



Simulation du flux de chaleur  
tridimensionnelle  
pour déterminer les

**coefficients de perte par pont thermique des boîtiers  
encastrés dans les systèmes composites  
d'isolation thermique**

Pour le compte de la société

**KAISER GmbH & Co. KG**

Ramsloh 4

58579 Schalksmühle

Allemagne

## **Rapport sommaire sur la simulation**

Remarque: Ce document est une traduction de tiers. Seule la version originale allemande de ce document a une valeur juridique.

Auteur :  
Adrian Muskatewitz, M.Eng.

Mars 2017

## 1 Introduction

À la demande de Kaiser GmbH & Co. KG, le Passivhaus Institut Dr. Wolfgang Feist a déterminé les coefficients de perte de ponts thermiques et les températures de surface côté pièce des boîtiers encastrés dans les systèmes composites d'isolation thermique. Un système composite d'isolation thermique a servi de structure murale de référence pour déterminer les pertes de chaleur. Le modèle de référence utilisé représente une structure de système que l'on peut rencontrer pour le type de boîtier d'encastrement. Le client a mis à disposition les documents nécessaires à cet effet.

En raison de la possibilité de se passer d'un système de chauffage séparé, les maisons passives posent des exigences élevées en matière de qualité des éléments de construction utilisés. Outre une excellente isolation thermique, une étanchéité à l'air élevée, une récupération de chaleur très efficace et des fenêtres de maison passive, l'absence de ponts thermiques dans l'enveloppe thermique est d'une importance capitale pour le bon fonctionnement de la maison passive.

## 2 Spécifications pour le calcul du flux de chaleur

Les calculs ont été effectués avec le logiciel SOLIDO de la société Physibel, Belgique. Le tableau 1 énumère les matériaux utilisés dans le calcul et leurs conductivités thermiques, ainsi que la couleur choisie pour la représentation. Les sources des conductivités thermiques sont les normes pertinentes et les fiches techniques fournies par le fabricant.

	Type	CEN-rule	Nom	Pat.	Maille	$\lambda$ [W/mK]	$\varepsilon$ [-]	$\theta$ [°C]	h [W/m²K]
	MATÉRIAU		HIPS		100,00	0,220			
	MATÉRIAU		Isolation thermique		100,00	0,032			
	MATÉRIAU		Verre		100,00	1,000			
	MATÉRIAU		Vis		100,00	17,000			
	MATÉRIAU		Enduit intérieur		100,00	0,510			
	MATÉRIAU		Enduit extérieur		100,00	0,700			
	MATÉRIAU		Chape		100,00	1,400			
	MATÉRIAU		Isolation phonique		100,00	0,060			
	MATÉRIAU		Béton armé		100,00	2,300			
	MATÉRIAU		Câble_eq		100,00	15,000			
	MATÉRIAU		Bois		100,00	0,130			
	MATÉRIAU		NEOPOR		100,00	0,032			
	BC_SIMPL	NIHIL	BCE		100,00			-10,0	25,00
	BC_SIMPL	NIHIL	BCI - HFhorizontal		100,00			20,0	7,69
	BC_SIMPL	NIHIL	BCI - HFvertical		100,00			20,0	6,00
	MATÉRIAU		Chevilles		100,00	0,270			
	MATÉRIAU		Air		100,00	0,100			
	MATÉRIAU		Air		100,00	0,040			
	MATÉRIAU		EQ		100,00	5,000			

Remarque: Ce document est une traduction de tiers. Seule la version originale allemande de ce document a une valeur juridique.

Tableau 1 : Matériaux utilisés, conductivité thermique et attribution des couleurs

**Les conditions marginales suivantes ont été appliquées :**

Température extérieure : -10 °C  
 Résistance au transfert de chaleur à l'extérieur : 0,04 m<sup>2</sup>K/W  
 Température intérieure : 20 °C  
 Résistance au transfert de chaleur à l'intérieur : 0,13 m<sup>2</sup>K/W  
 Résistance au transfert de chaleur vert. : 0,17 m<sup>2</sup>K/W

**3 Modélisation**

Les boîtiers encastrés dans les systèmes composites d'isolation thermique ont été convertis, à l'aide d'un modèle de dessin tridimensionnel mis à disposition, en un modèle de calcul nécessaire à la simulation du flux de chaleur par éléments finis, puis utilisés dans le modèle d'une structure de façade avec système composite d'isolation thermique.

1		Standard-WDVS						
Bauteil Nr.		Bauteil-Bezeichnung						
Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>s</sub> :		0,13				
		außen R <sub>s</sub> :		0,04				
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite	Dicke [mm]	
1. Innenputz	0,600					15		
2. Stahlbeton	2,300					175		
3. Dämmung	0,032					160		
4. Außenputz	0,700					15		
5.								
6.								
7.								
8.								
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe		
						36,5 cm		
				U-Wert:		0,18912 W/(m <sup>2</sup> K)		

2		Standard-WDVS						
Bauteil Nr.		Bauteil-Bezeichnung						
Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>s</sub> :		0,13				
		außen R <sub>s</sub> :		0,04				
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite	Dicke [mm]	
1. Innenputz	0,600					15		
2. Stahlbeton	2,300					175		
3. Dämmung	0,032					100		
4. Außenputz	0,700					15		
5.								
6.								
7.								
8.								
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe		
						30,5 cm		
				U-Wert:		0,29304 W/(m <sup>2</sup> K)		

Illustration 1 : Structures murales SITE - Détermination de la transmission thermique unidimensionnelle

Remarque: Ce document est une traduction de tiers. Seule la version originale allemande de ce document a une valeur juridique.

<b>3</b>	<b>Standard-WDVS Deckenaufbau</b>					
Bauteil-Nr. Bauteil-Bezeichnung		Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>s</sub> :	0,16	
				außen R <sub>s</sub> :	0,04	
					Summe Breite	
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Dicke [mm]
1. Holzbooden	0,130					25
2. Estrich	1,400					60
3. Trittschalldämmung	0,060					30
4. Stahlbeton	2,300					175
5. Dämmung	0,032					160
6. Außenputz	0,700					15
7.						
8.						
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<b>46,5</b> cm
		U-Wert: <b>0,16576</b> W/(m <sup>2</sup> K)				

<b>4</b>	<b>Standard-WDVS Deckenaufbau</b>					
Bauteil-Nr. Bauteil-Bezeichnung		Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]		innen R <sub>s</sub> :	0,16	
				außen R <sub>s</sub> :	0,04	
					Summe Breite	
Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Dicke [mm]
1. Holzbooden	0,130					25
2. Estrich	1,400					60
3. Trittschalldämmung	0,060					30
4. Stahlbeton	2,300					175
5. Dämmung	0,032					100
6. Außenputz	0,700					15
7.						
8.						
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe
		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<b>40,5</b> cm
		U-Wert: <b>0,24052</b> W/(m <sup>2</sup> K)				

Illustration 2 : Structures de plafond SITE - Détermination de la transmission thermique unidimensionnelle

Pour le calcul tridimensionnel du flux de chaleur, le modèle a été divisé en éléments finis par un maillage tridimensionnel. Au niveau du boîtier d'encastrement, la taille des mailles du filet est de 0,5 x 0,5 x 0,5 mm. Elle augmente vers les bords du modèle. Au total, le modèle comprend environ 6 100 000 nœuds.

Les différents boîtiers encastrés sont modélisés avec les structures murales de référence et leur coefficient de perte ponctuelle de pont thermique ( $X_{WB}$  en W/K) est calculé. Les coefficients de perte par pont thermique se calculent à partir de la différence entre la transmission thermique unidimensionnelle  $\Phi_{1D}$  du modèle non perturbé (cf. fig. 1 - SITE), respectivement le flux thermique issu du modèle non perturbé, et le flux thermique simulé du système composite d'isolation thermique avec boîtier encastré  $\Phi_{3D}$ .

La figure 3 montre le modèle de boîtier sous la forme d'un modèle de simulation FEM modélisé.

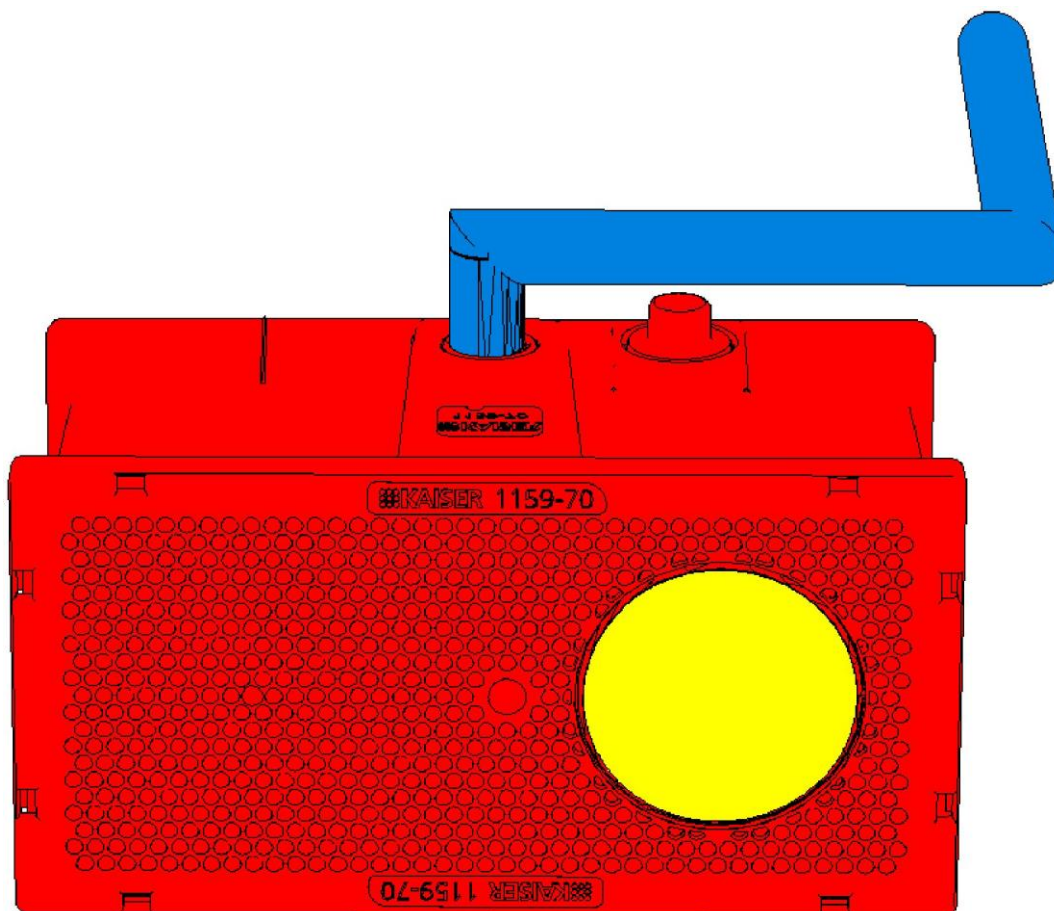


Illustration 3 : Modèle de calcul du boîtier encastré dans un système composite d'isolation thermique

#### 4 Résultats

Les résultats de la simulation du flux de chaleur sont documentés ci-dessous. Outre les coefficients de perte de ponts thermiques, les températures de surface minimales  $T_{\min}$  ont également été déterminées. Celles-ci sont déterminées à une température extérieure de  $-10^{\circ}\text{C}$  et à une température ambiante opérationnelle de  $20^{\circ}\text{C}$ .

Si le luminaire est utilisé dans un boîtier encastré conformément aux instructions du fabricant, il n'y a pas de risque de condensation ou de moisissure sur la surface de la pièce. La simulation FEM a permis de déterminer une valeur  $f_{Rsi}$  de 0,97 pour une épaisseur d'isolation de 160 mm. Pour une épaisseur d'isolation de 100 mm de l'isolation régulière, la valeur  $f_{Rsi}$  est de 0,96.

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

Avec  $\theta_{si}$ : Température de surface intérieure min. issue de la simulation du flux thermique [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Remarque: Ce document est une traduction de tiers. Seule la version originale allemande de ce document a une valeur juridique.

$\theta_e$ : Température extérieure issue de la simulation du flux de chaleur [°C]

$\theta_i$ : Température intérieure issue de la simulation du flux de chaleur [°C]

La détermination des coefficients de perte de ponts thermiques a été effectuée dans un système composite d'isolation thermique avec un plan d'isolation présentant une conductivité thermique de 0,032 W/mK. Si la conductivité thermique du niveau d'isolation régulier est plus faible, les coefficients de perte de ponts thermiques augmentent.

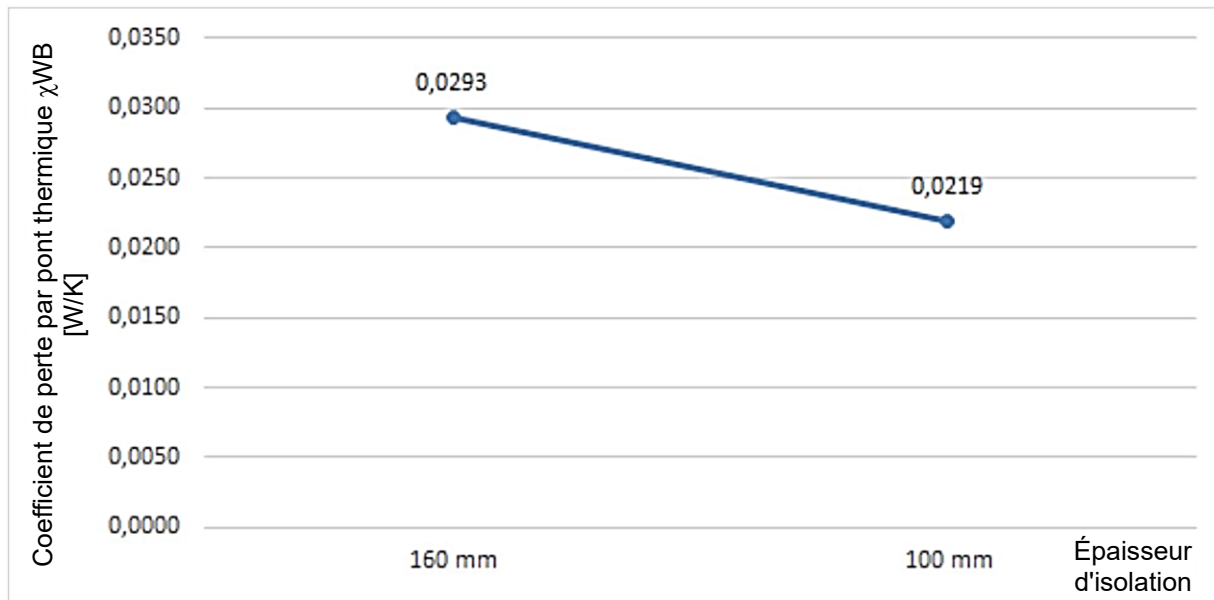


Diagramme 1 : Aperçu des résultats de la simulation FEM

Remarque : Les coefficients de perte par pont thermique pour les épaisseurs d'isolation comprises entre 100 mm et 160 mm peuvent être déduits approximativement du diagramme.

#### SOLIDO - Résultats des calculs

Fichier de données SOLIDO : 160\_opt.sld

Nombre de nœuds = 3 635 602

Divergence du flux de chaleur pour l'objet total = 6.27527e-009

Divergence du flux de chaleur pour le pire nœud = 200

Col.	Type	Nom	tmin [°C]	Nœud	tmax [°C]	Nœud
4	MATÉRIAU	HIPS	-10,04366	263396	16,57837	187188
6	MATÉRIAU	Isolation thermique	-9,71980	63457	18,69229	18386
7	MATÉRIAU	Verre	-8,24220	2723634	-7,53927	2237817
11	MATÉRIAU	Vis	15,41272	1759340	16,30406	1778739
20	MATÉRIAU	Enduit intérieur	19,00848	2347370	19,53744	19218
44	MATÉRIAU	Enduit extérieur	-9,83452	64308	-7,49681	1624377
79	MATÉRIAU	Chape	18,49609	2194071	19,65599	19242
101	MATÉRIAU	Isol. de bruit d'impact	16,55509	2097867	19,62175	19241
104	MATÉRIAU	Béton armé	15,80685	1797405	19,42998	19230
106	MATÉRIAU	Câble_eq	13,76520	1860978	17,17819	3556685
159	MATÉRIAU	Bois	18,65913	2174841	19,84227	19243
165	MATÉRIAU	NEOPOR	-3,69348	1334262	16,11366	166943
171	BC_SIMPL	BCE	-10,04366	263396	-7,76893	2547337
174	BC_SIMPL	BCI - HFhorizon	19,20445	2347508	19,53744	19218

Remarque: Ce document est une traduction de tiers. Seule la version originale allemande de ce document a une valeur juridique.

175	BC_SIMPL	BCI - HFvertica	19,37693	2136356	19,84227	19243
181	MATÉRIAU	Chevilles	15,80304	1778305	16,34549	1797983
192	MATÉRIAU	Air	-9,41695	116891	16,69784	1229982
193	MATÉRIAU	Air	-4,00652	1277104	16,60755	129459
200	MATÉRIAU	EQ	-6,01031	253236	-2,56476	3359203

Nœud	X	Y	Z
263396	400,00	546,25	562,20
187188	395,10	553,41	750,00
63457	300,00	482,50	590,00
18386	0,00	825,00	607,31
2723634	559,99	531,18	582,50
2237817	528,75	480,00	585,00
1759340	497,79	501,13	740,29
1778739	498,75	502,50	780,44
2347370	535,00	1000,00	747,82
19218	0,00	1250,00	735,00
64308	300,00	490,00	575,00
1624377	488,75	500,00	583,83
2194071	526,25	0,00	955,00
19242	0,00	1250,00	1015,00
2097867	520,00	0,00	925,00
19241	0,00	1250,00	955,00
1797405	500,00	497,50	750,00
19230	0,00	1250,00	750,00
1860978	503,61	548,75	726,83
3556685	636,36	584,62	884,73
2174841	525,00	0,00	1015,00
19243	0,00	1250,00	1040,00
1334262	470,00	486,25	720,22
166943	393,89	545,00	748,50
263396	400,00	546,25	562,20
2547337	548,75	500,00	582,50
2347508	535,00	1015,00	722,73
19218	0,00	1250,00	735,00
2136356	522,50	0,00	1040,00
19243	0,00	1250,00	1040,00
1778305	498,17	498,31	750,00
1797983	499,97	502,70	781,69
116891	390,76	445,31	584,14
1229982	462,76	588,75	750,00
1277104	466,25	491,25	719,04
129459	390,76	553,75	750,00
253236	400,27	457,91	589,11
3359203	600,77	541,25	719,04

Col.	Type	Nom	ta [°C]	Débit entrée [W]	Débit sortie [W]
171	BC_SIMPL	BCE		0,00056	8,33197
174	BC_SIMPL	BCI - HFhorizon		5,22744	0,00000
175	BC_SIMPL	BCI - HFvertica		3,10390	0,00000

**SOLIDO - Résultats des calculs**

Fichier de données SOLIDO : 100\_opt.sld

Nombre de nœuds = 2644232

Divergence du flux de chaleur pour l'objet total = 0,000237157

Divergence du flux de chaleur pour le pire nœud = 0,996053

Col.	Type	Nom	tmin [°C]	Nœud	tmax [°C]	Nœud
------	------	-----	--------------	------	--------------	------

Remarque: Ce document est une traduction de tiers. Seule la version originale allemande de ce document a une valeur juridique.

4	MATÉRIAU	HIPS	-9,39332	96533	15,25927	159837
6	MATÉRIAU	Isolation thermique	-9,53849	1474601	17,91506	12899
7	MATÉRIAU	Verre	-8,39476	1938965	-7,87590	1860251
11	MATÉRIAU	Vis	14,07774	1275013	14,95761	1288772
20	MATÉRIAU	Enduit intérieur	18,45705	1881656	19,28205	13623
44	MATÉRIAU	Enduit extérieur	-9,69848	1365295	-7,63889	12809
79	MATÉRIAU	Chape	17,83644	1746460	19,46983	13649
101	MATÉRIAU	Isol. de bruit d'impact	15,04251	1651459	19,41676	13648
104	MATÉRIAU	Béton armé	14,47414	1302027	19,11523	13635
106	MATÉRIAU	Câble_eq	12,22923	1346976	15,95936	2560633
159	MATÉRIAU	Bois	18,07104	1719333	19,75684	13650
165	MATÉRIAU	NEOPOR	-5,11733	973521	14,74434	145500
171	BC_SIMPL	BCE	-9,69848	1365295	-8,02552	1860249
174	BC_SIMPL	BCI - HFhorizon	18,75510	1922414	19,28205	13623
175	BC_SIMPL	BCI - HFvertica	19,10353	1732898	19,75684	13650
181	MATÉRIAU	Chevilles	14,47156	1288475	14,99624	1302423
192	MATÉRIAU	Air	-9,32825	110282	15,41055	899289
193	MATÉRIAU	Air	-5,43949	810406	15,28575	118887
200	MATÉRIAU	EQ	-6,44100	206816	-4,05965	2407214

Nœud	X	Y	Z
96533	390,00	443,74	642,43
159837	395,10	553,41	750,00
1474601	516,25	362,00	650,00
12899	0,00	825,00	0,00
1938965	558,67	468,03	642,50
1860251	551,25	501,25	645,50
1275013	497,79	501,13	740,29
1288772	498,75	502,50	780,44
1881656	552,50	1000,00	746,56
13623	0,00	1250,00	735,00
1365295	506,25	346,00	635,00
12809	0,00	725,00	649,96
1746460	541,25	0,00	955,00
13649	0,00	1250,00	1015,00
1651459	532,50	0,00	925,00
13648	0,00	1250,00	955,00
1302027	500,00	497,50	750,00
13635	0,00	1250,00	750,00
1346976	503,61	548,75	726,83
2560633	632,99	586,67	884,73
1719333	538,75	0,00	1015,00
13650	0,00	1250,00	1040,00
973521	470,00	486,25	720,22
145500	393,89	545,00	748,50
1365295	506,25	346,00	635,00
1860249	551,25	501,25	642,50
1922414	556,25	1015,00	716,46
13623	0,00	1250,00	735,00
1732898	540,00	0,00	1040,00
13650	0,00	1250,00	1040,00
1288475	498,17	498,31	750,00
1302423	499,97	502,70	781,69
110282	390,76	445,26	644,16
899289	462,76	588,75	750,00
810406	455,00	495,00	719,04
118887	390,76	553,75	750,00
206816	400,27	457,91	649,11
2407214	600,77	541,25	719,04

Remarque: Ce document est une traduction de tiers. Seule la version originale allemande de ce document a une valeur juridique.



Col.	Type	Nom	ta [°C]	Débit entrée [W]	Débit sortie [W]
171	BC_SIMPL	BCE		0,00000	12,78671
174	BC_SIMPL	BCI - HFhorizon		8,24496	0,00000
175	BC_SIMPL	BCI - HFvertica		4,54145	0,00000

La page suivante présente les modèles de calcul ainsi que les représentations d'isothermes et les courbes de température correspondantes.

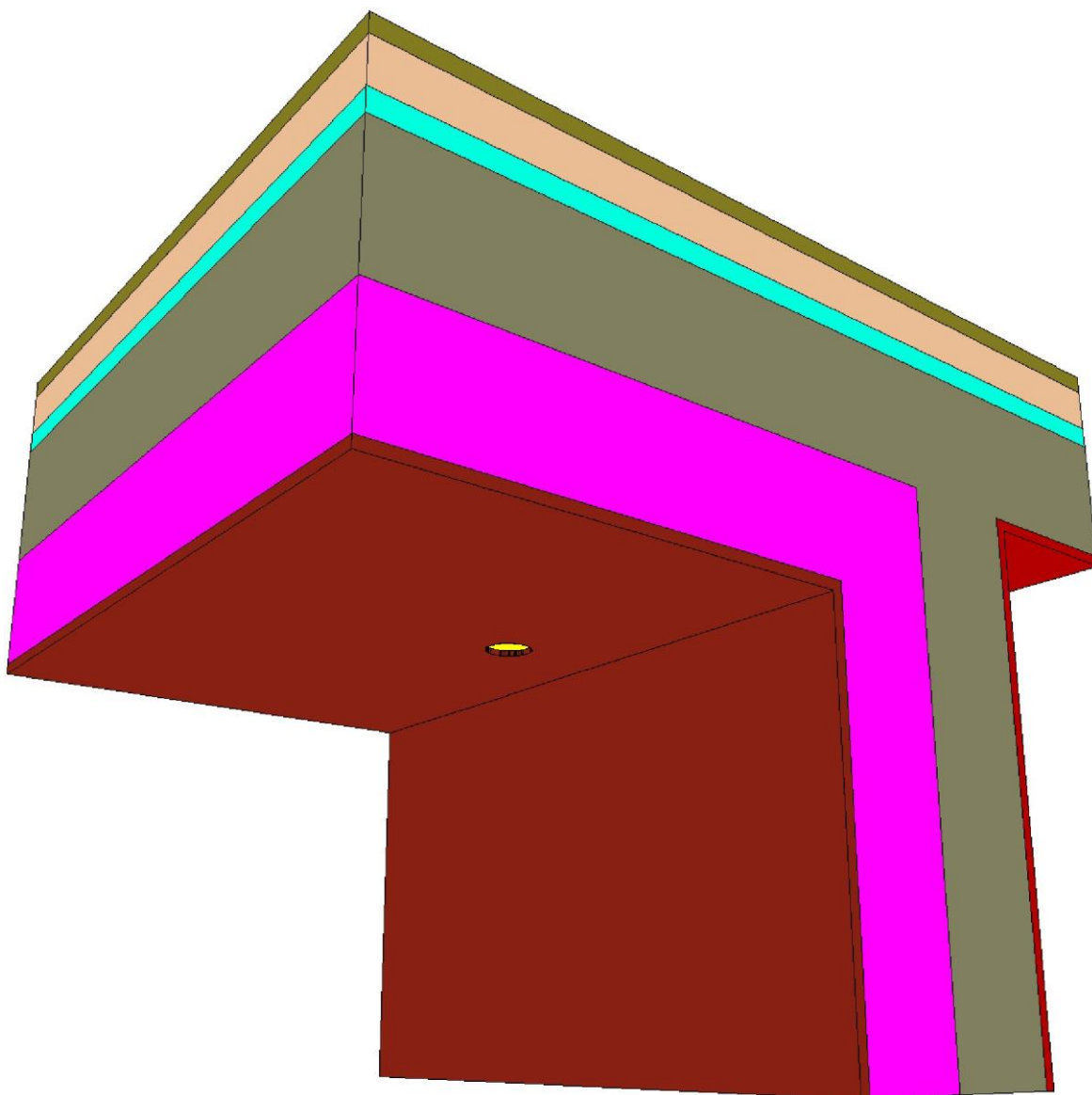
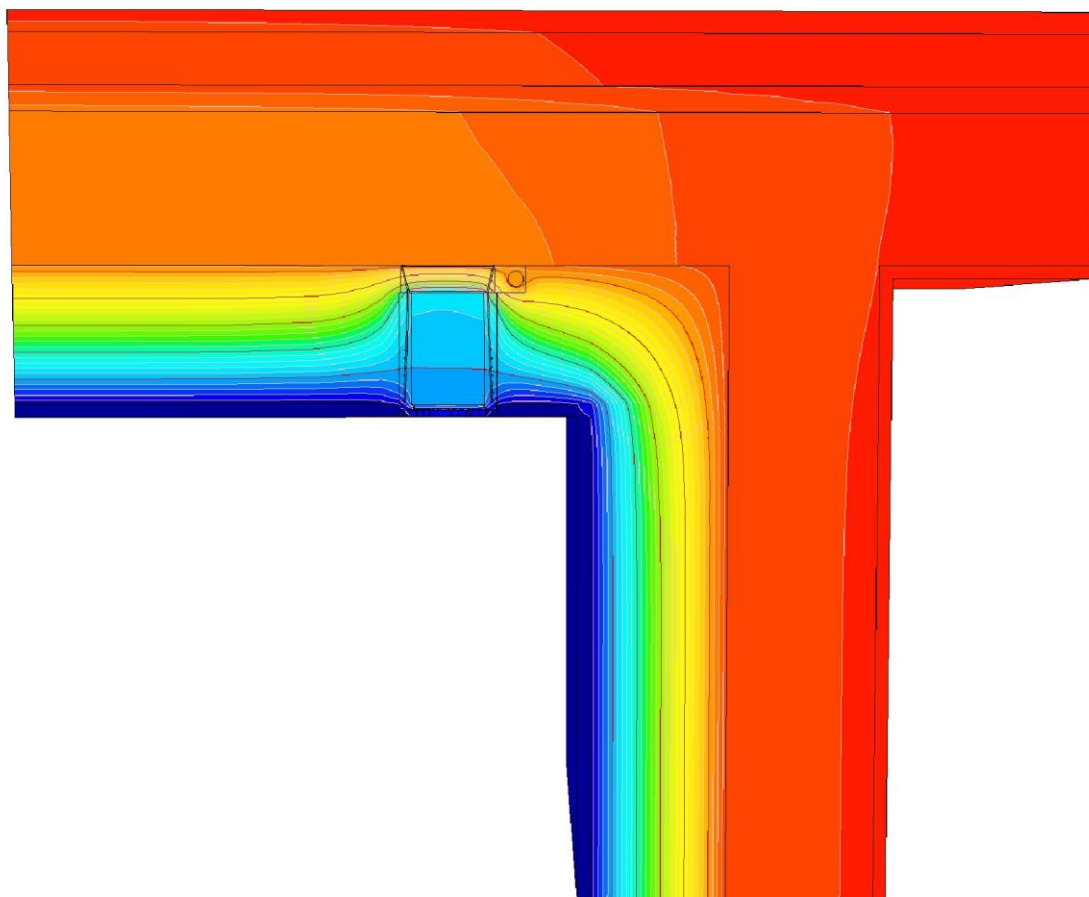
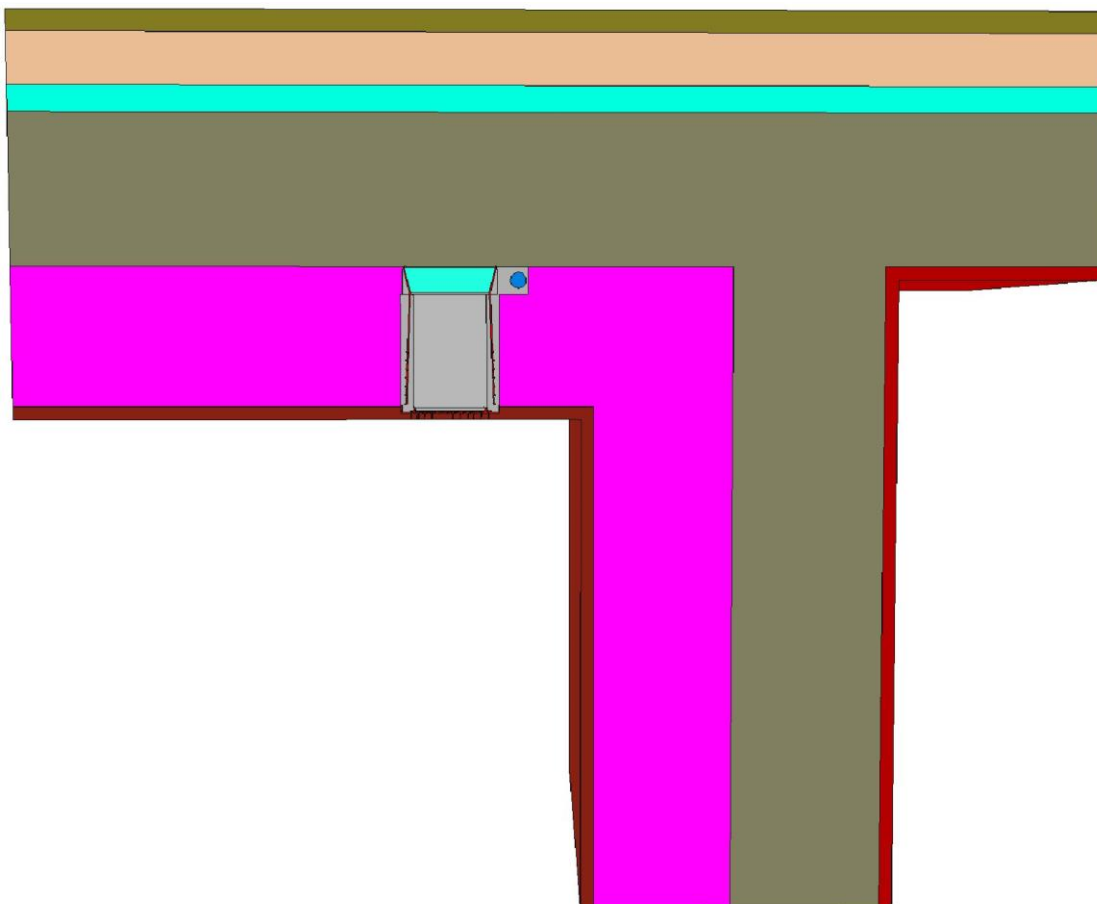


Illustration 4 : Représentation du modèle de 160 mm d'épaisseur d'isolation



Remarque: Ce document est une traduction de tiers. Seule la version originale allemande de ce document a une valeur juridique.

Illustration 5 : Représentation des matériaux et des isothermes Coupe verticale (160 mm d'isolation)

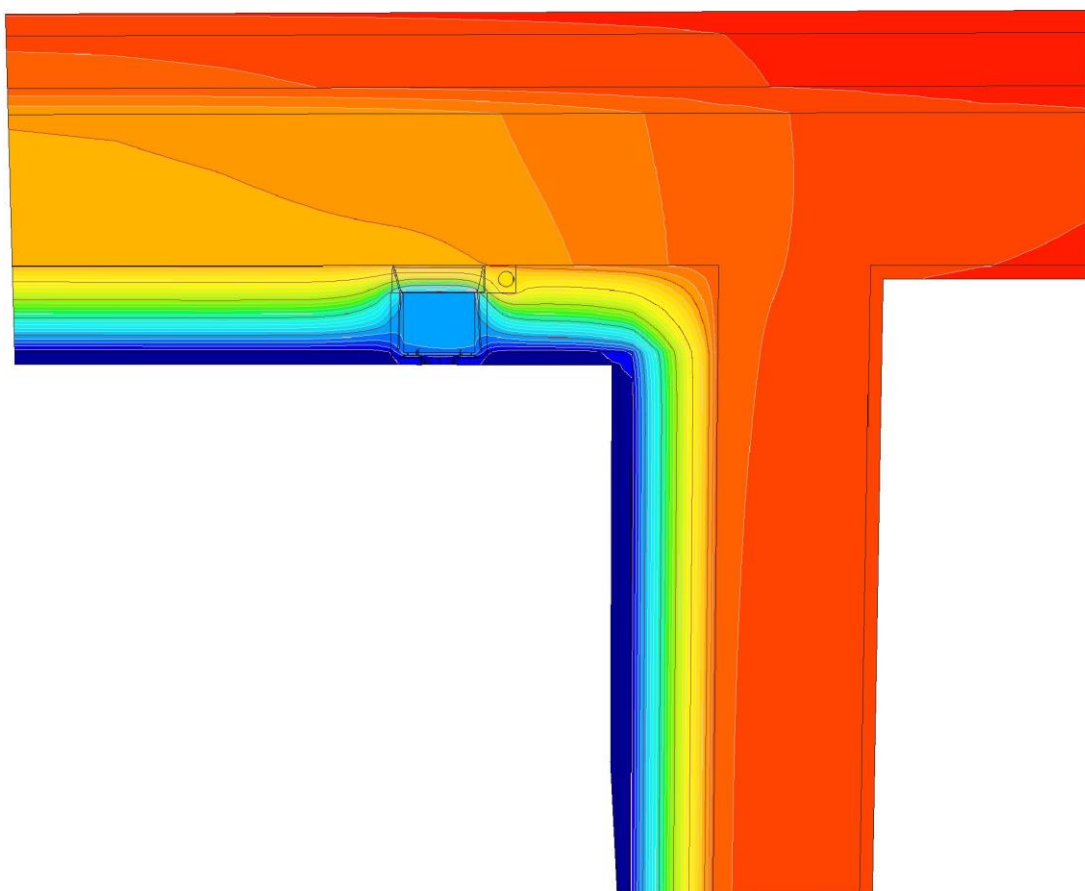
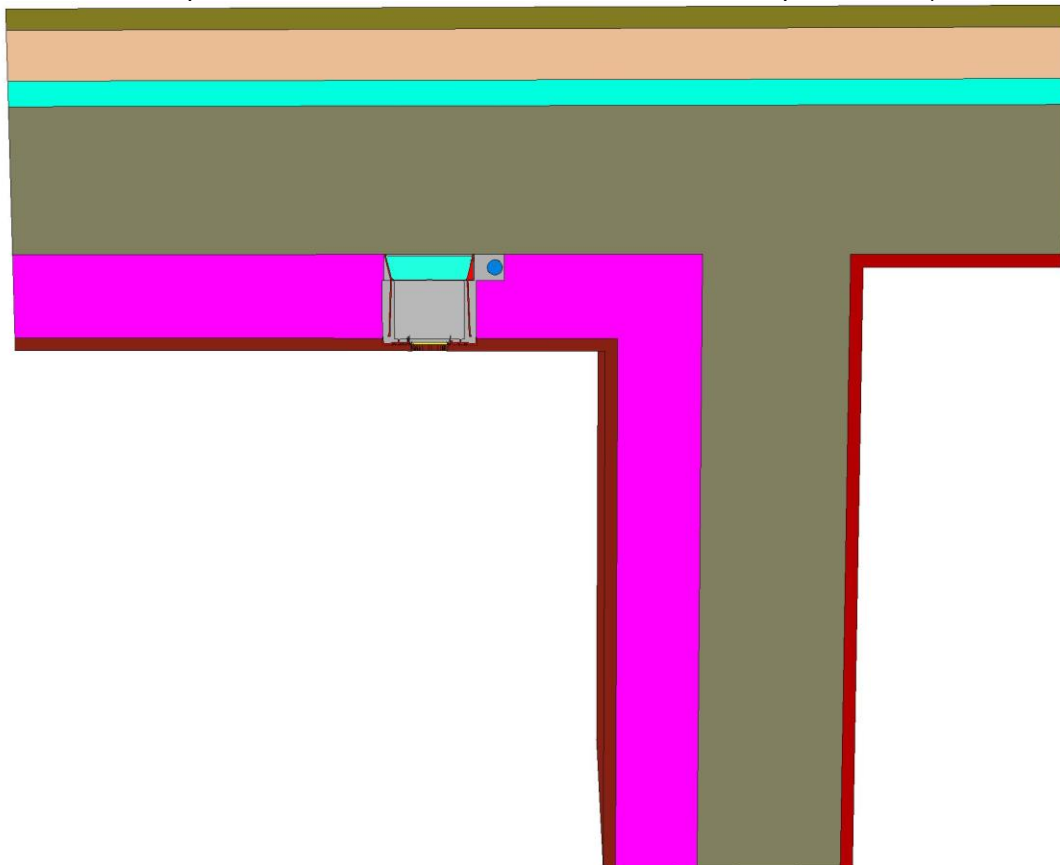


Illustration 6 : Représentation des matériaux et des isothermes Coupe verticale (100 mm d'isolation)

Remarque: Ce document est une traduction de tiers. Seule la version originale allemande de ce document a une valeur juridique.



<b>160 mm d'épaisseur d'isolation KAISER</b>	<b>hsi = 7,69, hse = 25</b>
<b>T<sub>i</sub> [°C]</b>	<b>20,0</b>
<b>T<sub>a</sub> [°C]</b>	<b>-10,0</b>
<b>Q<sub>Solido, non perturbé</sub> [W]</b>	<b>7,45221</b>
<b>Q<sub>Solido, WB</sub> [W]</b>	<b>8,33197</b>
<b>T<sub>min, WB</sub> [°C]</b>	<b>19,20</b>
<b>U<sub>Mur</sub> [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>	<b>0,2484</b>
<b>χ<sub>WB</sub> [W/K]</b>	<b>0,0293</b>
<b>U<sub>eq WB</sub> [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>	<b>0,2777</b>
<b>Mod. 1 (maison mitoyenne)</b>	
<b>Nombre</b>	<b>60,00</b>
<b>Σ suppl. Pertes [W/K]</b>	<b>1,75952</b>
<b>Surface (Mur ext à l'air extérieur) [m<sup>2</sup>]</b>	<b>184,2</b>
<b>ΔU [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0,00955</b>
<b>Valeur limite sans ponts thermiques [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0,010</b>
<b>Exigence remplie ?</b>	<b>oui</b>
<b>Mod. 2 (bâtiments non résidentiels)</b>	
<b>Nombre</b>	<b>290,00</b>
<b>Σ suppl. Pertes [W/K]</b>	<b>8,504346667</b>
<b>Surface (Mur ext à l'air extérieur) [m<sup>2</sup>]</b>	<b>867,9</b>
<b>ΔU [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0,00980</b>
<b>Valeur limite sans ponts thermiques [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0,010</b>
<b>Exigence remplie ?</b>	<b>oui</b>
<b>100 mm d'épaisseur d'isolation KAISER</b>	<b>hsi = 7,69, hse = 25</b>
<b>T<sub>i</sub> [°C]</b>	<b>20,0</b>
<b>T<sub>a</sub> [°C]</b>	<b>-10,0</b>
<b>Q<sub>Solido, non perturbé</sub> [W]</b>	<b>12,13059</b>
<b>Q<sub>Solido, WB</sub> [W]</b>	<b>12,78671</b>
<b>T<sub>min, WB</sub> [°C]</b>	<b>18,75</b>
<b>U<sub>Mur</sub> [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>	<b>0,4044</b>
<b>χ<sub>WB</sub> [W/K]</b>	<b>0,0219</b>
<b>U<sub>eq WB</sub> [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>	<b>0,4262</b>
<b>Mod. 1 (maison mitoyenne)</b>	
<b>Nombre</b>	<b>80,00</b>
<b>Σ suppl. Pertes [W/K]</b>	<b>1,749653333</b>
<b>Surface (Mur ext à l'air extérieur) [m<sup>2</sup>]</b>	<b>184,2</b>
<b>ΔU [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0,00950</b>
<b>Valeur limite sans ponts thermiques [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0,010</b>
<b>Exigence remplie ?</b>	<b>oui</b>
<b>Mod. 2 (bâtiments non résidentiels)</b>	
<b>Nombre</b>	<b>380,00</b>
<b>Σ suppl. Pertes [W/K]</b>	<b>8,310853333</b>
<b>Surface (Mur ext à l'air extérieur) [m<sup>2</sup>]</b>	<b>867,9</b>
<b>ΔU [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0,00958</b>
<b>Valeur limite sans ponts thermiques [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0,010</b>
<b>Exigence remplie ?</b>	<b>oui</b>

Remarque: Ce document est une traduction de tiers. Seule la version originale allemande de ce document a une valeur juridique.

Tableau 1 : Aperçu des résultats de la simulation

## 5 Résumé

Le système de boîtier encastré de KAISER GmbH & Co. KG représente une construction réussie en ce qui concerne les paramètres contrôlés. Les pertes de chaleur supplémentaires dues au pont thermique constructif peuvent également être compensées dans le segment des constructions neuves de haute qualité énergétique et conviennent également à une utilisation dans les maisons passives. La prise en compte dans le bilan énergétique devrait néanmoins avoir lieu, surtout si un nombre relativement élevé de luminaires est installé. La condensation de surface côté pièce, ainsi que la chute d'air froid due aux faibles températures de surface peuvent également être exclues selon la structure analysée. Les températures de surface sont supérieures à 19 °C même lorsque la température extérieure est de -10 °C. Cela correspond presque à la température de surface du mur non perturbé.