

LUCHTROTATIES IN DE ADAPTIELAAG

PRO³- IWT-TETRA 150144, Werkpakket 2
September 2017

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Onderzoeksgroep Bouwfysica, Constructie en Klimaatbeheersing

E katrien.maroy@ugent.be
T 09 264 32 48

Technicum B4
Sint-Pietersnieuwstraat 41, 9000 Gent

www.ugent.be

INHOUDSOPGAVE

Inhoudsopgave	2
1 Literatuurstudie	3
1.1 Definitie	3
1.2 Risico's bij een niet-aansluitende isolatielaag	3
1.3 Aanbevelingen uit na-isolatie (TVN 246)	6
1.4 Huidige richtlijnen voor de adaptielaag (AIM-ES)	7
2 Potentieel van een adaptiestrip	8
2.1 Onderzoeksvraag	8
2.2 Opbouw simulatiemodellen	9
2.3 Luchtstroomweerstand R_{air} [Pa.s/m ³] en dichtheid ρ [kg/m ³]	11
2.4 Winddrukken en luchtdebiet door de adaptielaag	12
2.5 Modelleren convectiestroming	14
2.6 Output en analyse resultaten	15
2.7 Terminologie in de analyse	15
3 Resultaten en bespreking	16
3.1 Strips vs. laag bij grote onregelmatigheden	16
3.2 Impact compressiegraad en R_{air}	18
3.3 Optimalisatie adaptiestrip	20
3.4 Aandachtspunten bij de gevel-uit-lood	21
3.5 Noodzaak volledige adaptielaag bij luchtdichte prefab systemen?	22
3.6 Simulatie in met zonnestraling	23
4 Besluit	25
5 Bibliografie	26
Bijlagen	27

1 LITERATUURSTUDIE

1.1 Definitie

Om de onregelmatigheden van de te renoveren gevel op te vangen, wordt een adaptielaag voorzien in rotswol, glaswol of cellulosevlokken tussen het prefab paneel en het bestaande oppervlak. Er zijn twee uitvoeringen mogelijk:

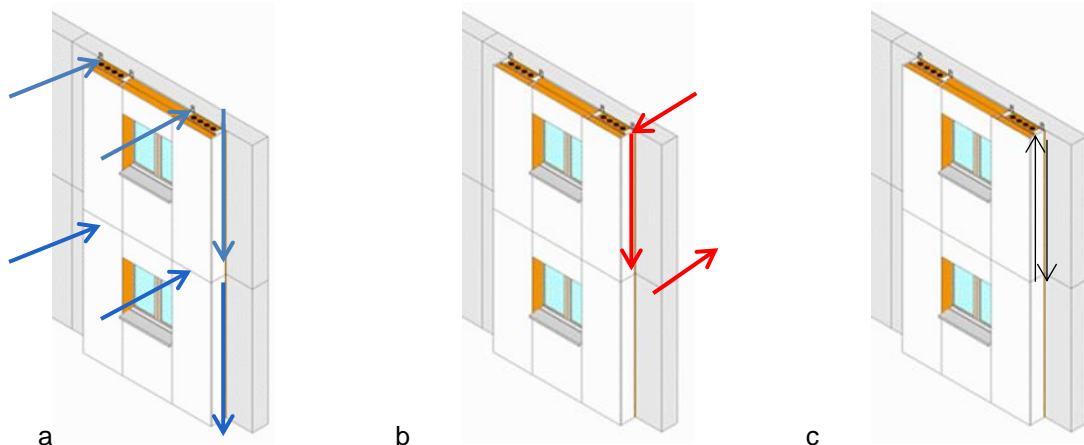
- Met een gesloten systeem: rotswol, glaswol of houtwol zit op voorhand bevestigd aan het prefab paneel (Figuur 1a).
- Met een open systeem: de holte tussen de bestaande gevel en het prefab systeem wordt na het plaatsen opgevuld met bv. cellulosevlokken (Figuur 1b).



Figuur 1 (a) Adaptielaag in minerale wol, 4 cm (Case 9, Prefabgids) (b) Adaptielaag met cellulosevlokken (TES EnergyFaçade, 2010-2013)

1.2 Risico's bij een niet-aansluitende isolatielaag

Als een isolatielaag niet goed aansluit tegen het binnenspouwblad, kunnen *windwashing*, *inside air venting* en *air looping* voorkomen. (Lecompte, 1989) (Hens, Janssens, Depreatere, Carmeliet, & Lecompte, 2007). Vertaald naar de context van prefab renovatie, *wind washing* en *inside air venting* komen voor als respectievelijk het prefab paneel en/of het binnenoppervlak niet luchtdicht is (Figuur 2).



Figuur 2 (a) Wind Washing (b) Inside air venting (c) Air Looping (indien de adaptielaag onvoldoende samengedrukt is)

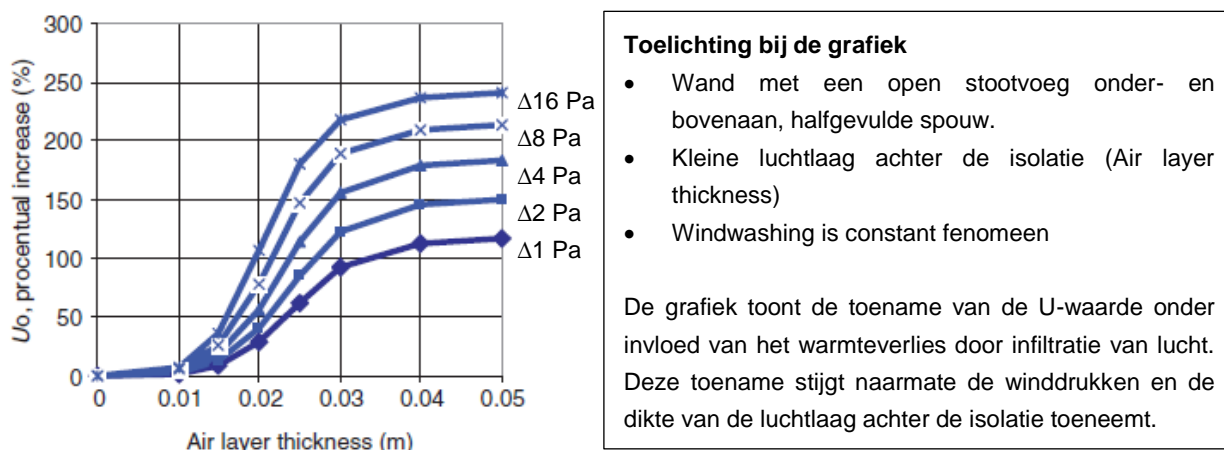
Lekkage van binnenlucht (Figuur 2b) lijkt op het eerste zicht geen probleem voor prefab panelen, aangezien voor de adaptielaag nog een geïsoleerd paneel zit. Het kan echter wel een probleem worden bij gebouwen met verschillende warmteregimes, bv. een appartement met leegstaande en

bewoonde units. Door het temperatuurverschil kunnen luchtstromingen ontstaan in de adaptielaag (in combinatie met een onvoldoende dense adaptielaag).

Het is niet duidelijk of air looping een risico is bij prefab elementen. Enerzijds wordt dit fenomeen vermeden indien de adaptielaag nauwkeurig tegen het binnenoppervlak van het prefab element aangebracht is. Anderzijds zouden er wel luchtstromingen in de adaptielaag kunnen ontstaan indien deze niet genoeg aangedrukt is tegen de bestaande gevel en te weinig samengedrukt is, waardoor convectie in de adaptielaag ontstaat. Dit fenomeen zou verder in de hand kunnen gewerkt worden indien er verschillende warmteregimes in het gerenoveerde gebouw aanwezig zijn.

1.2.1 Windwashing

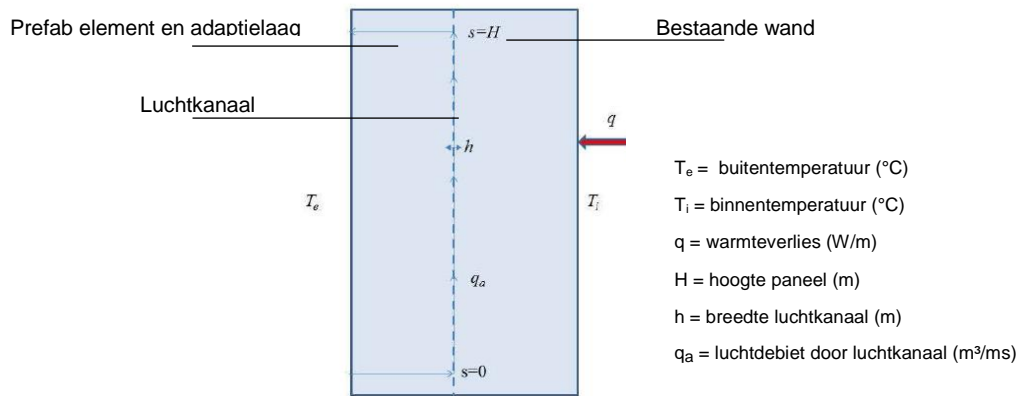
De impact van *windwashing* werd begroot bij spouwmuren (Hens, Janssens, Depreatere, Carmeliet, & Lecompte, 2007). Hoge windsnelheden (een verschil van 16 Pa winddruk boven en onderaan) en een spleet van 2 cm tussen de isolatielaag en het binnenspouwblad resulteert in een toename van de U-waarde van 100% (Figuur 3). Bij lage windsnelheden (een verschil van 1 Pa tussen bovenste en onderste open stootvoeg), is de toename bij een spleet van 2 cm 25% (Hens, Janssens, Depreatere, Carmeliet, & Lecompte, 2007).



Figuur 3 De impact van windwashing bij een spouwmuur (Hens, Janssens, Depreatere, Carmeliet, & Lecompte, 2007)

In (Hens, Janssens, Depreatere, Carmeliet, & Lecompte, 2007) wordt aangeraden om een soepele laag isolatie aan te brengen tussen de harde isolatieplaat en het binnenspouwblad om luchtspleten achter de isolatielaag te vermijden. Een andere oplossing bestaat erin om het isolatiemateriaal te lijmen tegen het binnenspouwblad. Verder wordt in het artikel ook aangeraden om een dikke laag isolatie te gebruiken in de spouw en deze goed te bevestigen tegen het binnenspouwblad om *windwashing* en luchtrotaties te vermijden. De auteurs vermelden ook dat het in ieder geval aan te raden is om het binnenoppervlak luchtdicht uit te voeren.

(Hagentoft, 2015) berekende de impact van luchtstromingen achter een adaptielaag van een prefab paneel (Figuur 4). Bij een drukverschil van 2 Pa door de wind, kunnen luchtstromingen achter de adaptielaag de U-waarde doen stijgen met 16% (van 0.25 W/m²K naar 0.29 W/m²K). In de berekening werd aangenomen dat de lucht die het luchtkanaal achter de adaptielaag binnengaat zijn evenwichtstemperatuur bereikt voor de lucht weer uit het kanaal gaat. Om het luchtdebiet in het kanaal te berekenen, gebruikt de auteur de luchtstroomweerstand van het kanaal.



Figuur 4 Model uit (Carl-E Hagentoft, 2015)

Doorgaans wordt *windwashing* in het isolatiemateriaal vermeden door een winddichte laag aan de buitenzijde van het isolatiemateriaal te plaatsen en een luchtdichtheidsscherm aan de binnenkant, maar in de praktijk vertonen deze lagen vaak defecten. (Langmans, 2013) haalt een studie aan van (Janssens & Hens, Effects of wind on the transmission heat loss in duo-pitched insulated roofs: A field study, 2007) waarin de daling in thermische weerstand tot 40% kan oplopen bij geventileerde daken met perforaties in het windscherm.

1.2.2 Natuurlijke convectie

(Lecompte, 1989) geeft aan dat er twee gevallen zijn waar natuurlijke convectie door het materiaal een probleem kan vormen:

- Bij een onbekleed open poreus isolatiemateriaal tussen twee luchtsponwen
- Bij lucht lekkage in de isolatielaag, in combinatie met luchtsponwen aan beide zijden

Indien een luchtdoorlatend isolatiemateriaal (bv. minerale wol) niet genoeg samengedrukt wordt in een luchtsponw, kunnen luchtstromingen ontstaan in het isolatiemateriaal. Wanneer het temperatuurverschil tussen het binnen- en buitensponwblad ($\theta_w - \theta_k$) stijgt, gaat het Darcy gemodificeerd Rayleigh getal (R_{a*d}) en het Nusselt getal (N_{ud}) in de spouw stijgen (formule 1). **Hoe hoger het Nusselt-getal (N_{ud}), hoe meer natuurlijke convectiestromingen in de spouw (Lecompte, 1989).** Wanneer een spouw volledig gevuld is met een open poreus isolatiemateriaal, is natuurlijke convectie verwaarloosbaar indien het Nusselt-getal in de spouw kleiner is dan 1 (Weber, 1975-referentie in Lecompte, 1989). Dit kan bereikt worden als de maximale permeabiliteit van het isolatiemateriaal lager is dan $3.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ (Lecompte, 1989).

$$R_{a*d} \uparrow = \frac{(\rho_{\text{lucht}} c_{\text{lucht}}) \beta g (\theta_w - \theta_k) D K}{\nu \lambda_{\text{isolatiemateriaal}}} \uparrow \quad \text{en} \quad Nu_D \uparrow = 0.577 (R_{a*d} \uparrow \cdot \frac{D}{H})^{1/2} \quad (\text{formule 1})$$

met R_{a*d} het Darcy gemodificeerd Rayleigh getal, N_{UD} het Nusselt-getal over de dikte van de spouw, ($\theta_w - \theta_k$) het verschil in oppervlaktetemperatuur tussen de warme en koude kant van de spouw, K de permeabiliteit van de spouw [m^2], ρ_{lucht} de massadichtheid van lucht [kg/m^3], c_{lucht} de soortelijke warmte van lucht [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$], β de thermische uitzettingcoëfficiënt [$1/\text{K}$], g de zwaartekrachtversnelling [m/s^2], D de dikte van de spouw, ν de kinematische viscositeit [m^2/s], λ de warmtegeleidingscoëfficiënt van het isolatiemateriaal (W/mK), en H de hoogte van de spouw [m].

Praktisch vertaald: de adaptielaag heeft een lagere permeabiliteit als deze voldoende samengedrukt is of als de adaptielaag een voldoende hoge massadichtheid bezit.

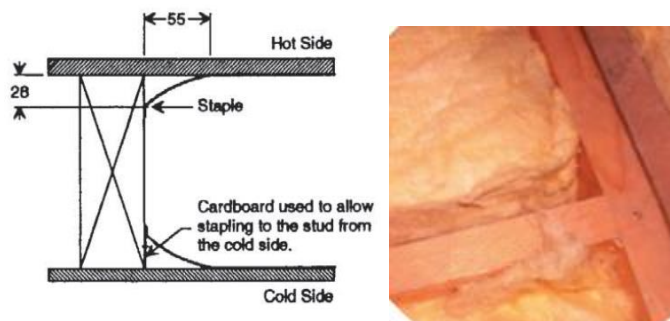
In (Langmans, 2013) werden convectiestromingen in een geïsoleerd houtskeletbouwelement onderzocht. Net zoals bij spouwmuren, ontstaan luchtstromingen in een houtskeletbouwelement door

natuurlijke convectie of door *windwashing*. Natuurlijke convectie in de isolatielaag van een houtskeletelement kan vermeden worden door:

- Een voldoende dichte isolatiemateriaal (ρ tussen 20 en 30 kg/m³) te gebruiken;
- Een luchtdicht vlak aan één van beide kanten van de isolatielaag te voorzien;
- Geen luchtholtes tussen de isolatielaag en de beplating aan de binnen- en buitenzijde te realiseren.

Verder somt (Langmans, 2013) vier courante uitvoeringsfouten in houtskeletbouwsystemen op die natuurlijke convectie stimuleren:

- Luchtlekken in de hoeken, door soepele isolatie in overbreedte tussen twee kepers te installeren waardoor de hoeken niet volledig opgevuld zijn (Figuur 5). Dit levert een daling in R-waarde van 2% voor materialen met een hoge dichtheid (35 kg/m³), en een daling van 40% bij grote temperatuurverschillen voor materialen met een lage dichtheid (9 kg/m³) (Brown et al 1993 geciteerd in Langmans, 2013).
- Hoe lager de dichtheid, hoe groter de kans op natuurlijke convectie.
- Verticaal luchtpad, doordat de isolatie niet goed aansluit tegen de beplating
- Horizontale luchtholte bovenaan (vb. door zakken van isolatie in het houtskeletelement)



Figuur 5 (Brown, 1993 in Langmans, 2013)

Wanneer minerale wol voldoende samengedrukt is en tegen alle oppervlakken goed aansluit, zijn luchtstromingen doorheen het materiaal onmogelijk. In de praktijk is dit echter moeilijk te controleren, aangezien de dichtheid van minerale wol sterk kan verschillen (Harreither, Krainz, Weissinger, & Bednar, 2015) op de markt, variërend van 20 kg/m³ (rotswolmatten) tot 400 kg/m³ (rotswolplaten) (zie tabel bijlage 1).

1.3 Aanbevelingen uit na-isolatie (TVN 246)

Het navullen van de spouwmuur is vergelijkbaar met het opvullen van de adaptielaag bij open prefab systemen. Ook in de richtlijnen voor na-isolatie wordt gehamerd op het halen van een voldoende dichtheid. In TV246 (WTCB, 2012) wordt vermeld dat zetting en convectie van de spouwisolatie kan vermeden worden indien de dichtheid voldoende hoog is. Om dit te controleren wordt voorgesteld om een gemiddelde massadichtheid ρ_{gem} te berekenen en te vergelijken met de volumemassa aangegeven op de technische fiche van het product (formule 2).

$$\rho_{gem} = \frac{M}{V} \quad \text{(formule 2)}$$

met

M: de massa die in de spouw ingespoten werd (kg)

V: het volume van de spouw (m³)

Indien ρ_{gem} kleiner is dan de volumemassa aangegeven op de productfiche, is de dichtheid onvoldoende. Volgende dichtheiten worden vermeld in diverse technische fiches van na-isolatieproducten (Tabel 1). Volgens (Langmans, 2013) moet de dichtheid van inblaasisolatie minimum 40 kg/m³ bedragen om natuurlijke convectie te vermijden.

Tabel 1 Densiteiten bij na-isolatie, productfiches

Materiaalsoort	λ (W/mK)	bij volumemassa ρ (kg/m ³)	brandklasse	Bron
Rotswol	0.037	70-105	A1	Rockwool
Glaswol	0.034	45	A1 geen rook	Isover
Cellulose	0.038	33-55 (ingeblazen) 20-35 (opengeblazen)	B-s2, dO (ingeblazen) B _{fl} -s1 (opengeblazen)	Isoproc
Houtwol	0.038	50	E	Eurabo (Steico flex)

1.4 Huidige richtlijnen voor de adaptielaag (AIM-ES)

De richtlijnen voor de adaptielaag bij prefab systeem zijn duidelijk afgeleid uit de aanbevelingen voor spouwmuurisolatie. In het onderzoeksproject AIM-ES wordt benadrukt dat het prefab paneel perfect moet aansluiten tegen de bestaande gevel. Aangezien de bestaande gevel quasi altijd een onregelmatig oppervlak heeft, moet een soepel materiaal alle holtes perfect opvullen. Iedere luchtholte kan een verminderde thermische prestatie tot gevolg hebben (Dubois & De Bouw, 2015).

Als de adaptielaag uitgevoerd wordt als een samendrukbare laag op de achterkant van een paneel, zal de dikte bepaald worden door de onregelmatigheid van de gevel en zijn voorafgaande, gedetailleerde 3D-metingen van cruciaal belang. Een tweede manier bestaat erin om een substructuur aan de bestaande gevel aan te brengen met houten balken waar de modules op uitgelijnd worden. De holtes ertussen worden opgevuld met een compressielaag op de achterkant van de panelen of worden nadien opgevuld zoals bij na-isolatie (Dubois & De Bouw, 2015). In TES Energy Façade werd een open systeem uitgetest waarbij de holte tussen het prefab paneel en de bestaande gevel opgevuld werd met cellulosevlokken (Figuur 1b). Daaruit raadde TES Energy Façade aan dat de egalisatielaag ten minste 3 cm moet zijn. In TV246 wordt na-isolatie afgeraden indien de spouwbreedte kleiner is dan 5 cm, maar dit heeft meer te maken met het risico op vochtdoorslag.



Figuur 6 (a) Gesloten prefab paneel met adaptielaag (b) gevel waarbij een substructuur in houten balken aangebracht werd (c) Open systemen waar achteraf isolatie in geïnjecteerd wordt (Dubois & De Bouw, 2015)

Bij open prefab systemen wordt het isolatiemateriaal achteraf geïnjecteerd. Bij deze methode moeten de randen en de voegen tussen de panelen luchtdicht uitgevoerd worden. Het grote voordeel van deze methode is dat de adaptielaag hier ook direct de hoofdisolatielaag vormt. Nadeel is wel dat er nog veel in-situ werk overblijft: zo moet de gevelbekleding achteraf uitgevoerd worden of zijn binnenwerken toch noodzakelijk. Open systemen worden in de praktijk weinig gebruikt omdat de uitvoering complexer is dan bij gesloten systemen: de inblaasgaten moeten goed gepositioneerd zitten zodat alle onregelmatigheden op de bestaande gevel even goed opgevuld geraken. Tot slot is het open systeem minder interessant voor renovatie van hoogbouw. Het navullen is praktisch niet haalbaar op grote hoogtes (dit is afhankelijk van de apparatuur), tenzij dit van binnenuit zou

gebeuren. Voor de renovatie van laagbouw kan deze methode echter wel interessant zijn omdat het dan een goedkopere versie kan zijn (prefab element = hol element dat nagevuld wordt).

2 POTENTIEEL VAN EEN ADAPTIESTRIP

2.1 Onderzoeksvraag

Uit deel 1 komen de volgende richtlijnen naar voor om luchtstromingen in spouwmuurisolatie te vermijden (Lecompte, 1989) (Hens, Janssens, Depreatere, Carmeliet, & Lecompte, 2007) (Langmans, 2013):

- Vul de spouw volledig op: Zorg voor een goede aanhechting aan het spouwoppervlak door vlakke spouwoppervlakken of een voldoende samendrukbaar isolatiemateriaal te voorzien, (zie ook (Dubois & De Bouw, 2015) voor prefab renovatie);
- Voorzie een voldoende hoge dichtheid, tussen 20 en 30 kg/m³ voor houtskelet;
- Luchtdicht binnenoppervlak.

De huidige richtlijnen voor prefab renovatie (IEA ECBCS Annex 50, 2011) (TES EnergyFaçade, 2010-2013) (Dubois & De Bouw, 2015) geven dan ook aan dat de holte tussen het prefab paneel en de bestaande gevel volledig opgevuld moet worden met een soepel materiaal om *windwashing* te vermijden.

Er zijn echter situaties waarin de richtlijnen uit de spouwmuurisolatie moeilijker realiseerbaar zijn bij renovaties met gesloten prefab systemen:

- Bij geprofileerde gevels (Figuur 7) of gevels uit het lood of grote onregelmatigheden kan de dikte van de adaptielaag snel oplopen; is een minimum dichtheid nodig? Is een goede aanhechting noodzakelijk? In welke gevallen?
- Als binnenwerken vermeden moeten worden, kan de luchtdichtheid van de bestaande gevel mogelijks niet gegarandeerd worden en zal het prefab systeem op zich luchtdicht uitgevoerd moeten worden; Is een volledige adaptielaag dan steeds noodzakelijk of is dit afhankelijk van de verwarmingsregimes in het gebouw bv. bewoonde en leegstaande huurwoningen?

Aan de hand van simulaties in VOLTRA¹ wordt het potentieel van een adaptie-strip geëvalueerd.



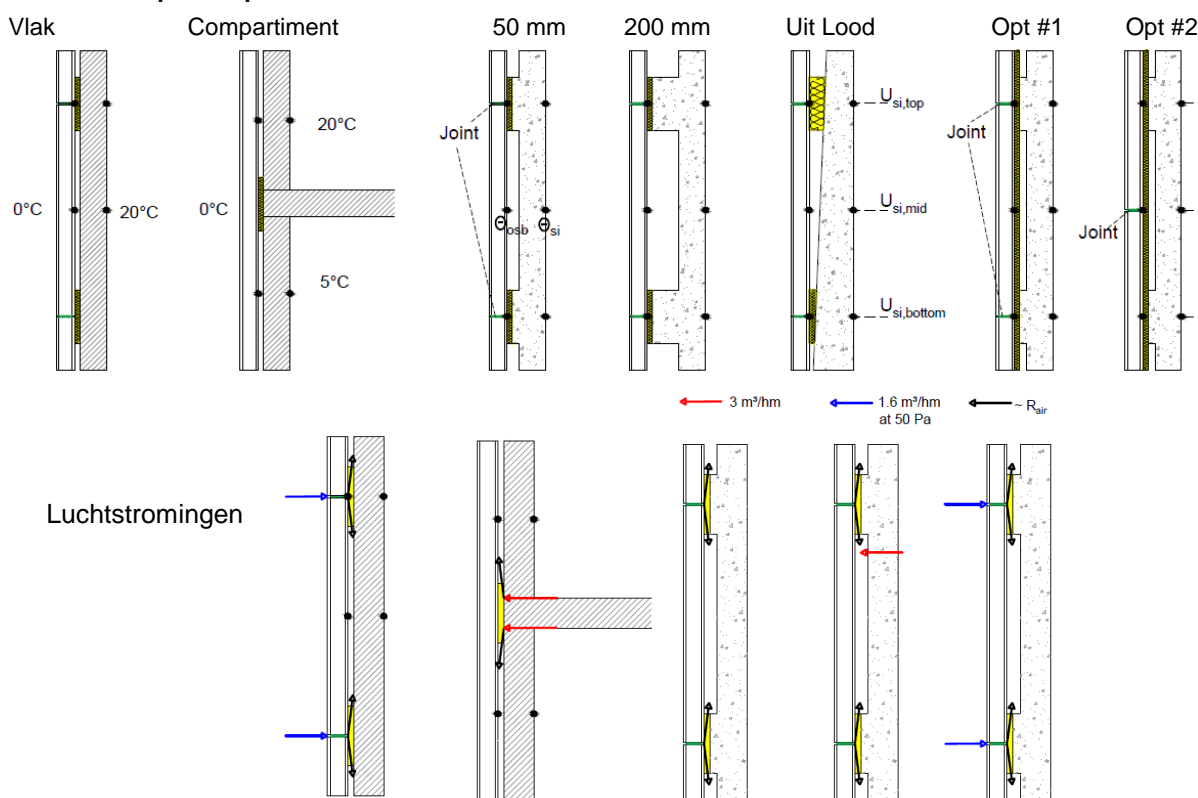
Figuur 7 (a) Gevel gebouw Magnel (profilering ± 50 mm) (b) Gevel de Sterre, zonder invulelementen in metselwerk ontstaan holtes van ± 200 mm

¹ Voltra is een thermische simulatiesoftware die toelaat om 3D dynamisch warmtetransport te modelleren (<http://www.physibel.be/v0n2vo.htm>)

2.2 Opbouw simulatiemodellen

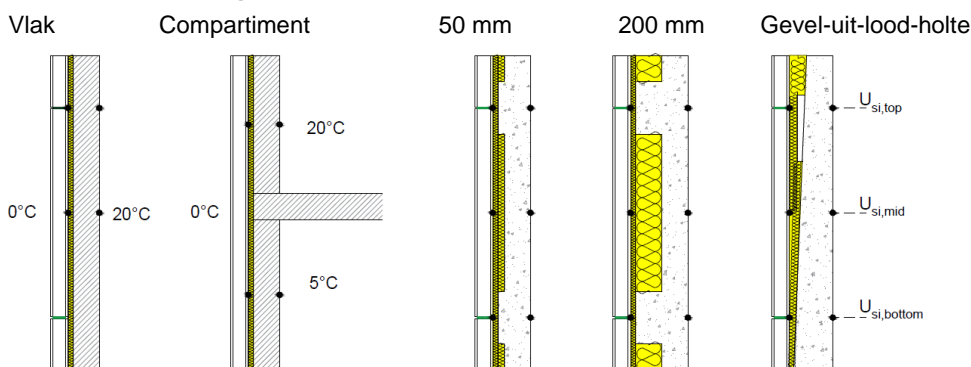
Er worden verschillende situaties gemodelleerd waarin gecontroleerd wordt of de adaptielaag eenvoudiger kan opgebouwd worden, met strips (Figuur 8) i.p.v. een volledig aansluitende laag (Figuur 9). De zwarte pijlen in de figuren stellen de luchtstromingen door de adaptielaag voor. Deze luchtstroming heeft een debiet dat afhankelijk is van de luchtstroomweerstand R_{air} van het materiaal in de adaptiestrip/laag (§3.2) en de winddruk (§3.3). De blauwe pijl stelt de luchtinfiltratie van de buitenomgeving voor. Deze heeft een debiet van $1.6 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$ bij 50 Pa . Deze waarde werd afgeleid uit een reeks luchtdichtheidsmetingen op diverse dichtingsmaterialen (zie PRO³ Onderzoeksrapport: Lucht- en waterdichtheid van prefab panelen). De rode pijl stelt de luchtinfiltratie van binnenuit, het luchtlekdebiet ($3 \text{ m}^3/\text{hm}$) was hier onafhankelijk van de winddrukken en bleef constant gedurende de simulaties.

Model 1: Adaptie strip

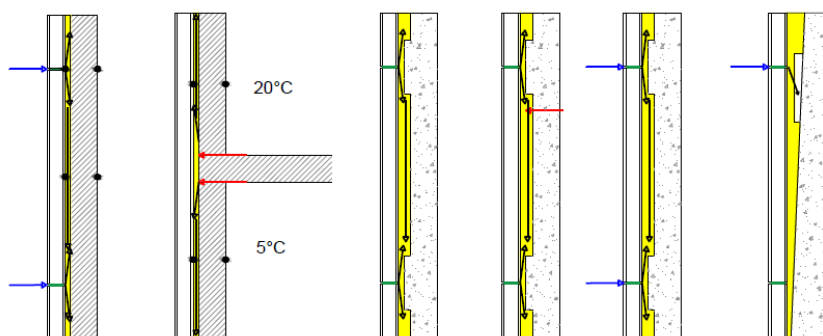


Figuur 8 Overzicht simulatiemodellen met de adaptie-strip

Model 2: Adaptielaag



Luchtstromingen
Slechte samendrukking



Figuur 9 Overzicht simulatiemodellen met een volledige adaptielaag

De bestaande gevel werd gemodelleerd als een bakstenen gevel ($\lambda=0.9$ W/mK, $d = 240$ mm) bij 'Model1-vlak', 'Model1-compartiment', 'Model2-vlak' en 'Model2-compartiment'. Bij de overige modellen ('50 mm', '200 mm' en de 'gevel-uit-lood'), werd een betonnen gevel ($\lambda=2.5$ W/mK, $d = 200$ mm) verondersteld.

Als prefab module werd een houtskeletmodule gevuld met minerale wol (100 mm, 0.035 W/mK), langs de buitenzijde afgesloten door een houtvezelplaat (18 mm, 0.14 W/mK) en langs de binnenzijde afgesloten door een OSB-plaat (18 mm, 0.13 W/mK) gemodelleerd. Het paneel heeft een totale dikte van 136 mm en een R-waarde van 3.12 m²K/W (zie ook Tabel 2). Tabel 3 geeft de U-waardes ter hoogte van het midden van het paneel per simulatiemodel (bovenste rij: niet-geventileerde luchtlaag (Figuur 8), onderste rij: volledige adaptielaag (Figuur 9). In de berekeningen wordt verondersteld dat de luchtlaag niet geventileerd is (NBN B62-002, 2008), en dat er geen luchtlekken van binnen- of van buitenuit zijn.

Tabel 2 Overzicht materiaaleigenschappen bestaande wand en prefab paneel

	Dikte (m)	λ (W/mK)
Bestaande wand		
Betonnen wand (zonder onregelmatigheden)	0.200	2.5
Bakstenen wand	0.240	0.9
Prefabmodule		
Houtvezelplaat	0.018	0.14
Minerale wol	0.100	0.035
OSB-plaat	0.018	0.13
Totale R-waarde Prefabmodule		3.12 m ² KW

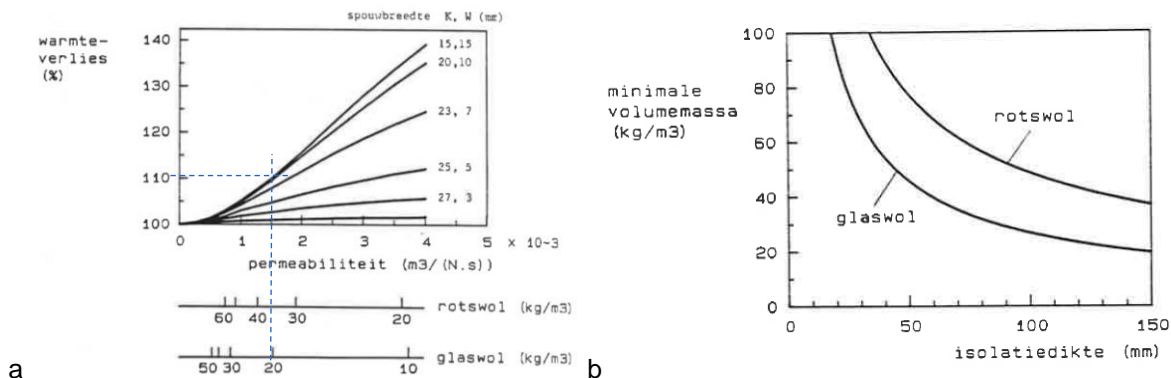
Tabel 3 Overzicht U-waardes (W/m²K) berekend met NBN B62-002, 2008

U_{midden} (W/m ² K)	Vlak	Compartiment	50 mm	200 mm
Luchtlaag	0.28	0.28	0.22	0.21
Volledige adaptielaag	0.21	0.21	0.17	0.10

2.3 Luchtstroomweerstand R_{air} [$\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$] en dichtheid ρ [kg/m^3]

2.3.1 Literatuur

Een open poreus materiaal wordt gekenmerkt door een luchtstroomweerstand R_{air} [$\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]. Deze eigenschap is gerelateerd aan de dichtheid van het materiaal. In (Lecompte, 1989) wordt gebruik gemaakt van de permeabiliteit [$\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{s}$] die omgekeerd evenredig is aan R_{air} . De permeabiliteit is gekoppeld aan de volumemassa van een open poreus materiaal (zie Figuur 10a). Stel, als bij een laag minerale wol van 50 mm (35 kg/m^3 rotswol, 20 kg/m^3 glaswol) langs beide kanten een luchtpouw van 15 mm zit, is de permeabiliteit ongeveer 1.5 $\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{s}$). In dat geval kan een extra warmteverlies van 10% verwacht worden (Lecompte, 1989).



Figuur 10 (a) stijgingspercentage warmteverliezen in functie van de permeabiliteit van de minerale wol (b) Vereiste minimale volumemassa van minerale wol, indien aan beide zijden restspouwen aanwezig zijn (Lecompte, 1989)

In (Harreither, Krainz, Weissinger, & Bednar, 2015) werd de dichtheid ρ en luchtstroomweerstand R_{air} gemeten van verschillende stalen minerale wol. Uit de meetresultaten blijkt dat de variatie op ρ en R_{air} groter wordt naarmate de afmetingen van de stalen kleiner waren. Daarnaast bleek R_{air} groter te zijn bij de stalen met grotere afmetingen. De correlatie tussen ρ en R_{air} bleek hoog te zijn in de labometingen, maar dat komt volgens (Harreither, Krainz, Weissinger, & Bednar, 2015) omdat in het labo de minerale wol zo nauwkeurig mogelijk geïnstalleerd werd in de testopstelling.

In de praktijk geldt: hoe hoger de dichtheid, hoe harder het materiaal. Voor harde rotswolplaten zijn dichtheiden rond 70-65 kg/m^3 te vinden, voor halfharde is dit 55 kg/m^3 , terwijl soepelere platen een dichtheid van 45 kg/m^3 hebben. Soepele rotswolplaten voor houtbouw hebben een dichtheid van 35 kg/m^3 (Rockwool). Bij glaswolmatten ligt de dichtheid gemiddeld tussen 10 en 32 kg/m^3 maar hogere dichtheiden zijn ook mogelijk.

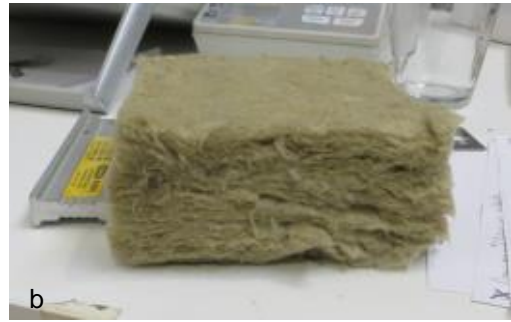
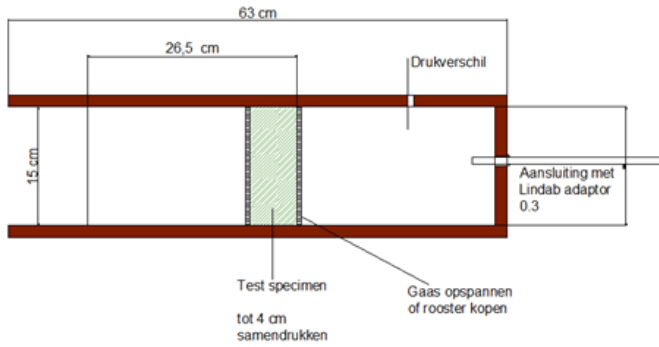
Typische dichtheiden voor diverse open poreuze (isolatie)materialen zijn weergegeven in Bijlage 1.

2.3.2 Meting labo

In de norm EN29053 wordt een meetmethode gegeven waarbij de luchtstroomweerstand R_{air} als een akoestische eigenschap wordt gezien. (Lecompte, 1989) geeft echter aan dat meetresultaten van de luchtstroomweerstand ook toegepast kunnen worden voor thermische berekeningen.

Conform EN29053, werd een opstelling gebouwd waarbij de minerale wol tussen twee geperforeerde metalen roosters wordt geplaatst. De norm geeft aan de stalen getest moeten worden met een maximale luchtsnelheid van 0.005 m/s. Om een voldoende lage luchtsnelheid te kunnen inblazen werd een LINDAB 6000 T gebruikt met een ventiel van 0.3 m^3/h . In EN29053 wordt aanbevolen dat de afmetingen van het materiaalstaal ten minste gelijk aan of groter moeten zijn dan de afmetingen van het toestel (NBN EN 29053, 1991). Het rooster had een oppervlakte van $0.013 \times 0.013 = 0.0169$

m². De stalen waren lengte en breedte 5 mm groter dan de doorsnede van het toestel zodat deze aan de zijkanten goed aansloten.



a

Figuur 11 (a) Snede testopstelling (b) Rotswol staal, dikte bij 0% compressie: 50 mm

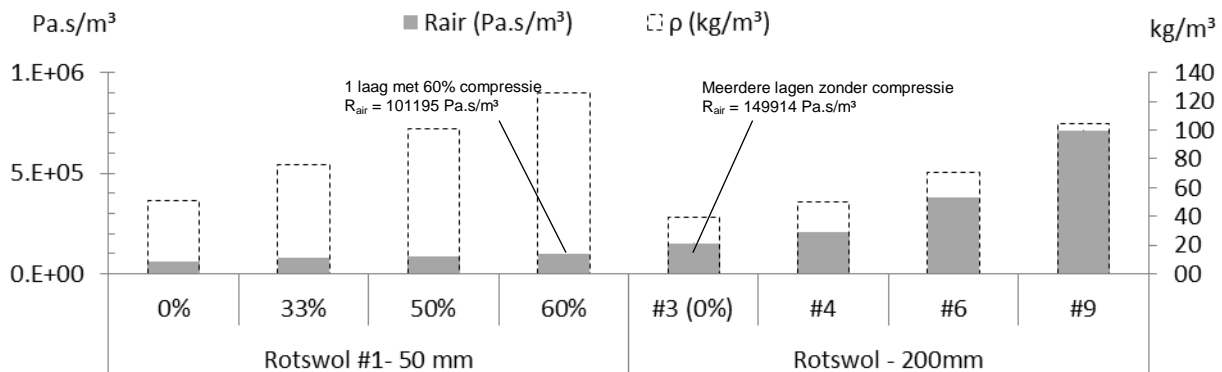
De luchtstroomweerstand werd afgeleid uit luchtdebietmetingen, waarbij het luchtdebiet (V) door de opstelling constant gelijk was aan 0.3042 m³/h (formule 3).

$$V_{opstelling} = v_{EN29053} \cdot A_{rooster} = 0.005 \frac{m}{s} \cdot 0.0169 m^2 = 0.0000845 \frac{m^3}{s} = 0.3042 \frac{m^3}{h} \quad (\text{formule 3})$$

Door het vaste luchtdebiet ($V_{opstelling}$) aan te houden, kan de luchtdruk P [Pa] gemeten worden die nodig is om dit debiet te halen. Met deze luchtdruk P kan dan de luchtstroomweerstand R_{air} berekend worden (formule 4)

$$R_{air} \left[Pa \cdot \frac{s}{m^3} \right] = \frac{P [Pa]}{V \left[\frac{m^3}{s} \right]} \quad (\text{formule 4})$$

In het labo werden rotswolstalen met een dikte van 50 mm getest op 4 verschillende compressiegraden (Rotswol #1-50mm) en met een opbouw van 2, 3 of 4 lagen om een dikte van 200 mm te halen (Rotswol-200mm). Die laatste testen dienden om de impact van het opvullen van grote holten in geprofileerde gevels te kunnen simuleren. Op basis van deze testen lijkt het combineren van meerdere lagen zonder compressie (#3 0%) een hogere luchtstroomweerstand R_{air} op te leveren dan de compressie van 60% van 1 laag rotswol van 50 mm; ook al ligt de dichtheid van de laag rotswol met 60% compressie meer dan 3 keer zo hoog.



Figuur 12 Overzicht resultaten meting EN29053

2.4 Winddrukken en luchtdebiet door de adaptielaag

Om het luchtdebiet uit de luchtstroomweerstand te berekenen, werd gebruik gemaakt van de windsnelheden uit een referentiejaar van het weerstation te Ukkel (v_{Ukkel}). De windsnelheden werden

omgerekend naar winddrukken P_b op een gebouw van 20 m hoog in terreincategorie 0, met een drukcoëfficiënt ($C_{pe,1}$) van -1.4 (Tabel 7.1, p 37, Eurocode 1-1-4).

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_o}{z_{o,II}}\right)^{0.07} = 0.19 \cdot \left(\frac{0.003}{0.05}\right)^{0.07} \text{ en } c_r = k_r \cdot \log\left(\frac{z}{z_o}\right) = k_r \cdot \log\left(\frac{z}{0.003}\right) \text{ en } v_b = c_r \cdot v_{ukkel} \text{ (formule 5)}$$

$$\text{Basiswinddruk } P_b = \frac{1}{2} \cdot c_{pe,1} \cdot \rho \cdot v_b^2 \text{ [Pa]}$$

Omrekening naar luchtdebiet van luchtstromingen in de adaptielaag

$$V_{adaptie} = \frac{P_b}{R_{air}} \text{ [m}^3\text{/s]} \quad \text{(formule 6)}$$

Met:

k_r = de terreinfactor [-]

z_o = ruwheidlengte [m], afhankelijk van de terreincategorie (zie tabel 4.1, Eurocode 1-1-4)
Hier: $z_o = 0.003$, volgens terreincategorie 0 (kustgebied)

$z_{o,II}$ = 0.05 m

c_r = ruwheidsfactor [-]

v_b = basiswindsnelheid [m/s]

v_{ukkel} = windsnelheid referentiejaar Ukkel [m/s] op 10 m hoogte

I = Turbulentie Intensiteit

Z = hoogte boven de grond = 20 m

P_b = Basiswinddruk [Pa]

$C_{pe,1}$ = drukcoëfficiënt

ρ = massadichtheid van lucht = 1.25 kg/m³

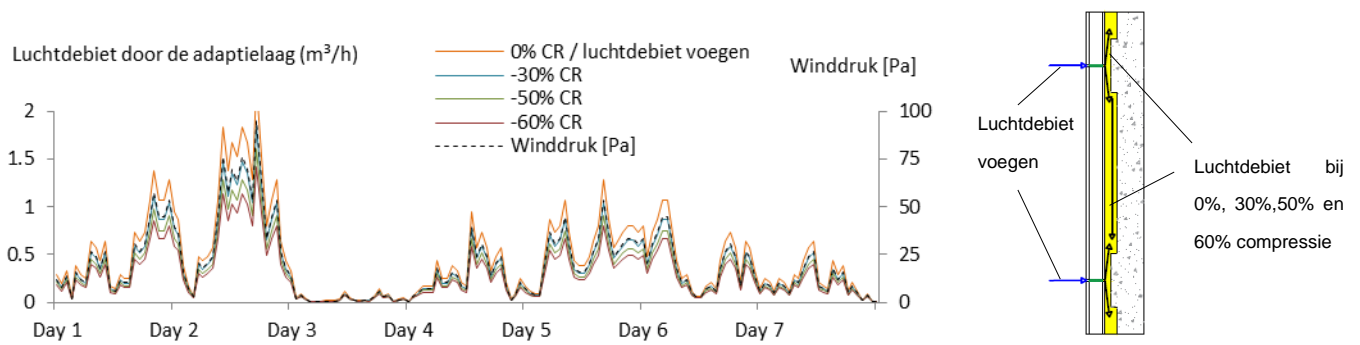
$V_{adaptie}$ = luchtdebiet door de adaptielaag [m³/s]

R_{air} = luchtstroomweerstand [Pa.s/m³]

Op die manier krijgen we een inputfile met een luchtdebiet, afhankelijk van de wind en de luchtstroomweerstand (R_{air}), per tijdstap van 1 uur over een heel jaar. Figuur 13 toont de winddrukken en ventilatiedebieten berekend uit 'Rotswol #1-50mm' (Figuur 12) door de adaptielaag van de eerste week in Februari.

De simulatie liep over deze week omdat de winddrukken hier variëren. Tussen dag 2 en 3 is een piek in de winddrukken en bijbehorende luchtdebiet door de adaptielaag te zien. Tijdens deze piek is het onderscheid tussen de verschillende compressiegraden ook het duidelijkst te zien. Bij 0% compressie zal er een luchtlekdebiet van 2 m³/h door de adaptielaag stromen tijdens de windpiek, bij 60% compressie is dit ongeveer 1 m³/h. De luchtdebieten (0% CR (compressie graad), 30% CR, 50%CR en 60%CR) werden gemodelleerd langs de ventilatiepaden doorheen de adaptielaag/strip. Het lekdebiet door de voegen werd gelijkgesteld met het debiet bij 0% compressie graad (Figuur 13).

Op de windstille dag (dag 3 en 4) is geen onderscheid te zien in de luchtdebieten van de verschillende compressiegraden (Figuur 13a). Er wordt dan ook verwacht dat de impact op de U-waarden en oppervlaktetemperaturen hier het kleinst zal zijn.

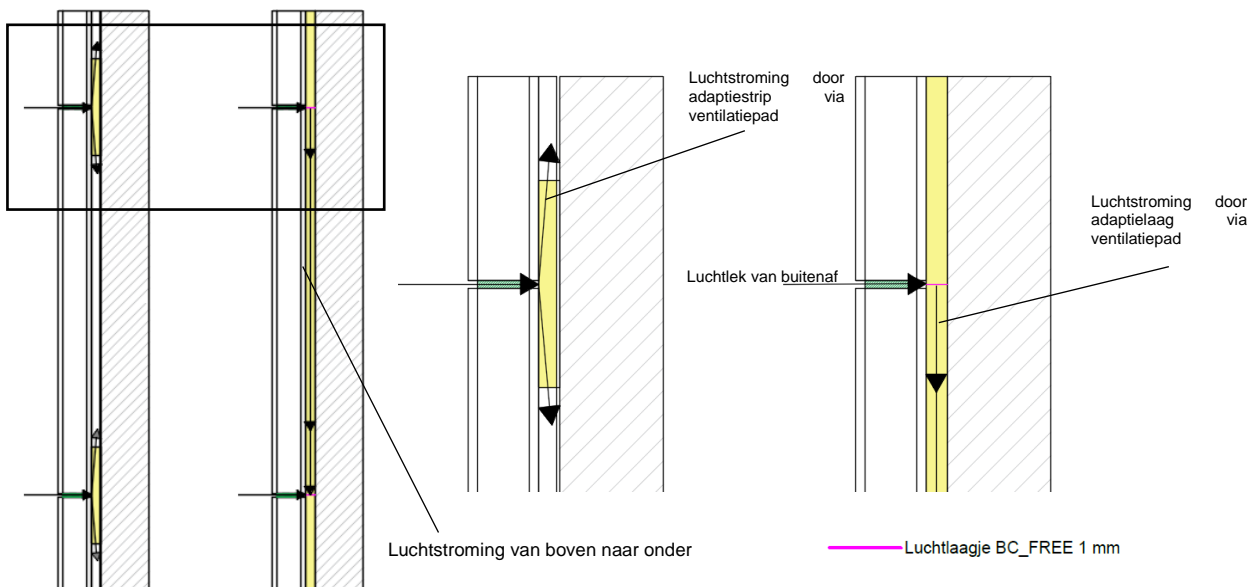


Figuur 13 (a) Winddrukken (zwarte stippellijn) en luchtdebiet door de adaptielaag/strip berekend met R_{air} (§3.2) en de winddrukken. (b) Aanduiding waar de luchtdebieten gemodelleerd zijn in het model

2.5 Modelling convectiestroming

In Voltra wordt verondersteld dat in een materiaalblok geen warmtetransport via convectiestromingen kan plaatsvinden. In realiteit kunnen wel convectiestromingen ontstaan in isolatiematerialen, indien ze bv. onvoldoende aangedrukt zijn (zie §1). Om toch de impact hiervan te kunnen modelleren, werden ventilatiepaden geprogrammeerd doorheen de adaptielaag. Dit is een 'pad' doorheen een materiaal dat van luchtblok naar luchtblok loopt. Om de luchtstroming doorheen de adaptielaag te modelleren, werd een ventilatiepad (zwarte pijl) doorheen de laag, van boven naar onder, gemodelleerd. Als begin- en eindpunt werd een luchtblok van 1 mm hoogte aan de voegen gemodelleerd ('Luchtlaagje BC_FREE, 1mm, Figuur 14). De temperaturen in die luchtblokjes waren afhankelijk van de omgevingsfactoren in de simulatie.

Doorheen het voegmateriaal (groen op Figuur 14) is een tweede ventilatiepad gemodelleerd die de buitenomgeving verbindt met de luchtblokjes in de voeg. Op die manier werden de luchtlekken door het voegmateriaal gemodelleerd.

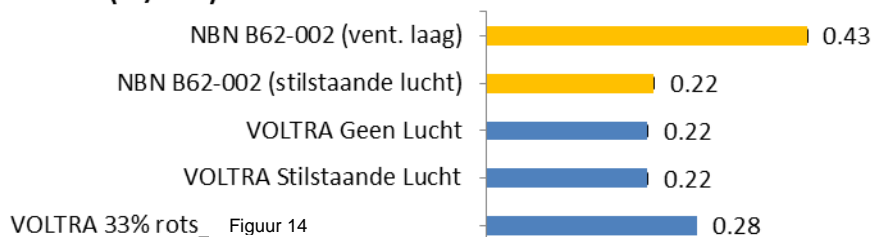


Figuur 14 Modelling van de luchtstromingen via een laagje van 1 mm in het verlengende van de voegen zodat het ventilatiepad van boven naar beneden in de adaptielaag loopt, evenwijdig met de bestaande gevel

De verhoging van de U-waarde (op basis van de binnenoppervlaktetemperatuur, zie formule 7) van deze simulatie was vergelijkbaar met de verhoging die in (Hagentoft, 2015) gevonden werd. In die laatste berekening verhoogde de U-waarde van 0.25 W/m²K naar 0.29 W/m²K (+ 16%). Wanneer de

U-waarde uit de norm met stilstaande lucht (0.22 W/m²K) vergeleken wordt met de U-waarde uit de simulaties (0.28 W/m²K) is een toename van 27% te zien.

U-waardes (W/m²K)



Figuur 15 Vergelijking U-waarden gesimuleerd en berekend met het transmissiereferentiedocument

2.6 Output en analyse resultaten

Om de impact van de compressiegraad van de adaptielaag te evalueren, werd de U_{si} -waarde gebruikt (formule 4). Om dit te berekenen werd de binnenoppervlaktetemperatuur (θ_{si}) aan de voegen en in het midden van het paneel opgevraagd. Daarnaast werd ook de oppervlaktetemperatuur van de OSB-plaat (warme kant, θ_{osb}) opgevraagd (aangeduide punten op Figuur 8 en Figuur 9).

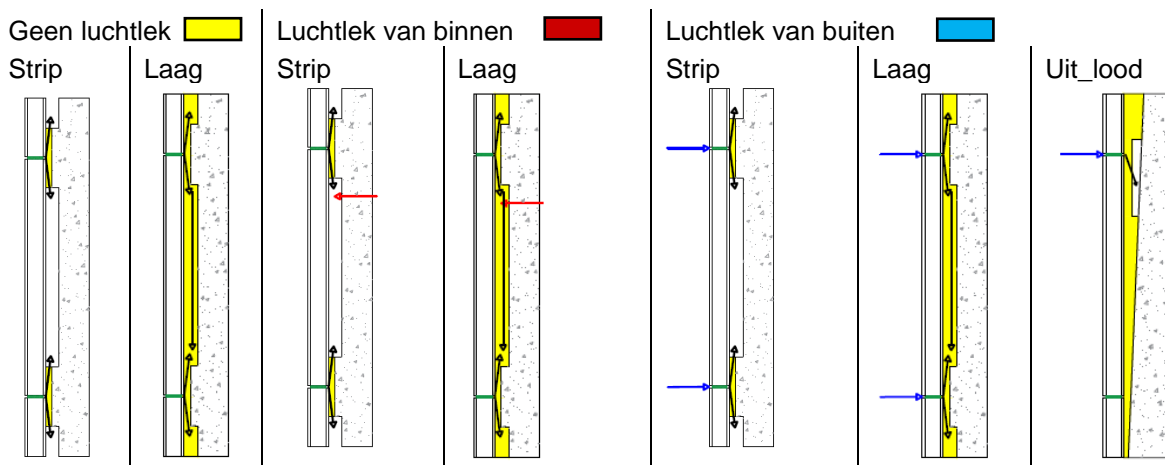
$$U_{si} = h_i \cdot \frac{\theta_i - \theta_{si}}{\theta_i - \theta_e} \quad \text{met } h_i = 7.7 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (\text{Formule 7})$$

Om enkel het effect van de compressiegraad te zien, werd de binnen- en buitentemperatuur constant gehouden, respectievelijk op 20°C en 0°C. Andere weersomstandigheden zoals zonnestraling en straling van de hemelkoepel werden buiten beschouwing gelaten. Ook de overgangscoefficienten h_i en h_e waren constant, respectievelijk 7.7 W/m²K en 25 W/m²K.

Tot slot werd in §3.6 de 50mm-geprofileerde gevel ter controle met zonnestraling gesimuleerd.

2.7 Terminologie in de analyse

Voor de duidelijkheid wordt in de analyse gesproken over 'Geen luchtlek', 'Luchtlek van binnen' en 'Luchtlek van buiten' (Figuur 16).



Figuur 16 Verduidelijking terminologie in de analyse

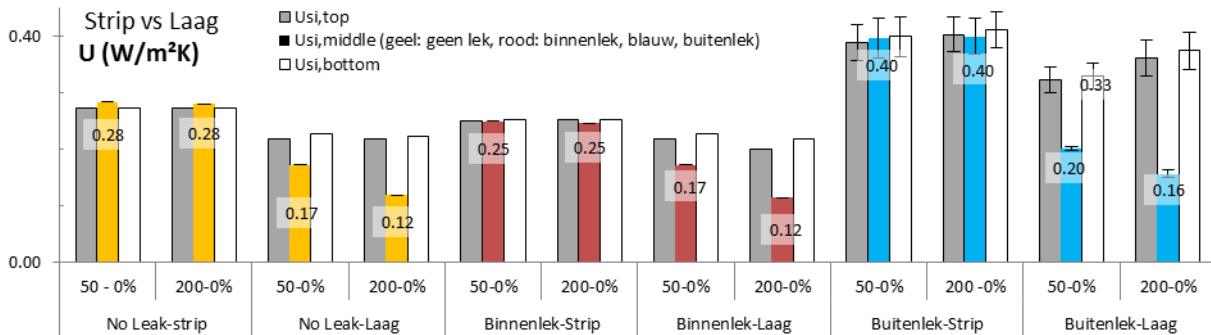
3 RESULTATEN EN BESPREKING

3.1 Strips vs. laag bij grote onregelmatigheden

Figuur 17 maakt duidelijk dat de adaptiestrip potentieel heeft indien geen luchtlekken van buitenaf aanwezig zijn. Luchtlekken van binnenuit hebben geen nefaste invloed op de thermische prestaties. Volledige opvulling kan wel voordeliger zijn omdat dit globaal een lagere U_{eq} -waarde oplevert (zie resultaten zonder luchtlek, Figuur 17).

Van zodra er luchtlekken van buitenaf aanwezig zijn (blauwe grafieken), is te zien dat de U_{si} -waarde van de modellen met adaptiestrip 42% stijgt (naar $0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$). Bij de configuratie met een volledig opgevulde laag is de stijging voor $U_{si,midden}$ slechts 17% (50 mm, $0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$) en 33% (200 mm, $0.16 \text{ W/m}^2\text{K}$). Aan de voegen is de stijging ook beperkter bij de modellen met een volledig opgevulde adaptielaag, maar is ze uiteraard wel hoger dan in het midden.

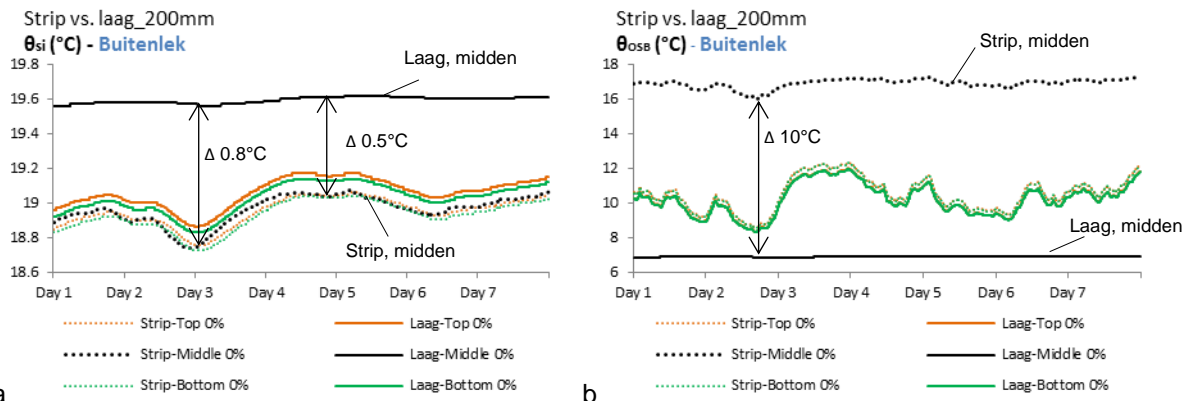
Indien de luchtdichtheid van het prefab element niet gegarandeerd kan worden, is het aanbevolen om de holte tussen het prefab paneel en de bestaande gevel volledig op te vullen.



Figuur 17 U_{si} -waarden bij Model 1_50 mm, Model 1_200 mm, Model 2_50 mm en Model 2_200mm, bij 0% compressiegraad en in het geval er geen luchtlekken zijn (geel), binnenlekken (rood) en buitenlekken (blauw).

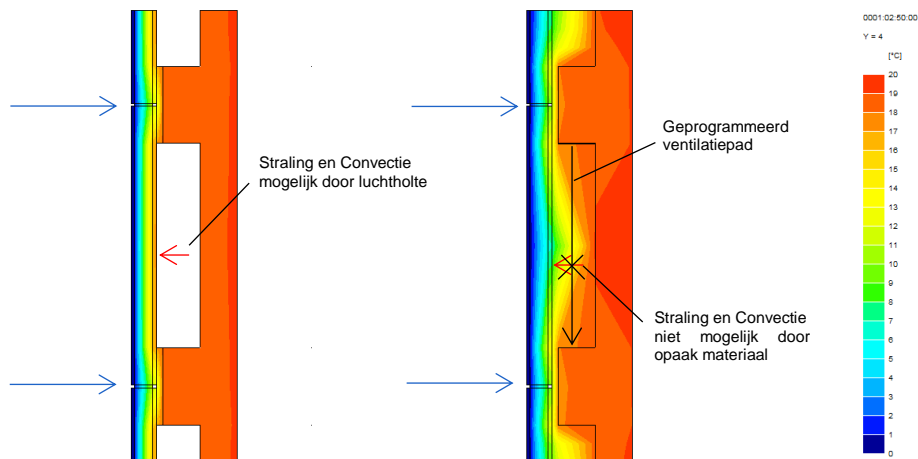
De oppervlaktetemperaturen θ_{si} en θ_{osb} schommelden gevoeliger in de opstelling met de adaptiestrip en luchtlekkage van buitenaf, in vergelijking met het opgevulde model. De temperatuurverschillen aan het binnenoppervlak zijn echter wel beperkt (Figuur 18a). Het maximale verschil in $\theta_{si,midden}$ tussen de configuratie met adaptiestrip en met volledige laag bedraagt 0.8°C , veroorzaakt door de piek in winddruk op Figuur 13. Bij windstil weer is het verschil in θ_{si} tussen het model met strip en met volledige laag 0.5°C .

De temperatuur aan de voegen is gelijklopend voor het model met strip en met volledige laag. De daling in temperatuur is te wijten aan de piek in winddrukken in het model.



Figuur 18 (a) Temperaturen aan het binnenoppervlak (θ_{si}) en (b) Temperaturen aan het OSB-oppervlak (θ_{osb}) bij 200 mm_geprofileerde gevel met buitenlekken, adaptiestrip vs. adaptielaag

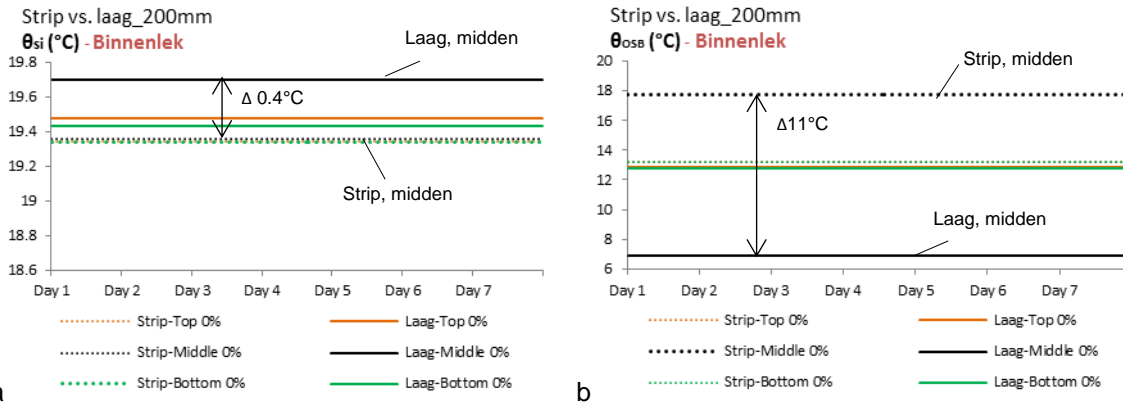
Aan het OSB-oppervlak (Figuur 18b, Figuur 19) is de temperatuur in het midden 10°C hoger bij de adaptiestrip-configuratie dan bij het volledig opgevulde model. Bij de adaptiestrip-configuratie vond er warmteoverdracht plaats door straling en convectie tussen de bestaande wand en het OSB-oppervlak, doorheen de luchtlag. Bij de volledig opgevulde laag vindt geen straling of convectie plaats tussen de bestaande wand en het OSB-oppervlak, doordat hier een opmaak materiaal tussen zit (de adaptielaag).



Figuur 19 Temperatuurverschil op het OSB-oppervlak tussen het model met adaptiestrip en met een volledig opgevulde laag is een gevolg van straling en convectie van warmte vanaf de bestaande gevel. Deze is verhinderd bij de volledig opgevulde laag, maar mogelijk bij de adaptiestrip.

Daarnaast is de invloed van de winddrukken in het midden van de OSB-plaat enkel zichtbaar bij het model met adaptiestrip. Bij de volledig opgevulde adaptielaag blijft de temperatuur in het midden van het OSB-oppervlak constant, waardoor het ventilatiepad doorheen de laag ook zeer weinig impact had op de oppervlaktetemperaturen in het midden van de OSB-plaat. Ten slotte is de temperatuur aan de voegen voor beide modellen gelijklopend. De invloed van de winddrukken is uiteraard beter te zien aan de oppervlaktetemperatuur van het OSB-oppervlak, daar dit dichterbij het buitenoppervlak zit.

In het geval het prefab systeem geen luchtlekken heeft of enkel onderhavig is aan luchtlekken van binnenuit (bv. Figuur 20), blijft de temperatuur aan de voegen en in het midden constant in de configuratie met de adaptiestrip. Het enige verschil tussen de configuratie met strip en met volledige laag is dan dat θ_{si} 0.4°C lager ligt het model met de adaptiestrip, terwijl θ_{osb} 11°C hoger ligt bij de adaptiestrip. Dit fenomeen is opnieuw te verklaren door het feit dat warmteoverdracht via straling en convectie wel mogelijk is via de luchtholte in de adaptie-strip configuratie, maar niet via de materiaalblok in de configuratie met de volledig opgevulde laag.



Figuur 20 (a) θ_{si} en (b) θ_{osb} bij 200 mm_geprofileerde gevel met binnenlekken, adaptiestrip vs. adaptielaag

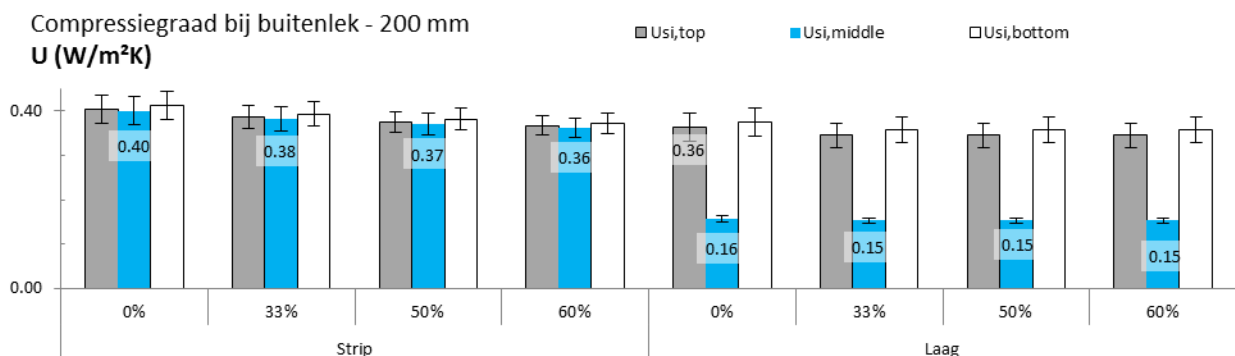
Ondanks de temperatuurverschillen tussen het model met de strip en met de volledig gevulde laag, is het toch afgeraden om een adaptiestrip te gebruiken als er luchtlekken van buitenaf kunnen zijn. Bij de U_{si} -waarden is een verdubbeling in U-waarde te zien (van 0.20 W/m²K naar 0.40 W/m²K Figuur 17), als de adaptielaag slechts gedeeltelijk opgevuld wordt en luchtlekken van buitenaf aanwezig zijn.

3.2 Impact compressiegraad en luchtstroomweerstand (R_{air})

3.2.1 Prefab panelen met luchtlekkage van de buitenomgeving

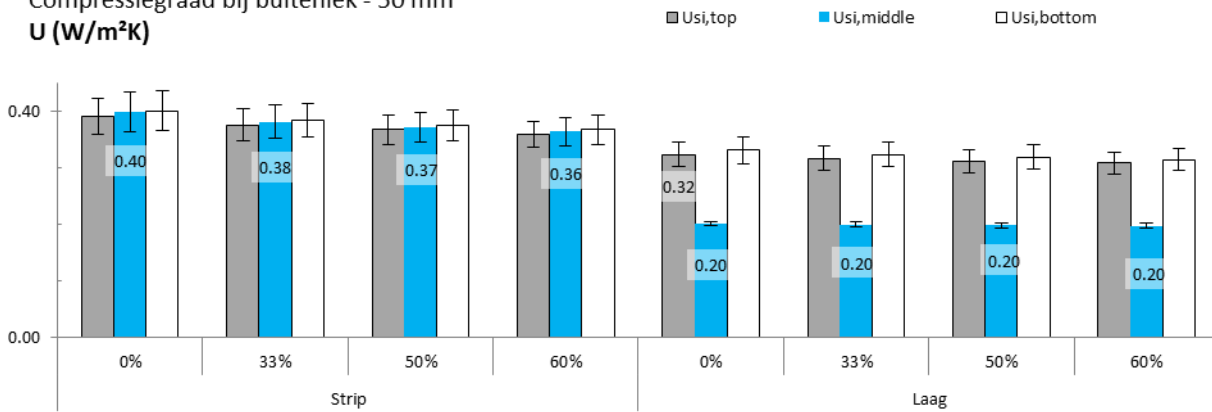
Wanneer een luchtlek van buitenaf aanwezig is, heeft de compressiegraad een geringe invloed op de U_{si} -waarden. De invloed is het grootst bij de configuratie met adaptiestrip (_200mm (figuur 19), _50 mm (figuur 20) en vlakke gevel (figuur 21): strip vs. laag) en op momenten waar een hoge winddruk aanwezig is. Bij configuraties met de volledige adaptielaag is de invloed van de compressiegraad te verwaarlozen, ook bij hoge winddrukken.

De vorm van de gevel (met 50 mm imperfecties of 200 mm imperfecties) speelt geen rol in de grootte van de impact van de compressiegraad, de verandering in U-waarde o.i.v. de compressiegraad heeft dezelfde grootteorde bij alle geometrieën (50 mm, 200 mm en vlak). Bij de geprofileerde gevels met strip vermindert de U_{si} -waarde met 10%, indien de adaptiestrip van 0% naar 60% compressie gaat (van $U_{si,0\%} = 0.40$ W/m²K naar $U_{si,60\%} = 0.36$ W/m²K, Figuur 21 en Figuur 22). Bij de vlakke gevels vermindert de U_{si} -waarde met 14% indien de adaptiestrip van 0% ($U_{si,midden} = 0.59$ W/m²K) naar 60% ($U_{si,midden} = 0.51$ W/m²K) gecompriemd werd (Figuur 23).



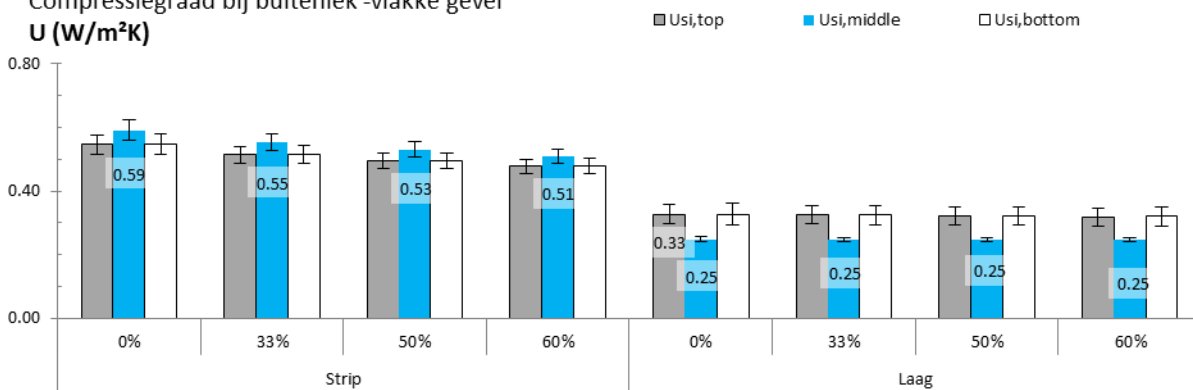
Figuur 21 Invloed van de compressiegraad op U_{si} bij een geprofileerde gevel met 200mm imperfecties

Compressiegraad bij buitenlek - 50 mm
 U (W/m^2K)



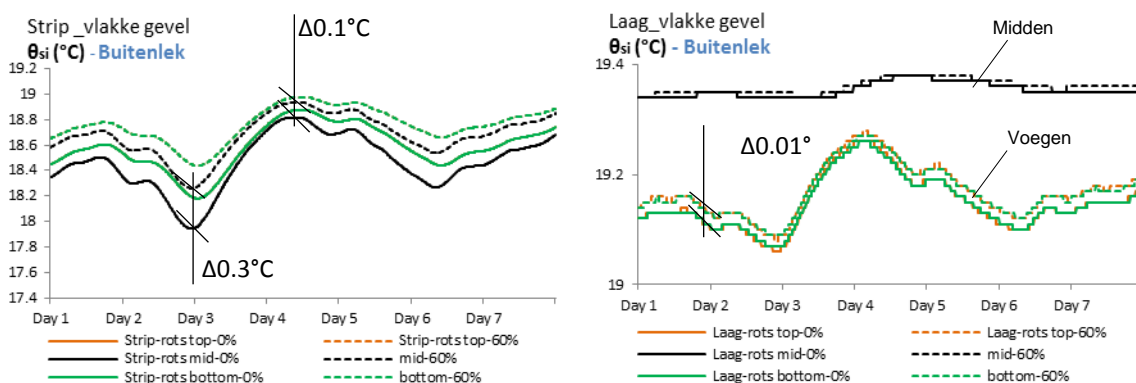
Figuur 22 Invloed van de compressiegraad op U_{si} bij een geprofileerde gevel met 50 mm imperfecties

Compressiegraad bij buitenlek - vlakke gevel
 U (W/m^2K)



Figuur 23 Invloed van de compressiegraad op U_{si} bij een vlakke gevel

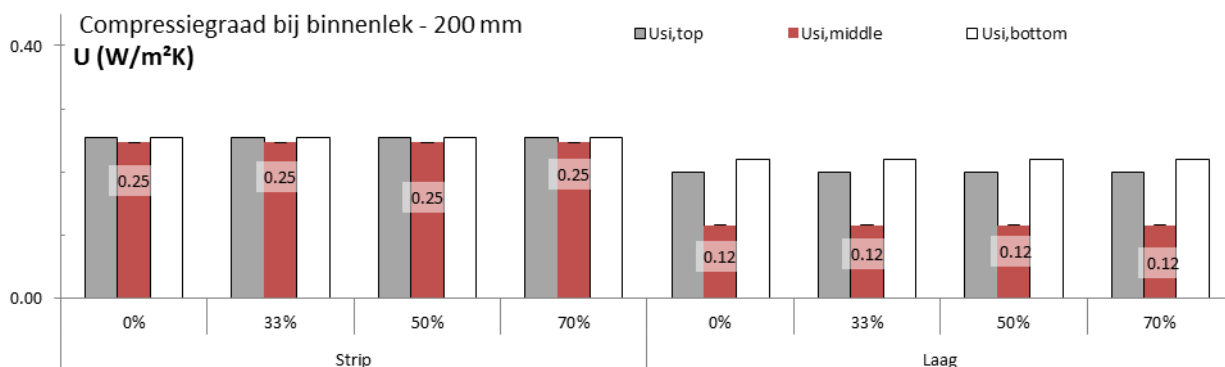
Bij de temperaturen in het vlakke gevel-model, is in het verloop van θ_{si} te zien dat de compressiegraad een geringe invloed heeft op temperatuurwaarden bij de adaptiestrip ($\theta_{si} +0.3^{\circ}C$ bij compressiegraad van 0% naar 60% bij luchttek van buitenaf, tijdens winddrukpiek, Figuur 24a). In windstille toestanden is het verschil in $\theta_{si} +0.1^{\circ}C$. Bij de volledig opgevulde laag is quasi geen verschil te zien. In dynamische simulaties waarbij het effect van zonnestraling wordt meegenomen zal het effect van de compressiegraad niet waarneembaar zijn (§3.6).



Figuur 24 Binnenoppervlaktetemperaturen Model_vlakke gevel, met luchttek van buiten en glaswol.

3.2.2 Prefab panelen met luchtlekken van de binnenomgeving

De compressiegraad van de adaptielaag heeft geen enkele impact op de U_{si} -waarde, op voorwaarde dat er geen luchtlekken van buitenaf aanwezig zijn. De vorm van de gevel van de adaptielaag (strip of laag) heeft geen invloed op de impact van de compressiegraad (Figuur 25).

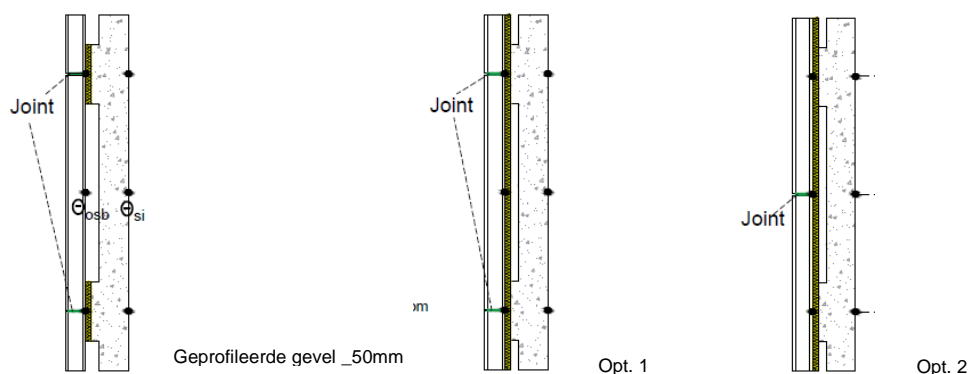


Figuur 25 U_{si} -waarden van de gevelconfiguratie met 200mm geprofileerde gevel, lek van binnen, adaptiestrip en –laag

3.3 Optimalisatie adaptiestrip

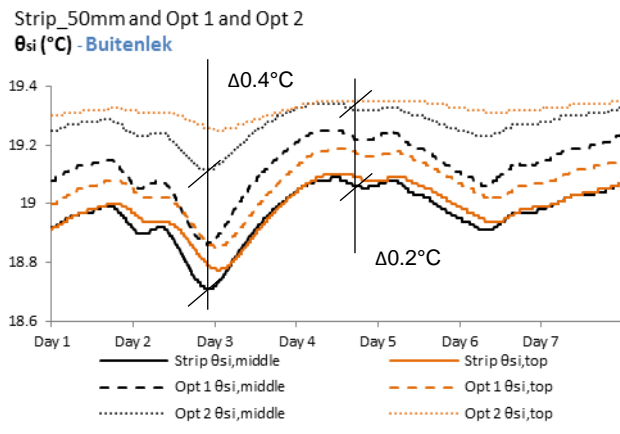
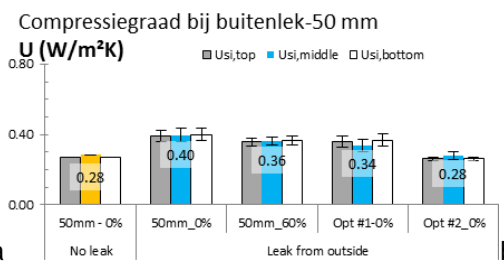
In het model met de geprofileerde gevel _50mm werden twee optimalisaties van de adaptiestrip getest (Figuur 26):

- Een configuratie waarbij de adaptiestrip een basis adaptielaag van 4 cm wordt –dit is in de praktijk het gemakkelijkst te prefabriceren.
- Een configuratie waarbij de adaptiestrip een basis adaptielaag van 4 cm wordt en waarbij de voeg van het prefab paneel tussen de profilering zit.



Figuur 26 Model met de geprofileerde gevel met profileren van 50 mm diep en Optimalisatie 1 (Opt1) met doorlopende adaptielaag en Optimalisatie 2 (Opt 2) met doorlopende adaptielaag en voeg in het midden

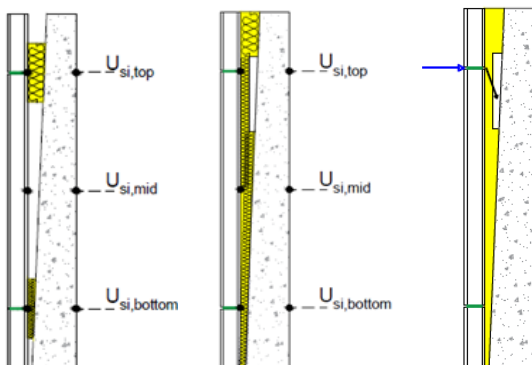
Figuur 27a toont aan dat de adaptiestrip laten doorlopen –zonder compressie- een grotere impact heeft op U_{si} dan de adaptiestrip tot 60% samen te duwen. De standaardafwijking van U_{si} blijft even groot bij Opt 1, bij Opt 2 blijven de U-waarden aan de voegen ($U_{si,top}$ en $U_{si,bottom}$) nagenoeg constant. De standaardafwijking hier wordt zeer klein. Figuur 27b toont θ_{si} van het model met de adaptiestrip (_50 mm), Opt 1 en Opt 2 bij 0% compressie. Bij Opt2 liggen de oppervlaktetemperaturen ongeveer 0.2°C hoger dan de configuratie met de adaptiestrip, in windstil weer. Bij maximale winddrukken wordt het verschil 0.4°C.



Figuur 27 (a) U_{si} -waarde bij een buitenlek bij de geprofileerde gevel bij 50 mm imperfectie, Opt 1 en Opt 2. (b) θ_{si} bij buitenlekken en 0% compressiegraad.

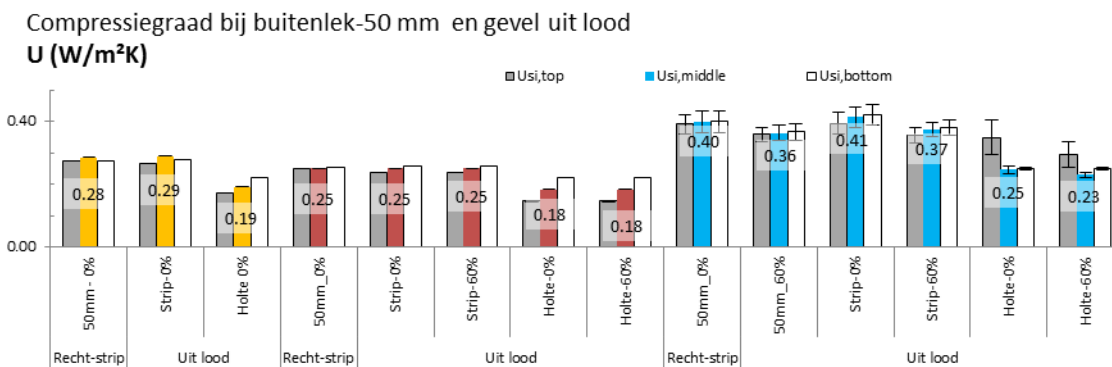
3.4 Aandachtspunten bij de gevel-uit-lood

De gevel-uit-lood werd gesimuleerd met adaptiestrips en met een volledig opgevulde adaptielaag, met een luchtholte (Figuur 28). Opnieuw werden verschillende compressiegraden toegepast en werden situaties zonder lekken, met een binnenlek en met een buitenlek gesimuleerd. Net zoals bij de geprofileerde rechte gevels (bv. _50 mm) is er geen probleem als de gevel-uit-lood opgevangen wordt door adaptiestrips of als de adaptielaag een luchtholte vertoont, zolang geen luchtlek van buitenaf aanwezig is (Figuur 29).



Figuur 28 Modellen met de gevel-uit-lood

In het geval van luchtlekkages van de buitenomgeving, heeft de compressiegraad een zekere invloed: van 0% naar 60% compressiegraad geeft een verbetering van 10% bij de adaptiestrip en gevel-uit-lood en bij de gevel-uit-lood met een luchtholte is er lokaal aan de holte een verbetering van 18%.



Figuur 29 U_{si} -waarden bij Model 1_50 mm en de gevel-uit-lood (strip en opgevuld met luchtholte), bij 0% en 60%compressiegraad en in het geval er geen luchtlekken zijn (geel), binnenlekken (rood) en buitenlekken (blauw).

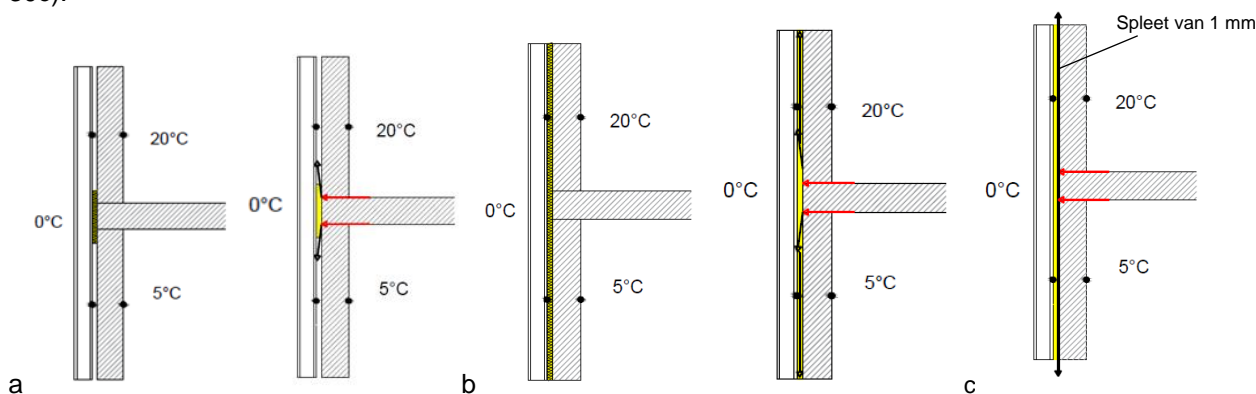
In het geval de gevel-uit-lood staat en er luchtlekken van buitenaf mogelijk zijn, worden luchtholtes het best vermeden. Lokaal aan de holte (aan $U_{si,top}$) kan de U-waarde oplopen tot $0.35 \text{ W/m}^2\text{K}$. In de simulatie ging het om een luchtholte met een breedte tussen 1 en 3 cm.

Een gevel-uit-lood opvangen door adaptiestrips is net als bij geprofileerde gevels mogelijk, zolang luchtlekken van buitenaf vermeden worden.

3.5 Noodzaak volledige adaptielaag bij luchtdichte prefab systemen?

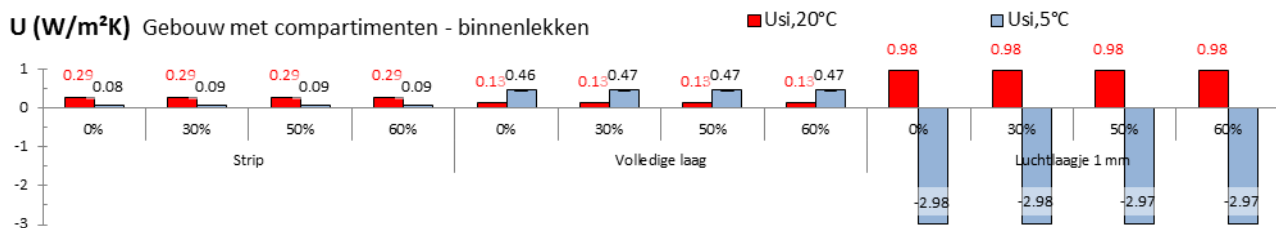
Uit de voorgaande resultaten blijkt dat een volledige adaptielaag overbodig is indien er geen luchtlekken van buitenaf mogelijk zijn. De vraag stelt zich of deze conclusies nog steeds geldig zijn als de adaptielaag weggelaten wordt bij een prefab renovatie van een gebouw met verschillende binnentemperaturen? (bv. sociale rijwoningen met lege en bezette woningen, traphal van een appartementsblok, enz...).

Om deze situatie te evalueren werd een configuratie gesimuleerd met twee compartimenten (Comp, Figuur 30), met een binnentemperatuur van 20°C en 5°C . Deze situatie werd gesimuleerd met een adaptiestrip op de scheiding (Figuur 30a) en een volledig aansluitende adaptielaag (Figuur 30b). Er dient namelijk steeds een vorm van compartimentering te zijn (door een strip in minerale wol) omwille van brandveiligheid en om convectiestromingen te vermijden bij gebouwen met verschillende warmteregimes. Zonder compartimentering kunnen convectiestromingen optreden in de luchtholte tussen het prefab paneel en bestaande gevel, ter hoogte van bv. een appartement (warmere zone) naar een traphal (koudere zone) en omgekeerd. Dit brengt extra warmteverliezen met zich mee. Om dit te illustreren werd ook een configuratie met een niet-aansluitende adaptielaag gesimuleerd (Figuur 30c).



Figuur 30 (a) Configuratie met strip aan de verdiepingsvloer (b) Configuratie met volledig opgevulde adaptielaag (c) Configuratie met een spleet van 1mm tussen de adaptielaag en de bestaande wand

Figuur 31 toont U_{si} bij binnenlekkage vanuit beide compartimenten langs de gemene muur (zie luchtstromingen op Figuur 30). De U-waarden werden berekend in het middelpunt van elk compartiment (zie zwarte punten Figuur 30). Uit de simulatie blijkt dat een strip voldoende is om de thermische prestaties van de gevel te waarborgen. De compressiegraad van het materiaal in de adaptiestrip/laag heeft geen enkele impact op de prestaties.



Figuur 31 U_{si}-waarde ter hoogte van het midden van de compartimenten

De U_{si}-waarden voor het compartiment met 5°C binnentemperatuur zijn bij de adaptiestrip lager dan die voor het compartiment op 20°C. Dit is te verklaren doordat U_{si} berekend wordt op basis van het verschil tussen binnentemperatuur en binnenoppervlaktetemperatuur. Voor het compartiment met een binnentemperatuur van 5°C is het verschil tussen de binnen- en de buitentemperatuur veel lager dan bij het compartiment met een binnentemperatuur van 20°C, waardoor het kleine verschil tussen binnen- en binnenoppervlaktetemperatuur een grotere invloed heeft (zie rekenvoorbeeld).

Rekenvoorbeeld:

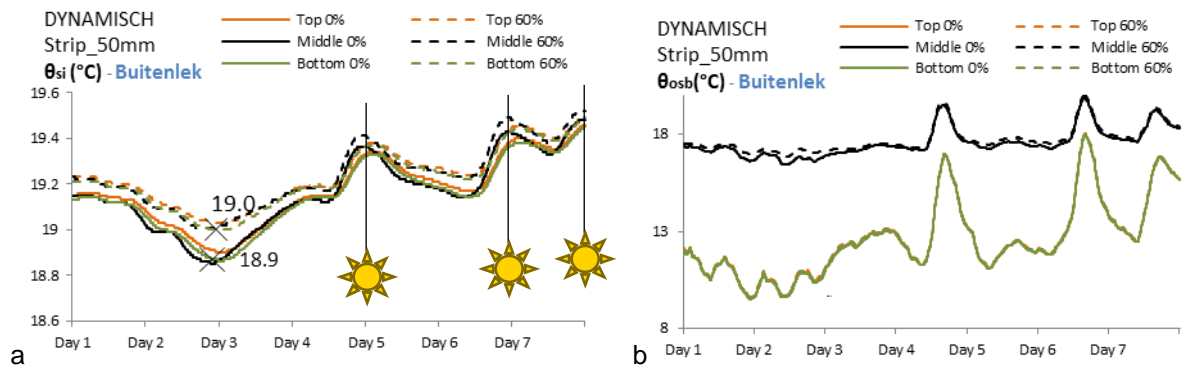
$$U_{si} = h_i \cdot \frac{\theta_i - \theta_{si}}{\theta_i - \theta_e} \text{ dus:}$$

$$U_{si,5^\circ C,strip} = 7.7 \frac{W}{m^2 K} \cdot \frac{5^\circ C - 4.95^\circ C}{5^\circ C - 0^\circ C} = 0.08 \frac{W}{m^2 K} \text{ en } U_{si,20^\circ C,strip} = 7.7 \frac{W}{m^2 K} \cdot \frac{20^\circ C - 19.25^\circ C}{20^\circ C - 0^\circ C} = 0.29 \frac{W}{m^2 K}$$

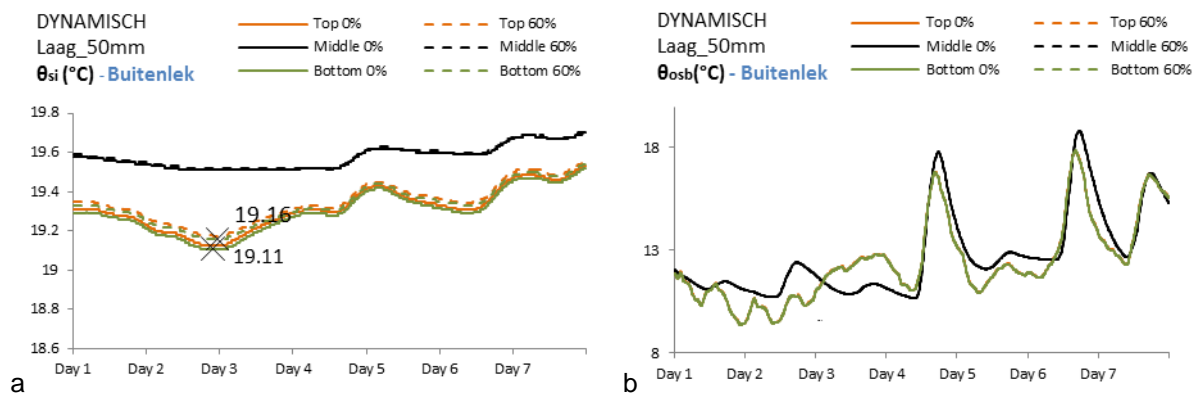
In het geval de adaptielaag niet goed aansluit (zoals op Figuur 30c, 'Luchtlaagje 1 mm') zijn luchtstromingen tussen de adaptielaag en de binnenwand mogelijk, van het warme naar het koude compartiment en omgekeerd. Hierdoor zakt de oppervlaktetemperatuur aan het warme compartiment (20°C) naar 17.46°C, en die van het koude compartiment (5°C) stijgt naar 6.94°C. Hierdoor worden zeer hoge U-waardes (0.98 W/m²K) berekend aan het warme compartiment en negatieve (-2.98 W/m²K) aan het koude compartiment. Hieruit kan besloten worden dat een zekere vorm van compartimentering in de adaptielaag (door een strip) altijd noodzakelijk is om convectiestromingen die ontstaan door temperatuurverschillen in de luchtholtes te vermijden.

3.6 Simulatie in met zonnestraling

Ter controle werden de adaptielaag/strip gesimuleerd in een vlakke gevel en een gevel met 50mm profilering, in de verschillende compressiegraden, met zonnestraling (Klimaatgegevens, zie bijlage 2). Door de zonnestraling op dag 4, 6 en 7 (bijlage 2) ontstaat met een halve dag vertraging een piek in de oppervlaktetemperaturen. Op die momenten is er geen enkel verschil te zien in θ_{si} bij 0% en bij 60% compressie, bij de adaptiestrip (Figuur 32). Bij de volledig gevulde laag bij 50 mm geprofileerde gevel is eveneens geen enkel verschil meer te zien (Figuur 33). De compressiegraad van de adaptielaag heeft dus geen invloed op de thermische prestaties van het gevelsysteem.



Figuur 32 Adaptiestrip en laag bij dynamische omstandigheden (a) Binnenoppervlaktetemperaturen (b) Oppervlaktetemperaturen OSB



Figuur 33 Volledig gevulde laag in dynamische omstandigheden (a) Binnenoppervlaktetemperaturen (b) Oppervlaktetemperaturen OSB

Echter, met zonnestraling en met luchtlekkage van buiten, blijkt een volledige gevulde laag te zorgen voor een stabielere binnenoppervlaktetemperatuur dan een adaptiestrip (Figuur 32a en Figuur 33a). Uiteraard hangt de stabiliteit van de binnenoppervlaktetemperatuur ook samen met de dikte en thermische isolatielaag van het prefab element en de dikte van de betonnen bestaande wand (zie Tabel 2)

In het midden van het OSB-oppervlak is het omgekeerde effect te zien (Figuur 32b en Figuur 33b). Bij het volledig opgevulde model is de stijging van de oppervlaktetemperatuur bij zonnestraling groter doordat de temperaturen daar lager zijn (zie Figuur 20 en Figuur 19 waarin oppervlaktetemperaturen gesimuleerd zijn zonder invloed van de zonnestraling).

4 BESLUIT

Afgaande op de huidige richtlijnen voor prefab renovatie (Dubois & De Bouw, 2015) (IEA ECBCS Annex 50, 2011) (TES EnergyFaçade, 2010-2013) moet de holte tussen het bestaande gebouw en de prefab elementen volledig opgevuld zijn met isolatiemateriaal. Bij de richtlijnen voor spouwmuurisolatie komt daar nog bij dat het binnenoppervlak luchtdicht moet zijn. Bij isolatie in houtskeletbouw moet de isolatie voldoende dens zijn, tussen 20 en 30 kg/m³. Voor inblaaisolatie moet de densiteit minimum 40 kg/m³ bedragen (Langmans, 2013).

In deze simulaties (met een gesloten prefab systeem) werd het volgende vastgesteld:

- Is volledig opvullen nodig?
 - Neen, indien het voegstelsel van de prefab panelen luchtdicht is zodat geen luchtlekken van buitenaf optreden.
 - Echter, er dient steeds een vorm van compartimentering te zijn (door een strip in minerale wol) omwille van brandveiligheid en om convectiestromingen te vermijden bij gebouwen met verschillende warmteregimes. Zonder compartimentering kunnen convectiestromingen optreden in de luchtholte tussen het prefab paneel en bestaande gevel, ter hoogte van bv. een appartement (warmere zone) naar een traphal (koudere zone) en omgekeerd (zie §3.5).
 - Bij bv. de gevel-uit-lood is een luchtholte geen probleem, zolang er geen lucht van buitenaf kan infiltreren.
 - Ja, indien de luchtdichtheid van het prefab systeem niet gegarandeerd kan worden.
- Moet de adaptielaag voldoende dens zijn?
 - In deze simulaties werd de luchtstroomweerstand van samples met een densiteit van minimum 39.1 kg/m³ gebruikt (20 cm rotswol, 0% compressie). De densiteit is dus hoger dan hetgeen wordt aanbevolen: tussen 20 en 30 kg/m³ volgens (Langmans, 2013). Uit deze simulaties blijkt de compressiegraad (en dus verhogen van de densiteit) geen significante invloed te hebben op de temperaturen aan de binnenzijde van de OSB-plaat en aan het binnenoppervlak van de gevel. Als zonnestraling wordt meegenomen in de simulaties is er quasi geen verschil meer (§4.6).

5 BIBLIOGRAFIE

- Dubois, S., & De Bouw, M. (2015). *AIMES- Architectural Industrialized Multifunctional Envelope Systems*. Brussels, Belgium: WTCB.
- Eeckhout, S., & Martin, Y. (2015). Brandveiligheid van details een aansluitingen in gebouwen. *WTCB-Contact 2015/1*, p25-30.
- Hagetoft, C.-E. (2015). Impact on the U-value due to airflows behind old buildings retrofitted with insulation modules attached to façades. *6th International Building Physics Conference 2015* (p. 6). Turijn, Italië: Elsevier.
- Harreither, C., Krainz, L., Weissinger, J., & Bednar, T. (2015). Experimental determination of the influence of installing fibrous insulation materials in timber frames on the air permeability and convective air transport. *6th International Building Physics Conference, IBCP 2015* (p. 6). Turin, Italy: Energy Procedia.
- Hens, H., Janssens, A., Depreatere, W., Carmeliet, J., & Lecompte, J. (2007). Brick cavity walls: A performance analysis based on measurements and simulations. (*Journal of Building Physics*, Vol.31, No.2).
- IEA ECBCS Annex 50. (2011). *Retrofit Module Design Guide*.
- Janssens, A. (2015). *Bouwsfysica 1 (Cursus 3de bachelor ingenieur-architect)*. Gent.
- Janssens, A., & Hens, H. (2007). Effects of wind on the transmission heat loss in duo-pitched insulated roofs: A field study. (*Energy and Buildings* 39 (9), 1047-1054).
- Kronvall, J. (1980). *Air flows in building components*.
- Langmans, J. (2013). *Feasibility of exterior air barriers in timber frame construction*. Heverlee, Belgium: KU Leuven, Science, Engineering & Technology.
- Lecompte, J. (1989). *De invloed van natuurlijke convectie op de thermische kwaliteit van geïsoleerde spouwconstructies*. Leuven: KU Leuven.
- NBN B62-002. (2008). Thermische prestaties van gebouwen-Berekening van de warmtedoorgangscoefficienten (U-waarden) van gebouwcomponenten en gebouwelementen-Berekening van de warmteoverdrachtscoëfficiënten door transmissie (Ht-waarde) en ventilatie (Hv-waarde) . Brussel, België: Belgisch Bureau voor Normalisatie.
- NBN EN 29053. (1991). Geluidleer - Bouwstoffen voor geluidtoepassingen - Bepaling van de luchtstroomweerstand (ISO 9053:1991). *ISO 9053*. NBN.
- Physibel. (2008). *Voltra. 3-dimensional dynamic simulation tool using the finite element method* (Version 7.0 ed.). Maldegem, Belgium.
- TES EnergyFaçade. (2010-2013). *Prefabricated Timber Based Building Systems for Improving The Energy Efficiency of the Building Envelope (Manual)*.
- WTCB. (2012, June). Na-isolatie van spouwmuren door het opvullen van de luchtspouw (Dutch). Brussels, Belgium.

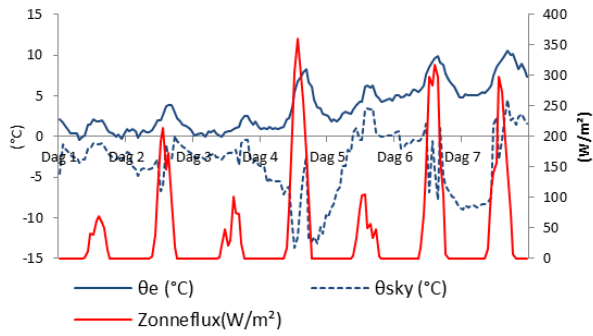
BIJLAGEN

1. Overzicht densiteiten van diverse open poreuze isolatiematerialen

Materiaal	Densiteit [kg/m ³]	Bron
Houtvezelplaat (hard)	870-960	(Kronvall, 1980)
Houtvezelplaat (semi-hard)	610	(Kronvall, 1980)
Houtvezelplaat (poreus)	215-260	(Kronvall, 1980)
Houtvezelplaat (semi-harde plaat)	160	http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/
Houtvezels (flexibel)	50	http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/
Minerale wol	20	(Kronvall, 1980)
	21.3	(Langmans, 2013)
	20	(Kuruman, 1996,I), geciteerd door (Langmans, 2013)
	17.9	(Kuruman, 1996,II), geciteerd door (Langmans, 2013)
	18.3	(Okland, 1998), geciteerd door (Langmans, 2013)
Glaswol	20	http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/
Rotswol	n/a	http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/
Minerale wol (platen)	16-250	Gevelisolatiehandboek
Minerale wol plaat	175-400	(Lecompte, 1989)
Glaswol	17	(Lecompte, 1989)
Houtwol	55	WTCB-Dossiers-Nr. 3/2010 – katern nr 6-p1
Cellenglas	115	http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/
Cellulose (navullen)	38-65	(TES EnergyFaçade, 2010-2013)
Cellulose (navullen-sprayen)	27-65	http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/
Cellenglasgranulaten (navullen)	18-30	(TES EnergyFaçade, 2010-2013)
Cellulose isolatiemat	35-45	(TES EnergyFaçade, 2010-2013)
Wol (schapen)	23	http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/
Hennep	25-38	http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/

2. Weersomstandigheden dynamische simulatie
 Bron: Test Reference Year, Uccle, (Physibel, 2008)

Dynamische simulatie: Zon en buitentemperaturen



Dynamische simulatie: weersomstandigheden

