

# POTENTIEEL VAN INTEGRATIE VAN HVAC IN PREFAB PANELEN

PRO<sup>3</sup>- 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 +32 09 264 32 48

Technicum B4  
Sint Pietersnieuwstraat 41, 9000 Gent

[www.ugent.be](http://www.ugent.be)

# INHOUDSOPGAVE

<b>Inhoudsopgave</b>	<b>2</b>
<b>1 Potentieel</b>	<b>3</b>
<b>2 Literatuur</b>	<b>3</b>
2.1 Hoe kunnen we technieken integreren?	3
<b>3 Invloedparameters ventilatieontwerp in paneel</b>	<b>8</b>
3.1 Vereiste debieten	8
3.2 Opbouw originele gevel (schoolgebouwen)	12
3.3 Voorbeeldcase: school in Krummbach	13
<b>4 Thermische evaluatie</b>	<b>16</b>
4.1 Literatuur: Grootte temperatuurdaling in het kanaal (Tes Energy Façade, 2014)	16
4.2 Opzet simulatiemodel PRO <sup>3</sup>	17
4.3 Evaluatiecriteria	19
4.4 Resultaten PRO <sup>3</sup>	22
<b>5 Conclusie</b>	<b>34</b>
5.1 Welke methode gebruiken?	34
5.2 Integratie van kanalen	34
<b>6 Bibliografie</b>	<b>36</b>

# 1 POTENTIEEL

Bij renovaties wordt typisch gedacht aan het aanbrengen van isolatie, het luchtdicht maken van de schil en de vervanging van het schrijnwerk. De noodzaak om tegelijk ook een ventilatiesysteem te voorzien wordt pas duidelijk na het ontstaan van schimmel- en vochtproblemen. De vochtgehalten binnenshuis kunnen hoog oplopen indien het gebouw luchtdichter werd gemaakt bij renovatie en geen ventilatiemogelijkheden werden voorzien. Daardoor kunnen achter meubels, in hoeken, waar de luchtcirculatie typisch beperkt is, vochtproblemen ontstaan. Bij doorgedreven renovaties is het dan ook van belang om ingrepen aan de bouwschil te combineren met een aanpassing aan de technische installaties.

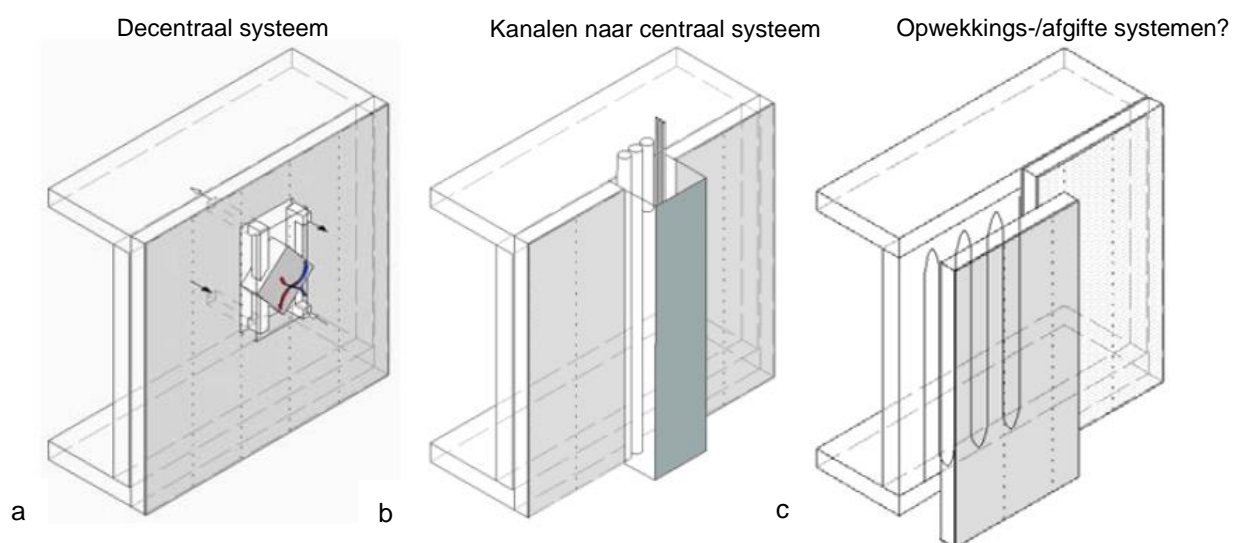
Bij renovaties met prefab elementen wordt het dan ook interessant als de kanalen van het HVAC-systeem ook mee in het paneel geïntegreerd kunnen worden. Op die manier worden met één beweging zowel de bouwschil als de technische installaties aangepakt. Voor gebouwen waar de hinder typisch beperkt moet blijven tijdens renovaties (bv. ziekenhuizen, scholen, kantoren) kan deze manier van renoveren een meerwaarde betekenen.

In dit verslag wordt dieper ingegaan op de technische aspecten rond het integreren van kanalen. Welke concepten bestaan er? Welke types gebouwen, met hun vereiste ventilatiedebieten, komen in aanmerking? Waar in het paneel moeten de kanalen geplaatst worden om de temperatuur in de kanalen zo constant mogelijk te houden? Is er een risico op schimmelvorming aan het binnenoppervlak of condens in het ventilatiekanaal?

## 2 LITERATUUR

### 2.1 Hoe kunnen we technieken integreren?

Er zijn drie manieren om technieken te integreren in een prefab paneel (Figuur 1) (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014) (Figuur 1).



**Figuur 1 (a) Decentraal systeem in het paneel (b) Kanalen in het paneel (c) Opwekkings- of afgifte apparaten in het paneel (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014).**

## 2.1.1 Decentraal systeem in één HVAC-paneel

Een eerste optie bestaat erin om een compacte luchtgroep in één paneel te integreren (Figuur 1a). Een voorbeeld hiervan is te vinden in Graz, waar 11 woonblokken met appartementen gerenoveerd werden. Per appartement werd één paneel uitgerust met een decentraal ventilatiesysteem met warmterecuperatie (rendement 75%). Per kamer is een toe- en afvoerkanaal voorzien, naast het raam (Figuur 2a). De gaten in de originele gevel werden tijdens de installatie van de adaptielaag aangebracht. Na de montage werd het boorgat langs de binnenkant vervolledigd en afgewerkt (Figuur 2b).



**Figuur 2 (a) Voorbeeld van een paneel met een geïntegreerd decentraal systeem (b) boorgaten en kanaal om de compacte luchtgroep aan te sluiten op de ventilator binnen (IEA ECBCS Annex 50, Building Renovation Case Studies, 2011)**

De opwekkingstoestellen moeten echter smaller zijn dan 200 mm, aangezien paneeldiktes meestal starten vanaf 200 mm dikte, excl. een adaptielaag van 40 mm (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014).

Door de gevraagde compactheid, zullen de apparaten typisch ook een relatief klein debiet of vermogen leveren. Zo zal een micro-luchtwarmtepomp een vermogen hebben van 1 à 2 kW, wat net genoeg is voor een appartement van 75 m<sup>2</sup>, uiteraard in functie van de warmtebehoefte (gelinkt aan de isolatiegraad, luchtdichtheid...) (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014). Dit concept is dus enkel geschikt voor gebouwen met aparte units, zoals gebouwen met appartementen, kleine lokalen enz.

Naast het apparaat zelf, zal de bijkomende structuur, nodig om de micro-installatie aan te bevestigen, een nefaste impact hebben op de U-waarde van het paneel. Bovendien blijft het opwekkingstoestel best toegankelijk voor onderhoud (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014).

Naast integratie in een paneel, kan het ook interessant zijn om een 3D-module te voorzien waarin de voornaamste HVAC-componenten in zitten: bijvoorbeeld een warmtepomp, een buffervat en een warmterecuperatie-unit voor de ventilatie. In de gevallen waar in het te renoveren gebouw geen plaats is voor de opwekkingstoestellen, kunnen deze plug-and-play modules een oplossing bieden. Zo werden al HVAC-modules aan de buitenkant van gerenoveerde rijwoningen geplaatst, zodat de apparatuur gemakkelijk toegankelijk is voor onderhoud (Nathan, 2016) (Figuur 3a). In Kerkrade werden de rijwoningen, naast een nieuwe bouwschil, ook voorzien van een compacte HVAC-unit, met alle HVAC-componenten in geïntegreerd (Figuur 3b). Door de kleine afmetingen kon deze in de bestaande zolderruimte geplaatst worden.



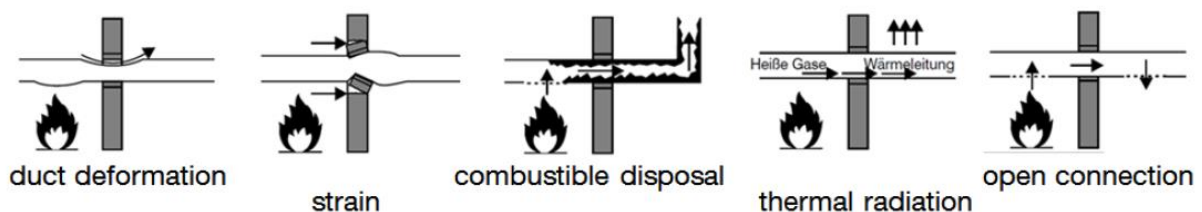
**Figuur 3 (a) Energiemodule van Nathan met Hr-ketel en tellers voor water en elektriciteit (Nathan, 2016) (b) Compacte HVAC-unit met de opwekkingstoestellen in Kerkrade (Thermod Brink, 2017)**

In de Belgische bouwsector zijn ook enkele compacte systemen te vinden die geschikt kunnen zijn voor integratie in een paneel (zie §3.1). Raadpleeg deel 2.3 van de Ontwerpgids voor voorbeeldoplossingen uit de Belgische Bouwsector.

## 2.1.2 Integratie kanalen

De tweede manier om HVAC te integreren bestaat erin kanalen te plaatsen in een paneel. Deze kanalen kunnen ventilatielucht of warm water voor verwarming bevatten, afkomstig van een centrale unit in het beschermd volume (bv. een geïsoleerde zolderruimte).

De kanalen zelf moeten voldoende geïsoleerd worden om mogelijke condensatie in de kanalen en tegen de kanalen te vermijden. Doorvoeren naar de binnenruimtes moeten luchtdicht uitgevoerd worden. Indien de kanalen zich in een vlamdicht gevelement bevinden, moeten er brandkleppen in de kanalen voorzien worden om verspreiding van brand via de kanalen te verhinderen (WTCB TV 254, 2015) (Figuur 4).



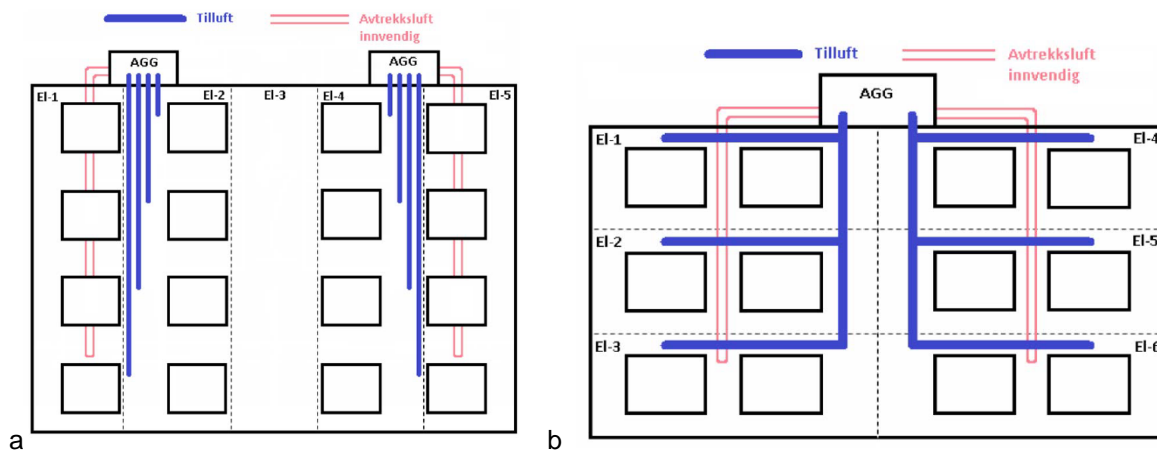
**Figuur 4 Mogelijke gevolgen van brand voor een ventilatiekanaal (Originele bron: VdS 2298:2002-06 Lüftungsanlagen im Brandschutzkonzept)**

Afhankelijk van de beschikbare ruimte voor de plaatsing van installatiecomponenten in het gebouw, kunnen de volgende kanalen geïntegreerd worden (Tabel 1):

**Tabel 1 Mogelijkheden kanalen en centrale unit volgens (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014):**

Ruimte voor HVAC?	Voorstel?
Geen centrale ruimte	HVAC-unit per ruimte + panelen met toe- en afvoerkanalen naar lokale HVAC-unit →Appartementsgebouwen
Centrale koker bijvoorbeeld per trapzaal	Toevoer via gevelpaneel, afvoer via centrale koker, →Appartementsgebouwen, scholen, kantoren
Centrale ruimte per gebouw	Kanalen in de gevelpanelen

Voor residentiële gebouwen en ziekenhuizen, is het aanbevolen om een rechtstreekse verbinding van de luchtgroep naar de verblijfsruimte te voorzien. Op die manier wordt geluidstransmissie tussen de verblijfsruimtes via de kanalen vermeden. Een lay-out met horizontale vertakkingen in het paneel wordt ook best vermeden, om drukverliezen door de aansluiting van verticale op horizontale kanalen te vermijden (Figuur 5) (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014).



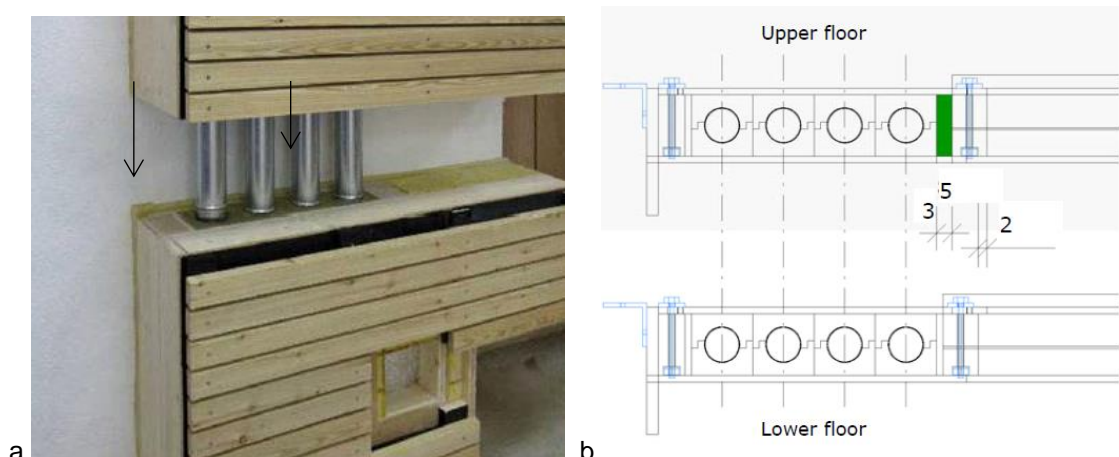
**Figuur 5 (a) Lay-out met verticale kanalen is te verkiezen boven een lay-out met vertakkingen (b), omwille van de hogere plaatselijke drukverliezen aan de aansluiting van een verticale op een horizontaal kanaal (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014)**

In Annex 50 werd de integratie van verticale kanalen ook onderzocht. Daar werd gewezen op de mogelijkheden om een push-fit systeem te gebruiken om kanalen te verbinden (Figuur 6). De kanalen worden uit het onderste paneel getrokken en met het paneel erboven verbonden via een push-fit systeem. Daarna zakt het bovenste paneel tot op het onderste en schuiven de kanalen terug in het in het onderste paneel (Figuur 7a). Bij deze methode moet de maatafwijking tussen de gevelopeningen gekend zijn. Indien de raamopening op de ene verdieping 2 cm meer naar rechts staat dan de andere raamopeningen, moet in het paneelontwerp voldoende ruimte voorzien worden om die 2 cm op te vangen zodat de kanalen perfect uitgelijnd blijven (Figuur 7b) (IEA ECBCS Annex 50, Retrofit Module Design Guide, 2011). Tot slot moet de positie van het eindkanaal en de aansluiting naar binnen precies uitgemeten worden (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014).



**Figuur 6 Push-fit systeem om leidingen geïntegreerd in panelen te verbinden**





**Figuur 7 (a) Kanalen schuiven terug in het onderste paneel (b) Maatafwijkingen opvangen met extra strookje rotswol bij de ventilatiekanalen (IEA ECBCS Annex 50, Retrofit Module Design Guide, 2011)**

### 2.1.3 Opwekking- en afgifte paneel

De derde manier bestaat erin om fotovoltaïsche cellen (opwekking) of warmteafgiftepanelen (afgifte) te integreren in een paneel. Een voorbeeld hiervan is te vinden in Graz, waar zonnecollectoren in het gevelpaneel geïntegreerd werden om sanitair warm water op te wekken (Figuur 8). Daarnaast werd ook een verwarmingssysteem in de adaptielaag geïntegreerd, onder vorm van XPS-isolatieplaten met koperen buizen (Figuur 8b) (IEA ECBCS Annex 50, Building Renovation Case Studies, 2011).

Door een verwarmingslichaam langs de buitenkant van de bestaande gevel te voorzien (Figuur 8b), worden de warmteverliezen van binnen naar buiten beperkt. Labotesten wezen echter uit dat het systeem heel gevoelig is voor luchtlekken infiltratie van koude buitenlucht tussen de bestaande gevel en de adaptielaag, waardoor het verwarmingssysteem in de adaptielaag wordt kortgesloten (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014). Indien afgifte-oppervlakken in de adaptielaag geïntegreerd worden, is het dus zeer belangrijk om overal een luchtdichte aansluiting te verzekeren tussen het prefab paneel en de bestaande gevel.



**Figuur 8 Prefabrenovatie van appartementsgebouwen in Graz (a) Zonnecollectoren in het gevelement om sanitair warm water op te wekken (b) Koperen warm water buizen , geïntegreerd in een XPS-laag in de adaptielaag.**

## 3 INVLOEDPARAMETERS VENTILATIEONTWERP IN PANEEL

### 3.1 Vereiste debieten

De mogelijkheid om ventilatiekanalen of decentrale ventilatiesystemen te integreren in een paneel is in de eerste plaats afhankelijk van de vereiste debieten, en dus van de functie van het gebouw. Voor ruimtes voor menselijke bezetting in niet-residentiële gebouwen (bv. kantoor, leslokalen,... ) waar niet gerookt wordt, moet een minimaal debiet aan verse lucht van 22 m<sup>3</sup>/u per persoon gerealiseerd worden. (Ventilatie document Niet-Residentieel, 2008). Het debiet is m.a.w. bepaald door de ontwerpbezetting of minimumbezetting (berekend op basis van de vloeroppervlakte per persoon, afhankelijk van de functie) van een ruimte. Voor een klaslokaal met een ontwerpbezetting van 20 leerlingen en 1 leerkracht kan het debiet dus oplopen tot 462 m<sup>3</sup>/u. Bij residentiële gebouwen is het debiet afhankelijk van de functie van de ruimte en de oppervlakte (algemene regel: 3.6 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>, (Ventilatiegids, 2007), maar er zijn ook minimale toe- en afvoerdebieten per ruimte), waardoor het debiet daar veel kleiner is.

Een eerste stap in het integratie proces bestaat er dan ook in om het vereiste debiet te bepalen en te vergelijken met de debieten die compacte ventilatie-units kunnen leveren en de debieten die kunnen geïntegreerd worden in de panelen.

#### 3.1.1 Rekenvoorbeeld met ventilatiekanalen in het gevelement

Om een idee te krijgen van het aantal kanalen, werd het ventilatiesysteem voor een appartement, een kantoorruimte en een leslokaal gedimensioneerd (Figuur 9). In de berekening werden de volgende zaken aangenomen:

- De grond- en geveloppervlaktes zijn in de drie modelgebouwen gelijk (Figuur 9);
- De toevoerkanalen zitten in het gevelpaneel;
- De afvoerleidingen zitten in centrale schachten in het gebouw.
- De diameter van de ventilatiekanalen werd vastgelegd op 100 mm.
- De luchtsnelheid in de woonruimtes is vastgelegd op 2 m/s, zoals aanbevolen in (Ventilatiegids, 2007). De snelheid van een geïntegreerd kanaal in het paneel is vastgelegd op 3 m/s (Ventilatiegids, 2007). Deze maximum snelheden werd vastgelegd om geluidshinder door stromende lucht te vermijden. Mogelijk kan deze snelheid wel hoger liggen omdat de kanalen hier in een prefab paneel geïntegreerd zijn en zich niet in de leefruimte bevinden. Daarom werd bijkomend met een luchtsnelheid van 6 m/s gerekend voor de centrale toevoerbuis, die zich in een gevelpaneel bevindt, centraal in het gebouw (Deel AB, Figuur 10).

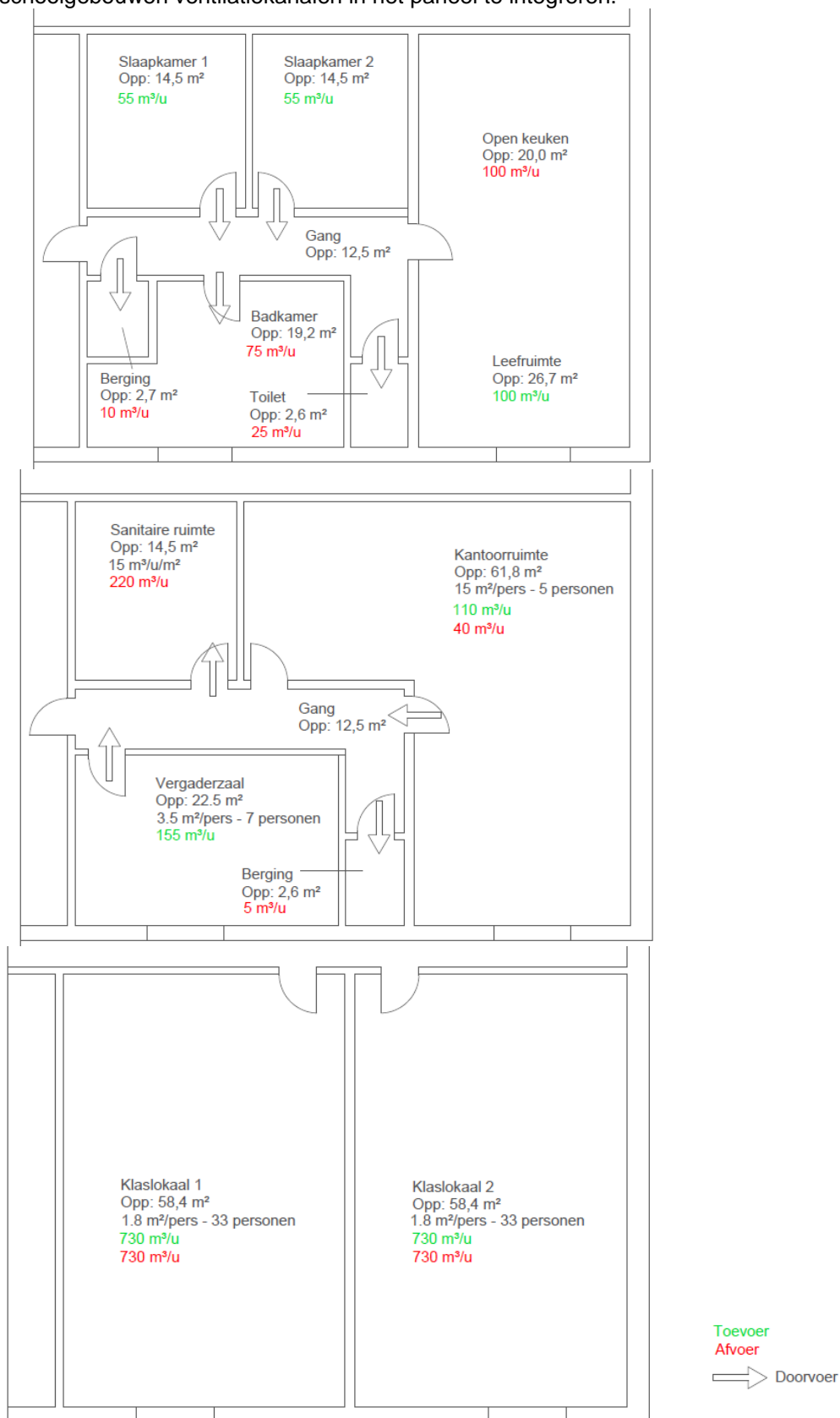
In de berekening werd dus gekeken naar het aantal ventilatiekanalen dat nodig is om te voldoen aan het gevraagde ontwerp toevoerdebiet.

Uit de berekening (Tabel 2) blijkt dat 2 toevoerkanalen per gevelpaneel volstaan voor de leefruimte van het appartement en voor het kantoor. Voor het schoolgebouw zijn 3 toevoerkanalen per gevelpaneel voldoende.

Indien echter uitgegaan wordt van een schoolgebouw met 3 verdiepingen met per verdieping 2 lokalen die door een centraal toevoerkanaal bediend worden (Figuur 10), lopen de gevraagde diameters snel op (Tabel 2). Het centrale toevoerkanaal –om de lucht van de centrale luchtgroep naar de leslokalen te krijgen-, moet uit 6 leidingen van 100mm diameter (min. 508 mm diameter, Tabel 2) bestaan om het gevraagde toevoerdebiet te kunnen leveren. Als de luchtsnelheid in de centrale leiding verdubbeld



mag worden naar 6 m/s, zijn drie kokers in de centrale gevelpanelen voldoende. Ander geformuleerd, als de toegelaten luchtsnelheid in de centrale leidingen beperkt is, lijkt het onhaalbaar om bij schoolgebouwen ventilatiekanalen in het paneel te integreren.



Figuur 9 Vereisten debieten voor (a) een appartement (volgens NBN D 50-001, 1991) (b) een kantoor (c) een school (volgens NBN EN 13779, 2010).

Tabel 2 Berekening van de ontwerpdebieten en het aantal ventilatiekanalen voor toevoerlucht van het appartement (volgens NBN D 50-001, 1991), het kantoor en het leslokaal (volgens NBN EN 13779, 2010).

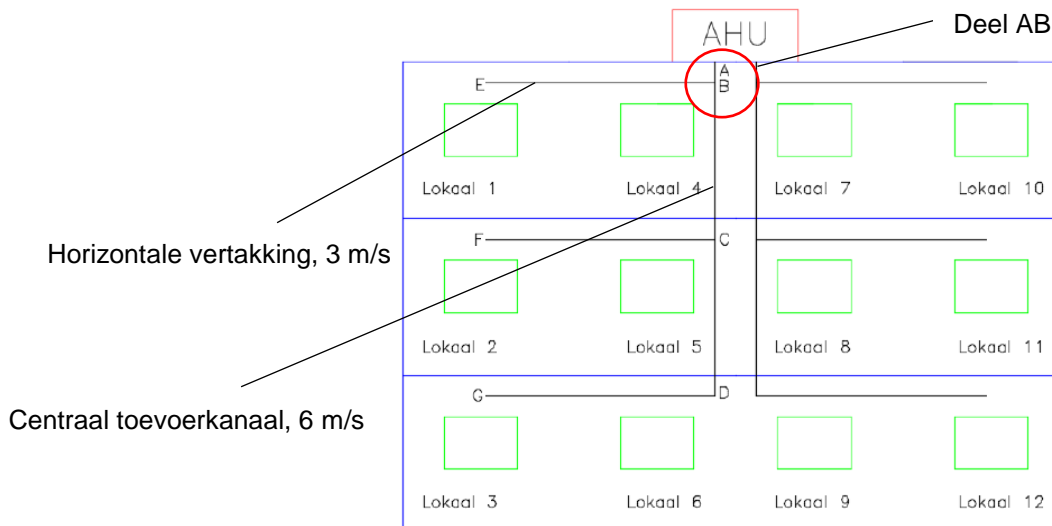
Appartement	Oppervlakte (m <sup>2</sup> )	Debiet (m <sup>3</sup> /h)	Debiet (m <sup>3</sup> /s)	Snelheid (m/s)	ø(mm)	Aantal leidingen met ø100 mm
Leefruimte	26.7	100	0.028	2.5	119	2
Slaapkamer 1	14.5	55	0.015	2.5	88	1
Slaapkamer 2	14.5	55	0.015	2.5	88	1
Horizontale vertakking		210	0.058	3	157	2
Deel AB (figuur 10)		630	0.175	6	193	2

Kantoor	Oppervlakte (m <sup>2</sup> )	Debiet (m <sup>3</sup> /h)	Debiet (m <sup>3</sup> /s)	Snelheid (m/s)	ø(mm)	Aantal leidingen met ø100 mm
Kantoorruimte	61.8	110	0.031	3	114	2
Vergaderzaal	22.5	155	0.043	3	135	2
Horizontale vertakking		265	0.074	3	177	2
Deel AB (figuur 10)		795	0.221	6	216	3

School	Oppervlakte (m <sup>2</sup> )	Debiet (m <sup>3</sup> /h)	Debiet (m <sup>3</sup> /s)	Snelheid (m/s)	ø(mm)	Aantal leidingen met ø100 mm
Leslokaal 1	58.4	730	0.203	3	293	3
Leslokaal 2	58.4	730	0.203	3	293	3
Horizontale vertakking		1460	0.406	3	415	5
Centraal toevoerkanaal (figuur 10)		4380	1.217	6	508	6



Figuur 10 Lay-out ventilatiekanalen uit het rekenvoorbeeld

Als de berekening van de leidingdiameters verder bekeken wordt voor het hele gebouw, bv. waarbij de ventilatiekanalen van een centraal punt op het dak komen en per verdieping horizontaal aftakken

(Figuur 10), wordt de diameter van de centrale leiding zeer groot bij schoolgebouwen (508 mm in dit voorbeeld), terwijl dit bij kantoorgebouwen en appartementen beperkt blijft tot 193 en 216 mm.

### 3.1.2 Rekenvoorbeeld met toevoerroosters in het schrijnwerk

Een tweede optie om ventilatie te voorzien in de modelgebouwen is door een toevoerrooster te integreren in het schrijnwerk. Het debiet dat toevoerroosters leveren kan verschillen van model tot model. Er zijn toevoerroosters die slechts 11.0 leveren bij 2 Pa en er roosters die tot 105,0 bij 2 Pa kunnen gaan. (Renson, Verluchtingen, 2016). Voor dit rekenvoorbeeld kiezen we een ventilatierooster dat een debiet van 46.0 m<sup>3</sup>/u/m kan leveren bij 2 Pa drukverschil (in combinatie met natuurlijke afvoer) en bij 10 Pa (in combinatie met mechanische afvoer) 116.0 m<sup>2</sup>/u/m verse lucht kan toevoeren kan toevoeren. Het debiet doorheen de opening met een drukverschil van 2 Pa moet minstens overeenstemmen met het minimale toevoerdebiet dat vereist is (Ventilatiegids, 2007).

Bij bepaling met 2 Pa, is 2.2 lopende meter rooster nodig voor de leefruimte en 15.9 lopende meter rooster voor het leslokaal (Tabel 3). In het modelgebouw op Figuur 9 moeten dan grotere raamopeningen voorzien worden in het schoolgebouw om de nodige ventilatiedebieten te kunnen voorzien via toevoerroosters.

**Tabel 3 Nodige lopende meters om voldoende toevoerlucht te voorzien, per modelgebouw**

	Ontwerpdebiet (m <sup>3</sup> /h)	Lopende meter toevoerrooster (m) – 2 Pa
<b>Appartement</b>		
Slaapkamer 1	55	1.2
Slaapkamer 2	55	1.2
Leefruimte	100	2.2
<b>Kantoor</b>		
Kantoorruimte	110	2.4
Vergaderzaal	155	3.4
<b>School</b>		
Klaslokaal 1	730	15.9
Klaslokaal 2	730	15.9

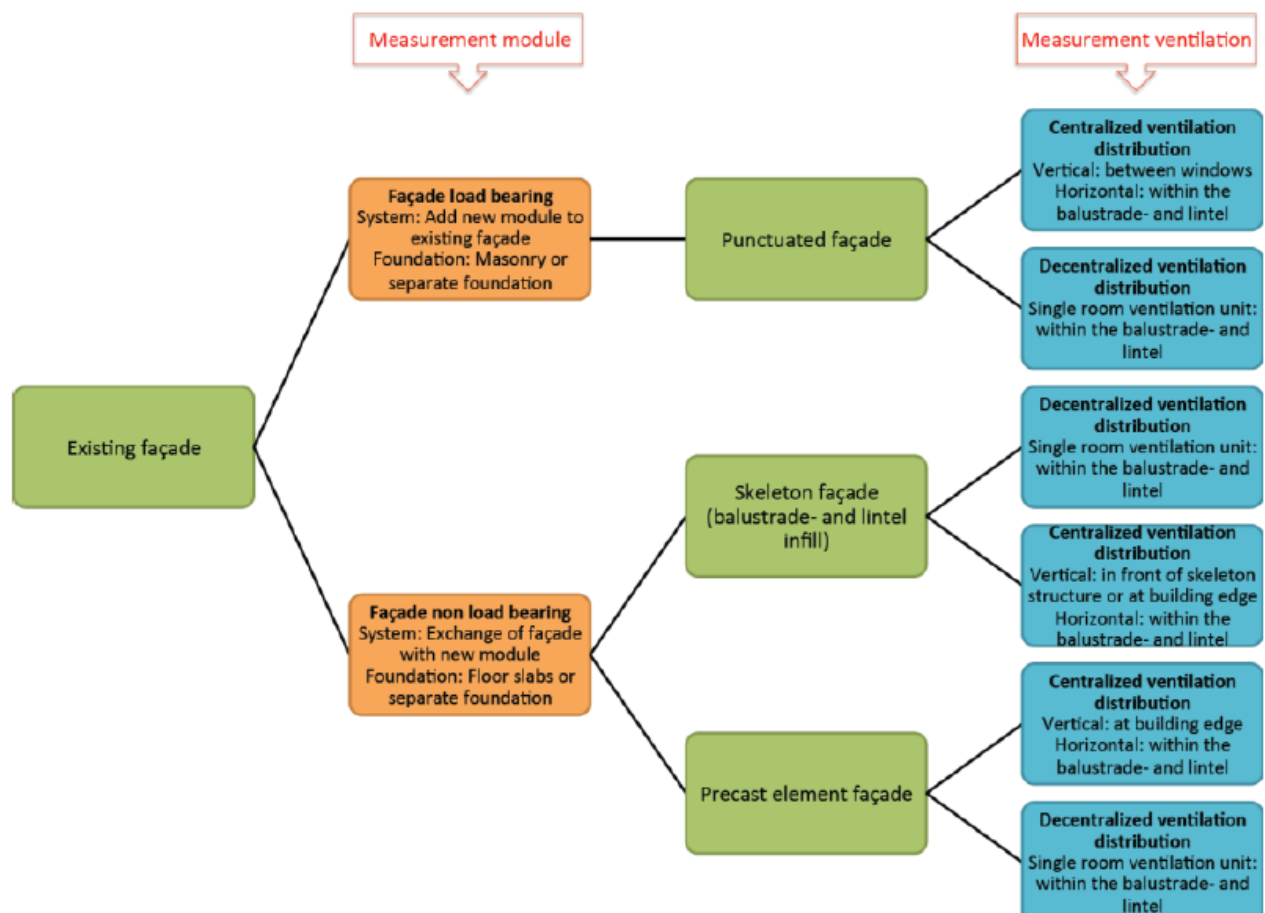
### 3.1.3 Rekenvoorbeeld met compacte luchtgroepen

Indien nieuwe ventilatoreenheden voor mechanische afvoer voorzien moeten worden in het gebouw, zijn er ook enkele compacte oplossingen mogelijk. Ter illustratie, het meest compacte systeem van Renson heeft een volume van 700 x 600 x 180 mm en biedt een ventilatiedebiet tot max. 325 m<sup>3</sup>/h bij 200 Pa (vraaggestuurde afvoer) (Renson, Healthbox (Systeem C+ EVO II) -- Technische fiche, 2016). Bij Schüco werd een compacte warmtewisselaar ontwikkeld met afmetingen 860 x 710 x 140 mm met een maximum ventilatiedebiet van 100 m<sup>3</sup>/h. Als deze systemen naast de ontwerpafvoerdebieten van de drie modelgebouwen gelegd worden, is te zien dat een compacte ventilatoreenheid van bv. Renson kan gebruikt worden voor één appartement (Figuur 9, totaal afvoerdebiet 210 m<sup>3</sup>/h) en de kantoorunit (Figuur 9, totaal afvoerdebiet 265 m<sup>3</sup>/h) waardoor gemakkelijk één gevelpaneel per unit met dit apparaat kan uitgerust worden.

Voor de leslokalen zijn de afvoerdebieten deze systemen kunnen realiseren opnieuw onvoldoende om tegemoet te komen aan het gevraagde ontwerpafvoerdebiet (Figuur 9, totaal afvoerdebiet 1460 m<sup>3</sup>/h = 4 ventilatoreenheden per lokaal (Renson, Healthbox (Systeem C+ EVO II) -- Technische fiche, 2016)).

### 3.2 Opbouw originele gevel (schoolgebouwen)

In het internationale project SchoolVentCool (2010-2013) werden nieuwe technische oplossingen voor koeling en ventilatie (verbeteren luchtkwaliteit) onderzocht bij de renovatie van schoolgebouwen. In het kader van dat project onderzochten (Kobler, Dott, & Heim, 2012) verschillende pistes om ventilatiekanalen te integreren in prefab modules, afhankelijk van de opbouw van de originele gevel. De belangrijkste parameter volgens de auteurs is of de gevel al dan niet massief en dragend is. De auteur maakt een onderscheid tussen massieve gevels met ramen (*punctuated façade*), gevels met invulelementen (*skeleton façade*) en complete geprefabriceerde gevels (*precast element façade*) (Figuur 11).



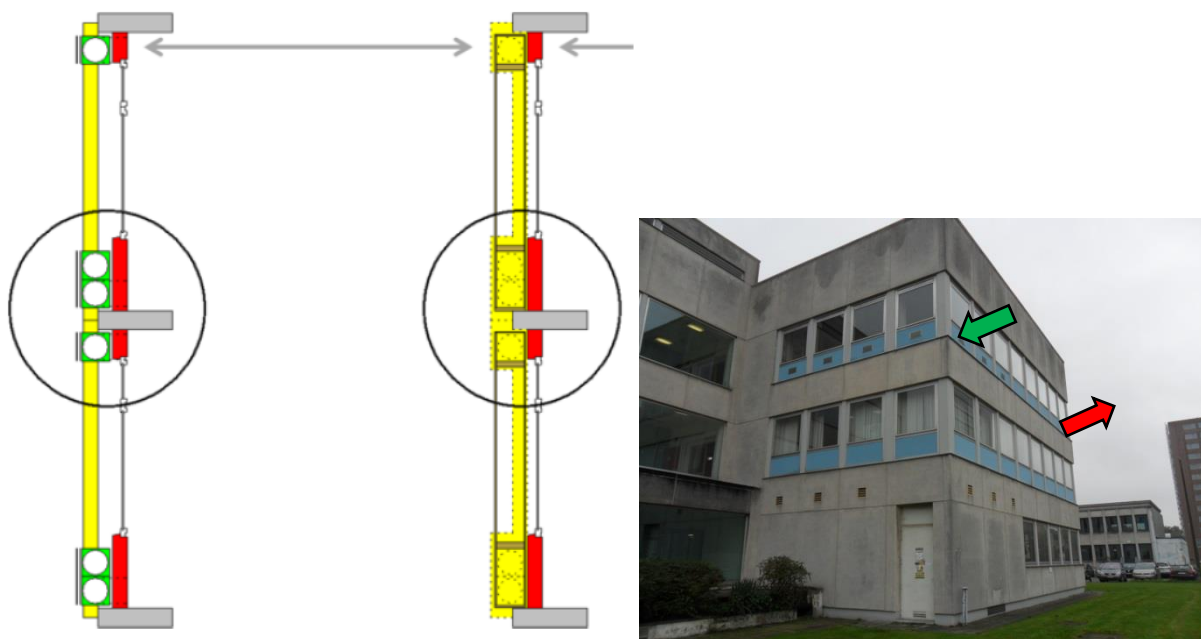
Figuur 11 Flowchart die leidt naar de keuze voor een (de)centraal ventilatiesysteem (Kobler, Dott, & Heim, 2012)

Naast het onderscheid tussen dragende en niet-dragende gevels, detecteren (Kobler, Dott, & Heim, 2012) nog drie andere typologie-aspecten die de lay-out van een HVAC-installatie in de gevel beïnvloeden:

- Lateien en borstweringen van raamopeningen;
- Ritmiek en aantal raamopeningen;
- Geometrie klaslokalen.

Doorgaans is er bij schoolgebouwen niet veel ruimte beschikbaar om een kanaalsysteem met louter verticale leidingen te voorzien. Door de grote diameters van de leidingen en het grote aantal raamopeningen in de gevel, zou de integratie van verticale ventilatiekanalen het uitzicht teveel veranderen. De afmetingen van het raam zouden verkleind moeten worden of er zouden ramen moeten gedicht worden. Een louter verticale distributie is dus enkel geschikt voor massieve gevels met voldoende ruimte tussen de raamopeningen (Kobler, Dott, & Heim, 2012). Indien er veel raamopeningen zijn, is het gebruik van toevoerroosters in het schrijnwerk een betere optie.

Horizontale vertakkingen en/of decentrale systemen zijn enkel mogelijk als de latei en borstwering van de raamopeningen geen dragende functie hebben, wat typisch voorkomt bij skeletstructuren met invulgevels. Ook de geometrie van de lokalen achter de gevel wordt belangrijk bij het plannen van de toe- en afvoer openingen van het ventilatiesysteem. Als deze te dicht bij elkaar geplaatst worden, kan een kortsluiting van lucht ontstaan. Zo zijn klaslokalen waarvan de lange zijde aan de gevel grenst met een bandraam ideaal voor ventilatieleidingen. Er is voldoende plaats onder het bandraam om kanalen te integreren en door de lengte van het bandraam kunnen de in- en afvoermond ver genoeg uit elkaar geplaatst worden (Figuur 12b) (Kobler, Dott, & Heim, 2012).



**Figuur 12 (a) Voorbeeld van een leidingensysteem in de borstwering en lateien (Kobler, Dott, & Heim, 2012) (b) Lokalen met een bandraam, waar de toe- en afvoermonden geïntegreerd in de gevel ver genoeg uit elkaar zouden kunnen liggen.**

### 3.3 Voorbeeldcase: school in Krumbach

In Krumbach (Duitsland) werd een school- en woongebouw gerenoveerd en voorzien van een ventilatiesysteem, geïntegreerd in de gevel. Aanvankelijk wou de eigenaar enkel het minimum doen om het gebouw te laten voldoen aan de huidige eisen. Pas later in de ontwerpfase werd gekozen om ventilatiekanalen te integreren in de gevelpanelen, om op die manier het Minergie-P label te halen. Dit Zwitsers energielabel komt overeen met het BEN-woning label in Vlaanderen (Kobler, Dott, & Heim, 2012).

Desondanks de late beslissing om ventilatiekanalen te integreren, was het vrij eenvoudig om tijdens de productie van de panelen leidingen te installeren. De school was gericht op volwassenen, er werd een bezetting van 10 personen per lokaal vooropgesteld. Daardoor bleven de debieten beperkt (10 x



22m<sup>3</sup>/h/p = 220 m<sup>3</sup>/h per lokaal) en konden 4 leidingen van 80 mm diameter voorzien worden, 2 voor toevoer- en 2 voor afvoerlucht. Bovendien was er ook ruimte op de zolder van het gebouw om de luchtgroep te installeren (Kobler, Dott, & Heim, 2012) (IEA ECBCS Annex 50, Building Renovation Case Studies, 2011).



Figuur 13 (a) Gebouw voor de renovatie (b) gebouw na de renovatie (IEA ECBCS Annex 50, Building Renovation Case Studies, 2011)



Figuur 14 Grondplan met aanduiding van de toevoer (pijltjes) en afvoerpunten (ruiten) die geïnstalleerd werden (Kobler, Dott, & Heim, 2012).

De ventilatiekokers werden geplaatst in een mal van rotswol. Door het samendrukbare materiaal was er voldoende tolerantie mogelijk, zodat de kanalen nog naar links of naar rechts kunnen verschuiven om een perfect rechte aansluiting tussen de panelen te garanderen. Door het gebruik van rotswol is de leiding ook EI30 beschermd volgens de Zwitserse normen. Om de leidingen van twee panelen te connecteren, werd tijdens de plaatsing genoeg plaats voorzien om de tussenstukken te plaatsen. Het bovenste paneel op Figuur 15 werd tijdelijk hoger gehouden om de connectoren op de kanalen te kunnen plaatsen. Daarna liet men het bovenste paneel zakken tot op de definitieve positie (Kobler, Dott, & Heim, 2012).



Figuur 15 (a) Installatie van het kanaal in een rotswol-mal. (b) Tijdens de plaatsing wordt het bovenste paneel tijdelijk hoger gehouden om de connectoren te kunnen plaatsen (Kobler, Dott, & Heim, 2012)

## 4 THERMISCHE EVALUATIE

Het plaatsen van ventilatiekanalen in een prefab paneel kan bepaalde risico's met zich meebrengen:

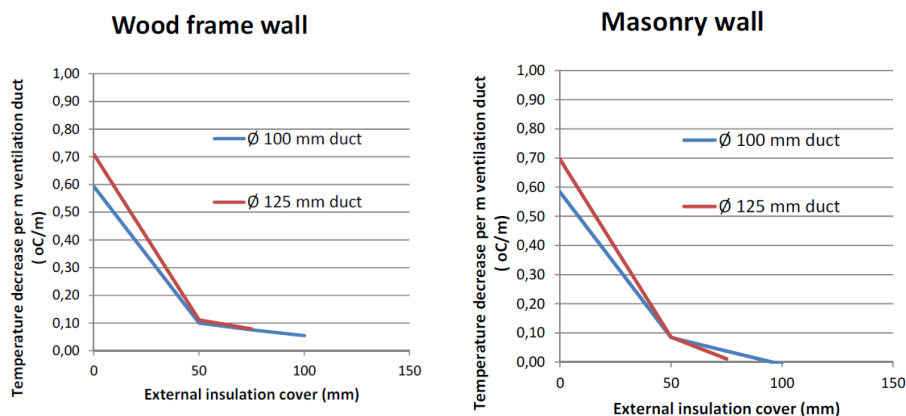
- er kunnen koudebruggen ontstaan ter plaatse van kanalen waardoor oppervlaktecondensatie ontstaat aan het binnenoppervlak;
- warme vochtige binnenlucht in kanalen kan afkoelen onder het dauwpunt waardoor lucht condenseert in het kanaal zelf;
- koude buitenlucht stroomt in het kanaal waardoor er condens optreedt in het paneel aan de buitenkant van het kanaal.

Deze risico's werden in PRO<sup>3</sup> geëvalueerd aan de hand van thermische simulaties in VOLTRA. Dit is een thermische simulatiesoftware die toelaat om 3D dynamisch warmtetransport te modelleren (Physibel, 2008).

### 4.1 Literatuur: Grootte temperatuurdaling in het kanaal (Tes Energy Façade, 2014)

In TES Energy Façade werd de temperatuurdaling van opgewarmde toevoerlucht gesimuleerd in een kanaal geïntegreerd in een houtskeletelement (200 mm, met isolatie met  $\lambda = 0.037$  W/mK) dat tegen een houtskeletwand (100 mm) en een massieve metselwerkwand (200 mm) geplaatst werd. Er werden kanaaldiameters van 100 mm en 125 mm gesimuleerd met een isolatiedekking van 0, 50 en 100 mm in het paneel. De simulaties in TES Energy Façade werden uitgevoerd onder statische condities, met een temperatuurverschil van 20°C tussen binnen en buiten. In het simulatiemodel had de warmtewisselaar een effectiviteit van 80% (Temperatuur toevoerlucht aan het begin van het kanaal = 16°C) en werd met 0.5 luchtwisselingen per uur per appartement rekening gehouden. Het exacte debiet per appartement werd niet vermeld, waardoor de luchtsnelheid door de kanalen in deze modellen niet geweten is (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014).

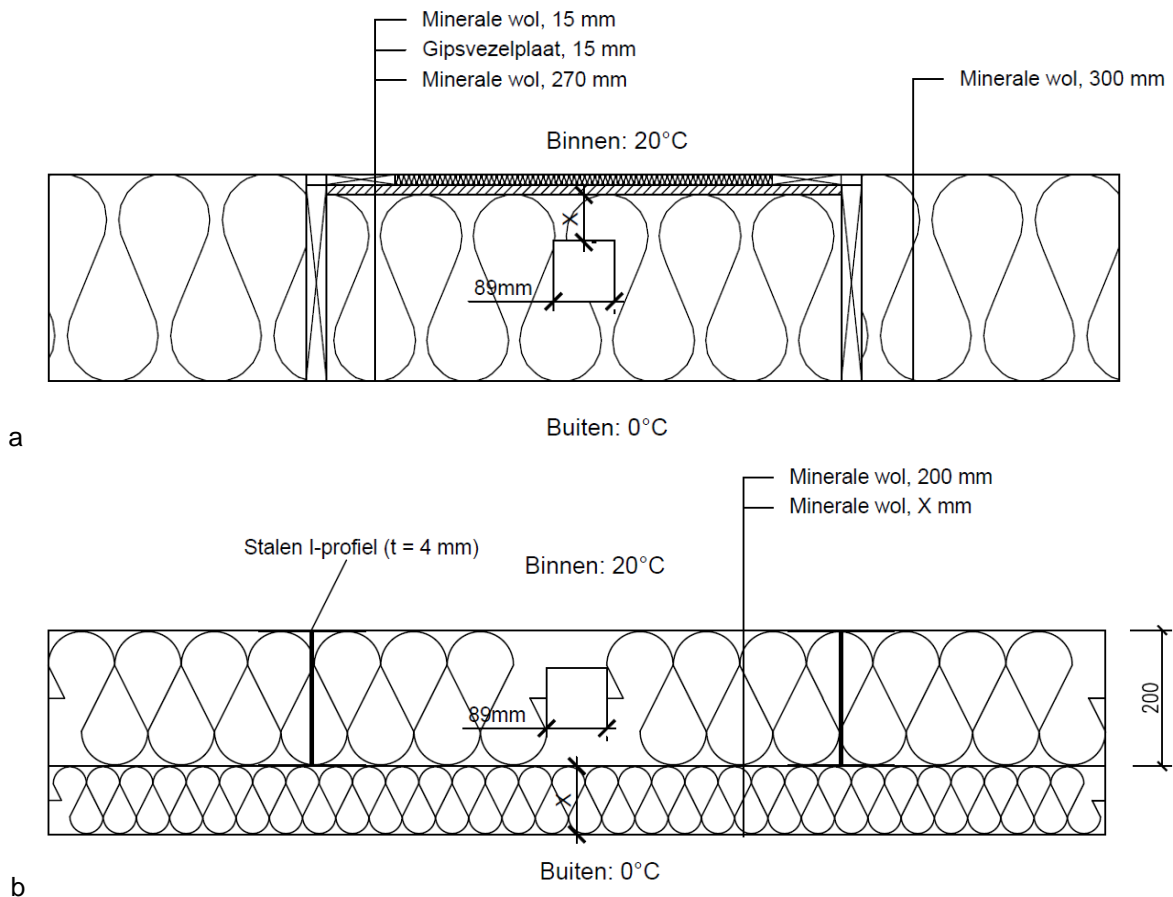
Met deze randvoorwaarden was de temperatuurdaling van de toevoerlucht beperkt tot 0.10 °C per lopende meter kanaal, vanaf een isolatielaag van 50 mm tussen kanaal en buitenomgeving, en dit zowel voor de kanalen met 100 mm als met 125 mm diameter en voor beide bestaande wanden in houtskelet en metselwerk (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014). Verder bleek ook dat de warmteverliezen via transmissie (van de warme lucht in de kanalen naar de buitenomgeving) beperkt kunnen worden tussen 2-6% met een isolatiedekking van 50 mm over de kanalen (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014).



**Figuur 16** Vanaf een isolatiedekking van 50 mm ( $\lambda = 0.037$  W/mK) van de kanalen, blijft de temperatuurdaling van de toevoerlucht onder 0.10 °C per lopende meter kanaal (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014)

## 4.2 Opzet simulatiemodel PRO<sup>3</sup>

In dit onderzoeksproject werd dieper ingegaan op de thermische prestaties van een prefab paneel in hout- en staalskelet met geïntegreerde ventilatiekanalen (Figuur 17). Deze panelen zijn gebaseerd op prototypes, ontwikkeld in het kader van Annex 50 (IEA ECBCS Annex 50, Building Renovation Case Studies, 2011). In het simulatiemodel werd verondersteld dat het paneel de bestaande gevel volledig vervangt. De modellen op Figuur 17 worden dus niet tegen een bestaande wand geplaatst.



**Figuur 17 (a) Houtskeletpaneel (b) Staalskeletpaneel**

Het ventilatiekanaal heeft een vierkante doorsnede met een zijde van 89 mm. Daarbij werden de volgende variaties op de ventilatiekanalen geëvalueerd:

- Doorvoeren van warme/koude lucht;
- Positie van het kanaal t.o.v. de warme en koude zijde;
  - X in Figuur 17a is de afstand tussen het binnenoppervlak en het kanaal. Deze afstand varieerde met de volgende waarden: 15 mm, 30 mm, 60 mm, 90 mm, 120 mm, 150 mm, 165 mm.
- Isolatie dikte paneel
  - X in Figuur 17b is de dikte van de isolatielaag over de staalframeprofielen. Deze dikte varieerde met de volgende waarden: 0.1 mm, 50 mm en 100 mm.

Deze aspecten werden geëvalueerd aan de hand van:

- het temperatuurverloop van de ventilatielucht;
- de warmtestroomdichtheid ( $W/m^2$ ) doorheen het paneel;
- risico op oppervlaktecondensatie of schimmelvorming door het doorvoeren van warme/koude lucht.

De materiaaleigenschappen in het model werden bepaald volgens NBN B62-002 en zijn opgelijst in Tabel 4.

**Tabel 4 Materiaaleigenschappen model**

Materiaal	Warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(mK)]	Dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]	Soortelijke warmte [J/kgK]
Minerale wol	0.032	25	1030
Hout	0.014	540	1880
Gipsvezelplaat	0.210	1150	960
Staal	50.00	7800	500
Lucht (bij 0°C)		1.30	1005

De temperatuur van de binnen- en buitenlucht werd constant gehouden op  $\theta_e = 0^\circ\text{C}$  en  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$  zodat de impact van de luchtstromingen door de geïntegreerde kanalen duidelijk naar voor kwam. De warmteovergangsweerstanden aan het oppervlak bedragen respectievelijk  $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$  en  $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$ , zoals aangegeven in NBN B62-002.

Naast de overgangscoefficienten aan het binnen- en buitenoppervlak, is er in het model ook een convectieve overgangscoefficient  $h_c$  (W/m<sup>2</sup>K) in de kanalen. Deze is afhankelijk van de luchtsnelheid, -temperatuur en vorm van het kanaal (formule 1) (Loveday & Taki, 2001). De overgangscoefficient is groter naarmate de luchtsnelheid hoger is. Bij koude lucht is deze ook iets groter (Tabel 5).

$$h_{c,kanaal} = \frac{N_u \cdot \lambda_{air}}{\varnothing_{hydraulisch}} \text{ met } N_u = 0.023 \cdot R_e^{0.8} \cdot P_r^{0.4} \text{ met } R_e = \frac{\rho_{air} \cdot v_{air} \cdot \varnothing_{hydraulisch}}{\eta_{air}} \quad (\text{formule 1})$$

Met :

$h_{c,kanaal}$	Convectieve warmteovergangscoefficient in het ventilatiekanaal [W/m <sup>2</sup> K]
$N_u$	Nusselt getal [-]
$\lambda_{air}$	Thermische conductiviteit van lucht [W/mK]
$\varnothing_{hydraulisch}$	Hydraulische diameter [m] = zijde van vierkant kanaal?
$R_e$	Reynolds getal [-]
$P_r$	Getal van Prandtl [-]
$\rho_{air}$	Massadichtheid van lucht [kg/m <sup>3</sup> ]
$v_{air}$	Snelheid van lucht [m/s]
$\eta_{air}$	Dynamische viscositeit van lucht [kg/ms]

**Tabel 5 De convectieve warmteovergangscoefficient  $h_c$  voor de lucht in de buis, bij 20°C en bij 0°C.**

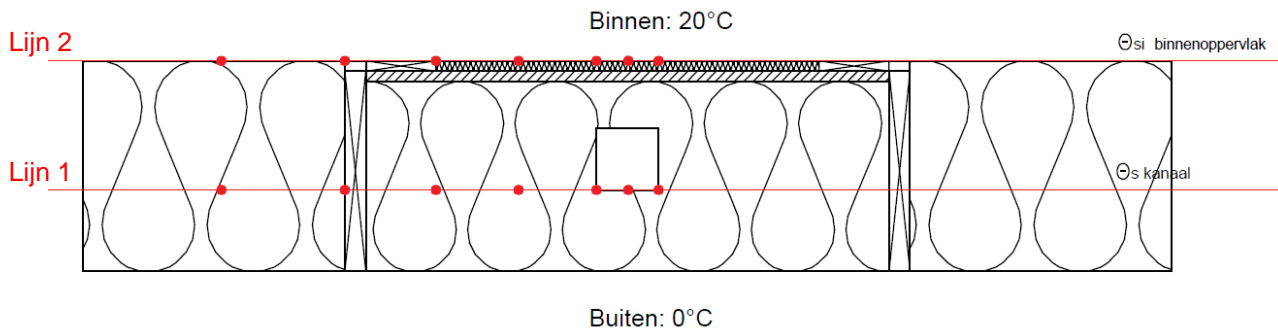
Snelheid [m/s]	Temperatuur [°C]	Doorsnede [mm x mm]	Warmteovergangscoefficient voor convectie $h_c$ [W/m <sup>2</sup> K]
6.00	20	89 x 89	27.33
3.00	20	89 x 89	15.70
1.00	20	89 x 89	6.52
6.00	0	89 x 89	27.72
3.00	0	89 x 89	15.92
1.00	0	89 x 89	6.61



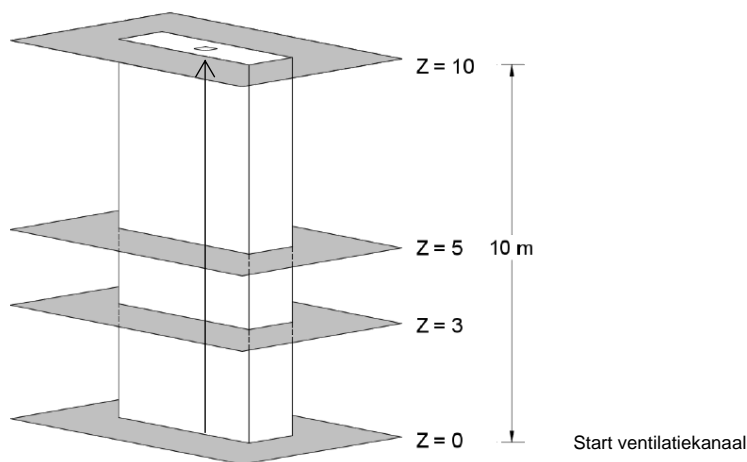
## 4.3 Evaluatiecriteria

### 4.3.1 Temperatuursdaling per lopende meter

In het model werden de lucht- en oppervlaktetemperaturen in het kanaal (Lijn 1, Figuur 18) en aan het binnen oppervlak van het paneel opgevraagd (Lijn 2, Figuur 18), op 0m, 3m, 5m en 10 m hoogte (Figuur 19). De ventilatielucht in het model stroomt van onder naar boven. De luchttemperatuur bedraagt 20°C of 0°C aan het begin van het kanaal (onderaan het kanaal).



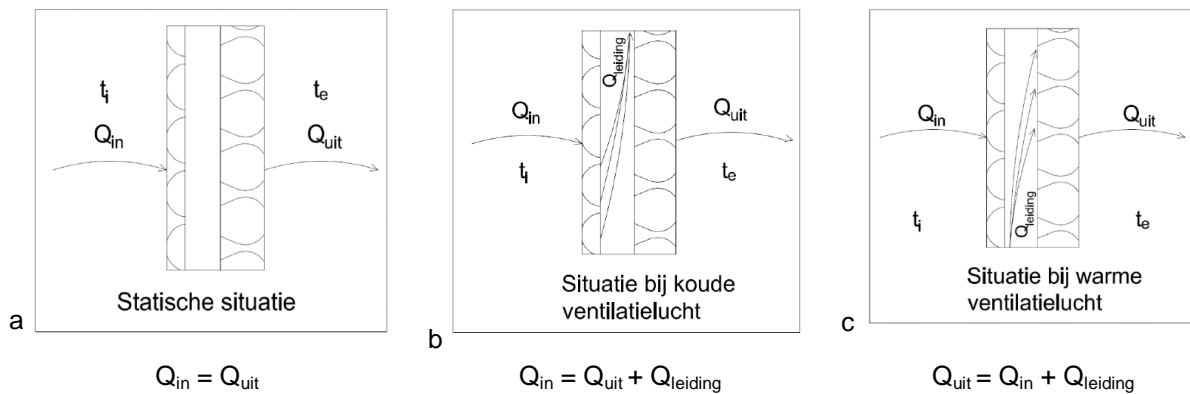
Figuur 18 Locatie gesimuleerde oppervlaktetemperaturen



Figuur 19 Schema model: links: horizontale doorsnede en rechts: 3D beeld van het beschouwde element. De lucht loopt van onder naar boven

### 4.3.2 Equivalente warmtedoorgangscoefficiënt $U_{eq}$

De warmtedoorgangscoefficiënt  $U$  heeft enkel betekenis in geval van één-dimensionaal stationair warmtetransport (Figuur 20a). Bij ventilatiekanalen waardoor lucht stroomt die opwarmt of afkoelt, is er geen sprake meer van stationaire condities, waardoor de  $U$ -waarde niet meer eenduidig kan bepaald worden via de warmtestroom  $Q$ :  $U = Q/(\theta_i - \theta_e)$ . Afhankelijk of er koude buitenlucht (stel 0°C) of warme binnenlucht (stel 20°C) door het kanaal stroomt, kan het warmteverlies  $Q$  anders gedefinieerd worden (Figuur 20). Indien er koude lucht doorheen de leiding stroomt, is het warmteverlies aan het binnenoppervlak ( $Q_{in}$ ) gelijk aan het warmteverlies aan het buitenoppervlak ( $Q_{uit}$ ), gesommeerd met het warmteverlies via de ventilatielucht ( $Q_{leiding}$ ). Indien er warme ventilatielucht doorheen het paneel stroomt, is het warmteverlies aan het binnenoppervlak ( $Q_{in}$ ) gelijk aan het warmteverlies van aan het buitenoppervlak ( $Q_{in}$ ) verminderd met het warmteverlies via de ventilatielucht ( $Q_{leiding}$ ).



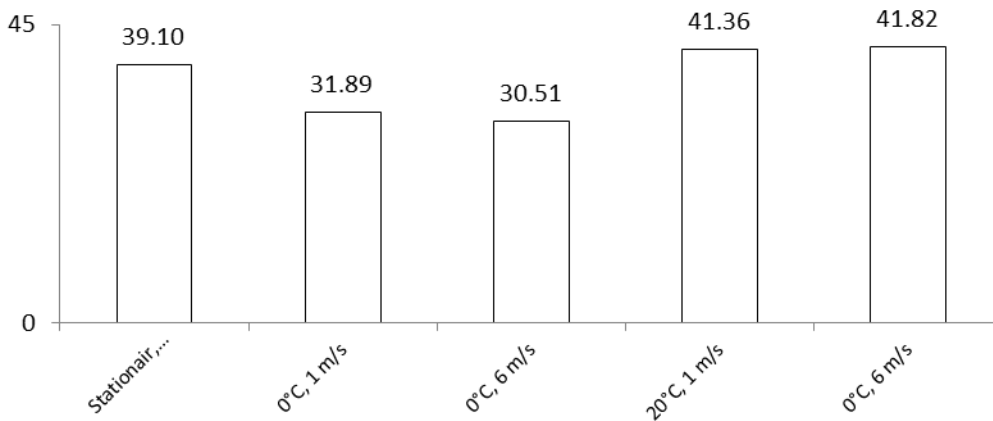
**Figuur 20 (a) stationaire condities, (b) situatie waarbij koude ventilatielucht opwarmt in het prefab element, (c) situatie waarbij warmte ventilatielucht afkoelt in het prefab element**

De stroming van warme ventilatielucht (afvoerlucht) doorheen een prefab element (Figuur 20c) zal bijdragen tot verminderde warmteverliezen van de binnenomgeving naar buiten, waardoor de effectieve U-waarde van het prefab element lager is dan wanneer berekend onder stationaire condities (zie §2.1.3). Men kan de equivalente U-waarde van het paneel dan begroten door:  $U_{eq} = Q_{in}/(\theta_i - \theta_e)$ .

Anderzijds koelt de warme afvoerlucht bij stroming door het geïntegreerd kanaal af, wat kan zorgen voor een verminderde thermische effectiviteit van het warmteterugwinningstoestel. Analoog kan men bij de stroming van koude buitenlucht doorheen het prefab element de equivalente U-waarde begroten door  $U_{eq} = Q_{in}/(\theta_i - \theta_e)$ .

Uit de simulaties blijkt dat de stroming van de lucht slechts een kleine impact heeft op de warmtestroming uit het prefab element ( $Q_{uit}$ ) (Figuur 21).

**Totale warmtestroming (Quit [W]) uit element)**



**Figuur 21 Vergelijking warmtestroming uit het prefab element (Quit [W]), onder stationaire toestand (stilstaande lucht in evenwichtstemperatuur) en lucht met een temperatuur (0°C of 20°C) en een bepaalde snelheid (1 m/s of 6 m/s).**

### 4.3.3 Temperatuurfactor

De temperatuurfactor  $f_{Rsi(x,y)}$  wordt gebruikt om het risico op schimmelontwikkeling op het binnenoppervlak te beoordelen (formule 2). Indien de factor een waarde van minimum 0.7 heeft, is het risico op schimmel onbestaande (WTCB TVN 153, 1984).

$$f_{Rsi(x,y)} = \frac{\theta_{si(x,y)} - \theta_e}{(\theta_i - \theta_e)} \geq 0.7 [-] \quad (\text{formule 2})$$

De temperatuurfactor wordt telkens nagerekend voor de meest nadelige locaties aan het binnenoppervlak.

#### 4.3.4 Maximum toelaatbare relatieve vochtigheid van de ventilatielucht

Als de oppervlaktetemperatuur van de ventilatiekanalen lager is dan het dauwpunt van de ventilatielucht, kan de waterdamp in de lucht condenseren tegen de wand van het kanaal.

Naarmate warme ventilatielucht (afvoerlucht) door het ventilatiekanaal stroomt, zal de temperatuur en bijgevolg ook de verzadigingsdampdruk dalen. Als lucht met 99% relatieve vochtigheid en 20°C aan het beginpunt na 10 meter 3°C afgekoeld is, zal de lucht op dat punt condenseren. Om te achterhalen wat de maximaal toelaatbare relatieve vochtigheid van de ventilatielucht mag zijn opdat er geen condensatie optreedt bij afkoeling van de ventilatielucht doorheen het kanaal, werd met formule 3 de verzadigingsdampdruk berekend voor temperatuur van de ventilatielucht aan het eind van het ventilatiekanaal. Dit is de maximale dampdruk die mag optreden in de binnenlucht.

Daarmee kan de bijhorende maximale toegelaten relatieve vochtigheid van de binnenlucht ( $\varphi_{\max}$ ) berekend worden (formule 4).

$$p_{v,sat}(\theta) = e^{(65.8094 - \frac{7066.27}{273.15 + \theta} - 5.976 \cdot \ln(273.15 + \theta))} \quad (\text{formule 3})$$

$$\varphi = \frac{p_{v,sat}(\theta_{min})}{p_{v,sat}(20^\circ\text{C})} \cdot 100 (\%) \quad (\text{formule 4})$$

met  $p_{v,sat}(\theta_{min})$  de saturatiedampdruk horend bij de temperatuur aan het eind van het ventilatiekanaal [Pa] en  $p_{v,sat}(20^\circ\text{C})$  de saturatiedampdruk van de binnenlucht.

Voorbeeld: Stel dat de temperatuur van de ventilatielucht afkoelt van 20°C tot 17°C door stroming doorheen het ventilatiekanaal. In dit geval mag de relatieve vochtigheid van de ventilatielucht max. 82.90% bedragen, wil men condensatie vermijden in het kanaal. De kans op condensatie zal op die manier onderzocht worden in alle gesimuleerde gevallen.

#### 4.3.5 Methode van Glaser voor kans op condensatie aan buitenkant ventilatiekanaal met koude lucht

Omgekeerd, als koude ventilatielucht door het ventilatiekanaal stroomt, zal de oppervlaktetemperatuur aan de buitenkant van het kanaal dalen, waardoor de damp op het scheidingsvlak van het isolatiemateriaal en het kanaal kan condenseren tegen het kanaal. Het risico hierop werd geëvalueerd met de methode van Glaser (formule 5).

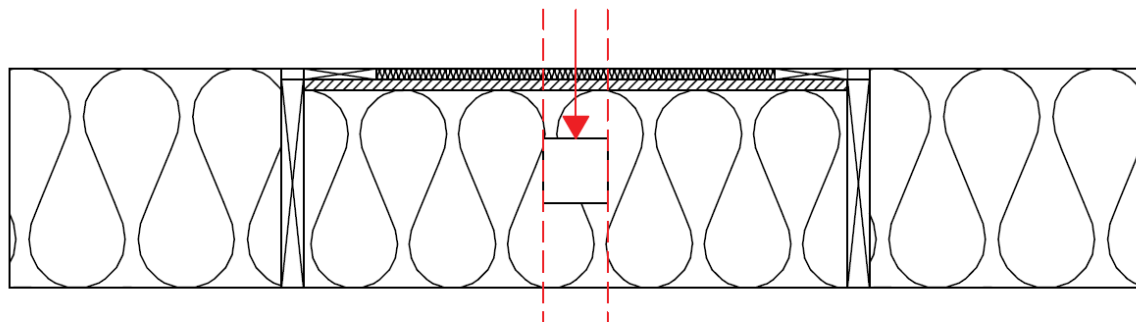
$$p_j = p_e + (p_i - p_e) \cdot \frac{\sum_{i=1}^j Z_i}{Z_{tot}} \quad \text{met } Z_i = \frac{\mu_i d_i}{\delta_a} \quad \text{en } \delta_a = 2 \cdot 10^{-10} \text{ s} \quad (\text{formule 5})$$

met  $p_j$  [Pa] de dampdruk op laag  $j$  in de constructie,  $\mu$  [-] het diffusieweerstandsgetal,  $d$  [m] de dikte van de samenstellende laag en  $\delta_a$  de dampgeleidingscoëfficiënt van lucht.

Deze methode laat een snelle controle op condens toe, maar geeft echter een zeer vereenvoudigd beeld:

- Het gaat om een stationaire berekening en is dus een momentopnamen;
- Het is een één-dimensionale berekening, waardoor geen rekening gehouden wordt met de impact van de isolatie rond de koker (Figuur 22). Damp kan in realiteit door de isolatie naast de koker geëvacueerd worden;
- In de berekening wordt enkel de dampdiffusie meegenomen. Er wordt dus uitgegaan van een perfecte luchtdichtheid van het prefab paneel;
- Vochttopslag in vochtbufferende materialen wordt niet meegenomen. In deze simulaties werd minerale wol gebruikt, waardoor dit effect minimaal zal zijn realiteit. Als er echter cellulose-isolatie wordt gebruikt, zal het vochtgehalte iets lager zijn doordat cellulose wel vocht kan vasthouden.

Dit alles in beschouwing genomen, zal de methode van Glaser dus een conservatieve inschatting zijn op het risico op condens aan de buitenkant van het ventilatiekanaal. Voor een gedetailleerde berekening in 2D waarin rekening gehouden wordt met vochttopslag en dynamische omstandigheden, moet beroep gedaan worden op een HAM-model.



**Figuur 22 1-D benadering met de methode van Glaser.**

Via formule 3 en de gesimuleerde temperaturen doorheen de constructie kan de verzadigingsdampdruk aan ieder ontmoetingsvlak tussen de lagen berekend worden. Aan de hand van de temperatuur en relatieve vochtigheid het binnenklimaat en het buitenklimaat kunnen de isotherme dampdrukken in de constructieopbouw berekend worden (formule 5). Er treedt condens op tegen het ventilatiekanaal als de berekende dampdruk hoger is dan de saturatiedampdruk.

## 4.4 Resultaten PRO<sup>3</sup>

### 4.4.1 Thermische impact technische kokers

De ventilatiekokers in de modellen (Figuur 17) zijn lineaire bouwknopen, aangezien de isolatielaag lijnvormig onderbroken wordt (Werkgroep PATHB2010, 2009). In het geval de isolatielaag voor minder dan de helft van de dikte onderbroken wordt, is de bouwknop EPB-aanvaard. Om de thermische impact van een ventilatiekanaal op het prefab paneel te evalueren, werd uitgegaan van stilstaande lucht. De luchttemperatuur werd automatisch berekend, op basis van de randcondities ( $\theta_i = 20^\circ\text{C}$  en  $\theta_e = 0^\circ\text{C}$ ) Op die manier is er sprake van één-dimensioneel warmtetransport waardoor de  $U_{eq}$  van panelen met en zonder kanalen vergeleken kan worden.

De toename van  $U_{eq}$  in stationaire toestand over het hele paneel bleef zeer beperkt indien 1 leiding geïntegreerd werd (Tabel 6). Bij de integratie van 3 leidingen met doorsnede 89 x 89 mm kan dit echter al oplopen tot +12% van de oorspronkelijke U-waarde. In stationaire toestand heeft de integratie van ventilatiekanalen dus een zekere impact. Indien nodig moet de dikte van het hele paneel toenemen om nog te voldoen aan de EPB-eisen. Let wel, hier werd rekening gehouden met stilstaande lucht (stationaire toestand).

**Tabel 6 Toename  $U_{eq}$  met de invoer van ventilatieleidingen**

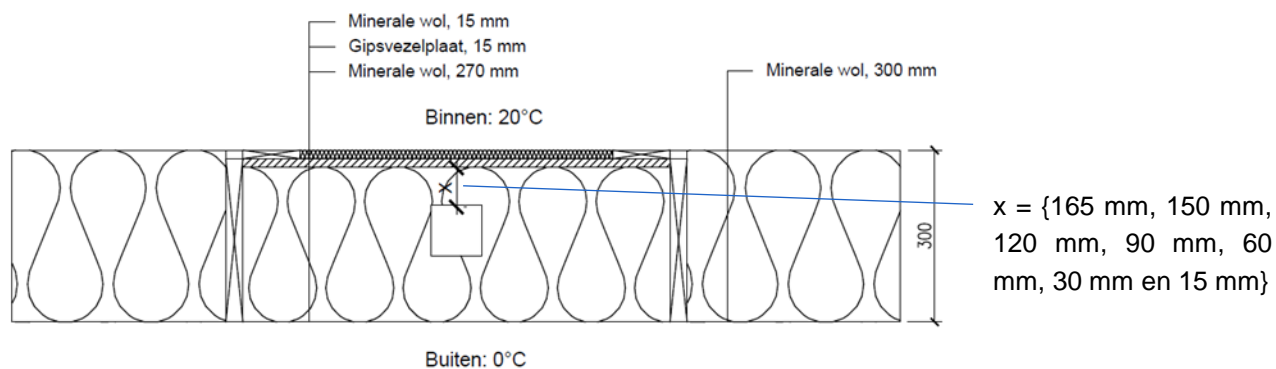
$U_{eq,paneel}$	$U_{eq,staalframe}$ (W/m <sup>2</sup> K)	$U_{eq,houtskelet}$ (W/m <sup>2</sup> K)
Zonder geïntegreerde leidingen	0.204	0.121
1 Leiding □ 63mm	0.206 (+1%)	0.122 (+1%)
1 Leiding □ 89mm (zie Figuur 17)	0.209 (+2%)	0.126 (+4%)
1 Leiding □ 100 mm	0.210 (+3%)	0.127 (+5%)
3 Leidingen □ 89mm	0.213 (+4%)	0.135 (+12%)

De impact van het materiaal van de leidingen was verwaarloosbaar klein, waardoor hier verder geen rekening mee gehouden werd in de simulaties.

#### 4.4.2 Ligging in het paneel

Een eerste uitvoeringsaspect is de ligging van het ventilatiekanaal in het paneel. Volgens (Ott, Loubus, Time, Homb, & Botsch, 2014) volstaat een laagje van 50 mm tussen het kanaal en de buitenomgeving om de temperatuurdaling in de ventilatielucht te beperken tot 0.1 °C per lopende meter. In deze simulaties van TES Energy Façade wordt echter geen luchtsnelheid vermeld, waardoor het onduidelijk is of de conclusies voor iedere luchtsnelheid gelden.

Dit werd in deze simulaties geverifieerd door de ventilatieleiding te simuleren waarbij de afstand tussen de leiding en het binnenoppervlak varieert van 165 mm tot 15 mm (Figuur 23). De luchtsnelheden werden op 6 m/s en op 1 m/s gehouden en er werd zowel met buitenlucht in de kanalen (0°C) als met binnenlucht (20°C) in de kanalen gesimuleerd.



**Figuur 23 Simulatiemodel om de impact van de dekking [mm] van het ventilatiekanaal te bepalen**

Uit de simulaties kwamen twee vaststellingen naar voor:

- Voor koude ventilatielucht is de stijging in luchttemperatuur het grootst:
  - Bij kleinere afstanden tussen het kanaal en het binnenoppervlak
  - Bij lagere luchtsnelheden
  - Bv. een stijging van 0.3°C per lopende meter bij een afstand van 15 mm tussen kanaal en binnenoppervlak bij luchtsnelheid 1 m/s (Figuur 24a).
  - Omgekeerd: bij een afstand van 165 mm tussen het kanaal en het binnenoppervlak, bij een luchtsnelheid van 6 m/s, bedraagt de stijging in temperatuur slechts 0.016°C per lopende meter ventilatiekanaal (Figuur 24a).
- Voor warme ventilatielucht is de daling in luchttemperatuur het kleinst:
  - Bij kleinere afstanden tussen het kanaal en het binnenoppervlak
  - Bij hogere luchtsnelheden



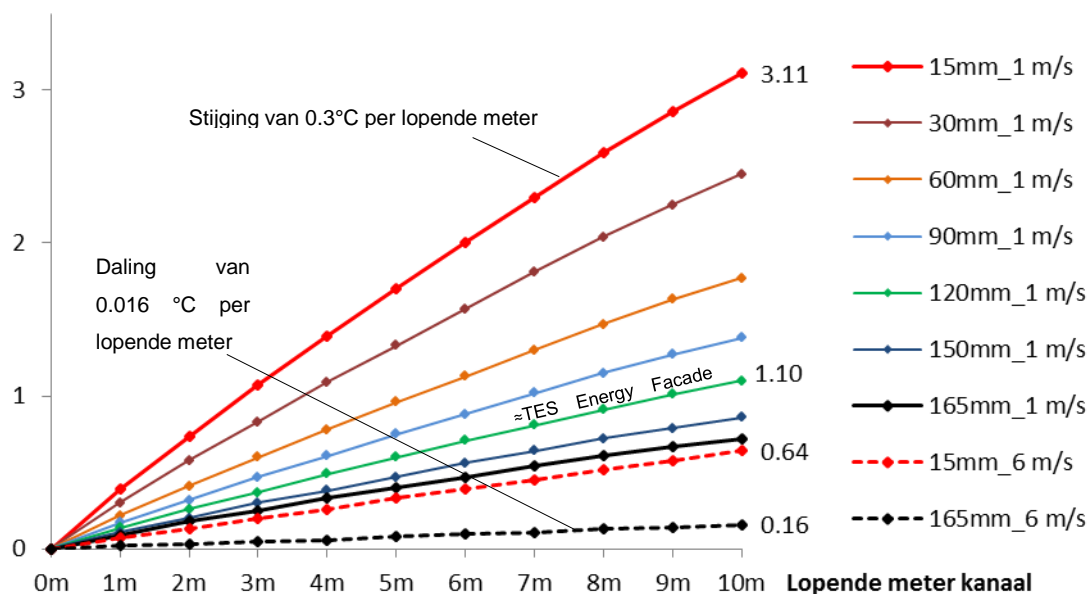
- Bv. een daling van 0.02°C per lopende meter bij een afstand van 15 mm tussen kanaal en binnenoppervlak bij luchtsnelheid 6 m/s (Figuur 24b).
- Omgekeerd: bij een afstand van 165 mm tussen het kanaal en het binnenoppervlak, bij een luchtsnelheid van 1 m/s, bedraagt de daling in temperatuur 0.45°C per lopende meter in de simulatie (Figuur 24b).

Indien de lucht in het ventilatiekanaal op zo een constant mogelijke temperatuur moet gehouden worden, moeten leidingen met warme lucht zo dicht mogelijk tegen de warme zijde geplaatst worden en moet een hoge luchtsnelheid gehanteerd worden. Leidingen met koude lucht moeten dan weer zo ver mogelijk van de warme zijde geplaatst worden, eveneens met een hoge luchtsnelheid. Indien de koude lucht moet opgewarmd worden, is het beter om de kanalen zo dicht mogelijk tegen de warme zijde te plaatsen en de luchtsnelheid zo laag mogelijk te houden. In de Ventilatiegids wordt voor residentiële gebouwen een maximum luchtsnelheid van 3 m/s aanbevolen, voor kanalen in een technische ruimte. Mogelijk kan deze snelheid hoger liggen voor kanalen geïntegreerd in een paneel.

Vergeleken met de simulaties uit TES Energy Façade, is de temperatuurdaling bij de opgewarmde lucht hier dubbel zo groot (0.2 °C per lopende meter). Bij TES Energy façade zat in het model een laag isolatie van 50 mm tussen het kanaal en het buitenoppervlak. In deze simulaties komt dit overeen met het model met 120 mm afstand tussen binnenoppervlak en kanaal (ofwel een laag isolatie van 62 mm tussen het kanaal en het buitenoppervlak). Bij de simulaties uit TES Energy Facade is echter niet geweten met welke luchtsnelheid rekening werd gehouden.

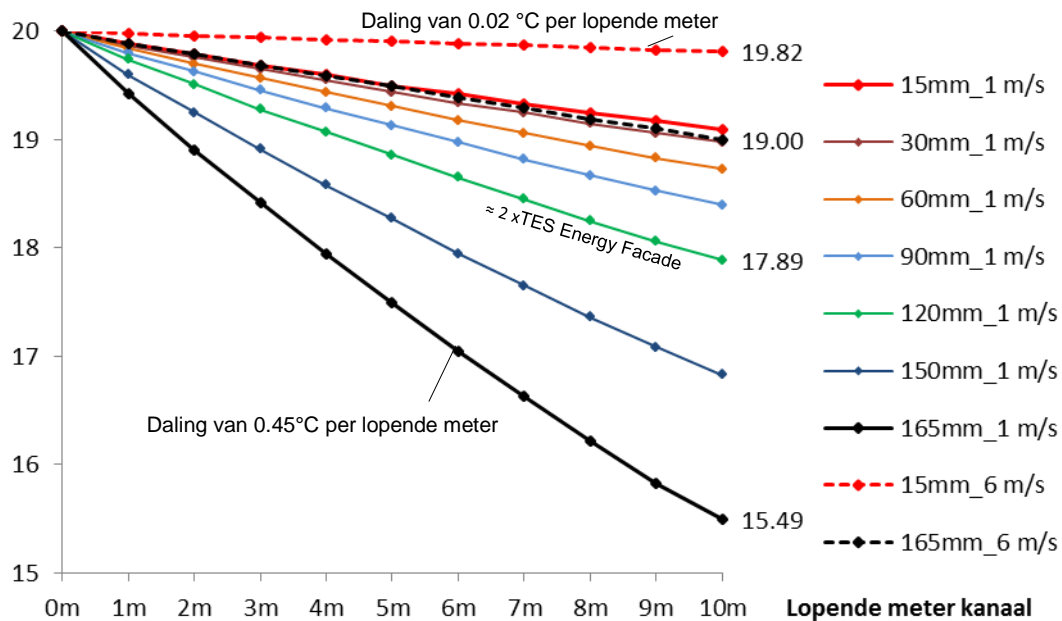
Bij de koude lucht is de temperatuurstijging (0.1°C per lopende meter) vergelijkbaar met de simulaties in TES Energy Façade.

**Opwarming +ΔT (°C) koude ventilatielucht over 10 m**



a

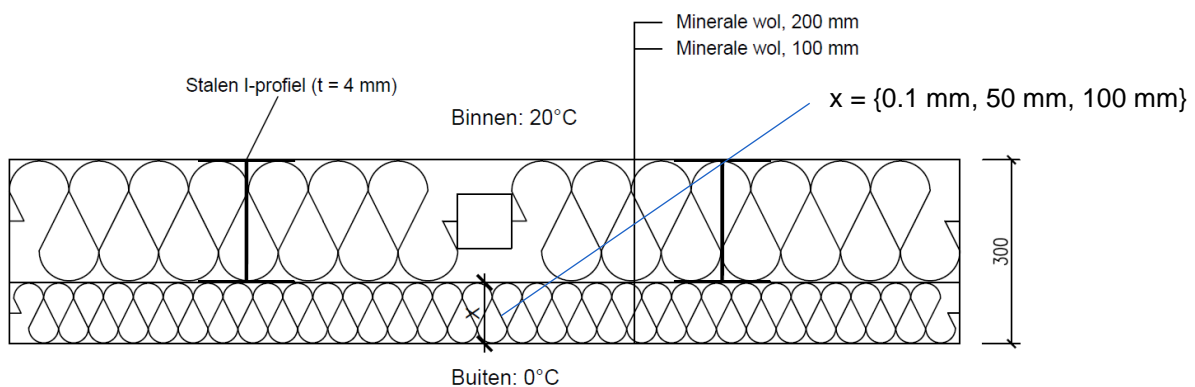
### Afkoeling +ΔT (°C) warme ventilatielucht over 10 m



b  
**Figuur 24 (a) Temperaturen van de ventilatielucht bij invoer van koude lucht (0°C) (b) Temperaturen van de ventilatielucht bij invoer van warme lucht (20°C)**

### 4.4.3 Paneeldikte

Naast de ligging van het ventilatiekanaal in het paneel, werd ook de isolatiedikte van het paneel zelf bekeken. Om de koudebrugwerking van de houten/metalen stijlen te compenseren, wordt typisch een doorlopende laag isolatie langs de buitenkant van het paneel voorzien (IEA ECBCS Annex 50, Retrofit Module Design Guide, 2011). In dit onderdeel wordt gekeken wat het effect van die extra isolatielaag is indien ventilatiekanalen in het paneel geïntegreerd worden. In dit onderdeel blijft het kanaal dus op dezelfde plaats, de isolatielaag tussen het kanaal en de buitenomgeving varieert (X in Figuur 24). Daarnaast wordt de impact van het ventilatiekanaal vergeleken met de impact van de koudebrug gevormd door de stalen stijlen in Figuur 24.



**Figuur 25 Staalskelet met totale diktes van 30, 25 en 20 cm.**

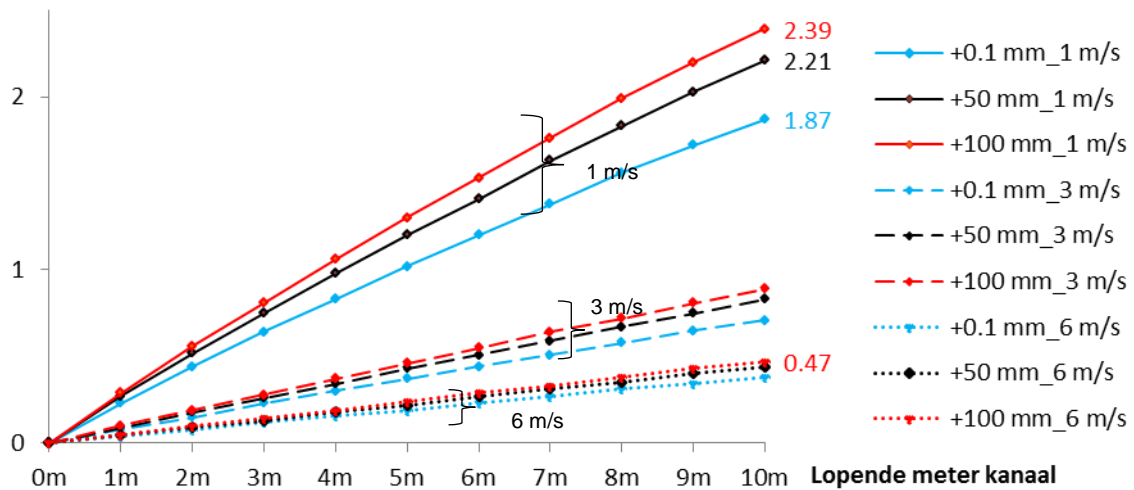
De vaststellingen zijn ongeveer gelijklopend met §4.4.2:

- Bij koude lucht: Hoe hoger de isolatiedikte en hoe lager de lichtsnelheid, hoe meer de ventilatielucht opwarmt (Figuur 26a) (bv. + 0.239°C/lm bij een laag van 10 cm extra tussen het paneel en de buitenomgeving t.o.v. +0.187°C/lm zonder extra laag).

- Bij warme lucht: Hoe lager de isolatiedikte en hoe lager de luchtsnelheid, hoe sneller de ventilatielucht afkoelt (Figuur 26b). (-0.2°C/m zonder extra laag, met luchtsnelheid 6 m/s).

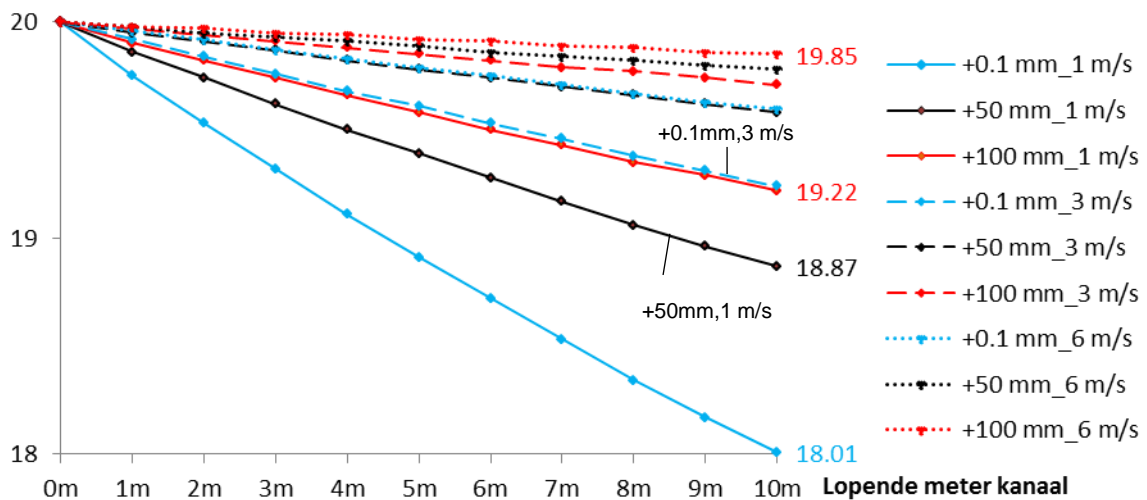
Daarbij heeft de snelheid van de lucht een grotere impact op de afkoeling-/opwarmingsnelheid dan de isolatiedikte. Zo is op Figuur 26b te zien dat de warme ventilatielucht in de staalskeletmodule met 50 mm extra isolatie en 1 m/s luchtsnelheid, sneller afkoelt dan de ventilatielucht in de module zonder extra laag(+0.1mm) en met een luchtsnelheid van 3 m/s.

**Opwarming +ΔT (°C) koude ventilatielucht over 10 m**



a

**Opwarming +ΔT (°C) warme ventilatielucht over 10 m**



b

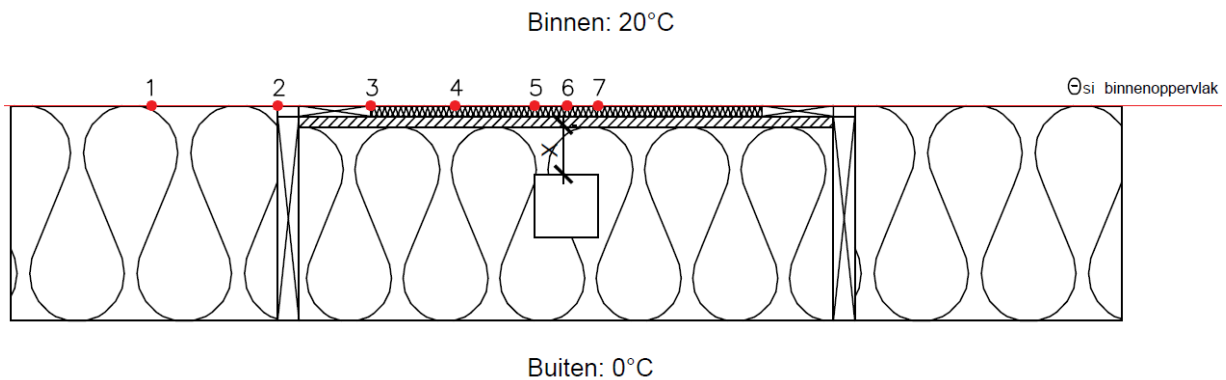
**Figuur 26 (a) Staalskeletmodule, koude ventilatielucht (b) Staalskeletmodule, warme ventilatielucht**

#### 4.4.4 Risico op schimmelvorming aan het binnenoppervlak bij koude lucht

Om het risico op schimmelvorming te evalueren, werd de temperatuurfactor  $f_{Rsi}$  aan het binnenoppervlak berekend aan de hand van de gesimuleerde binnenoppervlaktetemperaturen (Figuur 27). Hoe dichter de leiding met koude lucht zich aan de binnenzijde van de wand bevindt, hoe groter de invloed op de binnenoppervlaktetemperaturen. Bij een afstand van  $x = 15$  mm (zeer dicht tegen de

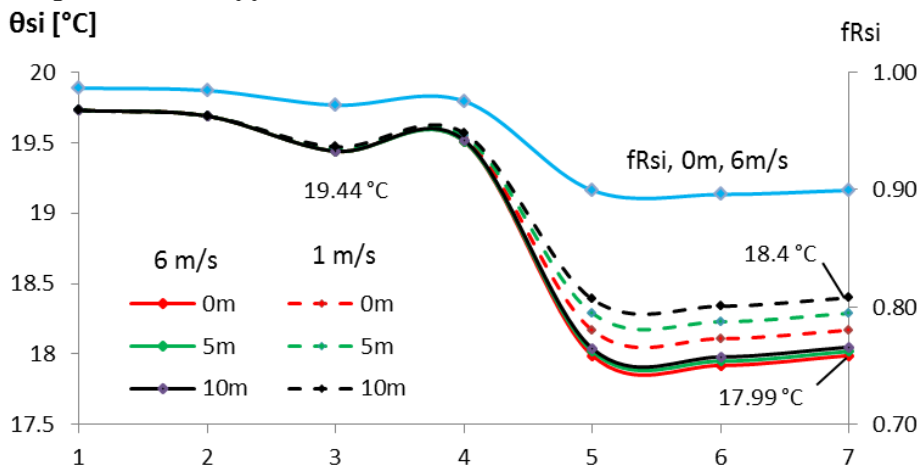
warme zijde) is te zien dat de binnenoppervlaktetemperaturen gemiddeld 1.6°C lager zijn in het midden van de module dan bij een afstand van  $x = 165 \text{ mm}$  (zo ver mogelijk van de warme zijde). Bij die laatste bevinden de laagste binnenoppervlaktetemperaturen zich niet aan het ventilatiekanaal, maar aan de profielen (houten stijlen van het paneel). De oppervlaktetemperaturen aan het kanaal onderaan (0m) en bovenaan (10m) verschilden slechts max. 0.23°C bij 15 mm afstand tussen het kanaal en het binnenoppervlak (Figuur 28). Bij een tussenafstand van 165 mm is er zelfs geen verschil meer te zien tussen de binnenoppervlaktetemperaturen boven- en onderaan het kanaal (Figuur 29).

Daarnaast werd opnieuw vastgesteld: hoe lager de luchtsnelheid, hoe kleiner de temperatuurdaling van de ventilatielucht is. De binnenoppervlaktetemperaturen in het midden (op 10 m hoogte) liggen 0.4 °C hoger bij luchtsnelheden van 1 m/s (Figuur 28).



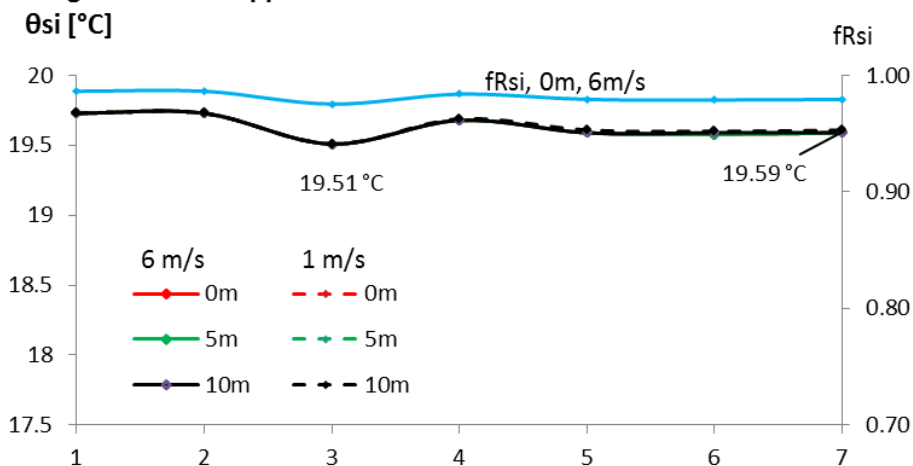
**Figuur 27 Aanduiding punten aan het binnenoppervlak waar de temperaturen gesimuleerd werden**

**Laag kanaal-binnopp: 15 mm - koude lucht**



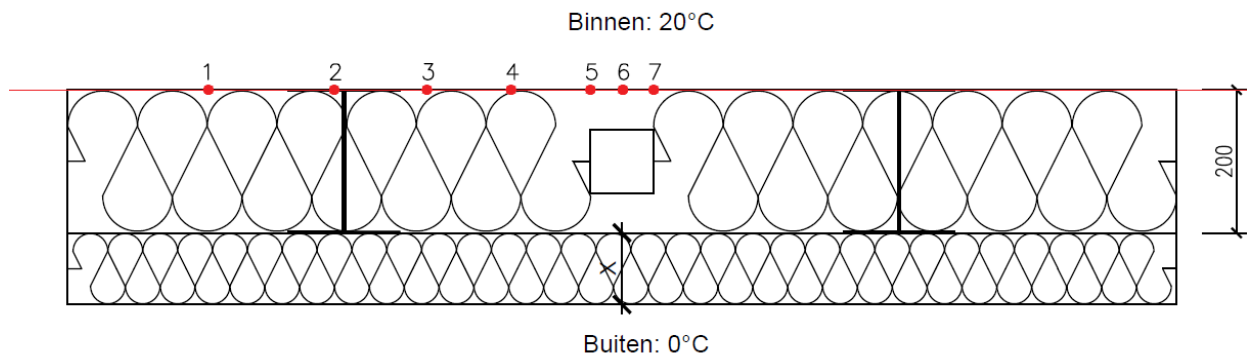
**Figuur 28 Impact op de oppervlaktetemperaturen bij verschillende luchtsnelheden en op verschillende afstanden in het kanaal (0, 5 en 10 m lengte) , 15 mm afstand tussen kanaal en binnenoppervlak**

### Laag kanaal-binnopp: 165 mm - koude lucht

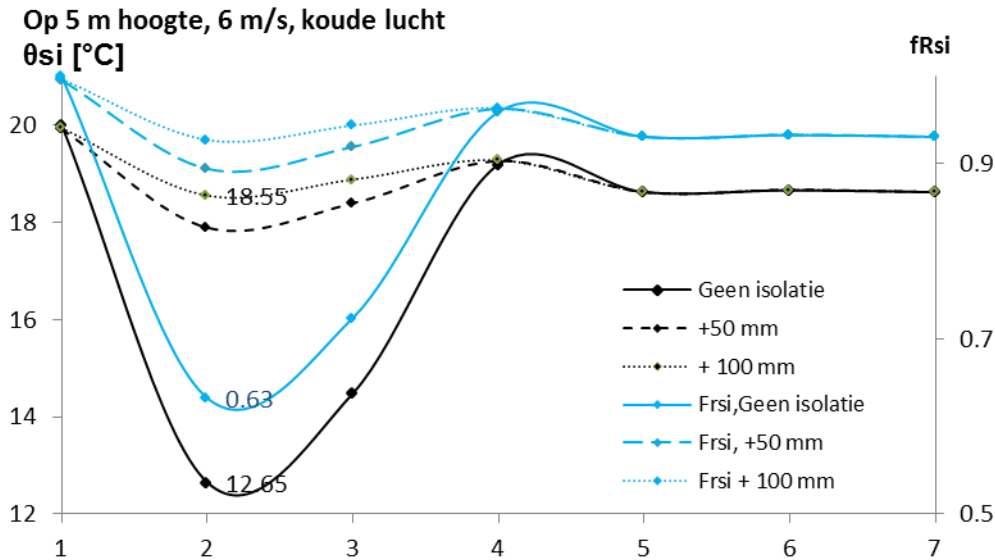


**Figuur 29 Impact op de oppervlaktetemperaturen bij verschillende lichtsnelheden en op verschillende afstanden in het kanaal (0, 5 en 10 m lengte), 165 mm afstand tussen het kanaal en het binnenoppervlak**

Bij de simulaties met veranderende isolatiedikte (§4.4.4) werd eveneens vastgesteld dat de laagste binnenoppervlaktetemperaturen voorkomen aan de metalen stijlen, als geen extra isolatielaagje voorzien wordt om dit te compenseren. Bij het staalframe zakt de temperatuurfactor tot 0.63 ter hoogte van de stijlen indien geen extra laagje isolatie voorzien werd. Enkel in dit geval is er kans op schimmelvorming, ter hoogte van de stijlen. Op Figuur 31 werden enkel de binnenoppervlaktetemperaturen op 5 m hoogte (midden van het kanaal) afgebeeld omdat het verschil in oppervlaktetemperaturen aan het begin en het einde van het kanaal verwaarloosbaar klein was (0.02°C).



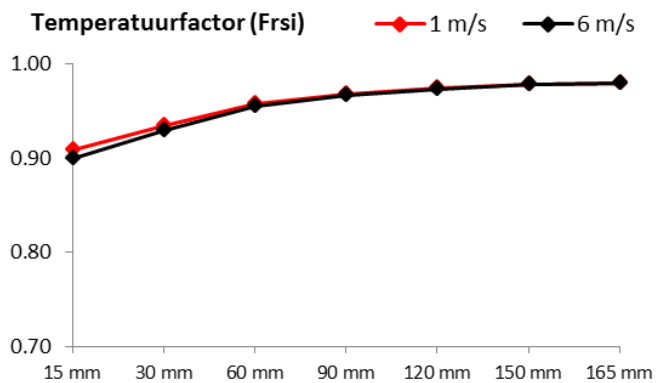
**Figuur 30 Aanduiding punten aan het binnen oppervlak waar de binnenoppervlaktetemperaturen gesimuleerd zijn.**



Figuur 31 Temperatuurfactor bij het staalskelet, met verschillende isolatiediktes

Ondanks de koude lucht tegen het binnenoppervlak, zijn de minimum binnenoppervlaktetemperaturen ter hoogte van het kanaal maximum 2°C lager dan de binnenluchttemperatuur (20°C). Bijgevolg blijven de temperatuurfactoren  $f_{rsi}$  dan ook hoog (Figuur 32). Hoe dichter het kanaal met koude lucht tegen het binnenoppervlak zit, hoe lager de temperatuurfactor wordt. De minimumwaarden die werden gesimuleerd waren minimum 0.90, dus ver boven de grenswaarde van 0.7.

Ter hoogte van het ventilatiekanaal met koude lucht is er dus geen risico op schimmelvorming aan het binnenoppervlak.

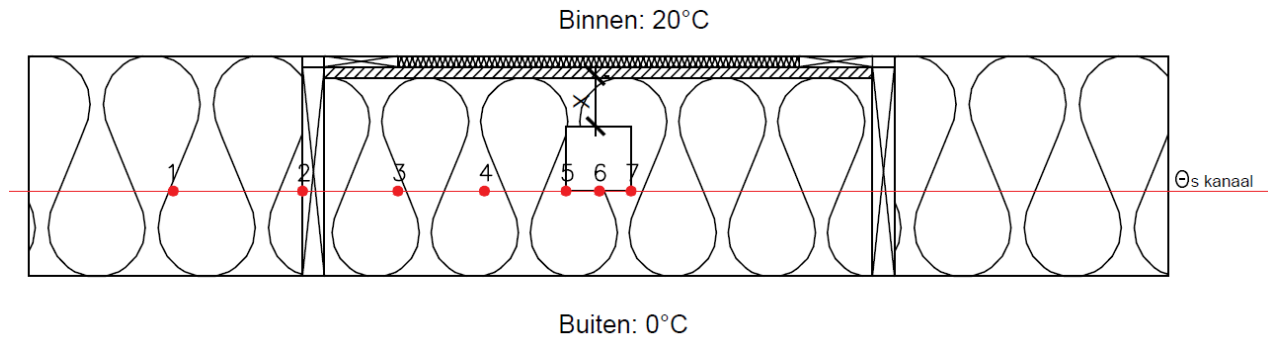


Figuur 32 Temperatuurfactor ter plaatse van de ventilatieleiding in functie van de isolatiedekking

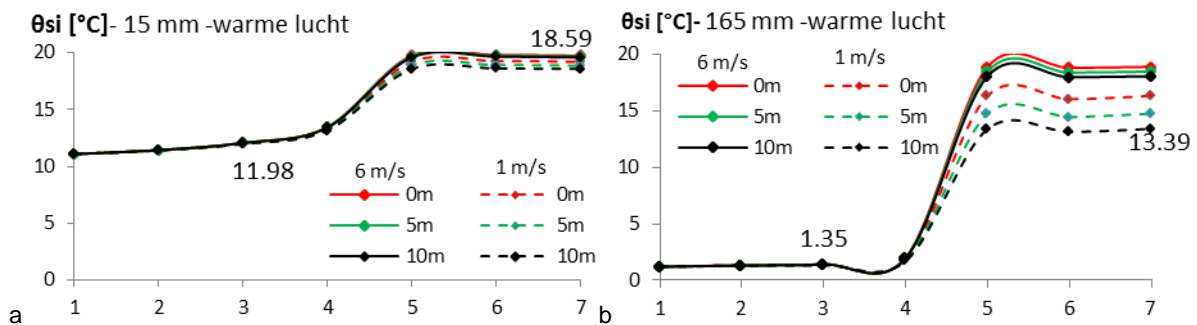
#### 4.4.5 Risico op condensatie in het ventilatiekanaal bij warme lucht

Om het risico op condens in de leidingen te begroten werden de oppervlaktetemperaturen op de binnenkant van het ventilatiekanaal gesimuleerd (Figuur 33). Uit deze simulaties blijkt dat de laagste temperaturen in het kanaal worden bereikt als de luchtsnelheid lager ligt en de afstand tussen het binnenoppervlak en het ventilatiekanaal groot is (Figuur 34).





**Figuur 33** Aanduiding van de punten waar de temperaturen gesimuleerd werden



**Figuur 34 (a)** Impact op de oppervlaktetemperaturen bij afstand van 15 mm tussen binnenoppervlak en kanaal **(b)** Impact op de oppervlaktetemperaturen bij afstand van 165 mm tussen binnenoppervlak en kanaal

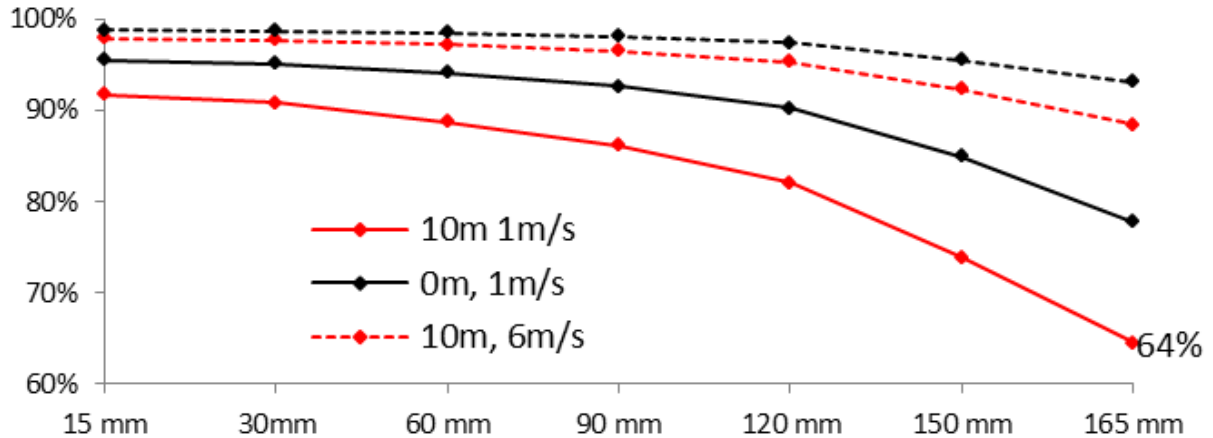
Met deze oppervlaktetemperaturen werd de maximale toelaatbare relatieve vochtigheid berekend. Figuur 35a en b toont dat  $\varphi_{max}$  daalt naarmate de afstand tussen het binnenoppervlak en het kanaal groter wordt. Dit in combinatie met lage luchtsnelheden, geeft een grotere kans op condens, met een maximaal toelaatbare relatieve vochtigheid van 70 %. Wanneer de ventilatiekanalen dicht tegen de warme zijde zitten (bv. 15 mm afstand), wordt de maximale toelaatbare relatieve vochtigheid 94% bij luchtsnelheden van 1 m/s en 97% bij luchtsnelheden van 6 m/s.

Om condens te vermijden, is het dus belangrijk om kanalen met warme ventilatielucht zo dicht mogelijk tegen de warme zijde te plaatsen. De luchtsnelheid is hier minder van belang, maar kan cruciaal zijn als de kanalen verder van de warme zijde zitten. Bij een afstand tussen binnenoppervlak en kanaal groter dan 120 mm, daalt de maximale toelaatbare relatieve vochtigheid naar 80% (Figuur 35). Bij het model met het staalskelet is de maximale toelaatbare relatieve vochtigheid eveneens 80%, ongeacht de dikte van de isolatielaag tussen het kanaal en het buitenklimaat (Figuur 36).

Rekening houdend met het feit dat de gewenste relatieve vochtigheid voor binnenlucht tussen 30% en 70% zit (Ventilatiegids, 2007), is de kans klein dat er condens zal optreden in de ventilatiekanalen die op max. 120 mm verwijderd zijn van het binnenoppervlak.

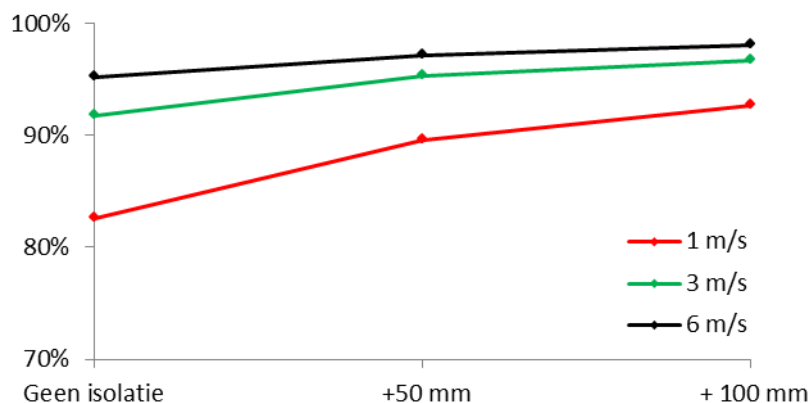
a

### Maximale toegelaten relatieve vochtigheid in kanaal $\varphi$ [%]



**Figuur 35** Maximale toelaatbare relatieve vochtigheid van de binnenlucht in functie van de afstand tussen het binnenoppervlak en het kanaal. Hoe kleiner de afstand, hoe hoger de maximale toegelaten relatieve vochtigheid

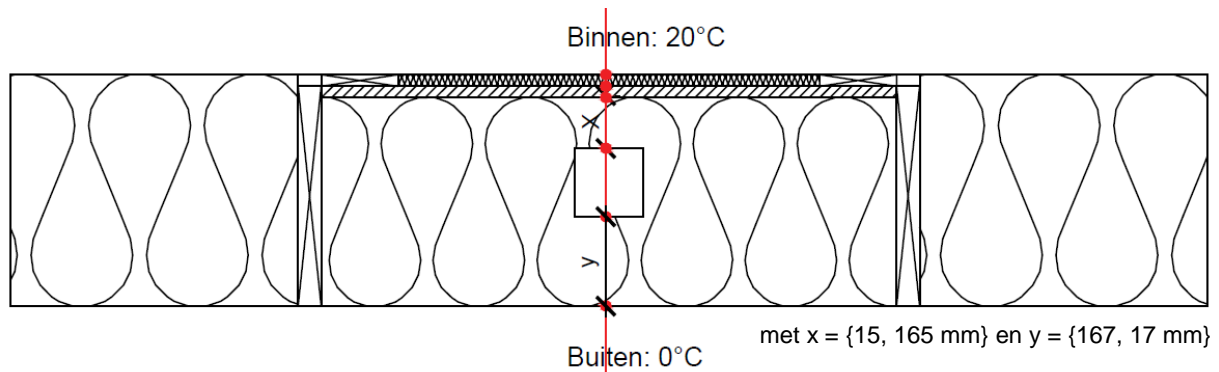
### Maximale toegelaten relatieve vochtigheid in kanaal $\varphi$ [%]



**Figuur 36** Maximale toelaatbare relatieve vochtigheid van de ventilatielucht in functie van de paneeldikte, staalskelet)

#### 4.4.6 Risico op condensatie in het paneel tegen het ventilatiekanaal bij koude lucht

Om het risico op condensatie op het scheidingsvlak tussen het ventilatiekanaal en de minerale wol te controleren, werd de methode van Glaser gebruikt. Zoals hoger aangegeven, is dit een zeer vereenvoudigde berekening die geen rekening houdt vocht opslag of randeffecten langs de ventilatiekoker (zie ook §4.3.5). De saturatiedampdruk werd berekend op de volgende punten (Figuur 37).



**Figuur 37 Aanduiding opgevraagde punten voor berekening Glaser diagram**

Er werd rekening gehouden met de volgende diffusieweerstanden van de materialen.

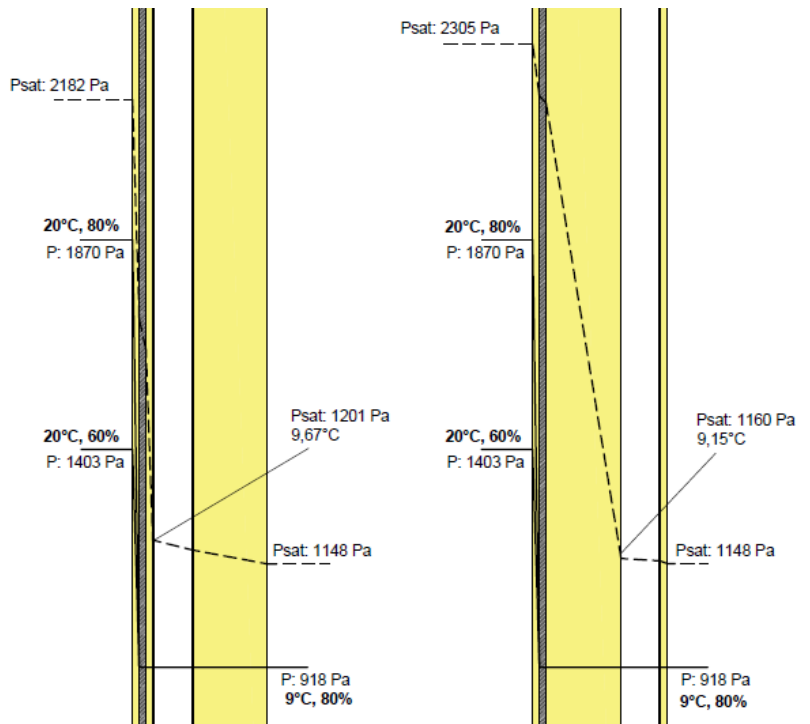
**Tabel 7 Diffusieweerstandsgetal en diffusieweerstand**

Eigenschappen kanaal	$\mu$	d	Z
Minerale wol	1	0.015	8E+07
gipsvezelplaat	5	0.015	4E+08
Minerale wol	1	x (Figuur 37)	8E+07
Kanaal (inox)	1E+14	0.002	1E+21
Lucht	1	0.088	4E+08
Kanaal (inox)	1E+14	0.002	1E+21
Minerale wol	1	y (Figuur 37)	8E+08
		Z tot	2E+21

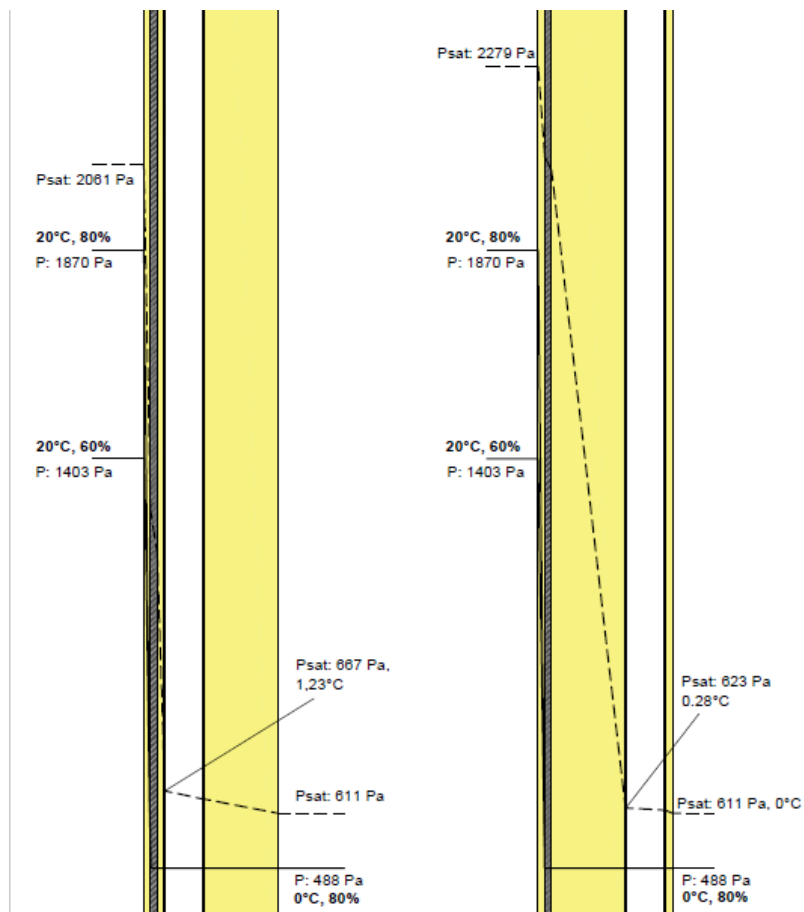
Bij een binnenomgeving met een luchttemperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid van 60% (bv. woonkamer) en 80% (bv. badkamer), en een buitenomgeving van 9°C en relatieve vochtigheid van 80% (jaargemiddelde, (KMI, 2017)) trad er geen condensatie op (Figuur 38). In deze controle had de ventilatielucht eveneens een starttemperatuur van 9°C. Bij een kleinere afstand tussen het ventilatiekanaal en het binnenoppervlak is de saturatiedampdruk lager in het gedeelte voor het ventilatiekanaal, waardoor de kans op condensatie aan het kanaal groter is.

Toch toont de evaluatie dat het risico op condensatie wel bestaat bij koudere temperaturen (Figuur 39). Bij een buitenlucht met een temperatuur van 0°C en relatieve vochtigheid van 80% (jaargemiddelde, (KMI, 2017)), is er nog steeds geen condensatie aan het ventilatiekanaal, maar die kan wel optreden van zodra de dampdruk buiten stijgt naar 667 Pa (indien het kanaal dicht tegen het binnenoppervlak zit-15 mm in Figuur 39) of naar 623 Pa (indien het kanaal verder van het binnenoppervlak zit-165 mm in Figuur 39).

Om het risico op condens zoveel mogelijk te beperken, is het aangeraden om een kanaal met koude ventilatielucht ver van het binnenoppervlak te plaatsen.



Figuur 38 Glaserdiagram voor binnenlucht ( $\theta_i=20^\circ\text{C}$ ,  $\phi_i= 60\%$  en  $\phi_i= 80\%$  ) en buitenlucht ( $\theta_e=9^\circ\text{C}$ ,  $\phi_e= 80\%$ , jaargemiddelde (KMI, 2017)), aan startpunt ventilatiekanaal



Figuur 39 Glaserdiagram voor binnenlucht ( $\theta_i=20^\circ\text{C}$ ,  $\phi_i= 60\%$  en  $\phi_i= 80\%$  ) en buitenlucht ( $\theta_e=0^\circ\text{C}$ ,  $\phi_e= 80\%$ , jaargemiddelde (KMI, 2017)), aan startpunt ventilatiekanaal

## 5 CONCLUSIE

### 5.1 Welke methode gebruiken?

In dit verslag werd het potentieel van HVAC-kanalen in een prefab gevelpaneel onderzocht. Er zijn drie manieren waarop HVAC-onderdelen kunnen geïntegreerd worden:

- via een decentrale unit in een paneel of 3D module
- via kanalen in het paneel
- via een opwekkings-/afgifte oppervlak in het paneel of de adaptielaag

Iedere methode heeft zijn voor- en nadelen (Tabel 8).

**Tabel 8 Voor- en nadelen van ieder systeem**

	Decentrale unit of 3D-module	Kanalen	Opwekkings-/afgifte apparatuur
+	Individueel afstelbaar Geringe installatiekosten	Onderhoudsarm Koude ventilatielucht kan opgewarmd worden	
-	Kleine debieten/vermogens per unit Grotere onderhoudskosten	Enkel kleine doorsnedes mogelijk	Zeer gevoelig voor luchtlekken in aansluiting prefab paneel en oude gevel
Geschikt voor?	Gebouwen met kleine, individuele debieten: bv. appartementsgebouw	Gebouwen met kleine, gelijke debieten: bv. klaslokalen met kleine bezetting	Gebouwen met veel opake geveldelen/bandramen/...: bv. kantoor, sporthal, winkelcentra

Het ontwerpproces voor HVAC-integratie bestaat uit drie stappen:

1. Berekening minimale ontwerpdebieten:
  - a. Niet-residentieel: NBN EN 13779
  - b. Residentieel: NBN D50-001
2. Opbouw gevel
  - a. Niet-dragende gevel biedt meer mogelijkheden om kanalen te integreren
  - b. Veel raamoppervlak? Toevoerroosters zijn haalbaarder dan kanalen
  - c. Mag het uitzicht van de gevel veranderen? (bv. meer opake delen door integratie kanalen? 3D module met installatiecomponenten aan de gevel?)

### 5.2 Integratie van kanalen

#### 5.2.1 Thermische prestaties

Tot slot werden enkele thermische aspecten bij de integratie van ventilatiekanalen met koude en warme lucht geëvalueerd. Indien de efficiëntie van de warmterecuperatie ( $\xi$ ) zo hoog mogelijk moet blijven, worden ventilatiekanalen zo dicht mogelijk tegen de warme zijde van de gevel geplaatst. De combinatie van:

- Opgewarmde toevoerlucht/warme afvoerlucht en een hoge lichtsnelheid (simulaties: 6 m/s)  
De temperatuursdaling van de opgewarmde lucht werd zo beperkt tot 0.05°C/lm (Figuur 24a).

- Verse koude toevoerlucht en een lage luchtsnelheid (simulaties: 1 m/s): De temperatuur van de koude toevoerlucht stijgt dan maximaal. In de simulaties was dit 0.3°C/m in temperatuur (Figuur 24b).

Om het risico op condens zoveel mogelijk te beperken, moeten:

- kanalen met warme ventilatielucht zo dicht mogelijk bij het binnenoppervlak geplaatst worden.
- kanalen met koude ventilatielucht zo ver mogelijk van het binnenoppervlak geplaatst worden.

De integratie van kanalen heeft een zekere impact op de U-waarde van het gehele paneel (+5% bij integratie van 1 kanaal met doorsnede 100 x 100 mm, +12 % bij de integratie van 3 kanalen met doorsnede 89 x 89 mm). De lijnvormige onderbreking is EPB-aanvaard als de isolatielaag voor minder dan de helft onderbroken wordt door het kanaal. Indien nodig moet de dikte van het paneel aangepast worden zodat de equivalente U-waarde voldoet aan de EPB-eisen.

Daarnaast is er geen risico op schimmelvorming aan het binnenoppervlak van de panelen door de integratie van een ventilatiekanaal. De meest kritische waarden van de temperatuurfactor  $f_{Rsi}$  werden vastgesteld aan de stijlen van het prefab paneel, indien geen extra isolatielaag langs de buitenzijde was aangebracht om de koudebrugwerking van de stijlen te compenseren.

Wat betreft het risico op condensvorming in de ventilatiekanalen met warme ventilatielucht, was de maximaal toelaatbare relatieve vochtigheid  $\phi_{max}$  80% in de simulaties.  $\phi_{max}$  zal lager zijn bij dunnere panelen, lagere luchtsnelheden en indien het ventilatiekanaal dichter bij de koude zijde geplaatst werd.

Tot slot, om het risico op condensvorming tussen het kanaal met koude ventilatielucht en de isolatielaag zoveel mogelijk te beperken, worden de kanalen best zo ver mogelijk van het binnenoppervlak geplaatst. Dit werd in deze simulaties gecontroleerd met de Methode van Glaser, wat een zeer conservatieve methode is. In de Methode van Glaser wordt namelijk geen rekening gehouden met de vochttopslag in de materialen en 2D-effecten (de isolatie rondom de leiding waarlangs damp kan evacueren is buiten beschouwing gelaten). Daarnaast werd enkel dampdiffusie meegenomen en gaat het om een stationaire berekening.

## 5.2.2 Aandachtspunten plaatsing

Voor de plaatsing en verbinding van ventilatiekanalen in een prefab paneel is het belangrijk om voldoende tolerantie toe laten:

- in horizontale richting: rotswolbekleding rondom de leiding met voldoende speling voor de connectoren (iets bredere diameter) en precieze uitlijning van de kanalen. Plaats voorzien in het gedeelte met kanalen om maatafwijkingen op te vangen.
- in verticale richting: uitschuifbare kanalen die terug in het paneel kunnen schuiven.



## 6 BIBLIOGRAFIE

- Cousin, S., Delouche, P., Radelet, F., & Boulanger, X. (2011). Retrofit Module Design Guide Part C: Large Size Prefabricated Steel Frame Retrofit Modules.
- IEA ECBCS Annex 50. (2011). *Building Renovation Case Studies*.
- IEA ECBCS Annex 50. (2011). *Retrofit Module Design Guide*.
- Janssens, A. (2015). Bouwswfysica 1 (Cursus 3de bachelor ingenieur-architect). Gent.
- KMI. (2017). *De maandnormalen te Ukkel*. Opgehaald van Algemeen klimaat België: [https://www.meteo.be/meteo/view/nl/360955-Maandelijkse+normalen.html#ppt\\_16230357](https://www.meteo.be/meteo/view/nl/360955-Maandelijkse+normalen.html#ppt_16230357)
- Kobler, R., Dott, R., & Heim, T. (2012). School Renovation with Modular Prefabricated Facade elements including ventilation.
- Loveday, D., & Taki, A. (2001). Section 3: Heat transfer. In P. Compton, W. Jones, D. Loveday, M. Purvis, & A. Watson (Red.), *Reference Data, CIBSE Guide C* (pp. 84-92). London: Butterworth-Heinemann.
- Nathan. (2016). *Nathan Energiemodule*.
- Ott, S., Loubus, S., Time, B., Homb, A., & Botsch, R. (2014). *Book 3: Multifunctional TES*. TES EnergyFaçade.
- Physibel. (2008). *Voltra. 3-dimensional dynamic simulation tool using the finite element method* (Version 7.0 ed.). Maldegem, Belgimu.
- Renson. (2016). *Healthbox (Systeem C+ EVO II) -- Technische fiche*.
- Renson. (2016). *Verluchtingen*. Waregem: Renson.
- Thermad Brink. (2017, 08 17). *Ecocombi*. Opgehaald van [www.thermad-brink.be](http://www.thermad-brink.be): <http://www.thermad-brink.be/nl-BE/content/cases/totale-oplossingen/ecocombi/42/160/>
- Ventilatie document Niet-Residentieel. (2008). 36.
- Ventilatiegids. (2007). *Stappenplan voor comfortabel en energiezuinig ventileren*. Brussel: Wetenschappelijk en technologisch centrum voor het bouwbedrijf WTCB.
- Werkgroep PATHB2010. (2009). *Toelichtingsdocument Bouwknopen*. Brussel: Vlaamse Overheid.
- WTCB TV 254. (2015). *Brandveilig afdichten van doorvoeringen in brandwerende wanden*. Brussel: WTCB.
- WTCB TVN 153. (1984). *Vochthuishouding in gebouwen*. Brussel: Wetenschappelijk en technisch centrum voor het bouwbedrijf.

