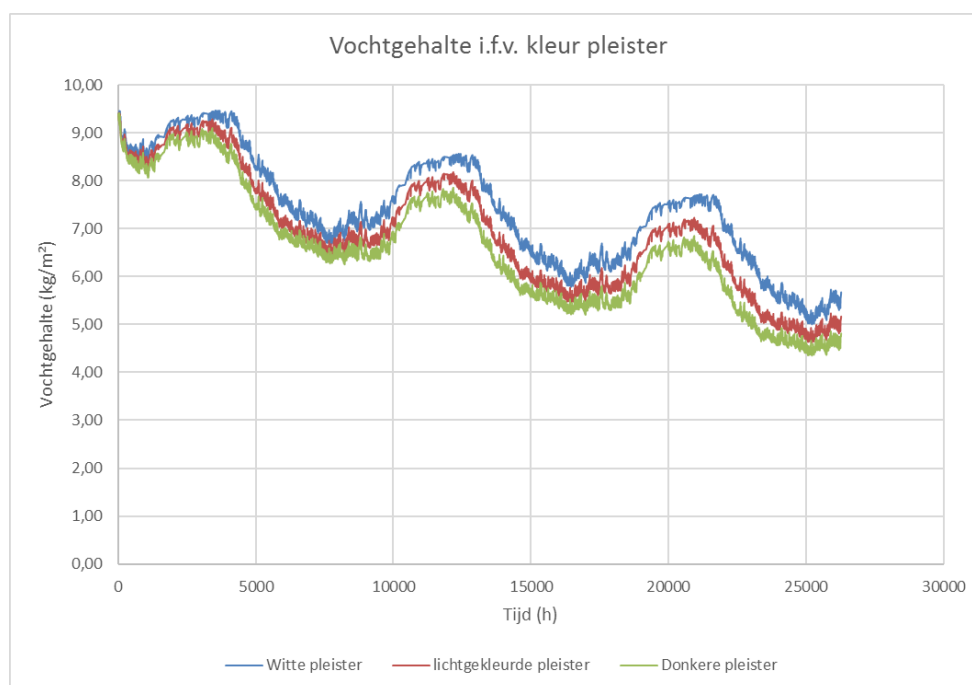
7.4.11. Invloed van kleur op uitdroging

Men kan de thermische belasting van de pleister beperken door het aanwenden van pleisters met een lichte kleur. Welk effect heeft het kleur echter op het hygrothermisch gedrag? Lichte kleuren komen overeen met een lagere absorptiefactor voor kortgolvlige straling, donkere kleuren met een hoge absorptiefactor. Een absorptiefactor van 0,2 voor witte pleisters is echter heel optimistisch. Daarom wordt er in voorgaande en volgende simulaties telkens uitgegaan van een lichtgekleurde pleister.

Kleur	Absorptiefactor
Witte pleister	0,2
Lichtgekleurde pleister	0,4
Donkere pleister	0,6

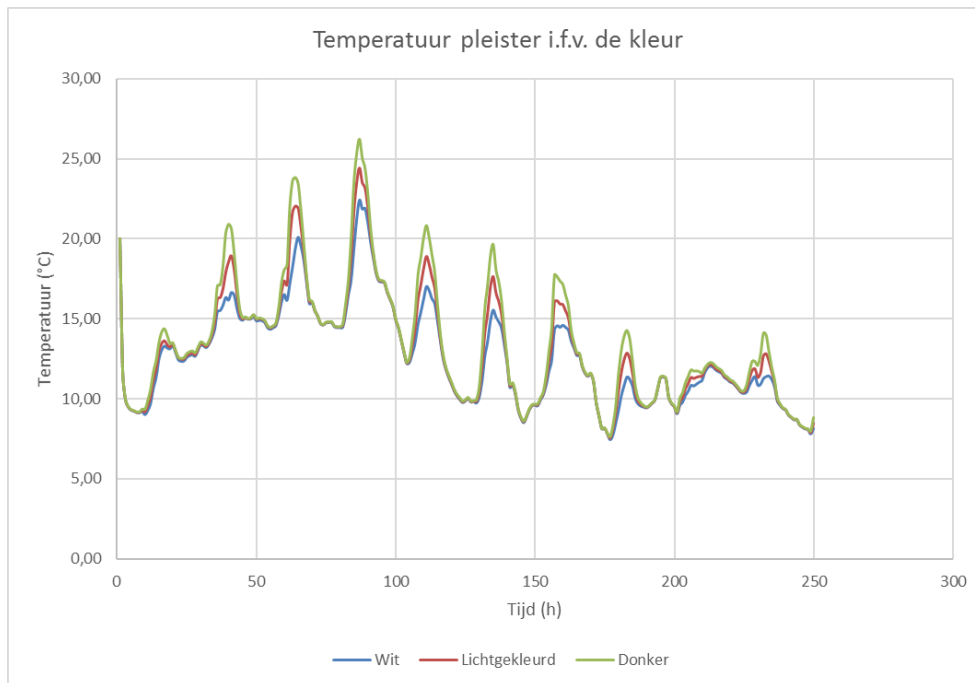
Tabel 14: Absorptie van de kortegolfstraling i.f.v. de kleur van de pleister

Ook in WUFI is dit effect zichtbaar. In bovenstaande tabel worden de waarden van de absorptie van de kortgolvlige straling, opgegeven door WUFI, weergegeven.

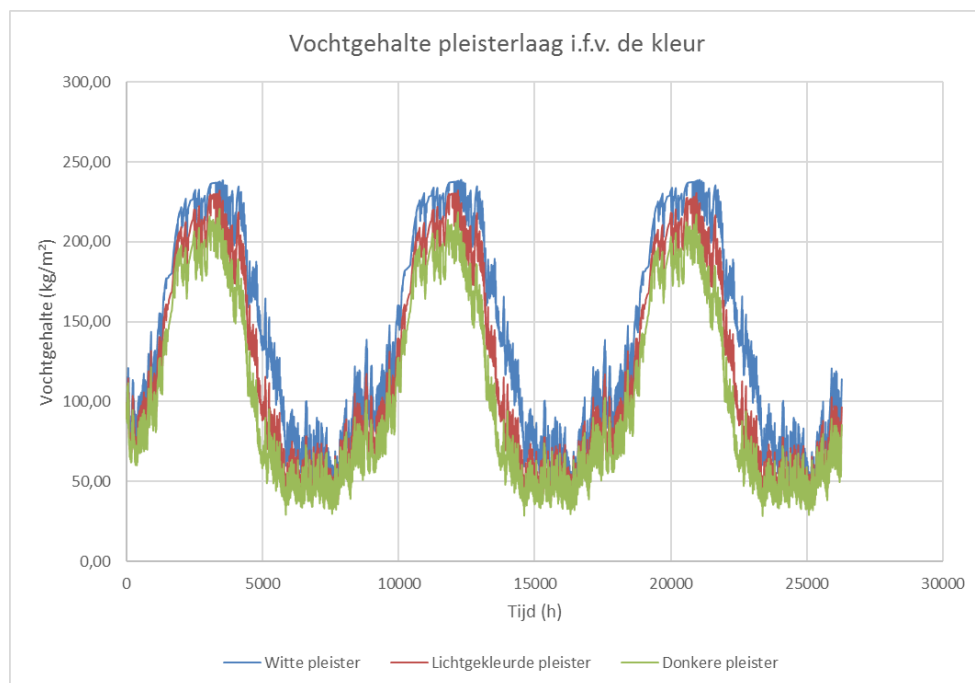


Figuur 117: Vochtgehalte van de constructie i.f.v. de kleur van de pleister

De keuze van de kleur heeft ook een invloed op het vochtgehalte. De witte pleister droogt trager uit dan de lichtgekleurde en de donkere pleisters. De donkere pleister droogt het snelst uit. Dit komt doordat een kleiner deel van de zonnestraling die zorgt voor de uitdroging van de gevel wordt gereflecteerd dan bij de lichtgekleurde en witte pleisters. Dit zorgt voor een hogere temperatuur in de pleisterlaag, zoals duidelijk wordt in onderstaande grafiek. Door de hogere temperatuur, droogt het materiaal sneller uit.



Figuur 118: Temperatuur in de pleister i.f.v. de kleur van de pleister

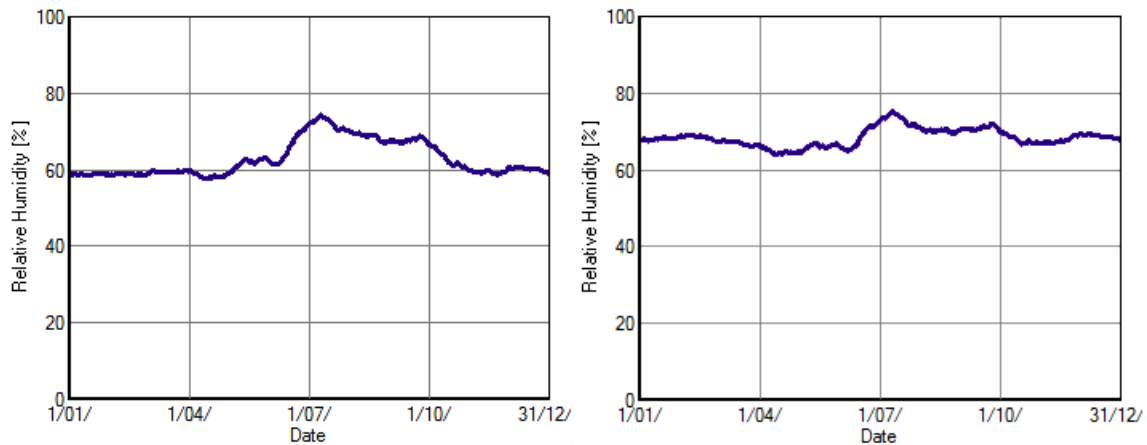


Figuur 119: Vochtgehalte van de pleisterlaag i.f.v. de kleur

Ook het vochtgehalte in de pleisterlaag is hoger bij een witte pleister dan bij een donkere pleister. De vochtgehalten schommelen zeer sterk. In de winter worden veel grotere vochtwaardes genoteerd.

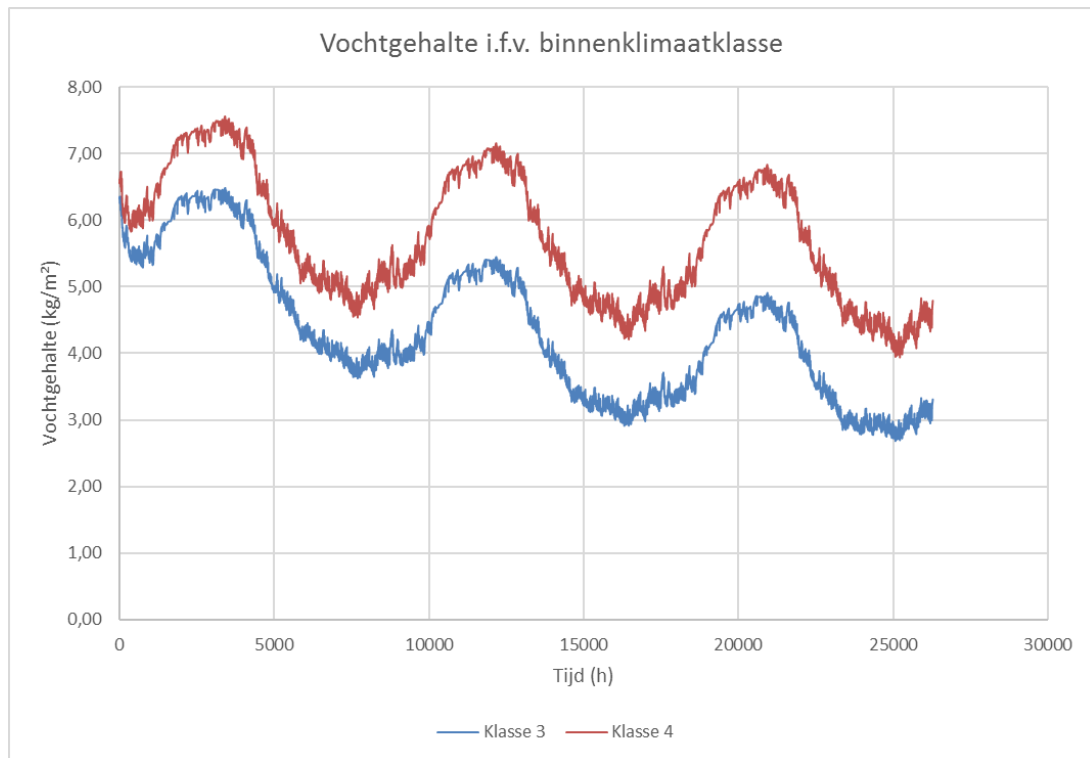
7.4.12. Invloed van binnenklimaat

Men kan verwachten dat het vochtgehalte in de muur ook afhankelijk is van het binnenklimaat. Hoe vochtiger het binnenklimaat, hoe hoger het vochtgehalte in de muur waarschijnlijk is. Men maakt in praktijk gebruik van het concept 'binnenklimaatklassen'. Ze zijn een maat voor de vochtbelasting van de binnenlucht voor eventuele problemen in de gebouwschil [8]. Gebouwen worden ingedeeld op basis van de te verwachten dampdruk in het gebouw, of dus eigenlijk de gebouwfunctie. In WUFI wordt er standaard uitgegaan van binnenklimaatklasse 3. Dit komt overeen met een kleine woning, flat, ziekenhuis...



Figuur 120: De relatieve vochtigheid voor binnenklimaatklasse 3 (links) en binnenklimaatklasse 4 (rechts)

Wanneer er wordt uitgegaan van een hogere binnenklimaatklasse, nl. klasse 4, is het resultaat zoals af te lezen is op Figuur 121. Binnenklimaatklasse 4 komt overeen met een zwembad, wasplaats... plaatsen met een hoge vochtproductie.



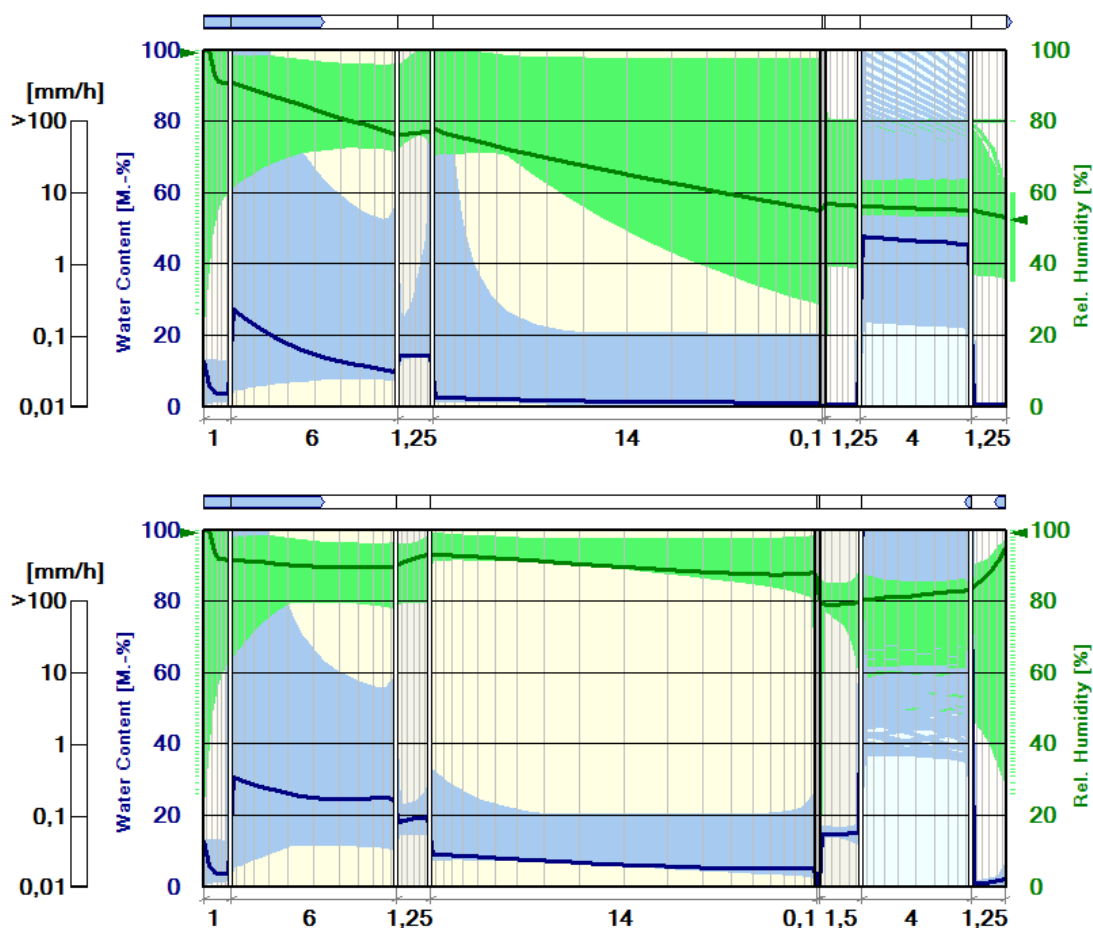
Figuur 121: Vochtgehalte i.f.v. binnenklimaatklasse

Uit bovenstaande grafiek blijkt duidelijk dat het vochtgehalte in de constructie een stuk trager uitdroogt voor een hogere klimaatklasse. Dit komt door de hogere relatieve vochtigheid aan de binnenzijde.



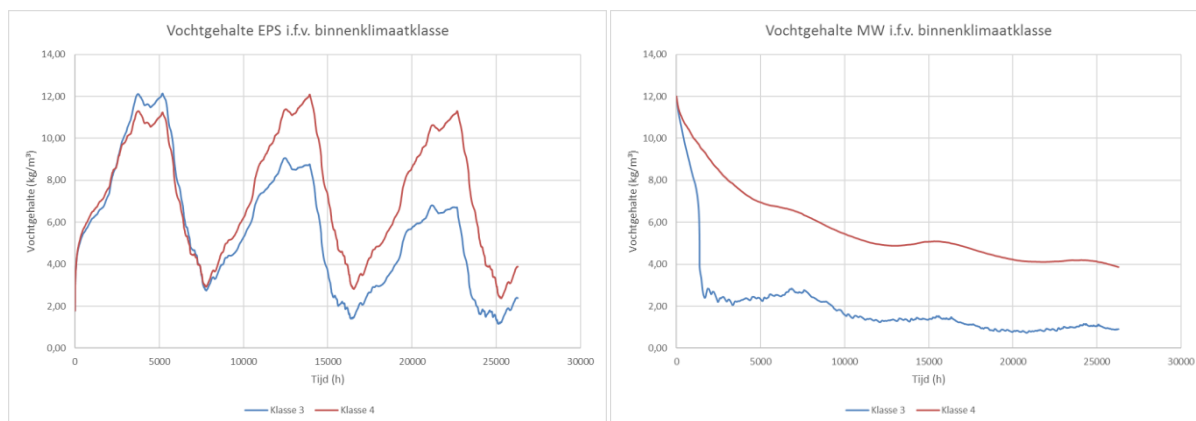
Figuur 122: Relatieve vochtigheid aan het binnenoppervlak

De relatieve vochtigheid aan het binnenoppervlak bereikt voor een hogere binnenklimaatklasse (Figuur 123, onder) een veel hogere waarde dan de standaard binnenklimaatklasse 3 (Figuur 123, boven). De relatieve vochtigheid reikt niet tot de 100%. Er is dus geen direct gevaar voor oppervlaktecondensatie.



Figuur 123: Uittrogingsprofiel voor binnenklimaatklasse 3 (boven) en binnenklimaatklasse 4 (onder)

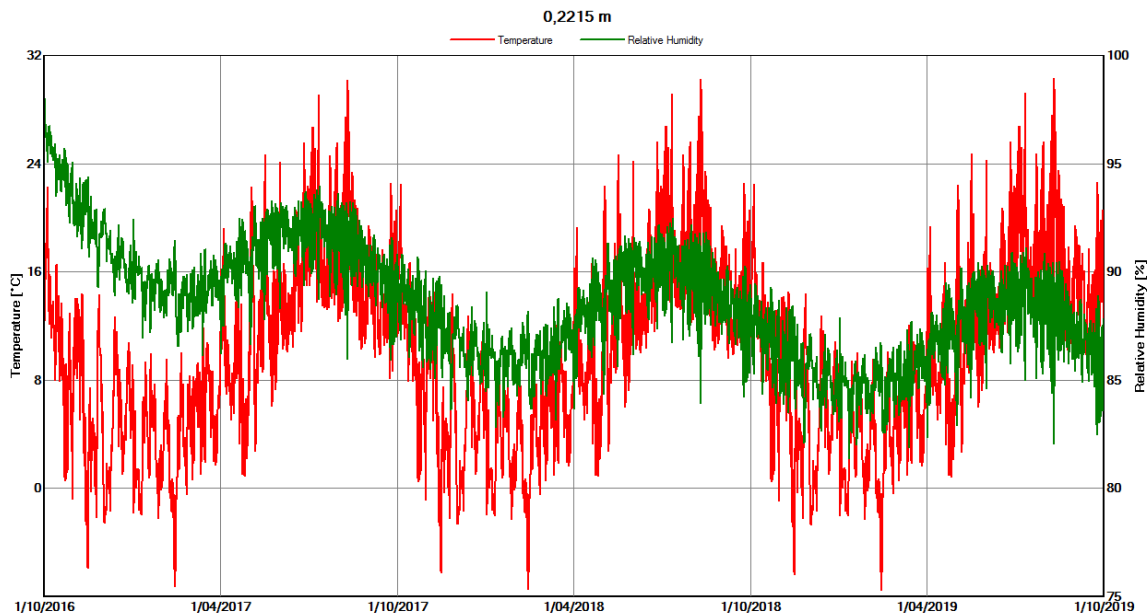
Het vochtgehalte in de constructie droogt minder snel uit bij binnenklimaatklasse 4. De relatieve vochtigheid doorheen het jaar ligt veel hoger en dat hoge gehalte geldt voor de hele constructie.



Figuur 124: Vochtgehalte voor EPS en MW i.f.v. de binnenklimaatklasse over een periode van drie jaar

Ook wanneer men het vochtgehalte in de verschillende materialen bekijkt, is duidelijk dat de constructie voor binnenklimaatklasse 3 sneller uitdroogt (Figuur 124).

Is er risico op inwendige condensatie? Het binnenvlak van de isolatie wordt onder de loep genomen. De relatieve vochtigheid bereikt daar bij een binnenklimaatklasse 4 hoge waarden. De relatieve vochtigheid bereikt echter nooit de 100 % op die plaats waardoor er geen direct gevaar is voor condensatie.



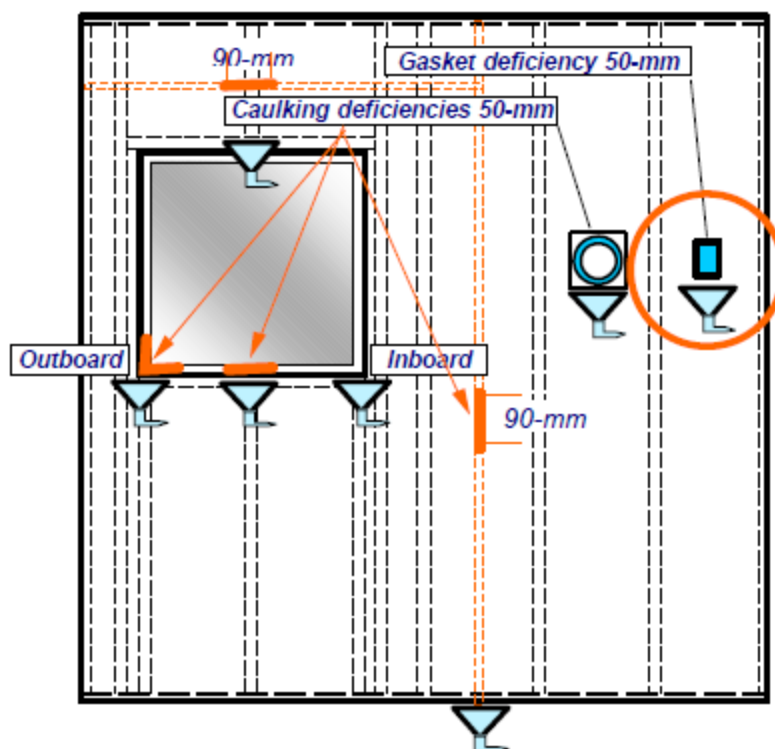
Figuur 125: Verloop van de temperatuur en relatieve vochtigheid aan de binnenzijde van de isolatie

7.4.13. Waterinfiltraties

Om te kijken welk effect een lek heeft op het hygrothermisch gedrag van de gevel, kan er een vochtbron in de constructie gesimuleerd worden. Om hier een realistische inschatting van de grootte van deze vochtbron te maken, wordt gekeken naar het MEWS – onderzoek van Lacasse et al. (MEWS: Moisture Management for Exterior Wall Systems)[33]. Een EIFS-muur worden getest op waterinfiltraties. EIFS is de Amerikaanse benaming voor ETICS. De opbouw kan lichtjes verschillen. Zij werken immers soms met gedraineerde systemen.

De punten waar de waterinfiltraties worden gesimuleerd, zijn de plaatsen waar er in realiteit ook de grootste kans op infiltratie is (Figuur 126):

- Boven uitlaatroosters e.d.: ontbrekende kitvoeg
- Rond ramen en aan de vensterbanken: ontbrekende kitvoegen
- Bij voegen



Figuur 126: Plaatsen waar de waterinfiltraties voorkomen

De infiltraties worden getest bij constante en variërende drukverschillen gaande van 0 tot 300Pa. Wanneer er grote aandacht wordt besteed aan het zorgvuldig dichten van de voegen, komen er veel minder waterinfiltraties voor in dit experiment. Dit duidt nog maar eens op het belang van een waterdichte buitenste laag en het correct dichten van voegen.

Er worden verschillende lekdebieten beschreven voor specifieke plaatsen in de constructie. De lekdebieten nemen toe bij een stijgend drukverschil tussen binnen en buiten. Om een correcte inschatting te maken van een standaard drukverschil in België in verschillende omstandigheden wordt de Eurocode 1[34] geraadpleegd. De drukverschillen worden bepaald a.d.h.v. de windsnelheid en een aantal andere factoren.

Met behulp van volgende formule wordt de windsnelheid berekend die rekening houdt met het soort omgeving:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

Met:

$c_0(z)$ Wordt aangenomen als 1

$c_r(z)$ Factor die rekening houdt met de terreinruwheid

v_b Basiswindsnelheid, af te lezen uit een weerfile [m/s]

De basiswindsnelheid wordt uit de weerfile voor Brussel uit WUFI gehaald en bedraagt 4,36 m/s. De basiswindsnelheid uit de weerfile voor Oostende bedraagt 5,6 m/s. Dit is echter een gemiddelde snelheid. WUFI geeft geen minima of maxima. De werkelijke drukverschillen, of piekdrukverschillen kunnen veel hoger liggen!

De factor c_r , die rekening houdt met de terreinruwheid, wordt berekend a.d.h.v. volgende formule:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{voor} \quad z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{voor} \quad z \leq z_{min}$$

Met:

z_0 Lengte van de ruwheid, af te lezen in Tabel 15 [m]

k_r Terreinfactor afhankelijk van z_0 , berekend a.d.h.v. volgende formule:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$$

Met:

$z_{0,II}$ = 0,05 m (terrein categorie 2)

z_{min} Minimum hoogte, af te lezen in Tabel 15 [m]

z_{max} Maximale hoogte, wordt standaard =200m aangenomen

z_0 en z_{min} zijn afhankelijk van het soort terrein. De waarden worden afgelezen in onderstaande tabel. Er wordt eens gekeken naar drie verschillende situaties: Kust, platteland en stad.

Table 4.1 — Terrain categories and terrain parameters

Terrain category		z_0 m	z_{min} m
0	Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV	Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10
The terrain categories are illustrated in Annex A.1.			

Tabel 15: Terreincategorieën en terreinparameters

Om het uiteindelijke drukverschil uit te rekenen, maken we gebruik van volgende formule:

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot (C_{p,e} - C_{p,i})$$

Met:

- v De hierboven berekende windsnelheid, in functie van het terrein
- C_{pe} Drukcoëfficiënt exterieur, af te lezen uit tabel, afhankelijk van geometrie van gebouw
- C_{pi} Drukcoëfficiënt interieur, standaard = -0,3
- ρ Massadichtheid van lucht, =1,25

De verhouding $p/2$ is dus gelijk aan 0,625. Voor C_{pe} worden de waarden 0,8 en 1,1 aangenomen, afgelezen uit onderstaande tabel en afhankelijk van de geometrie van het gebouw. Deze waarden komen overeen met een gebouw met rechthoekig grondvlak, met een windbelasting op de zijgevel.

Table 7.1 — Recommended values of external pressure coefficients for vertical walls of rectangular plan buildings

Zone	A		B		C		D		E	
h/d	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Tabel 16: Drukcoëfficiënten voor buiten, afhankelijk van de geometrie van het gebouw en de belaste oppervlakte

De drukverschillen tussen binnen en buiten kunnen hierdoor berekend worden. Wanneer men rekent met de gemiddelde windsnelheid uit Brussel, 4,36 m/s, zijn de drukverschillen eerder klein. De gemiddelde windsnelheid in Oostende ligt hoger dan in het binnenland. Dit leidt tot hogere drukverschillen. Dit zijn echter maar gemiddelden, dus de werkelijke windsnelheid zal pieken hebben die veel hoger liggen. (voor de berekening, zie tabellen 17 en 18).

Brussel				v _b (m/s)	v _m (m/s)	v _m (m/s)	v _m (m/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
COEFFICIENTEN	Kust	Platteland	Stad	WINDSNELHEID	Kust	Platteland	Stad	Kust	Kust	Platteland	Platteland	Stad	Stad
z ₀	0,003	0,05	1,00	uit WUFI file				cpe-cpi	cpe-cpi	cpe-cpi	cpe-cpi	cpe-cpi	cpe-cpi
z _{min}	1,00	2,00	10,00	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	1,10	1,30	1,10	1,30	1,10	1,30
k _r	0,16	0,19	0,23										
c _{r(z)} (3m)	1,08	0,78	0,54	4,36	4,70	3,39	2,35	15,18	17,94	7,91	9,35	3,80	4,50
c _{r(z)} (4m)	1,12	0,83	0,54	4,36	4,90	3,63	2,35	16,47	19,47	9,06	10,71	3,80	4,50
c _{r(z)} (5m)	1,16	0,87	0,54	4,36	5,05	3,81	2,35	17,51	20,70	10,01	11,82	3,80	4,50
c _{r(z)} (10m)	1,27	1,01	0,54	4,36	5,52	4,39	2,35	20,94	24,74	13,24	15,65	3,80	4,50
c _{r(z)} (15m)	1,33	1,08	0,63	4,36	5,79	4,73	2,77	23,08	27,28	15,35	18,14	5,26	6,22

Tabel 17: Berekening van het drukverschil a.d.h.v. windsnelheid en terreinparameters, Brussel

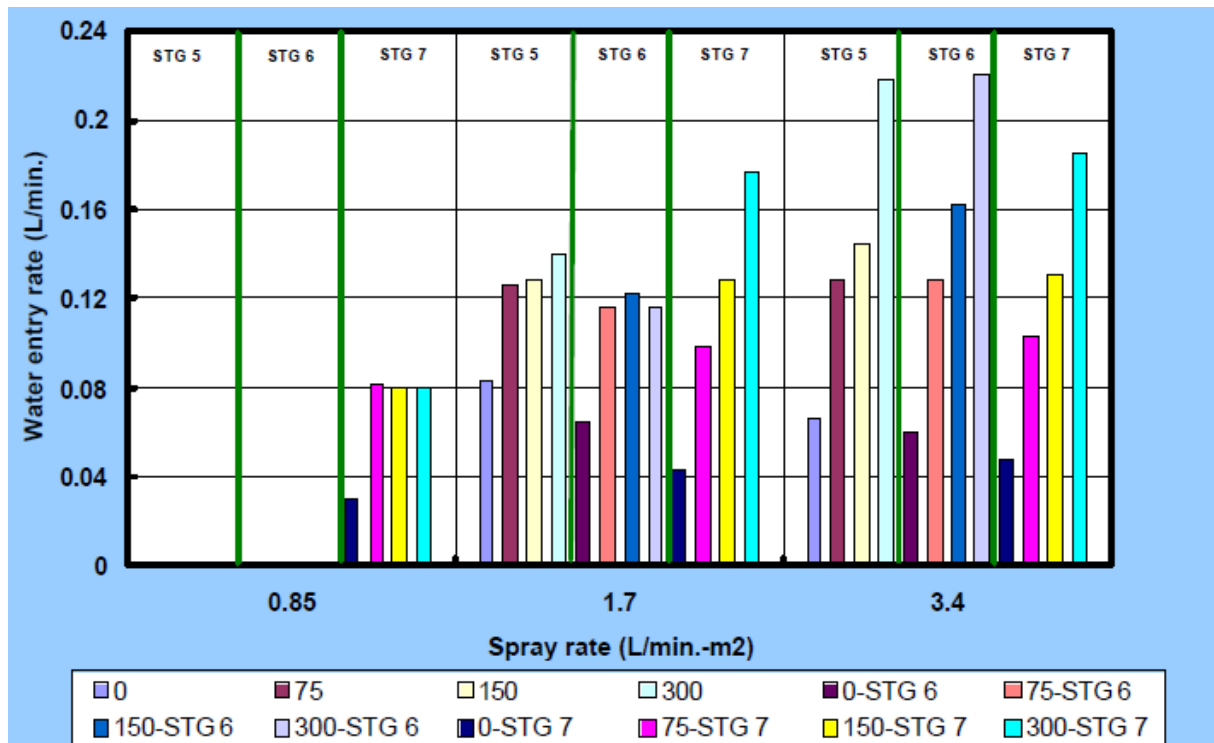
Oostende				v _b (m/s)	v _m (m/s)	v _m (m/s)	v _m (m/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
COEFFICIENTEN	Kust	Platteland	Stad	WINDSNELHEID	Kust	Platteland	Stad	Kust	Kust	Platteland	Platteland	Stad	Stad
z ₀	0,003	0,05	1,00	uit WUFI file				cpe-cpi	cpe-cpi	cpe-cpi	cpe-cpi	cpe-cpi	cpe-cpi
z _{min}	1,00	2,00	10,00	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	1,10	1,30	1,10	1,30	1,10	1,30
k _r	0,16	0,19	0,23										
c _{r(z)} (3m)	1,08	0,78	0,54	5,40	5,82	4,20	2,91	23,29	27,53	12,13	14,34	5,84	6,90
c _{r(z)} (4m)	1,12	0,83	0,54	5,40	6,06	4,50	2,91	25,27	29,87	13,90	16,42	5,84	6,90
c _{r(z)} (5m)	1,16	0,87	0,54	5,40	6,25	4,72	2,91	26,86	31,75	15,35	18,14	5,84	6,90
c _{r(z)} (10m)	1,27	1,01	0,54	5,40	6,83	5,44	2,91	32,12	37,96	20,32	24,01	5,84	6,90
c _{r(z)} (15m)	1,33	1,08	0,63	5,40	7,18	5,85	3,43	35,41	41,85	23,54	27,83	8,07	9,54

Tabel 18: Berekening van het drukverschil a.d.h.v. windsnelheid en terreinparameters, Oostende

				v_b (m/s)	v_m (m/s)	v_m (m/s)	v_m (m/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
COEFFICIENTEN	Kust	Platteland	Stad	WINDSNELHEID	Kust	Platteland	Stad	Kust	Kust	Platteland	Platteland	Stad	Stad
z_0	0,003	0,05	1,00	uit WUFI file				c_{pe-cpi}	c_{pe-cpi}	c_{pe-cpi}	c_{pe-cpi}	c_{pe-cpi}	c_{pe-cpi}
z_{min}	1,00	2,00	10,00	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	1,10	1,30	1,10	1,30	1,10	1,30
k_r	0,16	0,19	0,23										
$c_r(z)$ (3m)	1,08	0,78	0,54	22,00	23,71	17,11	11,87	386,58	456,87	201,37	237,98	96,87	114,49
$c_r(z)$ (4m)	1,12	0,83	0,54	22,00	24,70	18,32	11,87	419,45	495,71	230,66	272,60	96,87	114,49
$c_r(z)$ (5m)	1,16	0,87	0,54	22,00	25,47	19,25	11,87	445,87	526,94	254,75	301,07	96,87	114,49
$c_r(z)$ (10m)	1,27	1,01	0,54	22,00	27,85	22,15	11,87	533,08	630,00	337,21	398,52	96,87	114,49
$c_r(z)$ (15m)	1,33	1,08	0,63	22,00	29,24	23,84	13,96	587,71	694,56	390,80	461,85	133,99	158,36

Tabel 19: Berekening van het drukverschil a.d.h.v. windsnelheid en terreinparameters

Hoe een constructie in staat is zijn waterdichting te behouden, werd getest door statische en dynamische drukverschillen aan te brengen op de testmuren terwijl er water over gesproeid werd aan een debiet van 0,85 L/(min*m²), 1,7 L/(min*m²) of 3,4 L/(min*m²). De grootste waterinfiltraties werden gemeten aan de ventilatieopeningen bij een sproeidebiet van 3,4 L/(min*m²) en bedroegen maximaal 0,22 L/min. Deze zijn dan ook gebruikt om een maximale waterinfiltratie in de constructie te berekenen. De stadia op onderstaande grafiek zijn de verschillende stadia van de waterinfiltratie in de muur.



Figuur 127: Overzicht van de waterinfiltraties in de verschillende stadia voor toenemende drukverschillen

Bij een debiet van 0,85 L/(min*m²) komt er enkel water binnen bij stadium 7, waarbij er nergens kitvoegen voorzien zijn. De infiltraties variëren hier van 0,03 L/min tot 0,07 L/min bij hogere drukverschillen.

Bij een sproeidebiet van 1,7 L/(min*m²) treden er in alle stadia waterinfiltraties op. In stadium 5 en 6 zijn de maximale infiltraties respectievelijk 0,140 en 0,122 L/min. Het verschil tussen de drukverschillen is enkel duidelijk merkbaar bij stadium 7. De waterinfiltraties variëren hierbij tussen de 0,043 L/min als er geen drukverschil is tot 0,176 L/min bij een drukverschil van 300 Pa.

Bij het grootste sproeidebiet, 3,4 L/(min*m²) zijn de waterinfiltraties afhankelijk van de drukverschillen voor elk stadium. De minimale infiltratiewaarden bij 0 Pa drukverschil variëren van 0,048 L/min tot 0,066 L/min terwijl de maximale infiltratiewaarden, bij 300 Pa, variëren tussen 0,185 L/min en 0,220 L/min.

Alhoewel deze constructie een beetje anders opgebouwd is dan de in deze thesis onderzochte constructies, worden de waterinfiltraties uit het MEWS-onderzoek aangenomen en gebruikt om waterinfiltraties in de ETICS te simuleren. Vanuit de drukverschillen kan het lekdebiet worden afgelezen uit de experimenten van Lacasse [33]. Voor elk drukverschil kan dus berekend worden welk aandeel van de besproeiing effectief in de muur binnendringt.

Bij een sproeidebiet van 1,7 L/min levert dit volgende percentages op. Er wordt telkens de maximale waterinfiltratie van de verschillende stadia aangenomen.

Drukverschil	Waterinfiltratie	Besproeiing	Waterinfiltratie als percentage van besproeiing
(Pa)	(L/min)	L/min	(%)
0	0,043	1,7	2,53
75	0,126	1,7	7,41
150	0,128	1,7	7,53
300	0,176	1,7	10,35

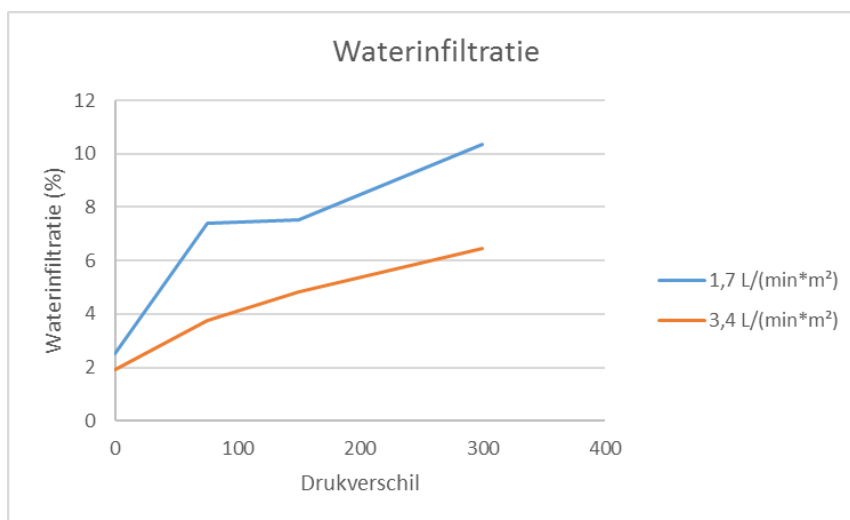
Tabel 20: Waterinfiltraties in % t.g.v. een sproeidebiet van 1,7 L/min

Voor een sproeidebiet van 3,4 L/min levert dit volgende waarden op:

Drukverschil	Waterinfiltratie	Besproeiing	Waterinfiltratie als percentage van besproeiing
(Pa)	(L/min)	L/min	(%)
0	0,066	3,4	1,94
75	0,128	3,4	3,76
150	0,165	3,4	4,85
300	0,220	3,4	6,47

Tabel 21: Waterinfiltraties in % t.g.v. een sproeidebiet van 3,4 L/min

Tussen de waarden kan er geïnterpoleerd worden. Dit levert volgende grafiek op.



Figuur 128: Waterinfiltratie i.f.v. het drukverschil en het sproeidebiet

Deze infiltratiewaarden worden nu getransporteerd naar de regenwaterinfiltratie uit WUFI. Dezelfde percentages worden gehanteerd om de grootte van de vochtbron te bepalen. Standaard wordt er in WUFI uitgegaan van een regenwaterinfiltratie van 1% van de WDR. Dit is echter maar een grove schatting, en is dus zeker niet in alle situaties waar. Het onderzoek van Lacasse toont immers aan dat er grotere waterinfiltraties optreden bij toenemende

drukken intensieve besproeiing. Deze kan overeenkomen met een zware regenbui. Hierdoor treden er in sommige situaties waterinfiltraties op van meer dan 1%. De infiltraties die in MEWS bepaald zijn zijn ook wel voor plaatsen waar er een slechte afsluiting is, en dus niet voor de pleister zelf.

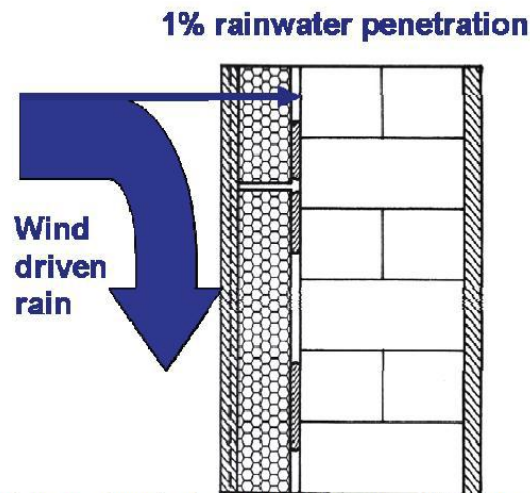


Figure 1. Schematic plot of a typical masonry wall with External Thermal Insulation Composite System (ETICS) including the deposit site for rainwater penetrating through leaks at joints and wall connections.

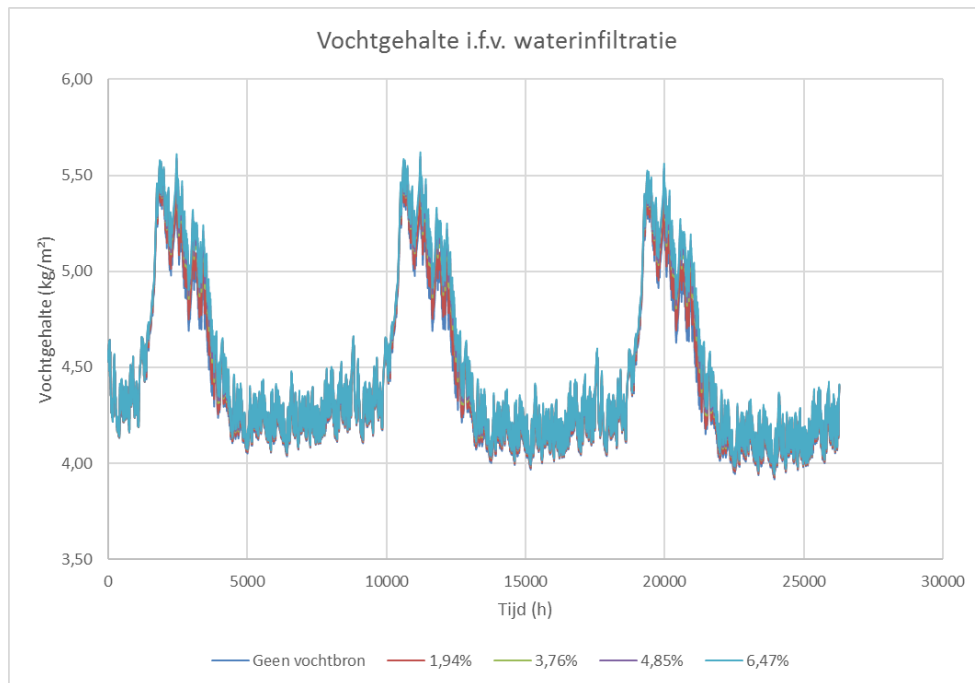
Figuur 129: Waterinfiltratie volgens WUFI

Als de windsnelheid en de regenval gekend zijn, kan berekend worden hoeveel van de regen tegen de muur slaat (Wind Driven Rain : WDR). Voor verticale oppervlakken gaat WUFI uit van een factor 0,07. De formule om de WDR te berekenen wordt dan als volgt:

$$WDR = Regenval \cdot 0,07 \cdot v_m$$

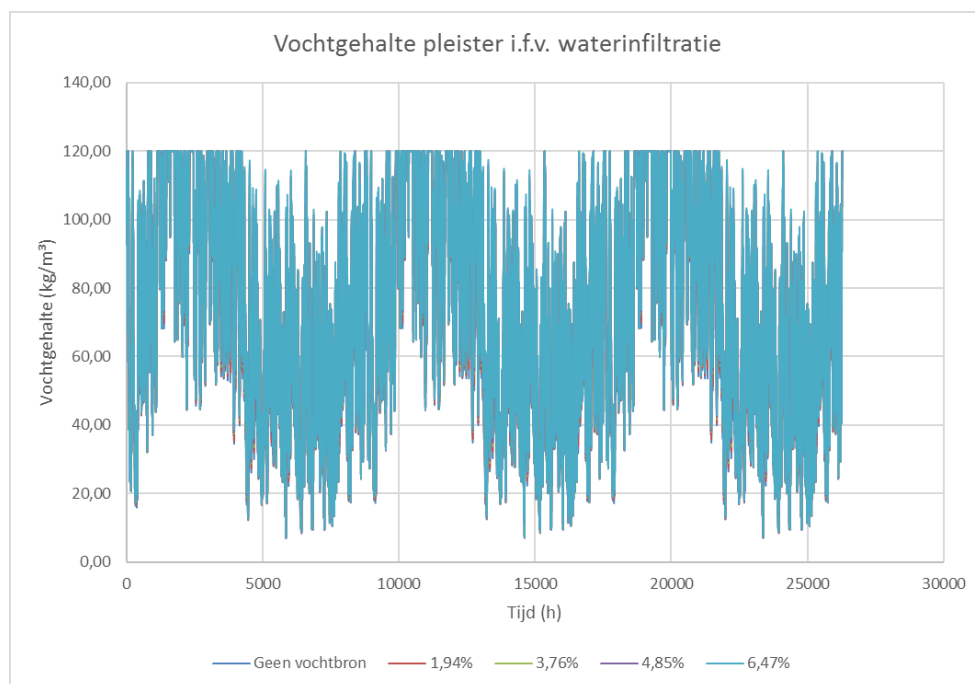
Als er uitgegaan wordt van de percentages uit de bovenstaande tabellen, kan ook de infiltratie i.f.v. de slagregen bepaald worden en ingegeven worden als vochtbron in WUFI. De drukverschillen werden hierboven berekend (zie tabellen 17-19) om aan te duiden dat de drukverschillen uit het MEWS-experiment reële inschattingen zijn en ook kunnen voorkomen in België. De vochtbronnen worden gesimuleerd bij de verschillende percentages van waterinfiltraties.

De waterinfiltraties ten gevolge van de slagregen lijken op het eerste gezicht weinig afhankelijk van het drukverschil. Dit is echter als we het totale vochtgehalte in de muur bekijken (Figuur 130).



Figuur 130: Vochtgehalte i.f.v. waterinfiltratie

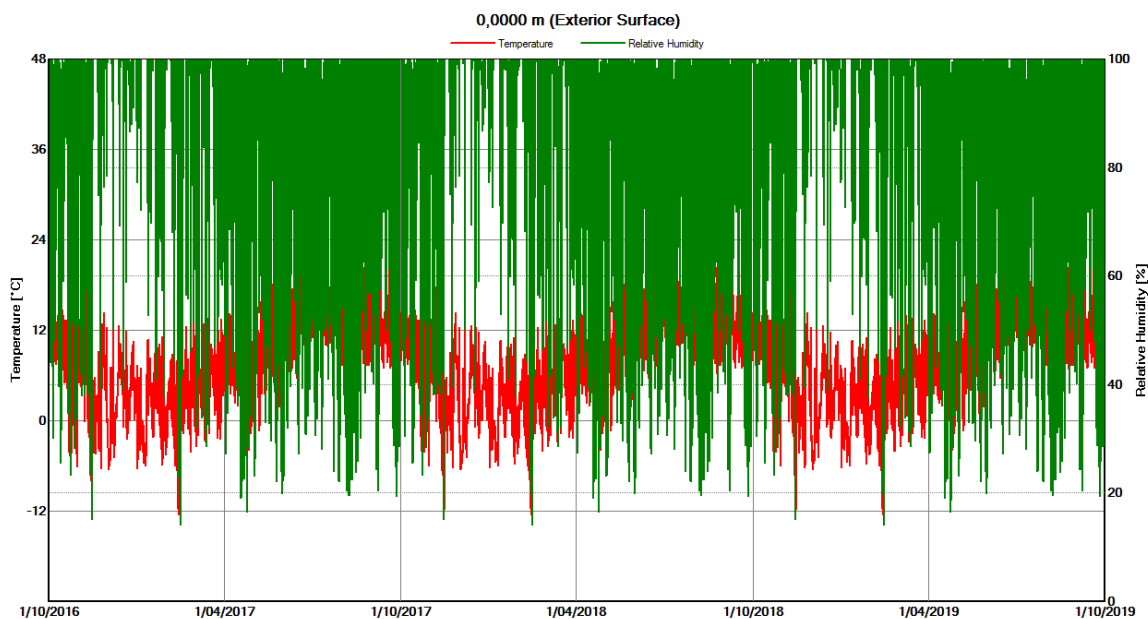
Dit zijn slechts kleine verschillen voor het totale vochtgehalte. Men kan de verschillende materialen ook nog eens apart beschouwen. De vochtbron wordt in de buitenste laag van de constructie, d.i. de pleisterlaag, gesimuleerd. Hier verwacht men dus hogere vochtgehalten door de waterinfiltraties.



Figuur 131: Vochtgehalte pleister i.f.v. waterinfiltratie

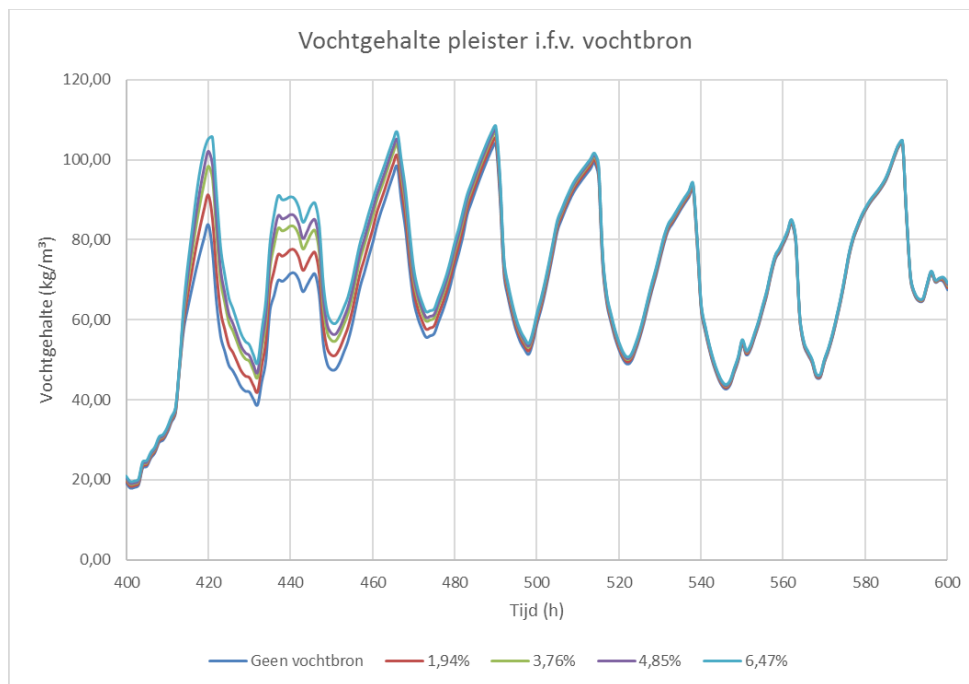
Er valt meteen op dat WUFI maar beperkte vochtgehalten toelaat. Wanneer dit vochtgehalte overschreden wordt, snijdt WUFI als het ware het overgebleven vocht weg. Dit leidt in de grafiek tot een rechte bovengrens. Men moet hier dus meteen vraagtekens zetten bij de juistheid van de simulatie. Waar gaat het overgebleven vocht naar toe? WUFI laat het

verdwijnen, maar in werkelijkheid bevindt het zich nog steeds in de constructie. Dit vocht is gecondenseerd. De pleisterlaag is gedurende lange periode verzadigd en loopt dus gevaar voor schimmelgroei. Ook vorstschade valt niet uit te sluiten in de winter.



Figuur 132: Relatieve vochtigheid en temperatuur aan het buitenoppervlak

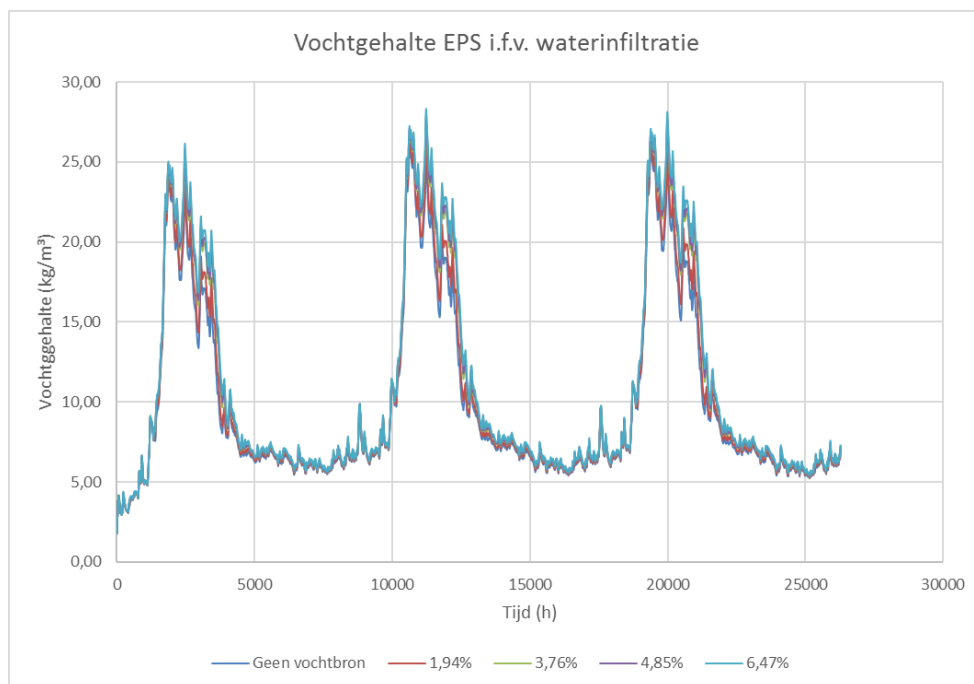
Er kan eens gekeken worden of dit zelfde effect ook bekomen wordt wanneer er wordt gewerkt met een fictieve luchtlaag. Er wordt iets minder water weggesmeten, maar het blijft een onrealistische situatie.



Figuur 133: Vochtgehalte pleister i.f.v. waterinfiltratie

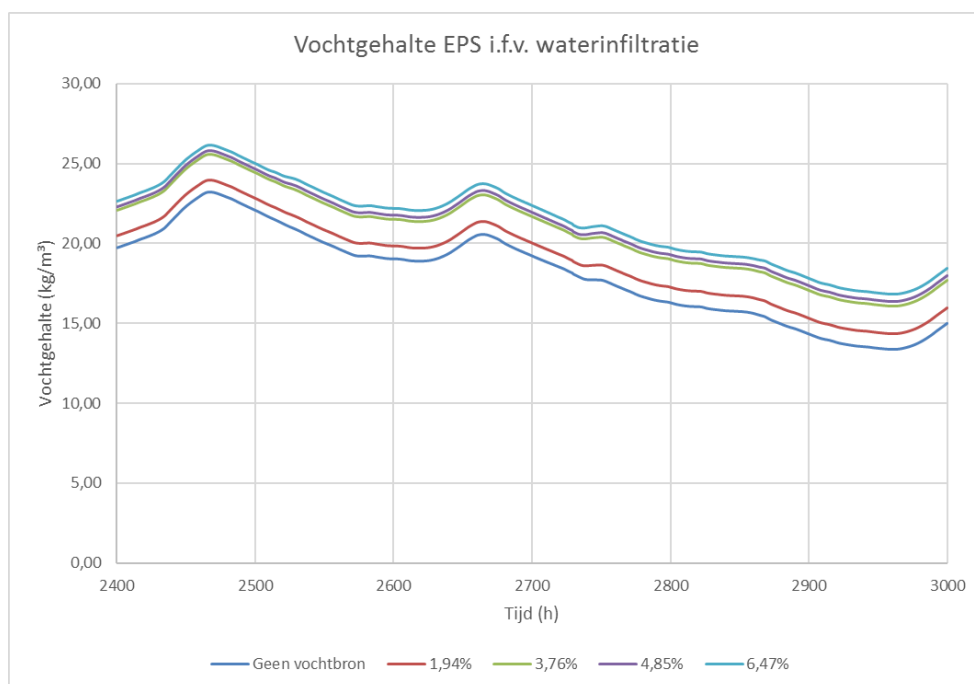
Wanneer men een beetje inzoomt op de grafiek (Figuur 133), is er bij een regenbui een duidelijke verhoging van het vochtgehalte in de pleisterlaag te zien ten gevolge van de

waterinfiltraties. Bij de grootste waterinfiltratie komt er hier bijvoorbeeld ongeveer 20 kg/m³ extra vocht in de constructie in vergelijking met een constructie zonder waterinfiltraties. In de EPS-laag verloopt het vochtgehalte t.g.v. de waterinfiltraties als volgt (Figuur 134).



Figuur 134: Vochtgehalte EPS i.f.v. waterinfiltratie

Op de grafieken kan men kleine verschillen onderscheiden tussen de verschillende curves (Figuur 134).

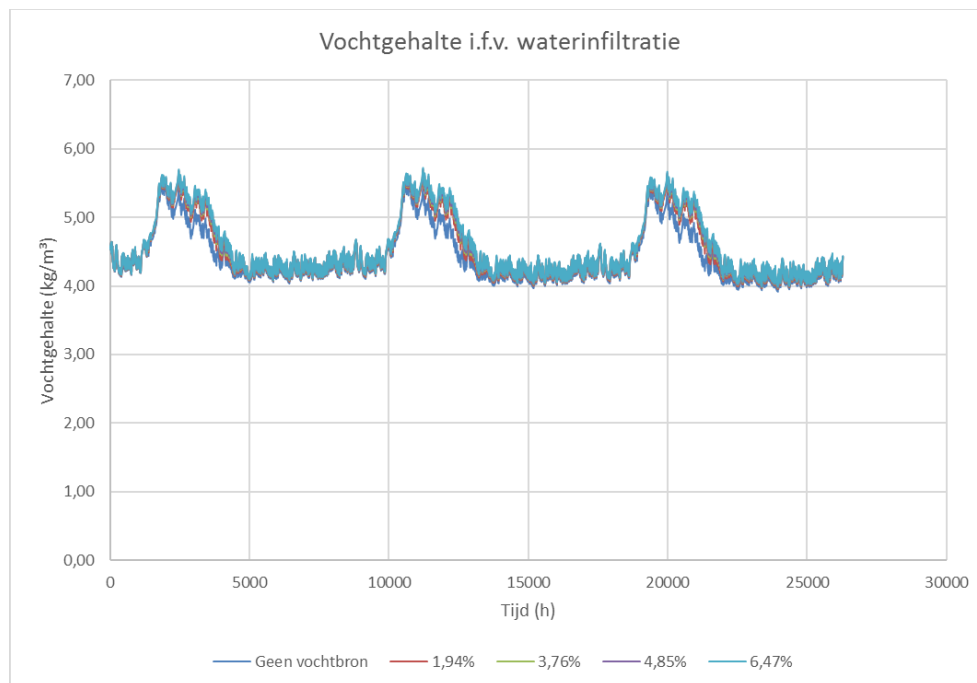


Figuur 135: Vochtgehalte EPS i.f.v. waterinfiltratie

Wanneer ingezoomd wordt op de curve van EPS (Figuur 135) zien we ook daar een verschil van enkele kg/m^3 bij het inbrengen van een vochtbron. Door de kleine vochtopslagcapaciteit van EPS is dit relatief veel.

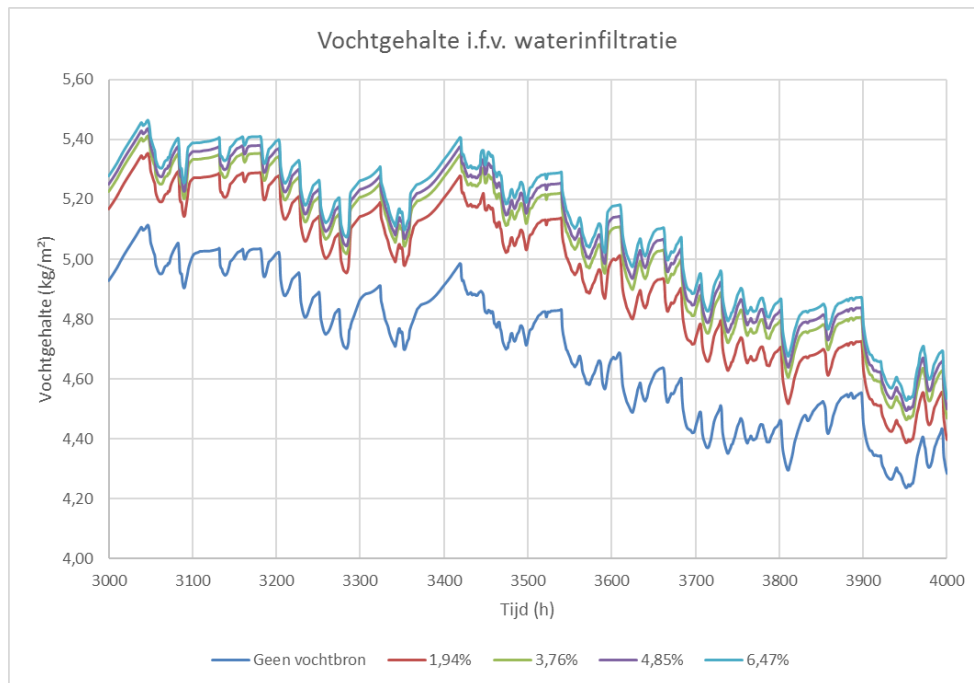
In de OSB-plaat is er in dit geval geen verschil in vochtgehalte meer op te merken door een waterinfiltratie aan de buitenzijde. We kunnen echter ook eens bekijken wat het effect is van een vochtbron die zich achter de isolatielaag bevindt (zie verder).

De gemiddelde windsnelheden zijn niet zo hoog. Er zijn momenten waarop veel hogere snelheden gehaald worden. Wat gebeurt er nu als we eens met zo'n hogere snelheid, dus ook een grotere WDR en dus meer infiltratie rekenen? We nemen 22 m/s als windsnelheid en bepalen op basis hiervan een vochtbron.



Figuur 136: Vochtgehalte i.f.v. waterinfiltratie

Er zijn in de winter duidelijk verschillen te merken tussen de verschillende grafieken. Als we meer inzoomen, wordt de trend duidelijker.

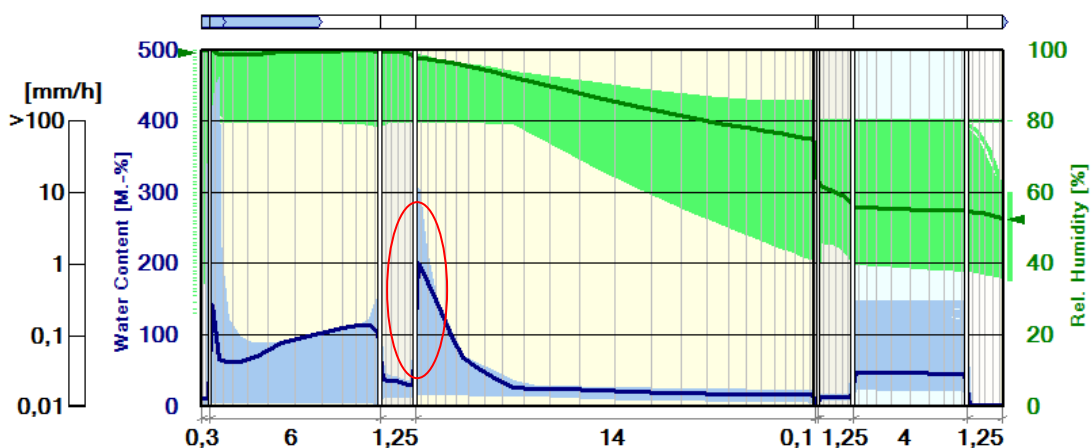


Figuur 137: Vochtgehalte bij de aanwezigheid van een vochtbron

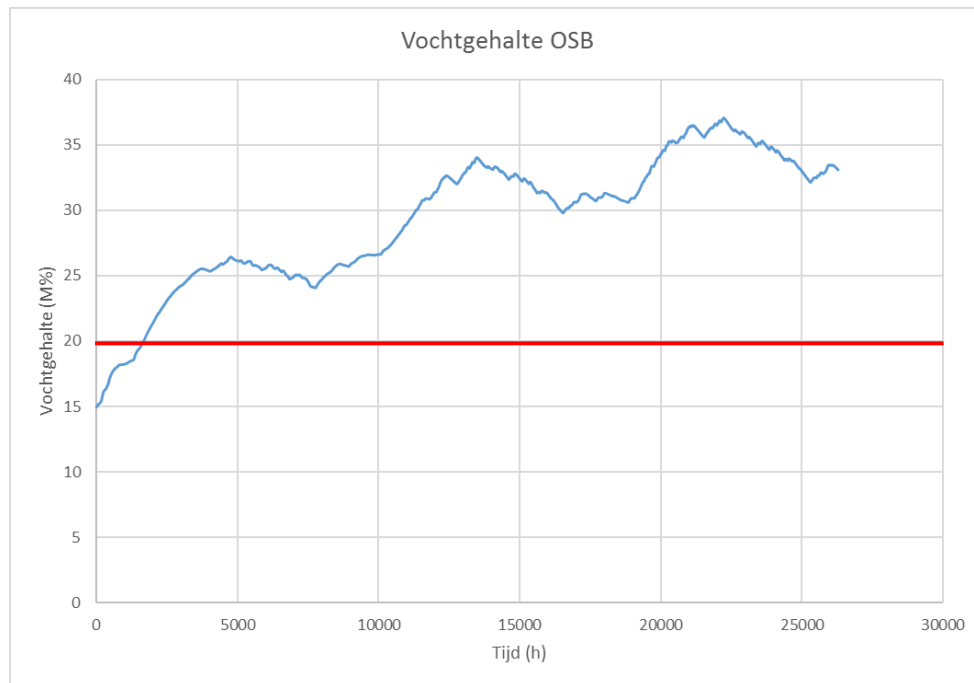
De verschillen in het totaal vochtgehalte zijn duidelijk merkbaar, maar niet zo heel groot.

Voorgaande simulaties zijn allemaal simulaties met een vochtbron tussen de pleisterlaag en de isolatielaag. Bij simulaties van vochtbronnen achter de pleisterlaag, blijven de OSB-platen en het houtskelet gevrijwaard van enig risico op schimmelvorming. Wanneer de vochtbron zich echter achter de isolatielaag (tussen de isolatielaag en de buitenste OSB-plaat) bevindt, is dit heel nefast voor de constructie. Het vochtgehalte in de OSB-laag begint te stijgen en overschrijdt de grens van 20M%. Op termijn is er dus risico op houtrot en schimmelvorming in de OSB-plaat.

Het uitdrogingsprofiel van zo'n muuropbouw met vochtbron aan de binnenzijde van de isolatielaag ziet er uit als volgt.



Figuur 138: Uitdrogingsprofiel van een muuropbouw met een vochtbron tussen de buitenste isolatielaag en OSB-plaat



Figuur 139: vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat t.g.v. een vochtbron tussen de isolatielaag en de OSB-plaat

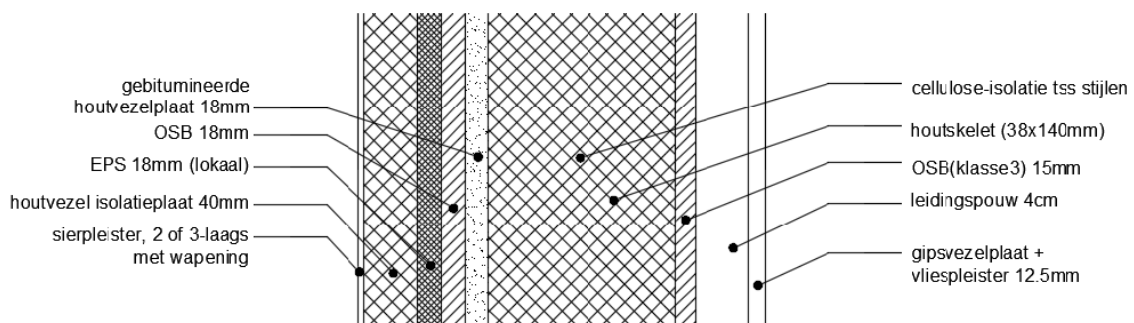
Het is duidelijk dat het vochtgehalte in de OSB-plaat de 20 massaprocent gaat overschrijden gedurende meer dan 720 uur en dus aanleiding kan geven tot schimmelvorming. Zo'n vochtinfiltratie kan bijvoorbeeld voorkomen bij een slecht afgedichte dakrand waardoor er water tussen de isolatielaag en het houtskelet kan. Hier kan dus de conclusie getrokken worden dat waterinfiltraties in de isolatielaag te allen tijde vermeden moeten worden.

8. CASE STUDIES

De kennis opgedaan in de vorige hoofdstukken over de invloed van de verschillende parameters kan gebruikt worden in concrete schadegevallen om het uitdrogingsgedrag te voorspellen en waar mogelijk te verbeteren.

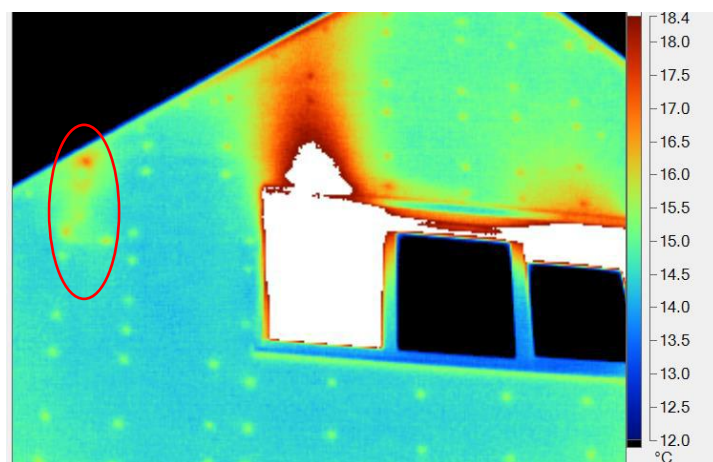
8.1. WAASMUNSTER

De Onderzoeksgroep Bouwfysica van de Universiteit Gent heeft een rapport opgemaakt rond een schadegeval in Waasmunster [35]. Het gaat om een woning met een structuur uit houtskeletbouw, die bezet is met een pleistersysteem (Figuur 140).



Figuur 140: Muuropbouw Waasmunster

Vooraf in de winter is er een duidelijke aftekening van schade waarneembaar. Om de precieze oorzaken te onderzoeken, zijn er thermografische metingen en boringen uitgevoerd in juli 2015. Aan de hand van de thermografische metingen werden verschillende vermoedelijke vochtophopingen ontdekt.



Figuur 141: Thermografisch beeld duidt op een vochtophoping aan de dakrand

Niet elke verkleuring in een thermografisch beeld duidt per se op een achterliggende vochtophoping. Andere verkleuringen in de foto's waren eenvoudig te verklaren door bijvoorbeeld een openstaand raam. Door op de vermoedelijk vochtige plaatsen te boren, konden de vochtgehalten in elk deel van de constructies zorgvuldig bepaald worden.



Figuur 142: Verkleuringen in de winter



Figuur 143: Plaats van boring in de zomer

De boring 2 die verder uitgebreider onderzocht wordt is gemaakt op een plaats aan de regenpijp waar in de winter verkleuringen zichtbaar waren. Er is op deze plaats geen EPS-plaat aanwezig. Op een andere boring (3) wel en die EPS verhindert de achterliggende OSB-plaat om uit te drogen. Deze OSB-plaat staat volledig nat bij de boringen.

De samples werden dampdicht verpakt om verdamping tijdens het transport te vermijden. In het labo werden de samples gewogen en gedroogd. Het materiaal wordt als droog beschouwd wanneer het verschil in gewicht tussen drie opeenvolgende metingen (minimum 24 uur tussen) niet hoger is dan 0.1 % van de totale massa. Aan de hand van deze metingen kan het precieze vochtgehalte bepaald worden:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0}$$

Met:

u Massaprocent vocht [M%]
m Initiële massa [g]
m₀ Massa na droging [g]

Een regel bij hout is dat er een gevaar is op houtrot of schimmelvorming wanneer het vochtgehalte de 20 % overstijgt, en dit gedurende een langere tijd. De precieze criteria zijn:

- Voor schimmelvorming: de ondergrens is 20 massaprocent en 5°C gedurende minimum 720 uur.
- Voor houtrot: de ondergrens is 25 massaprocent en 10°C gedurende minimum 168 uur.

Deze schadecriteria zijn echter enkel bekend voor hout. Men moet er rekening mee houden dat plaatmaterialen vaak extra behandeld zijn tegen schimmels en rot, waardoor men andere criteria gaat krijgen. Het risico ligt in werkelijkheid dus waarschijnlijk een stuk lager.

Onderstaande vochtgehaltes werden bekomen voor de genomen stalen.

	Sample 1: droog	Sample 2: nat	
houtvezelplaat (40mm)	12.17%	a.Buitenste 20mm 5.42% b.Middelste 15mm 15.17% c.Binnenste 5mm 20.35%	halfdroog vochtig
OSB (18mm)	halfdroog	103.87%	nat (buitenopp) vochtig(binnenopp)
Gebitumineerde houtvezelplaat (18mm)	-	a.Buitenste 17mm 90.96% b.Binnenste 1mm 18.07%	
cellulose	-	19.18%	
OSB	-	-	normaal droog/halfdroog

Figuur 144: Resultaat van de vochtmetingen op de boorsamples

De boringen 2 en 3 vertonen dezelfde vochtgehaltes. Ze worden beiden eens gesimuleerd. Het verschil tussen beide boringen is de aanwezigheid van de EPS-plaat bij boring 3. Bij boring 2 ontbreekt deze.

Het is belangrijk om te kunnen inschatten of de constructie met deze vochtgehaltes kan uitdrogen eens de oorzaak van de lekkage opgelost wordt. Hiertoe werden simulaties uitgevoerd met WUFI. De simulaties lopen over een periode van 25 jaar. Zo kan gekeken worden naar de uitdrogingscapaciteiten van de structuur. De simulaties werden uitgevoerd met de opgemeten vochtwaardes. Uit de simulaties bleek dat geen enkel getest sample in staat zou zijn om voldoende uit te drogen binnen een aanvaardbare termijn. Zelfs wanneer de simulaties worden uitgevoerd met een standaard vochtgehalte, zijn de vochtgehaltes in de winter nog onaanvaardbaar hoog. De kans op schade is dus groot, ook zonder lekken.

Er is dus een fundamentele wijziging aan de opbouw nodig om deze constructie te behoeden van verdere schade. Daarom worden er verdere simulaties uitgevoerd om te kijken wat de impact van verschillende ingrepen zou zijn. De hierboven getrokken conclusies worden toegepast op dit voorbeeld uit de praktijk.

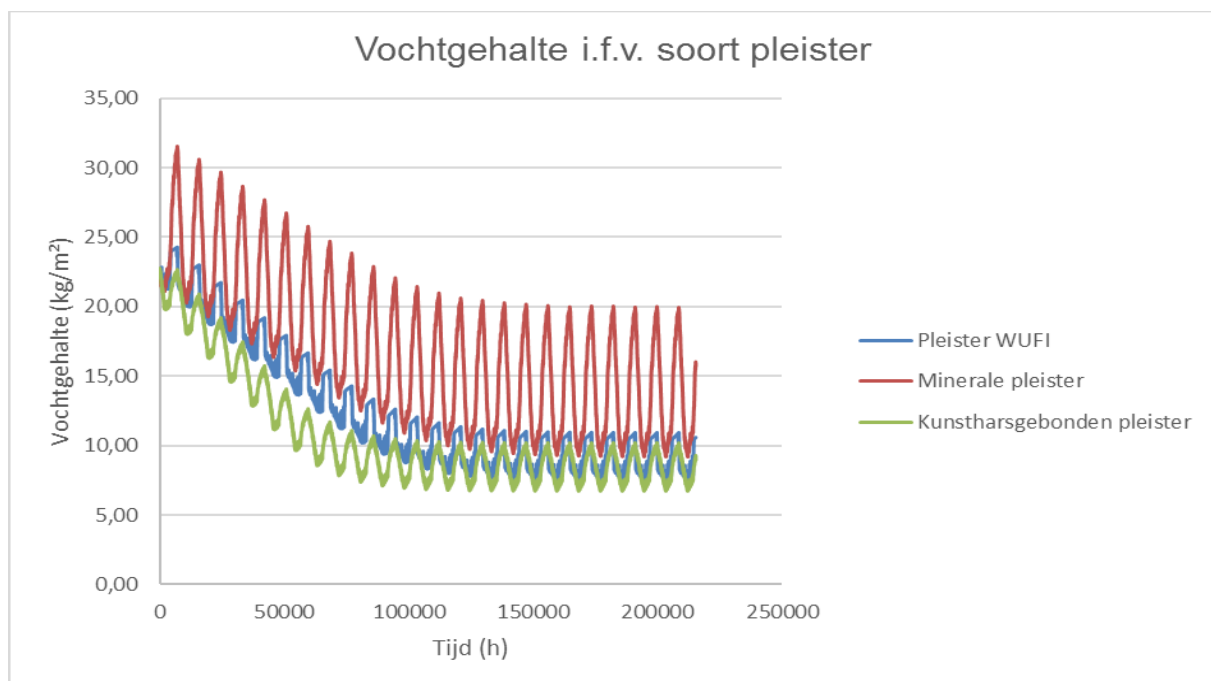
De volgende vochtgehaltes worden gehanteerd voor de verschillende materialen, gebaseerd op de gemeten vochtgehaltes. Wanneer er geen vochtgehalte bekend is, wordt er gerekend met een standaardvochtgehalte bij een relatieve vochtigheid van 80%.

Materiaal	Dikte (mm)	M%	Vochtgehalte (kg/m ³)
Pleister WUFI	10	/	15
Kunstharsgebonden	3	/	10
Minerale pleister	12,5	/	45
Houtvezelplaat	20	5,42	50,18
Houtvezelplaat	15	15,17	81,65
Houtvezelplaat	5	20,38	179,59
EPS	18	/	1,79
MW	18	/	1,79
OSB	18	103,87	638,82
Gebitumineerde houtvezelplaat	17	90,96	245,59
Gebitumineerde houtvezelplaat	1	18,07	48,8
Cellulose	140	19,18	13,43
OSB	18	/	92
Lucht	40	/	1,88
Gipskartonplaat	12,5	/	6,3

Tabel 22: Oplijsting van de vochtgehalten de gemeten vochtgehalten en de vochtgehalten gebruikt voor de simulaties voor de verschillende materialen

Vervanging van soort pleister

De gebruikte buitenpleister is momenteel onbekend. De eerste simulaties werden uitgevoerd met een standaardpleister in WUFI. De buitenpleister kan vervangen worden door een kunstharsgebonden pleister. Deze wordt in een kleinere dikte aangebracht. Uit voorgaande simulaties bleek dat deze pleister zorgde voor een kleine schommeling in het vochtgehalte. Een minerale pleister is ook een optie.



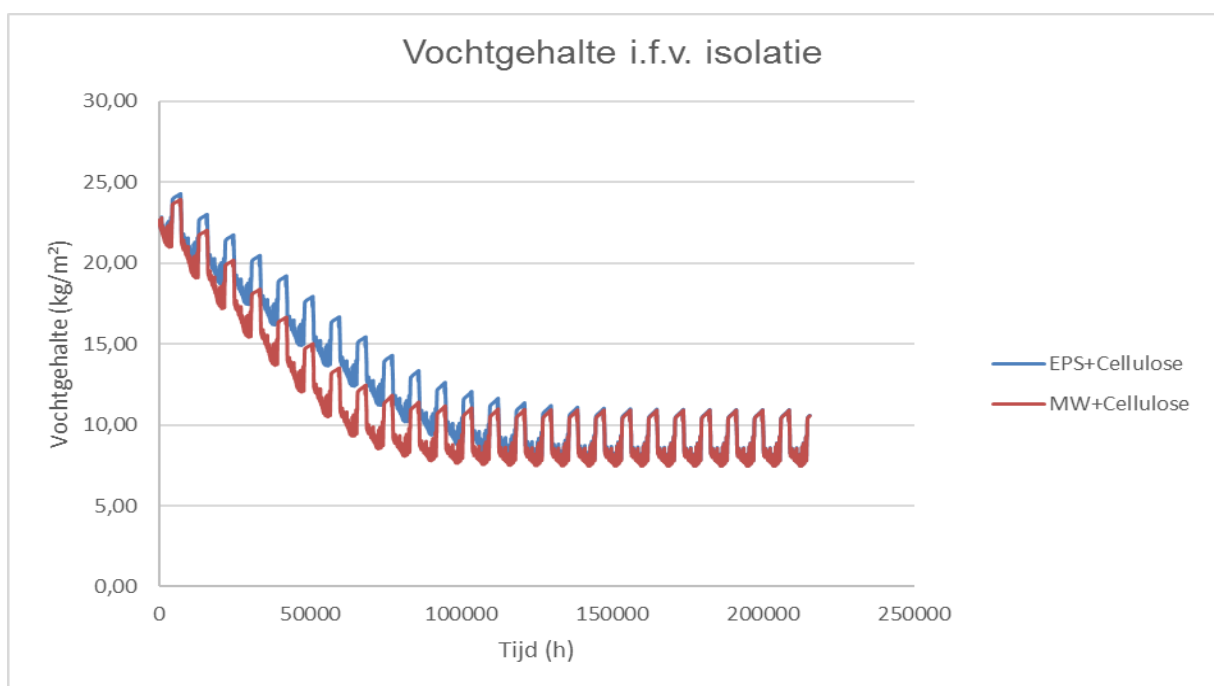
Figuur 145: Het vochtgehalte i.f.v. de soort pleisterafwerking

In dit geval lijkt de keuze voor een kunstharsgebonden pleister het beste voor het totale vochtgehalte. Bij minerale pleister gaat het vochtgehalte heel erg schommelen, misschien net doordat het zoveel meer vocht doorlaat. Bij alle pleistersoorten zien we dat het vochtgehalte pas stagneert na ongeveer 11 jaar.

Vervanging van buitenste isolatielaag

In de isolatielaag heeft zich sinds de oplevering al heel wat vocht kunnen verzamelen. Wanneer deze isolatie vervangen wordt door andere isolatie, is het probleem op lange termijn dan opgelost?

Als men dezelfde isolatiesoort terugplaatst, kan men verwachten dat binnen afzienbare tijd dezelfde problemen opnieuw optreden.

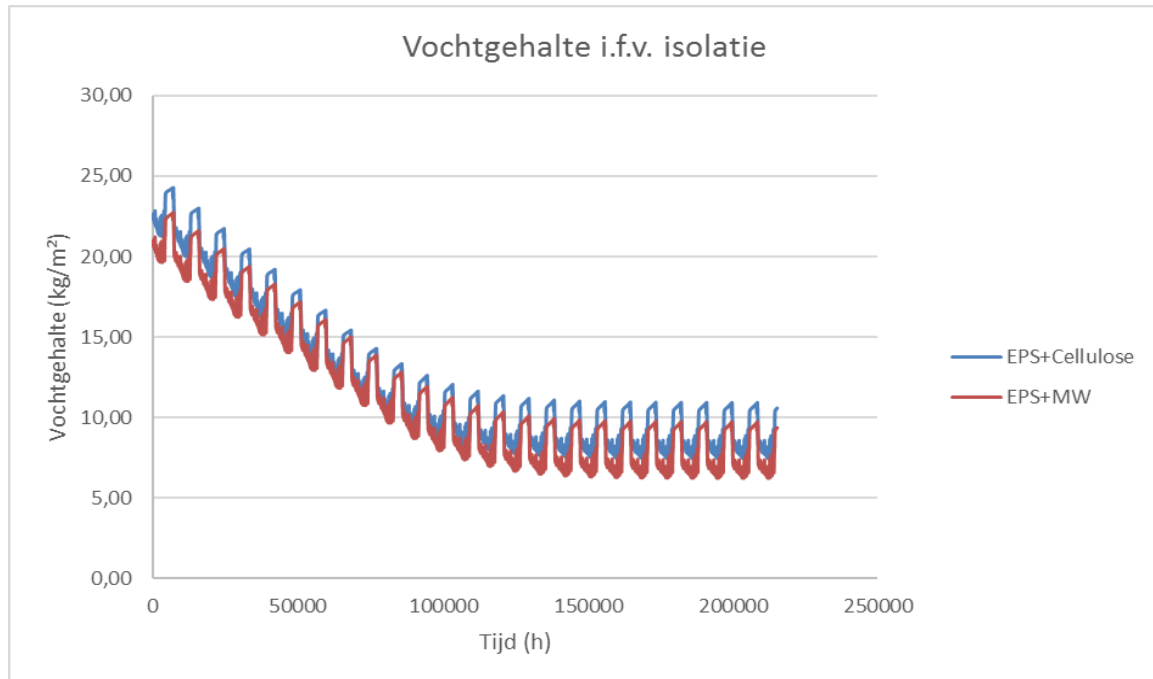


Figuur 146: Vochtgehalte i.f.v. de soort isolatie

Bij vervanging door minerale wol zal de constructie iets sneller uitdrogen, maar het evenwichtsvochtgehalte dat na een aantal jaren bereikt wordt, blijft gelijk.

Vervanging van cellulose door MW

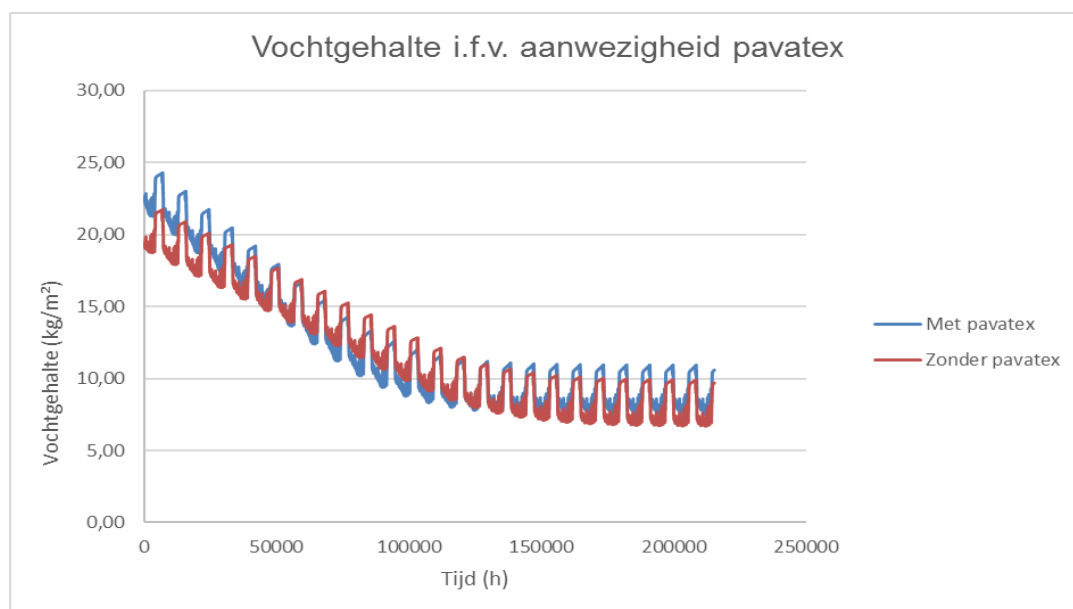
MW heeft een hogere dampdoorlaatbaarheid en slaat ook minder vocht op dan cellulose isolatie. Geeft dit de kans aan de OSB-plaat en andere materialen om uit te drogen naar binnen?



Figuur 147: Vochtgehalte i.f.v. de soort isolatie aan de buitenzijde

Dit leidt slechts tot een klein verschil in het totale vochtgehalte. De constructie moet ook grotendeels afgebroken worden om deze isolatie te kunnen vervangen. Dit lijkt dus niet de meest geschikte oplossing.

Verwijdering van de pavatexplaat



Figuur 148: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van de houtvezelplaat Pavatex

De houtvezelplaat kan verwijderd worden. De U-waarde blijft met $U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ voldoen aan de norm van $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ voor een gevelopbouw. In deze constructie (met EPS en Cellulose) heeft dit echter geen grote invloed. Het initieel vochtgehalte is lager doordat er geen houtvezelplaat meer is die veel vocht bevatte, maar na 5,5 jaar bezitten beide constructies hetzelfde totale vochtgehalte.

Combinatie van factoren

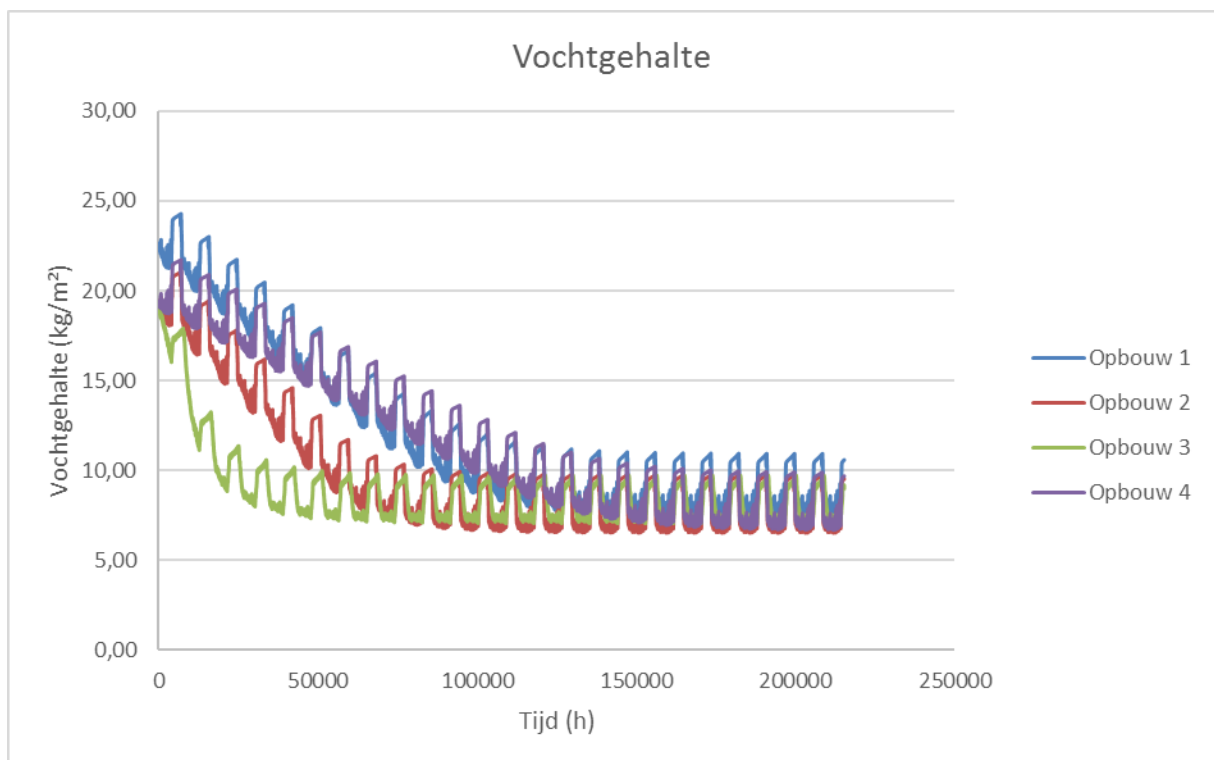
Verschillende opbouwen worden vergeleken die een combinatie zijn van voorgaande parameters.

Opbouw 1: de originele opbouw, gesimuleerd zoals in de plannen van de architect, met de gemeten vochtwaardes in juli 2015

Opbouw 2: Dezelfde opbouw, maar met MW ipv EPS. Hier wordt er echter nog gerekend met de gemeten vochtwaardes in de pavatexplaat. Er wordt dus vanuitgegaan dat de pavatexplaat verwijderd wordt, de EPS vervangen wordt en dan dezelfde pavatexplaten terug worden geplaatst.

Opbouw 3: De opbouw zonder de pavatex platen. Zoals hierboven vermeld voldoet de muuropbouw nog steeds aan de vereiste U-waarde.

Opbouw 4: De pavatex platen worden weggenomen en er wordt minerale wol geplaatst i.p.v. EPS.



Figuur 149: Vochtgehalte i.f.v. de verschillende gevelopbouwen en materiaalkeuzes

Bij opbouw nr.3 gaat de constructie het snelst gaan uitdrogen. Dit gaat echter nog steeds over een uitdrogingsperiode van 5,5 jaar. Dit is veel te lang.

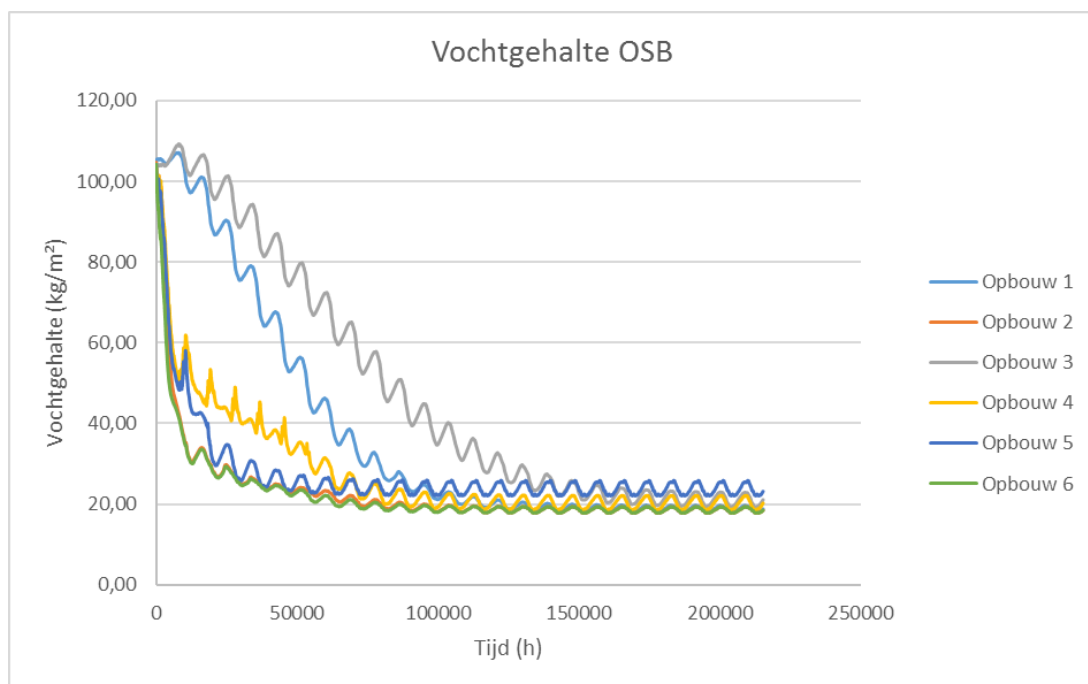
Nieuwe constructie

De laatste stap is een volledig nieuwe constructie. Dit is natuurlijk niet gewenst, want dan kan men even goed het volledige huis afbreken.

Effect op vochtgehalte in OSB-plaat

Het effect van de parameters wordt hiervoor echter bestudeerd op het totale vochtgehalte. Voor een houtconstructie zijn de OSB-plaat en de houtvezelplaten het gevoeligste aan een te hoog vochtgehalte. De regels voor hout zijn hierboven reeds beschreven. Men kan dus controleren welke vochtgehaltes (in M%) voor de verschillende opbouwen behaald worden en of deze onder de schadegrenzen blijven. De simulaties lopen over een periode van 25 jaar. Deze lange periode is nodig om het volledige uitdrogingsgedrag te kunnen bestuderen.

- Opbouw 1: De originele opbouw, gesimuleerd zoals in de plannen van de architect, met de gemeten vochtwaardes in juli 2015
- Opbouw 2: Dezelfde opbouw, maar met MW ipv EPS. Hier wordt er echter nog gerekend met de gemeten vochtwaardes in de pavatexplaat. Er wordt dus vanuitgegaan dat de pavatexplaat verwijderd wordt, de EPS vervangen wordt en dan dezelfde pavatexplaten terug worden geplaatst. In opbouw 6 worden de platen mee vervangen.
- Opbouw 3: De opbouw zonder de pavatex platen. Zoals hierboven vermeld voldoet de muuropbouw nog steeds aan de vereiste U-waarde.
- Opbouw 4: De pavatex platen worden weggenomen en er wordt minerale wol geplaatst i.p.v. EPS.
- Opbouw 5: Zelfde als opbouw 4, maar als afwerkingslaag wordt gewerkt met een kunstharsgebonden pleister.
- Opbouw 6: Dezelfde opbouw als opbouw 2, met nieuwe pavatex platen.

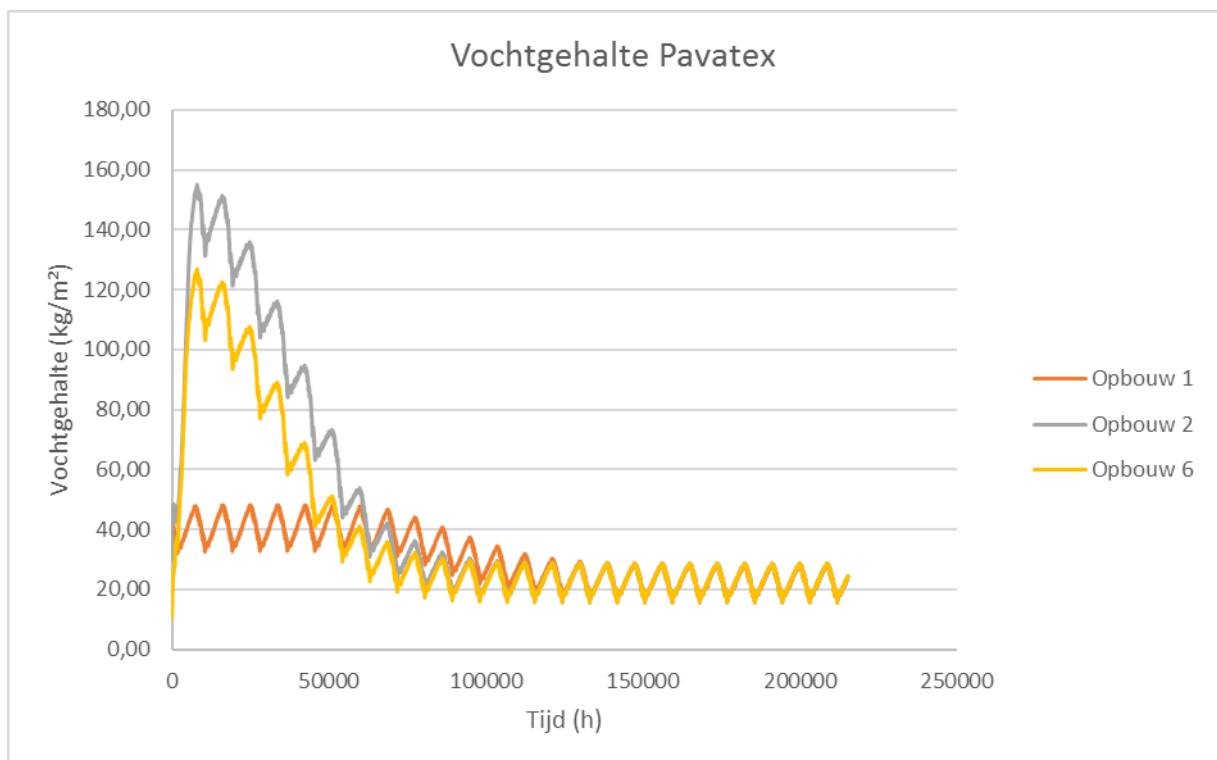


Figuur 150: Het vochtgehalte in massaprocent in de OSB-plaat

Uit bovenstaande grafiek blijkt duidelijk dat enkel bij opbouw 2 en 6 de OSB-plaat op lange termijn onder de 20 massaprocent zal blijven. Het is wel duidelijk dat de gevelconstructies met minerale wol sneller een lager vochtgehalte bereiken dan de gevelconstructies met andere isolatiematerialen. Dit komt door de grote dampdoorlaatbaarheid van minerale wol.

Geen enkele van de constructies kan snel genoeg uitdrogen. Ook bij opbouw 2 en 6 is het pas na een aantal jaren dat het vochtgehalte onder de 20 massaprocent daalt. Hierdoor is er kans op schimmelvorming en houtrot gedurende de eerste jaren.

Het vochtgehalte in de pavatexplaten blijkt in geen enkele van de opbouwen te voldoen. Het vochtgehalte blijft schommelen rond de 20 massaprocent.



Figuur 151: Het vochtgehalte in massaprocent in de pavatexplaat

Er lijkt dus niet meteen een oplossing voorhanden te zijn om deze constructie op een eenvoudige manier te redden.

8.2. LEEUWERGEM

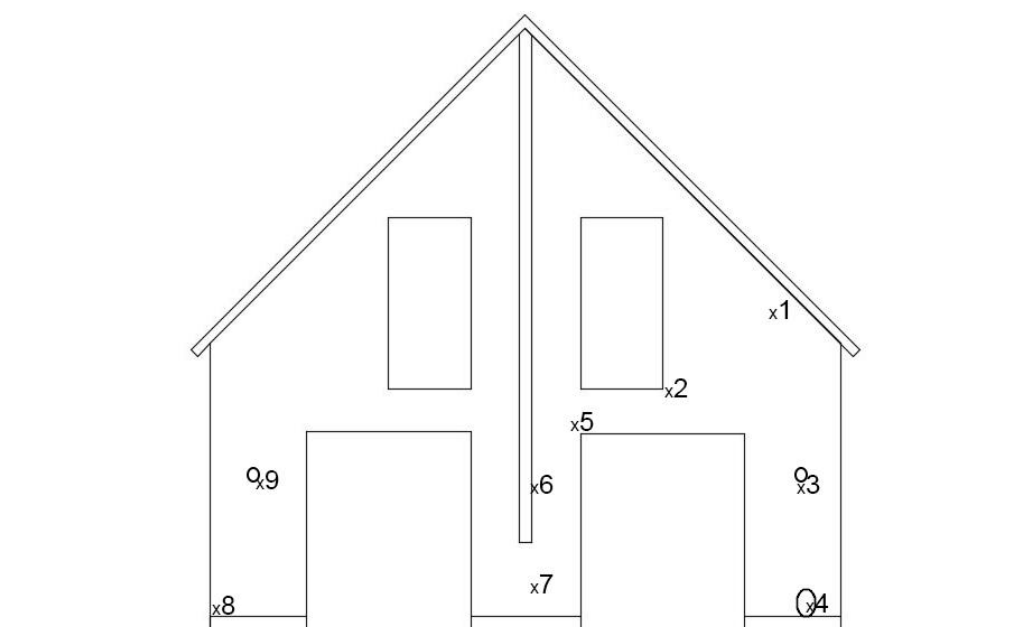
Korte schets van het schadebeeld

De gevel werd vlak voor de winter 2015 afgewerkt met een pleistersysteem met EPS. De dakrand was nog niet volledig afgewerkt. Sindsdien treden er verschillende schadefenomenen op, voornamelijk op de zuidzijde:

- Blaasvorming bij regenachtige dagen
- Microscheuren in het geveloppervlak en macroscheuren aan de hoeken van de ramen
- De pleister komt los in de hoeken van de zuidgevel met de westgevel, en van de zuidgevel met de oostgevel.
- Lijn op het gevelvlak bij overgang van snelbouwsteen naar houtskelet
- De top van de noordgevel helt naar achter

Vaststellingen

Er zijn indicatieve vochtmetingen uitgevoerd met volgende resultaten. Waarden rond de 130 wijzen op een verzadigd pleistermateriaal. Waarden rond de 70 wijzen op een zeer vochtig materiaal.



Figuur 152: Schets van de zuidgevel met de plaatsen van vochtmeting

Meetpunt	Indicatief vochtgehalte
1	19
2	25
3	32
4	50
5	19
6	34
7	28
8	43
9	38

Tabel 23: Indicatieve vochtmetingen op aangeduide meetpunten

De indicatieve metingen wijzen op een muur die zo goed als droog staat. Op de plaatsen waar de pleister reeds is losgekomen (meetpunt 4) worden iets hogere vochtwaardes genoteerd, maar de waarden bevinden zich nog steeds niet in de gevarenzone. Op de plaatsen van aansluitingen (meetpunten 3,6 en 9) worden hogere vochtwaardes genoteerd. Er rijst de vraag of de openingen correct zijn gedicht. De pleisterlaag is afgewerkt met een donkere verf. Door de donkere kleur is de gevel onderhevig aan snelle opwarming bij zonneschijn. De gevel ondergaat dus grote thermische spanningen. Deze spanningen kunnen leiden tot microscheuren.

Op woensdag 18 mei werden er geen opvallende blaasjes op het gevelvlak gedetecteerd, door het mooie weer van de voorbije dagen. De eigenaar bevestigt dat er bij slecht weer telkens opnieuw blazen op de gevel opduiken. Dit is vooral het geval op de achtergevel. Dit is de zuidgevel en is zwaar onderhevig aan slagregen. Wanneer de eigenaar de achtergevel met een tuinslang besproeit, komen er ook blazen op. Dit duidt op microscheuren in de pleister waarlangs water kan binnendringen. Ook op de hoeken grenzend aan deze zuidgevel is er schade en komt er pleister los. De blaasvorming lijkt dus een oppervlaktefenomeen te zijn, aangezien ze uitdrogen bij mooi weer. De muur staat momenteel ook droog, wat de hypothese van het oppervlaktefenomeen bevestigt.



Figuur 153: Losgekomen stukken pleister onderaan de muur in de hoeken

De pleistergevel werd geplaatst net voor de winter in 2015. Gedurende een aantal maanden is de dakrand onvolledig afgewerkt gebleven waardoor er een opening was waarlangs water kon infiltreren (Figuur 154). Dit detail is nu wel afgewerkt met een zinken profiel (Figuur 155). Er valt echter niet te controleren of de aansluiting tussen de dakrand en de pleister nu op een goede manier is afgedicht. Is er een zwelband gebruikt?



Figuur 154: Onafgewerkte dakrand



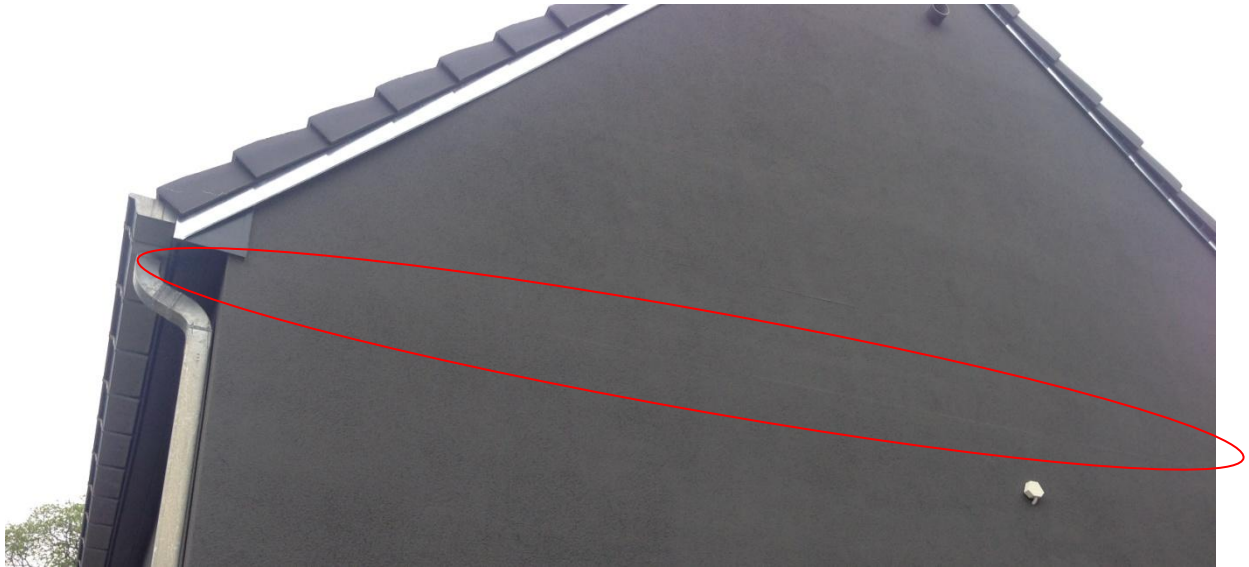
Figuur 155: Afgewerkte dakrand

Het loskomen van de pleister onderaan de hoeken kan aldus een samenlopen van omstandigheden zijn: de dakranden die gedurende een aantal maand onafgewerkt gebleven zijn, water dat langs de gevel loopt en blijft staan op het aluminium sokkelprofiel en opspattend regenwater. De pleister onthecht zich op verschillende plaatsen op de gevel. Aan de westgevel duiden de vochtmetingen aan dat het vochtgehalte in de stukken boven de onthechtte pleister (rode ellips) ook hoger zijn, wat wil zeggen dat het waarschijnlijk een kwestie van tijd is voor die stukken ook loskomen.



Figuur 156: Hoek aan de westgevel

Het is ook onzeker wat de staat van de constructie was toen de afwerkingslaag erop is aangebracht. Heeft de constructie de tijd gehad om uit te drogen voor de laatste laag erop werd aangebracht? Werd de pleister op een droge ondergrond geplaatst? Dit is cruciaal. Anders kan dit leiden tot slechte hechting, met alle gevolgen van dien.



Figuur 157: Lijnvorming op de overgang tussen verschillende ondergronden

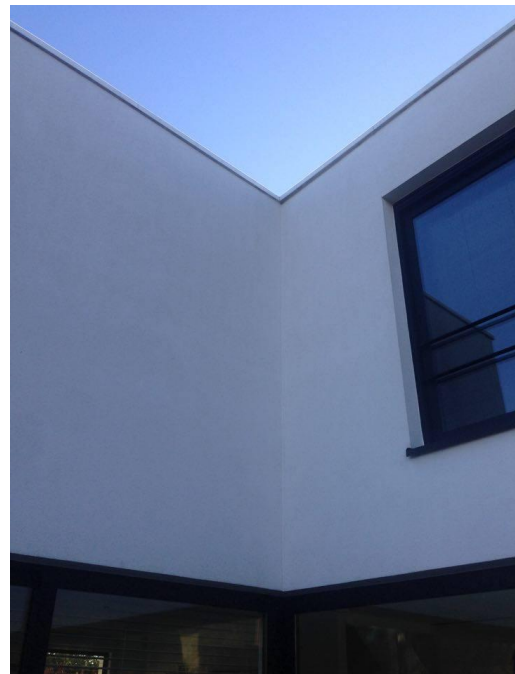
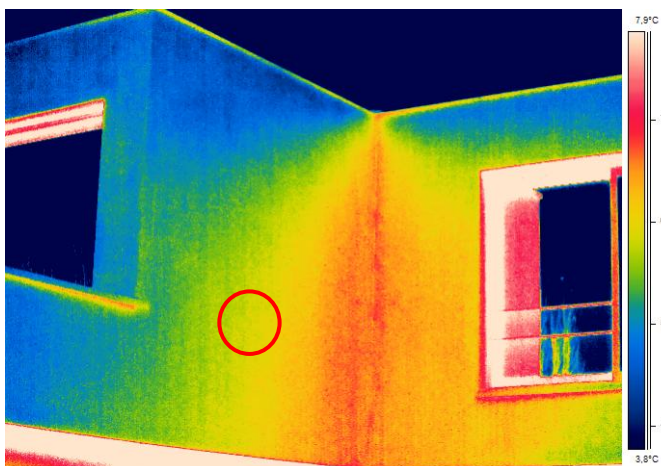
Een ander schadefenomeen is de lijnvorming in het gevelvlak daar waar de overgang tussen de snelbouwstenen (achteraan)/metselwerk (vooraan) en het houtskelet zich bevindt. Er is misschien geen uitzettingsvoeg gebruikt in de pleisterafwerking. De lijn vertoont geen verhoogde vochtgehaltes; er zit geen vocht achter.

8.3. Schadegeval Marke

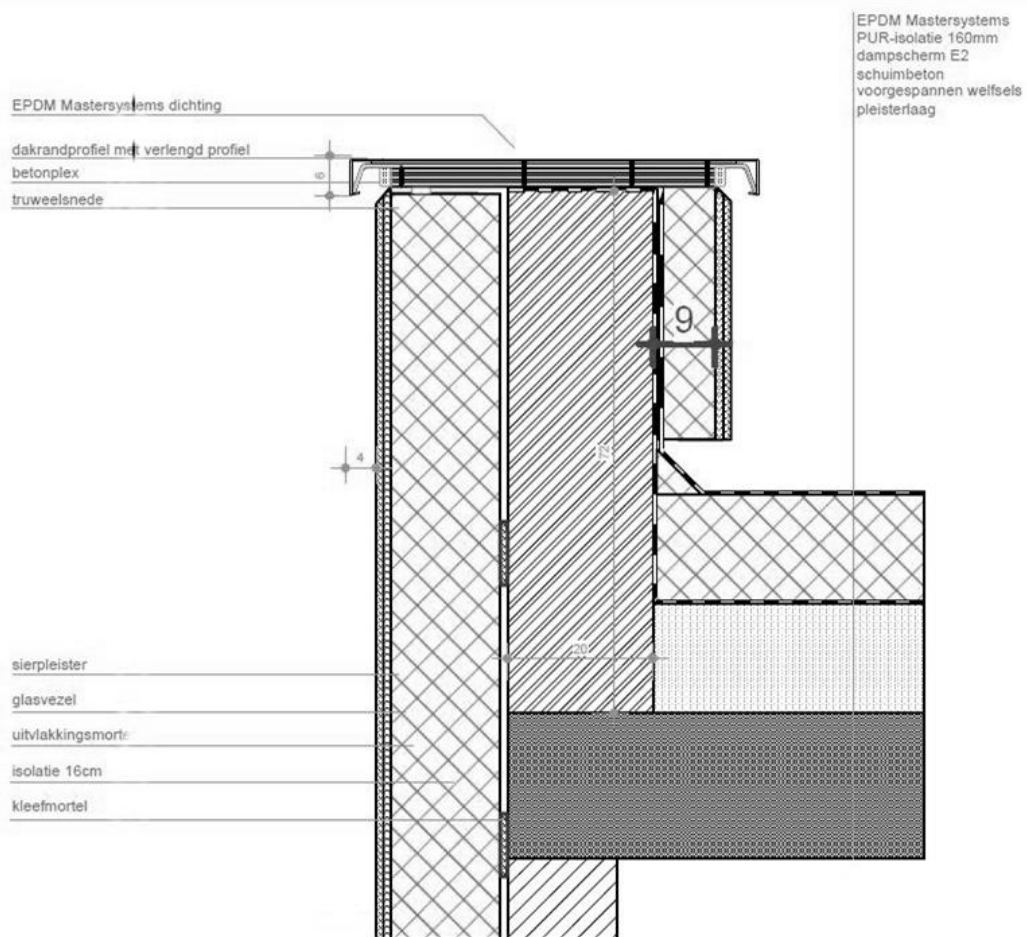
Bij dit schadegeval is er schade aan de binnenzijde. Aan de buitenzijde is er niets van schade op te merken. Ook de thermografische metingen hebben niets uitgewezen. Opvallend is dat de schade zich manifesteert ter plaatse van een naad in de dakrand. Elke minieme waterinfiltratie bij een pleistergevel kan leiden tot schade. Pleister zelf is waterdicht, maar de aansluitingen zijn cruciaal.



Figuur 158: Schimmelvorming aan de binnenzijde



Figuur 159: Aan de buitenzijde is er geen schade zichtbaar



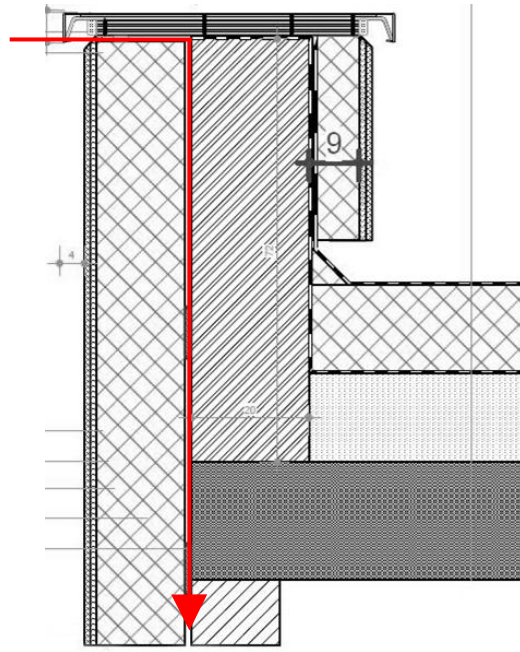
Figuur 160: Dakrandsnede volgens de plannen van de architect

Bij het openleggen van de dakrand bleek dat er een voeg niet waterdicht afgesloten was, waardoor het water kon binnendringen en in de constructie bleef.



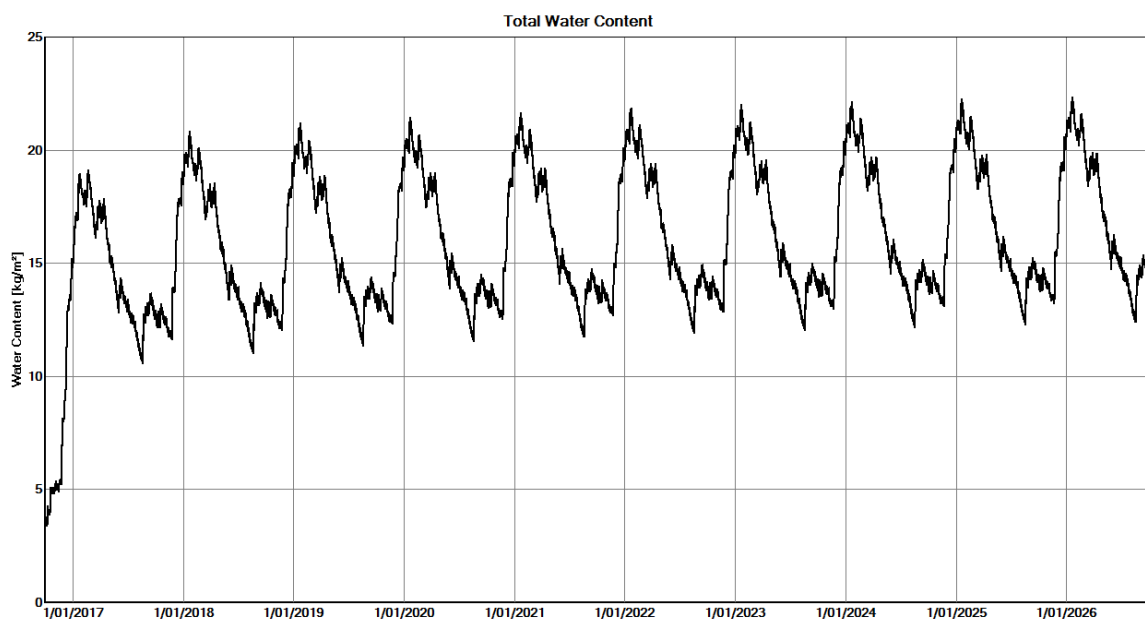
Figuur 161: Het openleggen van de dakrand

Om te kijken hoe het tot schimmelvorming kan komen, wordt er een vochtbron gesimuleerd. Het is echter raden naar de precieze grootte van deze vochtbron. De ruimte wordt gebruikt als wasruimte, dus voor de binnenklimaatklasse kan binnenklimaatklasse 4 gekozen worden. De vochtbron wordt gesimuleerd tussen de isolatielaag en het metselwerk. Het pad van het water wordt als volgt verondersteld:



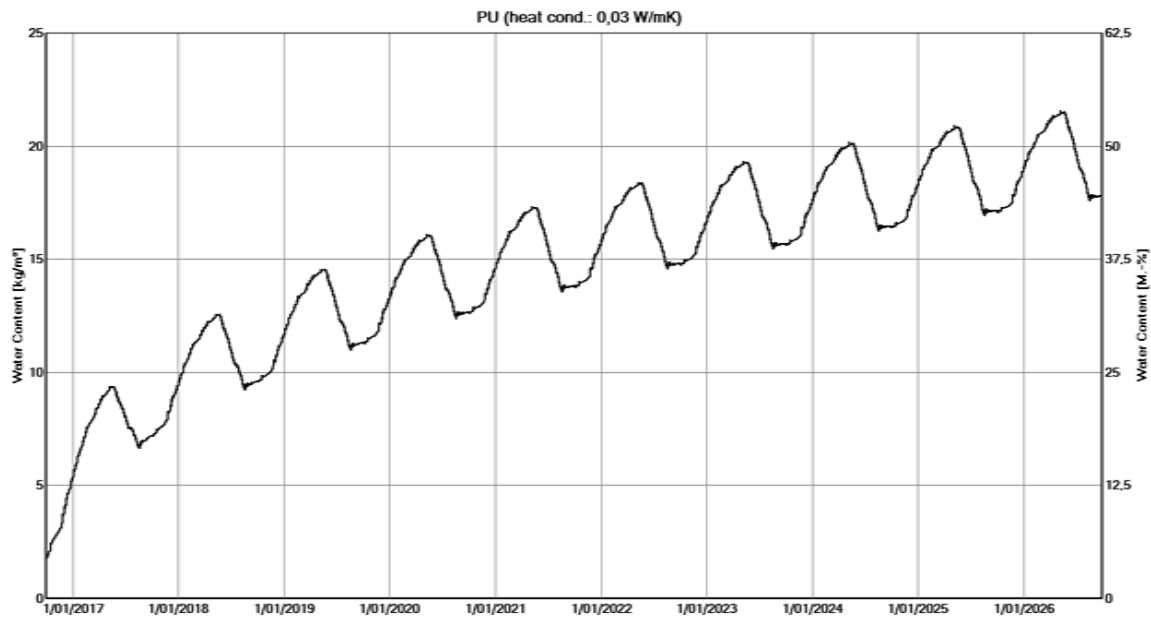
Figuur 162: Pad van het water

Als gevolg van deze vochtbron, gaat het totale vochtgehalte in de constructie langzaam stijgen.

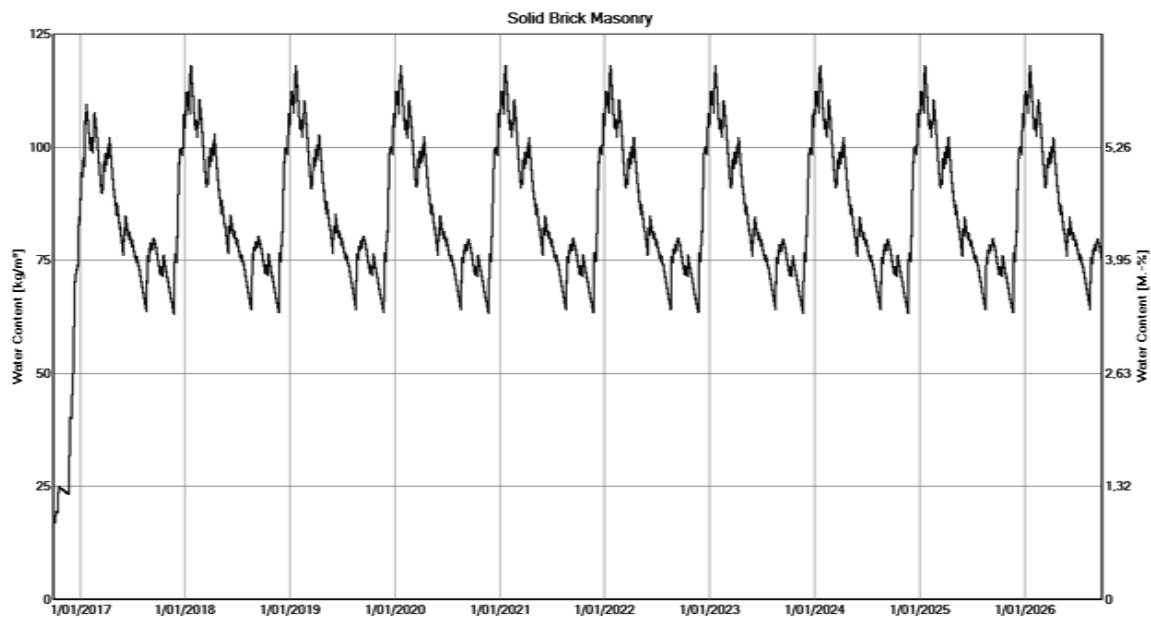


Figuur 163: Totale vochtgehalte van de constructie over een periode van 10 jaar

Ook de vochtgehaltenes in het metselwerk en de isolatie stijgen doorheen de jaren. Er is geen uitdroging mogelijk.



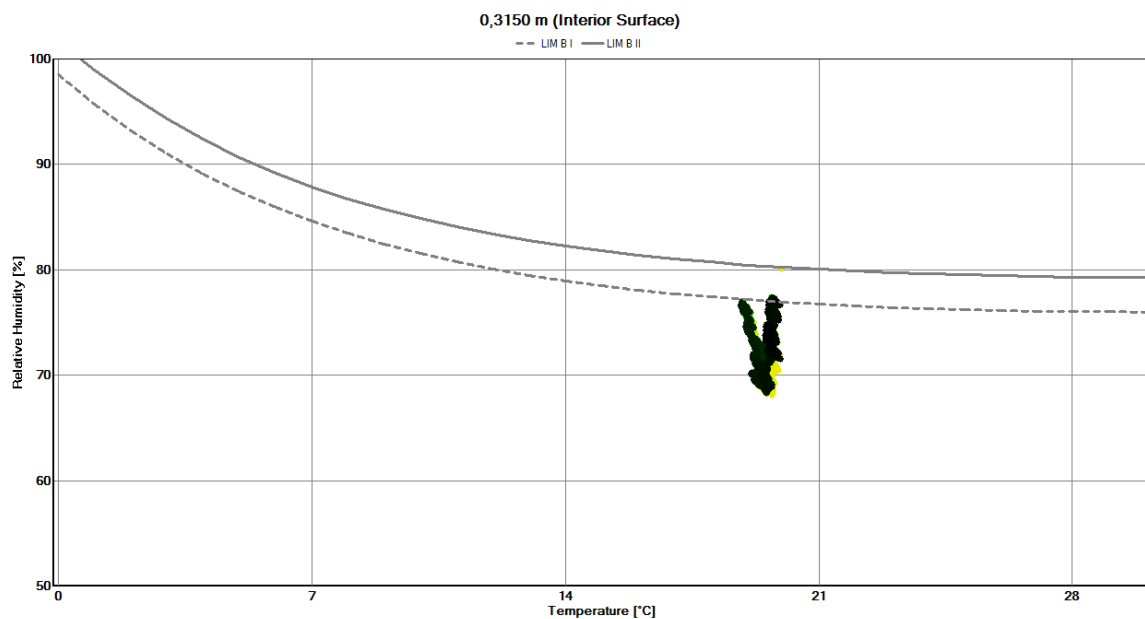
Figuur 164: Vochtgehalte in de isolatielaag



Figuur 165: Vochtgehalte in de baksteenlaag

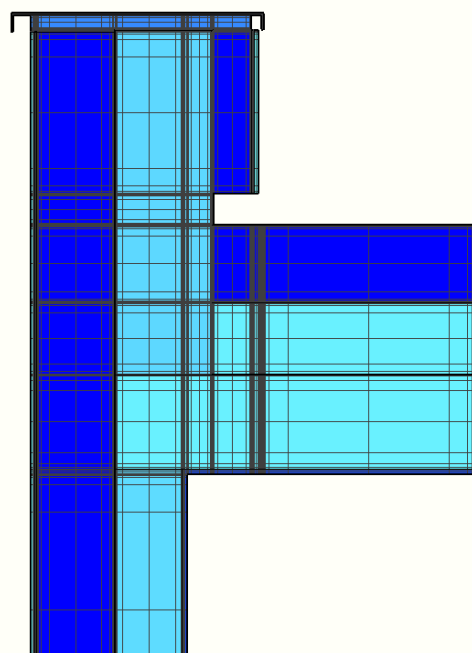
Als we eens kijken naar het isopleetdiagram aan het binnenoppervlak zien we dat deze vochtbron niet meteen een schimmelrisico inhoudt voor de pleisterlaag, maar de schimmelcondities wel benadert. In werkelijkheid is er wel schimmel opgetreden. Misschien is het binnenklimaat net iets vochtiger dan de waarden die WUFI aangeeft en leidt het daarom tot schimmel. De eigenschappen van de materialen kunnen ook verschillen met de werkelijkheid. Misschien heeft de baksteen een iets andere vochtopslagcurve, andere

dampdiffusieweerstand enz. De vochtbron die gesimuleerd is, is ook maar een berekeneerde vochtbron en kan verschillen van de werkelijkheid. Al deze verschillen kunnen het verschil tussen simulatie en werkelijkheid verklaren.



Figuur 166: Isopleet van het binnenoppervlak

Het dakdetail kan ook eens in WUFI 2D gesimuleerd worden om de vochtverdeling in de constructie te bestuderen. Ook hier wordt er een vochtbron gesimuleerd tussen de isolatielaag en het metselwerk. Onderstaande afbeelding geeft de vochtgehaltes weer. Hoe donkerder blauw, hoe hoger het vochtgehalte.



Figuur 167: Startverdeling van de vochtgehaltes in het dakdetail

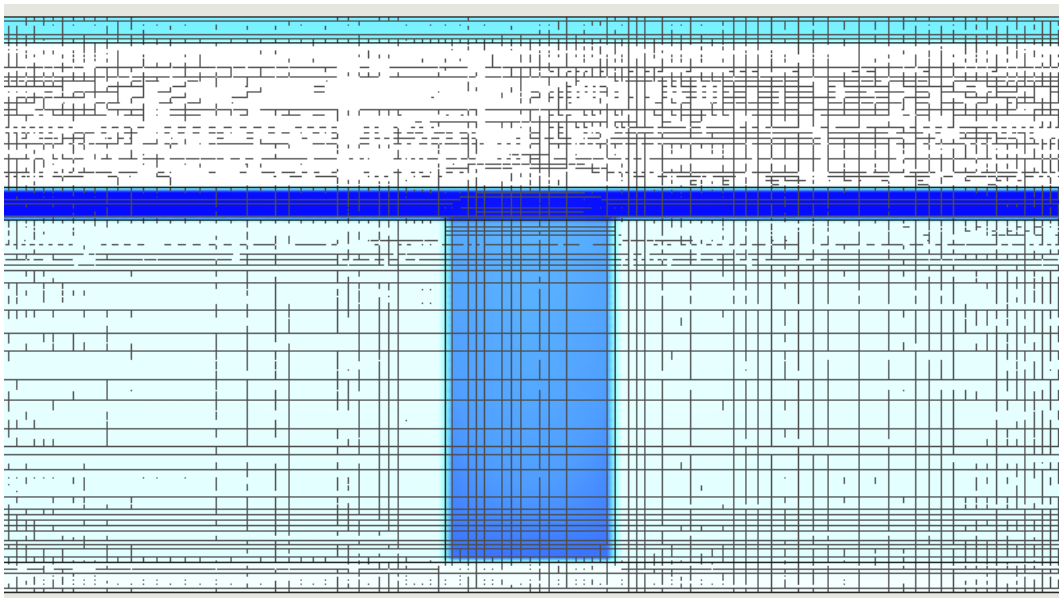
9. BEDENKINGEN

Er zijn een aantal bedenkingen op zijn plaats na het bestuderen van het uitdrogingsgedrag van een ETIC-systeem a.d.h.v. WUFI.

Zoals al eerder vermeld blijft WUFI een rekenkundig programma, en zijn de resultaten dus nooit volledig gelijk aan de werkelijkheid. De realiteit is een stuk minder voorspelbaar. Het klimaat kent de laatste jaren steeds extremere pieken: hete zomers en koude winters. De klimaatdata in WUFI zijn echter constanten; ze zijn voor elk jaar gelijk. Ook de vochttopslagcurve in WUFI voldoet niet aan de werkelijkheid. Dit zorgt ervoor dat vochtgehaltes in WUFI soms lager zijn dan in werkelijkheid. WUFI laat vocht ook soms plots verdwijnen. (niet hetzelfde als uitdrogen! In werkelijkheid is het vocht er wel nog, maar WUFI kan er niet meer mee rekenen).

Een tweede bedenking is dat alle simulaties zijn uitgevoerd m.b.v. WUFI 1D. Hierdoor wordt het houtskelet niet volledig realistisch in beeld gebracht. De isolatie in de nabijheid van het houtskelet zal beïnvloed worden door dit houtskelet en vice versa. Voor de duidelijkheid zijn er ook eens simulaties uitgevoerd voor een standaard opbouw in WUFI 2D en deze onderstaande figuur toont duidelijk aan dat een 1D-onderzoek eigenlijk niet volledig is.

Het vochtgehalte wordt aangeduid in het blauw. Hoe donkerder het blauw, hoe hoger het vochtgehalte. De bovenzijde van de afbeelding is de buitenzijde, de onderzijde is de binnenzijde.



Figuur 168: Vochtverdeling in een houtskelet

De randen van het houtskelet zijn lichtblauw, wat wijst op een lager vochtgehalte. In de kern heerst er een hoger vochtgehalte.

Het onderzoek is uitgevoerd voor een paar standaard gevelconstructies. Er zijn natuurlijk nog een hele reeks andere mogelijke oplossingen te bedenken voor een houtconstructie met ETICS, maar deze vallen buiten het bestek van deze masterproef.

Een laatste bedenking is de onvolledigheid. Er zijn een oneindig aantal mogelijke combinaties van ETICS met een houtskeletbouw: de materialen, de diktes, de specifieke eigenschappen, ... kunnen verschillen. Dit leidt ertoe dat deze studie niet volledig is in zijn mogelijkheden, maar eerder een indicatie geeft over welke parameters bepalend kunnen zijn voor het uitdrogingsgedrag van het systeem.

10. **BESLUIT**

Een catalogus van bouwgebreken is in de toekomst haalbaar wanneer alle schade-experts een eenduidig systeem gaan gebruiken voor het aangeven van schade. Het programma dat wij ontwikkeld hebben is hier een aanzet toe.

Het onderzoek naar het hygrothermisch gedrag van een ETIC-systeem op een houtskeletbouw is iets dat nog maar in zijn kinderschoenen staat. Doordat het systeem nog maar sinds kort wordt toegepast, is er nog niet veel onderzoek naar gebeurd. Deze masterproef is een aanzet tot het bestuderen van invloedsfactoren en hun effecten op de materialen in de constructie.

Een eerste conclusie die ook blijkt uit de verschillende onderzochte schadegevallen, is de gevoeligheid aan fouten. Meer dan een metselwerkconstructie, is een houtconstructie gevoelig aan waterinfiltraties die kunnen leiden tot schimmel en houtrot. Wanneer er fouten opduiken in de constructie kan dit tot ontoelaatbare waterinfiltraties leiden die het normaal functioneren van de constructie in gevaar kunnen brengen. Een zorgvuldige uitvoering van ETIC-systemen is dan ook vereist.

Er bestaan geen vaste schadecriteria voor pleistergevels. Er bestaan wel een aantal schadefenomenen die op falen kunnen wijzen, zoals blaasvorming, scheurvorming, schimmel, onthechting, verkleuringen ed. Voor houtconstructies zijn de schadecriteria wel gemakkelijk te achterhalen en te controleren.

De simulaties werden uitgevoerd voor verschillende reeksen muuropbouwen die verschillende invloedsparameters testen. WUFI blijft echter een rekenprogramma, dus de resultaten van deze masterproef moeten met de nodige voorzichtigheid bekeken worden.

Iets wat WUFI onderscheidt van oudere simulatieprogramma's is dat het geen abstractie maakt van invloed van langegolfstraling. Dit fenomeen kan leiden tot nachtelijke onderkoeling en oppervlaktecondensatie. Wanneer men de verschillende oriëntaties met elkaar vergelijkt, blijkt duidelijk dat het een noordgevel het traagst uitdroogt en een zuidgevel het snelst. Het aanbrengen van een coating zorgt voor een minder schommelend verloop in het vochtgehalte in de muur omwille van de verminderde opname van slagregen. Omgekeerd geldt echter ook dat hoe dampdichter de verf is, hoe moeilijker het vocht uit de constructie kan uitdrogen.

De juiste materiaalkeuze speelt ook een belangrijke rol. Afhankelijk van het te verwachten initiële vochtgehalte kunnen bepaalde keuzes voor isolatiematerialen meer geschikt zijn dan andere, of bepaalde pleistersoorten een betere uitdroging mogelijk maken. In het algemeen kan men zeggen dat minerale wol snellere uitdroging toelaat dan EPS door zijn kleinere dampdiffusieweerstand, en cellulose het meest vocht kan opslaan van de drie isolatiematerialen.

Het initiële vochtgehalte heeft een cruciale rol in het hygrothermisch gedrag. Men moet er op blijven hameren dat het systeem pas mag geplaatst worden op een ondergrond die zijn evenwichtsvochtgehalte heeft bereikt. Verzadigde materialen hebben jaren tijd nodig om tot aanvaardbare vochtgehaltes te komen. Op deze termijn is houtrot en schimmel echter al mogelijk.

De keuze van het dampscherm, de aanwezigheid van een elektrospouw en de keuze van de kleur van de pleister hebben een relatief kleine invloed op het hygrothermisch gedrag. Dit is zo in algemene gevallen. Er zijn ongetwijfeld situaties waarbij een kleur een grote rol speelt ; zie bijvoorbeeld het schadegeval van Leeuwerghem waar een donkerkleurige pleister leidt tot grote thermische spanningen en zo tot microscheuren.

Het binnenklimaat speelt een belangrijke rol, vooral aan het binnenoppervlak. Wanneer er hoge relatieve vochtigheden kunnen verwacht worden aan de binnenzijde, moet men op zijn hoede zijn voor oppervlaktecondensatie en op termijn misschien zelfs schimmelvorming.

Waterinfiltraties leiden tot een hoger vochtgehalte in de constructie, maar lijken pas echt gevaarlijk te zijn wanneer het vocht achter de isolatielaag infiltreert. In het geval dat vocht infiltreert door de pleisterlaag door bijvoorbeeld microscheuren, is er weinig kans op grote schade. Dit is met vochtbronnen die gesimuleerd zijn op basis van effectieve windsnelheden en drukverschillen die in België voorkomen.

Tot slot is het belangrijk om te beseffen dat dit een beginnend onderzoek is en dus zeker niet volledig is.

11. BIBLIOGRAFIE

1. l'AQC, *Sycodés 2014: Pathologie*. 2014, /: /.
2. IVP, *Handboek ETICS in Thermisch buitengevelisolatiesysteem*. 2011, IVP: Brussel. p. 66.
3. Dirkx, I. and Y. Grégoire, *Evaluation of the durability of ETICS: additional requirements in Belgium*.
4. WTCB, *Technische Voorlichting 209: Buitenbepleisteringen*, WTCB, Editor. 1998, Carlo De Pauw: Brussel. p. 54.
5. Rousseau, M., *An overview of the survey of building envelope failures in the coastal climate of British Columbia, performed by Morrisson-Hershfield Limited for CMHC (1996)*. Journal of Building Physics, 1999. **22**(4): p. 364-367.
6. Sutherland, J., *Leaking Buildings - An Industry in Denial*. 2003, UNITEC School of Architecture: Auckland, New Zealand. p. 10.
7. Approvals, E.E.O.o.T., *ETAG 004 - Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering*. 2000: Brussels, Belgium.
8. Janssens, A., *Bouwfysische Aspecten van Gebouwen* 2013, Universiteit Gent: Gent.
9. WTCB, *Technische Voorlichting 252: Vocht in Gebouwen*, in *Bijzonderheden van opstijgend vocht*, WTCB, Editor. 2014, Jan Vestermans: Brussel. p. 68.
10. Künzel, H.M., *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One-and two-dimensional calculation using simple parameters*. IRB-Verlag Stuttgart, 1995.
11. DIN, *DIN 4108-3 Klimabedingerter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung Enthält Randbedingungen und Rechenvorschriften für das Glaser-Verfahren*. 2014.
12. Ximenes, S., et al., *Modelling the degradation and service life of ETICS in external walls*. Materials and Structures, 2015. **48**(7): p. 2235-2249.
13. Barreira, E. and V.P. de Freitas, *External thermal insulation composite systems: Critical parameters for surface hygrothermal behaviour*. Advances in Materials Science and Engineering, 2014. **2014**.
14. Barreira, E. and V.d. Freitas. *Defacement of ETICS cladding due to hygrothermal behaviour*. in *11th International conference on durability of building materials and components, Istanbul, Turkey*. 2008.
15. Vereecken, E., D. Saelens, and S. Roels. *A comparison of different mould prediction models*. in *Proceedings Building Simulation*. 2011.
16. Künzel, H.M. and C. Fitz, *Bauphysikalische Eigenschaften und Beanspruchung von Putzoberflächen und Anstrichstoffen*, in *WTA Schriftenreihe*. 2006. p. 49-71.
17. Maroy, K., *In situ nazicht van defecten in de gebouwschil aan de hand van actieve infrarood thermografie*. 2014, Universiteit Gent Gent.
18. Carmeliet, J., *Duurzaamheid van Weefselgewapende Pleisters voor Buitenisolatie*, in *Bouwkunde*. 1992, Katholieke Universiteit Leuven: Leuven.
19. Hens, H. and J. Carmeliet, *Performance prediction for masonry walls with EIFS using calculation procedures and laboratory testing*. Journal of Building Physics, 2002. **25**(3): p. 167-187.
20. Nannen, D. and K. Gertis, *Thermische Spannungen in Wärmedämmverbundsystemen*. 1984: Bundesverband Kalksandsteinindustrie.
21. Liisma, E., G. Löhmus, and L.-M. Raado, *The effect of temperature and humidity on the permanence of external thermal insulation composite systems*. Procedia Engineering, 2015. **108**: p. 340-348.
22. ISO, *ISO 7892: Vertical building elements -- Impact resistance tests -- Impact bodies and general test procedures*. 2012.

23. Adan, O., et al., *Determination of liquid water transfer properties of porous building materials and development of numerical assessment methods: introduction to the EC HAMSTAD project*. Journal of Thermal Envelope and Building Science, 2004. **27**(4): p. 253-260.
24. Hagentoft, C.-E., et al., *Assessment method of numerical prediction models for combined heat, air and moisture transfer in building components: benchmarks for one-dimensional cases*. Journal of thermal envelope and building science, 2004. **27**(4): p. 327-352.
25. Staatsblad, B., *Transmissie Referentie Document*. 2010. p. 104.
26. Manfred, K. and T. Schmidt. *Radiation effects on exterior surfaces*. in *Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in Nordic Countries*. 2008. Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark.
27. Deboosere, F. *Windrichtingen in België*. 2010 [cited 2016 15/04/2016]; Available from: <http://www.frankdeboosere.be/vragen/vraag115.php>.
28. Normalisatie, B.v., *NBN EN 1062-1: Verven en vernissen - Coatingmaterialen en coatingsystemen voor buitenmetselwerk en -beton - Deel 1 : Classificatie*. 2004, NBN: Brussel.
29. E. Cailleux, I.D., *Verven voor ETICS*. 2013, WTCB: Brussel.
30. Lembo, F. and F.P.R. Marino, *The Pathologies of the ETICS*, in *Recent Developments in Building Diagnosis Techniques*. 2016, Springer. p. 37-49.
31. Standard, A., *160P (Draft), "Design Criteria for Moisture Control in Buildings"*. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, 2006.
32. Isoproc. *Intello*. 2015; Available from: <https://www.isoproc.be/nl/solutions/producten/detail/intello/167>
33. Lacasse, M.A., et al., *Report from Task 6 of MEWS Project: Experimental Assessment of Water Penetration and Entry into Wood-Frame Wall Specimens-Final Report*. 2003.
34. CEN/TC250, *prEN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures - General actions - Part 1-4: Wind actions*. 2004: Brussels. p. 148.
35. Carbonez, K., *In situ inspectie van vochtschade Bepaling vochtgehalte materiaalstalen Uitdrogings simulaties WUFI*. 2015, Universiteit Gent: Gent. p. 28.

12. FIGURENLIJST

<i>Figuur 1: Overzicht schadegevallen uit 1974-1975 door WTCB.....</i>	<i>2</i>
<i>Figuur 2: Basismodel Matlab, Kim Carbonez.....</i>	<i>4</i>
<i>Figuur 3: Finaal model Matlab.....</i>	<i>1</i>
<i>Figuur 4: Output van de ingevulde cases</i>	<i>10</i>
<i>Figuur 5: Opbouw van een ETIC-systeem.....</i>	<i>13</i>
<i>Figuur 6: De drie bevestigingsmethodes van isolatieplaten op de structuur</i>	<i>14</i>
<i>Figuur 7: De verschillende verkleavingsmethodes.....</i>	<i>15</i>
<i>Figuur 8: ETICS op houtskeletbouw.....</i>	<i>17</i>
<i>Figuur 9: Dakoversteken.....</i>	<i>19</i>
<i>Figuur 10: Oorzaken van waterinfiltratie</i>	<i>19</i>
<i>Figuur 11: ETICS is een face sealed systeem</i>	<i>22</i>
<i>Figuur 12: Muurvoet, WTCB</i>	<i>23</i>
<i>Figuur 13: Muurvoet, fabrikant 1</i>	<i>23</i>
<i>Figuur 14: Muurvoet, fabrikant 2</i>	<i>24</i>
<i>Figuur 15: Risico's bij een foutief uitgevoerde muurvoet</i>	<i>24</i>
<i>Figuur 16: Dakrand, fabrikant 1.....</i>	<i>25</i>
<i>Figuur 17: Dakrand, fabrikant 2.....</i>	<i>25</i>
<i>Figuur 18: Dakrand, WTCB.....</i>	<i>26</i>
<i>Figuur 19: Vochtopname van poreuze materialen</i>	<i>27</i>
<i>Figuur 20: De droging van een vochtig poreus materiaal: principeschema.....</i>	<i>29</i>
<i>Figuur 21: De drie vochtregio's</i>	<i>30</i>
<i>Figuur 22: Vochtcurve WUFI.....</i>	<i>31</i>
<i>Figuur 23: Benadering van de vochtcurve</i>	<i>32</i>
<i>Figuur 24: Isopleet uit WUFI</i>	<i>36</i>
<i>Figuur 25: schimmelindex voor het VTT-model en WUFI.....</i>	<i>38</i>
<i>Figuur 26: Isopleet aan het buitenoppervlak van een noordelijke gevel.....</i>	<i>39</i>
<i>Figuur 27: Isopleet aan het buitenoppervlak van een zuidelijke gevel</i>	<i>39</i>
<i>Figuur 28: Isopleet aan het binnenoppervlak van een noordelijke gevel.....</i>	<i>40</i>
<i>Figuur 29: Isopleet aan het binnenoppervlak van een zuidelijke gevel</i>	<i>40</i>
<i>Figuur 30: De thermische (witte pijlen) en hygrische (zwarte pijlen) effecten op een muur met pleisterafwerking gedurende dag en nacht.....</i>	<i>41</i>
<i>Figuur 31: Blaasvorming op de gevel.....</i>	<i>42</i>
<i>Figuur 32: Opstelling van de infraroodlampen</i>	<i>43</i>
<i>Figuur 33: Infraroodbeeld bij bestraling door infraroodlampen</i>	<i>43</i>
<i>Figuur 34: De vrije hygrische krimp in functie van het vochtgehalte</i>	<i>47</i>
<i>Figuur 35: Resultaten van de simulaties door de verschillende universiteiten op basis van dezelfde formules en invoergegevens.....</i>	<i>50</i>
<i>Figuur 36: Standaard opbouw van het houtskelet waarmee de simulaties zijn uitgevoerd</i>	<i>51</i>
<i>Figuur 37: Verloop van de U-waarde i.f.v. de tijd</i>	<i>54</i>
<i>Figuur 38: Berekening van U-waarde volgens WUFI</i>	<i>57</i>
<i>Figuur 39: U-waarde i.f.v. vochtgehalte en temperatuur</i>	<i>59</i>
<i>Figuur 40: Stralingsbalans</i>	<i>61</i>
<i>Figuur 41: Aandeel van de verschillende soorten straling bij zonnestraling voor de oriëntaties.....</i>	<i>61</i>
<i>Figuur 42: Vochtverloop van een noordelijke gevelopbouw onder invloed van de langegolfstraling</i>	<i>63</i>
<i>Figuur 43: Vochtverloop van een zuidelijke gevelopbouw onder invloed van de langegolfstraling</i>	<i>63</i>
<i>Figuur 44: Regen in het Zuiden.....</i>	<i>64</i>
<i>Figuur 45: Vochtgehalte van de pleisterlaag bij een zuidelijke gevelopbouw o.i.v. langegolfstraling</i>	<i>65</i>
<i>Figuur 46: Vochtgehalte van de buitenste OSB-plaat bij een zuidelijke gevelopbouw o.i.v. langegolfstraling</i>	<i>65</i>
<i>Figuur 47: Vochtgehalte van de EPS-isolatie bij een zuidelijke gevelopbouw o.i.v. langegolfstraling</i>	<i>66</i>
<i>Figuur 48: vochtgehalte in de verschillende lagen met en zonder langegolfstraling.....</i>	<i>66</i>
<i>Figuur 49: Vochtgehalte van de pleisterlaag o.i.v. langegolfstraling voor de verschillende oriëntaties.....</i>	<i>67</i>
<i>Figuur 50: Uitdrogingsprofiel zonder langegolfstraling</i>	<i>67</i>
<i>Figuur 51: Uitdrogingsprofiel met langegolfstraling</i>	<i>68</i>
<i>Figuur 52: Vochtgehalte EPS (buitenste laag) i.f.v. langegolfstraling</i>	<i>68</i>
<i>Figuur 53: Vochtgehalte EPS (binnenste laag) i.f.v. langegolfstraling</i>	<i>69</i>

<i>Figuur 54: Vochtgehalte OSB i.f.v. langegolfstraling.....</i>	<i>69</i>
<i>Figuur 55: Uitdrogingsprofiel voor een constructie met langegolfstraling na simulatie van 3 jaar</i>	<i>70</i>
<i>Figuur 56: Uitdrogingsprofiel voor een constructie zonder langegolfstraling na simulatie van 3 jaar</i>	<i>70</i>
<i>Figuur 57: Slagregen i.f.v. de verschillende oriëntaties.....</i>	<i>71</i>
<i>Figuur 58: Slagregen i.f.v. de oriëntatie op jaarbasis</i>	<i>72</i>
<i>Figuur 59: Vochtgehalte i.f.v. oriëntatie</i>	<i>73</i>
<i>Figuur 60: Superhydrofoob oppervlak</i>	<i>74</i>
<i>Figuur 61: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van een coating en de absorptiefactor van de coating voor een noordelijke gevelopbouw.</i>	<i>76</i>
<i>Figuur 62: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van een coating en de absorptiefactor van de coating voor een oostelijke gevelopbouw.....</i>	<i>76</i>
<i>Figuur 63: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van een coating en de absorptiefactor van de coating voor een zuidelijke gevelopbouw.....</i>	<i>77</i>
<i>Figuur 64: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van een coating en de absorptiefactor van de coating voor een westelijke gevelopbouw.....</i>	<i>77</i>
<i>Figuur 65: Vochtgehalte i.f.v. de oriëntatie bij een gevelopbouw met een coating</i>	<i>78</i>
<i>Figuur 66: Vochtgehalte i.f.v. de soort pleister voor een noordelijke gevelopbouw</i>	<i>80</i>
<i>Figuur 67: Uitdrogingsprofiel van de constructie met de standaardpleister uit WUFI</i>	<i>80</i>
<i>Figuur 68: Verloop van de temperatuur en relatieve vochtigheid in de pleisterlaag over een periode van 3 jaar ..</i>	<i>81</i>
<i>Figuur 69: Vochtgehalte i.f.v. soort pleister voor een oostelijke gevelopbouw</i>	<i>82</i>
<i>Figuur 70: Vochtgehalte i.f.v. soort pleister voor een zuidelijke gevelopbouw.....</i>	<i>82</i>
<i>Figuur 71: Vochtgehalte i.f.v. soort pleister voor een westelijke gevelopbouw.....</i>	<i>83</i>
<i>Figuur 72: Vochtgehalte i.f.v. de dampdiffusieweerstand van minerale pleister</i>	<i>83</i>
<i>Figuur 73: Vochtgehalte i.f.v. de dampdiffusieweerstand van kunstharsgebonden pleister</i>	<i>84</i>
<i>Figuur 74: Vergelijking van vochtgehalte i.f.v. isolatiematerialen, Noord</i>	<i>86</i>
<i>Figuur 75: Vochtgehalte i.f.v. isolatie over een periode van 10 jaar</i>	<i>87</i>
<i>Figuur 76: Vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat i.f.v. gekozen isolatiematerialen</i>	<i>87</i>
<i>Figuur 77: Vochtgehalte in de binnenste OSB-plaat i.f.v. de gekozen isolatiematerialen</i>	<i>88</i>
<i>Figuur 78: Vergelijking van vochtgehalte in de buitenste isolatielaag i.f.v. isolatiematerialen.....</i>	<i>89</i>
<i>Figuur 79: Vergelijking van vochtgehalte in de binnenste isolatielaag i.f.v. isolatiematerialen</i>	<i>89</i>
<i>Figuur 80: Vergelijking van vochtgehalte i.f.v. isolatiematerialen, Oost</i>	<i>90</i>
<i>Figuur 81: Vergelijking van vochtgehalte i.f.v. isolatiematerialen, Zuid.....</i>	<i>90</i>
<i>Figuur 82: Vergelijking van vochtgehalte i.f.v. isolatiematerialen, West.....</i>	<i>91</i>
<i>Figuur 83: Invloed van het vochtgehalte op de warmtegeleidingscoëfficiënt voor de verschillende isolatiematerialen</i>	<i>92</i>
<i>Figuur 84: Vochttopslagcurve van cellulose</i>	<i>92</i>
<i>Figuur 85: Vochttopslagcurve van EPS.....</i>	<i>92</i>
<i>Figuur 86: Profiel van het vochtgehalte en de relatieve vochtigheid aan de start van de simulaties</i>	<i>93</i>
<i>Figuur 87: Uitdroging na drie jaar van een constructie met EPS + Cellulose</i>	<i>93</i>
<i>Figuur 88: Uitdroging na drie jaar van een constructie met EPS + MW.....</i>	<i>94</i>
<i>Figuur 89: Uitdroging na drie jaar van een constructie met MW + Cellulose.....</i>	<i>94</i>
<i>Figuur 90: Uitdroging na drie jaar van een constructie met MW + MW.....</i>	<i>95</i>
<i>Figuur 91: Het vochtgehalte i.f.v. het initiële vochtgehalte in een houtskeletbouw met EPS en Cellulose-isolatie over een periode van 10 jaar</i>	<i>96</i>
<i>Figuur 92: Het vochtgehalte i.f.v. het initiële vochtgehalte in een houtskeletbouw met EPS en MW over een periode van 10 jaar.....</i>	<i>97</i>
<i>Figuur 93: Het vochtgehalte i.f.v. het initiële vochtgehalte in een houtskeletbouw met MW en Cellulose-isolatie over een periode van 10 jaar</i>	<i>97</i>
<i>Figuur 94: Het vochtgehalte i.f.v. het initiële vochtgehalte in een houtskeletbouw met twee keer MW als isolatie</i>	<i>98</i>
<i>Figuur 95: Vochtgehalte bij opbouw met verschillende isolatiematerialen bij een initiële vochtigheid van 100% over een periode van 10 jaar</i>	<i>98</i>
<i>Figuur 96: Vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat i.f.v. de gekozen isolatiematerialen, bij een initieel vochtgehalte van de materialen van 100 % (capillair vochtgehalte)</i>	<i>99</i>
<i>Figuur 97: Vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat i.f.v. de gekozen isolatiematerialen, bij een initieel vochtgehalte van 100%</i>	<i>100</i>
<i>Figuur 98: Vochtgehalte i.f.v. startdatum</i>	<i>101</i>
<i>Figuur 99: Basisconstructie zonder buitenste isolatielaag en pleister.....</i>	<i>101</i>
<i>Figuur 100: Uitdrogingsprofiel op 1 oktober 2019 voor een simulatie met startdatum 1 oktober 2016.....</i>	<i>102</i>
<i>Figuur 101: Uitdrogingsprofiel op 1 maart 2017 voor een simulatie met startdatum 1 oktober 2016.....</i>	<i>102</i>

Figuur 102: Uitdrogingsprofiel op 1 oktober 2019 voor een simulatie met startdatum 1 maart 2017 en de initiële vochtgehaltenes bekomen uit de vorige simulatie	103
Figuur 103: Vochtgehalte in de OSB-plaat bij een simulatie van een basisconstructie over een periode van enkele maanden.....	103
Figuur 104: Vochtgehalte i.f.v. de keuze van het dampscherm	104
Figuur 105: Uitdrogingsprofiel van een muuropbouw met een dampscherm met $sd = 1500m$	105
Figuur 106: Uitdrogingsprofiel van een muuropbouw met een intelligent dampscherm.....	105
Figuur 107: Vochtgehalte in de binnenste isolatielaag i.f.v. het gekozen dampscherm	106
Figuur 108: Vochtgehalte in de binnenste OSB-plaat i.f.v. het gekozen dampscherm	106
Figuur 109: Vochtgehalte i.f.v. de keuze van het dampscherm bij een initieel verzadigde constructie, EPS + MW	107
Figuur 110: Uitdrogingsprofiel na 3 jaar voor een gewoon dampscherm	107
Figuur 111: Uitdrogingsprofiel na drie jaar voor een intelligent dampscherm.....	108
Figuur 112: Vochtgehalte i.f.v. de keuze van het dampscherm bij een initieel verzadigde constructie, EPS + Cellulose	108
Figuur 113: Opbouw zonder en met elektrospouw	109
Figuur 114: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van een elektrospouw bij een noordelijke gevel.....	109
Figuur 115: Vochtgehalte in EPS i.f.v. de aanwezigheid van een elektrospouw bij een noordelijke constructie..	110
Figuur 116: Vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat i.f.v. de aanwezigheid van een elektrospouw bij een noordelijke constructie	110
Figuur 117: Vochtgehalte van de constructie i.f.v. de kleur van de pleister.....	111
Figuur 118: Temperatuur in de pleister i.f.v. de kleur van de pleister	112
Figuur 119: Vochtgehalte van de pleisterlaag i.f.v. de kleur	112
Figuur 120: De relatieve vochtigheid voor binnenklimaatklasse 3 (links) en binnenklimaatklasse 4 (rechts)	113
Figuur 121: Vochtgehalte i.f.v. binnenklimaatklasse	114
Figuur 122: Relatieve vochtigheid aan het binnenoppervlak	114
Figuur 123: Uitdrogingsprofiel voor binnenklimaatklasse 3 (boven) en binnenklimaatklasse 4 (onder).....	115
Figuur 124: Vochtgehalte voor EPS en MW i.f.v. de binnenklimaatklasse over een periode van drie jaar	115
Figuur 125: Verloop van de temperatuur en relatieve vochtigheid aan de binnenzijde van de isolatie	116
Figuur 126: Plaatsen waar de waterinfiltraties voorkomen	117
Figuur 127: Overzicht van de waterinfiltraties in de verschillende stadia voor toenemende drukverschillen	122
Figuur 128: Waterinfiltratie i.f.v. het drukverschil en het sproeidebiet.....	123
Figuur 129: Waterinfiltratie volgens WUFI	124
Figuur 130: Vochtgehalte i.f.v. waterinfiltratie	125
Figuur 131: Vochtgehalte pleister i.f.v. waterinfiltratie	125
Figuur 132: Relatieve vochtigheid en temperatuur aan het buitenoppervlak.....	126
Figuur 133: Vochtgehalte pleister i.f.v. waterinfiltratie	126
Figuur 134: Vochtgehalte EPS i.f.v. waterinfiltratie	127
Figuur 135: Vochtgehalte EPS i.f.v. waterinfiltratie	127
Figuur 136: Vochtgehalte i.f.v. waterinfiltratie	128
Figuur 137: Vochtgehalte bij de aanwezigheid van een vochtbron.....	129
Figuur 138: Uitdrogingsprofiel van een muuropbouw met een vochtbron tussen de buitenste isolatielaag en OSB-plaat.....	129
Figuur 139: vochtgehalte in de buitenste OSB-plaat t.g.v. een vochtbron tussen de isolatielaag en de OSB-plaat	130
Figuur 140: Muuropbouw Waasmunster.....	131
Figuur 141: Thermografisch beeld duidt op een vochtophoping aan de dakrand.....	131
Figuur 142: Verkleuringen in de winter	Figuur 143: Plaats van boring in de zomer.....
Figuur 144: Resultaat van de vochtmetingen op de boorsamples	133
Figuur 145: Het vochtgehalte i.f.v. de soort pleisterafwerking	134
Figuur 146: Vochtgehalte i.f.v. de soort isolatie	135
Figuur 147: Vochtgehalte i.f.v. de soort isolatie aan de buitenzijde	136
Figuur 148: Vochtgehalte i.f.v. de aanwezigheid van de houtvezelplaat Pavatex	136
Figuur 149: Vochtgehalte i.f.v. de verschillende gevelopbouwen en materiaalkeuzes	137
Figuur 150: Het vochtgehalte in massaprocent in de OSB-plaat	138
Figuur 151: Het vochtgehalte in massaprocent in de pavatexplaat	139
Figuur 152: Schets van de zuidgevel met de plaatsen van vochtmeting.....	140
Figuur 153: Losgekomen stukken pleister onderaan de muur in de hoeken	141

<i>Figuur 154: Onafgewerkte dakrand</i>	<i>Figuur 155: Afgewerkte dakrand</i>	142
<i>Figuur 156: Hoek aan de westgevel</i>		142
<i>Figuur 157: Lijnvorming op de overgang tussen verschillende ondergronden</i>		143
<i>Figuur 158: Schimmelvorming aan de binnenzijde</i>		144
<i>Figuur 159: Aan de buitenzijde is er geen schade zichtbaar</i>		144
<i>Figuur 160: Dakrandsnede volgens de plannen van de architect</i>		145
<i>Figuur 161: Het openleggen van de dakrand</i>		145
<i>Figuur 162: Pad van het water</i>		146
<i>Figuur 163: Totale vochtgehalte van de constructie over een periode van 10 jaar</i>		146
<i>Figuur 164: Vochtgehalte in de isolatielaag</i>		147
<i>Figuur 165: Vochtgehalte in de baksteenlaag</i>		147
<i>Figuur 166: Isopleet van het binnenoppervlak</i>		148
<i>Figuur 167: Startverdeling van de vochtgehalten in het dakdetail</i>		148
<i>Figuur 168: Vochtverdeling in een houtskelet</i>		149

13. TABELLENLIJST

<i>Tabel 1: Overzicht van de gesimuleerde materialen met hun belangrijkste eigenschappen.....</i>	<i>1</i>
<i>Tabel 2: Verloop van de U-waarde.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabel 3: Warmtegeleidingcoëfficiënt i.f.v. vochtgehalte en temperatuur</i>	<i>56</i>
<i>Tabel 4: Berekening U-waarde</i>	<i>57</i>
<i>Tabel 5: U-waarde afhankelijk van vochtgehalte en temperatuur.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabel 6: Eisen uit de ETAG 004 m.b.t. de water- en waterdampdoorlaatbaarheid van ETICS</i>	<i>74</i>
<i>Tabel 7: Voorbeelden van de impact van verf op de globale waterdampdiffusieweerstand van het pleistersysteem</i>	<i>74</i>
<i>Tabel 8: Verenigbaarheid tussen het hoofdbindmiddel van de verf en dat van het ETIC-systeem</i>	<i>75</i>
<i>Tabel 9: Materiaaleigenschappen van de verschillende pleisters.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabel 10: Materiaaleigenschappen van de onderzochte isolatiematerialen</i>	<i>85</i>
<i>Tabel 11: Lambdawaardes voor de verschillende vochtgehaltes i.f.v. het vochtgehalte.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabel 12: De geteste initiële vochtwaardes</i>	<i>96</i>
<i>Tabel 13: De waterdampdiffusieweerstand i.f.v. de relatieve vochtigheid voor een intelligent dammscherm</i>	<i>104</i>
<i>Tabel 14: Absorptie van de kortegolfstraling i.f.v. de kleur van de pleister</i>	<i>111</i>
<i>Tabel 15: Terreincategorieën en terreinparameters</i>	<i>119</i>
<i>Tabel 16: Drukcoëfficiënten voor buiten, afhankelijk van de geometrie van het gebouw en de belaste oppervlakte</i>	<i>119</i>
<i>Tabel 17: Berekening van het drukverschil a.d.h.v. windsnelheid en terreinparameters, Brussel.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabel 18: Berekening van het drukverschil a.d.h.v. windsnelheid en terreinparameters, Oostende</i>	<i>120</i>
<i>Tabel 19: Berekening van het drukverschil a.d.h.v. windsnelheid en terreinparameters</i>	<i>121</i>
<i>Tabel 20: Waterinfiltraties in % t.g.v. een sproeidebiet van 1,7 L/min.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabel 21: Waterinfiltraties in % t.g.v. een sproeidebiet van 3,4 L/min.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabel 22: Oplijsting van de vochtgehaltes de gemeten vochtgehaltes en de vochtgehaltes gebruikt voor de simulaties voor de verschillende materialen</i>	<i>134</i>
<i>Tabel 23: Indicatieve vochtmetingen op aangeduide meetpunten</i>	<i>141</i>

