

Detallering van geprefabriceerde gevelpanelen in renovatietoepassingen met VIP's

Simon Martens

Promotoren: prof. dr. ir. Arnold Janssens, dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche
Begeleider: 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 2014-2015



Detallering van geprefabriceerde gevelpanelen in renovatietoepassingen met VIP's

Simon Martens

Promotoren: prof. dr. ir. Arnold Janssens, dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche
Begeleider: 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 2014-2015



Voorwoord

In de hedendaagse zoektocht naar manieren om het energieverbruik te doen dalen kan het isoleren van het bestaande gebouwbestand een belangrijke rol spelen. Daarbij kan de integratie van VIP's een interessante piste zijn. Daarom leek het me interessant om de voordelen en de restricties van dit nieuwe materiaal in de toepassing van geprefabriceerde gevelpanelen te onderzoeken.

Dit was echter niet mogelijk geweest zonder de hulp van allereerst prof. dr. ir.-arch. Arnold Janssens, die in het vak bouwfysica de basis gaf die nodig was voor deze masterproef en richtinggevende voorstellen deed. Daarnaast wil ik ook dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche en ir.-arch. Glenn De Meersman bedanken voor het beantwoorden van mijn vragen, het opvolgen van mijn thesis en hun richtinggevende voorstellen zodat deze thesis resulteerde in een leerrijk proces. Ook wil ik Stephanie Van Goethem bedanken voor de hulp bij het opstellen van de lucht - en waterdichtheidstesten. Als laatste wil ik ook mijn ouders en mijn vriendin bedanken voor de steun en de aanmoediging doorheen deze studies.

Toelating tot bruikleen

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

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen 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 limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.”

Simon Martens, 3 augustus 2015

Detaillering van geprefabriceerde gevelpanelen in renovatietoepassingen met VIP's

Simon Martens

Promotoren: prof. dr. ir.-arch. A. Janssens, dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche

Begeleiders: ir.-arch. Glenn De Meersman

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

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. ir. Arnold Janssens

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2014-2015

Samenvatting

Deze masterproef onderzoekt de toepasbaarheid van vacuümisolatiepanelen in renovatietoepassingen. De renovatie van het bestaande gebouwbestand is namelijk een belangrijk onderdeel in de zoektocht naar de verlaging het energieverbruik.

Hiervoor worden enkele bestaande systemen onderzocht en worden ze ten opzichte van elkaar geplaatst. Daarna worden in de literatuurstudie enkele thermische en hygrothermische normen bepaald waaraan de systemen moeten voldoen. Aan de hand van het thermisch simulatieprogramma Trisco en het hygrothermisch simulatieprogramma WUFI wordt het gedrag van de verschillende systemen gesimuleerd. De resultaten werden verwerkt volgens de verschillende modellen die toelaten om te controleren of ze aan de normen voldoen. Hierbij werd bij het thermisch deel vooral gelet op de invloed van de paneelverbindingen op de equivalente U-waarde van de gevel. Bij het hygrothermisch deel lag de aandacht vooral op de gevolgen van het aanwezige water in de bestaande draagmuur en de invloed van de dampdichte folie op het vochtgedrag in het gevelsysteem. Hierbij werd vooral gelet op het risico op degradatie van de aanwezige materialen en de kans op condensatie.

Rekening houdend met de conclusies die naar voor kwamen uit het vooronderzoek werd vervolgens een nieuw vacuüm geïsoleerd gevelelement ontwikkeld. Hierbij werd gekozen voor een geprefabriceerd element met geïntegreerde ramen. Dit laat toe om de ecologische renovatie van de gevel op een snelle manier, met zo weinig mogelijk hinder voor de bewoners, uit te voeren. Opnieuw werd gevonden dat de aansluiting van de panelen de equivalente U-waarde van de gevel bepaalt en dat bij de compositie van het systeem rekening gehouden worden met de invloed van de dampdichte folie van het VIP. Ook de waterdichtheid van het element en enkele bouwkundige aansluitingen werden uitgewerkt.

Trefwoorden:

Vacuümisolatiepanelen – retrofit – ecologische renovatie – geprefabriceerde gevelelementen

Detailing of prefabricated facade elements with VIPs for building retrofit

Simon Martens

Supervisor(s): prof. dr. ir.-arch. A. Janssens, dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche,
ir.-arch. Glenn De Meersman

Abstract - This paper investigates the application of vacuum insulation panels in façade elements for building retrofit. The research consists of a theoretical part in which existing retrofit systems are analysed and a practical part in which a new prefabricated vacuum insulated element is designed.

Keywords – Retrofit, Eco-refurbishing, Vacuum Insulation Panel, prefabricated façade element.

I. INTRODUCTION

Reducing the energy consumption is an important subject in this time. Over 40% of the total energy consumption is used for the heating of buildings [3]. Therefore there are possibilities to decrease the energy consumption by making our houses more energy efficient. Contemporary regulations make that the newly built houses meet this demand. There is however a large building stock that is still used and is not energy efficient. The retrofitting of these building could therefore be a key element. There are already different systems on the market to do this, but the use of Vacuum Insulation Panels in prefabricated elements could facilitate this transformation. These allow a highly insulating façade addition with a small thickness.

II. VACUUM INSULATION PANELS

A Vacuum Insulated Panel consists of a porous core material, wrapped in an air and vapor tight barrier envelope that gets its insulating quality due to the evacuation of the air in the core material. Different materials can be used for this, but in building applications the use of silica is common. The resulting thermal conductivity in the core of the panel is 0,004 W/m.K [1]. Because the insulating quality is dependent on the maintaining of the vacuum, the panel is prone to perforation of the barrier envelope. Therefore the handling on construction site should be done carefully and the use would be more suited in prefabricated applications. Another consideration that should be made is that because of the air and vapor tight barrier envelope, the vapor flow through the wall construction shall be altered in comparison with constructions with common insulation materials that are not as vapor tight.

III. RETROFIT SYSTEMS

The investigated retrofit systems differ from each other by their level of prefabrication, their dimensions, their fixation strategy and the materials that are used. Literature on executed retrofits with in situ installation of individual VIP's confirmed the high risk of puncturing of the barrier envelope. Prefabricated elements with integrated VIP's therefore incorporate layers that protect the VIP from damage. Others anticipate the risk of puncturing by using a double layer of VIP's or by facilitating the replacing of the VIP's. The dimensions of the elements determine the complexity of the fixation method. Bigger panels often are more complex, but allow faster installation, because of the possibility of the integration of the windows, and are therefore more convenient for the residents.

IV. THERMAL AND HYGROTHERMIC SIMULATIONS

Thermal calculations in TRISCO showed that for bigger panels the linear transmittance coefficient has less influence on the overall U-value of the façade in comparison to panels with small dimensions. The magnitude of the linear transmittance factor however is dependent on the thermal conductivity of the material that is used to make the connection of the panel. The hygrothermic simulations were made in WUFI. A selection of standards was selected to check the performance of the different systems. For the wooden elements the water content of the panel is limited according to Viitanen (M% >20 max 720h/year ; M%>25: max 168h/year) in order to prevent degradation [2].

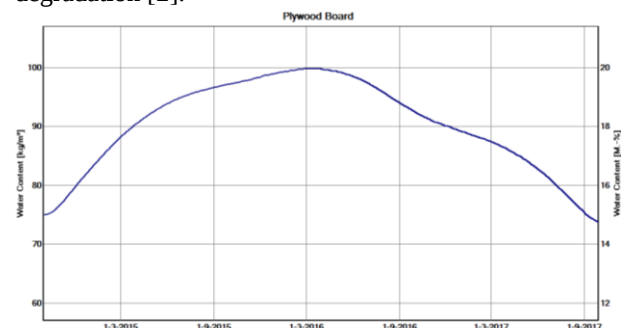


Figure 1: Simulated water content in plywood board has to meet the standard of Viitanen.

To preclude the risk of condensation, the relative humidity was checked. The initial water content of the

existing wall was first investigated in order to be able to make a representable simulation of the behavior of the panels in a retrofitting application. Simulations showed that the drying of the wall and the accompanying vapor flow caused the risk of degradation of moisture sensitive layers or internal condensation because the vapor tight barrier envelope of the VIP doesn't allow it to migrate to the outside. In order to prevent this, the composition and the order of the different panel layers should be thought true. The integration of a well-placed vapor barrier could be of use.

V. DESIGN

Based on the knowledge that was found in the study of the existing retrofit systems, a new vacuum insulated façade system was designed. A few requirements were pursued during the design. The heat transfer coefficient of the total wall construction should be lower than $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ and it should be watertight at least until 600 Pa. The element consists of a vacuum insulated panel, a leveling layer, a protective layer and a bearing layer that connects the element to the wall. The layers are connected by a glass fiber reinforced plastic profile. After lab tests, the joint between the elements were made watertight by the combination of a tongue and groove connection and the use of rubber profiles. The panel connection was designed and optimized using the thermal simulation software Trisco. The evolution of the connection improved the value of the linear transmittance from $0,023 \text{ W/m.K}$ to $0,017 \text{ W/m.K}$. The hygrothermic performance of the element was examined in the simulation software WUFI. The water content in the outside layer was simulated in order to know whether a moisture sensitive material, for example wood, could be used. The results showed for both the element with and without an external ventilated finishing that this was not the case. For that reason a High Pressure Laminate panel was chosen for the outside layer, since it is moisture resistant. A second element that was investigated is the risk of condensation on the inside of the VIP. The original element showed high risk of condensation, in order to solve this, changes to the composition were tested. The water content on the inside of the barrier envelope is limited to 200 g/m^2 [4].

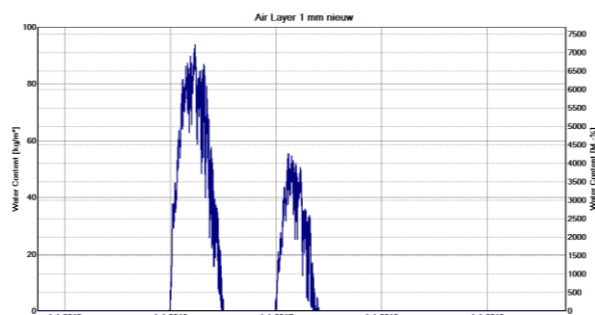


Fig 2: Simulation of water content on the inside of the barrier envelope checked to meet the limit of 200 g/m^2 .

The displacement of the bearing layer from the outside to the inside was considered to have the best performance. The panel buffered the emigrating moisture that was leaving the existing wall and thereby eliminated the risk of condensation.

VI. CONCLUSIONS

The use of vacuum insulated panels in prefabricated façade elements for retrofitting proves to have high potential. The renovation can be carried out in a minimum of time, with only limited impediment to the residents. The integration of the windows also allows to ensure the water tightness of the connections. Because of the insulating quality of the VIP's, the wall construction results in a U-value of $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ with only an addition of 121,5 mm. This allows buildings that are limited in expanding space to be thermally improved, while traditional insulation materials could not reach the requirements with a limited thickness. The vapor tight barrier envelope necessitates to attach importance to the composition of the element, particularly in the case of retrofitting because of the possibility of a high initial water content of the existing wall that could cause condensation or degradation.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank my supervisors for the support and professional guidance in the process of writing this master dissertation.

REFERENCES

- [1] Kalnaes, S.E.. 'Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways'. Applied Energy 116: 355–375, 2014.
- [2] Viitanen, H. 'Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time.' The Swedish University of agricultural Sciences, Department of Forest Products, 1996.
- [3] Woodwisdom Net 'TES EnergyFaçade: Prefabricated timber based building system for improving the energy efficiency of the building envelope', 2008.
- [4] WTCB. 'Het platte dak: Opbouw, materialen, uitvoering, onderhoud'. Technische Voorlichtingsnota 215, 2012.

INHOUD

1. Inleiding	1
1.1. Gebouwbestand	2
1.1.1. Leeftijd	2
1.1.2. Woning typologieën	4
1.1.3. Staat van het huidige bouwbestand	4
1.1.4. Renovatie vs. afbraak	4
1.2. Opbouw	5
2. Vacuum Insulation Panel (VIP)	6
2.1. Kernmateriaal	6
2.2. De folie	7
2.3. Levensduur van het paneel	8
2.4. Gebruik bij constructietoepassingen	9
3. Onderzoek:	15
3.1. Projecten:	15
3.1.1. Nuremburg 2000, PVC-rail systeem	15
3.1.2. Munchen 2001, metaalprofiel	16
3.1.3. Karlsruhe 2010, aluminium-rail	17
3.1.4. Hofheim 2006, GEDT	17
3.1.5. Riihimäki 2010, Paroc Innova	20
3.1.6. Structural Insulated Panels	23
3.1.7. Schleißheim Passivhausstandard	24
3.1.8. Roosendaal	25
3.2. Thermisch gedrag:	27
3.2.1. Lineaire warmtedoorgangscoefficient	27
3.2.2. Aannames bij de simulaties	27
3.2.3. Resultaten	28
3.2.4. Conclusies	28
3.3. Hygrisch gedrag	30
3.3.1. Inleiding	30
3.3.2. Schimmelgroei	30
3.3.4. Houtrot	36
3.3.5. Inwendige condensatie	36
3.3.6. Onderzoeksmethodiek	37
3.3.7. Aannames bij de simulaties	37

3.3.8. Resultaten.....	43
3.3.9. Conclusies.....	63
4. Ontwikkeling eigen paneel.....	64
4.1. Inleiding.....	64
4.2. Conclusie vooronderzoek.....	64
4.3. Gestelde eisen.....	64
4.4. Materialen.....	65
4.4.1. Effeningsisolatie.....	65
4.4.2. Beschermende isolatieplaat.....	66
4.4.3. Dragende buitenplaat.....	68
4.4.4. Gevelafwerking.....	70
4.4.5. Keuze materialen.....	71
4.4.6. Verbindingstechnieken.....	72
4.5. Paneeldimensie.....	73
4.6. Paneelverankering.....	75
4.6.1. Hoekanker.....	75
4.6.2. Ophanganker.....	76
4.7. Hygrothermische analyse.....	77
4.7.1. Buitenpaneel:.....	77
4.7.2. Beschermende laag.....	78
4.7.3. Zone tussen VIP-folie en bestaande draagmuur.....	79
4.8. Structurele analyse.....	86
4.9. Waterdichtheid.....	87
4.10. Bouwkundige aansluitingen.....	92
4.10.1. Horizontale en verticale aansluiting.....	92
4.10.1. Verticale verbinding.....	93
4.10.2. Horizontale verbinding.....	94
4.10.3. Paneelbevestiging.....	95
4.10.4. Dakrandaansluiting.....	96
4.10.5. Raamaansluiting Boven.....	97
4.10.6. Raamaansluiting Onder.....	98
4.10.7. Vloerplaataansluiting.....	99
4.11. Thermische analyse.....	100
5. Algemeen besluit.....	103

Gebruikte afkortingen en symbolen

CLT		cross laminated timber
DHF		diffusible humid resistant fibreboard
EPB		energieprestatieregelgeving
EPS		geëxpandeerd polystyreen isolatie
GEDT		Großelement-Dämmtechnik
LVL		laminated veneer lumber
OSB		oriented strand board
PE		polyetheleen
PET		polyethyleentereftalaat
PIR		polyisocyanuraat
PUR		polyurethaan isolatie
PF		phenolformaldehyde
PVC		polyvinylchloride
RVS		roestvast staal
SIP		structural insulated panel
TES		timber element structure
TOW		time of wetness
VIP		vacuümisolatiepaneel
XPS		geëxtrudeerd polystyreen isolatie
WTCB		wetenschappelijk en technisch centrum voor het bouwbedrijf
α	[W/m ² .K]	warmteovergangscoefficiënt
θ	[°C]	temperatuur
θ_e	[°C]	buitentemperatuur
θ_i	[°C]	binnentemperatuur
θ_{si}	[°C]	binnenoppervlakte temperatuur
λ_{cop}	[W/m.K]	centre-of-panel warmtegeleidingscoefficient
λ_{eq}	[W/m.K]	effectieve warmtegeleidingscoefficient
Ψ	[W/m.K]	lineaire warmtedoorgangscoefficient
μ	-	waterdampdiffusieweerstandsgetal
μ_d	-	equivalente luchtlaagdikte
c	[J/kgK]	warmte-opslagcapaciteit
E	[MPa]	elasticiteitsmodulus
$f_{0,2}$	-	temperatuurfactor
I	[mm ⁴]	traagheidsmoment
$M\%$	kg/m ³	massaprocent
R	[m ² .K/W]	warmteweerstand
RV	[%]	relatieve vochtigheid
U	[W/m ² .K]	warmtedoorgangscoefficient
U_+	[W/m ² .K]	toevoeging aan U ten gevolge koudebrugwerking
U_{eff}	[W/m ² .K]	effectieve warmtedoorgangscoefficient

1. INLEIDING

In Europa wordt meer dan 40% van het totale energieverbruik en 36% van de totale CO₂ uitstoot geproduceerd in of door gebouwen [48]. Bij het ontwerpen van nieuwe woningen wordt dan ook gestreefd naar energie efficiënte woningen. Deze nieuw gebouwde woningen vertegenwoordigen echter slechts 1-1,5% van de bestaande gebouwen. Renovatie van deze bestaande gebouwen is dan ook een belangrijke schakel in het streven naar een lager energieverbruik. De huidige toestand van deze gebouwenvoorraad is in vele gevallen problematisch. Ze lijden niet enkel onder verschillende mogelijke fysieke problemen, maar ze zijn ook niet gebouwd volgens energetische of duurzame standaarden. Ongeveer 70% van de bestaande gebouwen zijn meer dan 30 jaar oud en ongeveer 35% is zelfs ouder dan 50 jaar. Dit is opmerkelijk, zeker gezien de introductie van isolatiematerialen in de bouwregelgeving pas in 1970 kwam als gevolg van de energiecrisis [29].

Het afbreken van deze gebouwen is echter geen oplossing voor de verouderende gebouwenvoorraad. Studies tonen aan dat de ecologische impact van de levenscyclus van een woning, met betrekking tot materialen en afval, zeker kleiner is bij renovatie dan bij het afbreken en herbouwen [41]. De nodige energie die gebruikt wordt bij het produceren en transporteren van materialen, wordt namelijk opgeslagen in het bouwwerk, deze afbreken gaat dus gepaard met het weggooien van deze energie. Ook de economische waarde van deze materialen gaat zo verloren. Zo is het antwoord op de groeiende verouderde gebouwenvoorraad dus het –energetisch- renoveren van deze gebouwen. Op die manier kunnen deze woningen alsnog voldoen aan een lagere energievraag en een verhoogd wooncomfort. Het renoveren van deze woningen zorgt zo niet enkel voor energiebesparingen, maar is ook economisch en sociaal relevant. De woningen zullen beter functioneren en zo leiden tot aangenamere leef en werkomstandigheden. Daarnaast zal ook de economische waarde van de woningen ook stijgen.

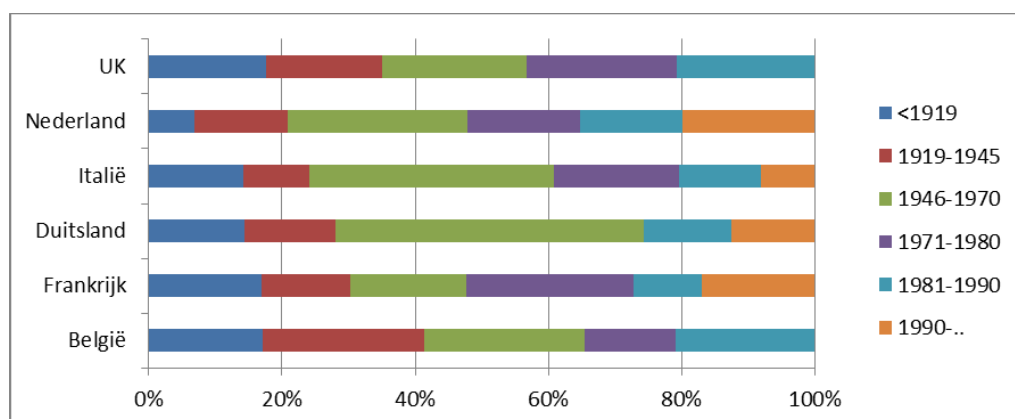
Het gebouwdeel dat de grootste invloed heeft op de energetische prestatie van een gebouw is de gevel of de bouwhuid. Het is niet enkel het belangrijkste element in de architecturale expressie van het gebouw, maar het bepaald meest en vooral ook het energiegebruik en de binnen omstandigheden. Het energieverbruik voor verwarming en koeling van het gebouw is dan ook direct gerelateerd aan de warmte winsten en verliezen die door de gevel gaan en zijn dus afhankelijk van het ontwerp, de kwaliteit en de werking van de gevel.

Om een minder verlieslatende gevel realiseren, moet het isolatiepeil verhoogd worden. Bij conventionele isolatiematerialen gaat dit gepaard met een grote dikte van de nieuwe gevelopbouw. Bij het renoveren van bestaande gevels is deze dikte vaak gelimiteerd door perceelgrenzen en kan het ook de architecturale lezing van de gevel nefast beïnvloeden. Hier biedt het gebruik van vacuümisolatiepanelen (VIP) een oplossing. Deze isolatie elementen zijn in het laatste decennium geïntroduceerd op de materialenmarkt en geven eenzelfde warmteweerstand bij een dunnere constructie.

1.1. GEBOUWBESTAND

1.1.1. LEEFTIJD

Informatie over de leeftijd van de gebouwenvoorraad geeft een goede indicatie over de fysieke staat van deze gebouwen. Onderstaande figuur toont de verdeling in verschillende bouwperiodes. De vooroorlogse woningen representeren bijna 20% van het gebouwbestand. Tot meer dan 20% van de woningen werd na Wereld Oorlog II gebouwd en voor de oliecrisis. Dit laatste leidde tot een grote verandering in de manier waarop gebouwd werd. De oliecrisis leidde namelijk tot het verplicht gebruik van thermische isolatie in woningen. De woningen die in deze periode gebouwd werden vertegenwoordigen in België minder dan 15% van het huidige woningbestand. Deze woningen zijn dus enigszins al geïsoleerd, maar dienen toch al gerenoveerd te worden. [14]



Figuur 1: Leeftijdverdeling van het gebouwbestand

In het transmissiereferentiedocument [50] worden richtwaarden gegeven die mogen aangenomen worden voor de dikte van het isolatiepakket bij oudere woning. Deze geven een indicatie van de gebruikelijke isolatiedikte per tijdspanne. In “Facade Refurbishment Toolbox” worden de constructie-technieken in Europa weergegeven per tijdspanne.

Bouwjaar	Aangenomen dikte van de isolatie (mm)	
	Muren naar de buitenomgeving	Andere muren
onbekend of -1970	0	0
1971-1985	10	0
1986-1992	30	0
1993-2005	40	0

Tabel 1: Aangenomen isolatiedikte indien aanwezigheid van isolatie onzeker is. [50]

Bouwjaar	Aangenomen dikte van de isolatie (mm)	
	Muren naar de buitenomgeving	Andere muren
onbekend of -1970	20	20
1971-1985	20	20
1986-1992	40	20
1993-2005	50	20

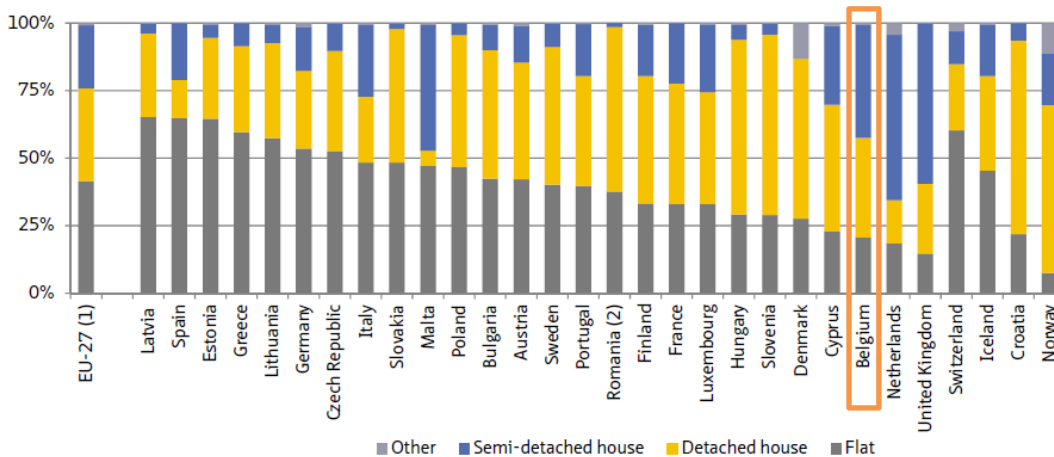
Tabel 2: Aangenomen isolatiedikte indien aanwezigheid van isolatie gestaafd is. [50]

	Construction type	Description	Structure	Windows	Roof	Period	Area	U-values (W/m²K)
Traditional	Timber-frame 	Timber-frame structure with brick or wattle-and-daub filling	Loadbearing external walls	Single glazing Timber frames	Timber structure Clay roof tiles	<1920	North-west, centre-east, south Europe	2.0
	Masonry walls 	Masonry of solid brick or stone, 250-400mm				<1950		2.0-1.8
		Two leaves of masonry with intervening air cavity				1920-1950		1.5
	Cavity walls 	Two leaves with air cavity and/or insulation. Lightweight masonry units, concrete walls, lime stone. Insulation thickness varies from 30-50mm to today's standards	Load-bearing external walls or traverse walls	Double glazing timber or aluminium frames	Reinforced concrete or timber structure	1950-today	North-west, centre-east, Europe. Usually facing bricks	1.1-0.5
		In-situ reinforced concrete frame			Reinforced concrete slab with insulation	1975-today	South Europe. Usually perforated bricks	0.6
	Lightweight concrete/perforated bricks 	Lightweight masonry units (concrete or hollow bricks), often clad	Load-bearing traverse walls, in-situ or pre-fab	Single or double glazing timber or aluminium frames	Reinforced concrete or timber structure	1950-1975	North-west, centre-east, e.g. Germany, Denmark, France	1.4
Non-traditional		Single or double layer perforated brick masonry, plastered	In-situ reinforced concrete frame			1950-today	South Europe	1.0-0.8
	Panel building 	Prefabricated concrete panels, sometimes with insulation 50mm	In-situ reinforced concrete frame or pre-fab load-bearing walls			1950-1975	North-west, centre-east Europe, e.g. Germany, Poland, Denmark	1.1-0.9
	Lightweight façade 	Sandwich panels consisting of asbestos cardboard/plasterboard and insulation (40-70mm). Different cladding materials possible	Load-bearing traverse walls, in-situ or pre-fab				North-west, Europe, e.g. the Netherlands, Denmark	0.8
	Timber-frame, brick cladding 	Timber-frame with insulation infill, boxed in plasterboard, Brick veneer. Different cladding materials possible	Load-bearing timber frame wall		Timber structure, clay roof tiles	1950-today	North-west, centre-east Europe	0.8-0.5

Figuur 2: Constructietechnieken per tijdsperiode [29]

1.1.2. WONING TYPOLOGIEËN

Binnen dit woningbestand komen verschillende woningtypologieën voor, afhankelijk van het aantal verdiepingen en de relatie met naburige woningen. Deze hebben niet alleen een invloed op de huidige thermische prestatie van deze woningen – rijhuizen zullen zo beter presteren dan alleenstaande woningen –, maar zullen ook bepalen in welke mate een renovatie mogelijk is. Alleenstaande woningen kennen namelijk geen beperkingen door naburige woningen en kunnen dus binnen de regelgeving aangepast worden om een betere prestatie te bekomen. Rijhuizen kennen een beperking door de perceelgrenzen en de grenzen aan naburige woningen en de straat. Tegenover deze individuele woningen staan de appartementsgebouwen, deze kunnen op een snelle, efficiënte manier een energetische renovatie ondergaan omdat deze gevel vaak ritmisch is. Hierbij speelt de financiering echter ook een rol en zal hier eerst een akkoord tussen de eigenaars en de bewoners van het gebouw moeten komen, wat de drempel tot renovatie kan verhogen. Onderstaande tabel toont de verdeling van het gebouwbestand met betrekking tot de woningtypologieën. In België zien we dat het grootste deel van de bouwvoorraad uit halfopen en open bebouwing bestaat.



Figuur 3: Verdeling van de verschillende woontypologieën in het gebouwbestand.[29]

1.1.3. STAAT VAN HET HUIDIGE BOUWBESTAND

Door het ouder worden van de woningen kan de prestatie die de woning initieel leverde verminderen. Dit kan gezien worden als schade aan de woning. Dit kan zich op verschillende manieren manifesteren, deze kan te wijten zijn aan vochtschade maar ook aan fysieke schade door zettingen in de fundering of door vorstschade. Deze zullen niet enkel de thermische prestaties van de gevel beïnvloeden, maar kunnen ook leiden tot schimmel en algengroei. Ook de stabiliteit van deze woningen kan op die manier in gedrang gebracht worden.

1.1.4. RENOVATIE VS. AFBRAAK

De renovatie van het woningbestand is een ecologisch efficiëntere manier dan afbraak om dezelfde energiewinsten te bekomen. De reden hiervoor is dat de bouwprocessen en de materialen die gebruikt worden beide energie intensief zijn, terwijl deze bij bestaande woningen reeds aanwezig zijn en vaak niet vervangen dienen te worden. Op die manier wordt tot acht keer meer energie gebruikt bij het opnieuw bouwen van de woning dan bij het renoveren van de woning [23]. De energieprestaties van gerenoveerde woningen zullen vaak niet eenzelfde niveau bereiken als nieuwbouwwoningen doordat sommige isolatiesystemen en complexe gebouwinstallaties moeilijker in deze woningen kunnen geïntroduceerd worden. Dit zal echter niet opwegen tegen het energieverlies die te paar gaat met de afbraak van de woningen. Vanuit

financieel standpunt is de afbraak en het opnieuw bouwen van de woning enkel interessant als de renovatie van de woning slechts een kleine energiewinst oplevert en het huis dus in een zeer slechte staat is.

1.2. OPBOUW

In het eerste deel van deze thesis wordt een onderzoek naar de bestaande gevelisolatiesystemen gevoerd. Hier wordt zowel gekeken naar toepassingen waarin VIP's geïntegreerd zijn, alsook toepassingen met klassieke isolatiematerialen. De verschillende systemen verschillen in opbouw en mechanische verbinding. Deze worden vergeleken door hun thermische en hygrothermische prestaties te vergelijken met behulp van de simulatieprogramma's TRISCO en WUFI. Het eerste helpt een uitspraak te doen over de invloed van het koudebrug-effect van de verbinding op het warmtetransport doorheen het paneel door het berekenen van de ψ -waarde en U_{eff} , de effectieve U-waarde. Daarnaast geeft het ook de temperatuurfactor, die het toelaat een eerste uitspraak te doen over de kans op schimmelgroei. Het tweede geeft het vochtgedrag in de opbouw van het paneel en kan zo de kans op schadegevallen door vocht in kaart brengen door de resultaten aan verschillende criteria te onderwerpen.

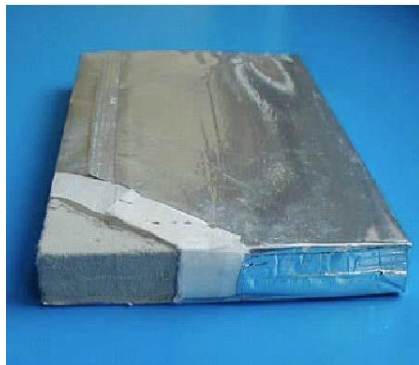
In het tweede deel van deze thesis volgt uit de conclusies van deze vergelijking van verschillende systemen de ontwikkeling van een eigen systeem, die vervolgens geoptimaliseerd wordt. Een dergelijk gevelelement zal dan in praktijk uitgewerkt worden en de prestaties van dit gevelelement worden dan geverifieerd door middel van laboproeven.

De nagestreefde eisen waaraan dit paneel moet voldoen zijn de volgende:

- Er wordt gestreefd naar een systeem met een zeer hoge thermische weerstand. Als richtwaarde wordt een warmtedoorgangscoefficient van $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ genomen, deze geldt voor de totale muuropbouw. Dit is een veelgebruikte waarde bij hedendaagse passiefwoningen.
- De dikte van het totale paneel, met de gevelafwerking inbegrepen, mag niet groter zijn dan 14 cm. Dit om binnen het kader van het rooilijndecreet van 2009 te werken, die stelt dat de rooilijn bij het aanbrengen van gevelisolatie ten hoogste 14 cm mag overschreden worden.
- De luchtdichtheid van de gevel dient te voldoen aan hedendaagse en eventueel toekomstige eisen. Als richtwaarde wordt een $v50$ -waarde van $1\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ genomen, wat aangeraden wordt in de norm NBN D50-001 bij mechanische ventilatie met warmteterugwinning.
- Het gevelsysteem is waterdicht tot 600 Pa. Het WTCB stelt dat dit in laboratoriumproeven moet kunnen aangetoond worden volgens methode A uit de norm NBN EN 12865.
- De buitenzijde van de gevel is na plaatsing afgewerkt of kan met beperkte handelingen in situ afgewerkt worden.
- De gevelpanelen zijn geen structurele of dragende panelen. Ze zijn bestand tegen de wind- en temperatuurbelasting en tegen het eigengewicht.
- Op de buiten- en binnen oppervlakken mag geen algen of schimmelgroei optreden. Ook mag geen inwendige condensatie of houtrot optreden in het paneel en moet rekening gehouden worden met de afname van de warmteweerstand van het VIP.

2. VACUUM INSULATION PANEL (VIP)

Een VIP bestaat uit een poreus kernmateriaal, die na vacuüm getrokken te worden, ingepakt wordt in een lucht- en dampdichte folie. Tenpierik [39], maakt voor de werking van een VIP de vergelijking met een luchtledig getrokken pakje koffie. Het kernmateriaal dient namelijk niet alleen om thermische weerstand te bieden, maar ook om het drukverschil op te vangen die gegenereerd wordt over de folie door het luchtledig trekken. De initiële thermische geleidbaarheid van de kern ligt rond de $0,004 \text{ W/(m.K)}$. Deze kan na een lange tijd echter stijgen door lucht en vochtdiffusie doorheen de folie [28]. Het warmtetransport in een VIP kan opgedeeld worden in warmtegeleiding in het vaste kernmateriaal en in het gas, en warmtegeleiding door straling, convectie en koppeling effecten.

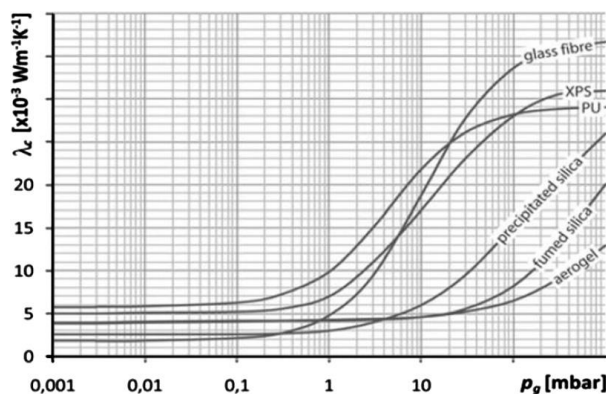


Figuur 4: Kernmateriaal en folie van het VIP-paneel. [28]

2.1. KERNMATERIAAL

Zoals hiervoor vermeld zorgt het kernmateriaal voor de isolerende en mechanische eigenschappen van de VIP's. Hierbij wordt dus vanzelfsprekend gestreefd naar een zo hoog mogelijke thermische weerstand. Om dit te bereiken moet het kernmateriaal volgens Baetens et al. aan de volgende voorwaarden voldoen [5]:

1. De diameter van het kernmateriaal moet zo klein mogelijk zijn, zo moet de druk minder verlaagd worden om te resulteren in een lage thermische geleidbaarheid. Daarom moet dus gebruik gemaakt worden van nano-poreus materiaal. De relatie tussen de effectieve thermische geleidbaarheid van verschillende kernmaterialen in functie van de interne gasdruk wordt weergegeven in de volgende figuur:



Figuur 5: Effectieve thermische geleiding van verschillende mogelijke kernmaterialen in functie van de interne gasdruk. [6]

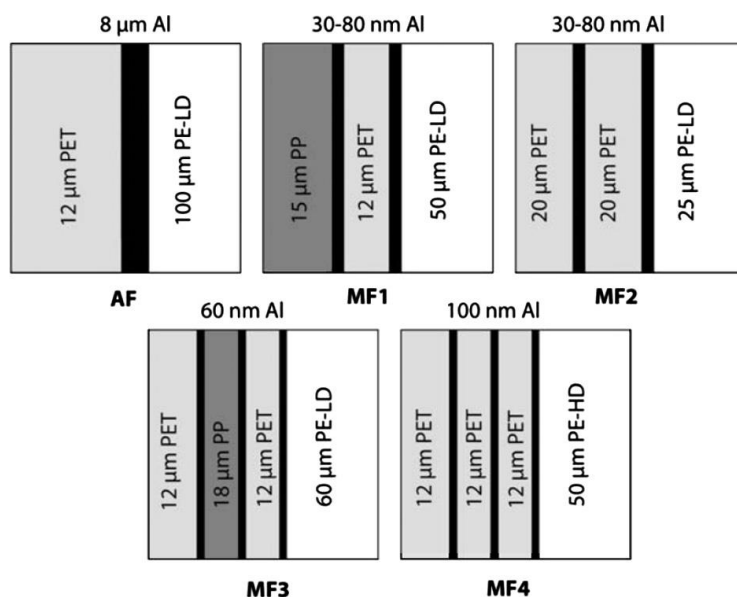
2. Het kernmateriaal moet 100% open zijn, zodat de aanwezige lucht gemakkelijk onttrokken kan worden.
3. Het kernmateriaal moet drukkrachten kunnen weerstaan. Normaal liggen de initiële interne drukken in de VIP's tussen 0,2 en 3 mbar. De externe druk op het paneel ligt rond de 101 kPa.
4. Het materiaal moet infraroodstralen kunnen tegenhouden, zodat het warmtetransport via straling in het paneel verlaagd wordt.

Voor toepassingen in de bouwsector wordt dan ook vooral gebruik gemaakt van pyrogeen silicium als kernmateriaal. Dit omdat het niet brandbaar is en voldoet aan de voorgaande criteria. Het is echter wel een duur materiaal en daarom wordt bij het gebruik in andere toepassingen gekozen voor goedkopere materialen.

2.2. DE FOLIE

De folie dient om een lucht- en dampdichte omsluiten te bekomen rond het kernmateriaal en dus het vacuüm te behouden. Indien dit niet behouden kan worden en er dus lucht zou lekken door de folie, zal de effectiviteit van de VIP's verminderen. Het is dus een fragiel isolatiemateriaal en moet met enige behoedzaamheid verwerkt worden. Door de omsluiting met de folie zal echter ook een koudebrug effect ontstaan aan de randen en de hoeken van het paneel. Dit zal de totale thermische prestaties van het paneel dus verminderen ten opzichte van het centrum van het paneel. De grootte van dit effect is afhankelijk van de dikte van de folie, de thermische geleidbaarheid, de paneel afmetingen en de thermische geleidbaarheid van het kernmateriaal [9].

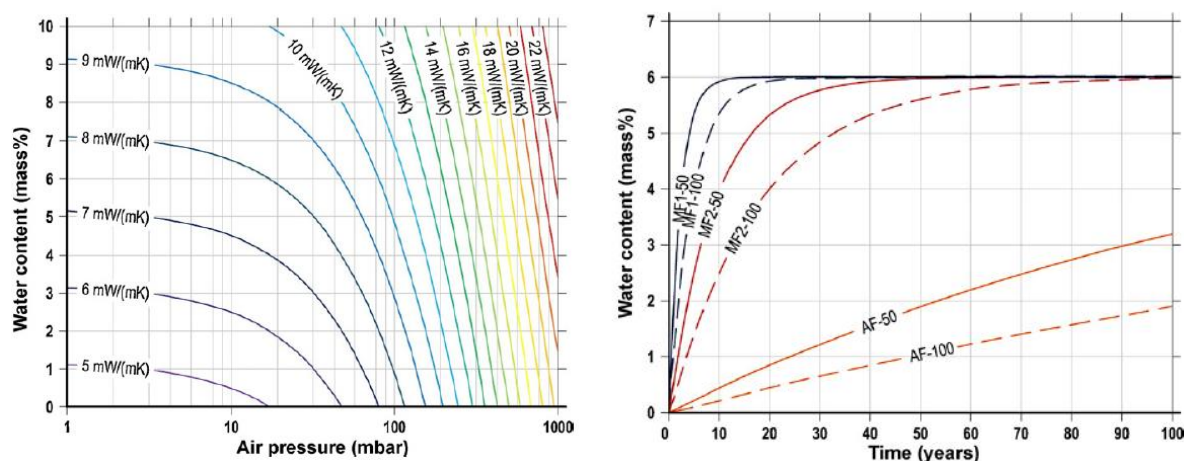
De folie bestaat meestal uit een dichtende laag, een sluitende laag en een beschermende laag zoals te zien in figuur 6. Deze lagen werden beschreven door Alam et al. [3]. De binnenste laag verzegelt het kernmateriaal en bestaat uit polyethyleen van lage of hoge densiteit en wordt onder druk gedicht door middel van twee warme staven. Voor de middelste, sluitende laag wordt gebruik gemaakt van aluminium folie of een gelamineerd product. Deze laag dient om de penetratie van waterdamp en lucht door de folie te verhinderen. De buitenste laag beschermt het paneel tegen het klimaat en handelingen die het paneel kunnen beschadigen. Het sluiten van de folie is een delicate kwestie, deze moet precies uitgevoerd worden en is vaak de oorzaak van het niet in standhouden van het vacuüm.



Figuur 6: Voorbeelden van verschillende soorten folies. [28]

2.3. LEVENSDUUR VAN HET PANEEL

De thermische prestatie van de VIP is geen statische eigenschap, met het ouder worden zal de thermische geleiding veranderen. Door een gas- en dampdruk verschil zullen damp en atmosferisch gas door de omhullende folie tot de kern binnendringen, de mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de eigenschappen van de folie en hygrothermische omstandigheden. Deze zal er voor zorgen dat de thermische geleidbaarheid zal stijgen, omdat deze bij een poreus materiaal afhankelijk is van de gasdruk en het watergehalte in de poriën. Onderzoek wijst uit dat dit verouderingseffect een stijging van de thermische geleidbaarheid tot 0,0023 W/m.K in een periode van 25 jaar kan veroorzaken. Deze stijging is afhankelijk van de afmetingen van het paneel. Hoe groter en hoe dikker het paneel, hoe kleiner de stijging zal zijn. Externe dampdrukken, of de combinatie van externe temperatuur en relatieve vochtigheid beïnvloeden dus de werkingsduur van het VIP. [39]



Figuur 7: Thermische geleidbaarheid (mW/m.K) van het kernmateriaal pyrogeen silicium in functie van de luchtdruk (mbar) met een externe belasting van 1 bar op het proefstuk en het watergehalte (m%), met een gemiddelde temperatuur van 20°C.

Figuur X: Invloed van vochtgehalte op levensduur afhankelijk van paneelafmetingen (50*50*1 m³ / 100*100*1 m³) en folie (AF/MF1/MF2). [39]

Bij toepassingen in gevelbouw moet dus rekening gehouden worden met de manier waarop de VIP's aan de omgeving zullen blootgesteld worden. Tenpierik [38] stelt dat hier twee mogelijkheden zijn. De VIP's kunnen ofwel in een dampopen of in een dampdicht systeem toegepast worden. Voor de dampopen systemen zal de relatieve vochtigheid rond de VIP panelen ongeveer dezelfde relatieve vochtigheid hebben als die van de buitenlucht. Voor dampdichte toepassingen zullen de schommelingen in het verloop van de relatieve vochtigheid een gevolg zijn van de schommelingen in de temperatuur. Daardoor zal de relatieve vochtigheid rond de VIP's meer stabiel zijn en zal de gemiddelde waarde afhangen van de manier waarop de systemen geproduceerd zijn.

De onderzoeksgroep bouwphysica aan de UGent bestudeerde de gevolgen van hygrothermische belasting op de levensduur van de VIP's door metingen te doen op elementen in omgevingstemperatuur en in klimaatkamers over een periode tot 4 jaar. De elementen werden op regelmatige tijdstippen gewogen om de accumulatie van waterdamp in het kernmateriaal te meten. Aan de hand van EN ISO 12572 kon hiermee ook de equivalente μ d-waarde van de MF-2 folies berekend worden. De metingen werden enkel uitgevoerd op volledige VIP's en brengen de effecten van de dichtingen dus in rekening.

Alle panelen toonden een gewichtstoename, wat wijst op de accumulatie van zowel lucht als waterdamp. De testen onder de conditie van 70°C en 90% RV resulteerden in versnelde degradatie door delaminatie van de folie. Deze extreme condities komen echter niet voor in typische constructies. Bij een gemiddeld klimaat werd gevonden dat de μ -waarde van de folie $2,66-7,03 \cdot 10^7$ bedraagt. Dit is hoger dan wat in voorgaande literatuur beschreven wordt. Algemeen wordt gesteld dat de hygrothermische belasting gedurende een lange periode slechts een beperkt effect heeft op de stabiliteit van de folie. Dit verzekert de toepasbaarheid van VIP's in gebouwcomponenten [12].

2.4. GEBRUIK BIJ CONSTRUCTIETOEPASSINGEN

Algemene aanbevelingen bij het gebruik van VIP's

Het gebruik van VIP's is vooral voordelig bij renovatieprojecten, dit doordat ze slechts een kleine dikte vereisen. Vanuit economisch standpunt gezien zijn ze erg duur ten opzichte van gebruikelijke isolatiematerialen. Om een U-waarde te bekomen van 0,15 W.m²K. betaal je voor VIP's 320 euro per vierkante meter, terwijl dit voor conventionele materialen 32 euro per vierkante meter is [18]. Gezien de dikte die nodig is voor deze laatste, moet deze meerkost dus afgewogen worden ten opzichte van een aanzienlijke ruimtewinst.

Doordat de panelen fragiel zijn, is het belangrijk om deze panelen te beschermen bij het gebruik in constructietoepassingen. Om die reden is het dus belangrijk om geadviseerd te worden door een specialist of een leverancier bij het gebruik van deze panelen in gebouwtoepassingen. Dit zowel tijdens de ontwerpfase, maar vooral voor het installatieproces. Hierbij is het belangrijk dat diegene die de VIP's plaatsen zich bewust zijn van de eigenschappen –en de fragiliteit– van deze panelen. Om die reden wordt er ook vaak een waarschuwing geplaatst op de verpakkingen die hiervoor waarschuwt.



Figuur 8: label die waarschuwt voor het gebruik van de VIP's. [22]

Door deze panelen te verwerken in geprefabriceerde systemen wordt het risico op beschadiging veel kleiner, gezien ze niet langer in situ verwerkt moeten worden. Hoewel dit de structurele mogelijkheden verhoogt, gaat dit echter ook gepaard met een extra koudebrug-effect. Dit door de verbindingselementen en de randen die het paneel samenhouden en de structurele verbinding maken. Het is dus van groot belang om bij het ontwerpen van dergelijke elementen deze koudebruggeffekten te minimaliseren.

Het renoveren van gevels door middel van geprefabriceerde gevelelementen heeft zo zijn voordelen, ze bieden de mogelijkheid om op een snelle en herhaalbare manier bestaande gebouwen energetisch ingrijpend te renoveren met een minimale impact voor de gebruikers. De gevelpanelen worden in een fabriek met de nodige precisie en luchtdichtheid geprefabriceerd, afgewerkt met ramen, geleverd op de bouwplaats en geïnstalleerd met behulp van een kraan.

Annex 39 [24] geeft nog enkele aanbevelingen voor het gebruik van VIP's zowel in toepassingen met prefabricatie als voor de directe installatie op de werf. Om het koudebrug effect door de randen van het paneel te beperken moeten panelen geselecteerd worden die zo vierkant en zo groot mogelijk zijn. Een verhoging van het paneeloppervlak leidt namelijk tot een verlaging van het koudebrug effect. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat het gevolg van een geperforeerd paneel ook een groter effect zal hebben indien deze een groot oppervlak heeft.

VIP size [m × m]	equivalent thermal conductivity λ_{eq} [W/(m K)]	Increase of λ_{eq} [%]	Increase of λ_{eq} [mW/(m K)]
0.30 × 0.20	0.0058	15.9%	0.79
0.30 × 0.40	0.0056	11.2%	0.56
0.50 × 0.50	0.0054	7.9%	0.39
1.0 × 0.50	0.0053	5.6%	0.28
0.75 × 0.75	0.0053	5.2%	0.26
0.6 × 1.2	0.0052	4.6%	0.23
1.0 × 1.0	0.0052	3.9%	0.20
1.5 × 1.0	0.0052	3.2%	0.16
2.0 × 1.0	0.0051	2.8%	0.14
3.0 × 1.0	0.0051	2.4%	0.12

Tabel 3: Equivalente thermische geleidbaarheid van de VIP's met variërende grootte, waarbij alle lange randen uit een enkele laag bestaan ($=0,0038 \text{ W/(m.K)}$) en de korte randen uitgevoerd zijn in overlapping ($=0,0052 \text{ W/(m.K)}$). De thermische geleidbaarheid in het centrum van het paneel is $5,0 \text{ mW/(m.K)}$ [36].

De VIP's moeten beschermd worden voor mechanische schade. Deze kan zowel veroorzaakt worden door functionele belasting (bijvoorbeeld door de vloer), onrechtstreekse belasting

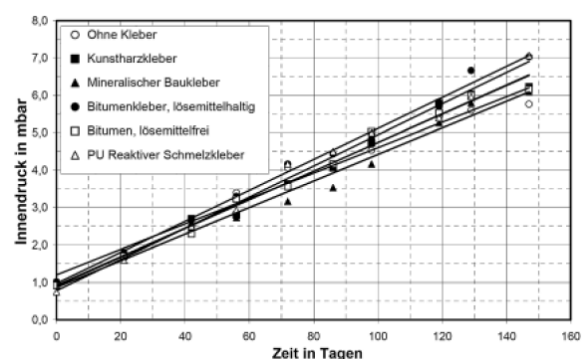
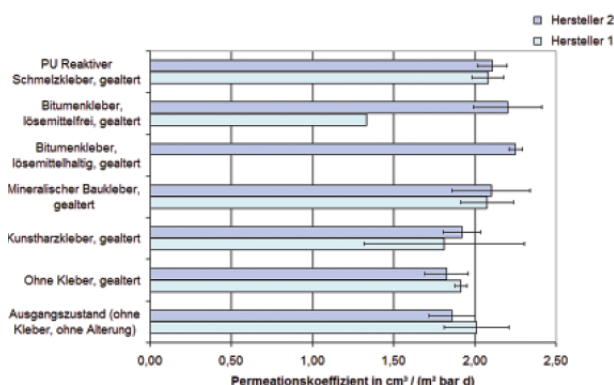
(bijvoorbeeld door dilataties) en navolgende manipulaties (bovenliggende lagen die bevestigd worden).

VIP's zijn dampdichte isolatiepanelen, hierbij moet rekening gehouden worden bij de volgorde en de dikte van de verschillende lagen. Verder moet ook aandacht besteed worden aan de naden van het paneel, deze zijn in het algemeen verzegeld door een verlijmd aluminium tape die de dichtheid verzekert maar vaak zelf ook broos is. Zo is het ook belangrijk om rekening te houden met de gevolgen van het falen van één of meerdere VIP's. Hierbij moet de thermische en hygrothermische werking van het paneel verzekerd blijven en bijgevolg geen risico geeft op verlies van comfort of kans op condensatie. Daarnaast moet ook de mogelijkheid voorzien worden om deze te vervangen en moet het dus ook mogelijk zijn om de werking van de VIP's te controleren door middel van infrarood technologie.

Verlijmen van VIP's.

Een onbekende in de toepassing van VIP's is het effect van verschillende verlijmingen of minerale stoffen die metselwerk of betonmuren afgeven op de duurzaamheid van de omsluitende folie. Ift Rosenheim probeerde in 2012 deze effecten aan de hand van een onderzoek in kaart te brengen[34]. Hiervoor werden zowel hele panelen als stalen van de folie en de stroken die de folie dichtmaken onderzocht, gezien deze allemaal verlijmd kunnen worden bij bevestiging op een substructuur.

Er wordt ten eerste gekeken naar het **effect van contact met verharde lijmen** over een lange tijd. Dit werd gesimuleerd door de panelen enkele maanden op te bergen met een verhoogde temperatuur. Enkele lijmen die vaak in de bouwsector gebruikt worden werden geselecteerd: lijmen op basis van kunsthars, minerale lijmen, bitumen lijmen (met oplosmiddel en oplosmiddelvrije) en reactieve smeltlijmen. Hiermee werden de proefstukken bedekt. Deze bleken een verwaarloosbaar effect te hebben op de mate waarin transport door diffusie doorheen de folie gaat. De toename in druk in het kernmateriaal bij langere blootstelling was van eenzelfde grootte bij de verlijmd als bij de niet verlijmd panelen. De kleine verschillen die de panelen onderling toonden kunnen dus niet als significant beschouwd worden. Ook voor de thermische geleidbaarheid kan dezelfde conclusie gemaakt worden, de verlijming had hier geen negatieve invloed op.

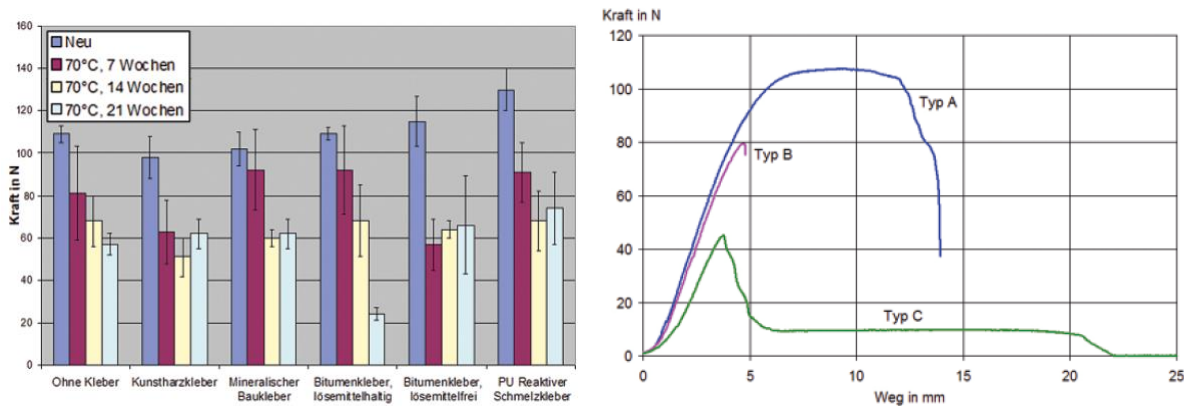


Figuur 9: He-indringing door de verlijmd en verouderde omhulling.

Figuur 10: Effect van de verlijming en veroudering op de interne gasdruk in een VIP met de afmetingen van 200*200*10 mm³. [34]

De lijmlaag van de proefstukken die bedekt waren met kunstharslijm, minerale lijm en de bitumineuze lijm kon niet verwijderd worden zonder een schadelijk effect aan het vacuüm te berokkenen. Bij de niet verlijmd panelen en de panelen die verlijmd zijn met smeltlijm trad de

delaminatie op van de omhullende folie bij gelijke belasting als bij de nog nieuwe, niet verlijmd panelen. Dit wil dus zeggen dat noch door de smeltlijm, nog door verouderen er schade aan de VIP ontstaat door het lostrekken van de folie. Deze resultaten werden bekomen door een “180° peel test”, op de afdichtnaden van de VIP. Deze meet de sterkte van een verlijming. De resultaten van deze test worden gegeven in de onderstaande figuur. Voor alle afdichtnaden, verlijmd of niet verlijmd, is de oorspronkelijke sterkte tussen de 100 en 130 N. Door veroudering zal deze sterkte dalen. Hierbij zullen met stijgende droogtijd verschillende faalmechanismen optreden en zullen dus verschillende spannings-rek diagram geven. Voor de eerste manier van falen zal het proefstuk eerst een grote rek vertonen voor de dichtingsnaad zal losgetrokken worden en/of de delaminatie van beide folies zal plaatsvinden. Type B zal oorspronkelijk eenzelfde verloop hebben, maar zal sneller falen. Bij type C zal de afdichtingsnaad bij een kleine kracht reeds loskomen, wanneer een eerste matig grote kracht overstegen is.

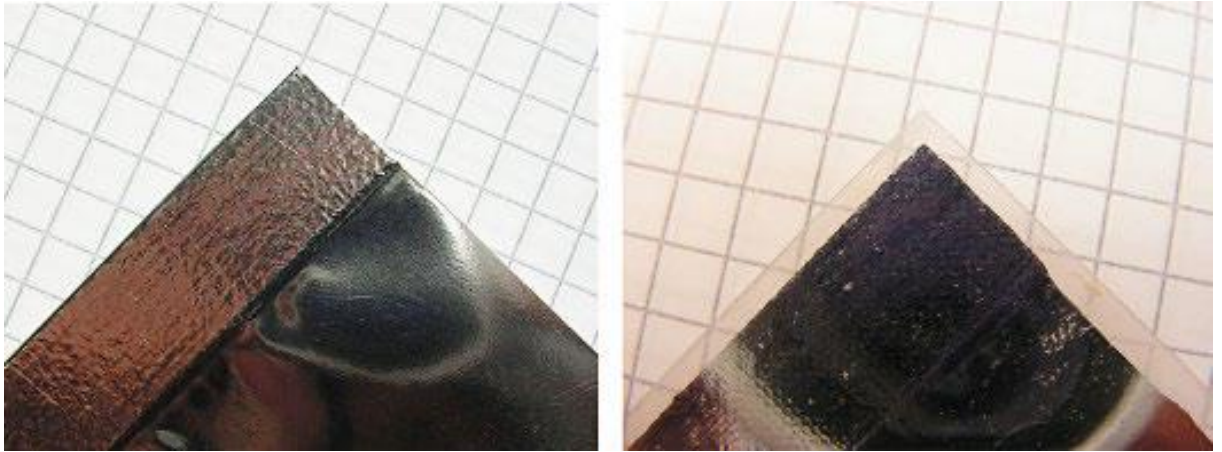


Figuur 11: Sterkte van de dichtingsnaden in een “T-peel test”.

Figuur 12: Verschillende spannings-rek verlopen voor de verschillende soorten falen in de T-peel test van de dichtingsnaden. [34]

Vervolgens werd gekeken naar het effect van contact met **niet-droge verlijming** gedurende enkele weken, om het vertraagde drogen te simuleren die voorkomt bij verlijmingen onder of achter grote panelen. Hierbij zal de lijm eerst aan de buitenranden van het paneel drogen en zal de lijm in het midden langere tijd nat blijven. Indien deze alkalisch zou zijn kan de aluminium coating van het VIP gaan corroderen en kan de gasdichte werking van de omhullende folie op die manier gecompromitteerd worden.

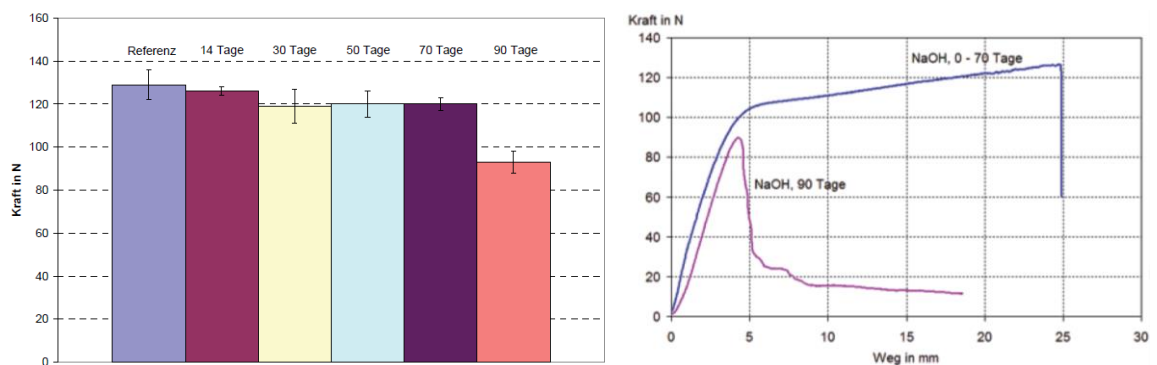
De blootstelling aan deze niet-droge lijmen verhoogde de interne gasdruk niet in de VIP's. Ook op de sterkte of het faalgedrag van de dichtingsnaden had dit geen invloed. De minerale lijm tastte echter de folie aan de dichtingsnaad aan zoals te zien is op figuur X. Een lange blootstelling aan niet-droge alkalische lijmen moet dus vermeden worden, vooral bij de dichtingsnaden.



Figuur 13: Folie met dichtingsnaad, links: initiële staat, rechts: staat na blootstelling aan een vochtige, minerale lijm. [34]

Daarna werd gekeken naar het effect van **contact met alkalisch vocht** gedurende enkele maanden, dit om de gevolgen van water uit de onderliggende structuur van de VIP, een metselwerk of betonnen muur en diens pleisterlaag, te simuleren. Deze kan namelijk alkalisch stoffen bevatten.

Na 90 dagen toont de “peel test” een significante verlaging in sterkte. Ervoor blijft de binnenzijde van de dichtingsnaad intact en blijft het mechanisch gedrag ongewijzigd. Pas wanneer de binnenzijde beschadigd wordt, verliest de dichting zijn sterkte.



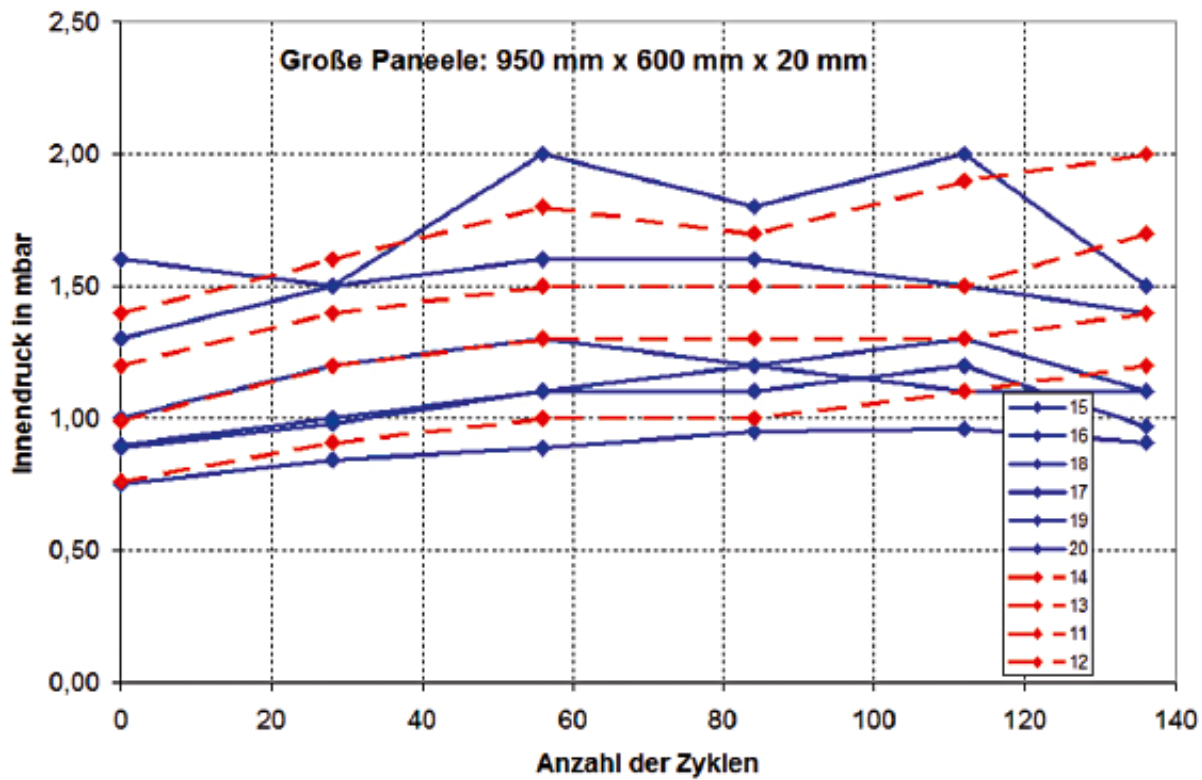
Figuur 14: Sterkte van de dichtingsnaad in de T-peel test na blootstelling aan een vochtig alkalisch medium.

Figuur 15: T-peel test van de dichtingsnaad, verandering van manier van falen na blootstelling aan een vochtig, alkalisch medium. [34]

Als laatste werd gekeken naar de gevolgen van cyclische **thermische uitzetting** van het materiaal waarop de VIP bevestigd wordt op de mechanische eigenschappen van deze VIP. Deze wordt in essentie bepaald door het kernmateriaal. Indien de onderliggende laag een grotere thermische uitzettingscoëfficiënt heeft en de verlijming stijf is zullen door temperatuurswisselingen trek en schuifkrachten tussen de panelen ontstaan.

Om het effect hiervan te testen werd een VIP paneel bevestigd om een aluminium paneel. Onderstaande figuur toont de resultaten van de interne gasdrukmetingen. Een stijging van de interne druk wordt waargenomen naargelang de panelen meer cycli ondergaan. Tussen de panelen die aan de aluminium panelen bevestigd werden en de referentiepanelen kunnen echter

geen grote verschillen waargenomen worden. De mechanische spanning die door de thermische uitzetting optreedt, zal dus geen negatief effect hebben op de dichtheid van de omhullende folie.



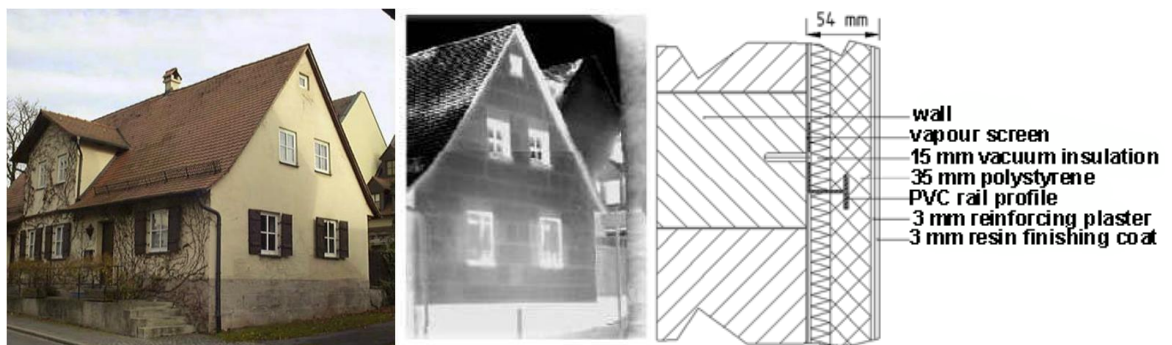
Figuur 16: Interne gasdruk in functie van het aantal thermische cycli: de blauwe lijnen stellen de panelen voor die verlijmd zijn op aluminium panelen, de rode de referentie panelen. [34]

3. ONDERZOEK:

3.1. PROJECTEN:

3.1.1. NUREMBURG 2000, PVC-RAIL SYSTEEM

Het eerste project dat geanalyseerd wordt is de na-isolatie van de gevel van een woning in Nuremburg in 2000. Aan de zijde van de puntgevel was de dakrand heel smal. Het federaal departement voor de preservatie van Historische Monumenten legde daarom een limiet van 6 cm op voor de thermische isolatie [45]. Hiervoor werd er gebruik gemaakt van vacuüm geïsoleerde panelen (VIP), die door middel van een rail systeem aan de bestaande muur bevestigd werden [Fig. 17]. De VIP's hebben een dikte van 15 mm, een oppervlakte van 1m^2 en worden vastgehouden door een PVC rail. Deze is ingeklemd in een EPS laag van 35mm die de VIP's aan de buitenkant beschermen [26]. De EPS laag is verlijmd op de VIP's en op de scheiding met de oorspronkelijke muur werd een dampscherm geplaatst. Door de oneven randen van de VIP's ontstaan er openingen van 2 tot 4 mm tussen de panelen, maar er zijn geen openingen tussen de EPS platen. Infrarood thermografie toonde een temperatuurverschil van $0,7^\circ\text{C}$ tussen het middelpunt van het paneel en de rand. De U-waarde van de muur is verbeterd van 0,7 tot $0,19\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Indien de panelen beschadigd worden zou deze U-waarde terug stijgen tot $0,32\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Een onderzoek dat gebruik maakte van infrarood thermografie in 2008 toonde dat één of zelfs meerdere panelen beschadigd werden na het onderzoek in 2001 en 2003.



Figuur 17: Infrarood thermografie en detail van de gevel in Nuremburg. [26,45]

Het voordeel van dit systeem is het montage systeem door middel van een rail, dit zorgt ervoor dat er geen gevaar is voor beschadigen van de VIP's, omdat geen nagels of andere nabewerkingen moeten uitgevoerd worden voor de mechanische bevestiging. De verbinding zal ook slechts een kleine koudebrugwerking veroorzaken, doordat deze uitgevoerd is in kunststof.

Een nadeel van het systeem is dat de vervanging van een beschadigd paneel niet mogelijk is zonder de bovenliggende panelen te verwijderen gezien deze aan elkaar vast zitten. Dit is echter niet kritisch doordat de muur nog steeds geïsoleerd zal blijven door de omliggende EPS platen.

Een groter nadeel is dat elk paneel ter plaatse individueel bevestigd moet worden en door deze handelingen is de kans op beschadigen van de VIP's, ondanks de veilige montage methode, toch reëel.



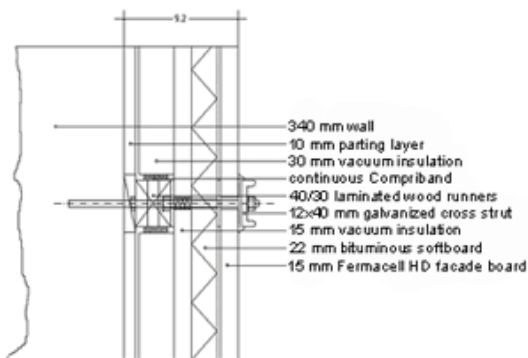
Figuur 18: Plaatsing van de gevel in Nuremberg/knoop die luchtholtes toont die een gevolg zijn van de oneffen randen van de VIP panelen. [22,45]

3.1.2. MUNCHEN 2001, METAALPROFIEL

Op eenzelfde schaal werd de buitenmuur van een rijhuis in Munchen, gebouwd in 1956, in 2001 nageïsoleerd met behulp van VIP's met een dikte van 40 mm. Hier was het belangrijk om de toegevoegde constructie zo smal mogelijk te houden omwille van de aangrenzende huizen. De panelen werden over de breedte van het gebouw bevestigd door middel van een stalen profiel [Fig. 19]. Dit omdat deze profielen aan de zuidgevel voldoende sterkte moeten hebben om zonnepanelen te dragen die voor de onderliggende structuur komen te zitten. De VIP laag wordt opgedeeld in twee panelen, dit om de koudebrugwerking ten gevolge van de achterliggende houten lat te minimaliseren. De U-waarde van de wand werd verbeterd tot $0,16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ of indien de panelen beschadigd worden tot $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. De totale energievraag werd zo verminderd met een factor 10 [46]. Ook hier toonde infrarood thermografie dat minstens één paneel beschadigd werd na de voltooiing van de constructie [26].

Door de bevestiging van zonnepanelen op de VIP's was de kans op beschadiging reëel doordat deze hoge temperaturen zullen aannemen. Bij testen bleek dat de VIP's temperaturen bereikten tussen de 116 en 161°C en hierdoor na 6 weken gevuld waren met lucht en dus niet langer hun hoge thermische prestatie hebben. De reden hiervoor werd niet gevonden, maar verdere testen waarbij een fleecelag met een dikte van 5mm tussen de panelen geplaatst werd resulteerde in een goed werkend systeem.

Een voordeel van het systeem is dat de VIP's hier bij beschadiging wel gemakkelijker vervangen kunnen worden doordat de verbinding aan de buitenkant te behandelen is. Daarnaast zorgt de opsplitsing van de VIP lagen er ook voor dat indien een paneel beschadigd raakt, het achterliggende paneel nog zal blijven isoleren. Opnieuw is hier een nadeel van het systeem dat de panelen op de site individueel geplaatst moeten worden, wat leidt tot verhoogde kans op beschadiging van de VIP's.



Figuur 19: Detail aansluiting en infrarood thermografie die de koudebruggen toont. [46]

3.1.3. KARLSRUHE 2010, ALUMINIUM-RAIL

Een ander project waar ook gebruik gemaakt werd van VIP's is bij het retrofitten van appartementsgebouwen in Karlsruhe in Duitsland, gebouwd in 1950. De panelen werden gelijkaardig als dat in Nuremberg bevestigd door een railsysteem. Hier gaat het echter om een aluminium rail die enkel de 40 mm dikke VIPs omsluiten. Deze panelen werden op beide zijden bedekt met een beschermende laag met een dikte van 4mm en aan de koude zijde werd een dubbele EPS laag van 25 mm aangebracht om de koudebrugwerking te verminderen. [26]. De panelen hadden afmetingen van 80x40 cm, 40x40 cm, 30x40 cm en 20x40 cm. Deze kleinere panelen waren nodig om de opvulling rond de ramen te kunnen maken. De U-waarde van de wand werd zo verbeterd tot $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Waar de VIP's niet aansluiten, werd deze opgevuld door EPS. De balkons werden aangepast en de verbinding met de muur werd speciaal ontworpen om de koudebrugwerking te minimaliseren.

Net als bij het project in Nuremberg heeft het montagesysteem het voordeel dat de bevestiging zonder extra handelingen kan gedaan worden en de VIP's dus minder kans hebben op beschadiging. Hier worden voor de rails echter aluminiumprofielen gebruikt, deze hebben een veel hogere lambda waarde en zullen dus een groter koudebrugeffect hebben, hoewel deze door de EPS laag verminderd wordt. Doordat de panelen tot hele kleine afmetingen hebben zal dit koudebrugeffect nog eens vergroot worden door het grotere aantal lopende meters waarbij er naden ontstaan. Ook kunnen de VIP panelen hier moeilijk vervangen worden gezien ze opnieuw onderling aan elkaar bevestigd zijn en de bovenliggende panelen dus mee moeten gedemonteerd worden.



Figuur 20: Gevelisolatie in Karlsruhe.[26]

3.1.4. HOFHEIM 2006, GEDT

Een volgend project werd gerealiseerd in 2006 in Hofheim. Hier werden de gevels van drie structureel identieke gebouwen, gebouwd in 1927, geïsoleerd door middel van geprefabriceerde gevelelementen met geïntegreerde VIP's. Naar deze panelen wordt vaak verwezen als Großelement-Dämmtechnik[8].



Figuur 21: Großelement-Dämmtechnik (GEDT) in Hofheim.[8]

De basis van deze prefab elementen is een gelamineerd paneel uit fineerhout (Kerto paneel). In dit paneel werden bevestigingselementen aangebracht om de panelen aan de bestaande structuur op te hangen. Deze worden verbonden aan de bestaande muur door ankers die door middel van pluggen en draadeinden op voorhand in de muur bevestigd werden. Hierbij werd de luchtdichtheid verzekerd door de wandbevestigingen afzonderlijk te voorzien van een luchtscherm [Fig 22].



Figuur 22: Afdichting van de wandbevestigingsconsole om de luchtdichtheid te verbeteren. [38]

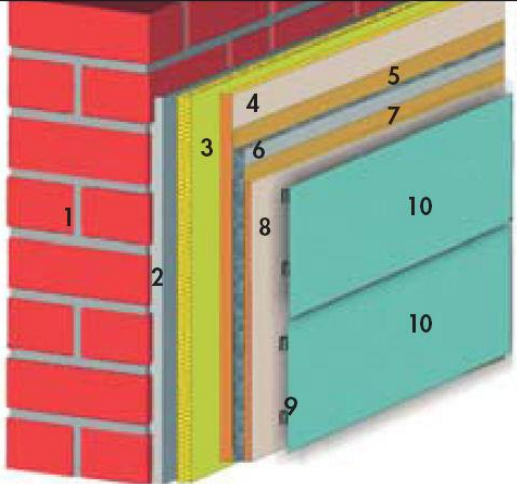
De verschillende bevestigingselementen in het gevelelement worden in de fabriek op het paneel bevestigd. Aan de bovenzijde van het paneel worden beugels bevestigd die op een console rusten en er in vast gebout worden (E). Daarnaast wordt het paneel in het midden opgehangen aan de muur door middel van een haak die bevestigd wordt in een 'schelp' die gevuld is met snel bindende mortel (W) en correct gepositioneerd wordt via steunpunten aan de onderzijde van het element (U). De panelen kunnen perfect gepositioneerd worden doordat deze dragers kleine horizontale en verticale uitwijkingen kunnen opvangen.



Figuur 22: Schema van de mechanische bevestiging van de panelen aan de bestaande muur. [38]

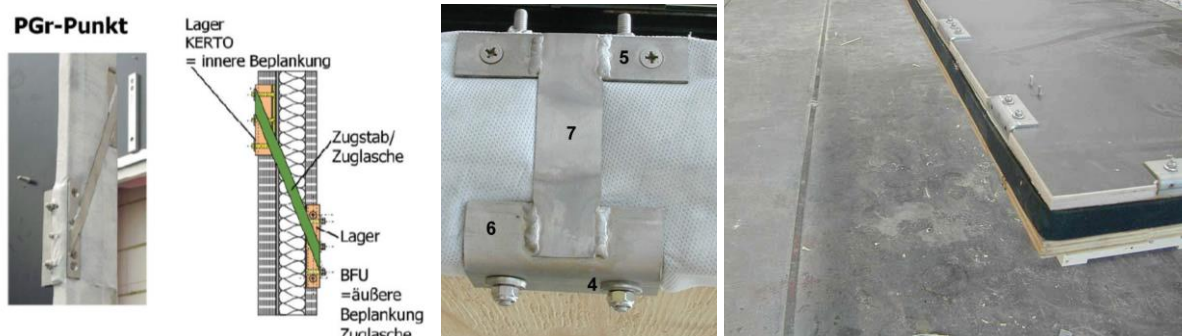
Rond deze bevestigingselementen wordt een isolatielaag aangebracht om de oneffenheden in de bestaande pleisterlaag te compenseren en zo luchtgaten te vermijden tussen de bestaande muur en het isolatie element. Op de andere zijde van het Kerto paneel werd een multiplex paneel met een aluminiumfolie aangebracht. Deze beschermt het VIP tegen mechanische beschadiging. Ook aan de buitenzijde wordt ze bedekt door een multiplex en een gefineerde multiplex plaat.

Layer sequence	Thickness [mm]
1 Masonry	300
2 Plaster	15
3 Compensating insulation (mineral wool)	20
4 Kerto base panel	27
5 Plywood	5
Aluminium foil	0.8
6 VIP	40
7 Plywood	5
8 Veneered plywood base panel	18
9 Hollow aluminium sections as substructure	20
10 Resin composite panels, bonded	8



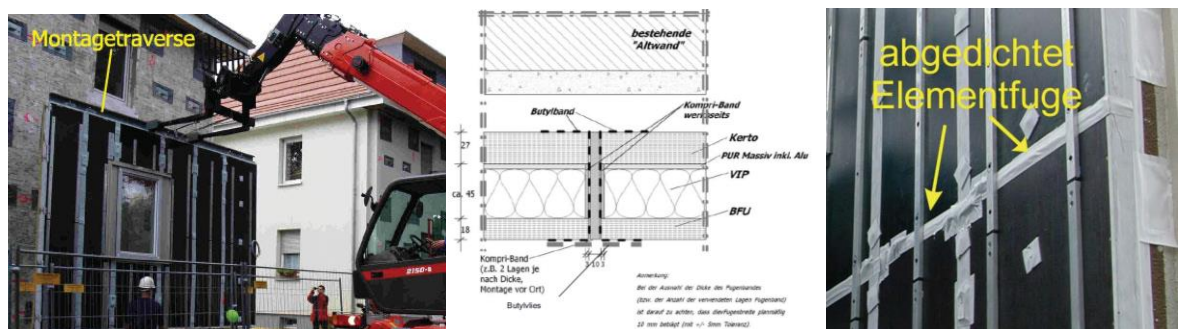
Figuur 23: Opbouw van het GEDT element.[8]

Het element wordt samengehouden door roestvrij stalen ankers zodat er geen lasten op de VIP's komen en de lasten op de voorzijde van het paneel toch overgedragen kunnen worden naar de achterzijde. Daarnaast werden ook aan de buitenzijde van het paneel stalen verbindingsprofielen gebruikt om het paneel samen te houden.



Figuur 24: Bevestigingselementen voor het samenhouden van het paneel. [8]

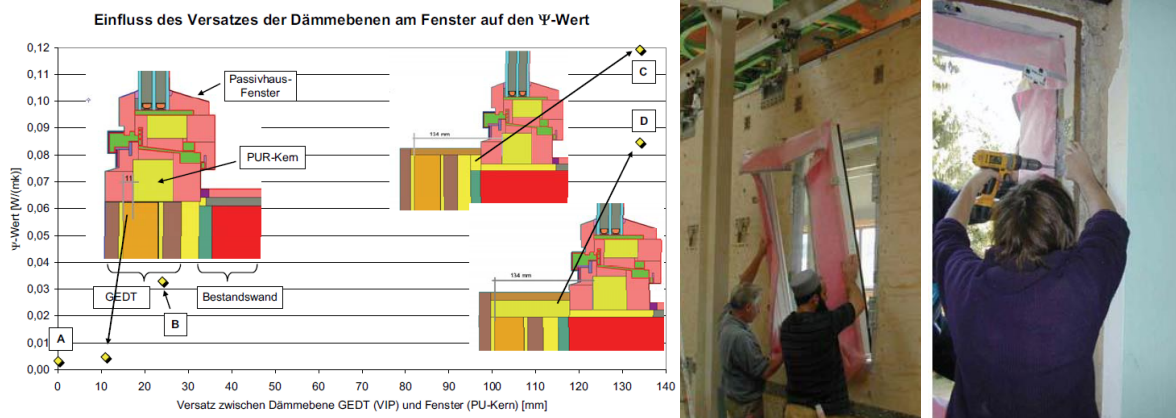
Met behulp van een montageplaat, bovenaan het element, worden de panelen door een heftruck opgehangen aan de geïnstalleerde ankers. De voegen tussen de elementen werden gevuld met voorgedrukte zwelbanden en aan de buitenzijde afgeplakt met butyl rubber tape. Ter plaatse wordt de gevel dan afgewerkt door een geventileerde gevelbekleding op de aluminium profielen die reeds aanwezig zijn op het buitenpaneel. Hierdoor is de verdeling tussen de individuele elementen niet visueel zichtbaar. [8]



Figuur 25: Plaatsing van de panelen met behulp van een montagebalk en afdichting van de naden om de luchtdichtheid te realiseren. [38]

De ramen werden in de panelen geïntegreerd om de kans op schade aan de VIP's te voorkomen. Daarnaast zorgt dit er ook voor dat de bewoners slechts een beperkte hinder door de renovatie ondervinden. Tijdens de installatie van de gevelelementen blijven de oorspronkelijke ramen namelijk zitten en deze kunnen daarna verwijderd worden onafhankelijk van het weer.

De positie van de ramen werd om het koudebruggeffect te verminderen ter hoogte van de VIP's gekozen, zodat de gewoonlijke XPS stroken rond het kader niet nodig zijn. Het raam wordt ook samen met zijn regenscherm en bevestigingsprofiel in het element verwerkt. Zo kan de bevestiging en luchtdichting met de bestaande muur snel gerealiseerd worden.



Figuur 26: Effect van de diepte waarin het raamkader geplaatst wordt op de Psi-waarde, plaatsing van het raamkader in het paneel en afwerking na installatie. [38]

Door de VIP's met een dikte van 40 mm wordt de U-waarde van de wand verbeterd tot 0,115 W/(m².K). Na het verouderen van de panelen zal de warmtegeleiding stijgen en resulteren in een U-waarde van 0,19 W/(m².K). In het geval alle VIP's zouden falen, zal de U-waarde stijgen tot 0,29 W/(m².K).

De voordelen van dit systeem zijn dus dat de grote mate van prefabricatie er voor zorgt dat de VIP's goed beschermd zijn en met zorg kunnen verhandeld worden. De ingreep kan zo ter plaatse ook snel gebeuren zonder veel hinder te veroorzaken voor de bewoners. Door de vooraf bevestigde aluminium profielen kan ook snel een geventileerde gevelafwerking voorzien worden die de elementen tegen de weersomstandigheden beschermt.

Een nadeel is dat, om de koudebrugwerking te beperken, voor dit systeem complexe stalen verbindingstukken gebruikt worden om, die de kostprijs doen stijgen. Ook zijn voor de plaatsing en het transport van de panelen machines nodig die de kosten opdrijven. Bij een defecte VIP moet ook het hele paneel gedemonteerd worden, waarbij opnieuw dus veel machinerie nodig is.

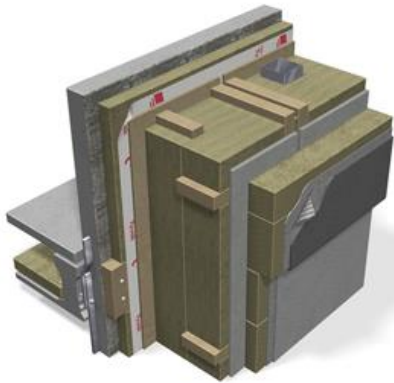
3.1.5. RIIHIMÄKI 2010, PAROC INNOVA

Bij het Paroc Innova project in Riihimäki in Finland in 2010, werd een appartement uit 1970 na-geïsoleerd door middel van geprefabriceerde gebouwhoge gevelelementen, gebaseerd op het Timber Based Element systeem (TES). De elementen hebben een hoogte van 12 m en bestaan dus uit een houten frame structuur met een profiel uit 39x300 gelamineerd fineerhout (LVL). Dit om een kleinere vochtbeweging te hebben in vergelijking met de traditionele gezaagde houten frames. [31].



Figuur 27: Prefabricatie van het TES element. [31].

Het frame wordt aan beide zijden omsloten door een houten paneel. Aan de binnenzijde werd een multiplexplaat op basis van sparrenhout met een dikte van 9 mm samen met een luchtscherm bevestigd op het frame doormiddel van verlijming en schroeven. In het frame werd minerale wol geplaatst en de buitenzijde werd gesloten door middel van een cement vezelplaat. De U-waarde werd zo verbeterd van $0,27 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ naar $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. In deze panelen werden ook de nodige kanalen voor verschillende technieken geïntegreerd zodat de hinder tijdens de uitvoering voor de bewoners geminimaliseerd wordt.

PAROC INNOVA	Lagen	Dikte (mm)
	Metselwerk	340
	Minerale wol	70
	Regenscherm $sd=0,5\text{m}$	1
	Multiplex	9
	Minerale wol	300
	Cement vezelplaat	9
	Minerale wol	50
	Pleisterafwerking	10

Figuur 28: Opbouw Paroc Innova

Voor de installatie van de panelen werden de buitenste lagen van de bestaande geprefabriceerde betonnen sandwichelementen verwijderd, zodat enkel de binnenste betonlaag overbleef. Hierop werden horizontale uitlijningsbalken bevestigd en werd de tussenruimte opgevuld met minerale wol. Deze opvullingslaag zorgt ervoor dat de bestaande muur kan uitdrogen zonder de nieuwe TES elementen te beschadigen. Dit door de vocht bufferende capaciteit van de cellulose vezels. Deze nemen het vocht tijdens de koude wintermaanden op en laten het tijdens de zomer maanden terug los. Dit om een goed drogingsproces te realiseren van zowel de bestaande muur als het TES element. Daarna worden de panelen met behulp van een hijskraan voor de gevel geplaatst en gemonteerd. Vervolgens werd aan de buitenzijde een laag minerale wol met een pleisterafwerking aangebracht op de cement vezelplaat. Op die manier worden de panelen luchtdicht gemaakt.



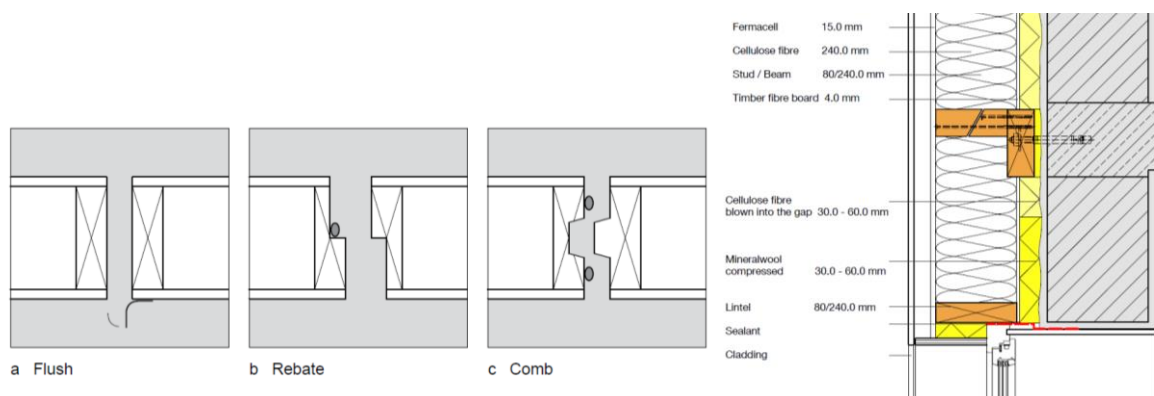
Figuur 29: Voorbereiding en montage van de elementen aan de bestaande gevel. [31].

Aan de zijde met de balkons wordt een geventileerde gevelafwerking toegepast. Hier moest de voegen tussen de panelen dus op een andere manier luchtdicht gemaakt worden. Hiervoor wordt in de “TES manual” enkele manieren beschreven om deze te realiseren. De winddichtheid aan de buitenzijde wordt vaak gerealiseerd door de combinatie van winddichte verbindingen met een Fermacell plaat aan de buitenzijde. Deze platen zijn winddicht, maar wel diffusie-open. Dit is belangrijk, omdat het zo een dampopen systeem wordt en het opgeslagen vocht zo naar buiten toe kan uitdrogen. Hiervoor moeten de buitenste lagen dus meer dampopen zijn dan de binnenste, of moeten de sd warden dus dalen van de binnenste lagen naar de buitenste lagen. Voor de binnenste lagen gaat dit van 2,5 tot 15 m, bij de buitenste lagen moet die een factor 5-10 kleiner zijn, of dus van 0,5 tot 1,5 m. In onderstaande tabel wordt de sd waarde van enkele bouwmaterialen gegeven.

	Interior surface	Wall	Exterior surface	Sd-value [m]
Reinforced concrete	15*0,02	80*0,15	50*0,015	13,35
Masonry, 1600 kg/m ³	15*0,02	5*0,24	50*0,015	2,55
Masonry, 900 kg/m ³	15*0,02	5*0,365	50*0,015	3,175
KS 1600 kg/m ³	15*0,02	15*0,20	50*0,015	4,35
Leichtbeton 1800 kg/m ³		70*0,20		15,35
Compare: PE-foil: sd=50 m				
Compare OSB: sd=0,45-0,75				

Tabel 4: Sd-waarden voor verschillende veelvoorkomende scheidingsmaterialen. [48].

Deze “TES manual” stelt ook dat indien de bestaande draagmuur voldoende dicht is door de binnen bepleistering, de binnenzijde van het TES element niet luchtdicht dient gemaakt te worden. Indien natuurlijk niet verzekert kan worden dat deze luchtdicht is zal een extra luchtdichte laag moeten geplaatst worden tussen de bestaande en de nieuwe structuur. Om de winddichtheid aan de binnenzijde te realiseren wordt ook een luchtdichte tape rond het kader van de ramen geplaatst. De nieuwe ramen worden dus hier ook geïntegreerd in de gevelementen.

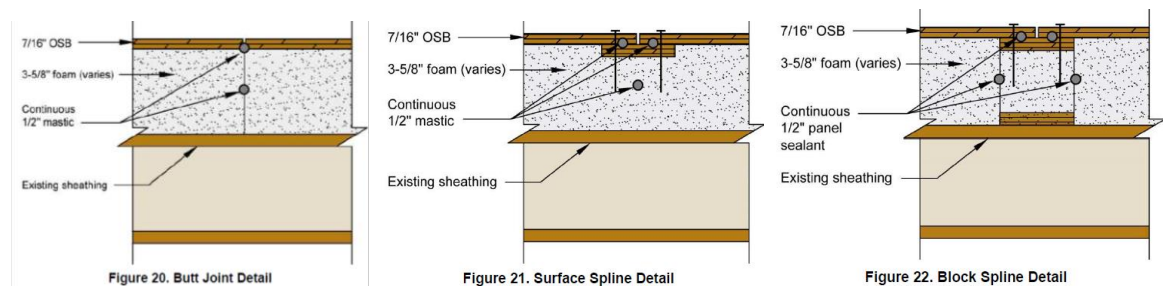


Figuur 30: Verschillende soorten element verbindingen en dichtingsoplossingen voor TES elementen, detail voor de luchtdichtheid van het raamkader. [48]

Voordelig aan dit systeem is dat de koudebrugwerking heel beperkt is doordat de verbindingen en de structuur met hout gemaakt wordt en deze een goede thermische weerstand heeft ($\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$). Om echter een voldoende lage U-waarde te bereiken zal hier een grote dikte nodig zijn. Dit heeft zijn invloed op de lezing van de gevel, maar vooral op het comfort binnen. De daglichtinval zal namelijk veel minder zijn door de dikte van de gevel, dit kan eventueel verholpen worden door de nieuwe ramen groter te maken.

3.1.6. STRUCTURAL INSULATED PANELS

Structural Insulated Panel (SIP) is een lichte composiet structuur bestaande uit isolerend polymeerschuim die tussen twee structurele platen zit. Dit kan een metaalplaat, vezelplaat of multiplex plaat zijn. De isolatie kan EPS, XPS, PUR of PIR zijn. Ze worden verondersteld snel geïnstalleerd te kunnen worden, zeer licht, akoestisch isolerend, thermisch isolerend, vochtwerend en brandwerend te zijn. De panelen kunnen op verschillende manieren verbonden worden, zoals te zien is op onderstaande figuur.



Figuur 31: Verschillende verbindingsmethodes voor de verbinding tussen de SIP's.

Belangrijk voor de werking van het systeem is de panelen onderling goed gedicht worden. Openingen kunnen vochtverplaatsing naar de binnenzijde van de muur veroorzaken. Deze dichting wordt gedaan door weinig uitzettend polyethuraanschuim of kitvoegen. Vaak wordt ook een regenscherm geplaatst en een geventileerde gevelafwerking.

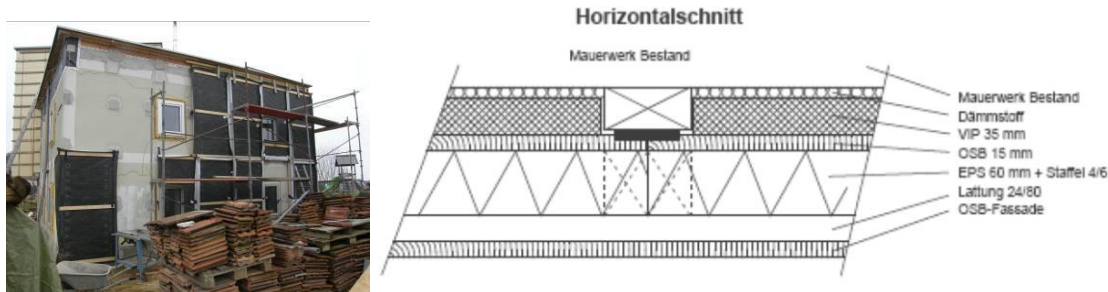


Figuur 32: Installatie van de SIP's.

Een voordeel van dit systeem is dat de panelen zelfdragend zijn en de isolerende laag dus volledig continue is. Een nadeel is dan weer dat deze geen vocht kunnen opnemen of afgeven en deze de draagmuur dus niet toestaan om naar buiten toe te drogen. Ook zal opnieuw een grote dikte nodig zijn om een voldoende hoge U-waarde te bekomen.

3.1.7. SCHLEIßHEIM PASSIVHAUSSTANDARD

In dit project uit 2008 in Schleißheim, Duitsland, werd een kleine boerderijwoning gerenoveerd tot passiefhuisstandaard door middel van geprefabriceerde gevelelementen met geïntegreerde VIP's. De ambitie was om gevel systeem te ontwikkelen met vacuüm isolatie in de vorm van "2-man-panel-units", deze moeten extreem luchtdicht, gemakkelijk te bouwen en te plaatsen zijn. Deze hebben een oppervlak van 2,50 op 1,25 m.



Figuur 33: Gevelrenovatie in Schleißheim, horizontale detailsnede. [33]

De panelen hebben aan de binnenkant een VIP laag met een dikte van 35 mm. Deze zijn door verlijming bevestigd aan een eerste OSB plaat met een dikte van 15 mm, hierop is een houten frame aangebracht, opgevuld met steenwol met een dikte van 60 mm. Daarbovenop zijn extra latten aangebracht met een regenscherm en een 15 mm dikke OSB plaat met een keramische coating¹. De voegen rondom het paneel worden tenslotte afgeplakt en op het paneel wordt aan de zijde van de VIP een beschermende folie aangebracht.



Figuur 34: Samenstelling van de "2-man-panel-unit". [33]

Deze panelen worden door een verbindingselement, gemonteerd in de hoeken van het paneel, via een console aan de bestaande muur opgehangen. Op deze manier is 0,2% van de oppervlakte niet door vacuümisolatie geïsoleerd.



Figuur 35: Bevestigingsmethode van het paneel. [33]

¹ Thermoshield

Een voordeel van dit systeem is dat de VIP's door prefabricatie verwerkt zijn in de panelen en dus verminderde risico op beschadiging hebben op de bouwwerf. Door afmetingen van de panelen kunnen deze geplaatst worden zonder grote kranen nodig te hebben. Ook indien de VIP zou beschadigd worden heeft dit zijn voordelen, omdat slechts een klein paneel gedemonteerd moet worden.

Nadelig aan dit systeem is dat er ter hoogte van de verbindingselementen een grote koudebrug ontstaat doordat hier geen isolatie aangebracht is en deze ook niet opgevangen wordt in andere lagen. Dat er geen voldoende dikke laag minerale wol als tussenlaag gekozen wordt maakt het ook moeilijk om oneffenheden in de bestaande muur op te vangen. Hierdoor merkte men dat het moeilijker was om de panelen perfect op elkaar te doen aansluiten.

Ook zal de uitsparing die nodig is in de hoek van het VIP de kostprijs van het paneel doen stijgen gezien deze op maat gemaakt moet worden.

3.1.8. ROOSENDAAL

Ook bij de energie efficiënte renovatie van het sociale huisvestingsproject de Kroegen in Roosendaal werd gebruik gemaakt van geprefabriceerde houten gevelelementen. Hier wordt een houten frame opgebouwd uit houten I-profielen met een dikte van 350 mm die zorgen voor een kleinere koudebrug. Deze werd opgevuld met minerale wol en aan de buitenzijde bedekt met een dampopen houtvezelplaat DHF² en aan de binnenzijde met een OSB plaat die meer dampdicht is [32]. Een dampopen folie is hierdoor niet nodig, omdat de isolatie en elementopbouw eventueel vocht kunnen reguleren en naar buiten kunnen laten verdampen. Aan de buitenzijde wordt de gevel in situ afgewerkt met leistenen. De panelen zijn verdieping hoog en worden onderaan bevestigd op een voorziene funderingsstrook en bovenaan doormiddel van een bevestiging met een metalen profiel in de bovenste vloerplaat. De oorspronkelijke gevel wordt gestript vooraleer de nieuwe panelen aan te brengen. De U-waarde van de gevel wordt zo verlaagd tot 0,11 W(m².K). [21]



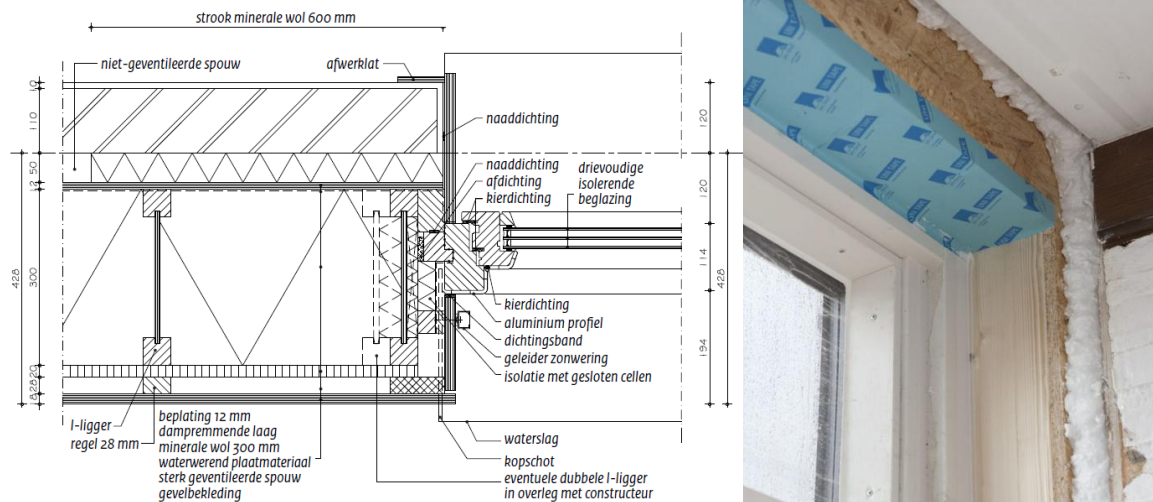
Figuur 36: Gevelrenovatie in Roosendaal. [21]

Naast de met cellulose geïsoleerde wanden en het dak van de houtskelet gedeeltes wordt ook de buitenzijde van de fundering geïsoleerd, in dit geval met XPS. De binnenzijde van de fundering en de onderzijde van de begane grondvloer zijn geïsoleerd met spuitpur.

Aan de infiltratie ofwel de luchtdoorlatendheid van een woning worden hoge eisen gesteld. Bij Passief Bouwen wordt uitgegaan van een zeer lage infiltratie ($\leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ bij 50 Pa). Deze hoge eis

² Diffusible Humid Resistant Fibreboard

voor luchtdichtheid is voor nieuwbouw passiehuizen al een hele opgave. Laat staan voor deze kleine en compacte eengezinswoningen uit de Kroeven. Om die reden is de luchtdichtheidseis voor deze renovatie minder scherp gelegd op $\leq 1,0$ bij 50 Pa. Om de gewenste infiltratiewaarden te realiseren is daarom extra aandacht besteed aan de kwaliteit van detaillering en uitvoering. Daaronder valt de maatvastheid en het zorgvuldig werken, het aftapen van naden, kieren en doorvoeringen. De luchtdichtingen werden geprefabriceerd en bij draaiende delen werd een dubbele luchtdichting gerealiseerd. De dampremmende folie werd met overlapping aangebracht en afgeplakt. De ramen zitten hier dus in de gevelpanelen ingewerkt en dienen enkel aan de binnenzijde nog afgewerkt te worden.



Figuur 37: Detail van de raamaansluiting[32]

Een voordeel van dit systeem is dus dat het een dampopen systeem is, maar resulteert opnieuw in een gevel met een grote dikte. De hinder door de renovatie blijft beperkt voor de bewoners. Door het gebruik van de I-liggers is de doorbreking van de isolatie minimaal en zijn er dus nauwelijks koudebruggen. Bij de montage van de elementen is wel een kraan nodig, maar deze zal op die manier snel gebeuren.

3.2. THERMISCH GEDRAG:

3.2.1. LINEAIRE WARMTEDOORGANGSCOËFFICIENT

Om het koudebruggeffect te vergelijken, dat ontstaat ten gevolge van de aansluiting van het paneel aan de achterliggende structuur wordt de lineaire warmtedoorgangscoefficient ψ gegenereerd. Deze warmtedoorgangscoefficient geeft aan welke toeslag aangerekend moet worden op het warmtetransport dat op basis van de U-waarde berekend is.

De lineaire warmtedoorgangscoefficient is gedefinieerd als:

$$\psi = \frac{\phi_{2D} - \phi_{1D}}{L \cdot (\theta_i - \theta_e)} \frac{W}{m \cdot K}$$

met:

- ϕ_{2D} [W]: de tweedimensionale, stationaire warmtestroom tussen de binnen- en buitenomgeving, berekend met gevalideerde numerieke software;
- ϕ_{1D} [W]: de som van de stationaire warmtestromen door de samenstellende scheidingsconstructies van het model, berekend volgens:

$$\Phi_{1D} = \sum U_i \cdot A_i \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [W]$$

waarin:

U_i [W/m²K]: U-waarde van de scheidingsconstructie i;

A_i [m²]: oppervlakte van de scheidingsconstructie i van het model, op basis van de buitenafmetingen;

- L [m]: de lengte waarover de bouwknop gemodelleerd wordt;
- $\theta_i - \theta_e$ [K]: het temperatuurverschil tussen de binnen- en buitenomgeving

3.2.2. AANNAMES BIJ DE SIMULATIES

Om de thermische prestaties van de verschillende systemen te vergelijken wordt gebruikt gemaakt van TRISCO. Hierin wordt de warmteoverdracht gesimuleerd doorheen de verschillende lagen die ingegeven worden als blokken in een rechthoekig grid. De maaswijdte van het grid moet voldoende klein worden gekozen om tot correcte resultaten te komen. Aan de blokken kunnen verschillende materiaaleigenschappen en randvoorwaarden toegekend worden. Na invoer van de geometrie en de thermische eigenschappen, wordt een stelsel lineaire vergelijkingen berekend, gebaseerd op de energiebalans techniek en opgelost met een snelle iteratieve werkwijze.

Gebaseerd op de thesis van P. Bonte werd de opbouw van de VIP's vereenvoudigd om de simulaties uitvoerbaar te maken. Daarvoor werden de drie dunne aluminium lagen en de drie PET lagen samengevoegd tot één aluminium en één PET laag. Bovendien werden de lagen van de folie dikker gesimuleerd dan ze in werkelijkheid zijn. Dit heeft als gevolg dat ook de warmtegeleidingscoëfficiënten moeten worden verschaald.

Werkelijke laagdikte			Werkelijke λ -waarde		
PE (mm)	Al (mm)	PET (mm)	PE (W/m.K)	Al (W/m.K)	PET (W/m.K)
0,055	0,0003	0,036	0,15	237	0,29
Gesimuleerde laagdikte			Gesimuleerde λ -waarde		
PE (mm)	Al (mm)	PET (mm)	PE (W/m.K)	Al (W/m.K)	PET (W/m.K)
0,55	0,1	0,35	0,015	0,711	0,030

Tabel 5: Inputgegevens voor simulatie van het VIP in Trisco. [10]

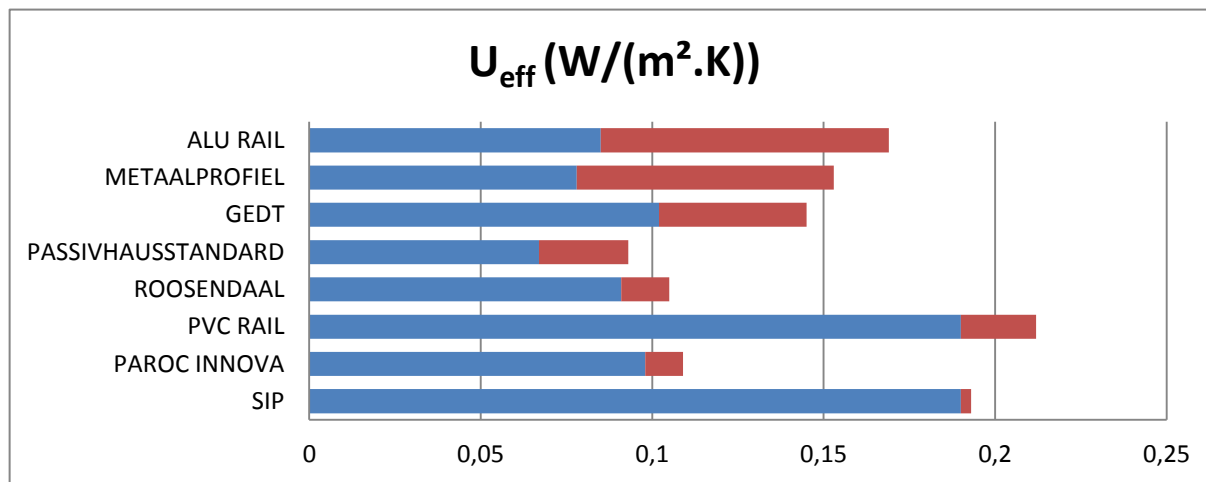
Verder werd ook gewerkt met de volgende overgangscoefficienten: $\alpha_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ en $\alpha_e = 25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, die gelden voor verticale constructie-oppervlakken. De referentietemperatuur van de binnen omgeving $\theta_{\text{ref},i}$ bedraagt 20°C . De referentietemperatuur van de buitenomgeving $\theta_{\text{ref},e}$ is -10°C .

Ten slotte werd de warmtegeleidingscoëfficiënt λ van de verschillende materialen uit de database van Trisco gebruikt. Voor de materialen die niet voorkomen in deze database werd eerst beroep gedaan op het Transmissie Referentie Document en vervolgens op specifieke productfiches (bijlage X).

3.2.3. RESULTATEN

	A	d	ψ	U	U+	Ueff	Aandeel ψ
	(m^2)	(mm)	$\text{W}/(\text{m}.\text{K})$	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	
SIP	2	124	0,003	0,19	0,003	0,193	1,55%
PAROC INNOVA	36	448	0,011	0,098	0,011	0,109	10,09%
PVC RAIL	2	54	0,011	0,19	0,022	0,212	10,38%
ROOSENDAAL	30	380	0,009	0,091	0,014	0,105	13,33%
PASSIVHAUSSTANDARD	9	315	0,026	0,067	0,026	0,093	27,96%
GEDT	15,39	158	0,075	0,102	0,043	0,145	29,66%
METAALPROFIEL	9	92	0,04	0,078	0,075	0,153	49,02%
ALU RAIL	0,5	98	0,047	0,085	0,084	0,169	49,70%

Tabel 6: Invloed van het koudebruggeffect op de totale U-waarde van het paneel.



Figuur 38: Invloed van het koudebruggeffect op de totale U-waarde [$U_{\text{eff}}=U+U_+$] van het paneel.

3.2.4. CONCLUSIES

- De keuze van het materiaal dat gebruikt wordt om de mechanische verbinding te maken – en meer precies de thermische geleidbaarheid van het materiaal – heeft een grote invloed op de grootte van de lineaire warmteverliezen die ontstaan bij de verbinding van de panelen. Dit is vooral te zien bij de vergelijking tussen het aluminium- en het pvc-rail systeem.
- De manier waarop het verbindingselement toegepast wordt heeft zo ook zijn effect. Dit komt vooral naar voor bij de vergelijking tussen het metaalprofiel systeem en het aluminium rail-systeem, waarvan de laatste een veel hogere thermische geleidbaarheid heeft. Toch is de ψ -waarde niet veel groter aluminium rail-systeem, dit doordat het

metaalprofiel doorheen de hele dikte gaat van het paneel, terwijl de aluminium rail bedekt wordt door een EPS-laag.

- Daarnaast zien we uit de simulaties ook dat de grootte van panelen van belang zijn. Bij de kleinere panelen heeft een hoge ψ -waarde een grotere invloed op de effectieve U-waarde, gezien de verhouding tussen de oppervlakte en de omtrek hier niet optimaal is.

3.3. HYGRISCH GEDRAG

3.3.1. INLEIDING

Een belangrijk gegeven in de analyse van de prestatie van de verschillende systemen is het hygrothermisch gedrag. Het initieel vochtgehalte van de draagmuur, de hygrische eigenschappen van de verschillende materialen en de volgorde waarin het paneel samengesteld is, maar ook onvoldoende verwarming, lekken in de buitenwand, penetratie van slagregen en onvoldoende ventilatie, kunnen leiden tot het ontstaan van overtollig vocht in de constructie. De meeste constructies kunnen een bepaalde hoeveelheid vocht bufferen, toch is dit overtollige vocht volgens Hens [19] de oorzaak bij 70% van de schadegevallen. Dit kan leiden tot schimmelgroei, corrosie, houtrot, hygrische vervorming, vorstschade of een verlaging van de thermische weerstand van de isolatiematerialen, maar ook tot gezondheidsproblemen voor de bewoners. In dit stuk wordt gekeken naar de verschillende normen of criteria die bestaan om een uitspraak te doen over de toegelaten hoeveelheid vocht.

3.3.2. SCHIMMELGROEI

Het voorspellen van het voorkomen van schimmelgroei is een moeilijk gegeven. Men kan stellen dat schimmelgroei zal optreden indien de omgevingsfactoren voldoen aan de groeicondities volgens Sedlbauer:

➤ Temperatuur:

Doordat de groei van organismen in grote mate tot stand komt door biochemische veranderingen, verwacht men ook dat de temperatuur een invloed heeft op deze groei. Dit bevestigt Grant door een onderzoek naar de groeisnelheid van enkele schimmelsoorten. In figuur 39 kan men een duidelijk optimale groeisnelheid zien bij een bepaalde temperatuur. Ook is te zien dat de groei stopt bij een bepaalde minimum of maximum temperatuur. Vervolgens kan men dus stellen dat een verandering van de temperatuur een effect heeft op het metabolisme.

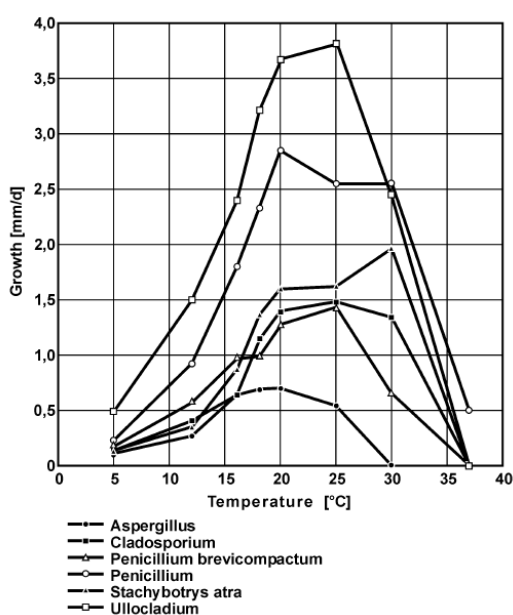


Fig. 39: Groeisnelheid van verschillende schimmels in functie van de temperatuur [35]

➤ Vochtigheid

Een volgende parameter is de vochtigheid die de schimmel ter beschikking heeft, deze is volgens Sedlbauer zelfs de meest kritische. De schimmel kan deze rechtstreeks opnemen van het substraat in de vorm van water, of via de lucht in de vorm van damp. Hier wordt dus gekeken naar de relatieve vochtigheid aan het oppervlak of in het bouw materiaal. Voor de groei van schimmels is geen saturatievochtigheid nodig, men vindt dat schimmelgroei al bij een lagere relatieve vochtigheid optreedt en bij de meeste schimmelsoorten een optimum vindt bij 80%.

➤ Combinatie van temperatuur en relatieve vochtigheid

De invloed van de temperatuur en de relatieve vochtigheid op de schimmelgroei kunnen echter niet los van elkaar gezien worden. De minimale en optimale relatieve vochtigheid kan verschillen naargelang de temperatuur lager of hoger is. Het verband tussen deze twee parameters resulteert in isopleten, dit zijn lijnen die een gelijke kans op schimmelgroei geven. Deze verschillen natuurlijk naargelang de schimmelsoort.

➤ Voedingsbodem

Een derde belangrijke parameter is de voedingswaarde van het substraat waarop de schimmel groeit. Zelfs kleine toegevoegde hoeveelheden van organisch materiaal maken de microbiologische groei nodig. De kans op schimmelgroei wordt dus medebepaald door de inherente samenstelling van de verschillende bouwmaterialen. Verder onderzoek wees ook uit dat niet alleen het materiaal aan het oppervlak, maar ook de achterliggende materialen een invloed hebben.

➤ Tijd

De vorming van schimmels gebeurt in verschillende fasen. Voor het ontstaan van een schimmel moet een bepaalde temperatuur en/of relatieve vochtigheid voor een bepaalde tijdsduur aangehouden worden. De materialen in een constructie zijn onderhevig aan fluctuerende temperaturen en relatieve vochtigheden en de tijd waaraan ze een bepaalde minimale of optimale grens overschrijden is dus van belang.

Op basis van deze criteria, die soms worden aangevuld door pH waarde, zuurstof hoeveelheid, oppervlakte ruwheid en biotische³ invloeden, werden verschillende modellen ontwikkeld die de kans op schimmelvorming trachten te voorspellen.

A. Model of Time of Wetness (TOW)

De TOW is bepaald door Adan [1] en geeft het aantal uur dat de relatieve vochtigheid een kritische waarde overschrijdt gedurende één dag. Op deze manier kunnen de resultaten uit stationaire proeven gebruikt worden om groeikansen in een fluctuerende omgeving te voorspellen. Hierbij hield hij rekening met de verschillende groeifasen van schimmels.

B. ASHRAE

De Amerikaanse norm Ashrae 160-P [4] geeft maximale tijdsduren als eis waaraan een materiaal mag voldoen om ontwikkeling van schimmels te voorkomen.

³ Invloeden door organismen van een andere populatie

- Dertig daagse gemiddelde relatieve vochtigheid aan de oppervlakte < 80% bij een temperatuurbereik van 5°C-40°C
- 7 daagse gemiddelde relatieve vochtigheid aan de oppervlakte < 98% bij een temperatuurbereik van 5°C-40°C
- 24 uren gemiddelde relatieve vochtigheid aan de oppervlakte < 100% bij een temperatuurbereik van 5°C-40°C

C. Temperatuurfactor

Daarnaast kijken we ook naar de temperatuurfactor $f_{0,2}$, die geeft een inschatting van de kans op schimmelgroei op het binnen oppervlak ten gevolge van het koudebrugeffect en wordt berekend volgens:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Met:

θ_{si} (°C): temperatuur van op het binnenoppervlak.

De waarde moet groter zijn dan 0,69. Op die manier wordt vochtproductie door condensatie vermeden rondom de mogelijke koudebruggen. Dit geldt enkel voor ruimtes waar geen hoge vochtproductie verwacht wordt, zoals een keuken of een badkamer. Men gaat dus uit van ruimtes met gestandaardiseerde klimaatcondities, daaronder verstaat men een temperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid van 50%. Daarnaast dient men er ook rekening mee te houden dat condensatie geen vereiste is voor het voorkomen van schimmelgroei. [35]

D. Model van Viitanen, Rischkoff en Hukka (VTT model)

Dit model, de Mould Index (MI) genoemd door Viitanen, is gebaseerd op laboratorium testen op stalen van vurenhout en grenenhout en verdeelt schimmelgroei in 7 klassen. Dit model wordt ook het VTT model genoemd, naar het Technical Research Center (VTT) in Finland. De schimmelindex kan berekend worden volgens een formule die afhankelijk is van o.a. de relatieve vochtigheid, de temperatuur en de tijd die nodig is om een hogere index te bekomen. Een nadeel van dit model is dat het minder goed werkt in een fluctuerend klimaat, vooral doordat het geen rekening kan houden met periodes van uitdrogen.

Index	Groeisnelheid	Beschrijving
0	Geen groei	Sporen niet geactiveerd
1	Kleine hoeveelheid schimmel op oppervlak (microscopisch)	Initiële groeifase
2	<10 % bedekking van oppervlak met schimmel	
3	10•30 % bedekking van oppervlak met schimmel (visueel)	Nieuwe sporen geproduceerd
4	30•70 % bedekking van oppervlak met schimmel	Gematigde groei
5	> 70 % bedekking van oppervlak met schimmel	Veel groei
6	Hevige en dichte begroeiing.	Bedekking rond 100% a

Tabel 7: Mould index klassen volgens VTT model [43]

De mould index kan als volgt berekend worden:

$$dM/dt = k_1 \cdot k_2 / (7 \times t_{M=1})$$

met:

k_1 , een factor die de groeisnelheid bepaalt onder gunstige groeicondities.

$k_1 = 1$, als $M < 1$

$= 2 / ((t_{M=3} / t_{M=1}) - 1)$, als $M > 1$

$t_{M=1}$, tijd die nodig is om $M=1$ te bereiken

$$t_{M=1} = \exp(-0,68 \times \ln(\theta) - 13,9 \times \ln(RV) + 0,14 \times W - 0,33 \times SQ + 66,02)$$

$t_{M=3}$, de tijd die nodig is om $M=3$ te bereiken

$$t_{M=3} = \exp(-0,74 \times \ln(\theta) - 12,72 \times \ln(RV) + 0,06 \times W + 61,50)$$

k_2 , een factor die de groeisnelheid tempert, bij het benaderen van de maximale mould index

$$k_2 = \max[1 - \exp(2,3 \times (M - M_{\max})), 0]$$

$$M_{\max} = \max(1 + 7 \cdot (RV_{\text{krit}} - RV) / (RV_{\text{krit}} - 100) - 2 \cdot ((RV_{\text{krit}} - RV) / (RV_{\text{krit}} - 100))^2; 0)$$

Daarnaast worden de ongunstige omstandigheden ($RV < RV_{\min}$) in rekening gebracht:

$$dM/dt = -0,00133, \text{ als } t - t_1 \leq 6h$$

$$0, \text{ als } 6h < t - t_1 \leq 24h$$

$$-0,000667, \text{ als } t - t_1 > 24h$$

In een ge-update versie van dit model werd het uitgebreid voor andere bouwmaterialen. Zo werd de mould index classificatie aangevuld. Uit een reeks van labo-onderzoeken werd op een aantal materialen uitgevoerd. Omdat niet op alle materialen zo'n onderzoek kon uitgevoerd worden, werd een systeem met sensitiviteitsklassen opgesteld waarbij de resultaten voor een bepaald materiaal representatief waren voor de andere materialen in dezelfde klasse [43].

Gevoeligheidsklasse	Materialen in experiment	Materiaal groepen
Erg gevoelig (vs)	Dennen spinthout	Onbehandeld hout, veel voedingsstoffen bevattend voor biologische groei.
Gevoelig (s)	Verlijmde houten platen, PUR met Geschaafd hout, papier-gecoate papieren oppervlak, sparrenhout	producten, houten panelen.
Semi bestendig (mr)	Beton, cellenbeton, glaswol, polyester, wol	Cement of kunststof gebaseerde materialen, minerale vezels
Bestendig(r)	PUR met glanzend oppervlak	Glas en metaal producten, producten met een efficiënte oppervlaktebehandeling.

Tabel 8: Schimmelgevoeligheidsklassen. [43]

De formule voor $M_{\max}$ wordt hier ook in kleine mate aangepast:

$$M_{\max} = A + B \times (RV_{\text{crit}} - RV) / (RV_{\text{krit}} - 100) - C \cdot ((RV_{\text{krit}} - RV) / (RV_{\text{krit}} - 100))^2$$

De waarden voor k_1 , k_2 , A, B, C en $RV_{\min}$ voor de verschillende klassen kunnen in onderstaande tabel gevonden worden.

Gevoeligheidsklasse	k_1	k_1	Mmax (influence on k_2)			$RV_{\min}$
	(if $M < 1$)	(if $M \geq 1$)	A	B	C	%
Erg gevoelig (vs)	1	2	1	7	2	80
Gevoelig (s)	0.578	0.386	0.3	6	1	80
Semi bestendig (mr)	0.072	0.097	0	5	1.5	85
Bestendig (r)	0.033	0.014	0	3	1	85

Tabel 9: Parameters k_1 , k_2 , $M_{\max}$ (A, B en C) en $RV_{\min}$ voor de verschillende sensitivity classes. [43]

E. Isopleten model

In het Isopleten model stelt Sedlbauer dat gedurende een voldoende tijd moet voldaan zijn aan een voldoende hoge relatieve vochtigheid, temperatuur en voedingsbodem. Dit model laat toe een vergelijking te maken tussen de hygrothermische condities en de groeicondities van ontkieming en mycelium-groei. Om schimmelgroei op verschillende substraten te kunnen voorspellen werden nieuwe types isopleten ontwikkeld. Hiervoor werden verschillende categorieën gedefinieerd, die een uitspraak doen over de geschiktheid voor schimmelgroei:

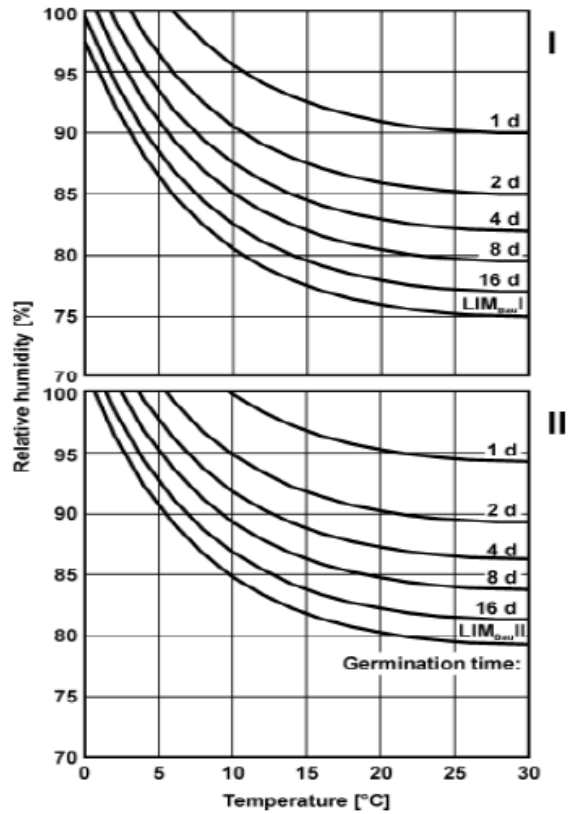
- Categorie 0: optimaal medium.
- Categorie I: biologisch recycleerbare bouwmaterialen, vb. papier, materialen gemaakt uit biologisch afbreekbare grondstoffen en materiaal voor permanente elastische verbindingen.
- Categorie II: materialen met een poreuze structuur, zoals minerale bouwmaterialen, bepaalde houtsoorten en isolatiematerialen.
- Categorie III: materialen die noch degradeerbaar zijn noch voedingsstoffen bevatten, deze categorie materialen wordt dus niet verder beschouwd.

Daarnaast werden ook een aantal categorieën opgemaakt die een uitspraak doen over het gezondheidsrisico voor de gebruikers van de gebouwen.

- Klasse A: De schimmel of zijn metabolische producten zijn hoogst pathogeen: Zij mogen niet voorkomen in gebruikte woningen.
- Klasse B: De schimmel is pathogeen wanneer deze over een langere periode wordt blootgesteld en kan allergische reacties uitlokken.
- Klasse C: De schimmel is niet gevaarlijk voor de gezondheid, maar kan wel economische schade aan de constructie aanrichten.

Elk model wordt begrensd door de onderste isopleet, hieronder is geen schimmelactiviteit meer. Deze wordt de “Lowest Isopleth for Mould” genoemd. Bij deze isopleten wordt gekeken naar temperaturen met een bereik tussen 0 en 30°C, omdat deze het interessantst zijn vanuit bouw fysisch oogpunt.

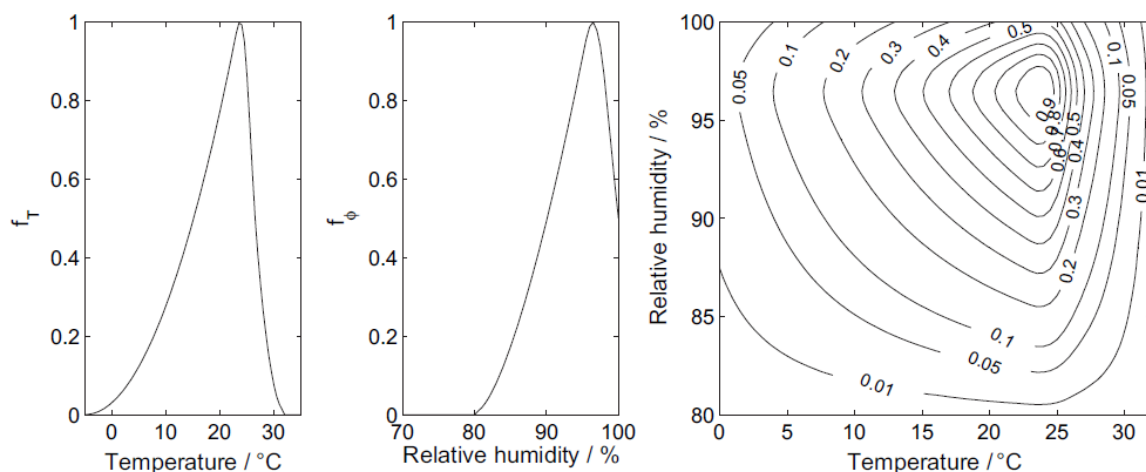
Spore germination



Figuur 40: Isopleten met “Lowest Isopleth for Mould”. [35]

Zo wordt ook gekeken naar de kans op algengroei op het buitenoppervlak bij panelen met een pleisterafwerking. Om dit te onderzoeken wordt gebruikt gemaakt van de methode beschreven door S. Johansson et al. Deze baseert zich op groeidata van de meest voorkomende schimmelsoort op pleisterafwerkingen: *Cladosporium*. Hieruit worden twee functies verkregen f_ϕ en f_T . deze geven de invloed van de relatieve vochtigheid en de temperatuur op de schimmelgroei. Met deze functies wordt een index berekend die de kans op schimmelgroei weergeeft.

$$I = \int_{\tau=t_0}^{t_1} f_T(\tau) f_\phi(\tau) d\tau$$



Figuur 41: S. Johansson et al: De gegevens die gebruikt werden om de isopleten te berekenen. Het effect van de temperatuur en de relatieve vochtigheid op de groeisnelheid zijn opgesplitst in twee verschillende functies. [27]

3.3.4. HOUTROT

Sommige bouwmaterialen, zoals hout en sommige thermische isolatiematerialen, kunnen een bepaald vochtgehalte opnemen zonder optredende schadefenomenen. De kans op houtrot wordt getoetst door het bepalen van de optimale vochtgehaltes.

Volgens Viitanen mag het vochtgehalte bij 5°C maximum 720h/jaar boven de 20% zijn, anders zal er schimmelgroei optreden. Daarnaast mag het vochtgehalte bij 10°C maximaal 168h/jaar de waarde van 25% overschrijden om houtrot te voorkomen. [44]

Buxbaum en Sedlbauer geven als criteria voor houtrot een vochtgehalte boven 20 massaprocent en een temperatuursbereik tussen +3°C en +40°C met een optimum afhankelijk van de schimmelsoort tussen +18°C en +20°C. Daarnaast wordt vermeld dat als kritische limiet een temperatuur van meer dan +5°C moet beschouwd worden in gebouwen. [35]

De DIN 68 800-2 standaard eist dat voor dragende elementen aan maximaal gedurende zes maanden een vochtgehalte van 20% bereiken. Voor niet dragende structuren is dit enkel een aanbeveling. Dit omdat volgens deze norm de biologische groei in hout niet plaatsvindt bij een lager vochtgehalte. [13]

3.3.5. INWENDIGE CONDENSATIE

In de norm EN ISO 13788 wordt een vereenvoudigde berekeningsmethode opgenomen om de jaarlijkse vochtbalans van een bouwconstructie te bepalen. Enkele factoren, zoals het initieel vochtgehalte van een materiaal en het luchttransport doorheen de constructie, worden hier echter niet mee opgenomen. Voor elke maand wordt aan de hand van gemiddelde klimaatomstandigheden nagegaan of er condensatie of verdamping optreedt. In de vochtbalans mag de geaccumuleerde hoeveelheid condensaat de mogelijke verdamping gedurende het jaar niet overstijgen [11].

3.3.6. ONDERZOEKSMETHODIEK

Om het hygrotermisch gedrag in de verschillende opbouwen van de systemen te simuleren wordt gebruik gemaakt van het numerieke softwarepakket WUFI. Deze laat toe rekening te houden met initiële vochtgehaltes, regenbelasting en andere extra vochtbronnen. Zo zullen de verschillende problematieken bekeken worden die zich kunnen voordoen in de verschillende systemen.

In de WUFI-simulaties wordt iedere materiaal laag voorzien van minstens 1 meetpunt in het midden van de laag. Daarnaast wordt ook op het binnen-en buitenscheidingsoppervlak een meetpunt geplaatst. De output van de simulaties geeft voor elk uur de relatieve vochtigheid, de temperatuur en het vochtgehalte weer van het desbetreffende meetpunt. Deze worden met behulp van Excel geanalyseerd om de kans op houtrot, inwendige condensatie en algengroei in kaart te brengen. Met de isopleet-grafieken voor de kalkpleister kan nagegaan worden of er risico op schimmelgroei is op het binnen oppervlak.

3.3.7. AANNAMES BIJ DE SIMULATIES

Voor iedere simulatie het volgende aangenomen tenzij anders wordt vermeld:

- 1) De warmte-overgangscoefficienten voor de buiten- en binnenomgeving worden door WUFI berekend ($\alpha_e = 17 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$) rekening houdend met de wind.
- 2) short-wave radiation afhankelijk van gebruikte gevelafwerking.
- 3) Koeling door lange golfstralingsemissie wordt in rekening gebracht.
- 4) sd-waarde voor het buiten- en binnenoppervlak: geen coating.
- 5) Het initiële bouwvocht volgens de norm ASHRAE voor alle materialen (bij renovatietoepassingen) buiten beton bepaald bij EMC80⁴ en voor beton bij EMC90.
- 6) Simulaties worden uitgevoerd met het buitenklimaat van Brussel.
- 7) Simulaties worden uitgevoerd met het binnenklimaat vochtigheidsklasse 3 volgens EN13788.
- 8) de simulaties starten op 1 oktober 2014
- 9) De simulaties worden eendimensionaal uitgevoerd en behandelen dus enkel de opbouw van de panelen. De bevestigingselementen worden niet in rekening gebracht.

De meeste materialen werden voor de simulatie uit de databank van WUFI gehaald. Sommige materialen waren echter niet in de databank terug te vinden of bleken uit de literatuurstudie niet optimaal te zijn. Enkele niet teruggevonden materialen werden ingegeven op basis van een gelijkaardig materiaal, aangevuld door de gegevens die teruggevonden werden in productfiches.

1. Bepleistering:

Voor de systemen die afgewerkt zijn met een bepleistering en er geen verdere details aanwezig zijn, wordt de simulatie uitgevoerd met een kunsthars gebonden bepleistering. Deze bepleistering wordt in de praktijk het meeste toegepast en wordt ingevoerd zoals beschreven in de thesis van P. Bonte. Een StoDecosil kunstharspleister uit de materialenbibliotheek van WUFI werd gebruikt als beginpunt. De materiaaleigenschappen van de kunsthars gebonden pleisters die wel in het ATG document staan, vervangen de oude materiaaldata van de StoDecosil kunstharspleister. De schijnbare volumemassa, het diffusieweerstandsgetal en de capillaire waterabsorptiecoëfficiënt worden aangepast.

⁴ Vochtgehalte van een materiaal uitgedrukt als de verhouding tussen het gewicht van het water en de oven-droge gewicht, wanneer het materiaal in equilibrium is bij een RV van 80% en bij 20°C.

	StoDecosil	StoDecosil (aangepast)
Dichtheid (kg/m ³)	1640	1600
Diffusieweerstandsgetal μ	50	88,889
Waterabsorptiecoëfficiënt (kg/m ² .s-0.5)	0,016	0,000333

Tabel 10: Inputgegevens voor de simulatie van StoDecosil in WUFI.

2. VIP:

Voor de systemen met VIP panelen werd het ingeven van de materiaaleigenschappen gebaseerd op de paper van P. Johanssen en de thesis van P. Bonte. De dichtheid, de porositeit, de gemiddelde soortelijke warmte en het diffusieweerstandsgetal van het kernmateriaal worden overgenomen uit de eerstgenoemde paper. De waterabsorptiecurve wordt a.d.h.v. van de ingegeven free water saturation en het referentie vochtgehalte door WUFI gegenereerd.

De folie wordt als één materiaal gesimuleerd met een laagdikte van 1mm. De dichtheid, de porositeit, de gemiddelde soortelijke warmte en de warmtegeleidingscoëfficiënt van de folie worden opnieuw overgenomen uit de paper van P. Johansson. Het diffusieweerstandsgetal volgt uit de thesis van P. Bonte.

	Kernmateriaal	Folie
Dichtheid (kg/m ³)	200	189
Porositeit (m ³ /m ³)	0,9	0
Warmtecapaciteit (J/(kg.K))	850	134
Thermische geleidbaarheid (W/(m.K))	0,005	0,02
Diffusieweerstandsgetal μ	1,3	1000000

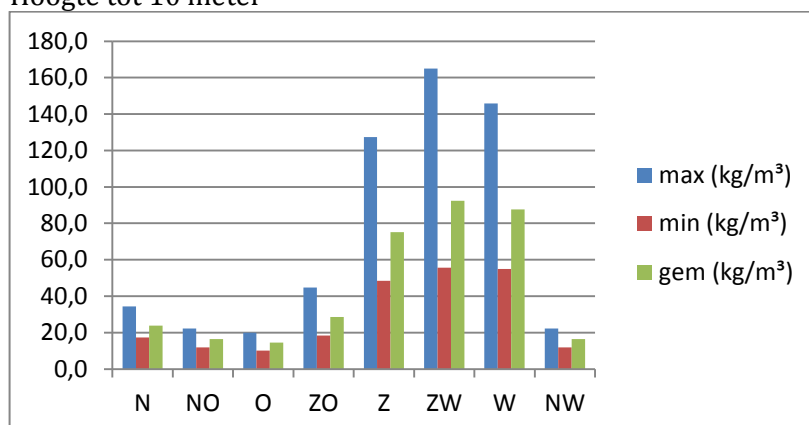
Tabel 11: Inputgegevens voor de simulatie van een VIP in WUFI. [10]

3. Draagmuur

Voor de simulaties van de draagmuur werd enerzijds een standaard metselwerk en anderzijds een standaard beton uit de materialenbibliotheek gekozen. Gezien het hier over systemen voor renovatietoepassingen gaat, moet het initieel vochtgehalte aangepast worden. De draagmuur is namelijk al enige tijd onderhevig geweest aan de buitenomgeving. Om het in te geven initieel vochtgehalte te bekomen, werd een voorgaande simulatie gedaan van enerzijds een massieve metselwerk of betonnen draagmuur en anderzijds een spouwmuur. Voor elk van de voorgenoemde opbouwen wordt een simulatie over een periode van 15 jaar uitgevoerd. De bekomen vochtgehaltes zijn een gemiddelde waarde over de wand.

a. Massief metselwerk

i. Hoogte tot 10 meter

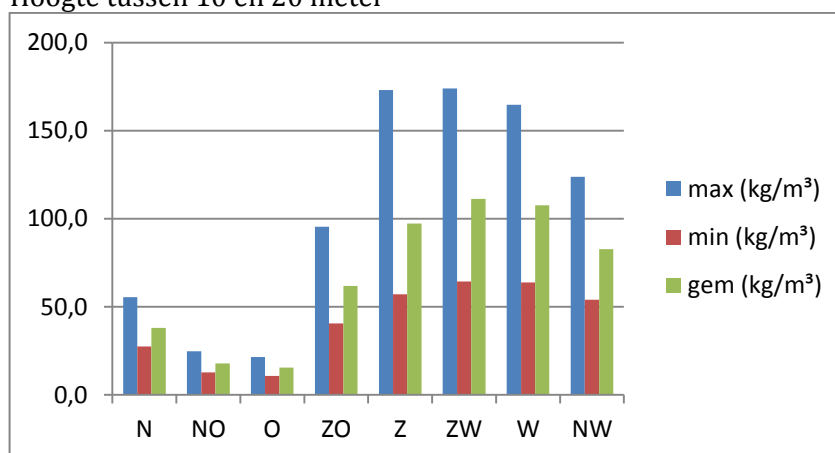


Figuur 42: Vochtgehaltes in metselwerk na simulatie van 15 jaar

	N	NO	O	ZO	Z	ZW	W	NW
max (kg/m ³)	34,3	22,3	20,0	44,8	127,5	165,0	145,8	22,3
min (kg/m ³)	17,3	11,8	10,2	18,5	48,4	55,7	55,0	11,8
gem (kg/m ³)	23,8	16,5	14,6	28,6	75,1	92,4	87,6	16,5

Tabel 12: Vochtgehaltes in metselwerk na simulatie van 15 jaar

ii. Hoogte tussen 10 en 20 meter



Grafiek 43: Vochtgehaltes in metselwerk na simulatie van 15 jaar

	N	NO	O	ZO	Z	ZW	W	NW
max (kg/m ³)	55,4	24,8	21,5	95,4	173,0	173,9	164,6	123,8
min (kg/m ³)	27,5	12,8	10,7	40,6	57,2	64,4	63,8	54,0
gem (kg/m ³)	37,9	17,8	15,5	61,9	97,2	111,3	107,6	82,7

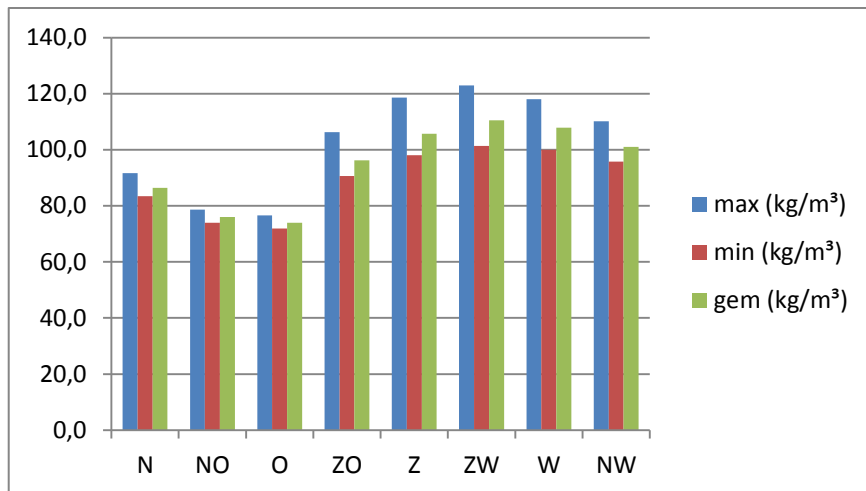
Tabel 13: Vochtgehaltes in metselwerk na simulatie van 20 jaar

Uit de simulaties blijkt dat een maximaal vochtgehalte bekomen wordt bij een zuidwestelijke oriëntatie. Dit is te verklaren door het feit dat dit de meest voorkomende windrichting is in België en dat het oppervlak van deze gevel het meeste regen zal opvangen. We zien ook dat de hoger gelegen gevels een hoger vochtgehalte bekomen. Om de meest kritieke resultaten te bekomen wordt bij de

verdere simulaties met massieve metselwerk muur enerzijds gewerkt met een zuidwestelijke oriëntatie en een vochtgehalte van $173,9 \text{ kg/m}^3$. Anderzijds werd ook gekeken naar een noordelijke oriëntatie, omdat de droging aan het oppervlak hier het laagst is en dus ook kritieke resultaten kan opleveren. Hier wordt verder gerekend met een vochtgehalte van $55,4 \text{ kg/m}^3$.

b. Betonnen draagmuur

i. Hoogte tot 10 meter

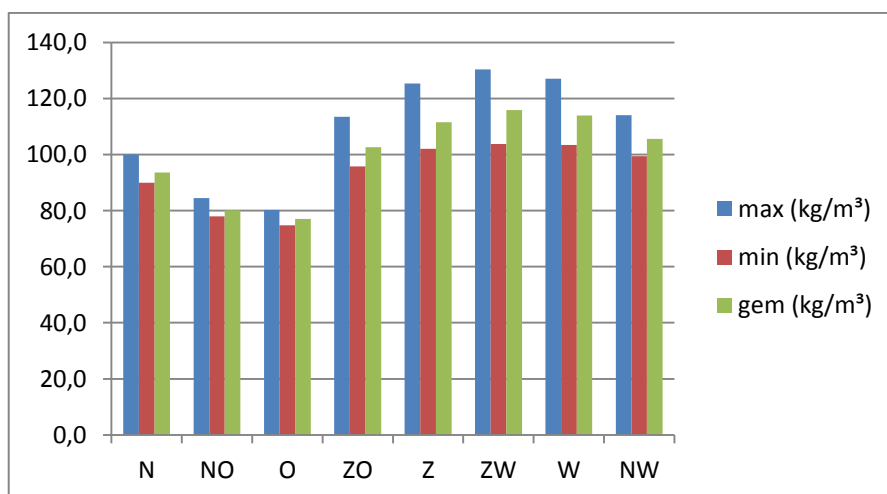


Grafiek 44: Vochtgehalten in betonnen draagmuur na simulatie van 15 jaar

	N	NO	O	ZO	Z	ZW	W	NW
max (kg/m³)	91,6	78,6	76,6	106,2	118,6	122,9	118,0	110,2
min (kg/m³)	83,4	74,0	71,9	90,6	98,1	101,4	100,0	95,8
gem (kg/m³)	86,4	76,0	74,0	96,3	105,7	110,5	107,8	101,1

Tabel 14: Vochtgehalten in betonnen draagmuur na simulatie van 15 jaar

ii. Hoogte tussen 10 en 20 meter



Grafiek 45: Vochtgehalten in betonnen draagmuur na simulatie van 15 jaar

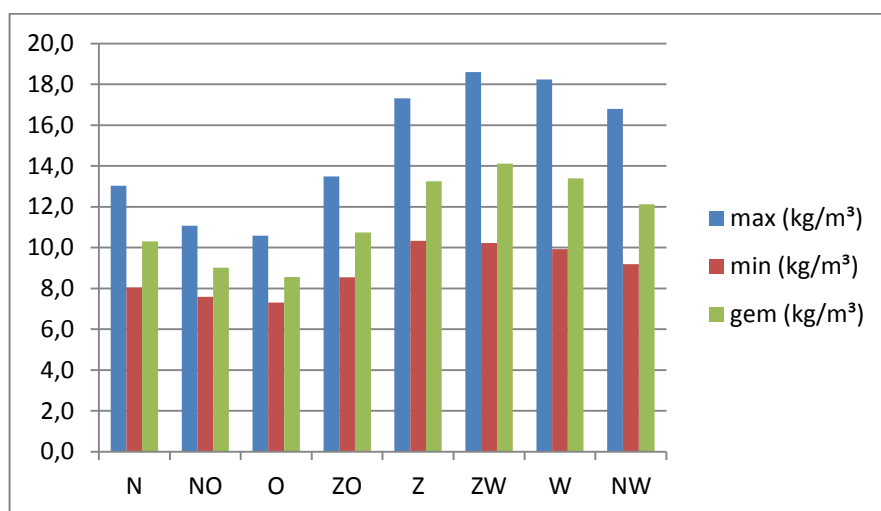
	N	NO	O	ZO	Z	ZW	W	NW
max (kg/m ³)	100,0	84,4	80,3	113,4	125,3	130,4	127,1	114,0
min (kg/m ³)	90,0	78,0	74,8	95,8	102,0	103,8	103,4	99,5
gem (kg/m ³)	93,6	80,2	77,0	102,6	111,5	115,9	114,0	105,5

Tabel 15: Vochtgehalten in betonnen draagmuur na simulatie van 20 jaar

Uit de resultaten blijkt dat hier een veel kleiner verschil is in vochtgehalte ten opzichte van de resultaten bij de massieve metselwerk muur. Dezelfde conclusies kunnen wel gemaakt worden, maar doordat het initieel vochtgehalte op de noord oriëntatie kan deze in combinatie met een kleinere droging aan het oppervlak, grotere gevolgen hebben. Om de meest kritieke resultaten te bekomen, wordt bij de verdere simulaties met een betonnen draagmuur enerzijds gewerkt met een zuidwestelijke oriëntatie en een vochtgehalte van 130,4 kg/m³. Bij een noordelijke oriëntatie wordt verder gerekend met een vochtgehalte van 100 kg/m³.

c. Spouwmuur

i. Hoogte tot 10 meter



Grafiek 46: Vochtgehalten in metselwerk na simulatie van 15 jaar

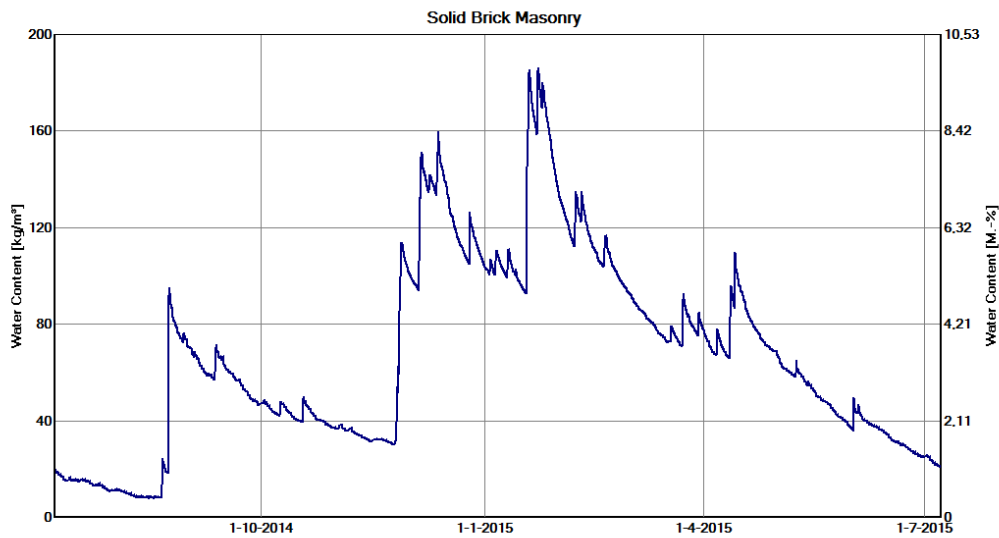
	N	NO	O	ZO	Z	ZW	W	NW
max (kg/m ³)	13,0	11,1	10,6	13,5	17,3	18,6	18,2	16,8
min (kg/m ³)	8,0	7,6	7,3	8,5	10,3	10,2	9,9	9,2
gem (kg/m ³)	10,3	9,0	8,6	10,7	13,3	14,1	13,4	12,1

Tabel 16: Vochtgehalten in metselwerk na simulatie van 15 jaar

We zien dat de bekomen vochtgehalten zeer klein zijn en het dus weinig waarschijnlijk is dat dit grote gevolgen zal hebben op het vochtgedrag in de panelen.

Echter, vooraleer de panelen aan de muur bevestigd worden, wordt de spouwmuur weggehaald. Indien de panelen hier niet onmiddellijk na bevestigd worden en er geen tijdelijk regenscherm geïnstalleerd wordt, zal de draagmuur terug blootgesteld worden aan de omgeving en kan het vochtgehalte dus hogere

waarden bekomen. De volgende grafiek toont een simulatie over een periode van één jaar waarin de draagmuur bij een initieel maximum vochtgehalte ($18,6 \text{ kg/m}^3$) en een zuidwestelijke oriëntatie blootgesteld wordt aan de omgeving.



Figuur 47: Verloop van het vochtgehalte in de draagmuur bij blootstelling aan omgeving gedurende een jaar.

We vinden dat het vochtgehalte in de muur gedurende deze periode kan oplopen tot $186,3 \text{ kg/m}^3$.

3.3.8. RESULTATEN

1. Kans op schimmelgroei op het binnen oppervlak

Aan de hand van de isopleet die WUFI genereert voor de kans op schimmelgroei op het binnen oppervlak, wordt nagegaan hoeveel uur de resultaten zich boven de limietgrens bevinden. Zo kan vergeleken worden welke opbouw meer kans heeft op dergelijke schadegevallen.

	Metselwerk			
	ZW 174	N 55,4	ZW 130,4	N 100
PVC RAIL	285	0	0	0
PAROC INNOVA	218	0	0	0
METAALPROFIEL	178	0	0	0
ROOSEDAAL	170	0	0	0
SIP	168	0	0	0
PASSIVHAUSSTANDARD	168	0	0	0
ALU RAIL	91	0	0	0
GEDT	59	0	0	0

Tabel 17: Aantal uur waarbij volgens de in WUFI gegenereerde isopleet schimmelvorming kan optreden op het binnen oppervlak voor verschillende oriëntaties en draagmuur.

De resultaten tonen dat er enkel gedurende de eerste weken kans is op schimmelvorming, in deze korte periode is het echter weinig waarschijnlijk dat er ook effectief schimmelgroei zal optreden. Dit fenomeen is te wijten aan het uitdrogen van de draagmuur die een hoog initieel vochtgehalte heeft. Dit is ook af te lezen uit de resultaten voor de noordelijke oriëntatie bij een metselwerkmuur. Daar wordt de simulatie gestart met een laag initieel vochtgehalte en is er bijgevolg geen periode waarin de resultaten zich boven de grenswaarden bevinden.

Voor elk van de voorgaande cases wordt ook nagegaan welk initieel vochtgehalte een grenswaarde vormt waaronder volgens de berekening op geen enkel moment de limietgrens van de isopleet zal overschreden worden.

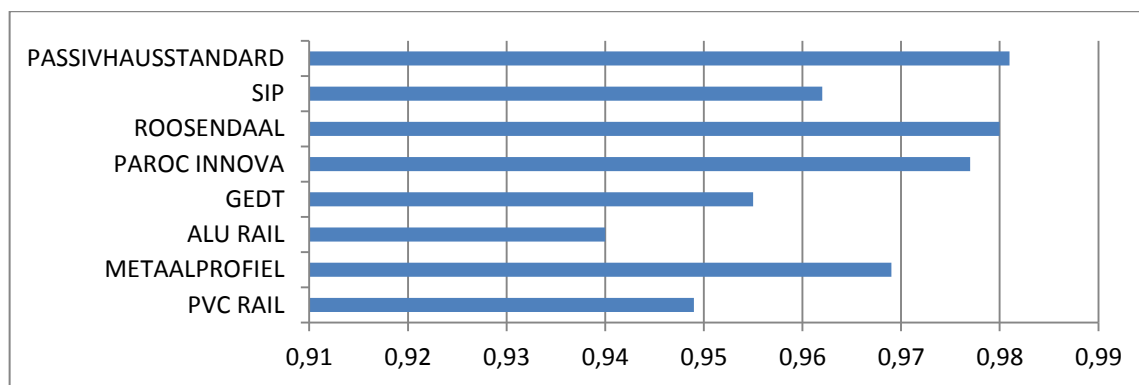
	Metselwerk			
	ZW	N	ZW	N
ALU RAIL	155,3	155,3	149	149
GEDT	154,2	154,3	149,1	149,1
PAROC INNOVA	134,9	134,9	144,5	144,5
METAALPROFIEL	134,5	134,5	144,5	144,5
PASSIVHAUSSTANDARD	133	133	144,2	144,2
SIP	132,8	132,8	144,1	144,1
ROOSEDAAL	132,7	132,7	144,2	144,2
PVC RAIL	129,3	129,3	143,1	143,1

Tabel 18: Initieel vochtgehalte van de draagmuur waarbij waaronder bij volgens de in WUFI gegenereerde isopleet geen schimmelvorming kan optreden op het binnen oppervlak.

Uit de resultaten zien we dat deze grenswaarden bij de renovatie met een betonnen draagmuur hoger liggen dan bij het metselwerk. Dit is te verklaren doordat het metselwerk het vocht met een groter debiet zal afgeven dan dat het beton dit zal doen.

Verder zien we ook dat resultaten rond dezelfde waarde liggen. Dit valt te verklaren doordat ook de u-waarde van de opbouw van dezelfde grote orde is en het binnenoppervlak eenzelfde temperatuur zal hebben. Deze is mede bepalend voor de relatieve vochtigheid aan het oppervlak en dus ook bepalend voor de kans op schimmelgroei. Dit wordt bevestigd door de afwijking die de resultaten bij het PVC-rail systeem vertonen. Deze heeft namelijk een beduidend hogere u-waarde dan de andere panelen. Het binnenoppervlak zal daardoor kouder zijn en daardoor zal het vochtgehalte lager moeten zijn.

Wanneer we ook de temperatuurfactor $f_{0,2}$ berekenen door gebruik te maken van de eerdere TRISCO simulaties zien we dat volgens de norm op geen van de binnen oppervlakken van de systemen schimmelgroei zou mogen optreden. Hier moet men echter bij opmerken dat deze simulaties enkel het systeem op zichzelf behandelen. De verschillende aansluitingen met ramen of andere gebouwelementen moeten apart nog nagezien worden.



Figuur 48: Temperatuurfactor $f_{0,2}$ berekend met behulp van TRISCO

2. Kans op algengroei op het buitenoppervlak

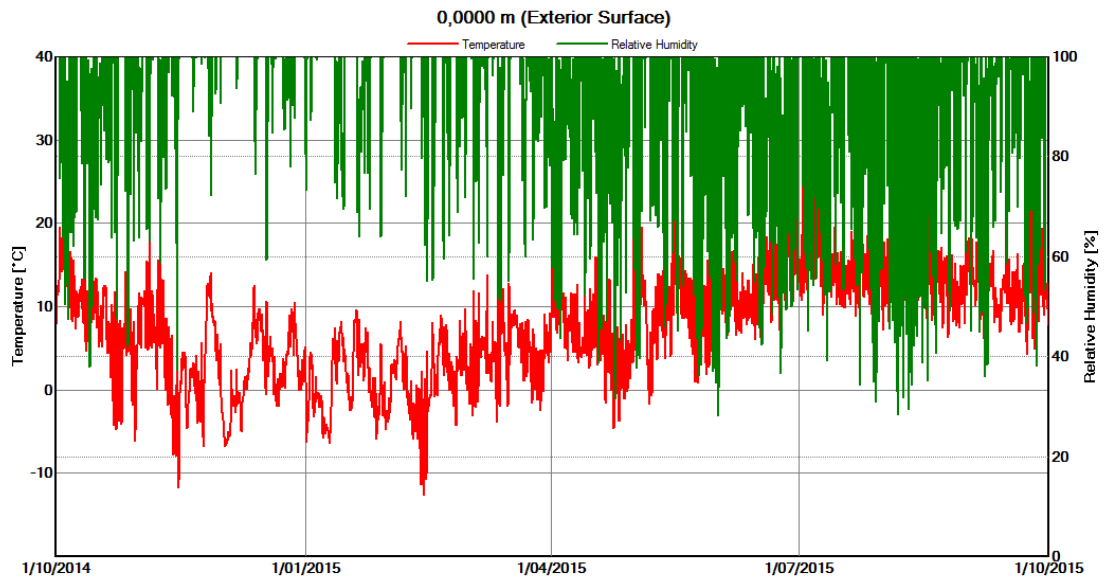
Aan de hand van de eerder besproken index die beschreven wordt in de paper van S. Johansson et al. wordt een vergelijking gemaakt tussen de kans op algengroei op de verschillende systemen. Uit de voorgaande berekeningen wordt de relatieve vochtigheid en temperatuur op het buitenoppervlak gehaald over de simulatie van 20 jaar om de index te berekenen. Gezien dit enkel van toepassing is op gevels met pleisterafwerkingen, worden enkele systemen uit de vergelijking gelaten.

	Metselwerk		Betonnen draagmuur	
	ZW	N	ZW	N
SIP	448,2176	450,7962	446,2946	448,8539
PVC RAIL	469,7817	426,2065	467,9698	423,5492
METAALPROFIEL	711,5525	708,4885	711,1009	708,5532
ALU RAIL	736,74	727,36	737,16	728,75
PAROC INNOVA	787,1642	787,4429	786,7066	786,8201

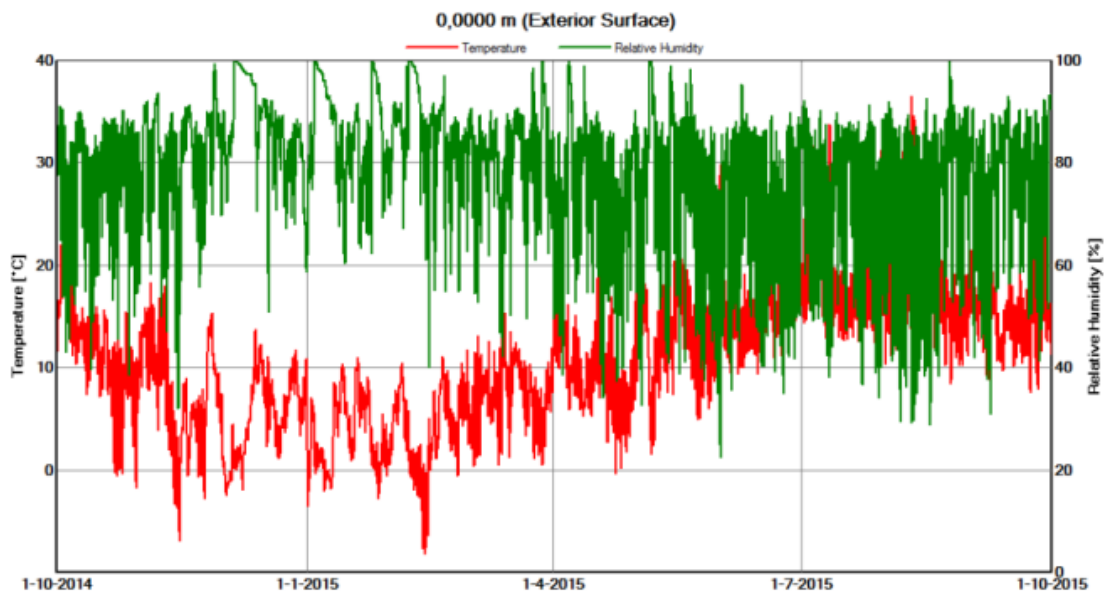
Tabel 19: Index die de kans op algengroei weergeeft op het buitenoppervlak gedurende het eerste jaar, gebaseerd op de paper van S. Johansson.

Het constructiemateriaal waaruit de draagmuur is opgebouwd heeft hier geen invloed. Ook het initieel vochtgehalte van deze draagmuur heeft geen invloed. Dit wordt bevestigd door te kijken naar de evolutie van de index over de 20 jaar die nauwelijks veranderd. We zien wel dat de oriëntatie van belang is. Bij een gelijke oriëntatie heeft de index namelijk eenzelfde waarde bij

eenzelfde opbouw, onafhankelijk van de materialisatie van de draagmuur. Net zoals bij de kans op schimmeligroei op het binnen oppervlak speelt ook de U-waarde van het paneel weer een rol. Bij een lagere U-waarde zal het buitenoppervlak namelijk kouder zijn en bijgevolg zal deze een hogere relatieve vochtigheid hebben. Dit verhoogt de kans op algengroei en resulteert dus in een hogere index. In de resultaten wordt dit weergegeven door de lagere index van het SIP systeem en het PVC-rail systeem die beide een hogere U-waarde hebben.



Figuur 49: Relatieve vochtigheid en temperatuur op het buitenoppervlak van het systeem met metaalprofielverbinding over een periode van 1 jaar.

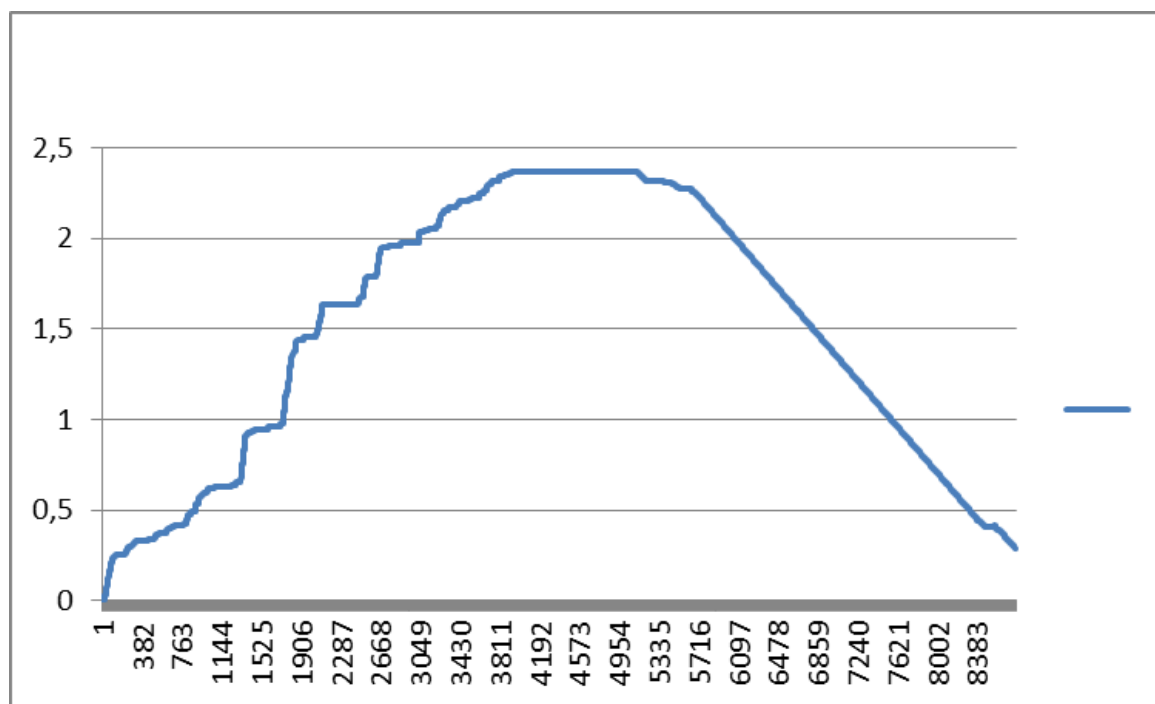


Figuur 50: Relatieve vochtigheid en temperatuur op het buitenoppervlak van het pvc-rail systeem over een periode van 1 jaar.

Voor de drie overige systemen wordt de kans op algengroei op het buitenoppervlak in kaart gebracht door middel van het VTT model. Hiervoor wordt eerst voor elk afwerkingsmateriaal

een sensitiviteitsklasse gekozen. Hieruit worden de benodigde constanten gehaald die gebruikt worden om aan de hand het relatieve vochtigheids- en temperatuurverloop de mould index in Excel te berekenen.

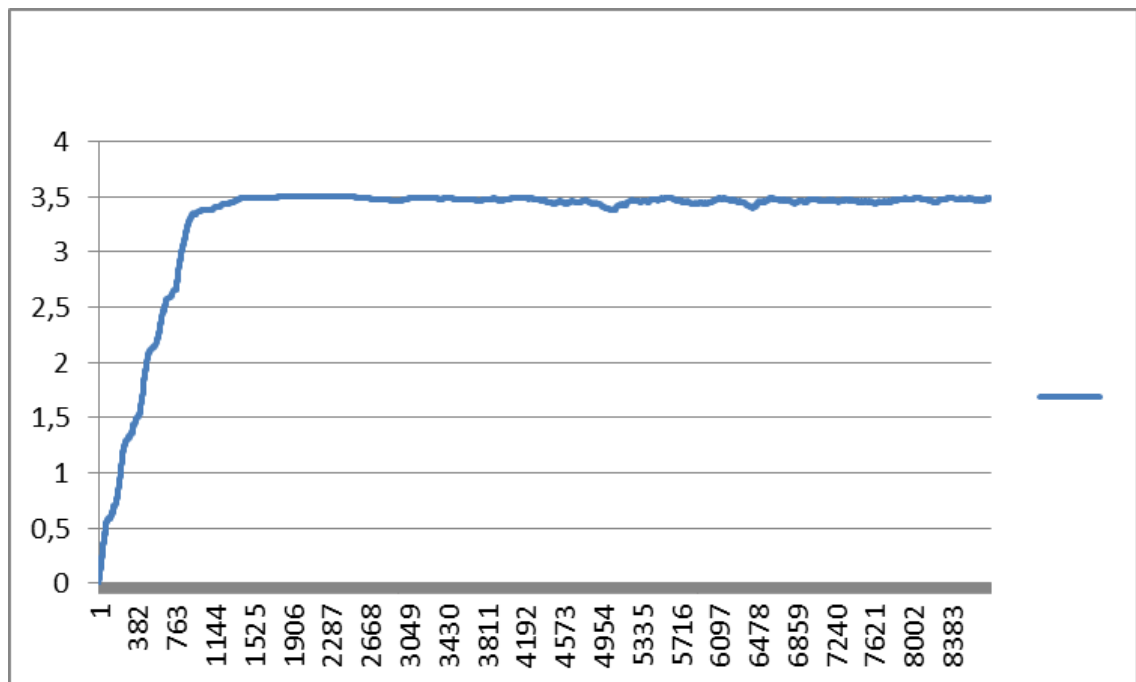
Bij het Passivhaussysteem werd bij de afwerking gebruik gemaakt van een OSB paneel. Houten panelen worden volgens het VTT model ingedeeld bij de klasse “Sensitive (s)”. Het verloop van de mould index wordt uitgezet over één jaar en is te zien in onderstaande grafiek. De hoogst behaalde mould index ligt onder de waarde van 2,5. Hierbij zal minder dan 10% van het oppervlak bezaaid zijn en niet voorbij de initiële groeifase gaan. Hier is de algengroei ook niet visueel zichtbaar. Deze waarde wordt volgens Rao et al. ook als aanvaardbaar beschouwd. Deze lage waarde is een resultaat van de thermoshield afwerking die op het paneel werd aangebracht. Op deze manier zal die minder vocht opnemen en dus ook sneller drogen. Zo is te zien dat er tijdens de winterperiode een hogere relatieve vochtigheid aan het buitenoppervlak gevonden wordt waardoor de mould index zal stijgen. Deze hoge relatieve vochtigheid zal tijdens de verdere maanden constant lager zijn en zo zal de mould index lineair dalen doordat dit ongunstige omstandigheden zijn voor de algengroei.



Figuur 51: mould index volgens het VTT model van het buitenoppervlak van het passivhaussysteem over de periode van één jaar.

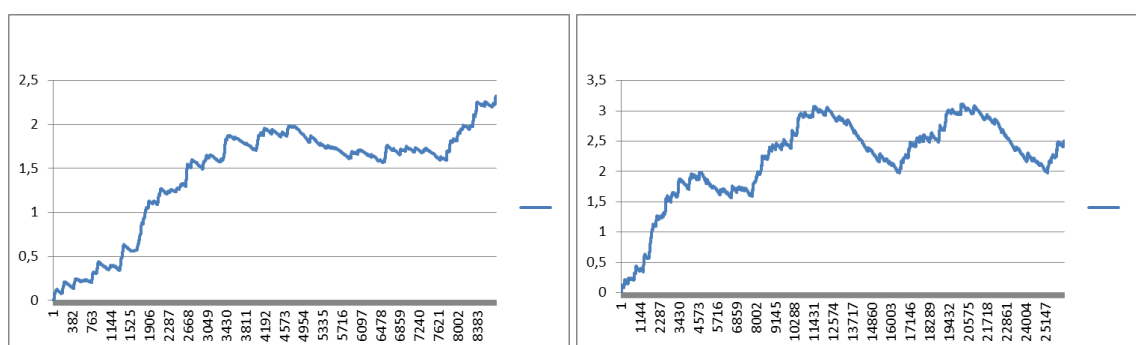
Bij het metaalprofielsysteem toonde de gevonden opbouw een afwerking met een fermacell HD board, deze is een cementvezelplaat en is bijgevolg volgens het VTT model “medium resistant (mr)”. Het uitzetten van de resulterende mould index waarden geeft onderstaande grafiek. Hier zien we dat de mould index onmiddellijk een sterkte stijging vertoont en daarna constant de maximale mould index voor dit materiaal aanhoudt. Hieruit kan besloten worden dat de optimale condities voor algengroei zal aangehouden worden gedurende het hele jaar. Hierbij zal tot 50 procent van het oppervlak op microscopisch vlak bezaaid zijn. Dit is natuurlijk nefast voor het materiaal en hieruit kunnen we dus besluiten dat deze afwerking niet zal werken. Om die reden is het nodig om nog een extra gipsafwerking toe te voegen aan deze opbouw, dit wordt

verder ook bevestigd wanneer de kans op houtrot in kaart gebracht wordt. Deze werd ook opgenomen de bovenstaande berekening van de index volgens S. Johansson.



Figuur 52: mould index volgens het VTT model van het buitenoppervlak van het metaal profiel systeem over de periode van één jaar.

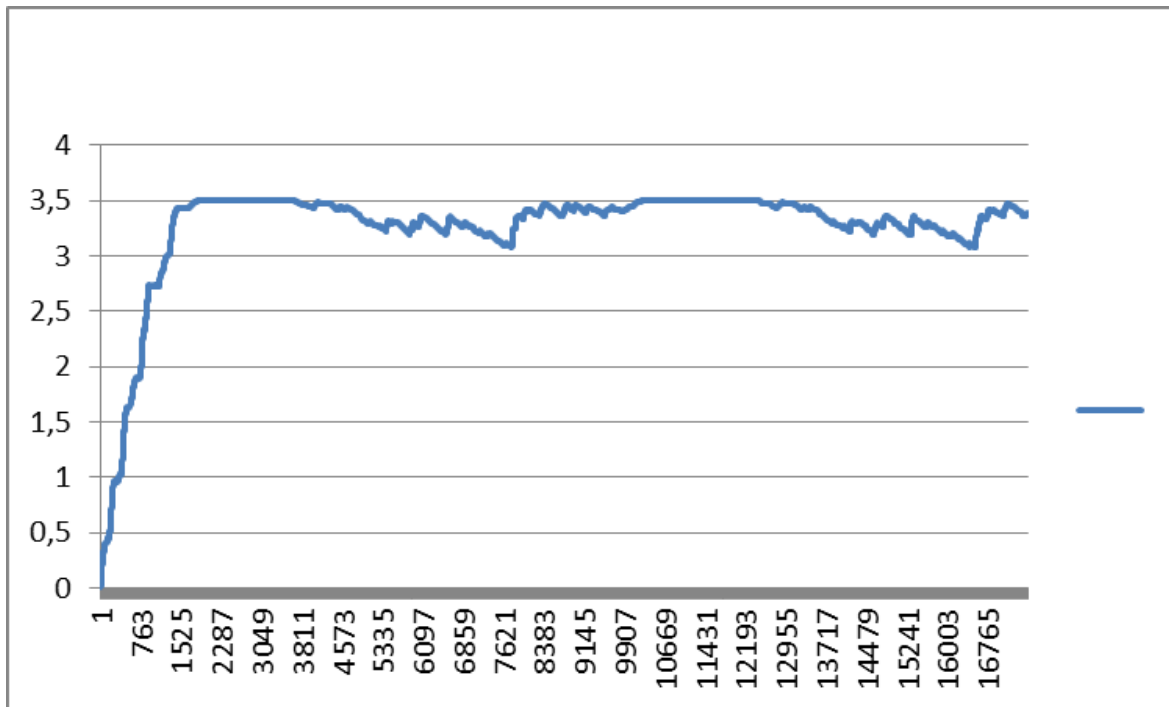
In het geval van het GEDT systeem werd voor het buitenoppervlak gebruik gemaakt van een composiet paneel en valt dus net als voorgaande afwerking onder de klasse “medium resistant (mr)”. Na het uitzetten van de resultaten over één jaar kan nog geen uitspraak gedaan worden, omdat deze het nog geen evenwicht vertonen. Vervolgens wordt gekeken naar de grafiek die uit de resultaten van drie jaar komt. Hier zien we dat de mould index nauwelijks groter zal zijn dan drie. Hier kunnen we dus stellen dat deze waarden aanvaardbaar zijn.



Figuur 53: mould index volgens het VTT model van het buitenoppervlak van het metaal profiel systeem over de periode van één en een periode van drie jaar.

In Roosendaal werd gebruik gemaakt van een gevelafwerking met leistenen. Ook deze worden in de klasse “medium resistant” ingedeeld. Net als bij het metaalprofielsysteem is er op het begin een grote stijging. De bekomen waarde zal in kleine mate terug dalen tijdens de drogere

periodes, maar zal boven de mould index van drie blijven. De algengroei zal dus constant visueel zichtbaar zijn.

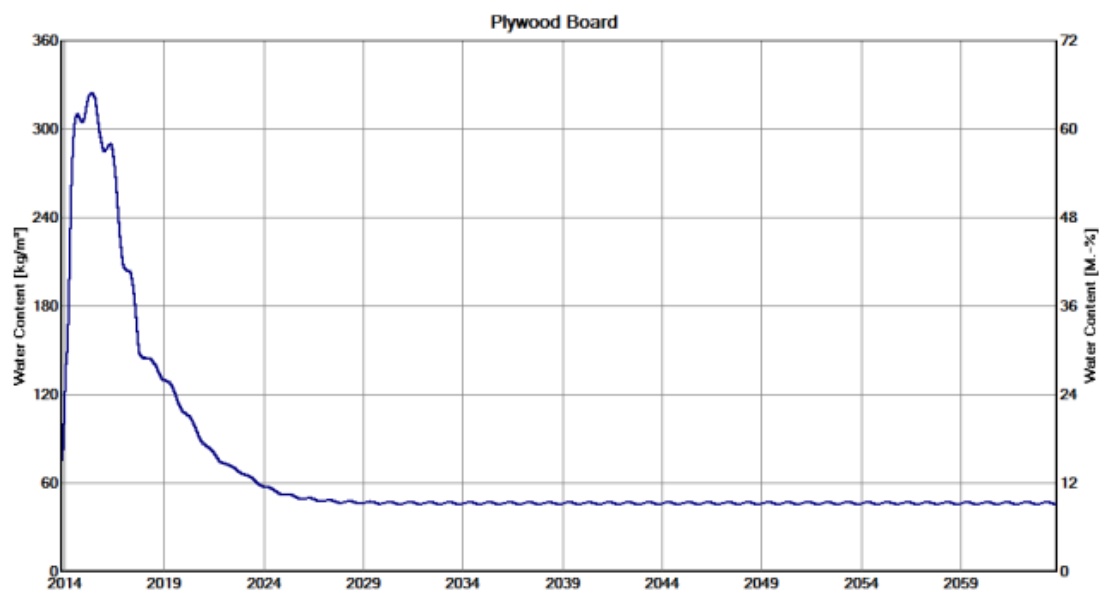
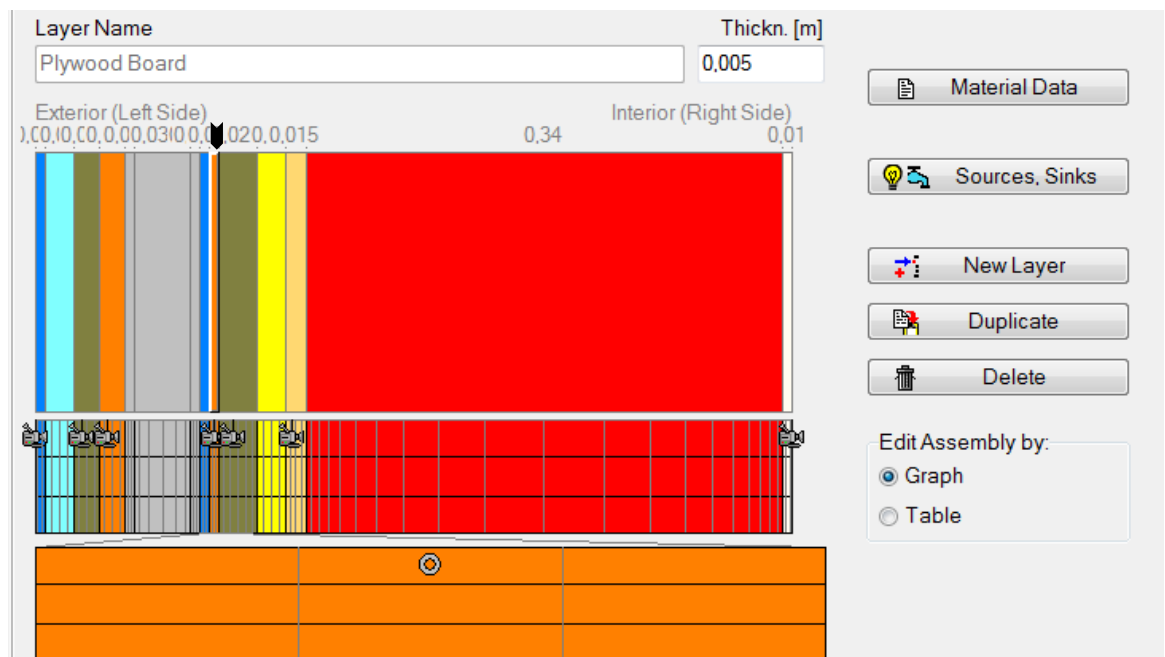


Figuur 54: mould index volgens het VTT model van het buitenoppervlak in Roosendaal over de periode van twee jaar.

Deze bekomen resultaten kunnen echter niet als absoluut beschouwd worden. Er moet nog veel onderzoek gedaan worden opdat deze modellen echt representatief kunnen zijn voor de eigenlijke algen of schimmeligroei. Veel parameters zoals het aantal aanwezige sporen op het oppervlak zijn namelijk omgevingsafhankelijk en worden niet in rekening gebracht. Ook zijn er slechts voor een beperkt aantal materialen groeidata bekend. Dit blijkt ook uit de gebruikte testen die slechts voor een bepaald aantal materialen geldig zijn en een vergelijking uitsluiten.

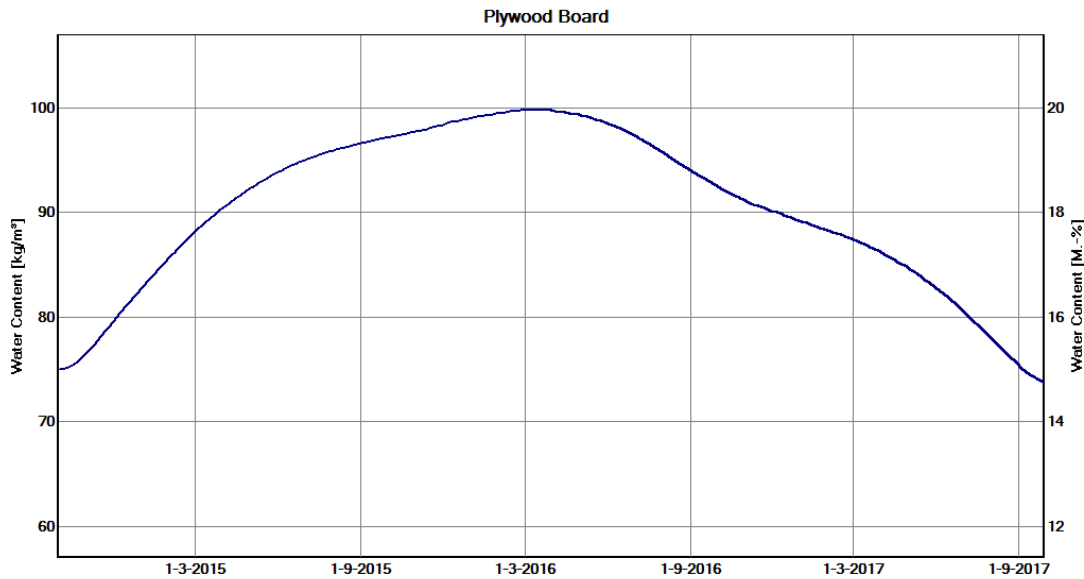
3. Kans op houtrot

Om na te gaan of er houtrot zal optreden in de opbouw van de verschillende systemen wordt gekeken naar het verloop van het vochtgehalte in de houten delen van deze opbouw. Om de kans te classificeren worden deze onderworpen aan de norm van Viitanen ($M\% > 20$ max 720h/jaar ; $M\% > 25$: max 168h/jaar). Uit de onderstaande grafiek valt af te leiden dat overschrijding van deze waarden voorkomt gedurende de eerste jaren. Wanneer de opbouw echter uitgebalanceerd is zullen deze waarden niet langer overschreden worden. Er kan geconcludeerd worden dat bij dit geval de overschrijding dus te wijten is aan het initieel vochtgehalte van de draagmuur die erg hoog is en het aanwezige vocht bij uitdroging doorheen dit element gaat. Indien het initieel vochtgehalte verlaagd wordt, zal deze piek ook dalen en kan er zo voor gezorgd worden dat deze grenswaarden niet overschreden wordt.



Figuur 55: Simulatie van het vochtgehalte in de multiplexplaat in het GEDT systeem over een periode van 50 jaar.

Voor de verschillende systemen zal een verschillende initiële vochtigheid resulteren in een opbouw die niet langer te lijden heeft onder de gevolgen van houtrot door het verdwijnen van de piek in het verloop van de M% waarden door uitdrogen van de draagmuur (figuur X). Deze initiële vochtgehaltes zijn terug te vinden in de volgende tabel.



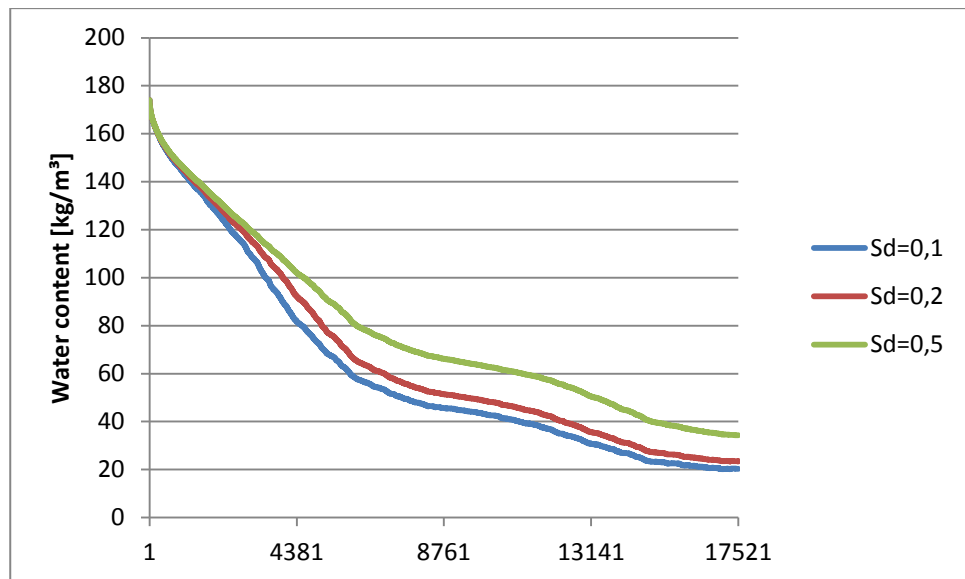
Figuur 56: Simulatie van het vochtgehalte in de multiplexplaat in het GEDT systeem over een periode van 3 jaar met een verlaagd initieel vochtgehalte.

	Metselwerk	Betonnen draagmuur
METAALPROFIEL	X	X
GEDT	32,4	83,6
PAROC INNOVA	68,8	125,2
SIP	71,2	127,4
ROOSEDAAL	174	174
PASSIVHAUSSTANDARD	174	174

Tabel 20: Toegestaan maximaal initieel vochtgehalte (kg/m^3) van de draagmuur, waarbij gedurende de simulatie van 20 jaar de norm van Viitanen ($M\% > 20$ max 720h/jaar ; $M\% > 25$: max 168h/jaar) niet overschreden wordt.

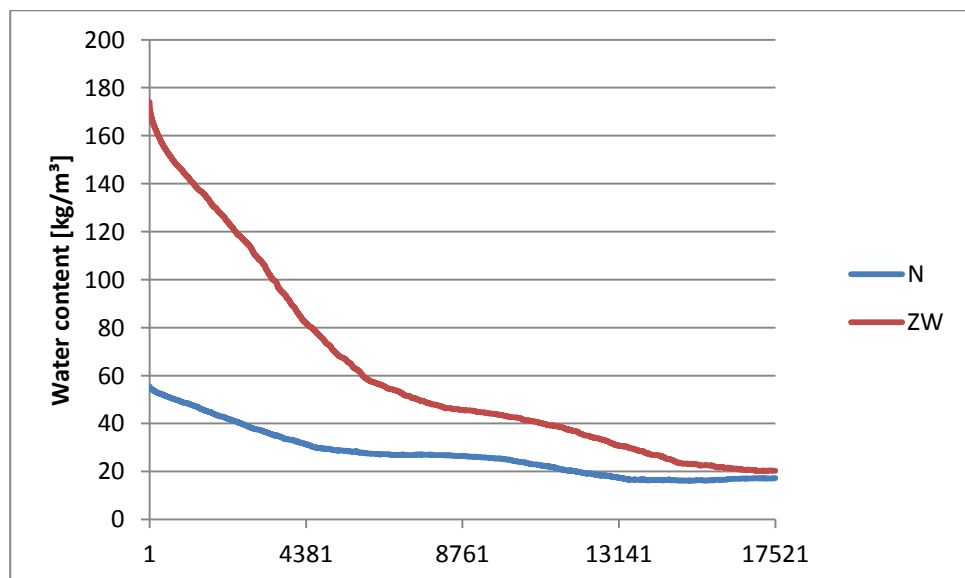
De oriëntatie had hier een verwaarloosbare invloed. Wel is weer te zien dat het materiaal waaruit de draagmuur opgebouwd is van belang is. Het maximaal toegestane initieel vochtgehalte bij de metselwerkmuur is beduidend lager. Dit kan opnieuw verklaard worden doordat deze zijn opgenomen vocht sneller in grotere hoeveelheid zal afgeven en de voorwaarden bij een lager initiële vochtigheid al zal overschreden worden.

Hierbij moet natuurlijk de vraag gesteld worden of het verlagen van het initieel vochtgehalte wel haalbaar is. In de praktijk wordt dit gedaan door een regenscherm voor de gevel te plaatsen die zo te laten uitdrogen. Hiervoor wordt verder gebouwd op de resultaten die bij de bepaling van het vochtgehalte in de verschillende type draagmuren bekomen zijn. Hierbij wordt een regenscherm aan de simulatie toegevoegd en wordt eerst gekeken bij welke Sd-waarde dit het effectiefst werkt. Hiervoor wordt een simulatie gedaan met respectievelijk met een regenscherm met respectievelijk 0,5; 0,2 en 0,1 m als Sd-waarde bij de metselwerk muur. De simulatie start telkens op het tijdstip waarop een minimum of maximum gevonden waarde werd verkregen.



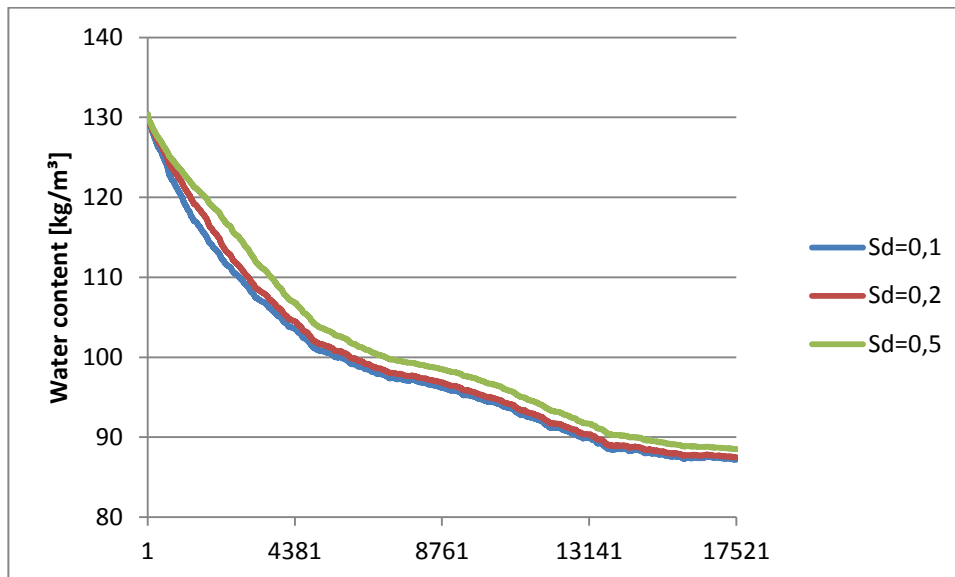
Figuur 57: Simulatie van het invloed van regenscherm, met respectievelijk 0,1; 0,2 en 0,5 als Sd-waarde, op het vochtgehalte in het metselwerk over een periode van 2 jaar met een zuidwestelijke, met het maximaal initieel bekomen vochtgehalte, met start op 05/12/2015.

Uit de resultaten blijkt duidelijk dat het regenscherm met een Sd-waarde van 0,5 het beste resultaat geeft. Dit kan verklaard worden doordat deze het meest dampopen is van de drie en het initieel vocht het beste zal doorlaten. De meeste van de hierboven bekomen maximale initiële vochtgehalten zullen binnen de periode van één jaar bereikt worden. Voor de GEDT systeem zal dit echter tot twee jaar duren. Indien dezelfde simulatie voor de gegevens bij noordelijke oriëntatie uitgevoerd wordt, zal deze door een lager initieel vochtgehalte sneller het gewenste vochtgehalte halen. De simulatie toont dat deze wel tot eenzelfde waarde zal drogen.



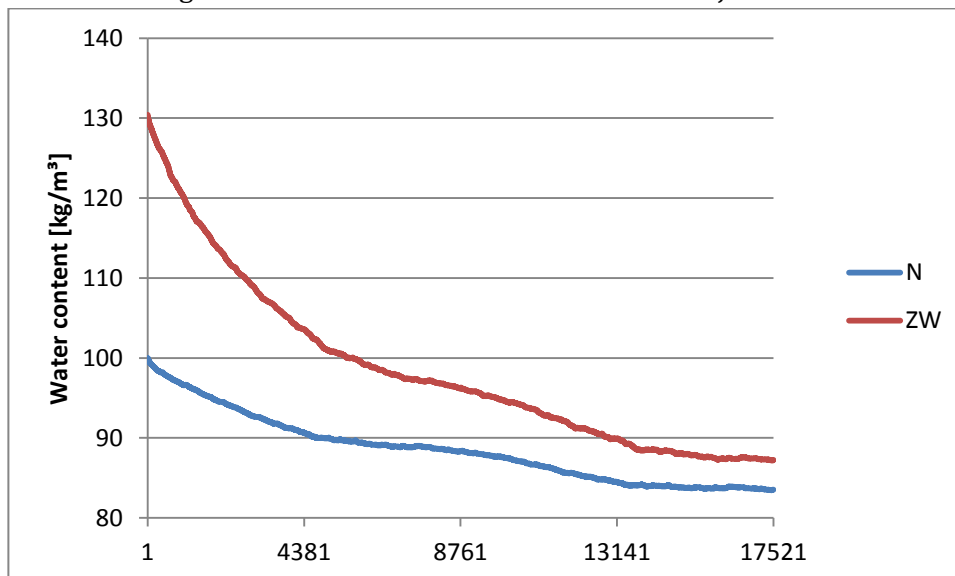
Figuur 58: Simulatie van het invloed van regenscherm met 0,1 m als Sd-waarde op het vochtgehalte in het metselwerk over een periode van 2 jaar met een zuidwestelijke en noordelijke oriëntatie, met het maximaal initieel bekomen vochtgehalte, met start op 05/12/2015.

Voor de constructies met betonnen draagmuur werd hetzelfde scenario gegenereerd. Voor het verschil tussen de gebruikte regenschermen kan dezelfde conclusie gemaakt worden. Er is echter wel een kleiner verschil tussen de invloeden op te merken. De hierboven opgelegde maximale initiële vochtgehalte worden hier niet voor elk systeem bereikt, zelfs niet na een periode van twee jaar. Voor het GEDT systeem zal dus een andere oplossing gevonden moeten worden indien ze toegepast wordt bij de renovatie van een woning met een betonnen draagmuur.



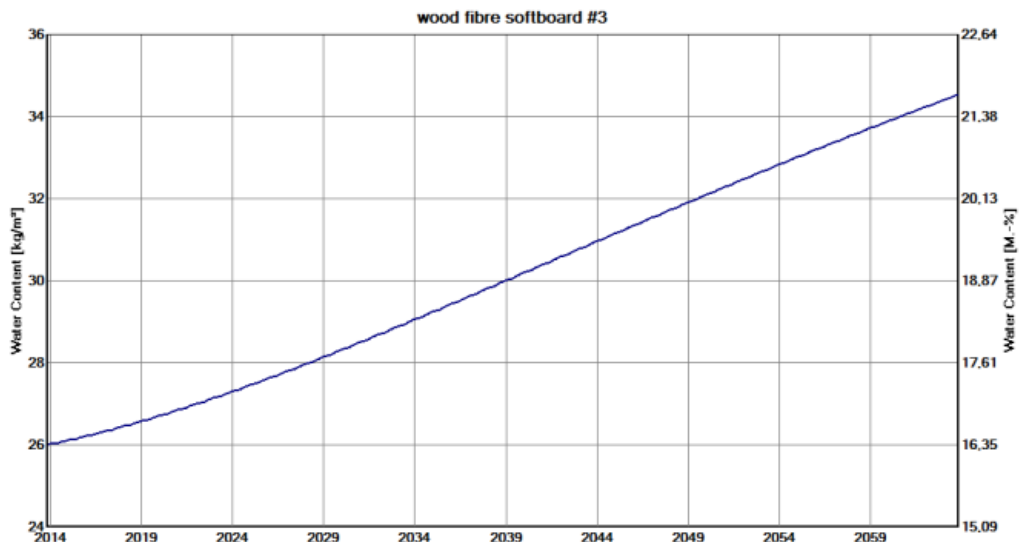
Figuur 59: Simulatie van het invloed van regenscherm, met respectievelijk 0,1; 0,2 en 0,5 als Sd-waarde, op het vochtgehalte in het metselwerk over een periode van 2 jaar met een zuidwestelijke, met het maximaal initieel bekomen vochtgehalte, met start op 19/01/2015.

Voor de noordelijke oriëntatie zal geen significant lager vochtgehalte bereikt worden. Deze toont dus dezelfde verhouding in het verschil tussen noord en zuid als bij de metselwerkmuur.



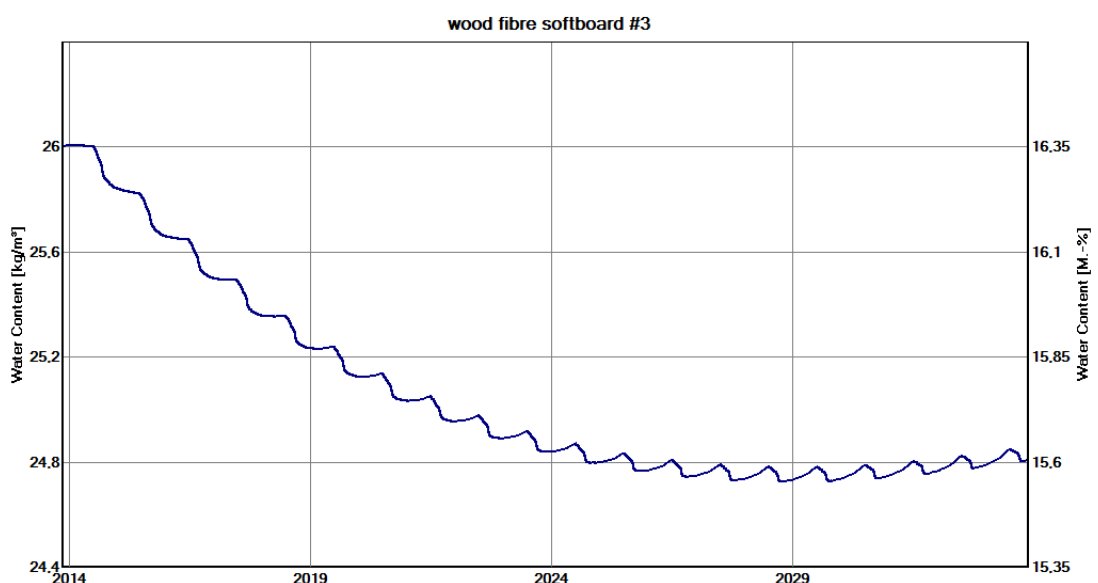
Figuur 60: Simulatie van het invloed van regenscherm met 0,1 m als Sd-waarde op het vochtgehalte in de betonnen draagmuur over een periode van 2 jaar met een zuidwestelijke en noordelijke oriëntatie, met het maximaal initieel bekomen vochtgehalte, met start op 19/01/2015.

Bij het metaalprofielsysteem toont de simulatie echter een probleem in de opbouw die niet te verhelpen is door het initieel vochtgehalte aan te passen. Er treedt een constant stijgend vochtgehalte op in de houtvezelplaat die zelfs na de simulatie van 50 jaar niet ophoudt. De folie van het VIP voorkomt dat er vocht vanuit de draagmuur naar deze laag stroomt, dit wordt bevestigd uit de resultaten die tonen dat het verlagen van het initieel vochtgehalte in de draagmuur geen invloed heeft op het vochtverloop in deze laag.



Figuur 61: Simulatie van het vochtgehalte in de houtvezelplaat over een periode van 50 jaar.

Verder onderzoekwerk wijst uit dat het afwerkingspaneel, namelijk het fermacell HD facade board, zelden zonder extra pleisterlaag gebruikt wordt, hoewel dit zo beschreven wordt in de detailtekening (figuur X). Indien de simulatie gedaan wordt met toevoeging van een pleisterafwerking zien we dat er niet langer een probleem optreedt in eerder genoemde houtvezelplaat zoals in de figuur te zien is. Dit doordat deze een dubbel zo hoge dampdiffusiecoëfficiënt heeft en dus de diffusie naar de binnen opbouw zal tegenhouden.



Figuur 62: Simulatie van het vochtgehalte in de houtvezelplaat over een periode van 20 jaar.

Voor de andere systemen zal een bouwkundige oplossing voor een betere prestatie moeten zorgen. Om de ingreep snel te laten gebeuren, zal er geen tijd genomen kunnen worden om de draagmuur te laten uitdrogen. Uit de resultaten zien we dat bij het PASSIVHAUS systeem geen kans op houtrot optreedt. Dit is te verklaren door de plaatsing van het dampscherm tussen de oorspronkelijke draagmuur en het paneel. Daarom wordt er gekeken of een regen-of dampscherm de kans op houtrot kan voorkomen. Daarvoor worden de simulaties met een metselwerk draagmuur hernomen, omdat hierbij het kritisch initieel vochtgehalte het laagst is. Er wordt een regen- of dampscherm tussen de bestaande draagmuur het nieuwe systeem geplaatst en er wordt gekeken welke equivalente luchtlaagdikte deze moet hebben om te voldoen aan de norm van Viitanen bij een initieel vochtgehalte van de metselwerk muur van 174 kg/m^3 . De resulterende opbouw wordt in de volgende tabel weergegeven.

Systeem	Lagen	Dikte (mm)
GEDT	Metselwerk	340
	Pleister	15
	Dampscherm sd=20m	1
	Minerale wol	20
	Kerto paneel	27
	Multiplex	5
	Aluminium folie	0.8
	VIP	40
	Multiplex	5
	Gefineerde multiplex	18
	Onderstructuur (Aluminium profiel)	20
	Composiet paneel	8
PAROC INNOVA	Metselwerk	340
	Dampscherm sd=1m	1
	Minerale wol	70
	Regenscherm sd=0,5m	1
	Multiplex	9
	Minerale wol	300
	Cement vezelplaat	9
	Minerale wol	50
	Pleisterafwerking	10
SIP	Metselwerk	340
	Dampscherm sd=1m	1
	OSB	12
	PIR	100
	Houtvezelplaat	12
	Pleisterafwerking	10

Tabel 21: Toevoeging van damp/regenscherm om houtrot in de opbouw te vermijden.

Hierbij moet natuurlijk nagegaan worden welk effect deze bouwkundige ingreep op de overige elementen in het systeem heeft. Hierbij is het belangrijk om te weten op welke manier een dergelijk regen/dampscherm werkt. Zoals hierboven gedaan werd, wordt bij een dergelijk scherm telkens een Sd-waarde vernoemd. Deze kwantificeert de weerstand van een bepaalde laag tegen waterdampdiffusie. Deze waarden houden niet alleen rekening met het materiaal, maar ook met de laagdikte. De formule waarmee deze waarde berekend wordt is de volgende:

$$S_d = \mu \cdot d$$

met μ : waterdampdiffusieweerstandsgetal, waarde die aangeeft in welke mate het materiaal weerstand biedt tegen waterdampdiffusie;

met d : de dikte van de laag.

Deze wordt ook wel μ_d waarde of equivalente luchtdaagdikte genoemd, het getal geeft namelijk aan in welke mate de dampdiffusie weerstand ondervindt en drukt dit uit ten opzichte damptransport via stilstaande lucht. Dit is te zien in onderstaande tabel.

Materiaal	Dikte	μ	μ_d of S_d
Lucht (referentie)	1 m	1	1 m
Gipsplaat	13 mm	4 tot 10	0,05 tot 0,13 m
OSB	1,2 cm	30 tot 170	0,4 tot 2 m
Multiplex	–	50 tot 250	–
Glaswol	40 cm	1	0,4 m
Houtvezelplaat	1,2 cm	5 tot 10	0,06 tot 0,12 m
Cellulose (bulk)	20 cm	2	0,4 m
Baksteen	20 cm	10 tot 16	2 tot 3,2 m
Polyethyleen	0,15 mm 0,15 mm	100.000	15 m
Scherf met variabele dampdoorlatendheid	0,2 mm	–	0,25 tot 10 m
Bitumen	4 mm	50.000	200 m

Tabel 22: μ en μ_d waarden voor verschillende frequent aangewende bouwmaterialen. [51]

De aanwezigheid van discontinuïteiten (bv. niet vastgelijmde verbindingen) zal de reële μ_d - of S_d - waarde echter sterk beïnvloeden. De volgende tabel geeft de verschillende materialen die gebruikt worden voor de verschillende klassen voor dampschermen. Hierbij worden ook enkele vereisten vermeld waarbij rekening moet gehouden worden voor de goede werking bij de uitvoering.

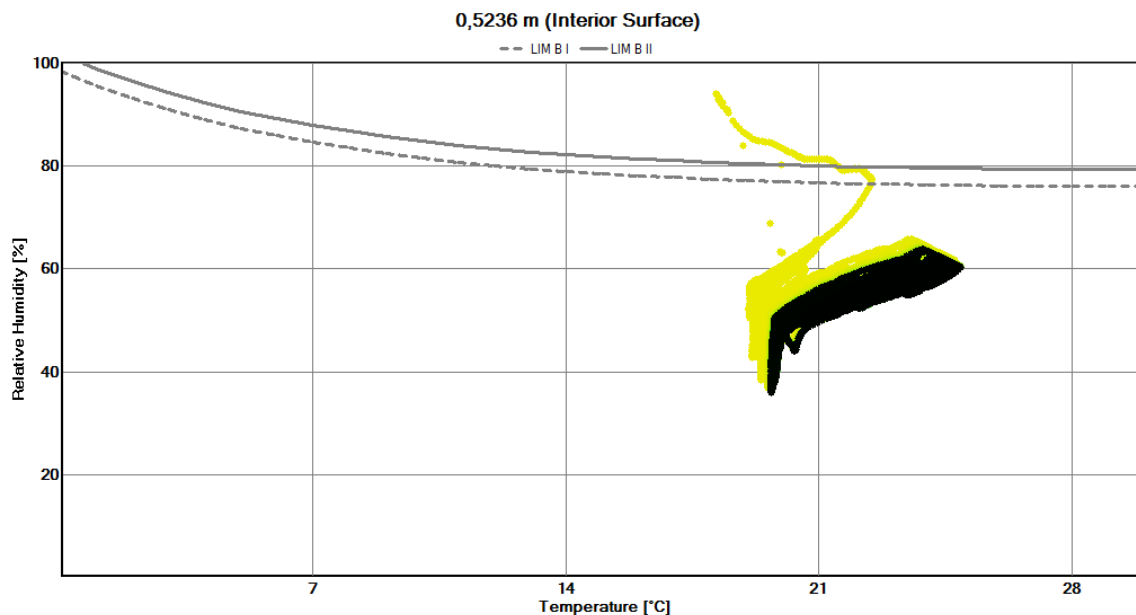
Klasse + $(\mu_d)_{eq}$ (*)	Materiaal	Opmerking
E1 (≥ 2 tot < 5 m)	PE-folie (dikte=0,2mm) met overlappings van min. 100mm. Ook bruikbaar: alle materialen van de klassen 2, 3 en 4.	Een kleeflaag, zelfs op een doorlopende ondergrond, mag niet als een volwaardig dampscherm beschouwd worden
E2 (≥ 5 tot < 25 m)	- Folies van PE (dikte $\geq 0,2$ mm) en aluminiumlaminaten. - Bitumengasvlies V50/16 - Bitumen-polyestervlies P150/16. Ook bruikbaar: alle materialen van de klassen 3 en 4.	Voegen in overlapping moeten steeds onderling en tegen andere bouwdelen gekleefd of gelast worden.
E3 (≥ 25 tot < 200 m)	- Gewapend bitumen V3, V4, P3 of P4. - Polymeerbitumen APP of SBS (minimale dikte = 3mm), glasvlies of PES gewapend. Ook bruikbaar: alle materialen van klasse 4.	Voegen in overlapping moeten steeds onderling en tegen andere bouwdelen gekleefd of gelast worden.
E4 (≥ 200)	- Gewapende bitumina met metaalfolies (ALU 3). - Meerlaagse dampschermen van polymeerbitumen (≥ 8 mm).	Voegen in overlapping moeten steeds onderling en tegen andere bouwdelen gekleefd of gelast worden. Dampschermklasse E4 vereist een uitvoering op een doorlopende drager. Perforaties (bv. door de schroeven van de mechanische bevestigingen) zijn niet toegelaten.

(*) $(\mu_d)_{eq}$ is de equivalente dampdiffusiedikte en bepaalt de dampremmende eigenschap van een (dampscherm)laag.
 $((\mu_d)_{eq}=1\text{ m})$ komt overeen met een laag stilstaande lucht van 1 m dikte.
 $(\mu_d)_{eq} > 200\text{ m}$: "absoluut" dampscherm.

Tabel 23: Dampschermklassen.[49]

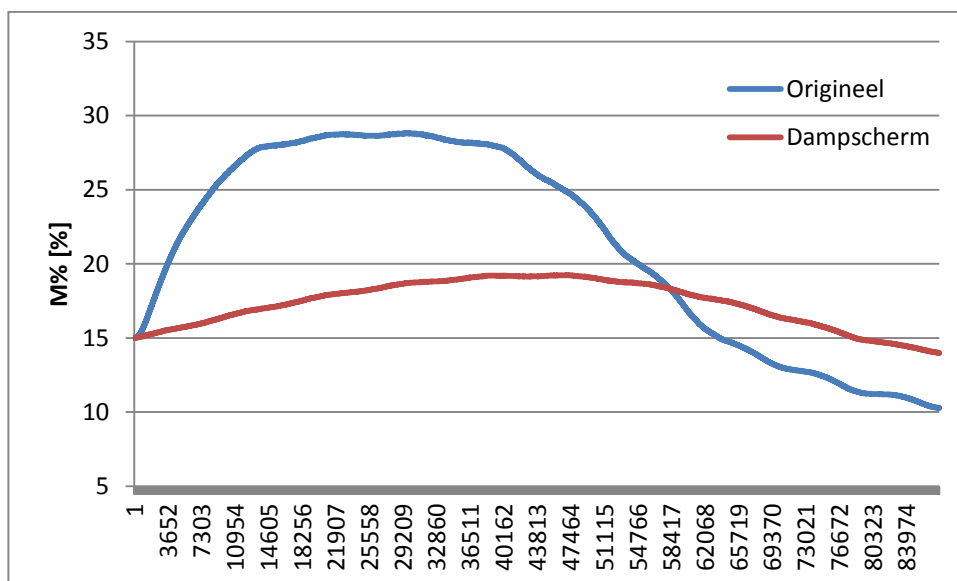
De verschillende regen/dampschermen worden in WUFI ingegeven met een dikte van 1mm, hierbij wordt de μ -waarde van het materiaal omgerekend zodat de μ_d waarde overeenkomt met dat van een echt regen/dampscherm. In werkelijkheid zullen deze echter zoals in bovenstaande tabellen af te lezen is, een andere dikte hebben. Zo kan bij het GEDT systeem een polyetheleenscherm gebruikt worden met een dikte van 0,2 mm, dit is dus een dampscherm klasse E2.

Doordat het uitdrogen van het vochtgehalte in de draagmuur zal afgeremd worden naar buiten toe moet nagekeken worden of dit geen negatieve invloed zal hebben op het binnenklimaat. Hierbij kijken we opnieuw naar de binnenisopleet die gegenereerd wordt door WUFI. Deze zal blijven voldoen en toont zelfs geen significant verschil.



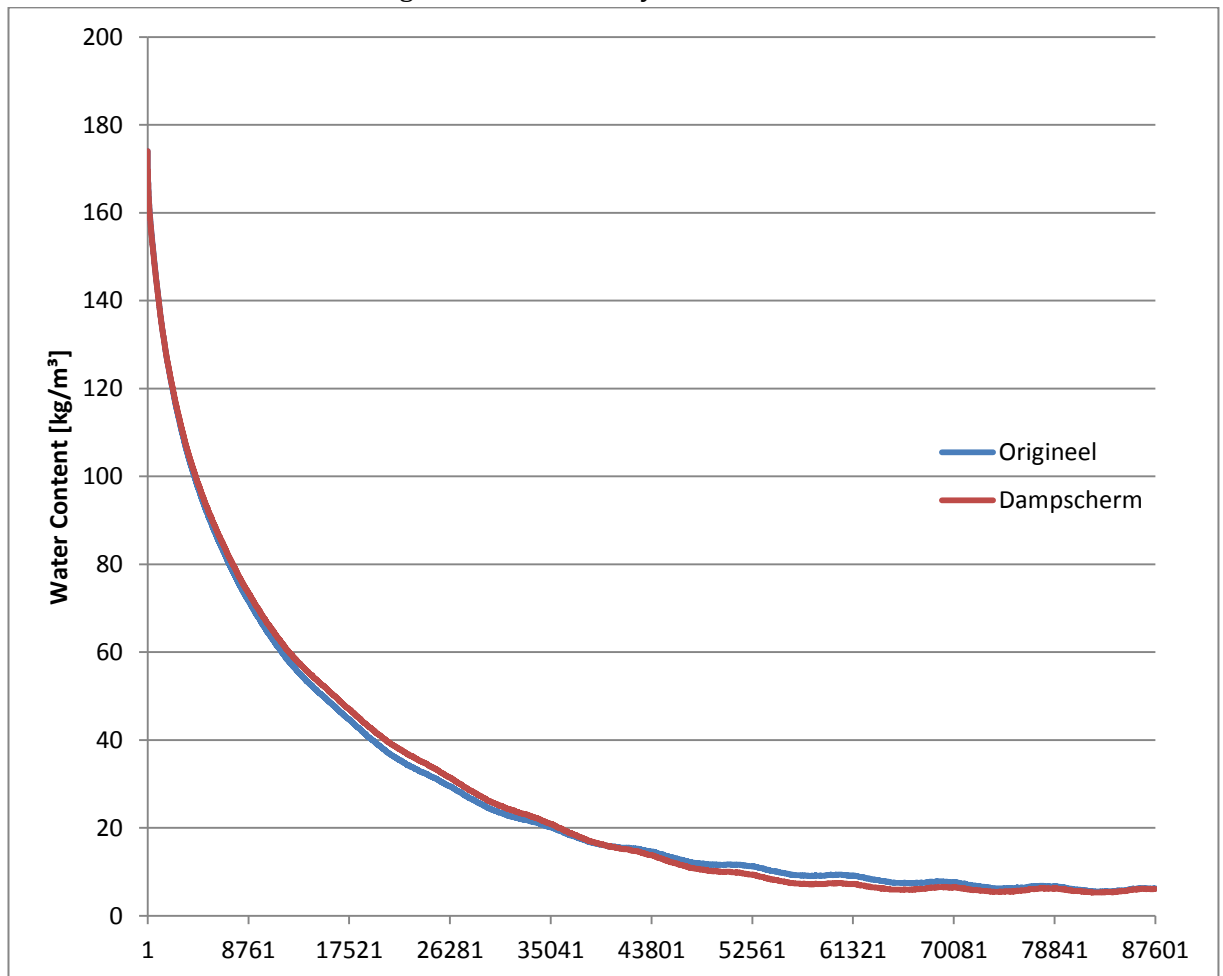
Figuur 63: Isopleet voor het binnenoppervlak bij het GEDT systeem met toevoeging van een dampscherm aan de opbouw over een periode van 2 jaar.

Indien we kijken naar het verloop van het vochtgehalte in de multiplexplaat, waar initieel houtrot optrad, zien we dat het uitdrogen van de muur nog steeds in die richting blijft gebeuren. De snelheid waarmee dit gebeurt wordt echter geremd en daardoor zal het langer duren vooraleer het vochtgehalte in deze multiplexplaat zijn piek bereikt, deze zal daardoor natuurlijk wel lager zijn.



Figuur 64: Verloop van het vochtmassaprocent in de multiplexlaag in het GEDT systeem voor de opbouw met en zonder dampscherm over een periode van 10 jaar.

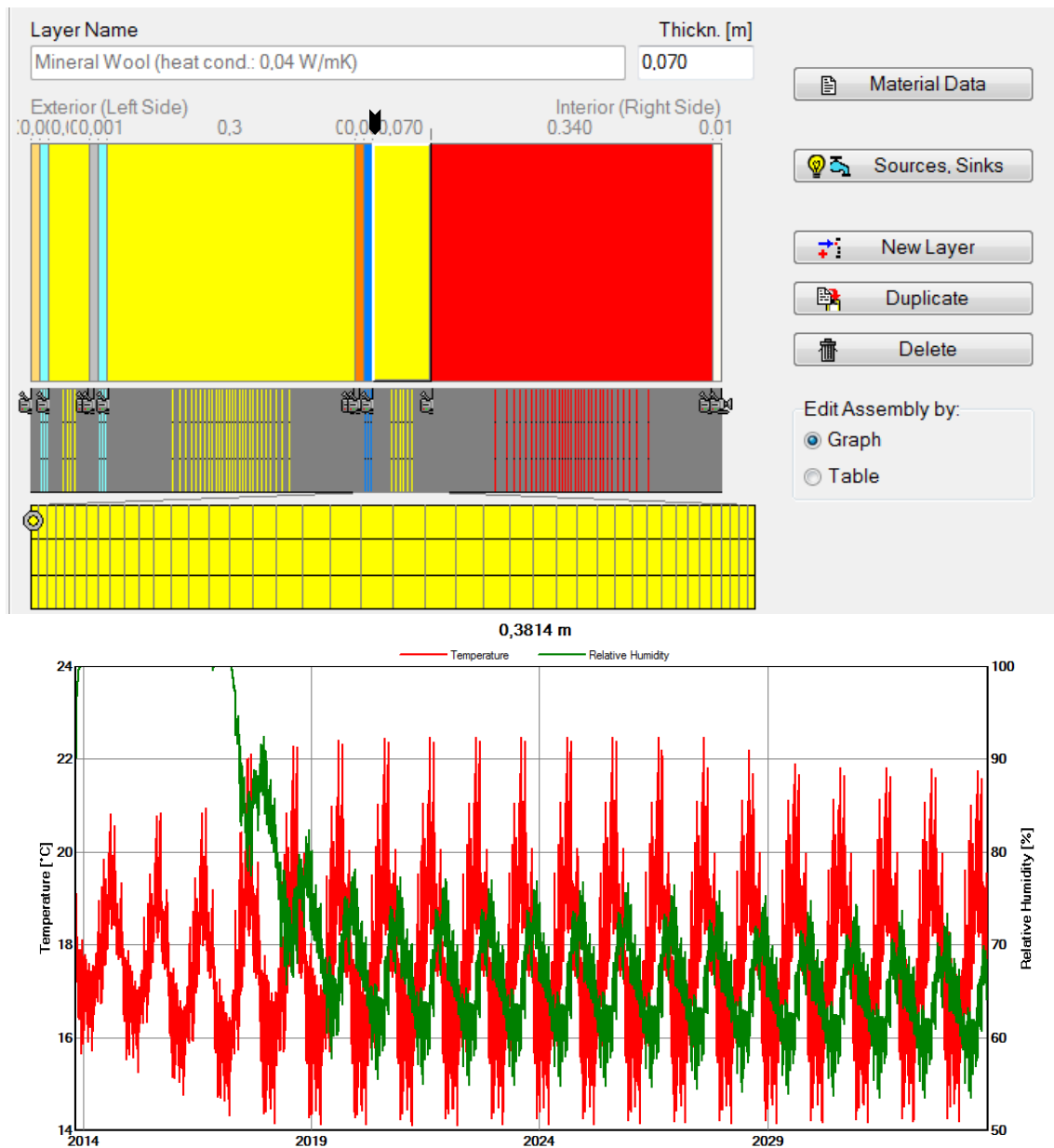
Ook in het verloop van het vochtgehalte in de muuropbouw is deze trend terug te vinden. Deze zal bij de originele opbouw gedurende de eerste periode sneller uitdrogen. Het verschil tussen de twee verlopen is echter zeer klein. De plaatsing van het dampscherm zal dus geen negatieve effecten hebben in de andere lagen van het GEDT systeem.



Figuur 65: Verloop van het vochtgehalte in het metselwerk bij het GEDT systeem voor de opbouw met en zonder dampscherm over een periode van 10 jaar.

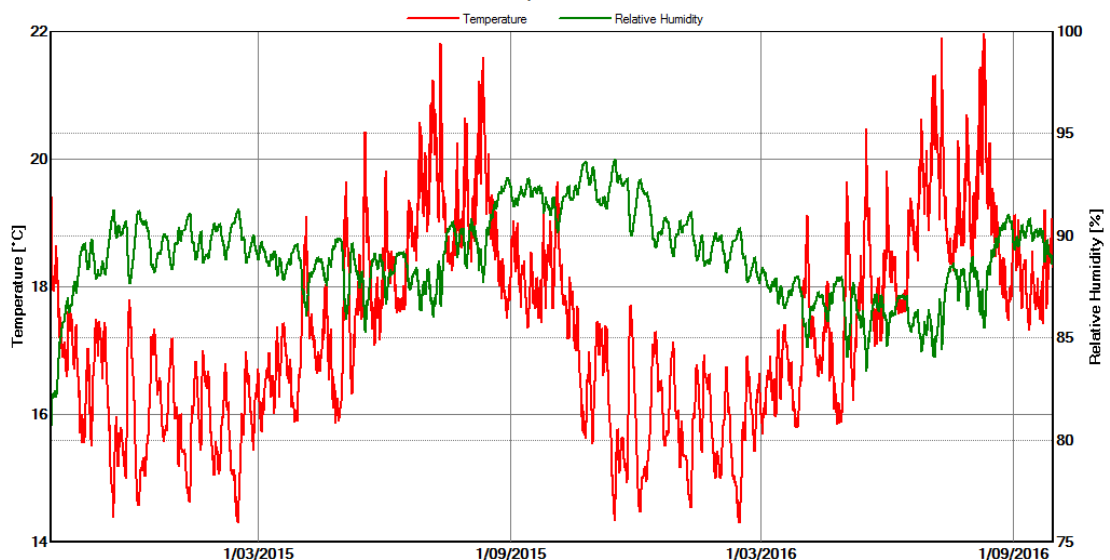
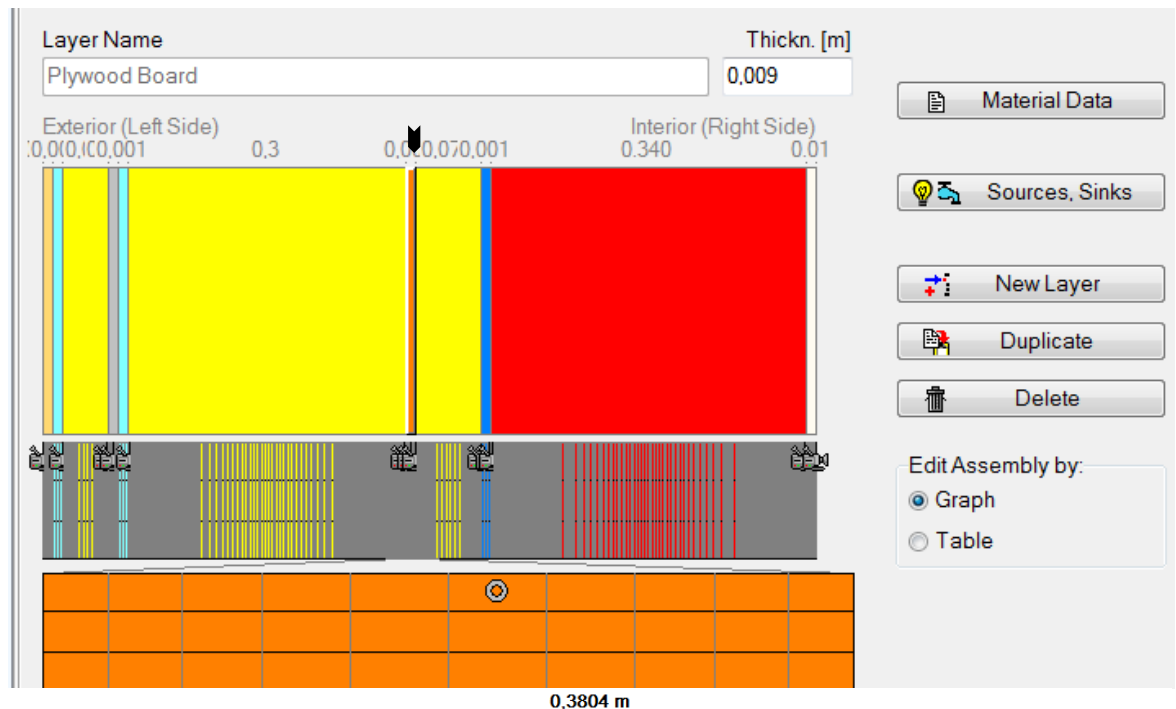
4. Kans op condensatie:

In de verschillende lagen werden knopen aangeduid waarvoor de grafiek van de relatieve vochtigheid en de temperatuur gesimuleerd wordt. Deze worden nagegaan op het voorkomen van condensatie. Dit zal voorkomen indien het vocht niet gebufferd kan worden en zal aanslaan op een koud oppervlak. Uit de resultaten blijkt dat enkel in het PAROC INNOVA systeem condensatie optreedt. Dit ter plaatse van het regenscherm dat oorspronkelijk achter de laag minerale wol zat (figuur X).



Figuur 66: Verloop van de relatieve vochtigheid en de temperatuur ter hoogte van de binnenzijde van het dampscherm in het PAROC INNOVA systeem over een periode van 20 jaar.

Het verplaatsen van het dampscherm om in het vorige deel de kans op houtrot te voorkomen lost ook het condensatieprobleem op. Opnieuw was deze te wijten aan het hoge initiële vochtgehalte van de draagmuur. Indien dit vochtgehalte dus verlaagd zou worden zal er ook geen condensatie optreden.

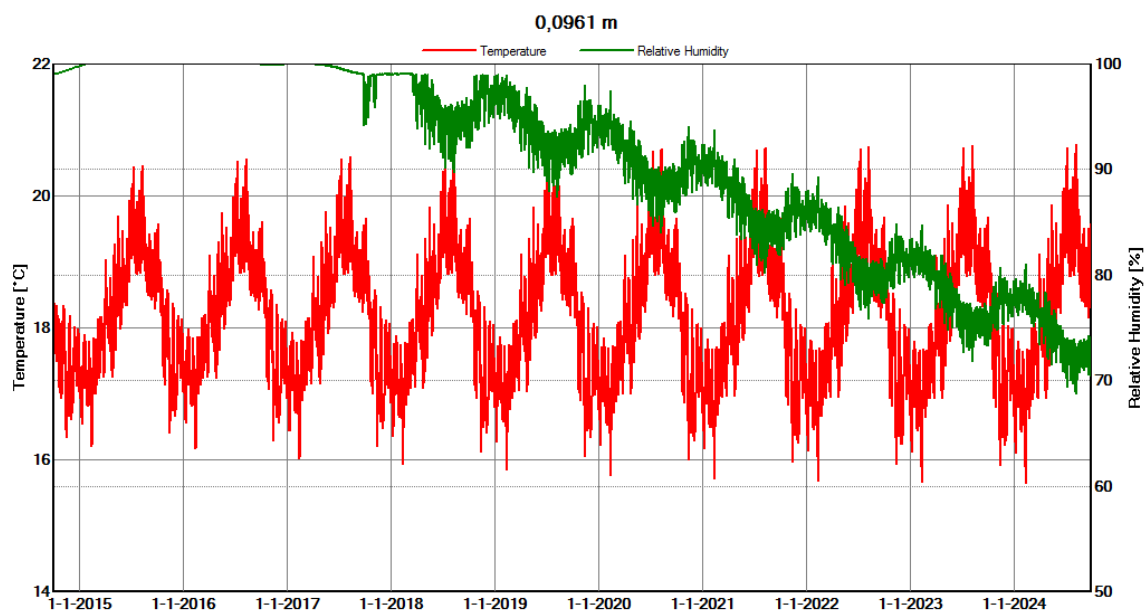
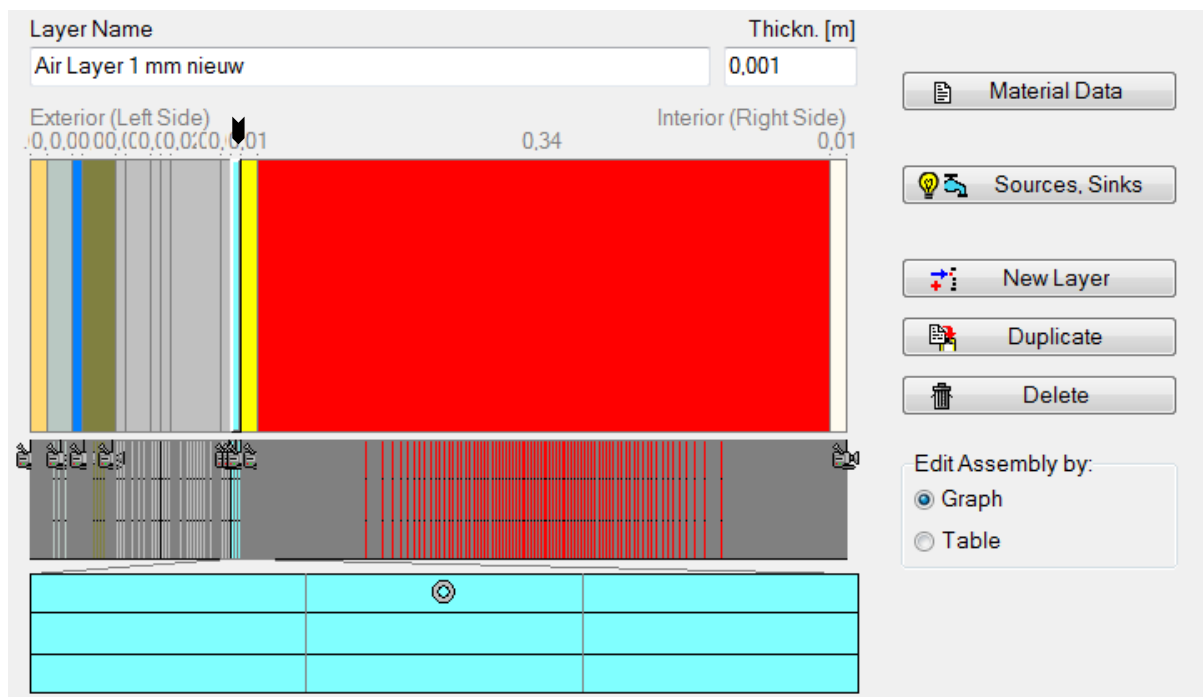


Figuur 67: Verloop van de relatieve vochtigheid en de temperatuur ter hoogte van de multiplexplaat in het PAROC INNOVA systeem over een periode van 2 jaar.

5. Gevolgen van niet intacte VIP

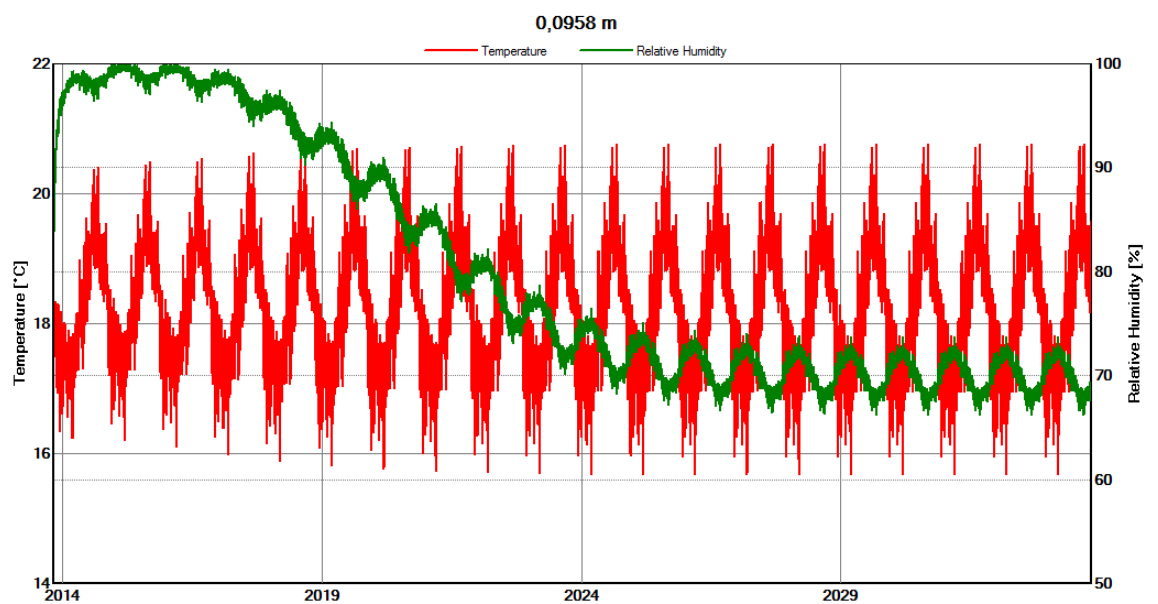
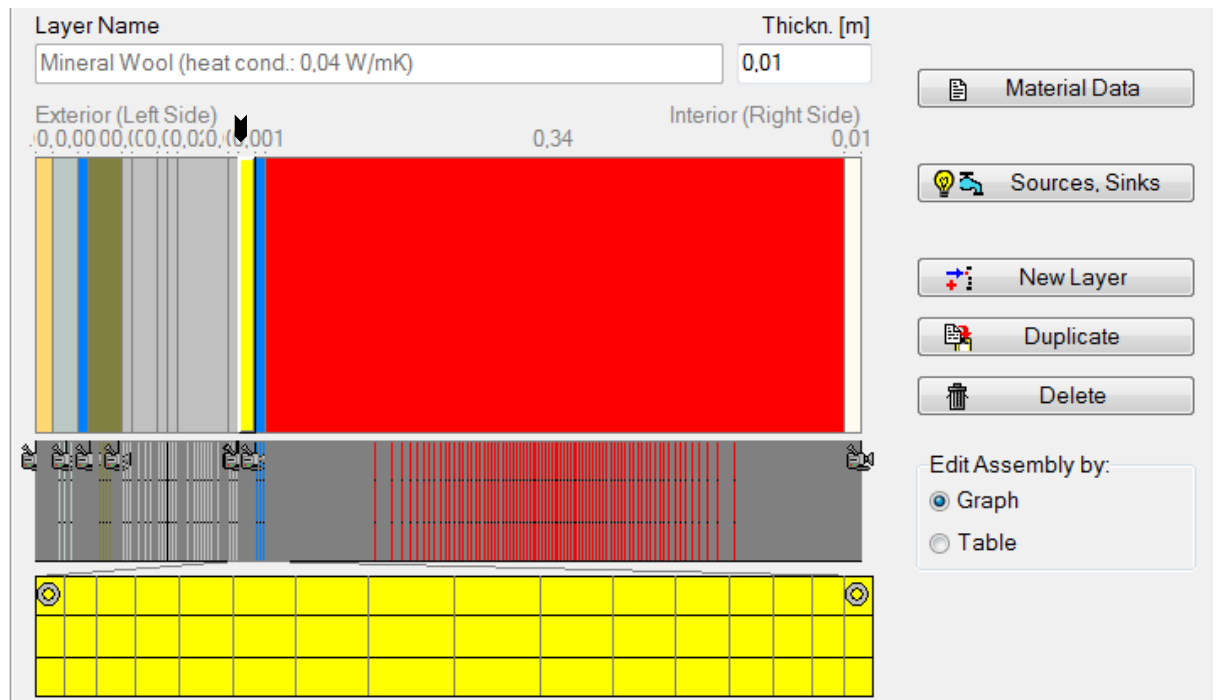
Indien één van de VIP's in de elementen beschadigd raakt, zal de thermische prestatie van het paneel verminderen en zal er dus een ander temperatuurverloop in de opbouw voorkomen. Dit kan resulteren in het voorkomen van condensatie in de elementen waar vooraf geen problemen waren. Voor de systemen waarin VIP's verwerkt zijn wordt deze opnieuw gesimuleerd, hierin wordt de thermische geleidbaarheid van het kernmateriaal aangepast van 0,005 W/mK naar 0,02 W/mK. Opnieuw wordt nagegaan of er condensatie optreedt en eventuele bijkomende kans op houtrot.

In het metaal profiel systeem zal gedurende de eerste jaren constant condensatie optreden ter plaatse van de VIP folie aan de zijde van de bestaande muur.



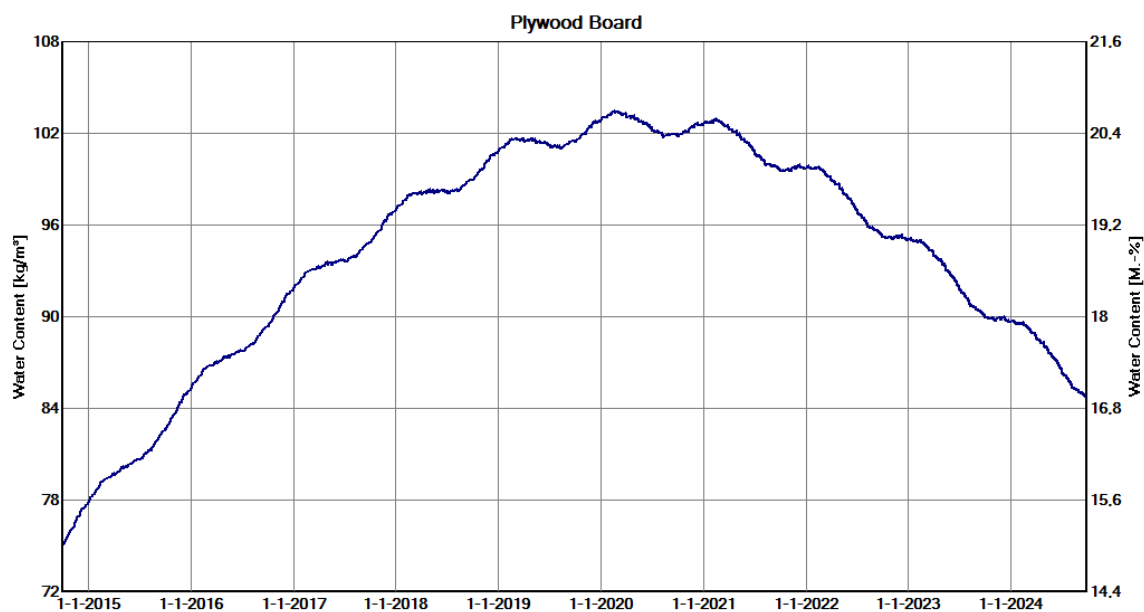
Figuur 68: Verloop van de relatieve vochtigheid en de temperatuur ter hoogte van de binnenzijde van het VIP paneel in het metaalprofiel systeem over een periode van 10 jaar.

Opnieuw is deze te wijten aan het hoge initiële vochtgehalte. Er wordt dus nagegaan welke equivalente luchtdikte het dampscherm minstens moet hebben dat geplaatst wordt tegen de bestaande muur. Vanaf een Sd waarde van 5m zal het jaarlijks evenwicht geen blijvend condensaat opleveren.

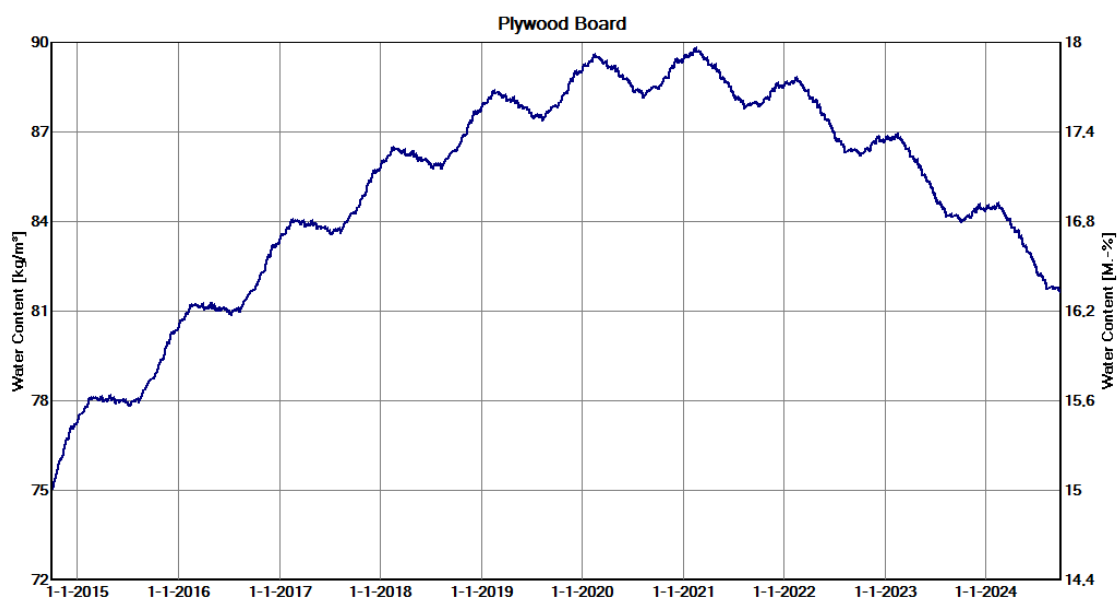


Figuur 69: Verloop van de relatieve vochtigheid en de temperatuur ter hoogte van de binnenzijde van het VIP paneel in het metaalprofiel systeem over een periode van 20 jaar.

In het GEDT systeem zal de verminderde thermische prestatie van de geperforeerde VIP resulteren in een verhoogde kans op houtrot en zal de equivalente luchtdaagdikte die eerder geplaatst wordt verhoogd moeten worden. Bij een dampscherm met $S_d=50$ tonen de resultaten geen M% waarde boven de 20%.



Figuur 70: Simulatie van het vochtgehalte in de houtvezelplaat over een periode van 20 jaar met een dampscherm met $S_d=20\text{m}$.



Figuur 71: Simulatie van het vochtgehalte in de houtvezelplaat over een periode van 20 jaar met een dampscherm met $S_d=50\text{m}$.

3.3.9. CONCLUSIES

- De systemen die opgebouwd zijn uit minerale wol en een houten structuur dienen dampopen structuren te zijn zoals deze in Roosendaal. Op die manier zal het initieel vochtgehalte doorheen de opbouw kunnen gaan zonder bij een bepaalde laag vast te komen zitten. Toch moet nagegaan worden dat de houten structuur zal lijden onder het vocht die door diffusie doorheen de opbouw gaat. Indien nodig zal een dampscherm deze vochtstroom moeten uitvlakken. Deze zal echter geen grote equivalente luchtlaagdikte moeten hebben.
- Doordat de folie rond de VIP een grote diffusieweerstand heeft, sluit dit een dampopen systeem uit. Hierdoor zal gedurende de eerste drie tot vijf jaar een vochtstijging plaatsvinden tussen het VIP en de draagmuur door het uitdrogen van het initieel vochtgehalte van deze bestaande draagmuur. Dit kan leiden tot condensatie of schimmelvorming. De volgorde van de lagen zal dus doordacht moeten zijn. Hierbij is het te vermijden om houtenconstructiedelen of andere vochtgevoelige materialen tussen de VIP en het bestaande metselwerk te verwerken. Indien dit toch gedaan wordt zal een dampscherm met een erg hoge equivalente luchtlaagdikte gebruikt moeten worden om deze tegen het aanwezige vocht in de draagmuur te beschermen. Een reiniging van de gevel en het beschilderen met schimmeldodende middelen kan een oplossing zijn om schimmelgroei in de vroege jaren voorkomen.
- De systemen moet zo voorzien zijn opdat ze in geval van stuk gaan van het VIP, nog steeds de diffusiestroom van het bouwvocht kunnen tolereren. Door de verminderde thermische weerstand zal het temperatuursverloop namelijk veranderen en dit zal een gevolg hebben op de relatieve vochtigheid in de materialen.
- Uit het onderzoek naar de kans op schimmelgroei kunnen moeilijk conclusies gemaakt worden, omdat de bestaande modellen nog niet ver genoeg ontwikkeld zijn om de effectieve kans op schimmelgroei te kunnen voorspellen en niet toelaten om de verschillende systemen te vergelijken.

4. ONTWIKKELING EIGEN PANEEL

4.1. INLEIDING

Uit voorgaande delen blijkt dat het gebruik van geprefabriceerde gevelelementen met VIP's veel potentieel biedt voor het renoveren van de bestaande bouwvoorraad. Hierbij moet echter rekening gehouden worden met de inherente eigenschappen en de voorwaarden omtrent de toepassing van VIP's. In dit deel wordt getracht een goed werkend element te ontwerpen door rekening te houden met de verworven kennis na de studie van de voorbeeldprojecten.

Om dit te bereiken worden eerst enkele eisen opgelegd waaraan dit element dient te voldoen. Hierna wordt een vergelijking gemaakt tussen de verschillende mogelijke bouwmaterialen die gebruikt kunnen worden. Vervolgens wordt de werking van het paneel uitgewerkt door de bevestiging met de bestaande muur, de verbinding tussen de verschillende bouwelementen van het paneel en de paneelaansluitingen te ontwerpen. Deze beslissingen worden mede gevormd door het element in de praktijk te bouwen en zo de werking te testen en door simulaties van de thermische en hygrothermische prestaties van het paneel. Hierna worden ook bouwknopen uitgewerkt en worden deze ook thermisch geanalyseerd.

4.2. CONCLUSIE VOORONDERZOEK

Uit de studie van de voorbeeldprojecten kwamen enkele zaken naar voren waarmee rekening gehouden dient te worden in het ontwerp. Zo wordt gekozen om een gevelelement te ontwikkelen en dus geen systeem uit te werken waarin alle lagen afzonderlijk aan de bestaande muur worden aangebracht. Dit omdat in de praktijkvoorbeelden naar voren kwam, dat de afzonderlijke VIP's bij montage beschadigd werden. Daarnaast heeft een gevelelement ook het voordeel dat het een snelle renovatie van de gevel toelaat, waardoor de bewoners er minder door gehinderd zullen worden. Verder kwam naar voren dat de grootte van de panelen en de verbindingsmaterialen van belang zijn voor de thermische efficiëntie van de werking van het paneel. Ten slotte moet ook rekening gehouden worden met de hoge dampdichtheid van de folie van het VIP. Deze zal de dampstroom doorheen het element tegenhouden en kan leiden tot condensatie bij het uitdrogen van de bestaande draagmuur.

4.3. GESTELDE EISEN

De nagestreefde eisen waaraan dit element moet voldoen zijn de volgende:

- Er wordt gestreefd naar een systeem met een zeer hoge thermische weerstand. Als richtwaarde wordt een warmtedoorgangscoefficiënt van $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ genomen, deze geldt voor de totale muuropbouw. Dit is een veelgebruikte waarde bij hedendaagse passiefwoningen.
- De dikte van het totale paneel, met de gevelafwerking inbegrepen, mag niet groter zijn dan 14 cm. Dit om binnen het kader van het rooilijndecreet van 2009 te werken, die stelt dat de rooilijn bij het aanbrengen van gevelisolatie ten hoogste 14 cm mag overschreden worden.
- De luchtdichtheid van de gevel dient te voldoen aan hedendaagse en eventueel toekomstige eisen. Als richtwaarde wordt een v_{50} -waarde van $1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ genomen, wat aangeraden wordt in de norm NBN D50-001 bij mechanische ventilatie met warmteterugwinning.

- Het gevelsysteem is waterdicht tot 600 Pa. Het WTCB stelt dat dit in laboratoriumproeven moet kunnen aangetoond worden volgens methode A uit de norm NBN EN 12865.
- De buitenzijde van de gevel is na plaatsing afgewerkt of kan met beperkte handelingen in situ afgewerkt worden.
- De gevelpanelen zijn geen structurele of dragende panelen. Ze zijn bestand tegen de wind- en temperatuurbelasting en tegen het eigengewicht.
- Op de buiten- en binnen oppervlakken mag geen algen of schimmeligroei optreden. Ook mag geen inwendige condensatie of houtrot optreden in het paneel en moet rekening gehouden worden met de afname van de warmteweerstand van het VIP.

4.4. MATERIALEN

Het element wordt opgebouwd uit enkele verschillende lagen die elk hun eigen functie hebben en zo de werking van het element garanderen. Hiervoor dienen de juiste materialen gekozen te worden.

4.4.1. EFFENINGSISOLATIE

Deze eerste laag in het paneel geeft de ruimte voor de mechanische bevestiging van het paneel en vangt de oneffenheden in de bestaande muur op. Hiervoor wordt dus een materiaal gezocht die zich kan zetten. Er wordt gekozen om hiervoor een isolatiemateriaal te gebruiken, opdat die indien de VIP geperforeerd zou worden, nog kan bijdragen aan de thermische weerstand van het paneel.



Figuur 72: Rotswol, glaswol en houtvezelisolatie.

Rotswol

Rotswol wordt vervaardigd uit diabaas of basalt (vulkanisch gesteente). Bij 1.400° wordt de steenmassa gesmolten en vervolgens met een zogenaamde spinner weggeslingerd. Hierdoor stolt de vloeistof weer tot draden. Samen met een bindmiddel wordt dit in een verhardingsoven tot een mat gemaakt [42]. Rotswol is vooral gekend voor zijn multifunctionaliteit. Naast thermisch isoleren draagt rotswol namelijk ook bij tot een betere geluidsisolatie en brandwering. Het is verkrijgbaar in de vorm van platen, spijkerflensdekens en deltaplatten die bijzonder handig zijn voor het isoleren tussen balken. Een gekende fabrikant van rotswol isolatie is Rockwool. Op zichzelf is steenwol vochtongevoelig. De bindingshars is dit echter niet. Dit betekent dat voorkomen moet worden dat bij de uitvoering of tijdens het gebruik vocht onder de isolatie kan komen, hetgeen vervolgens in het materiaal zal condenseren. Het materiaal neemt bij inwendige condensatie door zijn lage diffusieweerstand zeer snel vocht op, terwijl ook de warmtegeleidingscoëfficiënt reeds bij lage vochtgehaltes zeer snel stijgt.

Glaswol

Glaswol is een silicaat dat bestaat uit zand en gerecycleerd glas. Het is verkrijgbaar op rollen (flensdeken) of soepele platen en wordt vooral gebruikt voor het isoleren van tussenverdiepingen, valse wanden en het dak. Het heeft een goede isolatiewaarde, is relatief goedkoop en licht in gewicht. Glaswol isolatie kan vocht absorberen, er moet dus steeds een dampscherm voorzien worden langs de binnenzijde van de woning. Hiervoor worden enkele types uitgevoerd met een aluminium coating. Een bekende fabrikant van rotswol is Isover. Naar glaswol en rotswol wordt vaak verwezen als minerale wol.

Houtwol

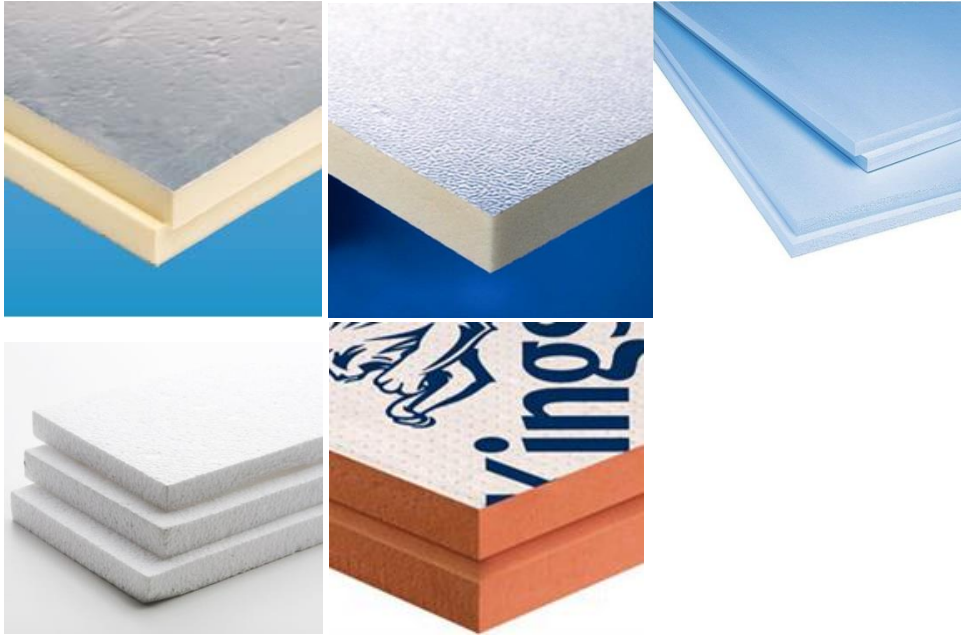
De grondstof is hakhout dat als nevenproduct ontstaat na het zagen van de bomen tot balken. Toeslagstoffen zijn een waterafstotend middel, waterglas of witte houtlijm voor strokenverlijming (nat productieproces) of PUR-hars (droog productieproces). Het aangeleverd hakhout wordt thermisch-mechanisch uiteengerafeld, met water en een suspensie gemengd en naargelang de vraag wordt er een waterafstotend middel bijgevoegd. De aldus bekomen brei wordt op de platenproductielijn gepompt en met behulp van vacuümpompen en pletwalsen geperst en gedroogd en finaal in de oven uitgedroogd tot de gewenste eindvochtigheid bereikt is. De mechanische eigenschappen zijn flexibel, vormvast en veerkrachtig. Bij toepassing in droge constructies is de levensduur onbeperkt. Houtvezelisolatie wordt vaak gebruikt als warmte- en geluidsisolatie. Het heeft daarnaast ook een hoge warmteopslagcapaciteit en een vochtbufferende werking. Houtvezelisolatie bevat kleine beetjes aluminiumsulfaat tegen schimmels en om het lignine te activeren en ammoniumsulfaat ter verhoging van de brandveiligheid. Een bekende fabrikant is Pavatex.

	λ -waarde [W/m.K]	c [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	μ	kostprijs [€/m ²]
Rotswol (12cm)	0,035-0,040	800	48	1-5	6,1
Glaswol (12cm)	0,032-0,040	800	25	1	9,6
Houtwol (12cm)	0,039-0,040	2100	45-140	1-5	15,45

Tabel 24: Eigenschappen van rotswol, glaswol en houtvezelisolatie. [42]

4.4.2. BESCHERMENDE ISOLATIEPLAAT

De volgende laag in het systeem beschermt de VIP's tegen mechanische impact en perforatie. Deze dient ook als scheidingslaag waarop de effeningsisolatie verlijmd kan worden, wat dus niet op het VIP dient gedaan te worden. Hiervoor wordt dus een stijve isolatieplaat gebruikt.



Figuur 73: PUR, PIR, XPS, EPS en PF.

PUR

PUR of polyurethaan is een kunststof materiaal dat uit isocyanaten onder toevoeging van katalysatoren en drijfgassen wordt geproduceerd. Er ontstaan tijdens dit proces harde schuimstoffen met gesloten cellen. Bij de productie worden er schadelijke en giftige stoffen gebruikt. PUR bestaat al sinds 1937 maar wordt pas decennia later als isolatiemateriaal toegepast. Het komt in plaatvorm voor, maar kan ook gespoten worden. Het is in zekere mate bestand tegen vocht en zal maar heel langzaam water opnemen. Hierdoor kan de vorminstabiliteit van het plaatmateriaal echter sterk toenemen.

PIR

PIR of polyisocyanuraat is een kunststof materiaal dat uit isocyanaten onder toevoeging van katalysatoren en drijfgassen wordt geproduceerd. Er ontstaan tijdens dit proces harde schuimstoffen met gesloten cellen, die dezelfde toepassingen kennen als PUR. Bij de productie worden er schadelijke en giftige stoffen gebruikt. PIR is eigenlijk de brandtechnisch verbeterde versie van PUR (voornamelijk op gebied van rookgassen). Het heeft voor een groot deel dezelfde eigenschappen, maar in tegenstelling tot het PUR schuim wordt PIR nagenoeg altijd in platen geleverd. Het is ook in dezelfde mate bestand tegen vocht als PUR.

XPS

XPS is een kunststof materiaal dat uit styreen (een restproduct van aardolie) wordt geproduceerd. XPS wordt door een sproeikop met drijfgas geplastificeerd. Binnen de bouw wordt het als isolatiemateriaal gebruikt omwille van de goede druksterkte en de gesloten cellen. Hierdoor is hij bestendig tegen wateropname. Bovendien is het minder prijzig dan sommige andere materialen.

EPS

Geëxpandeerd polystyreenschuim wordt in de volksmond ook isomo of piepschuim genoemd en is een witte kunststof die bestaat uit allemaal kleine bolletjes. Het wordt geproduceerd uit styreen (een restproduct van aardolie) en ontstaat door schuimvorming met pentaan en

waterdamp. Het voordeel van EPS als bouw materiaal is het zeer lage gewicht van het schuim. Dit maakt het makkelijk te transporteren, versnijden en plaatsen. Daarnaast heeft het ook een goede druksterkte. Het is goed bestand tegen vocht.

PF (phenolformaldehyde)

Resolhardschuim is gebaseerd op resolhars. Resolhardschuim wordt geproduceerd door resolhars, een katalysator en een milieu-vriendelijk blaasmiddel tegelijk bij elkaar te voegen. De celstructuur in het hars ontstaat onder invloed van warmte die optreedt tijdens de scheikundige reactie. Hierdoor wordt het blaasmiddel ingesloten en ontstaat er een vaste, zeer fijne celstructuur die 100% gesloten is. Deze celstructuur is veel fijner dan die van PUR en PIR en geeft een betere thermische stabiliteit en brandweerstand. Het is echter wel gevoeliger voor vocht. Het zal namelijk sneller vocht opnemen en zal als gevolg uitzetten en bij droging krimpen.

	λ -waarde [W/m.K]	c [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	μ	kostprijs [€/m ²]
PUR (8cm)	0,023-0,032	1200	22	60-80	15,91
PIR	0,023-0,032	1200	30	60-80	15,91
XPS (6cm)	0,029-0,038	1450	15-30	150-300	15,6
EPS (11cm)	0,033-0,042	1450	15	20-120	19,74
PF (6cm)	0,020	1400	40	35	18,35

Tabel 25: Eigenschappen van rotswol, glaswol en houtvezelisolatie. [42]

4.4.3. DRAGENDE BUITENPLAAT

Het dragende element in het paneel wordt initieel aan de buitenzijde van de VIP geplaatst, opdat het niet in de risicozone tussen het VIP paneel en de bestaande draagmuur zou zitten. Het paneel moet een voldoende hoge sterkte hebben en moet ook aan de gevolgen van hygrothermische belasting kunnen weerstaan.

Gelamineerd fineerhout – Laminated Veneer Lumber (LVL)

Dit type plaatmateriaal is samengesteld uit verlijmden dunne lagen fineerhout. Door de lagen een specifieke oriëntatie te geven krijgen de platen een relatief hoge sterkte en stijfheid. De afmetingen zijn, zoals alle gelamineerd hout, niet beperkt door de afmetingen van bomen. De maximale afmetingen worden dan ook uitsluitend door transport bepaald en liggen rond 2,5 x 24 meter. Het gebruikte hout heeft slechts een vochtgehalte van 10 tot 12 % en is dus uitstekend bestand tegen thermische vervormingen en aantastingen van ongedierte. De panelen zijn zeer vlak en hebben een hoge maatvastheid door de productie onder gecontroleerde omstandigheden. De bewerkbaarheid van gelamineerd fineerhout is vergelijkbaar met natuurlijk hout en kan aan de hand van CNC-zaagmachines heel nauwkeurig gebeuren. Ook andere voordelen van natuurlijke houtproducten zoals de hoge thermische weerstand en de uitstekende sterkte-gewichtsverhouding blijven toepasbaar.



Figuur 74: Laminated Veneer Lumber

Kruislings gelamineerd hout – Cross Laminated Timber (CLT)

Door naalddhouten planken geschrant op elkaar te verlijmen en samen te drukken worden grote massief houten platen gevormd. Door de dwarse schikking van de planken wordt de uitzetting en krimp sterk gereduceerd en verkrijgen de panelen een hoge vormvastheid. Door het vochtgehalte van het gebruikte hout tussen 10 en 14 % te houden wordt schade door insecten, schimmels of bacteriën vermeden. De panelen kunnen zeer grote afmetingen hebben tot 2,95 x 16,5 meter. CLT-platen kennen zowel vele dragende als niet-dragende toepassingen. De belangrijkste voordelen zijn de snelle en droge bouwmethode, de hoge maatvastheid en de duurzaamheid van de panelen. Producenten zijn Binderholz en Metsäwood.



Figuur 75: Cross Laminated Timber.

Multiplex – Plywood

Multiplex bestaat net als LVL uit een aantal lagen fineerhout die op elkaar gelijmd worden. Maar bij multiplex wordt de sterkterichting van de fineerlagen telkens eenvoudig afgewisseld. Zo wordt de werking van het hout geminimaliseerd en de totale sterkte en buigstijfheid van de platen verhoogd. Meestal wordt er gebruik gemaakt van berkenhout en naalddhout. Afhankelijk van de toepassing worden de verhoudingen van de verschillende houtsoorten aangepast. Een fabrikant van dergelijke panelen is Bruynzeel. Een voorbeeld van hun producten is Multipaint®, dit is een weer- en waterbestendig Okoume multiplex welke aan twee zijden is voorzien van een direct overschilderbare kunsthars folie. Doordat kunsthars de kunstharslaag met het dekfineer is versmolten, is deze zeer glad, stootvast en weersbestendig.



Figuur 76: Multiplex.

Vezelcementplaat

Vezelcement is een materiaal dat voornamelijk bestaat uit minerale grondstoffen (ongeveer 95%). Er worden versterkingsvezels aangebracht om tot de nodige sterkte te kunnen komen. De minerale vulmiddelen zorgen ervoor dat de gevelplaten of gevelstroken waterbestendig zijn.

De beeldzijde kan voorzien worden van een cederhoutstructuur en vervolgens afgewerkt met diverse coatings naargelang dekkende kleur of natuurlijke basiskleur. De voordelen van dit materiaal is dat het brandveilig en recycleerbaar is, niet zal rotten, onderhoudsvriendelijk, vormvast en vorstbestendig is. Een bekende producent is Eternit.



Figuur 77: Vezelcementplaat.

High Pressure Laminate [HPL] - Volkern

HPL platen - High Pressure Laminate platen bestaan uit phenolhars en cellulose en worden door verhitting en extreem hoge druk geproduceerd. Melaminehars is de hardste synthetisch gemaakte organische stof. Hieruit resulteert ook de grote slijtvastheid van de HPL. De taaie en elastische fenolkern maakt het materiaal slagvast. Deze eigenschappen gaan gepaard met een verregaande bestendigheid tegen chemicaliën en een grote hittebestendigheid. Het is vooral bekend onder de term volkern, die de producent Trespa eraan gaf. Trespa Meteon is een type HPL die voor buitentoepassingen gebruikt wordt.



Figuur 78: Trespa Meteon.

	λ -waarde [W/m.K]	c [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	μ	E-modulus [MPa]
LVL	0,15	1600	510	70-200	10500
CLT	0,13	2100	480	25-50	12000
Multiplex	0,13	1600	420-500	70-200	4000-8000
Vezelcement	0,39	1500	1580	30-50	> 12000
HPL-Volkern	0,30	-	1350	9100	9000

Figuur 26: Eigenschappen van LVL, CLT, Multiplex, Vezelcement en HPL.

4.4.4. GEVELAFWERKING

Geventileerde afwerking

De werking van dit gevelbekledingssysteem berust op de realisatie van een tweetrapsdichting. Dit houdt in dat er een fysieke scheiding gerealiseerd wordt tussen de gevelbekleding (die voor

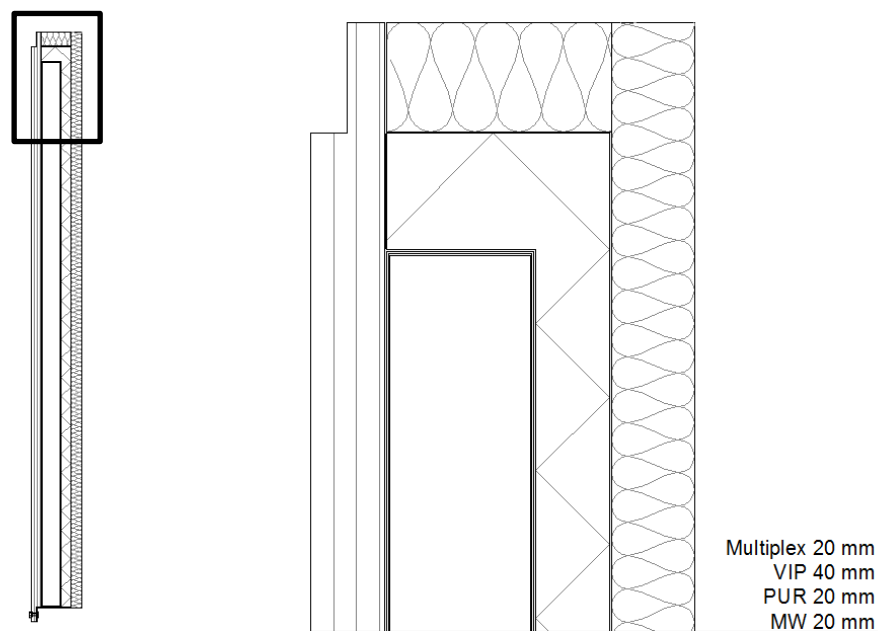
een betrouwbare waterdichting zorgt) en de binnen bepleistering (die de luchtdichtheid verzorgt). Deze luchtdichtheid zorgt ervoor dat het water dat door de gevelbekleding dringt en in de achterliggende spouw terecht komt, niet naar binnen geblazen wordt, maar naar buiten gedraineerd wordt. Om dit principe te laten werken, moet er een drukvereffening plaatsvinden tussen de spouw achter de gevelbekleding en de buitenomgeving. Deze wordt gerealiseerd door het ventileren van de spouw. Men moet bijgevolg niet enkel onderaan de gevelbekleding, maar ook ter hoogte van de aansluitingen rekening houden met afvloeiend spouwwater [WTCB]. De spouw in deze afwerking wordt vaak gerealiseerd door een houten lattenwerk, maar kan ook uitgevoerd worden met metalen profielen.

Niet geventileerde afwerking

Bij een niet geventileerde afwerking is geen spouw aanwezig in de opbouw en berust de werking dus op een eentrapsdichting. Er is hier dus maar één dichting tegen het water. Als het water hier door dringt komt het niet in een spouw terecht, maar direct in de muur zelf. Daarom moet de gevelbekleding van de eentrapsdichting perfect waterdicht zijn, terwijl de gevelbekleding bij spouwmuren wel wat water mag doorlaten. Een voorbeeld van een eentrapsdichting is een muur met buitenisolatie en gevelbepleistering.

4.4.5. KEUZE MATERIALEN

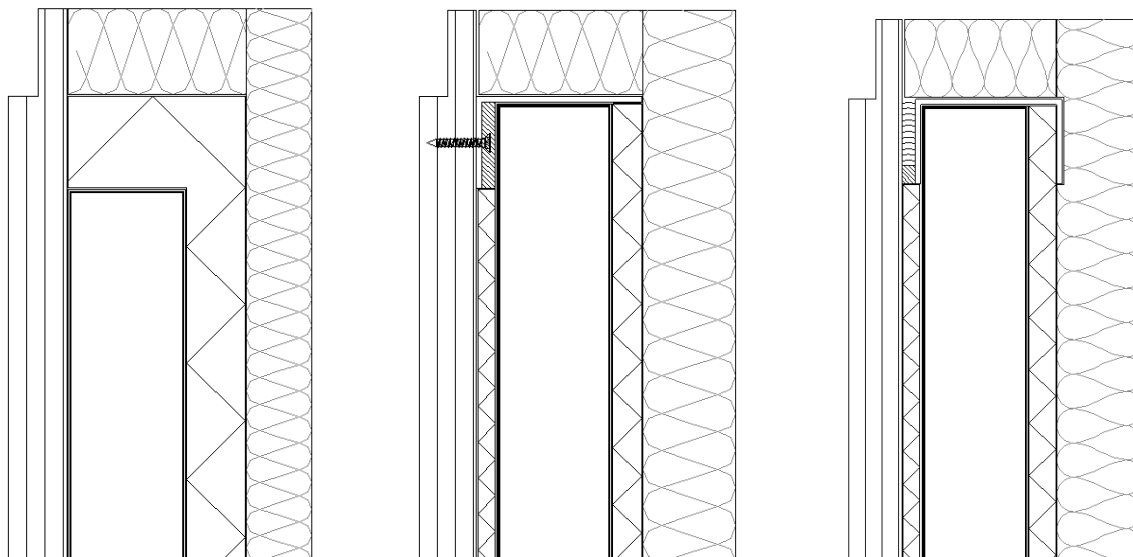
Voor de dragende buitenplaat wordt in het initiële ontwerp gekozen voor een multiplexplaat met een dikte van 20 mm. De beschermende isolatieplaat is een PUR-plaat met een dikte van 20 mm en om de oneffenheden op te vangen wordt een rotswoldeken gebruikt met een dikte van 20 mm. Er wordt vanuit gegaan dat de gevel nog een geventileerde afwerking kan krijgen. Bovenaan het paneel wordt een rotswolstrook voorzien van 30 mm om schroeven door het dragende paneel toe te laten die later zullen nodig zijn voor de mechanische bevestiging van het paneel [Fig. 79]. Het vacuümgeïsoleerd paneel heeft een dikte van 40 mm. Deze keuzes worden in het verloop van het verdere ontwerp nog in vraag gesteld en gewijzigd om de werking en de prestatie van het paneel te optimaliseren.



Figuur 79: Samenstelling van het initieel element

4.4.6. VERBINDINGSTECHNIKEN

De verschillende lagen worden op de dragende buitenplaat bevestigd. Hiervoor worden enkele mogelijkheden onderzocht. Hierbij is het van belang dat er gezocht wordt naar een manier waarop het VIP, indien nodig, optimaal gerecycleerd of vervangen kan worden. Daarom zal ze ingeklemd worden tussen het dragende paneel en de PUR plaat zonder eraan verlijmd te worden. Hiervoor worden drie mogelijkheden onderzocht. De verschillende oplossingen worden aan de hand van TRISCO geëvalueerd door de berekening van hun ψ -waarde en de invloed op de equivalente U-waarde van het paneel.



Figuur 80: Verbindingstechnieken: verticale snede doorheen bovenzijde paneel, 1. L-vorm (PUR); 2. Metalen hoekprofiel; 3. GFRP randprofiel.

L vormige PUR plaat rondom VIP

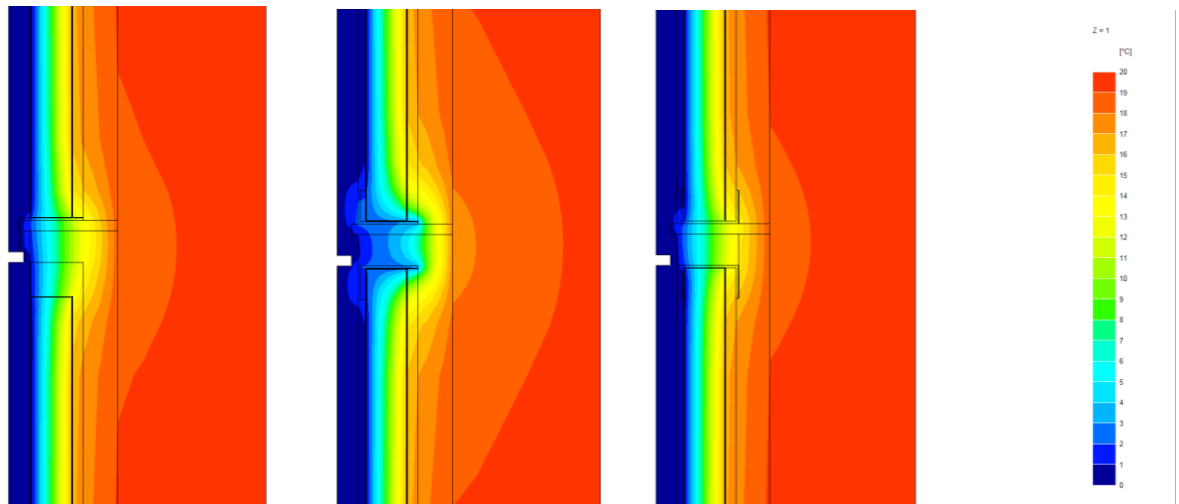
Hierbij omsluit de PUR plaat bovenaan het VIP en wordt ze verlijmd tegen de dragende buitenplaat. Een voordeel is dat de verbinding gedaan wordt door middel van een materiaal met een kleine warmtegeleidingscoëfficiënt. De dikte die nodig is om een voldoende stijve verbinding te maken is echter wel groter.

Metalen hoekprofiel

Hierbij wordt het hoekprofiel op de dragende plaat bevestigd en wordt eerst het VIP erin gelegd. Daarna wordt de PUR plaat aan de bovenkant verlijmd tegen het profiel. Om het VIP te beschermen tegen perforatie door het profiel aan de bovenzijde wordt het een extra beschermende laag voorzien aan de buitenzijde van het VIP. De laag toe dat het profiel voor het VIP komt. Hiervoor wordt opnieuw een PUR plaat gebruikt. De dikte van de plaat wordt verminderd tot 10 mm terwijl de minerale wol laag vermeerderd wordt tot 30 mm. Het profiel kan in staal of aluminium zijn en zal dus een hogere warmtegeleidingscoëfficiënt hebben.

GFRP randprofiel

Dit is een glasvezelversterkt kunststofprofiel en combineert een hoge sterkte met een laag gewicht. De warmtegeleidingscoëfficiënt (0,25-0,35 W/m.K) ligt ook veel lager dan die van metaal. De bevestiging van het profiel op de dragende buitenplaat wordt door middel van een elastische lijmlaag gedaan om uitzettingsverschillen te kunnen opnemen zoals beschreven in de masterproef van S. Van Audenhove.



Figuur 81: Berekening van ψ -waarde van verschillende verbindingssystemen in TRISCO: 1. L-vorm (PUR); 2. Metalen hoekprofiel; 3. GFRP randprofiel.

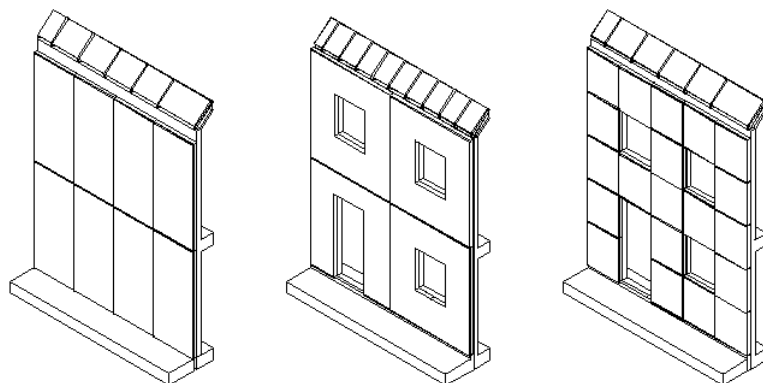
	U_1 [W/m ² .K]	A [m ²]	ψ [W/m.K]	L [m]	U_{eq} [W/m ² .K]	Aandeel ψ/χ [%]
PUR L-vorm	0,107	1,2	0,029	1	0,131	23%
Metalen hoekprofiel	0,104	1,2	0,066	1	0,159	53%
GFRP randprofiel	0,104	1,2	0,023	1	0,123	18%

Tabel 26: Berekening van ψ -waarde van verschillende verbindingssystemen in TRISCO: 1. L-vorm (PUR); 2. Metalen hoekprofiel; 3. GFRP randprofiel.

De verbinding door middel van het GFRP randprofiel geeft duidelijk de beste prestatie en wordt ook in het verdere ontwerpproces toegepast.

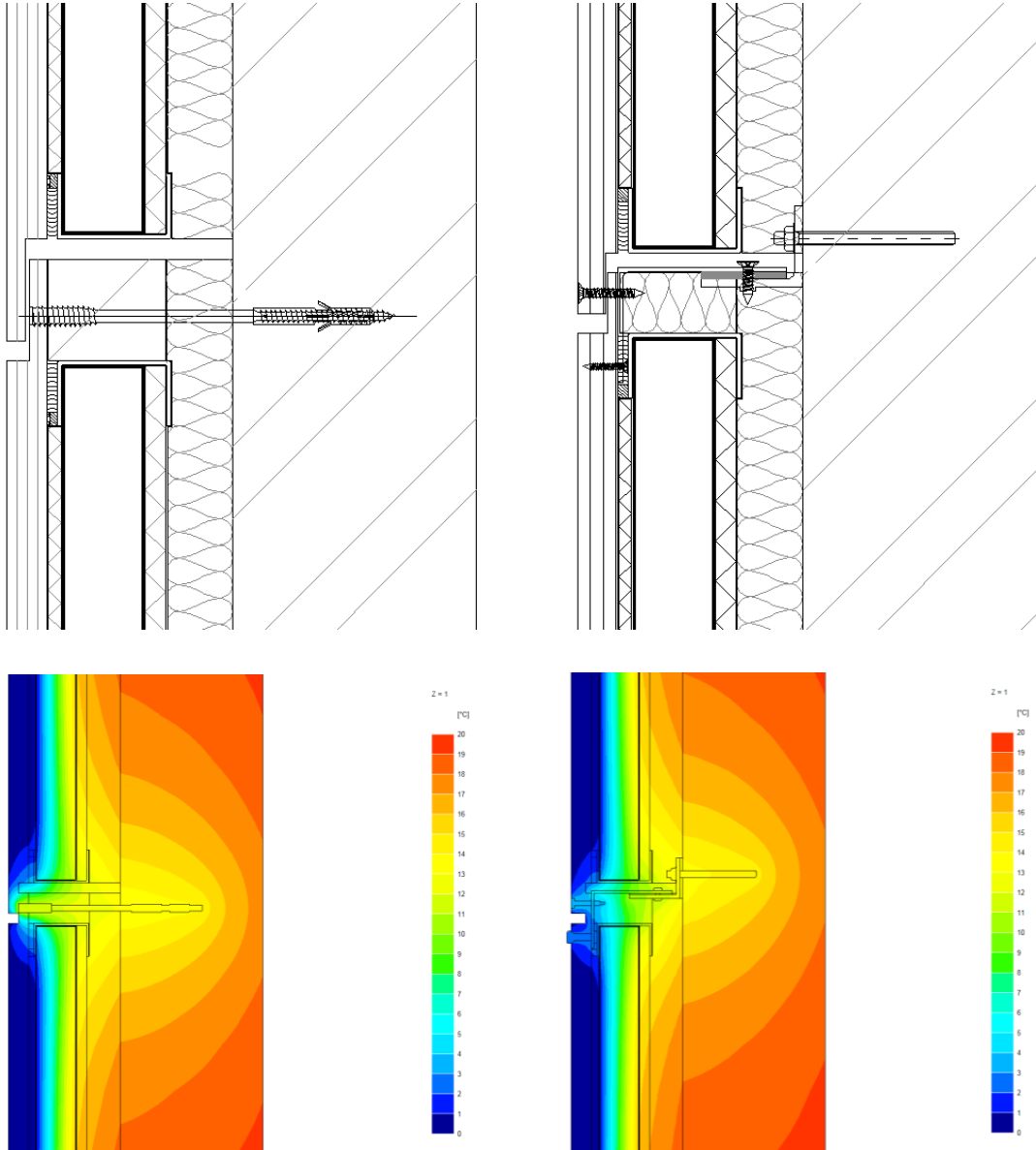
4.5. PANEELDIMENSIE

Zoals in de voorbeeldprojecten naar voor kwam kunnen de panelen op verschillende schalen gerealiseerd worden. Hierbij kan enerzijds gekozen worden voor kleinere panelen die met een minder complexe bevestiging, zoals bij sandwichpanelen, verankerd kunnen worden. Anderzijds kan ook gekozen worden voor grotere panelen, die een meer complexe verankering eisen. Als voordeel bieden deze laatste panelen wel de mogelijkheid om ramen en deuren te integreren, zodat de vernieuwing van de gevel op een snellere manier kan gebeuren.



Figuur 82: Verschillende paneeldimensies met en zonder raamintegratie.

Voor zowel een klein paneel als een groot paneel wordt een bevestigingssysteem gekozen en wordt de invloed op de equivalente U-waarde van het paneel onderzocht. Bij het kleine paneel wordt een plugsysteem gebruikt die gebaseerd is op het Facafix systeem van de fabrikant Borgh. Voor het grote paneel wordt gebruik gemaakt van een hoekanker die zal verbonden worden op een console die in de muur verankerd is.



Figuur 83: Bevestiging van klein paneel door middel van plugsysteem en bevestiging van groot paneel door middel van hoekanker en console - Berekening van invloed van paneeldimensie en ankersysteem op thermische prestatie paneel in TRISCO.

	U_1 [W/m ² .K]	A [m ²]	ψ [W/m.K]	L [m]	χ	aantal	U_{eq} [W/m ² .K]	Aandeel ψ/χ [%]
Klein	0,104	1,2	0,023	1	0,00025	4	0,123	18%
Groot	0,104	6,48	0,023	2,4	0,0014	4	0,113	8%

Tabel 27: Berekening van invloed van paneeldimensie en ankersysteem op thermische prestatie paneel in TRISCO.

De verankering van het kleine paneel heeft een kleinere invloed op het warmtetransport doorheen de gevel ter hoogte van de bevestiging. Dit valt af te lezen uit de resultaten door de berekening van de puntwarmtedoorgangscoefficiënt χ . Deze werd berekend aan de hand van de volgende formule:

$$\chi = \frac{Q3D - Q2D}{\theta_i - \theta_e}$$

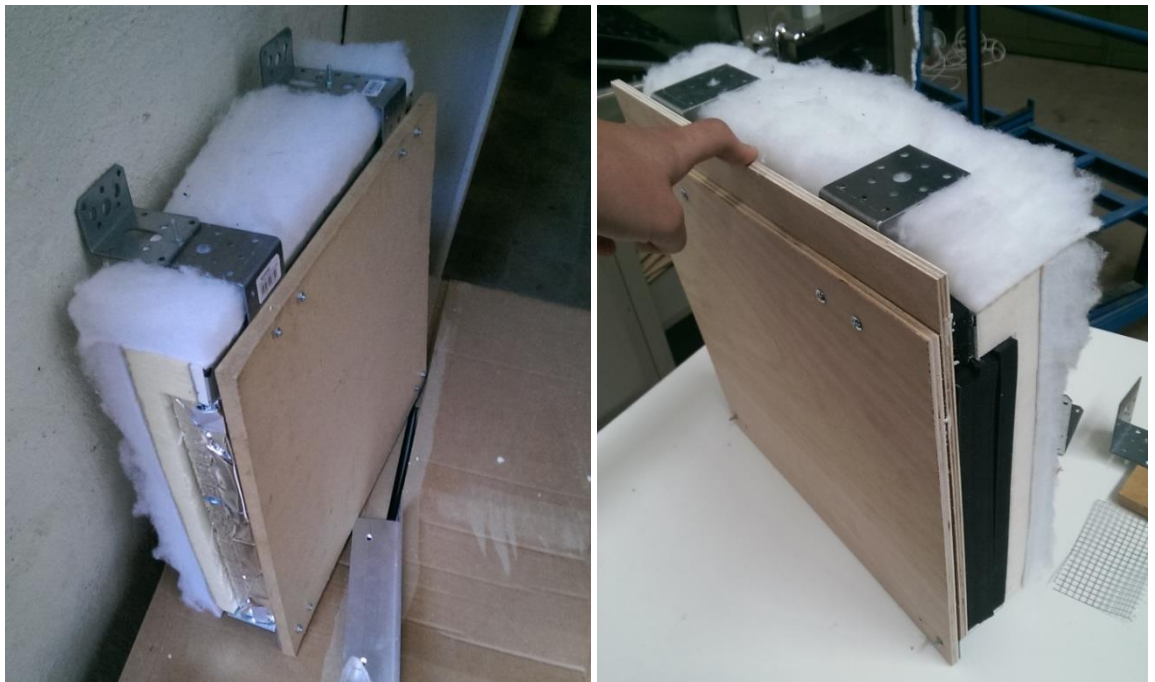
Het effect van de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt zal echter meer doorwegen en is groter bij het kleinere paneel door de verhouding tussen de oppervlakte en de randomtrek.

Er wordt gekozen om verder te streven naar een paneel met grotere dimensies omwille van de kleinere invloed van het randeffect, maar vooral om een paneel te verkrijgen waarin ramen en deuren geïntegreerd zijn en waarmee de renovatie van de gevel zo optimaal mogelijk kan gebeuren.

4.6. PANEELVERANKERING

4.6.1. HOEKANKER

De bevestiging door middel van het hoekanker wordt in dit deel verder toegelicht. De aansluitingen en de werking van het paneel werden getest door een prototype te maken. Op die manier werden wijzigingen getest en evolueerde de werking van het paneel. Om de verticale aansluiting tussen de panelen mogelijk te maken wordt de multiplex op de halve hoogte van het hoekprofiel bevestigd. Op die manier kan het bovenliggende paneel bevestigd worden op het bovenste gedeelte van het profiel. Om dit te kunnen uitvoeren wordt gebruik gemaakt van zelftappende schroeven die zich in het anker zetten. Hiervoor mag dit anker maximaal 3mm dik zijn⁵. Om de verticale aansluiting een goede regendichtheid te geven werd gekozen om te werken met een tand-groefverbinding.



Figuur 84: Prototypes in vroeger stadium, gebruik tand-groefverbinding.

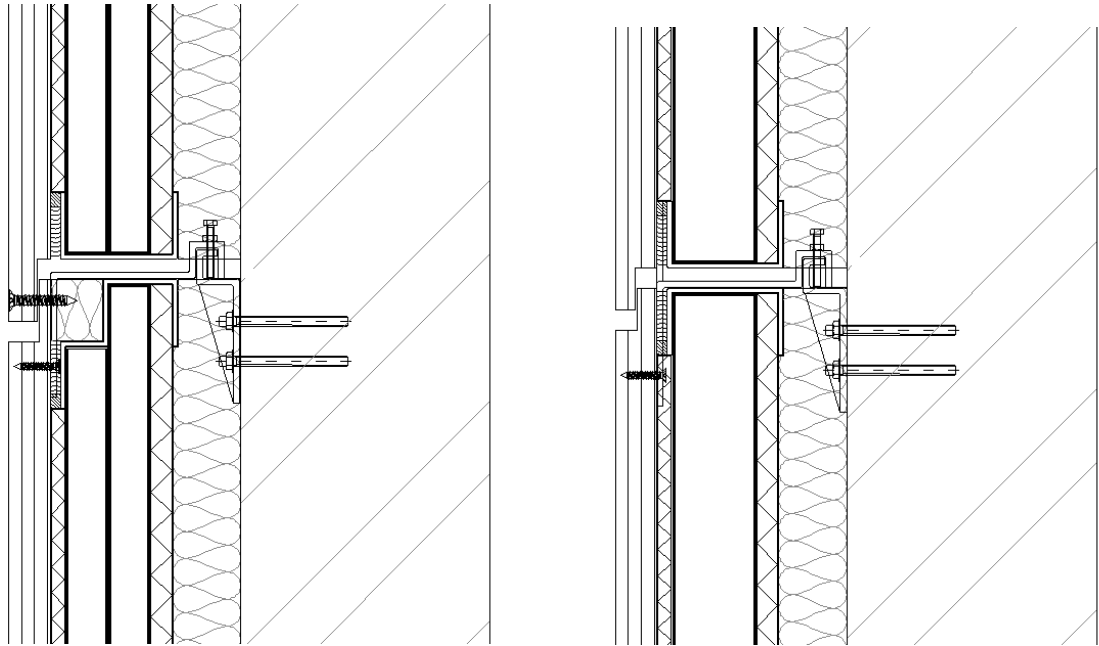
⁵ Productbeschrijving zelftappende schroeven Dejong Building systems

De verbinding tussen het hoekanker en de console wordt ook via schroeven gedaan. Eerder werd overwogen om dit via een boutstelsel te doen, maar hiervoor was niet voldoende plaats beschikbaar. De verbinding via schroeven vergt enkel een handeling van bovenaf. Hiervoor moet echter in de console reeds een schroefdraad aanwezig zijn. Deze zal namelijk dikker zijn dan 3mm en dus niet met zelf tappende schroeven kunnen uitgevoerd worden.

4.6.2. OPHANGANKER

Bij de verankering door middel van het hoekanker in verbinding met een console werd het bevestigen van de elementen nog steeds niet optimaal bevonden. Wanneer het anker op de console wordt geplaatst zal deze namelijk afschuiven, wat de bevestiging niet ideaal maakt. Ook de noodzakelijkheid van de strook minerale wol om handelingen uit te voeren werd in vraag gesteld. Daarom werd een ander bevestigingssysteem onderzocht. Het hoekanker evolueerde naar een profiel die aan de console kan opgehangen worden. De hoogte van het paneel kan hierbij nog bijgesteld worden door een regelschroef. De bovenliggende strook minerale wol die het vastbouten of vastschroeven van het anker op de console toe liet kan zo ook gereduceerd worden. Deze is wel nog noodzakelijk om vastschroeven van het onderste deel toe te laten. Om die reden werd het VIP opgesplitst opdat de tweede laag VIP's tot aan de rand van het profiel kan komen en zo dicht bij het bovenliggende paneel zal komen [Fig. 85, type 2]. Dit zorgt voor een verbetering van de ψ -waarde van 0,23 W/m.K naar 0,17 W/m.K. De equivalente U-waarde zal echter niet veranderen, dit doordat de oorspronkelijke U-waarde van de opbouw hoger zal liggen door de opsplitsing van de VIP's. Bij één paneel van 40 mm VIP is het aandeel van de folie namelijk kleiner dan bij twee keer 20 mm. De opsplitsing van de VIP's heeft als voordeel dat indien een van de panelen geperforeerd zou worden, de achterliggende nog steeds de thermische weerstand zal verzorgen. De kostprijs van het paneel zal echter wel stijgen.

Het vastschroeven van het paneel ter hoogte van de onderzijde van het element op het profiel werd ook herzien. Hierdoor werden de panelen onderling verbonden, wat het uitzetten van de panelen niet toe laat en wat zal resulteren in spanningen in het paneel. Om deze te vermijden werd het paneel onderaan voorzien van een kokerprofiel. Het oorspronkelijke hoekanker werd dan weer voorzien van een opgaand deel die in dit kokerprofiel past [Fig. 85, type 3]. Op die manier zal het opheffen van het paneel ten gevolge van windbelastingen tegengegaan worden, maar kan deze nog steeds verticaal bewegen ten gevolge van uitzetten. Op die manier is de zichtbare schroef ook niet langer nodig alsook de strook minerale wol die het vastschroeven toeliet. Het VIP paneel hoeft zo ook niet langer opgesplitst te zijn. Dit zorgt opnieuw voor een verbetering van de equivalente U-waarde van het paneel. Voor de ψ -waarde wordt opnieuw 0,17 W/m.K. bekomen, maar omdat de initiële U-waarde lager ligt zal de equivalente U-waarde dalen van 0,113 W/m.K. naar 0,110 W/m.K..



Figuur 85: Wijzigingen in paneelverbinding door nieuw verankering systeem; links: type 2; rechts: type 3.

	U_1 [W/m ² .K]	A [m ²]	ψ [W/m.K]	L [m]	χ	aantal	U_{eq} [W/m ² .K]	Aandeel ψ/χ [%]
Type 1	0,104	6,48	0,023	2,4	0,0014	4	0,113	8%
Type 2	0,107	6,48	0,017	2,4	0,0016	4	0,113	6%
Type 3	0,104	6,48	0,017	2,4	0,0013	4	0,110	6%

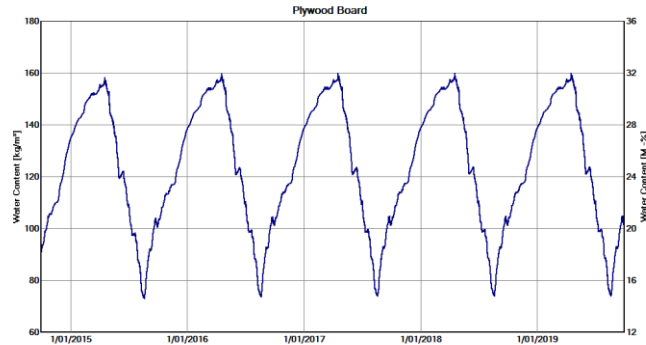
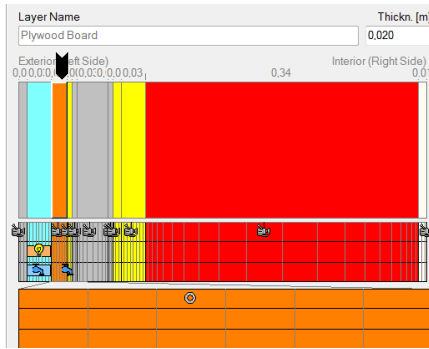
Tabel 28: Invloed van de ontwerpbeslissingen op de thermische prestatie van het paneel berekend in TRISCO.

4.7. HYGROTHERMISCHE ANALYSE

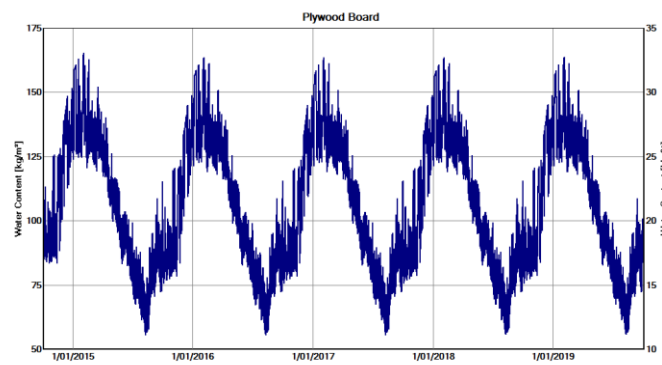
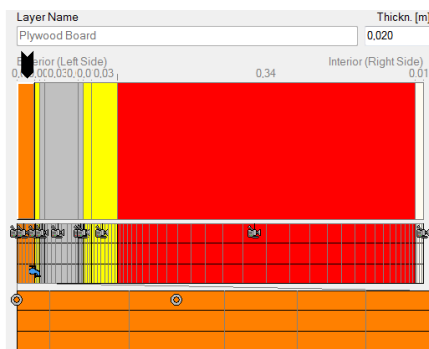
Net zoals in het voorgaande hoofdstuk wordt ook het hygrothermische gedrag van het element in rekening gebracht. De paneelaannames werden opnieuw in WUFI ingevoerd en er werd nagegaan of het element kan weerstaan aan de hygrothermische belasting.

4.7.1. BUITENPANEEL:

Bij de conceptualisering van het element werd het dragende paneel aan de buitenzijde voorzien, opdat het niet ingesloten zou zijn tussen de dampdichte VIP en de bestaande draagmuur. Dit omdat in de voorbeeldprojecten bleek dat hier beter geen vochtgevoelige materialen geplaatst worden. De multiplexplaat kan aan de buitenzijde dan wel drogen, toch wordt nagegaan indien deze de norm van Viitanen ($M\% > 20$ max 720h/jaar ; $M\% > 25$: max 168h/jaar) zal overschrijden. Dit wordt nagegaan voor zowel het element met als zonder een geventileerde afwerking



Figuur 86: Simulatie van het vochtgehalte in de multiplexplaat met een geventileerde gevelafwerking over een periode van 5 jaar.

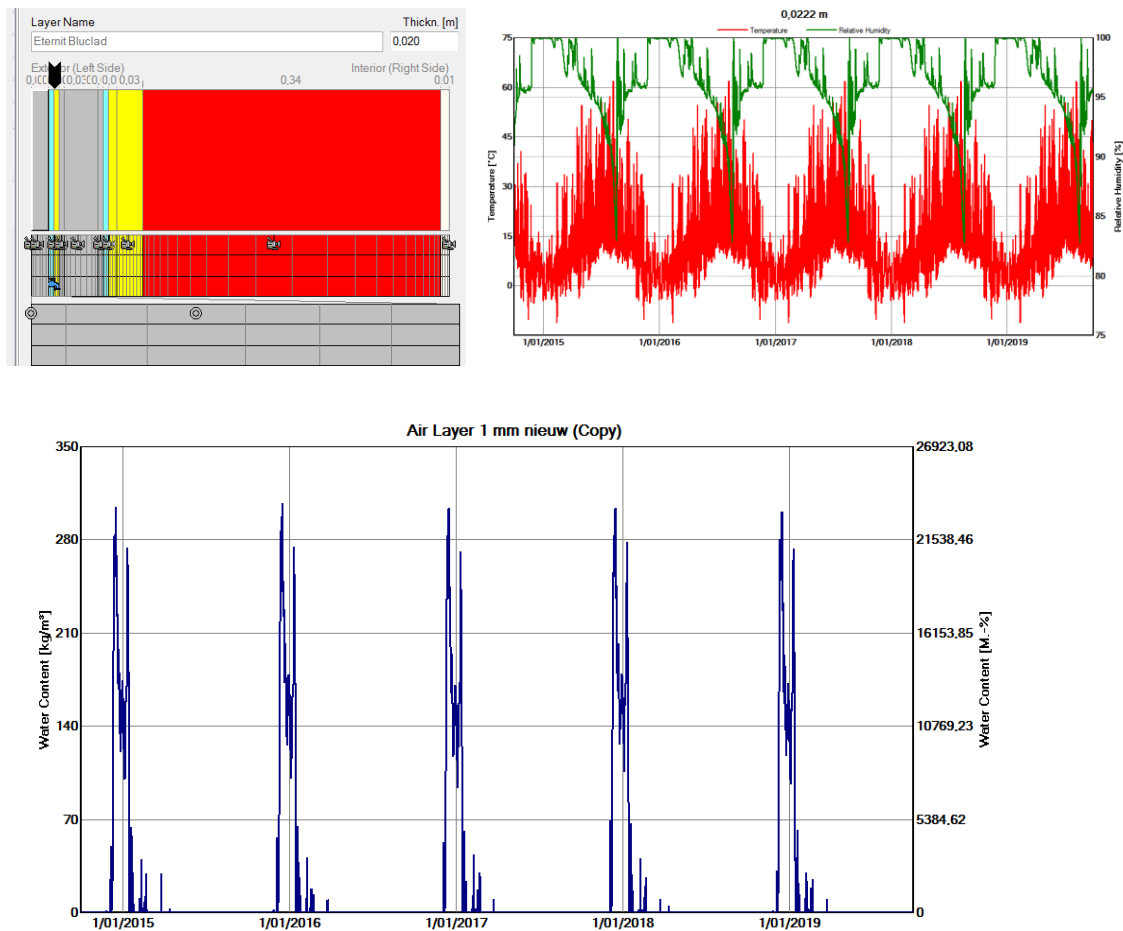


Figuur 87: Simulatie van het vochtgehalte in de multiplexplaat zonder gevelafwerking over een periode van 5 jaar.

In beide gevallen zal de massavochtpercentage overschreden worden, het dragende multiplexplaat kan dus niet zomaar gebruikt worden. Dit kan opgelost worden door er een beschermende laag op aan te brengen. Er wordt echter gekozen om de plaat te vervangen door een materiaal die niet gevoelig is aan vocht. Hiervoor kon gekozen worden tussen een vezelcementplaat of een volkernplaat. Er werd gekozen voor een volkernplaat, omdat deze eerder als afwerkingslaag kan gebruikt worden en het frezen voor de tand-groefverbinding toelaat.

4.7.2. BESCHERMENDE LAAG

Bij de keuze voor het element zonder geventileerde afwerkingslaag resulteert dit in een hoog vochtpercentage van de dragende plaat. De achterliggende laag, die de VIP beschermt, zal hier ook aan onderhevig zijn. Om die reden wordt gekeken naar de relatieve vochtigheid en het vochtgehalte in deze laag. Hierbij wordt een vochtbron toegevoegd, ter grootte van 1% van de regen die op het oppervlak valt [4].

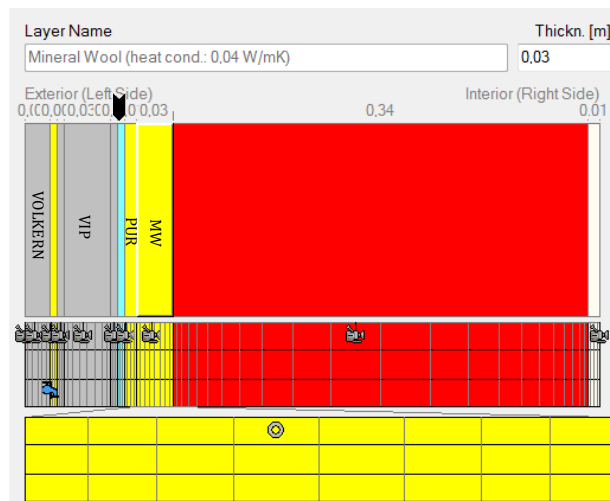


Figuur 88: Simulatie van de relatieve vochtigheid en het watergehalte ter hoogte van de binnenzijde van de multiplexplaat over een periode van 5 jaar.

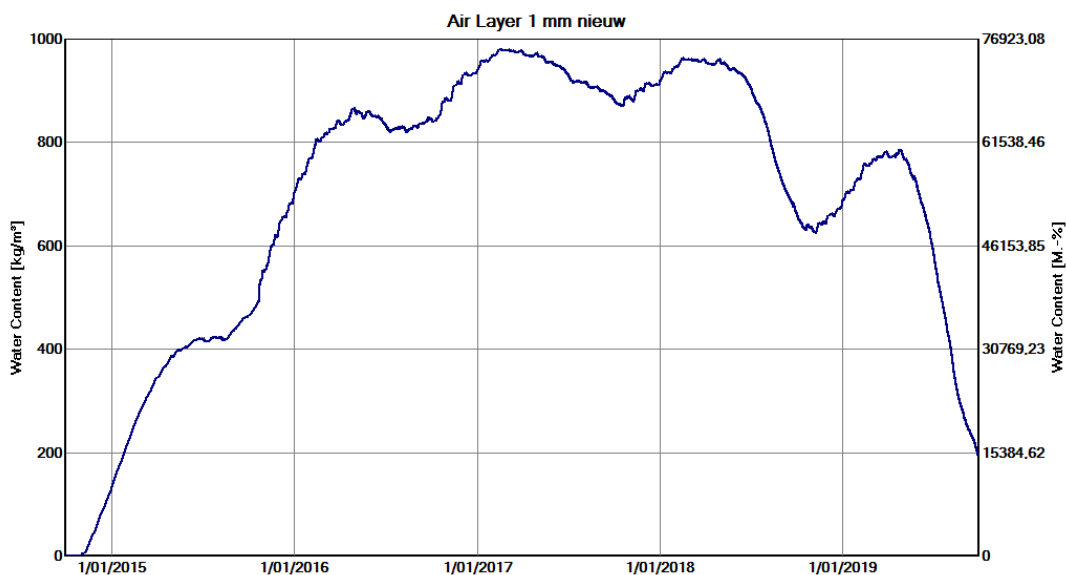
Uit de resultaten blijkt dat de relatieve vochtigheid de 100% zal overschrijden en er ook condensvorming kan optreden. Het materiaal van de beschermende laag moet dus ook vochtbestendig zijn. De PUR laag wordt hierdoor vervangen door een XPS laag.

4.7.3. ZONE TUSSEN VIP-FOLIE EN BESTAANDE DRAAGMUUR

In de zone tussen de binnenste VIP folie en de draagmuur werden geen vochtgevoelige materialen geplaatst. Het risico op condensatie, door het vrijkomen van het initieel vochtgehalte in de bestaande draagmuur, moet echter nog nagegaan worden. Hiervoor wordt de relatieve vochtigheid en het watergehalte gesimuleerd ter hoogte van de binnenzijde van het VIP element. TV 215 [49] stelt dat het vochtgehalte niet boven de 200 g/m^2 mag gaan. Zolang deze niet bereikt wordt zullen er niet genoeg druppels condenseren en coaguleren waardoor er geen aflopen zal starten. Om dit in WUFI na te gaan wordt een luchtlaag met goede wateropname met een dikte van 1 mm aan de binnenzijde van het VIP gesimuleerd. De resultaten van het vochtgehalte worden weergegeven in kg/m^3 . Om de limiet van 200 g/m^2 te testen wordt deze omgerekend naar kg/m^3 . Hieruit volgt dat het vochtgehalte in het luchtlaagje lager moet blijven dan 200 kg/m^3 .

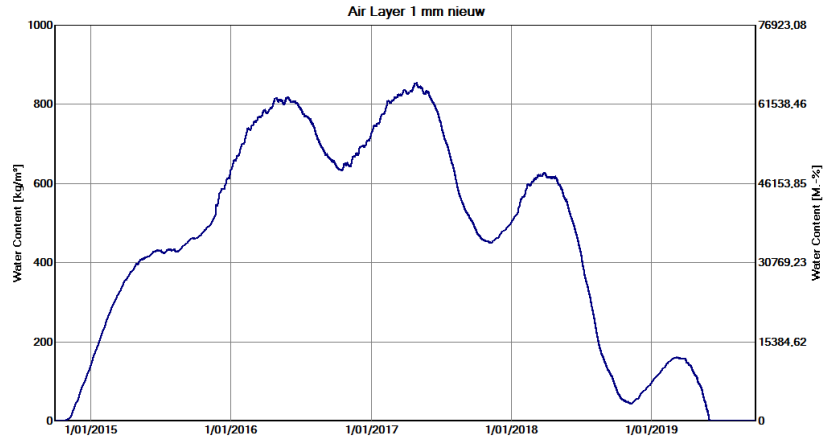


Figuur 89: Opbouw in WUFI: Simulatie van de relatieve vochtigheid en het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje over een periode van 5 jaar.

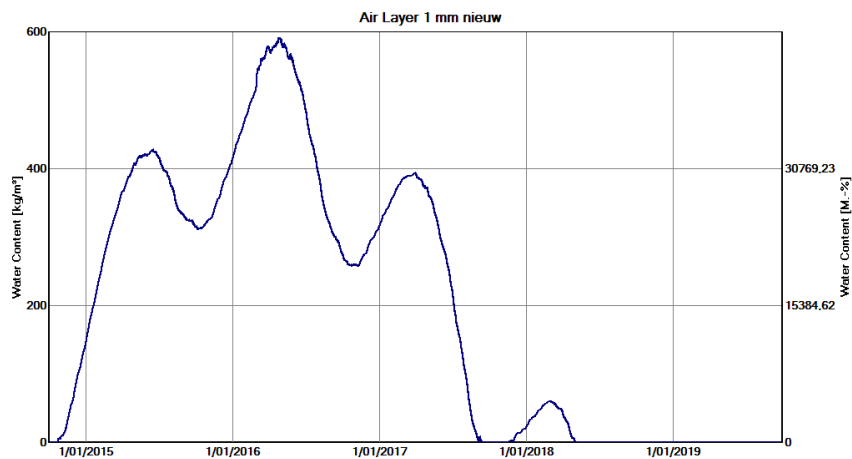


Figuur 90: Simulatie van de het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie.

De simulatie van de opbouw van het element toont dat het risico op condensvorming groot is, het vochtgehalte overschrijdt namelijk ruim de limiet van 200 kg/m^3 . De condensvorming komt voor, omdat de dampstroom stopt of geremd wordt aan het oppervlak van het VIP. Er wordt nagegaan of de limiet nog zal overschreden worden indien de dikte van de minerale wol verminderd wordt. Zo zal het binnenoppervlak van de VIP warmer zijn en zal de aanwezige waterdamp minder snel condenseren. De dikte van de minerale wol laag wordt achtereenvolgend gereduceerd tot 20 en tot 10 mm.

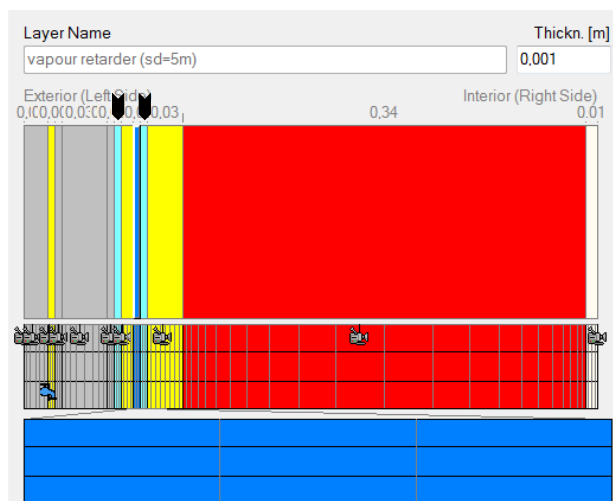


Figuur 91: Simulatie van de het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Met reductie van dikte MW-laag naar 20 mm.

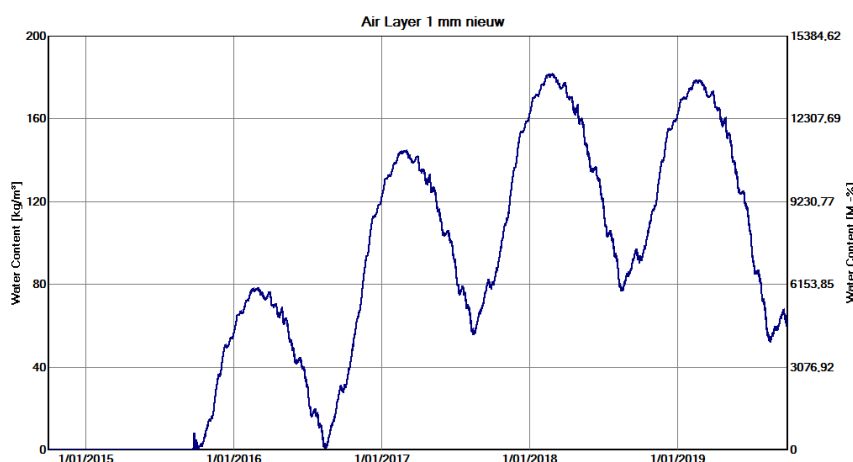


Figuur 92: Simulatie van de het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Met reductie van dikte MW-laag naar 10 mm.

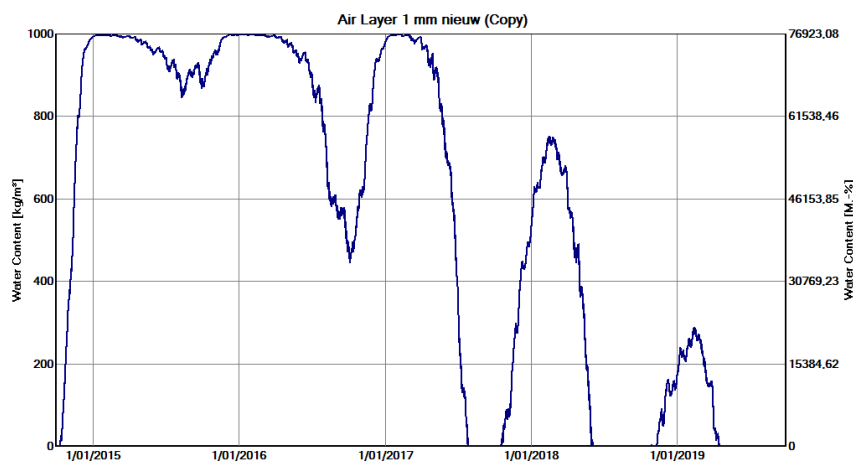
Uit de resultaten blijkt dat het reduceren van de laagdikte van de minerale wol wel degelijk een verlaging van het vochtgehalte met zich meebrengt. Deze verlaging is echter niet voldoende om aan de limiet te voldoen. Andere bouwkundige aanpassingen moeten dus uitgevoerd worden. Hiervoor wordt een dampscherm in het element verwerkt. Deze wordt verwezenlijkt door een aluminiumfolie op de binnenzijde van de PUR laag te voorzien. Er werd vervolgens nagegaan welke equivalente luchtlaagdikte nodig was om condensatie ter hoogte van de binnenzijde van het VIP te vermijden.



Figuur 93: Opbouw in WUFI: Simulatie van het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Met invoer van dampscherm met $S_d:5\text{m}$.



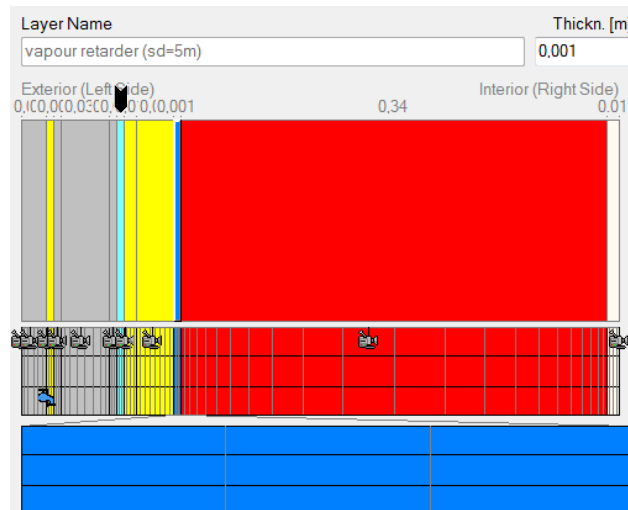
Figuur 94: Simulatie van het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje aan binnenzijde VIP over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Met invoer van dampscherm met $S_d:5\text{m}$.



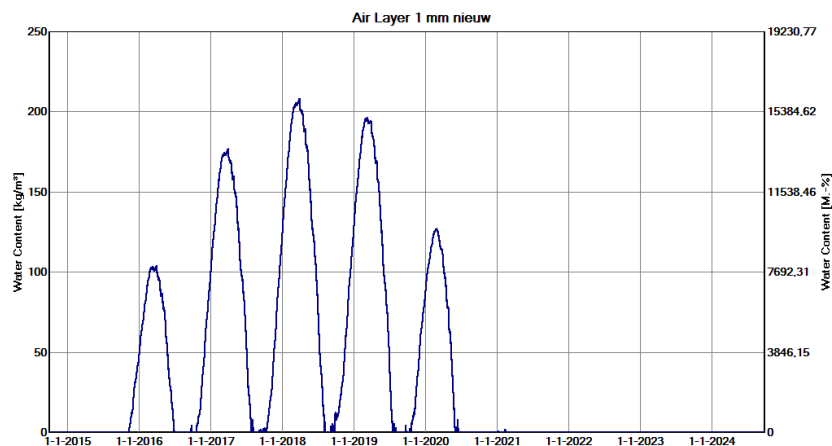
Figuur 95: Simulatie van het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje aan de binnenzijde van het dampscherm over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Met invoer van dampscherm met $S_d:5\text{m}$.

Uit de resultaten blijkt dat het dampscherm minimaal een Sd-waarde van 5m mag hebben. Hieruit kan echter niet geconcludeerd worden dat de kans op condensatie uitgesloten is, de plaats waar condensatie zal optreden werd door deze ingreep gewijzigd. Deze zal nu plaats vinden aan de binnenzijde van het ingevoerde dampscherm en uit de resultaten blijkt dat deze bij een dampscherm met een Sd-waarde van 5m wel degelijk zal optreden.

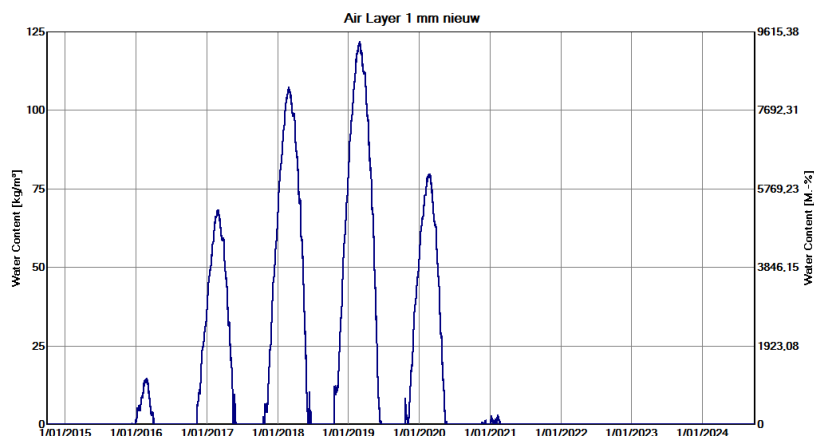
De plaats van het dampscherm moet dus herzien worden. Deze wordt verlegd naar de binnenzijde van het element. Opnieuw wordt nagegaan welke Sd-waarde het dampscherm dient te hebben. Daarnaast wordt ook gekeken naar de invloed op de binnenisopleet. Het aanwezig vocht zal namelijk moeilijker naar buiten kunnen uitdrogen en zal zich naar binnen verplaatsen.



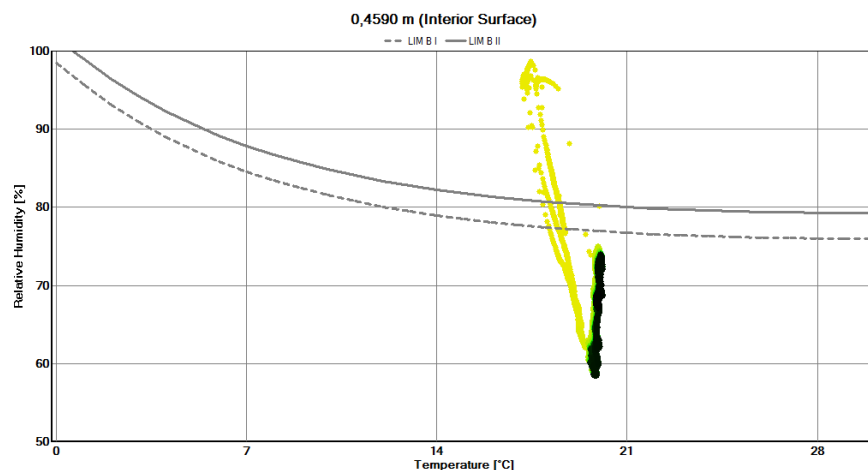
Figuur 96: Opbouw in WUFI: Simulatie van het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje aan de binnenzijde van het dampscherm over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Met invoer van dampscherm met Sd:5m aan buitenzijde draagmuur.



Figuur 97: Simulatie van het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje aan binnenzijde VIP over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Met invoer van dampscherm met Sd:5m aan buitenzijde draagmuur.



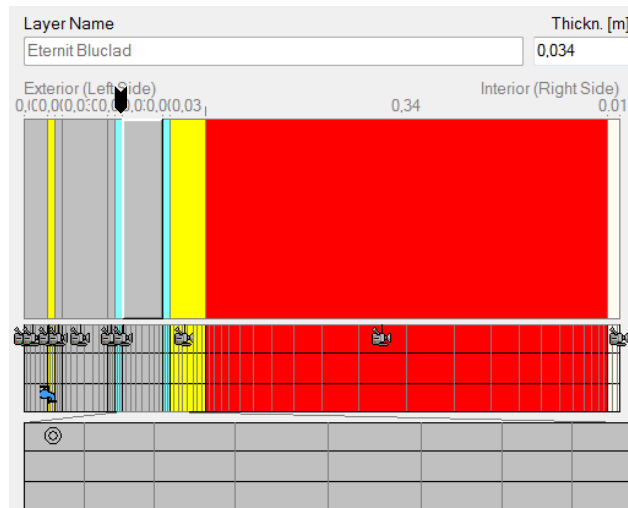
Figuur 98: Simulatie van het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje aan binnenzijde VIP over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Met invoer van dampscherm met $S_d:10\text{m}$ aan buitenzijde draagmuur.



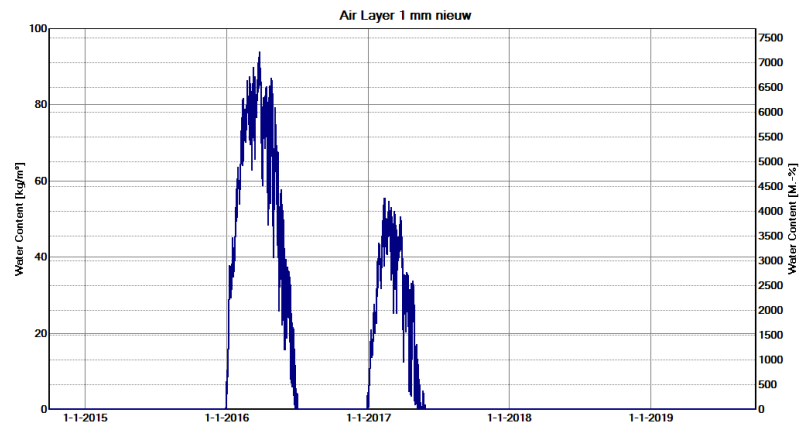
Figuur 99: Simulatie de binnenisopleet over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Met invoer van dampscherm met $S_d:5\text{m}$ aan buitenzijde draagmuur.

Uit de resultaten blijkt dat het dampscherm minimaal een S_d -waarde gelijk aan 10 m moet hebben. De invloed op de vochtigheid van het binnenklimaat blijkt niet nefast. Deze oplossing is bouwkundig echter moeilijk te realiseren. Het dampscherm is moeilijk te integreren in het element, omdat deze zich op de rand van de laag minerale wol zit en hier moeilijk een dampscherm op aan te brengen is. Het dampscherm zou dus gerealiseerd moeten worden op de bestaande draagmuur, alvorens er de gevelelementen op aan te brengen.

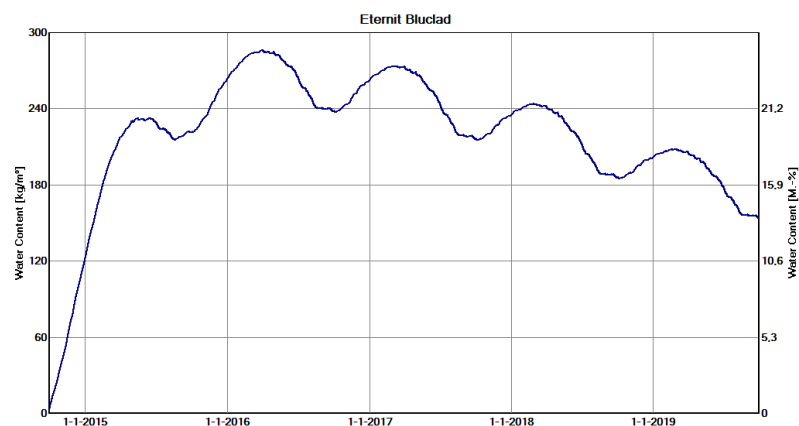
Om de oplossing in het element zelf te integreren wordt verder gezocht naar een andere opbouw die het risico op condensatie uitsluit. Het invoegen van een laag die het vocht kan opnemen en zo de dampstroom buffert, leidde tot goede resultaten. Zo werd het dragende paneel naar binnen geplaatst en werd deze uitgevoerd in vezelcement. Op die manier komt het bevestigingsprofiel ook dichter tegen de console en zal de krachten zo efficiënter kunnen overdragen. Hierdoor zal ook de puntwarmtedoorgangscoefficiënt kleiner zijn. Aan de buitenzijde wordt de dikte van de volkernplaat gereduceerd. Deze heeft nog een beschermende functie tegen en verzorgt de waterdichtheid.



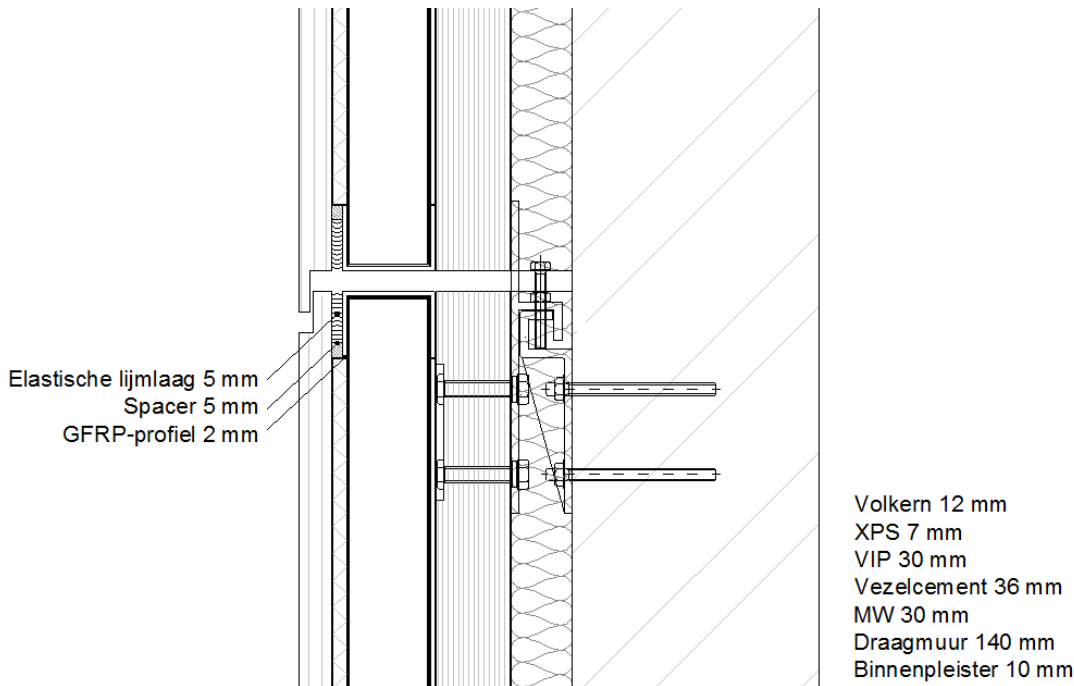
Figuur 100: Opbouw in WUFI: Simulatie van het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje aan binnenzijde VIP over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Dragend paneel naar binnen geplaatst en in vezelcement.



Figuur 101: Simulatie van het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje aan binnenzijde VIP over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Dragend paneel naar binnen geplaatst en in vezelcement.



Figuur 102: Simulatie van het watergehalte ter hoogte van het fictieve luchtlaagje aan binnenzijde VIP over een periode van 5 jaar, met 200kg/m^3 als limiet voor condensatie. Dragend paneel naar binnen geplaatst en in vezelcement.



Figuur 103: Bevestiging en aansluiting van paneel type 4: verplaatsing van dragend paneel in vezelcement naar binnen.

	U_1 [W/m ² .K]	A [m ²]	ψ [W/m.K]	L [m]	χ	aantal	U_{eq} [W/m ² .K]	Verhoging [%]
Type 3	0,104	6,48	0,017	2,4	0,017	4	0,110	6%
Type 4	0,106	6,48	0,019	2,4	0,00005	4	0,113	7%

Tabel 29: Invloed van wijziging bevestiging en aansluiting paneel type 4 op de thermische prestatie.

Door de wijziging van de samenstelling van het paneel zal de U-waarde en de ψ -waarde automatisch ook wijzigen. Doordat de PUR plaat vervangen wordt zal de U-waarde van de opbouw stijgen van 0,104 naar 0,106 W/m².K. De ψ -waarde stijgt van 0,017 naar 0,019 W/m.K en de resulterende equivalente U-waarde wordt 0,113 W/m².K.

4.8. STRUCTURELE ANALYSE

De nodige dikte van het dragende paneel wordt berekend aan de hand van de maximale doorbuiging van het paneel. Deze wordt bepaald als maximum 1/200 van de lengte van het paneel om te kunnen weerstaan aan de windbelasting (2kN/m) die op het paneel inwerkt. Aangezien het paneel bovenaan en onderaan wordt verankerd kan de werking van het paneel voorgesteld worden als een balk op twee steunpunten. De maximale doorbuiging wordt dan bepaald door de volgende vergelijking:

$$\Delta_{max} = \frac{5pl^4}{384 EI}$$

Door Δ_{max} gelijk te stellen aan 1/200 kan hieruit de minimale dikte van het paneel afgeleid worden. Voor een klein element moet het dragende paneel minimum een dikte van 21 mm hebben, voor het uitgewerkte paneel is dit minimum 47 mm.

L [m]	1,2	2,7	E vezelcement [MPa]	12000
B [m]	1,2	1,2	p [kN]	2
d _{min} [m]	0,021	0,047		

Tabel 30: Berekening van dikte dragend paneel met twee steunpunten.

Om de dikte van het element te verminderen wordt gekozen om een extra steunpunt toe te voegen aan het paneel. Dit op de halve hoogte van het paneel. Deze werkt op dezelfde manier als de bovenverankering. Hierdoor verandert de momentlijn van het paneel en wordt de maximale doorbuiging door de volgende vergelijking bepaald:

$$\Delta_{max} = \frac{pl^4}{185 EI}$$

L [m]	1,2	2,7	E vezelcement [MPa]	12000
B [m]	1,2	1,2	p [kN]	2
d _{min} [m]	0,016	0,035		

Tabel 31: Berekening van dikte dragend paneel met drie steunpunten.

4.9. WATERDICHTHEID

Statische waterdichtheidstest: EN 12155 (2000)

Om de waterdichtheid van een gevelement te bepalen wordt de norm EN 12155 gebruikt, deze is van toepassing op zowel de vaste als de opengaande delen. Het testelement wordt aan de buitenzijde onderworpen aan een continue besproeiing met water en een positieve, statische luchtdruk. De controle op waterdichtheid wordt vervolgens visueel uitgevoerd.

Opstelling:

Een testelement wordt in een luchtdichte kast gemonteerd. Hiervoor werd een kast gemaakt van 1x1 m en worden vier elementen van 0,5x0,5m bevestigd. Op die manier kan zowel de horizontale als de verticale naad getest worden. Alle andere buitennaden worden afgeplakt. Om een gecontroleerde druk op de binnenzijde van de kast uit te oefenen zal deze voor een opening geplaatst worden waarin een luchtdrukinstallatie voorzien is. Om geen drukverliezen te hebben langs de randen wordt een zwelband aangebracht aan de rand van het kader en wordt deze met druk tegen de muur aangebracht. Vervolgens werd door middel van een rookmachine gezocht naar openingen waar nog drukverliezen voorkwamen. Eens de luchtdichtheid van de kast verzekerd is, wordt een sproeisysteem geïnstalleerd in de kast die water aan een debiet van 2l/min m² als een continue waterfilm aan de buitenzijde van de testgevel sproeit met een nauwkeurigheid van 10%. Het sproeisysteem bevat sproeikoppen in een grid met een uniforme afstand tot de buitenkant van de testgevel. De sproeikoppen hebben een conische kop, sproeien in een hoek tussen 90° en 120° en hebben een drukbereik van 2 tot 3 bar. De voorzijde wordt met een plexiglas afgewerkt die visuele controle toelaat. Hierbij wordt opnieuw toegezien dat de randen luchtdicht zijn.



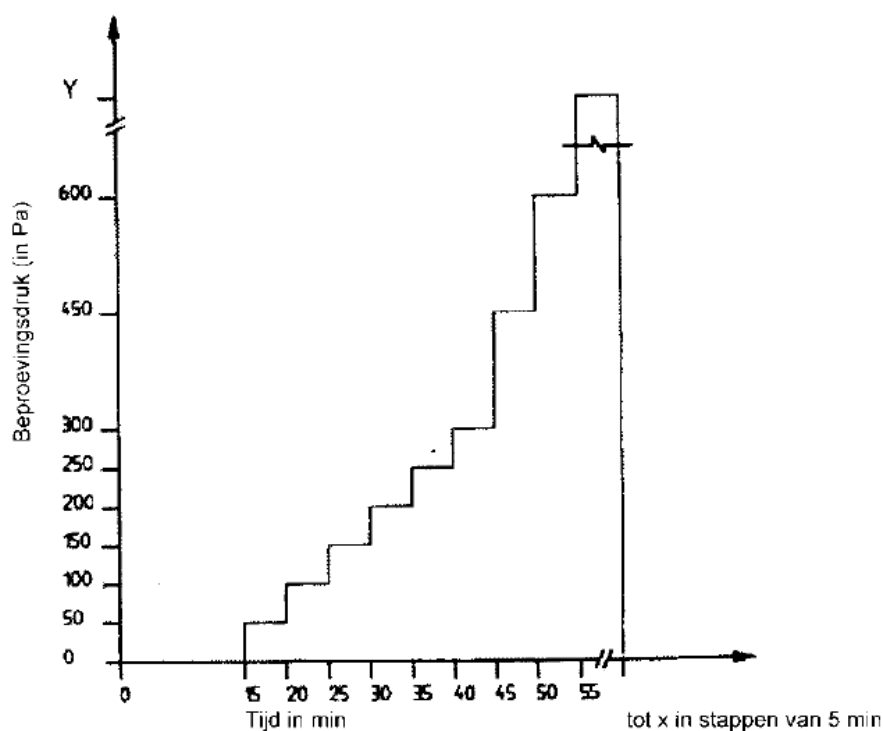
Figuur 104: Bevestiging testelement in luchtdichte kast; testmuur met drukinstallatie en water af- en toevoer; sproeikoppen in een hoek tussen 90° en 120°; opsporen van luchtlekken door middel van rookinstallatie.

Testprocedure

Bij de aanvang van de test worden eerst drie pulsen uitgevoerd met een druk van 500 Pa. Hierna wordt het oppervlak bij een druk van 0 Pa gedurende 15 minuten besproeid met een waterstroom van 2l/m²min. Daarna wordt de testdruk in stappen van 5 minuten verhoogd. Gedurende de test wordt visueel nagegaan of er waterlekken zijn. Indien er water doorheen het testelement zal komen zal dit opgevangen worden in een gootje achteraan de kast en zal dit naar een emmer stromen die toelaat om de hoeveelheid te wegen.



Figuur 105: Achterzijde van kast met goot om water weg te leiden.



Figuur 106: Drukverloop bij statische waterdichtheidstest EN 12155 [16].

EN 12154 (2000)

Deze norm legt de eisen vast waaraan een gordijngewel moet voldoen om in een bepaalde classificatie te vallen. Om in een welbepaalde klasse terecht te komen mag er geen waterinfiltratie gebeuren gedurende de test bij alle testdrukken tot en met de maximale testdruk.

Classificatie

Er zijn vijf klassen die onderscheiden kunnen worden door de testdruk die wordt toegepast gedurende de waterdichtheidstest. De klassen worden weergegeven in onderstaande tabel:

Class	Pressure steps in Pa and test duration in minutes, Pa/T	Water spray rate, l/min m ²
R4	0/15; 50/5; 100/5; 150/5	2
R5	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 200/5; 300/5	2
R6	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 200/5; 300/5; 450/5	2
R7	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 200/5; 300/5; 450/5; 600/5	2
RE xxx	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 200/5; 300/5; 450/5; 600/5; above 600/5 in steps of 150 Pa and 5 minutes duration.	2

Tabel 32: Drukstappen waterdichtheidstest per klasse [15]

Maximum test pressure $P_{\max}$ in Pa	Classification
150	R4
300	R5
450	R6
600	R7
Above 600	RE xxx

Tabel 33: Classificatie na waterdichtheidstest [15]

Resultaten:

Druk [Pa]	Tijd [min]	Waarneming
0 Pa	15	geen water
50 Pa	5	geen water
100 Pa	5	geen water
150 Pa	5	geen water
200 Pa	5	geen water
250 Pa	5	geen water
300 Pa	5	geen water
450 Pa	5	geen water
600 Pa	5	geen water

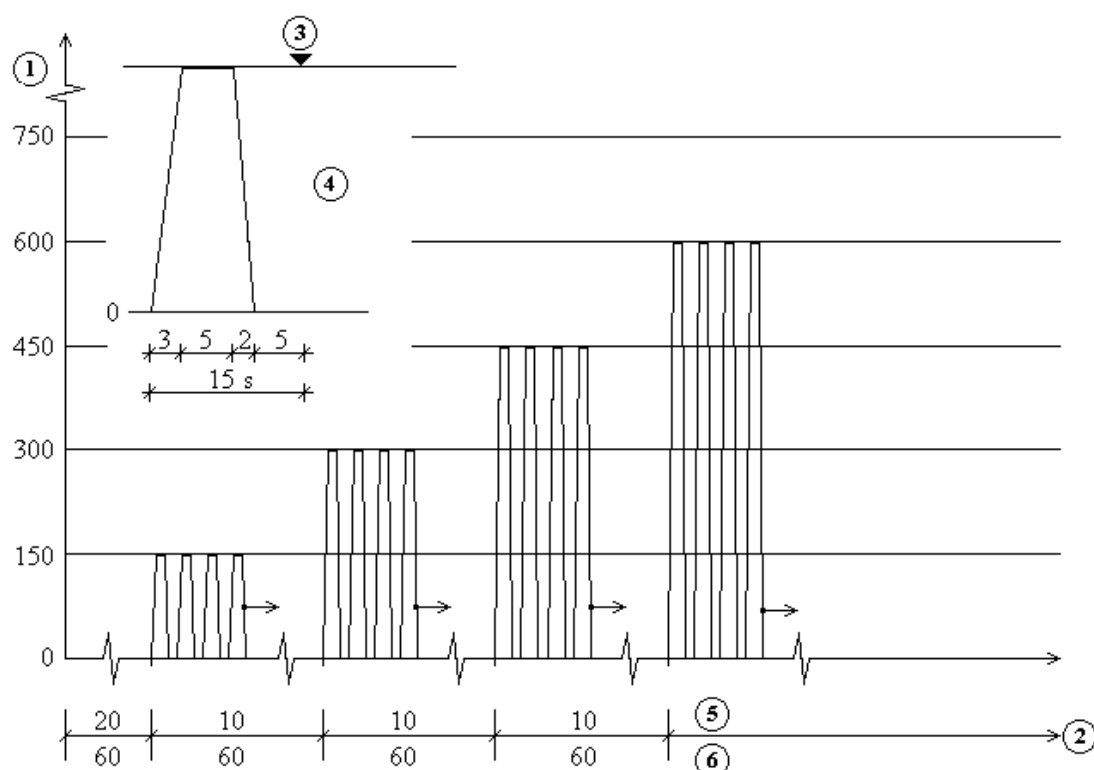
Tabel 34: Resultaten statische waterdichtheidstest

Cyclische waterdichtheidstest EN 12865 (2001)

Naast de statische test wordt ook een cyclische waterdichtheidstest op de gevel uitgevoerd. Alvorens met de proef te beginnen moet het testelement terug droog zijn. Het opleggen van de druk verloopt hier niet zoals in de statische proef volgens een trapverloop, maar er worden drukpulsen op de gevel uitgeoefend. In de norm wordt de opbouw van de pulsen voor een cyclische waterdichtheidstest met een totale duur van 15 ± 1 sec per puls besproken. Er wordt een debiet van 2l/min.m^2 op de gevel gespreid.

Testprocedure

Er zijn twee testprocedures: methode A en methode B. Methode A dient als korte proef, om kwalitatief te testen of er al dan niet water binnendringt. Hiervoor besproeit men de gevel eerst 20 minuten zonder drukverschil en daarna in stappen van elk 10 minuten. Methode B is een langer durende proef waarbij men kwantitatief kan controleren hoeveel water het proefstuk geabsorbeerd heeft. Hiervoor voert men alle drukstappen ($0-600+ix150$) uit in stappen van 60 minuten. Opnieuw wordt tijdens de test gekeken of er water doorheen het test element komt.



Figuur 107: Drukstappen cyclische waterdichtheidstest EN 12865 [17]

Resultaten:

Druk [Pa]	Aantal pulsen	Waarneming
0 Pa	0	geen water
50 Pa	3	geen water
100 Pa	3	geen water
150 Pa	3	geen water
200 Pa	3	geen water
250 Pa	3	geen water
300 Pa	3	geen water
450 Pa	3	geen water
600 Pa	3	geen water

Figuur 35: Resultaten cyclische waterdichtheidstest EN 12865

Bij beide proeven werd geen waterdoordringing doorheen het element waargenomen. Hierbij moet echter wel de bedenking gemaakt worden dat er misschien wel water doorheen de buitenste laag in het element kon dringen, maar dat deze niet waargenomen kon worden doordat ze klein was en werd opgenomen door de laag glaswol. Anderzijds kan het water ook tegengehouden worden door de VIP laag. Om die reden werd een opening gemaakt tussen de buitenste plaat en de VIP laag en werd met behulp van een camera de waterdichtheid door de tand-groefverbinding van de horizontale naad getest.



Figuur 108: Controle van waterdichtheid aan binnenzijde van het buitenpaneel; links: camera doorheen opening in zijkant luchtdichte kast; rechts: beeld van camera aan binnenzijde buitenpaneel ter hoogte van de bevestiging.

Bij een druk van 300 Pa werden druppels waargenomen. De horizontale naad moest dus verder ontworpen worden.

4.10. BOUWKUNDIGE AANSLUITINGEN

4.10.1. HORIZONTALE EN VERTICALE AANSLUITING

Om een betere waterdichtheid te realiseren werd bij de detaillering van de horizontale naad eerst gebruik gemaakt van een zwelband, die vervolgens vervangen werd door een dichtingsrubber. Deze liet toe om een dubbele dichting te maken ter hoogte van de halfhoutverbinding.

Ook voor de verticale naad werd de waterdichting oorspronkelijk verwezenlijkt door middel van een zwelband en evolueerde deze vervolgens naar een dichtingsrubber.

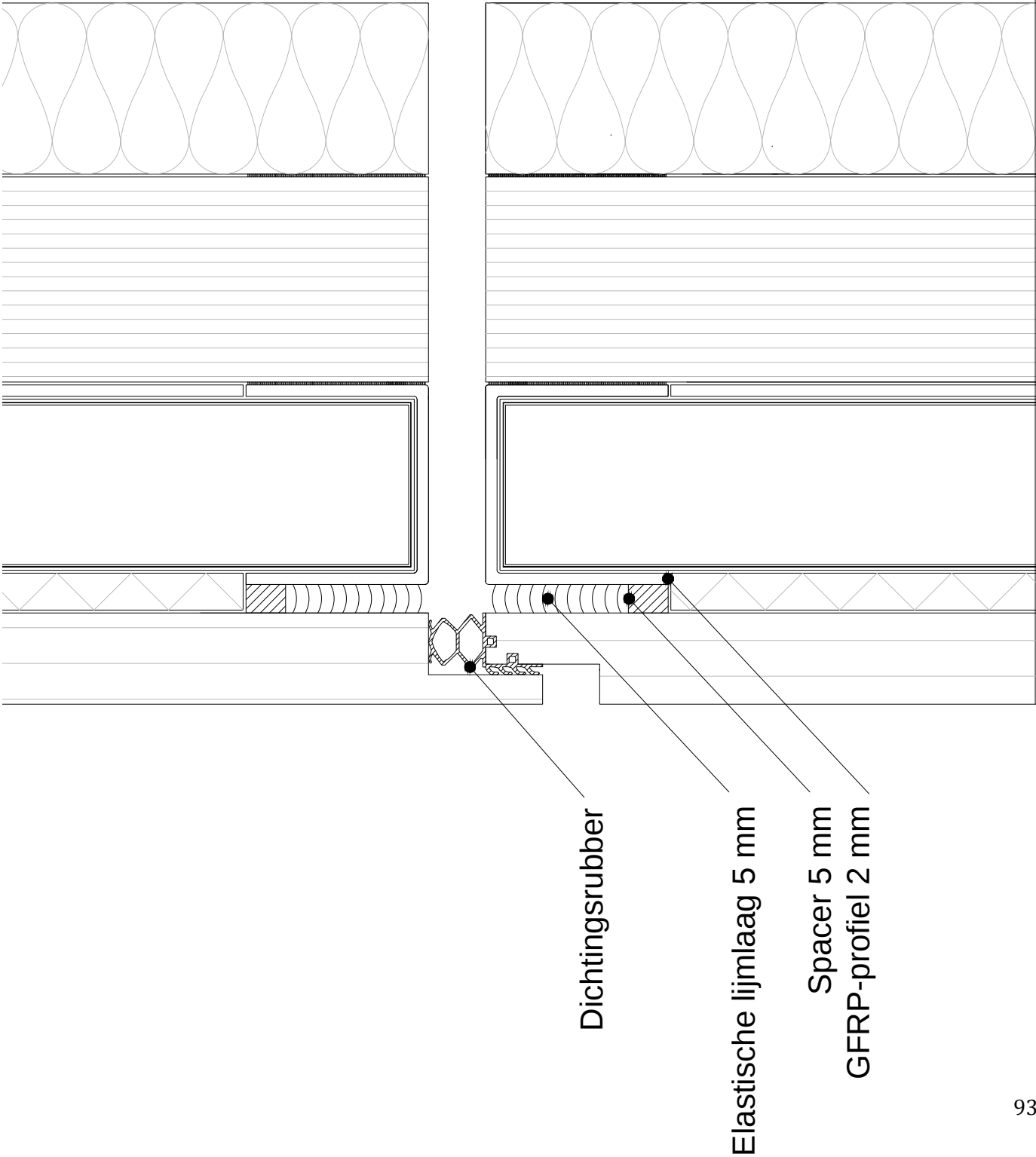
De lineaire warmtedoorgangscoefficiënt van de verticale en de horizontale verbinding werden in Trisco berekend. Hierbij werd de dikte van het VIP paneel verminderd tot 30 mm, omdat dit voldoende bleek om de equivalente U-waarde van $0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ te behalen.

	$U_1 [\text{W/m}^2\cdot\text{K}]$	$A [\text{m}^2]$	$\psi_{1/2} [\text{W/m}\cdot\text{K}]$	$L_{1/2} [\text{m}]$	χ	aantal	$U_{eq} [\text{W/m}^2\cdot\text{K}]$	Verhoging [%]
Type 4'	0,134	6,48	0,019	2,4	0,00005	4	0,150	12%
			0,020	2,8				

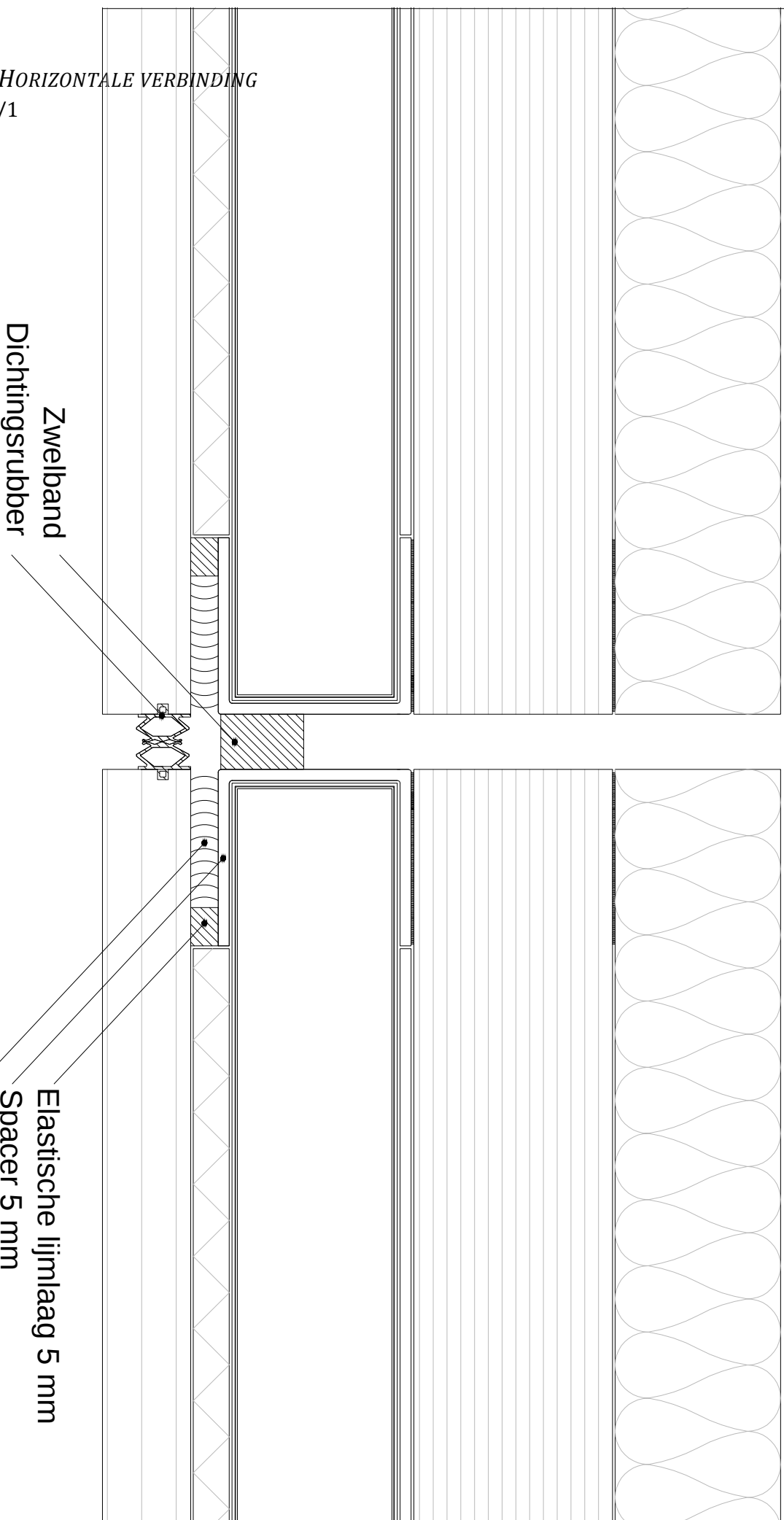
Tabel 36: Invloed van voegen en bevestiging op equivalente U-waarde van de gevel.

4.10.2. VERTICALE VERBINDING

Schaal 1/1



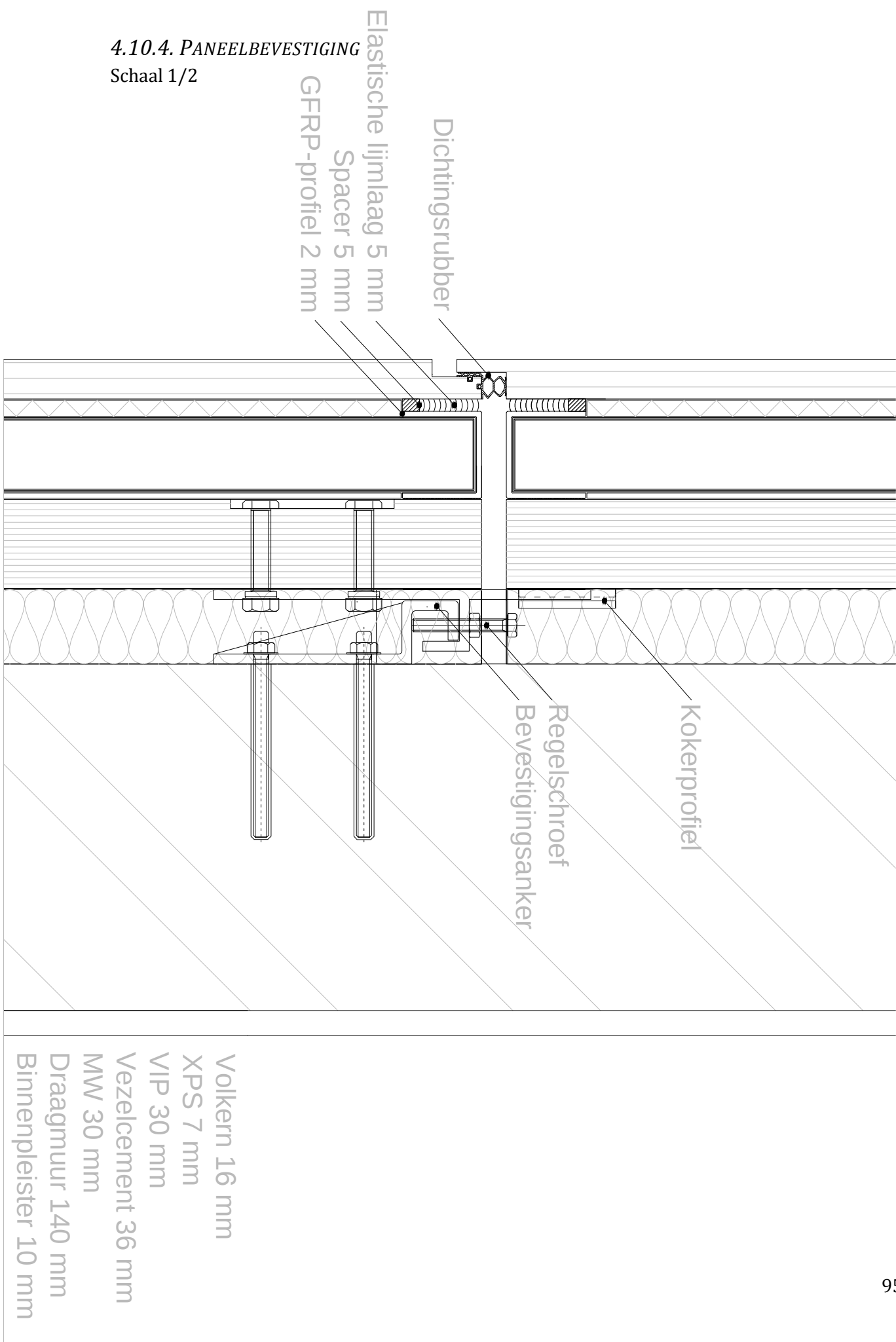
Volkeren 16 mm
XPS 7 mm
VIP 30 mm
Vezelcement 36 mm
MW 30 mm



4.10.3. HORIZONTALE VERBINDING
Schaal 1/1

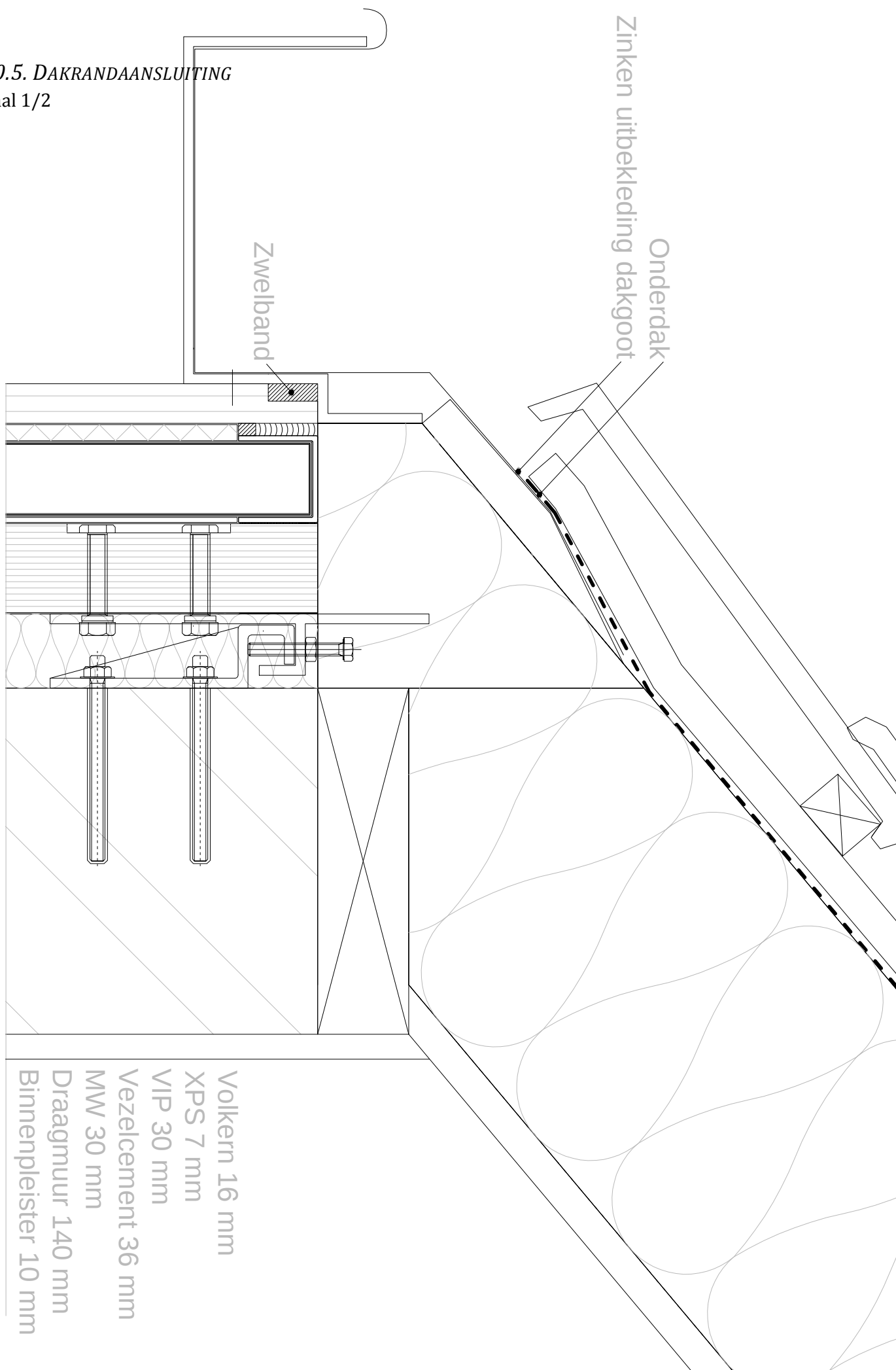
4.10.4. PANEELBEVESTIGING

Schaal 1/2



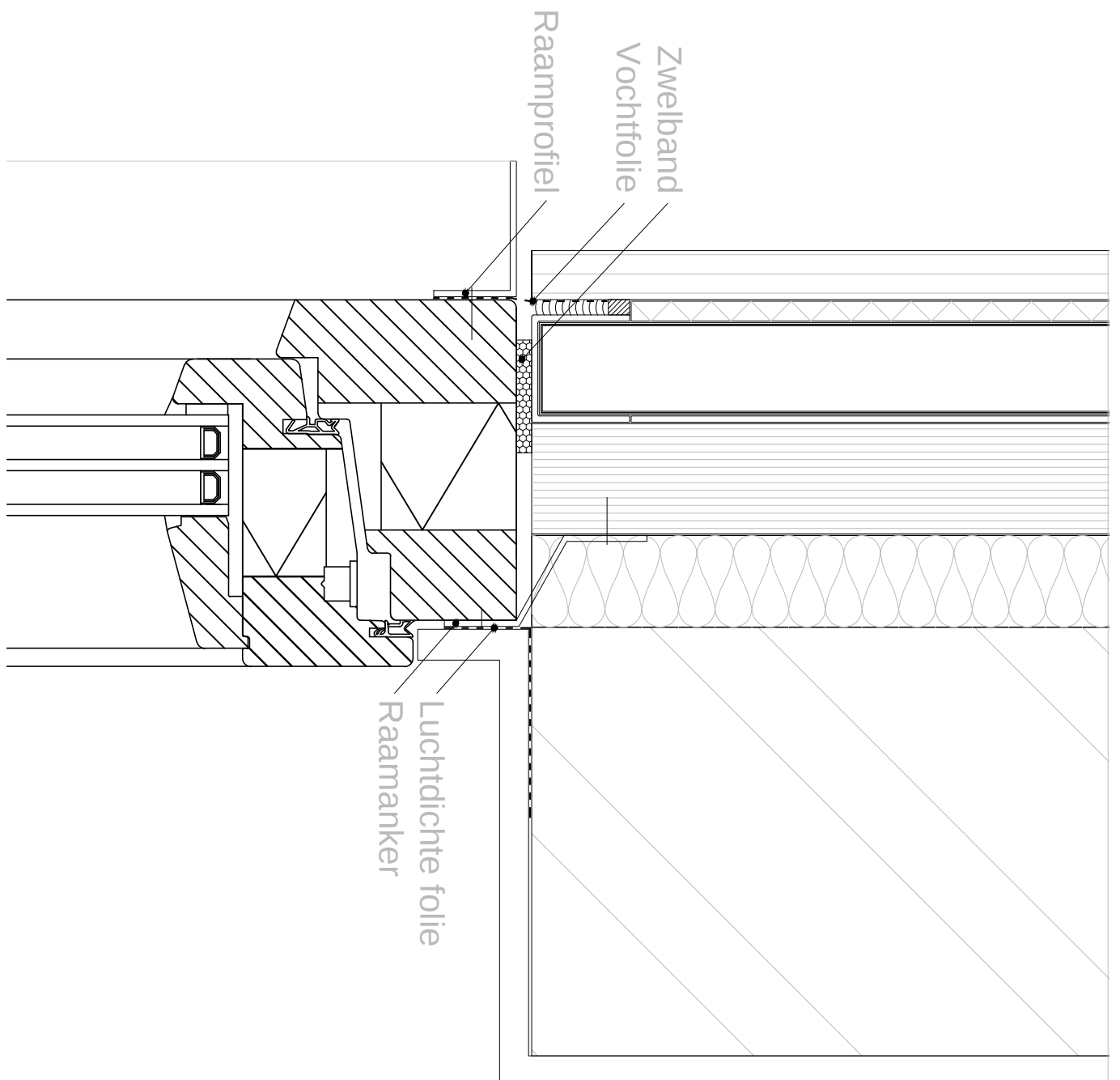
4.10.5. DAKRANDAANSLUITING

Schaal 1/2



4.10.6. RAAMAANSLUITING BOVEN

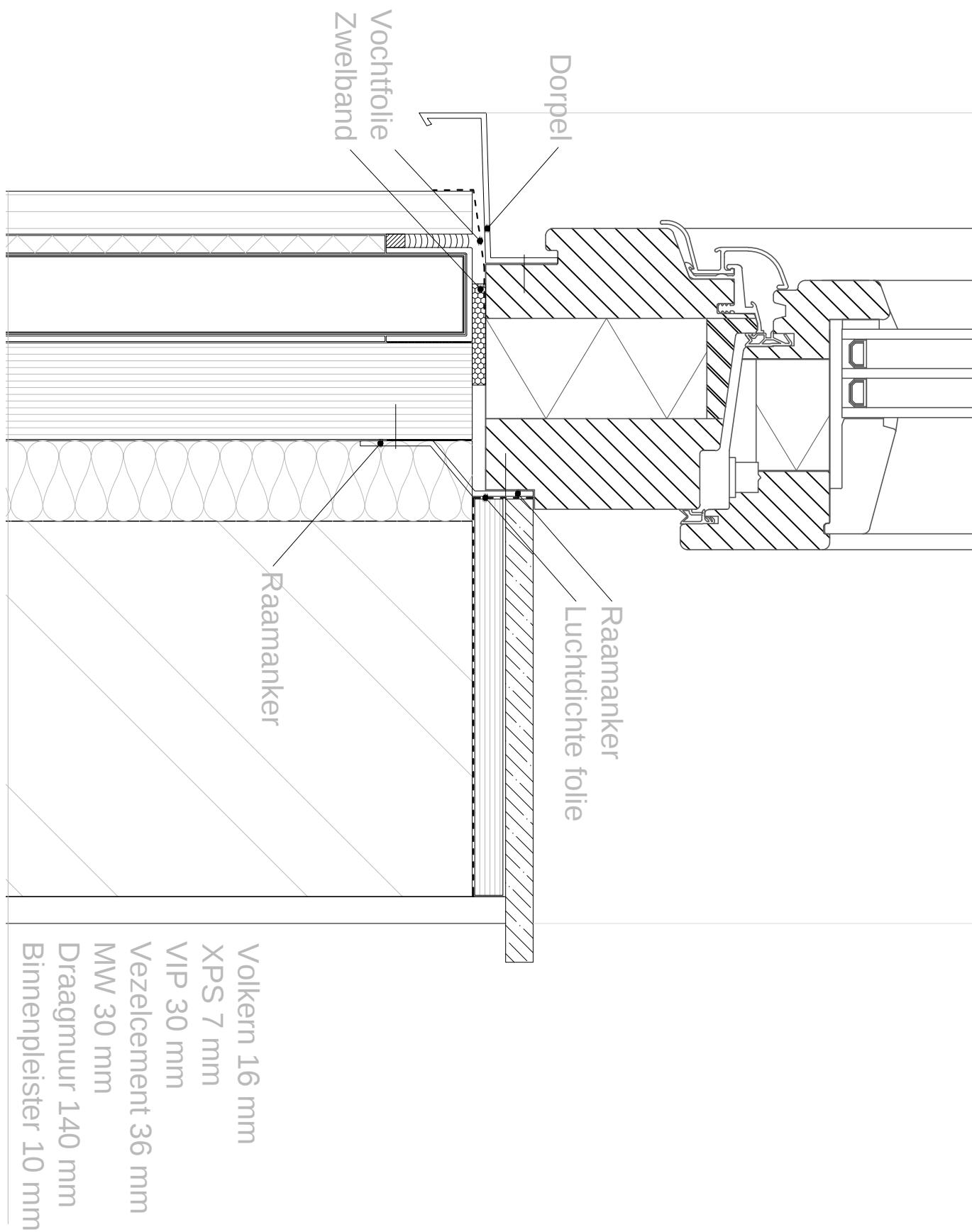
Schaal 1/2



Volkeren 16 mm
XPS 7 mm
VIP 30 mm
Vezelcement 36 mm
MW 30 mm
Draagmuur 140 mm
Binnenpleister 10 mm

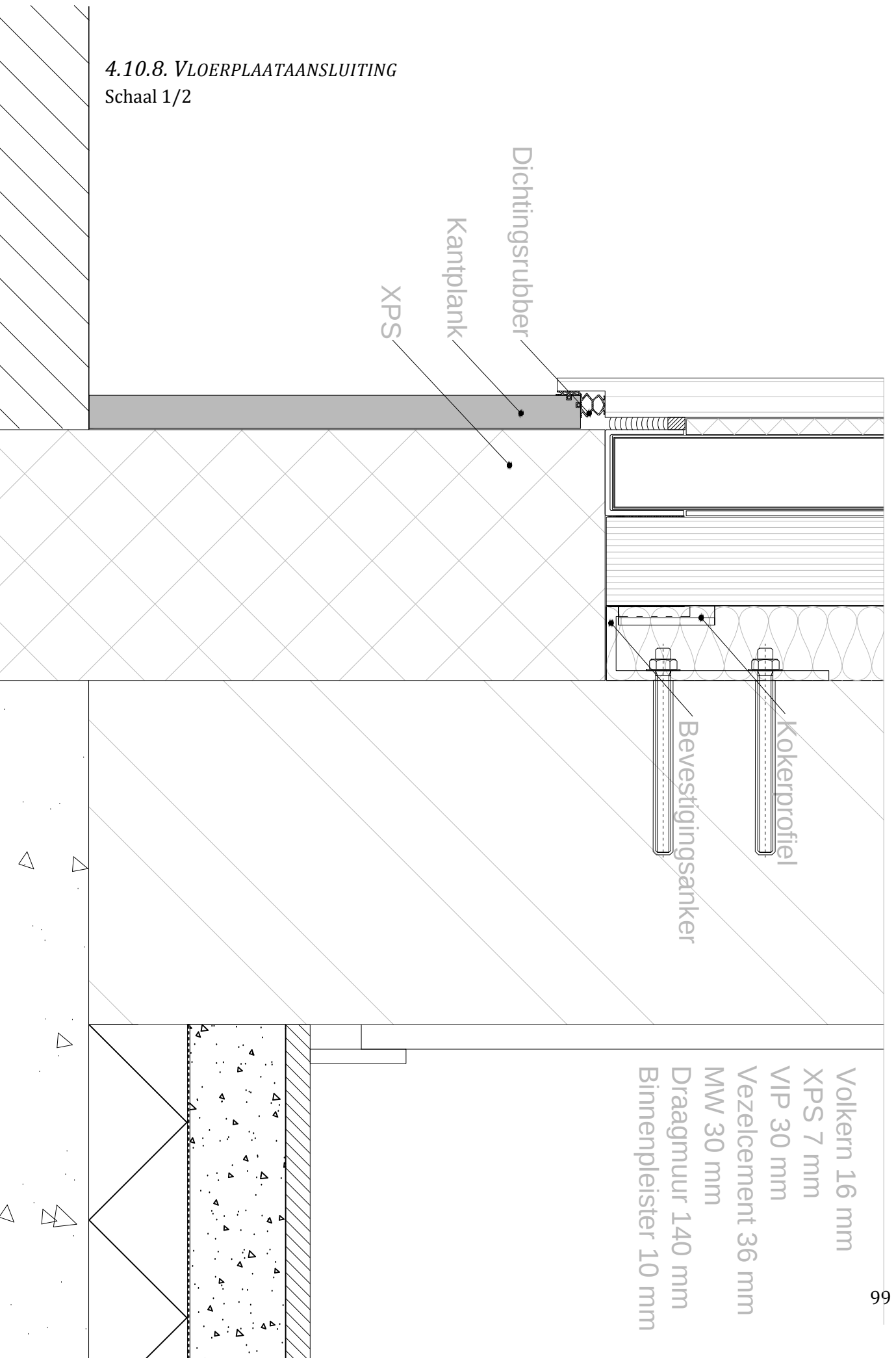
4.10.7. RAAMAANSLUITING ONDER

Schaal 1/2



4.10.8. VLOERPLAATAANSLUITING

Schaal 1/2

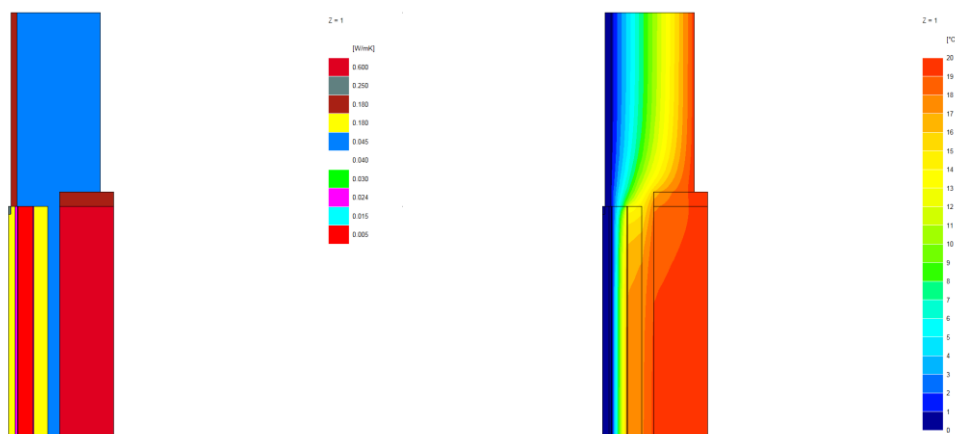


4.11. THERMISCHE ANALYSE

Deze bouwknopen werden aan de hand van TRISCO verder geanalyseerd. Dit door de ψ -waarde te berekenen. Dit werd gedaan volgens de methode beschreven door het document “gevalideerde numerieke berekeningen”. Hierbij wordt als ψ_{lim} gebruikt als criterium. Voor de horizontale snede is dit 0,10 W/m.K en voor de verticale snede 0,15 W/m.K.

Dakrand

Omdat TRISCO enkel het invoeren van rechthoekige elementen toelaat en het dus moeilijk is om schuine elementen in te voegen wordt de dakaansluiting geabstraheerd opdat die representatief zou zijn als de aansluiting met het schuine dak.



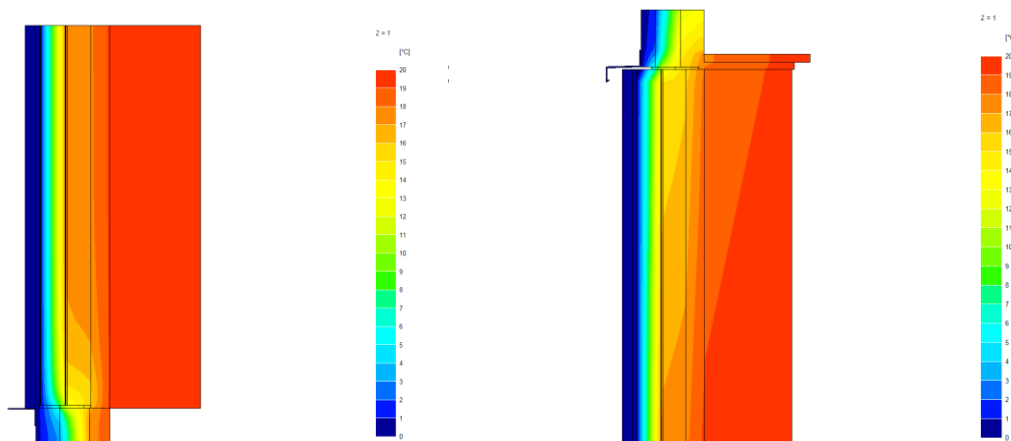
Figuur 109: Simulatie van het warmtetransport doorheen de dakrandaansluiting in Trisco.

Uit de simulatie volgt dat deze aansluiting resulteert in een ψ -waarde van 0,018 W/m.K. Deze voldoet dus aan het criterium ψ_{lim} .

Raamaansluiting

Om de ψ -waarde van de raamaansluiting te berekenen wordt het raamprofiel geabstraheerd. Net zoals bij de vorige berekening worden twee oppervlaktes en twee U-waardes bepaald. Vervolgens wordt de ψ -waarde bepaald aan de hand van de volgende formule:

$$\psi = \frac{\Phi_{2D}}{L \cdot (\theta_i - \theta_e)} - \frac{U_1 A_1}{L} - \frac{U_2 A_2}{L} \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

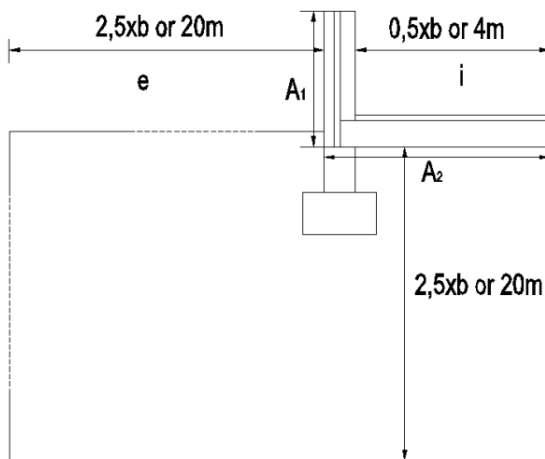


Figuur 110: Simulatie van het warmtetransport doorheen de raamaansluiting in Trisco.

Voor zowel de bovenste raamaansluiting als de onderste aansluiting wordt voor de ψ -waarde 0,016 W/m.K verkregen. Beiden aansluitingen voldoen dus aan het criterium.

Vloerplaat aansluiting

Bij de berekening van de thermische prestatie van de aansluiting met de vloerplaat op volle grond moet niet alleen het warmtetransport doorheen het vloerdeel, maar ook doorheen de grond in rekening gebracht worden. Om dit te doen moet ook het grondmassief in het numeriek model opgenomen worden. De afmetingen waarover deze gesimuleerd moet worden zijn vastgelegd zoals te zien in figuur X. In deze toepassing wordt gekozen om aan de binnenzijde 4 meter en aan de buitenzijde en onder de woning 20 meter te nemen.



Figuur 111: Afmetingen van het te simuleren vloerdeel. [7]

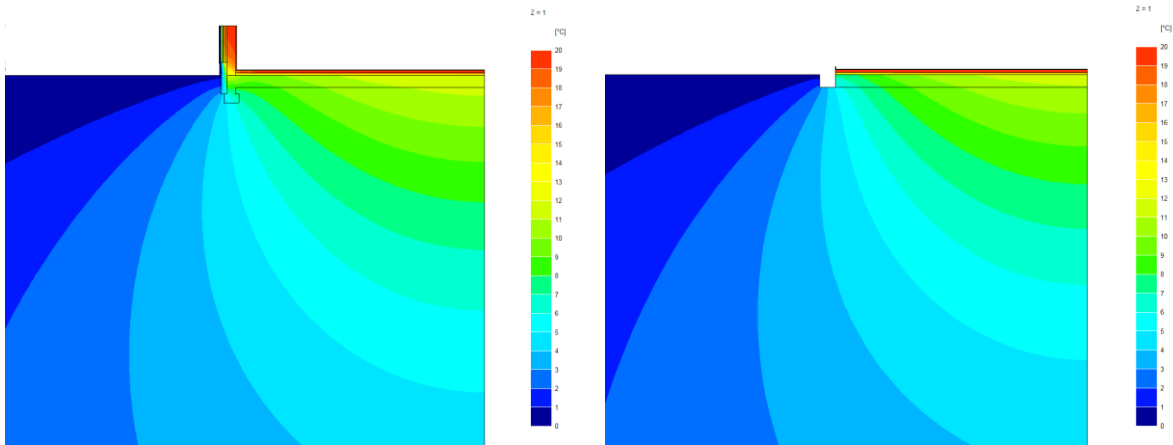
Voor een funderingsaanzet van een vloer op volle grond, wordt het model tweedimensionaal doorgerekend en wordt Φ_{2D} berekend als de totale warmtestroom die de binnenomgeving verlaat. Hierbij wordt de lijnwarmtedoorgangscoefficiënt op de volgende manier bepaald:

$$\psi = \frac{\Phi_{2D}}{L \cdot (\theta_i - \theta_e)} - \frac{U_1 A_1}{L} - \frac{\Phi_{2D,a}}{L \cdot (\theta_i - \theta_e)} \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

met $\Phi_{2D,a}$ [W]:

de totale tweedimensionale stationaire warmtestroom die de binnenomgeving verlaat, berekend met gevalideerde numerieke software, op basis van het model dat als volgt moet worden aangepast:

- ✓ verwaarlozing van alle funderingsmassieven en/of randisolatie door deze te vervangen door grond met een warmtegeleidbaarheid van 2 W/mK;
- ✓ opleggen van adiabatische randvoorwaarden waar de muur (die principieel loopt tot onderkant vloerplaat, inclusief vloerisolatie) in contact is met de vloer op volle grond of de grond. [7]



Figuur 112: Simulatie van het warmtetransport doorheen de vloeraansluiting in Trisco.

Voor ϕ_{2D} wordt 25,539 W verkregen en voor $\phi_{2D,a}$ 20,736 W. Indien we dit samen met de oppervlakte 0,996 m in de formule invoeren wordt een ψ -waarde verkregen gelijk aan 0,12 W/m.K.

5. ALGEMEEN BESLUIT

Uit het onderzoek naar de bestaande systemen blijkt dat het gebruik van vacuümgeïsoleerde panelen bij renovatietoepassingen best toegepast wordt in geprefabriceerde gevelelementen. Deze zorgen ervoor dat de VIP's niet in situ verwerkt moeten worden, wat de kans op perforatie van de omhullende folie fors doet dalen. Daarnaast laten deze elementen ook een snelle uitvoering toe waardoor de bewoners er slechts een beperkte hinder door zullen ondervinden. Dit zal de drempel tot het uitvoeren van dergelijke renovatie verminderen en zo de opwaardering van het bestaande gebouwbestand versnellen.

Uit het thermisch onderzoek werd de invloed van de aansluiting van het gevelpaneel op de equivalente U-waarde van de gevel duidelijk. Op hygrothermisch vlak bleek de invloed van het initiële watergehalte in de bestaande draagmuur en de dampdichtheid van de omhullende folie van het VIP een grote invloed te hebben op de hygrothermische prestatie van het element. Hieruit kwam voort dat bij de compositie van de gevel rekening gehouden moet worden bij de plaatsing van een vochtgevoelig materiaal en het risico op condensatie verhinderd kon worden door een dampdichte folie of een vochtbufferend materiaal.

Bij het ontwerp van het nieuwe vacuüm geïsoleerde gevelelement werd door optimalisatie van de paneelaansluiting de grootte de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt verlaagd en werd een paneel verkregen die met een dikte van 121,5 mm de equivalente U-waarde van de gevel verbeterde tot 0,15 W/m².K. Voor het dragende paneel werd een vochtbestendig materiaal gekozen. Deze kan de vochtstroom uit de bestaande draagmuur bufferen en zo het risico op condensatie vermijden, maar zal zelf toch niet degraderen ten gevolge van het hoge watergehalte.

De aansluitingen van het paneel werden ontworpen opdat die de waterdichtheid van de gevel garanderen. Daarnaast werden ook enkele bouwkundige aansluitingen uitgewerkt, hierbij moeten ook enkele wijzigingen gedaan worden aan de oorspronkelijke structuur om de aansluitingen thermisch te laten voldoen.

BRONNEN:

- [1] ADAN, O. *On the fungal defacement of interior finishes*. Proefschrift, University of Technology, Eindhoven, 1994.
- [2] Agentschap NL. *Renoveren op Passief-niveau*. Thema uitgewerkt voor de corporatiesector Sittard, 2012.
- [3] ALAM M. *Vacuum insulation panels (VIPs) for building construction industry – a review of the contemporary developments and future directions*. Appl Energy, 2011.
- [4] ASHRAE. *Standard 160P-Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings*, 2008.
- [5] BAETENS et al. *Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond*. Energy and Buildings, 42: 147-172, 2010.
- [6] BAETENS, R. *Properties, requirements and possibilities for highly thermal insulating materials and solutions in buildings: state-of-the-art and beyond*. Thesis voor het behalen van Master of Applied Sciences and Engineering: Architecture, Universiteit Leuven, 2009.
- [7] BIJLAGE V. *Gevalideerde numerieke berekeningen*. Belgisch Staatsblad, 2010.
- [8] BINE. *Building refurbishment – highly insulative large elements: Applications: Facade insulation in old buildings: Three buildings in Hofheim am Taunus*. FIZ Karlsruhe, 2011.
- [9] BINZ, A. STEINKE, G. *Applications of Vacuum Insulation in the Building Sector', International Vacuum Insulation Symposium 2005*. Empa Akademie, Zurich, 2006.
- [10] BONTE, P. *Vacuum Insulation Panels in gevelbepleisteringisolatiesystemen (ETICS)*, UGent, 2013.
- [11] CEN. EN ISO 13788. *Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods*. 2001.
- [12] DE MEERSMAN G., VAN DEN BOSSCHE N., JANSSENS A. *Long term durability of Vacuum Insulation Panels: determination of the Sd-value of MF-2 foils*. Ghent University, Faculty of Engineering and Architecture, Research group of building physics, 2015.
- [13] DIN 68800-2. *Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau (Entwurf)*. Berlin, Duitsland: Deutsches Institut für Normung e. V., 2009.
- [14] DOL, K. *Housing Statistics in the European Union*. Universiteit Delft, 2010.
- [15] EN 12154. *Curtain walling – Watertightness – Performance requirements and classification*. 2000.
- [16] EN 12155. *Curtain walling – Watertightness – Laboratory test under static pressure*. 2000.

- [17] EN 12865. *Hygrothermal performance of building components and building elements-Determination of the resistance of external wall systems to driving rain under pulsating air pressure*. 2001.
- [18] HAUSLADEN, G. *Climateskin : building-skin concepts that can do more with less energy*. Basel; Boston Birkhäuser, 2008.
- [19] HENS, H. *Warmte- en massatransport*, Leuven, 2003.
- [20] HUKKA, A., VIITANEN, H. *A mathematical model of mould growth on wooden material*. Wood science and technology 33 (p. 475-485), 1999.
- [21] IEA ECBCS Annex 50. *Prefab retrofit demonstration project: Passive renovation De Kroeven 505 Roosendaal, NL*.
- [22] IEA/ECBCS Annex 39. *Vacuum Insulation in the Building Sector: Systems and Applications*.
- [23] ITARD, L., KLUNDER, G. *Comparing environmental impacts of renovated housing stock with new construction*. Building Research & Information, 35(3), 252-267, 2007.
- [24] JOHANNESSON, G. THORSEL, T. *Vacuum Insulation in the Building Sector. Systems and Applications (Subtask B)*. Final Report for the IEA/ECBCS Annex 39 HiPTI-project (High Performance Thermal Insulation for Buildings and Building Systems), 2007.
- [25] JOHANSSON, P. *Assessment of the Risk for Mold Growth in a Wall Retrofitted with Vacuum Insulation Panel*. Chalmers University of Technology, Zweden, 2011.
- [26] JOHANSSON, P. *Vacuum Insulation Panels in Buildings: Literature Review (Report 2012: 1)*'. Gothenburg. Zweden: Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 2012.
- [27] JOHANSSON, S. *Estimation of mould growth levels on rendered façades based on surface relative humidity and surface temperature measurements*. Building and Environment 45, p. 1153–1160, 2011.
- [28] KALNAES, S.E. *Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways*. Applied Energy 116: 355–375, 2014.
- [29] KONSTANTINOOU, T. *Facade Refurbishment Toolbox. Supporting the Design of Residential Energy Upgrades*. A+BE | Architecture and the Built Environment, [S.l.], n. 9, p. 1-420, jul. 2014.
- [30] KRUS, M., SEDLBAUER, K., ZILLIG, W., KÜNZEL H.M. *A new model for mould prediction and its application on a test roof*. Cracow : Proceedings of the II international scientific conference on the current problems of building physics in the rural building, 2001.
- [31] LYLYKAGAS, K. *Energy-efficiency Up-grade with Pre-fabricated Façade elements - the Innova Project Renovation in Saternuksenkate 2, Riihimäki*.
- [32] Nederlandse Bond van Timmerfabrikanten i.s.m. Bouwlokalen. *Duurzaam bouwen met hout*.

- [33] PANIC, E. *Erste Altbausanierung auf Passivhausstandard mit VIPs: Sanierung eines 150 Jahre alten Bauernhauses auf Passivhausstandard nach PHPP unter Einsatz von Vakuumdämmung*, 2009.
- [34] ROSE, A., SACK, N., KOPPOLD, S., ALBRECHT, W. *Dauerhaftigkeit von Vakuum-Isolations-Paneelen in der klebetechnischen Anwendung*. Bauphysik, 36: 188–195, 2014.
- [35] SEDLBAUER, K. *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components*. Stuttgart, Fraunhofer IBP, 2001.
- [36] SPRENGARD, C. *Numerical examination of thermal bridging effects at the edges of vacuuminsulation-panels (VIP) in various constructions*, Energy Buildings, 2014.
- [37] STRAUBE, J., ONYSKO, D., SCHUMACHER, C. *Methodology and design of field experiments for monitoring the hygrothermal performance of wood frame enclosures*. Journal of building physics Vol. 26, 2002.
- [38] Teilprojekt Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumdämmung. *Sanierung von drei kleinen Wohngebäuden in Hofheim*. Endbericht, Darmstadt, November 2007.
- [39] TENPIERIK M., CAUBERG, H. *Vacuum Insulation Panel: friend or foe*. Proceeding of 23rd conference on passive and low energy architecture, Geneva, Switzerland. 2006.
- [40] TENPIERIK, M.J. *Vacuum Insulation Panels Applied in Building Constructions*. Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor, TU Delft, 2010.
- [41] THOMSEN, A. F. *Replacement or reuse? The choice between demolition and life cycle extension from a sustainable viewpoint Shrinking Cities, Sprawling Suburbs*. Changing Countrysides (Vol. 1): Centre for Housing Research, UCD, 2010.
- [42] VAN LEEMPUT, S. *Technische fiche: Isolatie, duurzame jeugdwerkinfrastructuur*. Vlaams Instituut voor Bio-Ecologisch bouwen en wonen natureplus, Antwerpen, 2007.
- [43] VEREecken, E. *Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation*. Building and Environment 51: 296-310; 2012.
- [44] VIITANEN, H. *Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time*. The Swedish University of agricultural Sciences, Department of Forest Products, 1996.
- [45] VIP-BAU. *Applications: Facade insulation in old buildings: Listed house near Nuremberg*.
- [46] VIP-BAU. *Applications: Facade insulation in old buildings: Terraced house in Munich*.
- [47] VIP-BAU. *Applications: Facade insulation in old buildings: Three buildings in Hofheim am Taunus*.
- [48] Woodwisdom Net. *TES EnergyFaçade: Prefabricated timber based building system for improving the energy efficiency of the building envelope*. 2010.
- [49] WTCB. *Het platte dak: Opbouw, materialen, uitvoering, onderhoud*. Technische Voorlichtingsnota 215, 2012.

[50] WTCB. *Transmissie referentie document*, Belgisch Staatsblad. 2010.

[51] WTCB. *Vochtbeheersing bij houtbouw*. WTCB-contact, 2013.

Bijlage A: Gebruikte warmtegeleidingscoëfficiënten in TRISCO

Materiaal	λ -waarde [W/m.K]
Aluminium	160
Beton	1,15
Bitumen	0,23
DHF	0,12
EPS	0,035
Gewapende pleister	0,32
Gips	0,30
KERTO	0,13
MDF	0,18
Metselwerk	0,60
Minerale wol	0,035
Multiplex	0,17
OSB	0,13
PIR	0,025
PU hars	0,25
PUR	0,030
PVC	0,170
RVS	17
Synthetische pleister	0,70
Vezelcement	0,39

Bijlage B: Gebruikte hygrothermische materiaaleigenschappen

ISO/FDIS 10456. *Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*, 2007.