



FEDERATIE  
ALUMINIUM  
CONSTRUCTEURS

# BASISCURSUS GEVELTECHNIEK 2023

## MODULE 3 - BOUWFYSICA

### WARMTETRANSPORT



Wout Parys, PhD  
Jelle Langmans, PhD  
mail@physibel.be

# Overzicht

## Les 1: warmtetransport

- Inleiding
- Theorie warmtetransport
- Afgeleide thermische eigenschappen:  $U$ ,  $\Psi$ ,  $X$
- Niet-stationair: bezonning

## Les 2: warmte-, lucht- en vochttransport

## Les 3: Bouwfysische evaluatie

**! Laptop meenemen met programma's geïnstalleerd**

**! Op voorhand .dxf doorsturen voor case study**



# Inleiding

## Bouwfysica

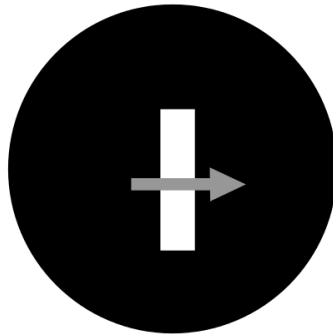
- Toegepaste wetenschap met comfort als uitgangspunt
  - (hygro-)thermisch comfort
  - Akoestische comfort
  - Visueel comfort
  - Binnenluchtkwaliteit
- Overige randvoorwaarden:
  - Gezondheid
  - Bouwkundige en materiaalkundige realiteit/duurzaamheid
  - Economische aspecten
  - Milieuoverwegingen



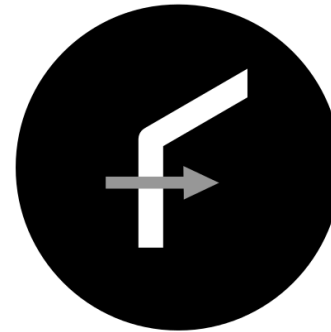
# Inleiding

## Bouwfysica

4 schalen



*materiaal*



*bouwcomponent*



*gebouw*

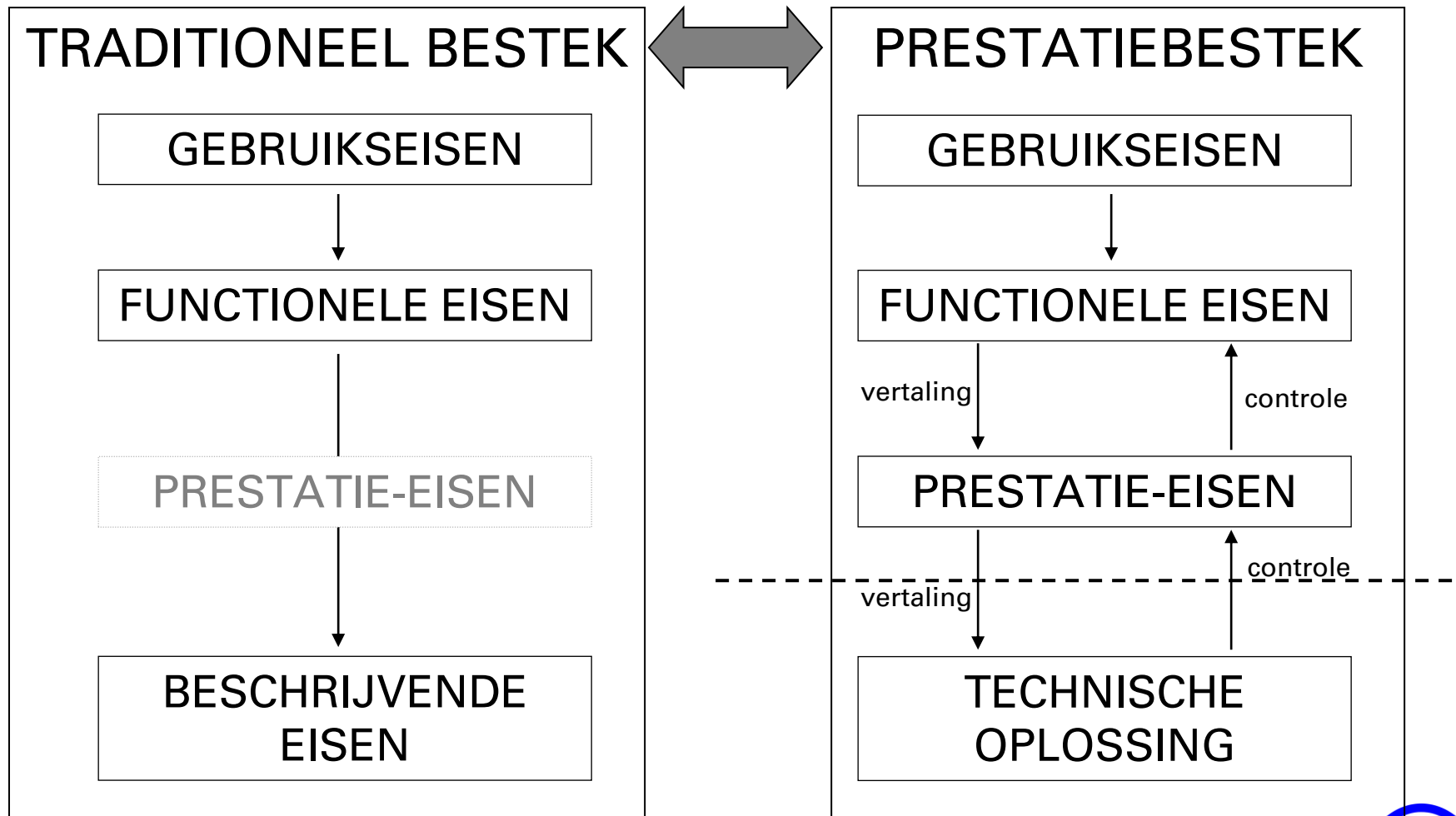


*Gebouwde omgeving*



# Inleiding

## Prestatiebenadering in de bouw



# Inleiding

## Prestatiebenadering in de bouw

Prestatie-eisen:

- Exact formuleerbaar en éénduidig bepaald
- Voorspelbaar in de ontwerpfase
- Controleerbaar na uitvoering

Op verschillende schalen gedefinieerd

gebouw                      bouwdeel                      materialen en lagen



Voorbeelden:

K-peil van het gebouw \_\_\_\_ U-waarden van de wanden \_\_\_\_ warmteweerstanden materialen

brandcompartimentering \_\_\_\_ brandweerstand bouwdelen \_\_\_\_ brandklasse van materialen



# Inleiding

## Prestatiebenadering in de bouw

### prestatie-eisen op niveau van scheidingsdeel

<b>Warmte en vocht</b>	1 Luchtdichtheid <i>luchtpermeabiliteit, <math>n_{50}</math>, rotatiestroming rond isolatie,...</i>
	2 Thermische isolatie <i>U-waarde (opake delen, ramen, gemiddelde U-waarde gebouwschil), dynamische U-waarde (actieve gevels)</i>
	3 Niet-stationaire respons <i>harmonische thermische weerstand en admittantie, zonne-transmissie, temperatuursdemping,...</i>
	4 Vochtrespons <i>initieel vochtgehalte en uitdroogbaarheid, regendoorslag, opstijgend vocht, hygroscopteit, oppervlaktecondensatie, inwendige condensatie</i>
	5 Koudebruggen <i>temperatuursfactor</i>
<b>Akoestiek</b>	6 Globale scheidingsisolatie tegen buitengeluid
	7 flankerende transmissie
	8 geluidsabsorbering
<b>Licht</b>	9 Lichttransmissie van transparante elementen
	10 fenestratie naar de gehele wandhoogteverhouding
<b>Brand</b>	11 brandweerstand
	12 brandreactie
	13 vlamverspreiding langs gebouwschil
<b>Gebruiksduur</b>	14 fysische krachten (spanningen tgv vocht, temperatuur, vorst, zouten, biologische groei,...)
	15 chemische aanval (vergipzing van kalk, carbonatie, corrosie)
	16 Biologische aanval (schimmel, algen, planten, bacteriën,
<b>Kosten</b>	17 netto contante waarde en optimalisatie van investeringen, operationele kosten, onderhoudskosten
<b>Duurzaamheid</b>	18 duurzaamheidsprofiel



# Overzicht

## Les 1: warmtetransport

- Inleiding
- Theorie warmtetransport
- Afgeleide thermische eigenschappen:  $U$ ,  $\Psi$ ,  $X$
- Niet-stationair: bezonning

## Les 2: warmte-, lucht- en vochttransport

## Les 3: Bouwfysische evaluatie





# Wat is warmteoverdracht?

## Wat is warmteoverdracht ?

Warmteoverdracht is de overdracht van energie ten gevolge van een temperatuursgradiënt tussen of in materiële media.

Door de warmteoverdracht evolueren de materiële media naar een toestand van thermisch evenwicht (zonder temperatuursgradiënt).

## Warmteoverdrachtsvormen ?

geleiding



convection



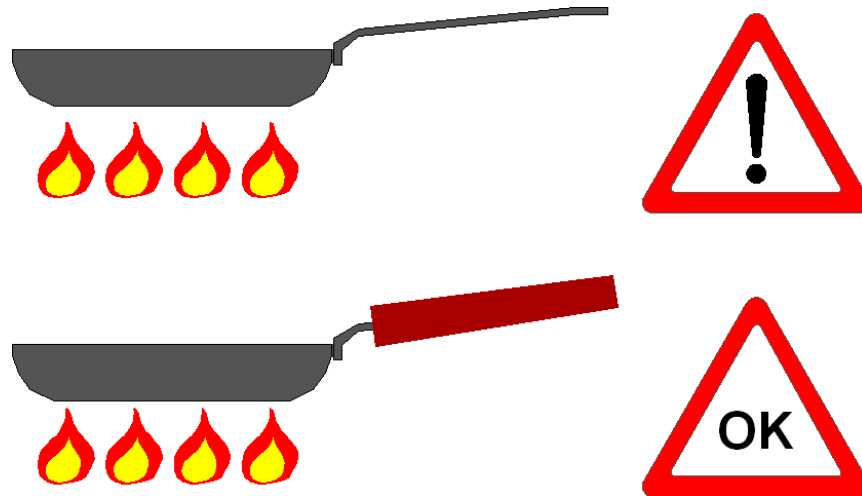
straling



# Geleiding

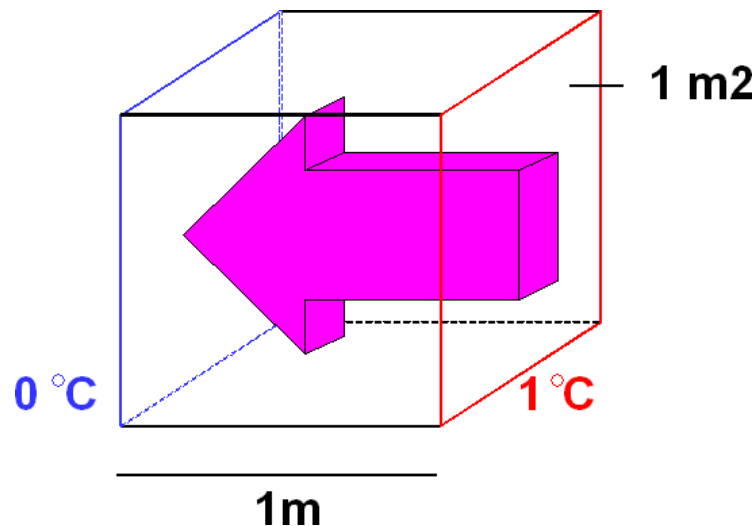
Warmteoverdracht door geleiding treedt op in vaste stoffen, gassen en vloeistoffen. Deze vorm van warmteoverdracht bestaat in de uitwisseling van moleculaire kinetische energie door elastische botsingen en de beweging van vrije elektronen.

Materialen kunnen zwak of sterk geleidend zijn.



# Geleiding

De mate waarin een materiaal de warmte geleidt wordt uitgedrukt door de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$  [W/mK], gedefinieerd zoals in de figuur aangegeven.



# Geleiding

1<sup>ste</sup> wet van Fourier

2<sup>de</sup> wet van Fourier

dynamische warmtebalansvergelijking

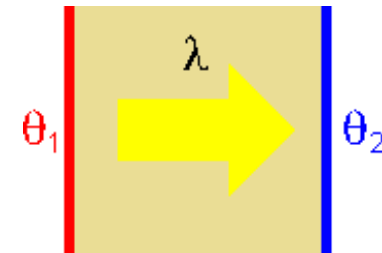
stationaire warmtebalansvergelijking

$\mathbf{q}$	warmtegeleidingsvector [W/m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	warmtegeleidingscoëfficiënt [W/m.K]
$\theta$	temperatuur [K]
$\rho$	densiteit [kg/m <sup>3</sup> ]
$c$	specifieke warmte [J/kg.K]
$t$	tijd [s]
$\Phi$	warmteopwekking [W/m <sup>2</sup> ]

$$\mathbf{q} = \lambda \text{grad}\theta$$

$$\text{div}(\lambda \text{grad}\theta) = \frac{\partial(\rho c \theta)}{\partial t} + \Phi$$

$$\text{div}(\lambda \text{grad}\theta) = \Phi$$



De warmtegeleidingscoëfficiënt is eigenlijk temperatuursafhankelijk, maar mag praktisch (binnen een beperkt bereik) als constant worden beschouwd.

Een berekening van U-,  $\Psi$ - of X-waarde is **stationair**. We beperken ons in eerste instantie tot stationaire warmteoverdracht.

# Geleiding - warmteweerstand

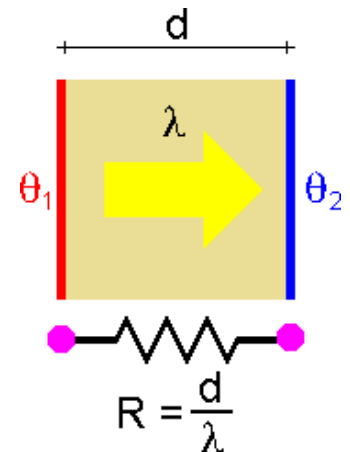
In geval van 1D geleiding door een homogene laag met bekende constante temperatuur aan beide zijden, wordt de wet van Fourier  $q_{12} = \frac{\lambda}{d}(\theta_1 - \theta_2)$  of  $q_{12} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R}$  met  $R = \frac{d}{\lambda}$

$q_{12}$	geleidings-warmtestroomdichtheid van vlak 1 naar vlak 2 [W/m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	warmtegeleidingscoëfficiënt [W/m.K]
$d$	laagdikte [m]
$\theta_1$	temperatuur in vlak 1 [K or °C]
$\theta_2$	temperatuur in vlak 2 [K or °C]
<b>R</b>	<b>warmteweerstand [m<sup>2</sup>.K/W]</b>

Deze vergelijking en de wet van Ohm uit de elektriciteitsleer zijn gelijkvormig. Men kan volgende analogieën maken:

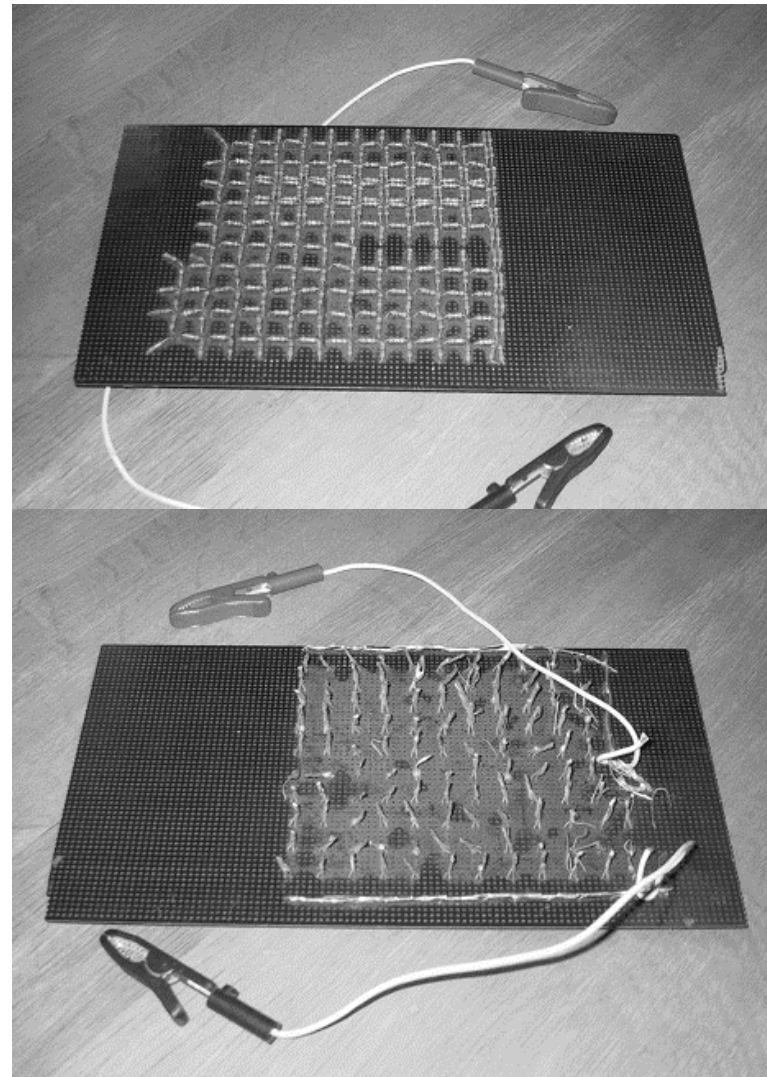
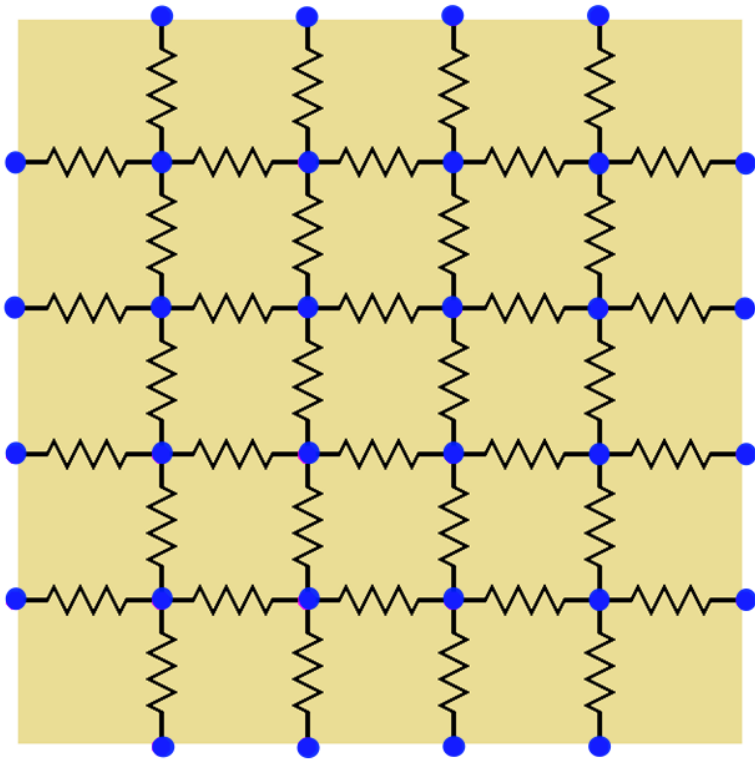
warmtestroom  $\Leftrightarrow$  elektrische stroom      temperatuur  $\Leftrightarrow$  spanning  
thermische weerstand  $\Leftrightarrow$  elektrische weerstand      thermische inertie  $\Leftrightarrow$  elektrische capaciteit

Deze analogie laat toe om wetten uit de elektriciteit toe te passen op warmtegeleidingsvraagstukken, zoals bijvoorbeeld warmtegeleiding doorheen lagen die **serieel of parallel** zijn geplaatst. 2D/3D geleiding kan men beschouwen als een 2D/3D **netwerk van elektrische weerstanden**.

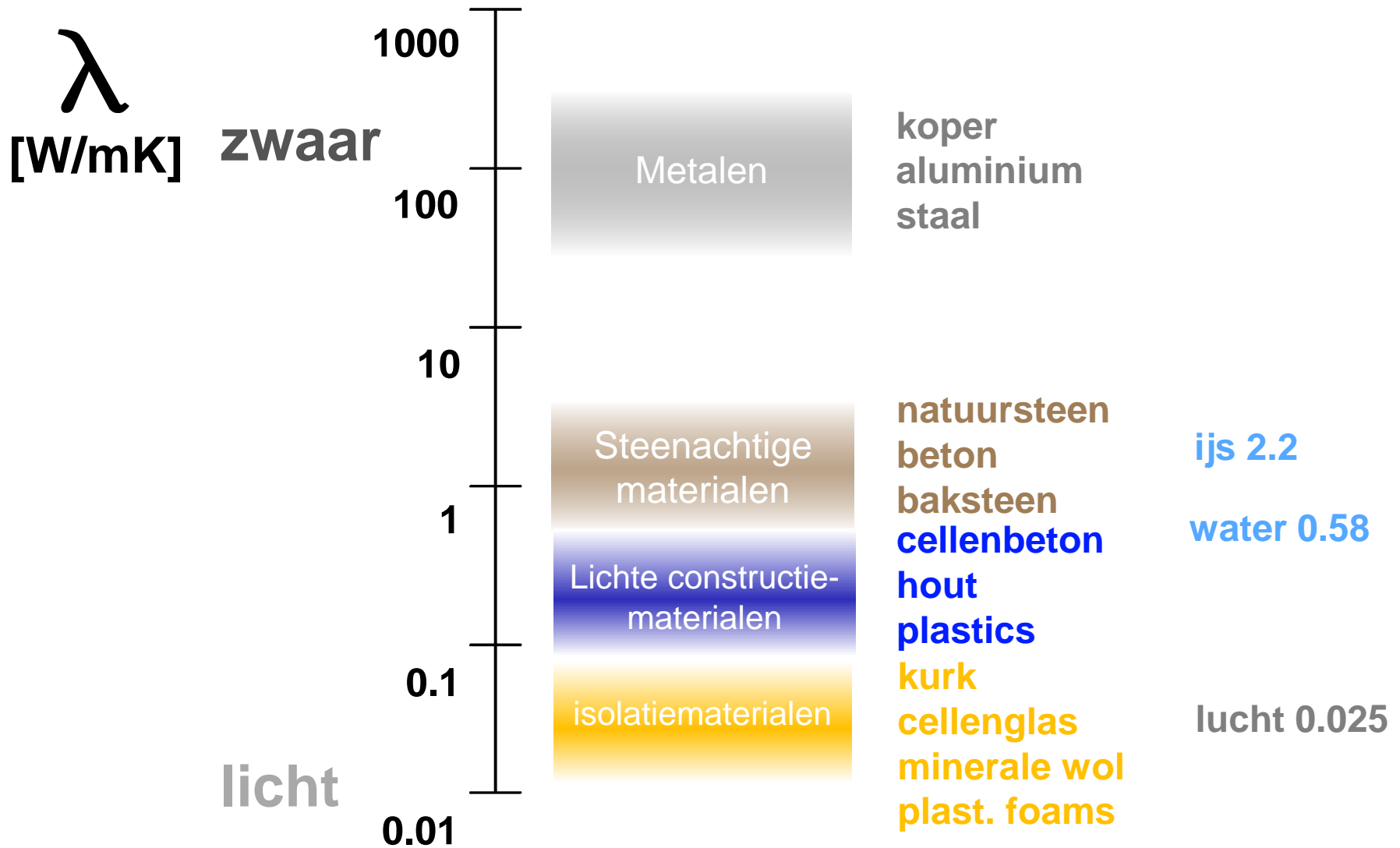


# Geleiding - warmteweerstandennetwerk

*Standaert, P. Spaas, J. (1977) Koudebruggen : bepaling van het temperatuurverloop in tweedimensionale constructies in permanent regime, Master thesis, KU Leuven.*



# Geleiding – geleidingscoëfficiënt



# Geleiding – geleidingscoëfficiënt

- normen voor het meten van de warmtegeleidingscoëfficiënt
  - ISO 8302 hot plate – cold plate methode
- normen met waarden van de warmtegeleidingscoëfficiënt
  - EN 12524 courante bouwmaterialen
  - EN ISO 10077-2 vensters en façades
  - EN 673 gassen voor glasspouwvulling





# Voorbeeld – 2D geleiding (EN 10211)

## Analytische oplossing

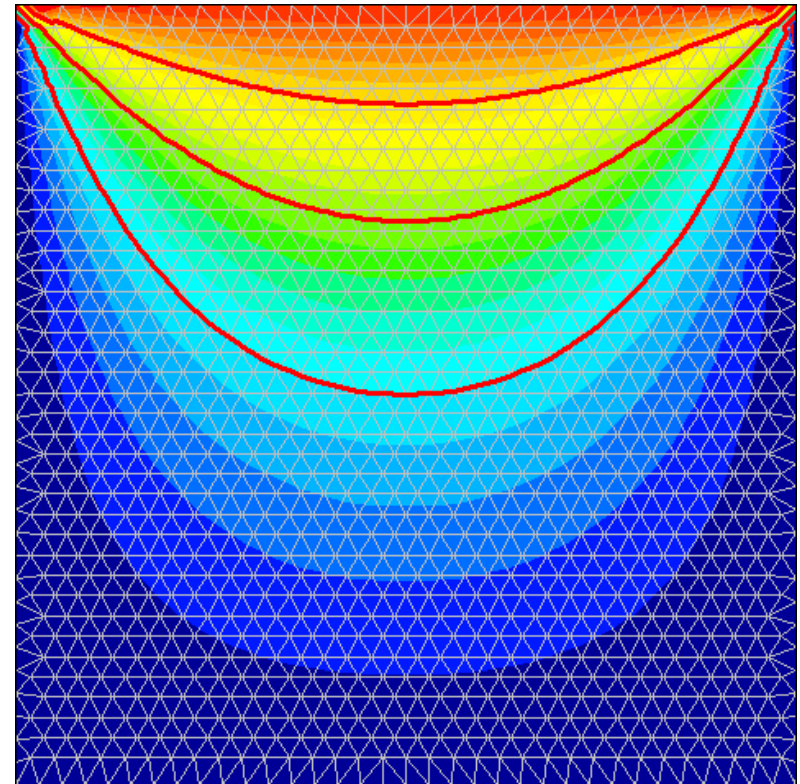
$$\theta(x, y) = \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{20 a}{k\pi \sinh(k\pi)} \sin \frac{k\pi x}{a} \sinh \frac{k\pi y}{a}$$

number of nodes	simulated temperature – real temperature [°C]	
	minimum	maximum
90	-0.234442	0.209684
306	-0.052136	0.046134
1122	-0.013477	0.011988
4290	-0.003398	0.003026
16770	-0.000851	0.000758
66306	-0.000213	0.000189
263682	-0.000057	0.000076
1051650	-0.000015	0.000016

De numerieke oplossing convergeert bij een toenemend aantal elementen naar de analytische oplossing.

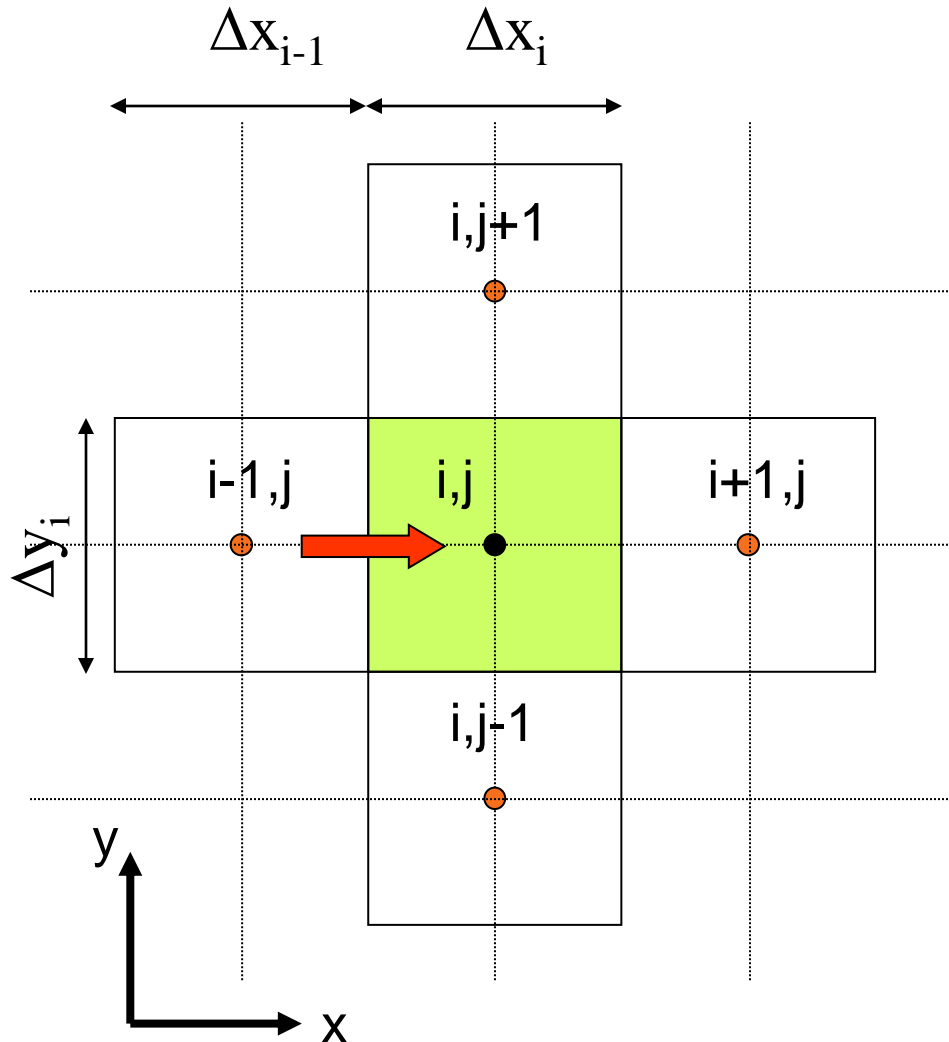
## Numerieke oplossing

([Physibel programma BISCO](#))



# Numerieke methode: CVM

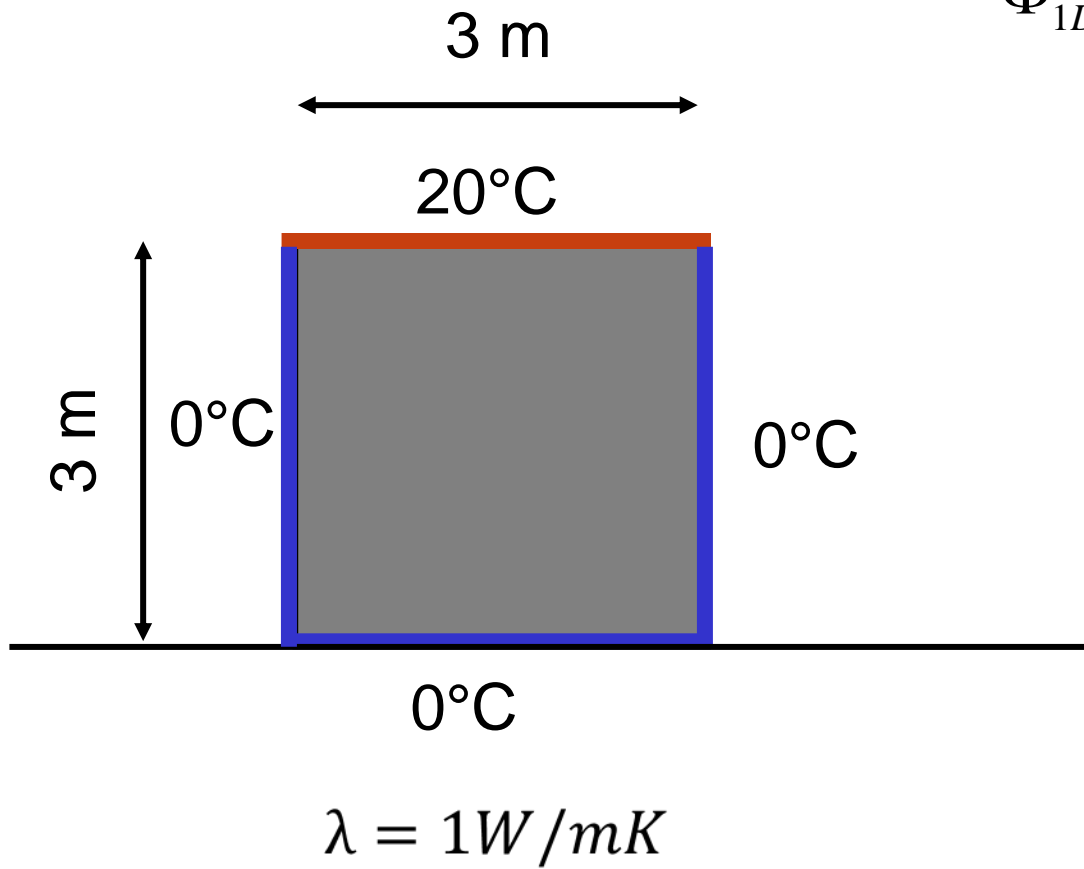
## Controle Volume Methode (CVM)



$$\Phi_{i-1,j \rightarrow i,j} = \Delta y_i \frac{\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j}}{\left( \frac{\Delta x_{i-1}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2} \right)}$$

$$= P_{i-1,j \rightarrow i,j} (\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j})$$



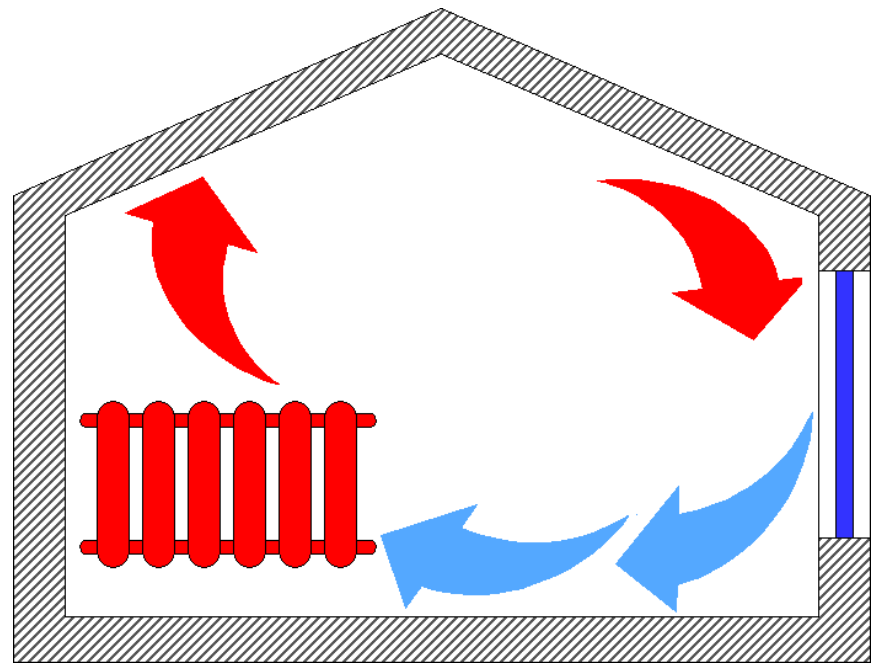


$$\Phi_{1D} = A \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{\frac{d}{\lambda}}$$



# Natuurlijke convectie

Warme lucht is lichter dan koude lucht (t.g.v. expansie). Daardoor ontstaat een opwaartse kracht op de warme lucht en een neerwaartse kracht op de koude lucht, wat een warmtetransport door natuurlijke convectie veroorzaakt.



# Gedwongen convection

Ook wanneer een externe kracht (ventilator, wind) de lucht doet bewegen zal deze lucht warmere oppervlakken afkoelen en koudere oppervlakken opwarmen. Dit noemt men geforceerde convection.



# Convectie

= warmteoverdracht tussen een oppervlak en een bewegend fluidum

fluidum in rust (Nusselt getal = 1) = geleiding

beweging door temperatuurverschil

= natuurlijke convectie

beweging door externe kracht

= geforceerde convectie

convectie-vergelijking (koelingswet van Newton)

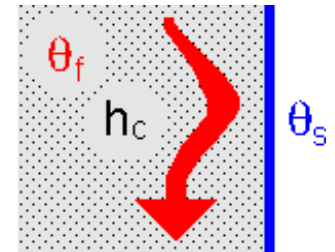
$$q_c = h_c (\theta_s - \theta_f)$$

$q_c$  convectieve warmtflux [ $W/m^2$ ]

$h_c$  convectieve warmteovergangscoefficiënt [ $W/m^2.K$ ]

$\theta_s$  oppervlaktetemperatuur [K]

$\theta_f$  fluidumtemperatuur [K]



Natuurlijke convectie:

- $h_c$  is functie van
1. richting van de warmtestroom ++
  2. temperatuurverschil +/-
  3. afmetingen en configuratie van de oppervlakken -

Geforceerde convectie:

- $h_c$  is functie van
1. fluidumsnelheid ++
  2. afmetingen en configuratie van de oppervlakken -

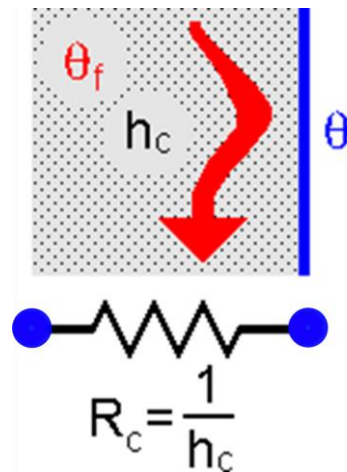


# Convectie overgangsweerstand

De analogie elektriciteit – warmte kan men ook op convectie toepassen.  
De koelingswet van Newton kan men herschrijven als:

$$q_c = \frac{\theta_s - \theta_f}{R_c} \quad \text{met} \quad R_c = \frac{1}{h_c}$$

$R_c$  convectieve overgangsweerstand [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]



# Convectie normatief

Normen met waarden en formules voor  $h_c$

EN 6946  $h_c$  aan omgevings- en holte-oppervlakken

EN ISO 10077-2  $h_c$  aan omgevings- en holte-oppervlakken

EN 673  $h_c$  voor beglazingen

## Aan **binnenoppervlakken**

- horizontale warmtestroom  $h_c = 1.46 \Delta\theta^{1/3} = 2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  bij  $\Delta\theta = 5 \text{ K}$
- opwaartse warmtestroom  $h_c = 2.28 \Delta\theta^{1/3} = 3.9 \text{ W/m}^2\text{K}$  bij  $\Delta\theta = 5 \text{ K}$
- neerwaartse warmtestroom  $h_c = 0.18 \Delta\theta^{0.187} = 0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$  bij  $\Delta\theta = 5 \text{ K}$

## Aan **buitenoppervlakken**

- warmteverliesberekening ( $v = 4 \text{ m/s}$ )  $h_c = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$
- temperatuurberekening in zomer  $h_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$

In **spouwen/holtes**: zie EN ISO 10077-2

Samenvattend:  $h_c =$  functie van

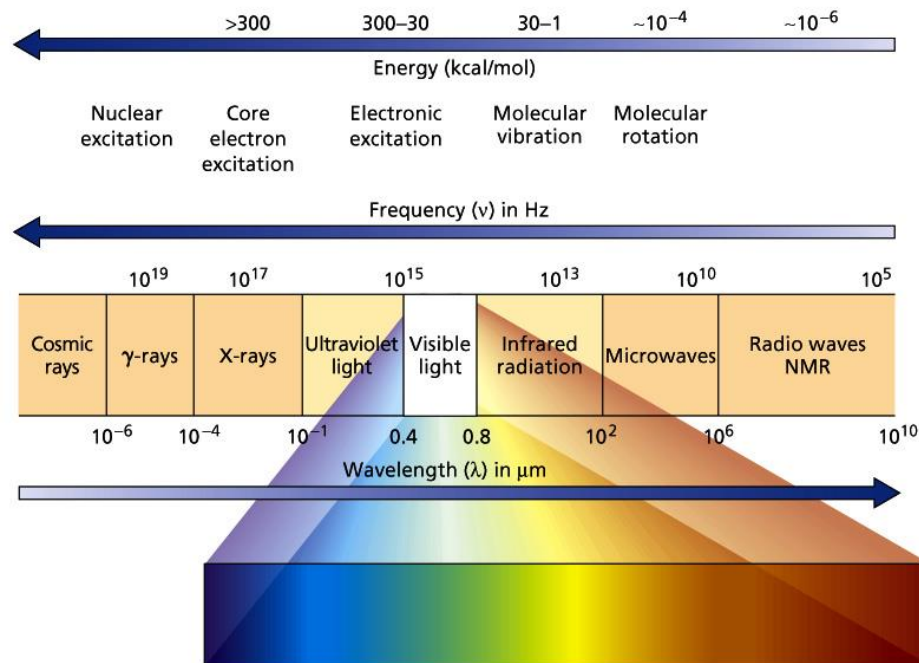
1. warmtestroomrichting
2. holtevorm en -afmetingen
3. temperatuurverschil
4. ventilatie





# Straling

Energie-uitwisseling via elektromagnetische golven tussen gescheiden materiële media zonder tussenkomst te vereisen van een materieel midden (doorheen vacuum, bepaalde gassen, vloeistoffen en vaste stoffen)



# Straling

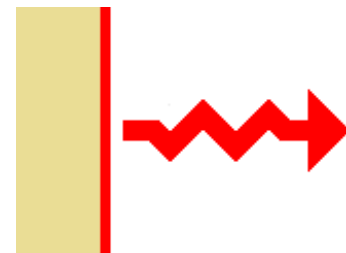
Energie-uitwisseling via elektromagnetische golven tussen gescheiden materiële media zonder tussenkomst te vereisen van een materieel midden (doorheen vacuum, bepaalde gassen, vloeistoffen en vaste stoffen)

Stralingsemissie door een oppervlak op hoge temperatuur  
= **kortgolvlige straling**, praktisch **zonstraling**

Stralingsemissie door een oppervlak op lage temperatuur  
= **langgolvlige straling** of **infrarode straling**

Stralingsemissiewet  $q = \varepsilon\sigma T^4$

q	stralingsflux [W/m <sup>2</sup> ]
ε	emissiviteit van het oppervlak [-]
σ	constante van Stefan-Boltzmann = 5.67 E-08 W/m <sup>2</sup> .K
T	absolute temperatuur [K]



# Straling

## Stralingsemisiewet $E = \varepsilon \sigma T^4$

- E uitgezonden stralingsflux [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $\varepsilon$  emissiviteit van het oppervlak [-] : indien  $\varepsilon = 1$  **zwarte straler**
- $\sigma$  constante van Stefan-Boltzmann =  $5.67 \text{ E-}08 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$
- T absolute temperatuur [K]



## Stralingswet van Planck

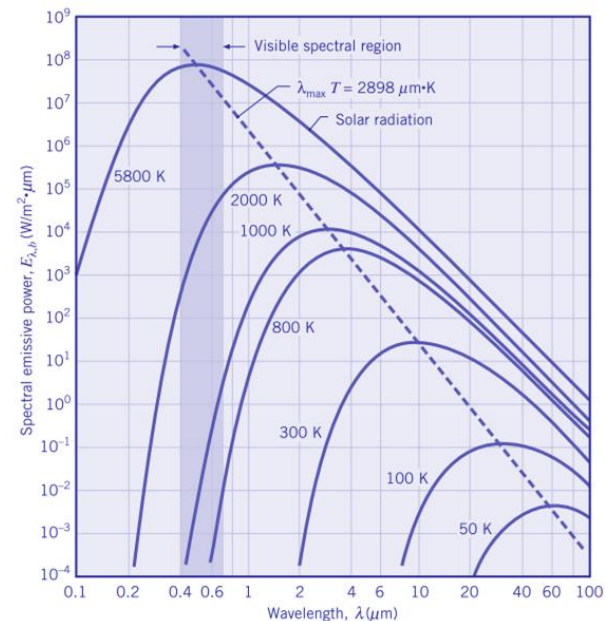
$$E_{b\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2 / \lambda T) - 1}$$

- l golflengte [m]
- $C_1$  constante 1 =  $3.7415 \text{ E-}16 \text{ Wm}^2$
- $C_2$  constante 2 =  $1.4388 \text{ E-}2 \text{ mK}$

## Verschuivingswet van Wien

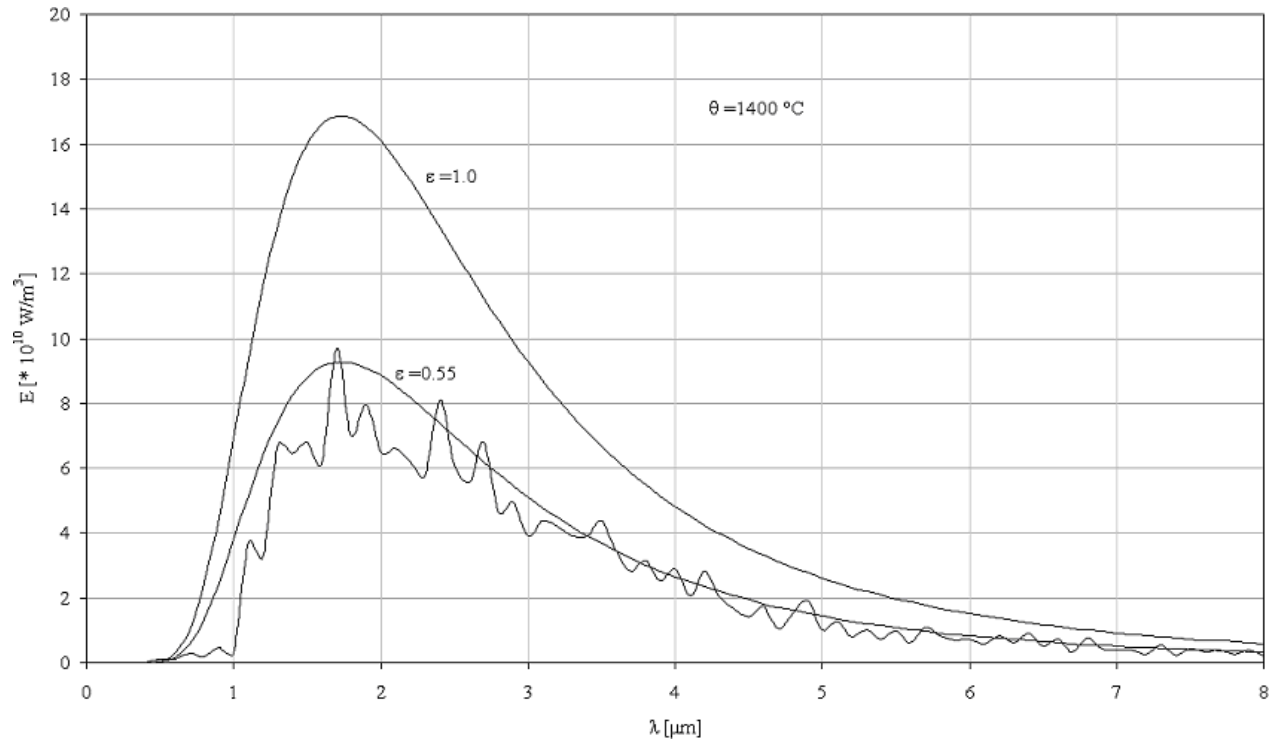
$$\lambda_M T = 2898 \cdot 10^{-6}$$

- $\lambda_m$  golflengte bij maximum E [m]



# Straling

Zwarte straler  
Reële straler  
Grijze straler



# Straling

## Basiswetten

Toepassing van de wet van energiebehoud op invallende straling

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

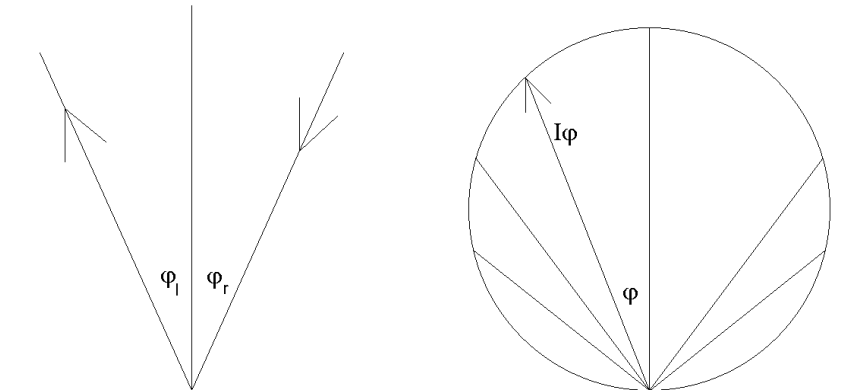
$\alpha$  absorptiefactor [-]  
 $\rho$  reflectiefactor [-]  
 $\tau$  transmissiefactor [-]

**golflengte-afhankelijke waarden !**

Wet van Kirchoff

$$\varepsilon = \alpha$$

Spiegelende en diffuse reflectie



# Straling: praktisch

Absorptiefactor (=emissiefactor), reflectiefactor en transmissiefactor zijn golflengte-afhankelijk. **Praktisch volstaat het om 2 golflengtegebieden te beschouwen, kortgolvlige straling (zonstraling) en langgolvlige straling (infrarode straling), elk met specifieke waarden voor  $\alpha=\varepsilon$ ,  $\rho$  en  $\tau$ .**

Stralingsemmissie door een oppervlak op hoge temperatuur  
= **kortgolvlige straling**, praktisch **zonstraling**

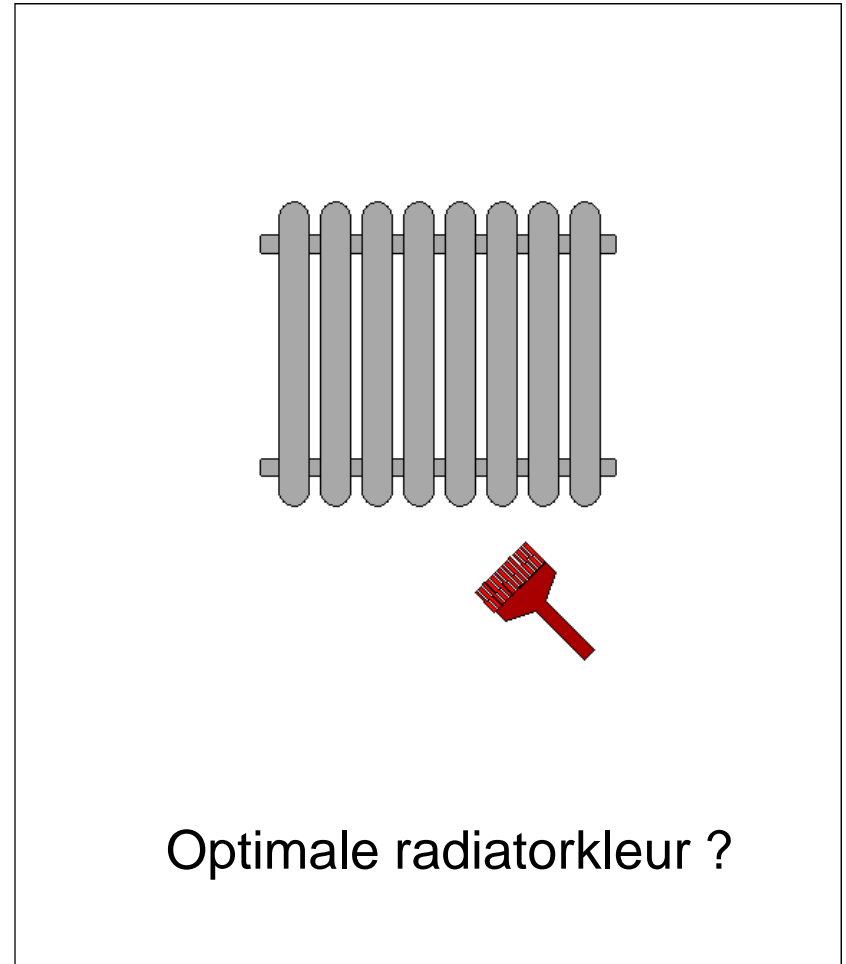
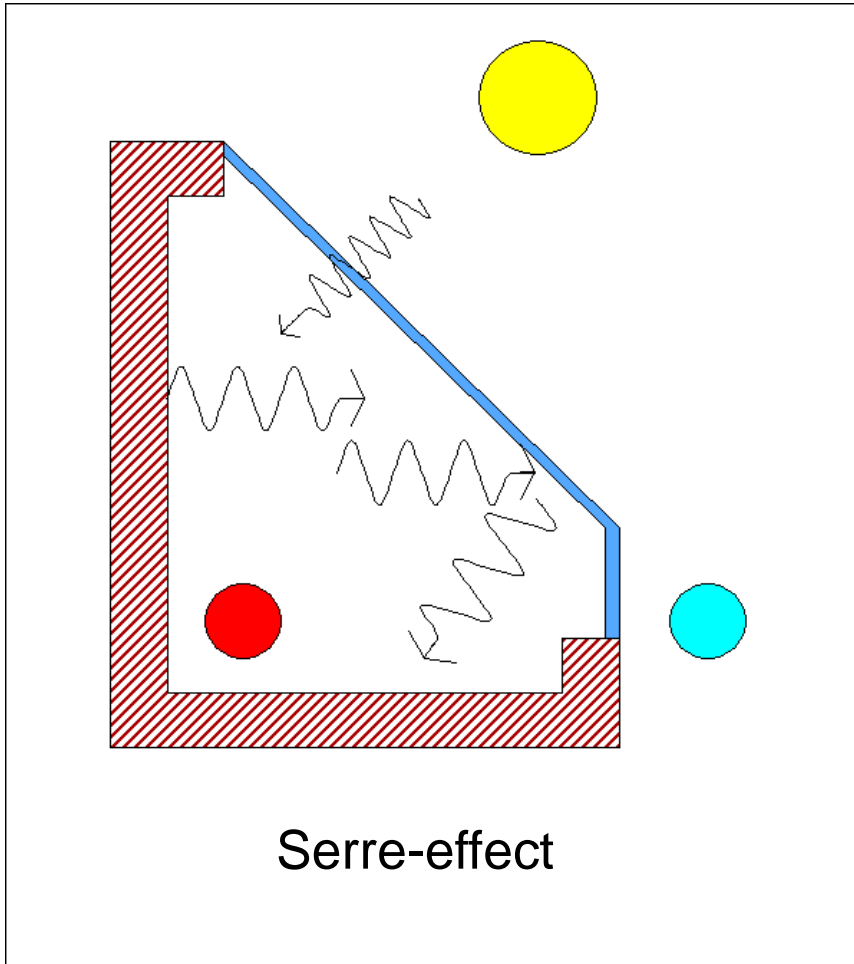
	$\alpha_k = \varepsilon_k$	$\rho_k$	$\tau_k$
klaar glas	0.1	0.1	0.8
opaak materiaal wit	0.3	0.7	0
opaak materiaal zwart	0.9	0.1	0

Stralingsemmissie door een oppervlak op lage temperatuur  
= **langgolvlige straling** of **infrarode straling**

	$\alpha_l = \varepsilon_l$	$\rho_l$	$\tau_l$
glas	0.9	0.1	0
meeste bouwmaterialen	0.9	0.1	0
gepolijst metaal	0.1	0.9	0

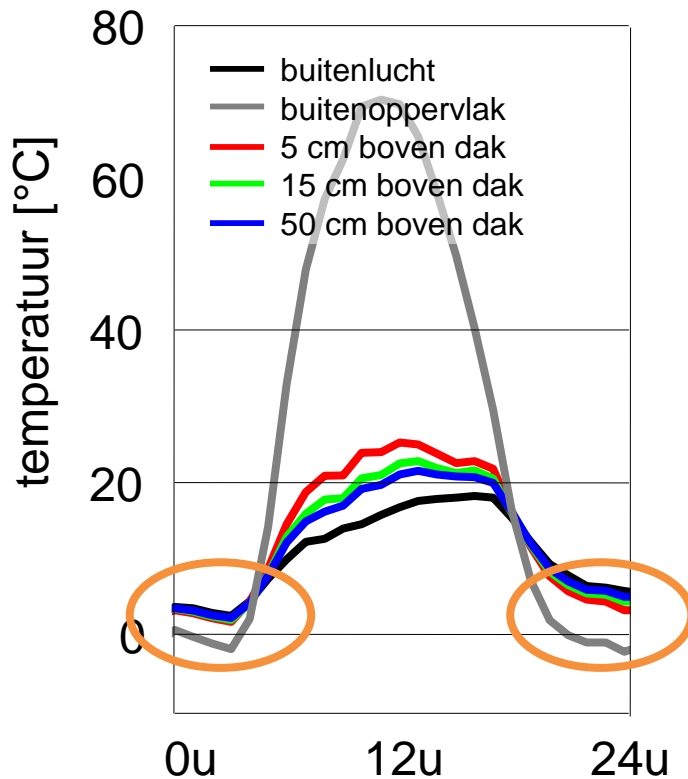


# Straling: illustraties

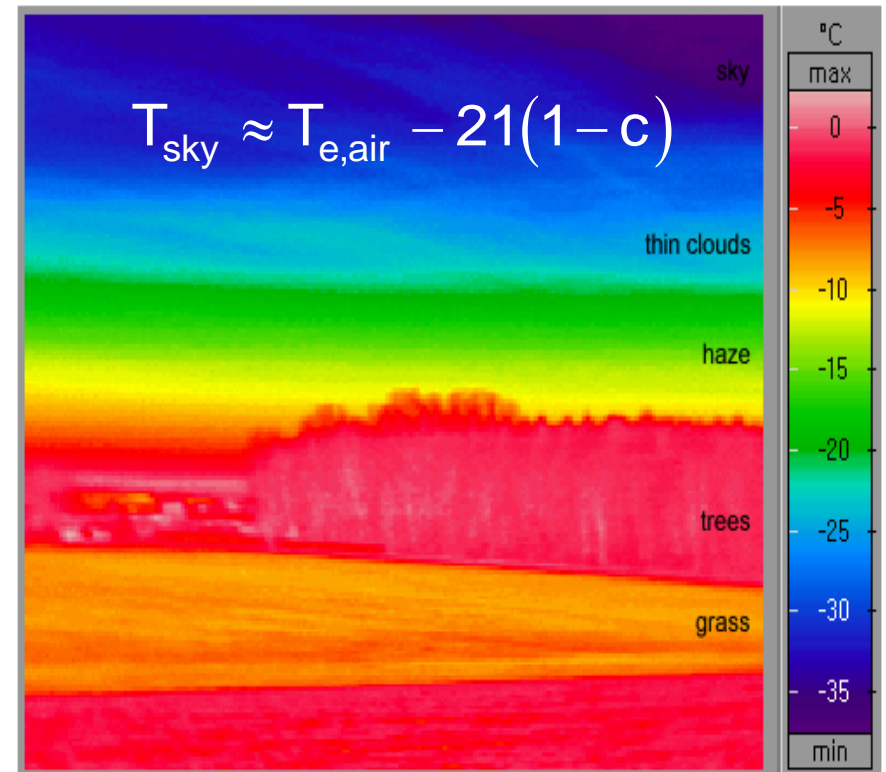


# Straling: illustraties

gemeten temperaturen op een dak, tijdens zomerdag:



‘onderkoeling’ tijdens nacht stemt van lage stralingstemperatuur van hemel





# Straling

Vergelijking voor stralingsuitwisseling tussen 2 vlakken

$$q_{ij} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{ij}} + \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j A_j}}$$

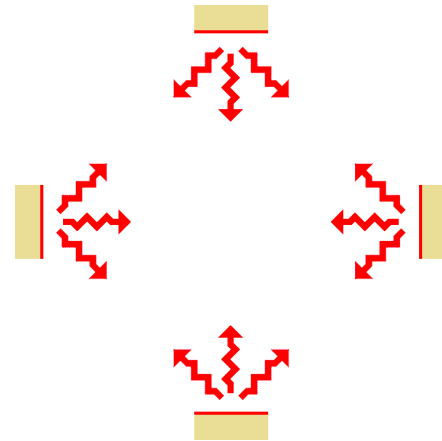
$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \vartheta_i \cos \vartheta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j$$

wet van Kirchoff  
radiation balance

$$\varepsilon = \alpha$$

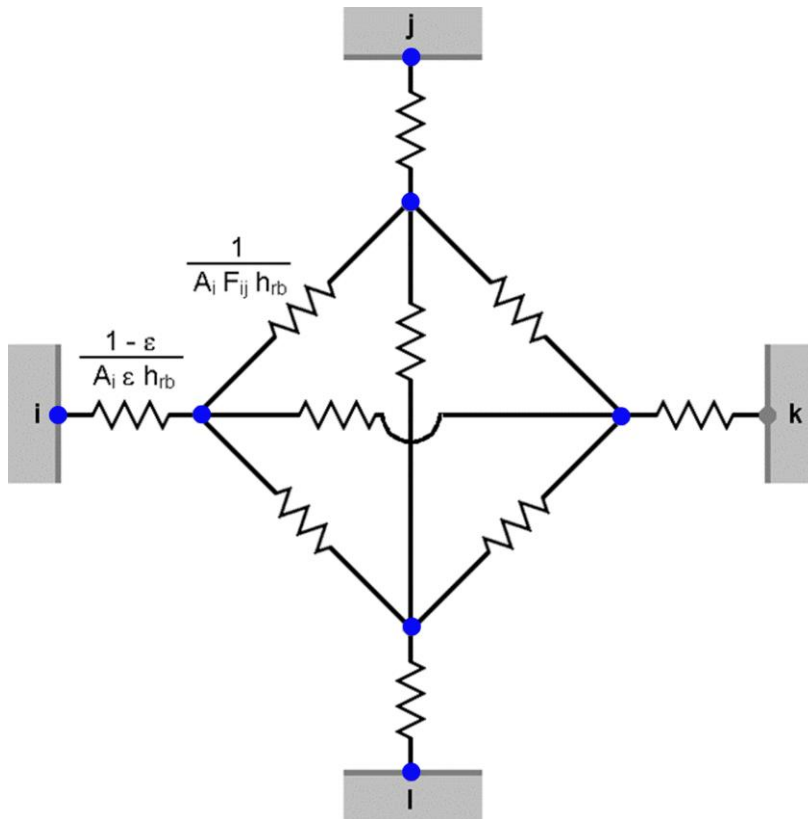
$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

q	stralingsflux [W/m <sup>2</sup> ]		
ε	emissiviteit van het oppervlak [-]		
σ	constante van Stefan-Boltzmann = 5.67 E-08 W/m <sup>2</sup> .K		
T	absolute temperatuur [K]		
A	oppervlakte [m <sup>2</sup> ]	F	hoekfactor [-]
i, j	indices oppervlakken	θ	hoek [rad]
R	afstand	α	absorptiefactor [-]
ρ	reflectiefactor [-]	τ	transmissiefactor [-]



# Stralingsweerstandennetwerk

De analogie elektriciteit – warmte kan men ook op straling toepassen. Het weerstanden-netwerk is wel wat complexer dan dat voor geleiding en convectie. Per deelopervlak dient een zogenaamde zwarte knoop te worden toegevoegd.



$$Q_i = q_i A_i = \frac{\theta_{sb} - \theta_s}{R_i}$$

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon}{A_i \varepsilon h_{rb}}$$

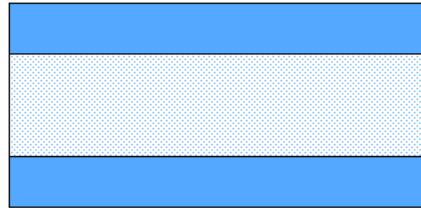
$$Q_{ij} = \frac{\theta_{sbi} - \theta_{sbj}}{R_{ij}}$$

$$R_{ij} = \frac{1}{A_i F_{ij} h_{rb}}$$

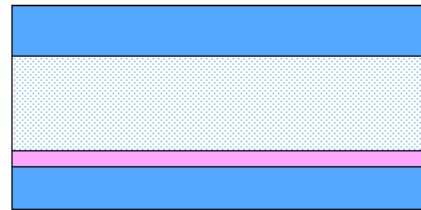
$$h_{rb} = \sigma \cdot (T_{sb}^2 + T_s^2) \cdot (T_{sb} + T_s)$$



# Straling: illustraties



Gewone  
dubbele beglazing



Verbeterde  
dubbele beglazing

# Straling normatief

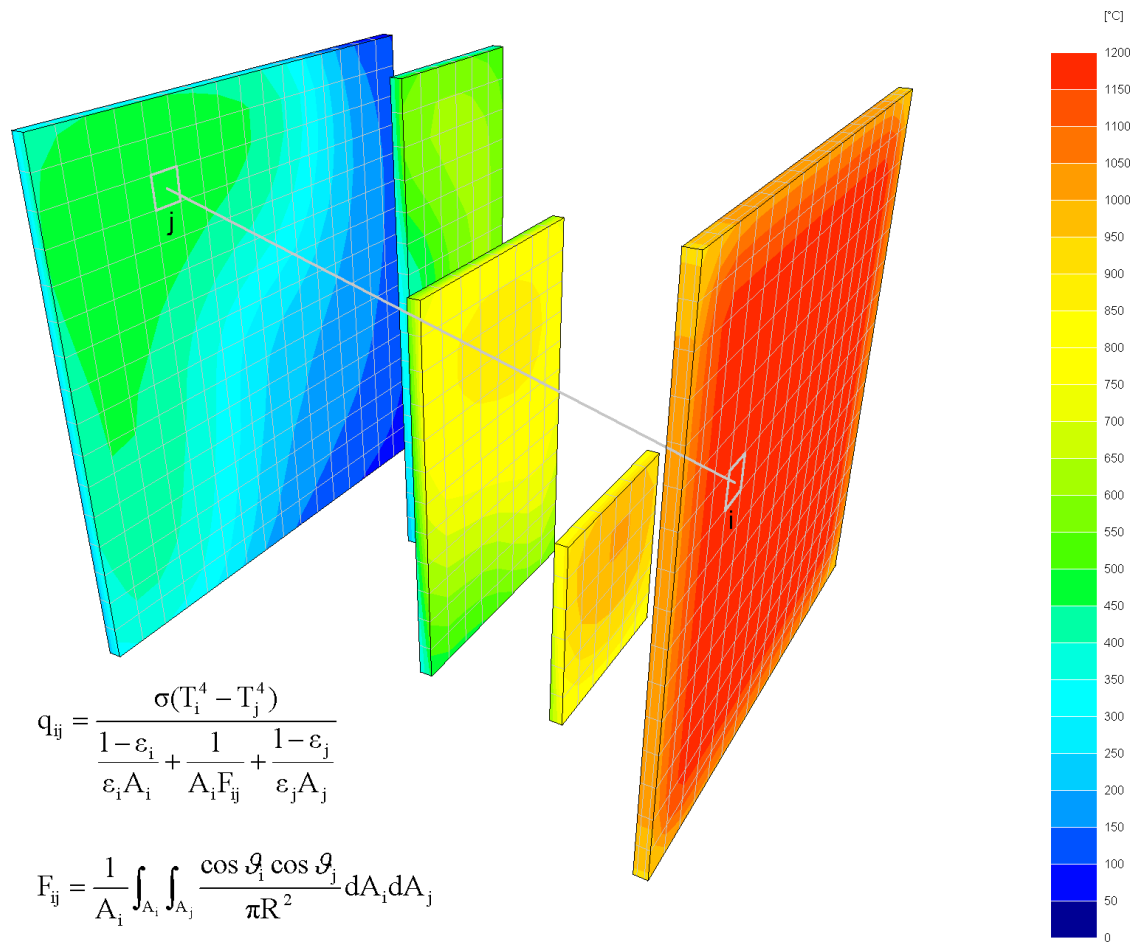
Handboeken en normen met

- $\alpha$  en  $\varepsilon$  waarden voor kortgolven en langgolven straling
- F-waarden voor typische configuraties van vlakken
- data zonstraling



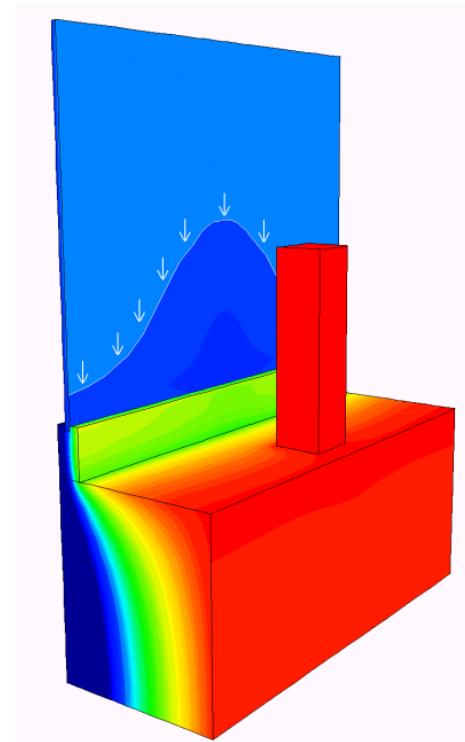
# Straling simulatie (RADCON module)

Geen vereenvoudigingen vereist ! Automatische berekening van de hoekfactoren  $F_{ij}$



# Straling simulatie (RADCON module)

De lage emissiviteit van koper veroorzaakt plaatselijk een lagere glasoppervlaktetemperatuur.



# Straling vereenvoudigd

$$q_r = h_r (\theta_r - \theta_s)$$

$$h_r = \varepsilon h_{rb} = 0.9 \times 5.8 = 5.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

voor binnen- en buitenoppervlakken

warmteoverg.coë voor zwarte $h_{rb}$ [W/m²K]		temperatuurverschil tussen de oppervlakken i en j $\Delta\theta_{ij}$ [°C]										
		0.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00	50.00
gemiddel temp. $\theta_m$ [°C]	-20.00	3.68	3.68	3.68	3.68	3.69	3.69	3.69	3.70	3.70	3.71	3.72
	-15.00	3.90	3.90	3.90	3.91	3.91	3.91	3.92	3.92	3.93	3.93	3.94
	-10.00	4.13	4.13	4.13	4.14	4.14	4.14	4.15	4.15	4.16	4.16	4.17
	-5.00	4.37	4.37	4.37	4.38	4.38	4.38	4.39	4.39	4.40	4.40	4.41
	0.00	4.62	4.62	4.62	4.63	4.63	4.63	4.64	4.64	4.65	4.65	4.66
	5.00	4.88	4.88	4.88	4.88	4.89	4.89	4.90	4.90	4.91	4.91	4.92
	10.00	5.15	5.15	5.15	5.15	5.16	5.16	5.16	5.17	5.17	5.18	5.19
	15.00	5.43	5.43	5.43	5.43	5.43	5.44	5.44	5.45	5.45	5.46	5.47
	20.00	5.71	5.71	5.72	5.72	5.72	5.72	5.73	5.73	5.74	5.75	5.76
	25.00	6.01	6.01	6.01	6.02	6.02	6.02	6.03	6.03	6.04	6.05	6.05
	30.00	6.32	6.32	6.32	6.32	6.33	6.33	6.33	6.34	6.35	6.35	6.36
	35.00	6.64	6.64	6.64	6.64	6.64	6.65	6.65	6.66	6.66	6.67	6.68
	40.00	6.96	6.97	6.97	6.97	6.97	6.98	6.98	6.99	6.99	7.00	7.01
45.00	7.30	7.30	7.31	7.31	7.31	7.32	7.32	7.33	7.33	7.34	7.35	
50.00	7.65	7.65	7.66	7.66	7.66	7.67	7.67	7.68	7.68	7.69	7.70	

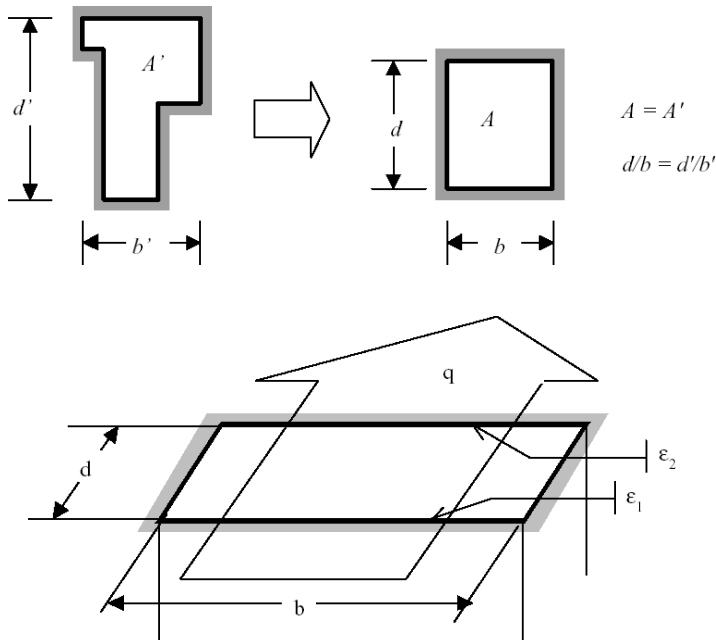
$$h_{rb} = \sigma(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j) = 4 \cdot T_m^3$$

voornamelijk afhankelijk van de gemiddelde temperatuur  
bijna onafhankelijk van het temperatuurverschil



# Straling vereenvoudigd

Voor spouwen:  
vereenvoudiging van de stralingsformules in EN ISO 10077-2 (methode 2)



The radiative part of the heat transfer coefficient is

$$h_r = 4\sigma \cdot T_m^3 \cdot \left( \frac{1}{E} + \frac{1}{F} - 1 \right)^{-1}$$

where

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$  is the Stefan-Boltzmann constant,

$E = \left( \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1}$  is the intersurface emittance and

$F = \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + (d/b)^2} - d/b \right)$  is the view factor for a rectangular section.

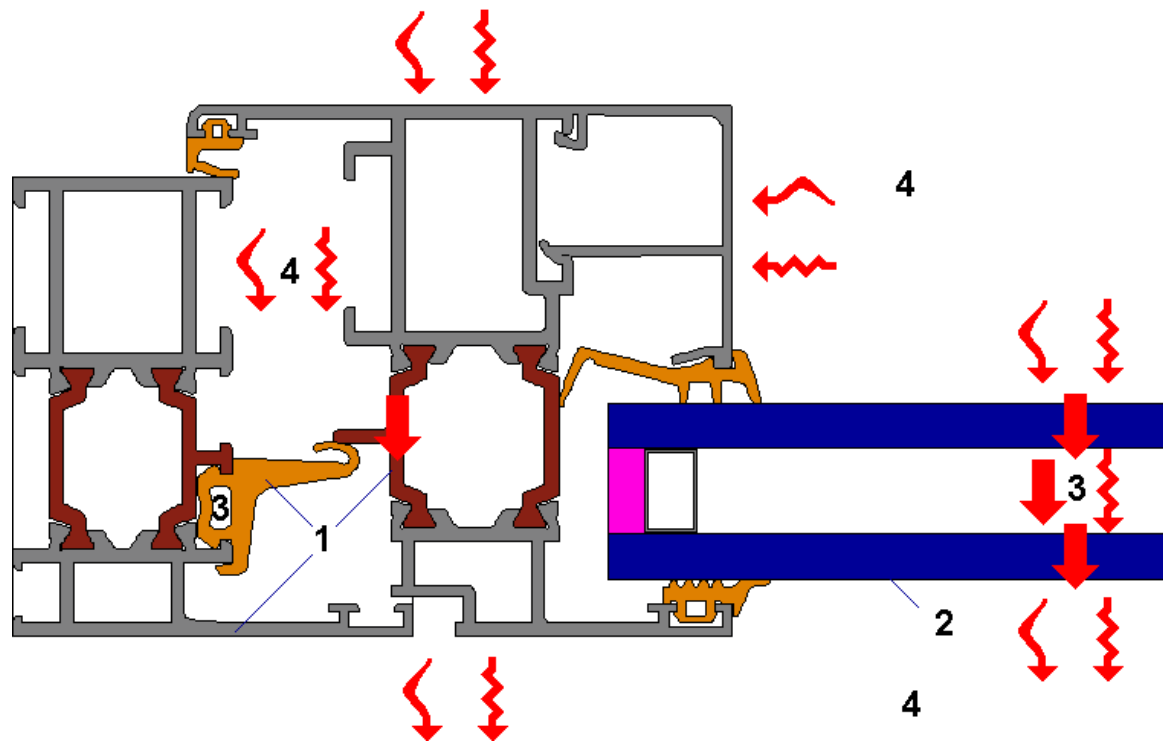
If no other information is available use  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,9$  and  $T_m = 283 \text{ K}$  for which

$$h_r = C_4 \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + (d/b)^2} - d/b \right) \text{ where } C_4 = 2,11 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$





# Warmteoverdracht in een raamprofiel

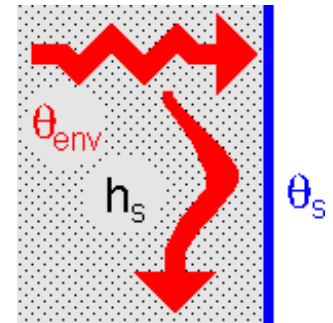


		GELEIDING	CONVECTIE	IR-STRALING	ZON-STRALING
1	Vaste stof opaak				
2	Vaste stof transparant				
3	Gas in rust				
4	Gas in beweging				

# Gecombineerde straling en convectie

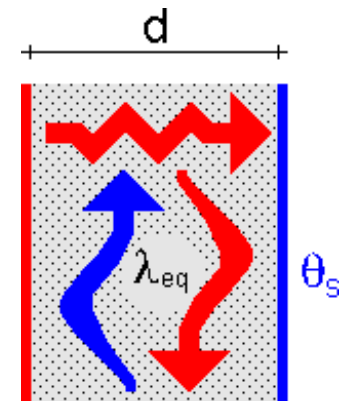
De simulatie van warmteoverdracht door convectie en straling tussen een omgeving en een oppervlak wordt vaak vereenvoudigd geformuleerd  $q = h_s (\theta_s - \theta_{env})$

$q$	warmteflux door convectie en straling [W/m <sup>2</sup> ]
$h_s$	<b>globale overgangscoefficiënt</b> [W/m <sup>2</sup> .K]
$\theta_s$	oppervlaktetemperatuur [K or °C]
$\theta_{env}$	<b>omgevings</b> temperatuur [K or °C]



Ook in luchtholtes wordt de warmteoverdracht door convectie en straling tussen de oppervlakken vaak vereenvoudigd via de geleidingsformule  $q = \lambda_{eq} \text{grad}\theta$

$q$	warmtegeleidingsvector [W/m <sup>2</sup> ]
$\lambda_{eq}$	<b>equivalente warmtegeleidingscoëfficiënt</b> [W/m.K]

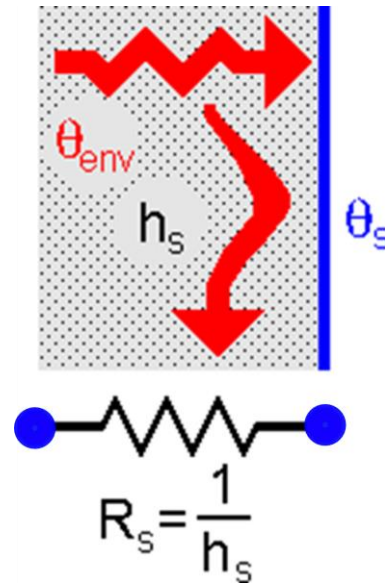


# Globale overgangsweerstand

De vergelijking  $q = h_s (\theta_s - \theta_{env})$  lijkt op de convectievergelijking. Terug geldt de analogie elektriciteit- warmte voor gecombineerde warmteoverdracht (convectie en straling).

$$q = \frac{\theta_s - \theta_{env}}{R_s}$$

$$R_s = \frac{1}{h_s}$$



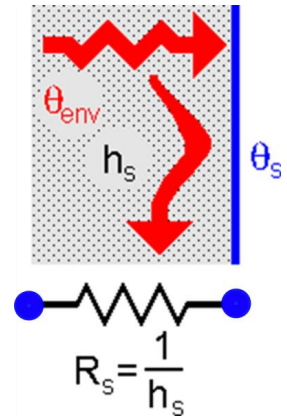
# Gecombineerde convectie en straling normatief

$h_s$  waarden voor **oppervlaktewarmteoverdracht**

$$q = h_s (\theta_s - \theta_{env})$$

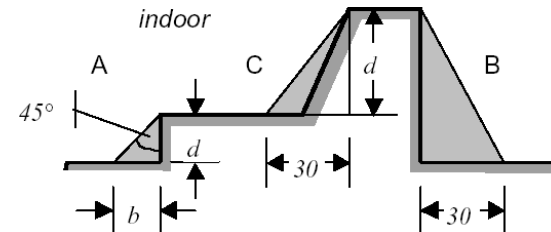
EN 6946 (algemeen)

	Direction of heat flow		
	Upwards	Horizontal	Downwards
$h_i$ [W/m <sup>2</sup> .K]	10	7.7	5.9
$h_e$ [W/m <sup>2</sup> .K]	25	25	25



EN ISO 10077-2 (raamprofielen, horizontale warmtestroom)

	Situation	
	Normal	In corners
$h_i$ [W/m <sup>2</sup> .K]	7.7	5.0
$h_e$ [W/m <sup>2</sup> .K]	25	25



EN ISO 10211 (koudebruggen)

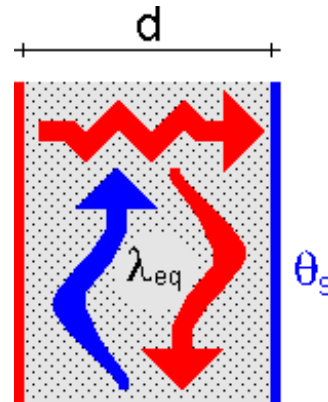
	Purpose		
	Heat flow	Surface temperature	
$h_i$ [W/m <sup>2</sup> .K]	7.7	Upper half of the room	4.0
		Lower half of the room	2.86
		Glazing	7.7
$h_e$ [W/m <sup>2</sup> .K]	25	25	



# Gecombineerde convectie en straling normatief

formules voor de equivalente  $\lambda$ -waarde van luchtholtes

$$q = \lambda_{eq} \text{grad}\theta$$



EN 6946 (algemeen)

EN ISO 10077-2:2017 (raamprofielen)

## Methode 1: radiosity method

Straling detail (radiosity)

Convectie via:  $\lambda_{equi} = \lambda_{air} \cdot Nu$

## Methode 2: equivalent thermal conductivity method

$$\lambda_{eq} = d(h_c + h_r)$$



# Gecombineerde convectie en straling normatief

tabel voor de warmteweerstand van **spouwen** EN 6946 (algemeen)

warmteweerstand van niet-geventileerde spouwen [m <sup>2</sup> K/W]			
spouwdikte [mm]	Richting van de warmtestroom		
	opwaarts	horizontaal	neerwaarts
0	0.00	0.00	0.00
5	0.11	0.11	0.11
7	0.13	0.13	0.13
10	0.15	0.15	0.15
15	0.16	0.17	0.17
25	0.16	0.18	0.19
50	0.16	0.18	0.21
100	0.16	0.18	0.22
300	0.16	0.18	0.23

opmerking 1: voor tussenliggende diktes lineaire interpolatie toepassen  
opmerking 2: horizontaal warmtetransport bij spouwen met een hoek van tot  $\pm 30^\circ$  met de horizontale



# Overzicht

## Les 1: warmtetransport

- Inleiding
- Theorie warmtetransport
- Afgeleide thermische eigenschappen:  $U$ ,  $\Psi$ ,  $X$
- Niet-stationair: bezonning

Les 2: warmte-, lucht- en vochttransport

Les 3: Bouwfysische evaluatie



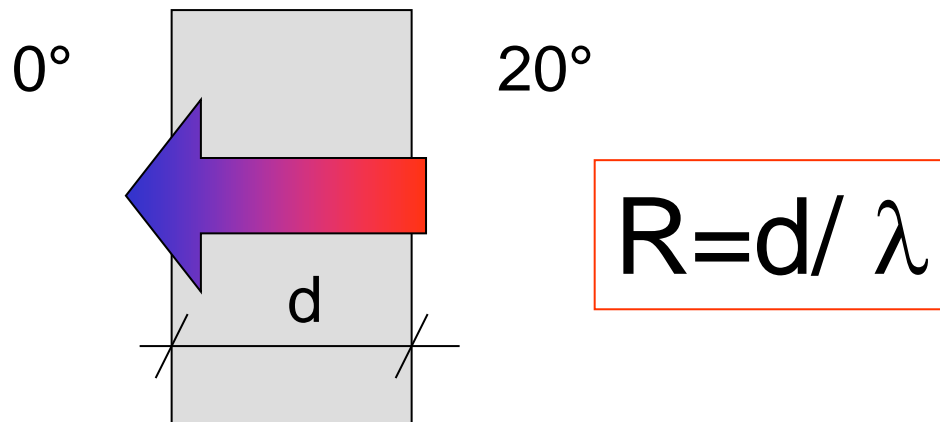
# Warmtetransmissiecoëfficiënt U

Voor een constructie tussen binnen- en buitenomgeving opgebouwd uit parallelle lagen kan men *1D warmtetransport* onderstellen.

→ Eenvoudigste geval: U-waarde met de hand te berekenen

warmteweerstand  $R$  ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

Geeft weer hoe een materiaal (enkelvoudige wand) 'weerstand' biedt tegen het doorgeven van warmte





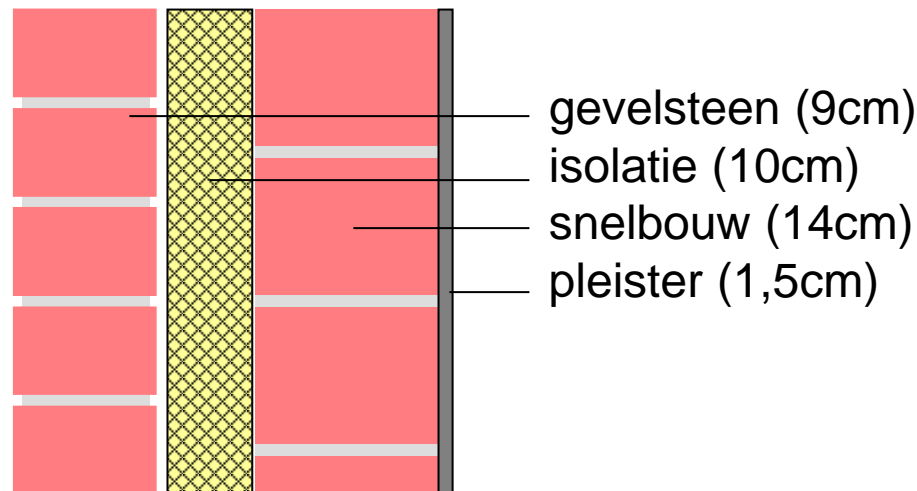
# Warmtetransmissiecoëfficiënt U

Voor een constructie tussen binnen- en buitenomgeving opgebouwd uit parallelle lagen kan men 1D warmtetransport onderstellen.

totale warmteweerstand  $R_T$  ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

$$R_T = \sum R_i$$

bv. spouwmuur



$$\begin{aligned} R_T &= 0.09/1.1 + 0.1/0.04 + 0.14/0.5 + 0.015/0.8 \\ &= 2.9 \text{ m}^2\text{K}/\text{W} \end{aligned}$$

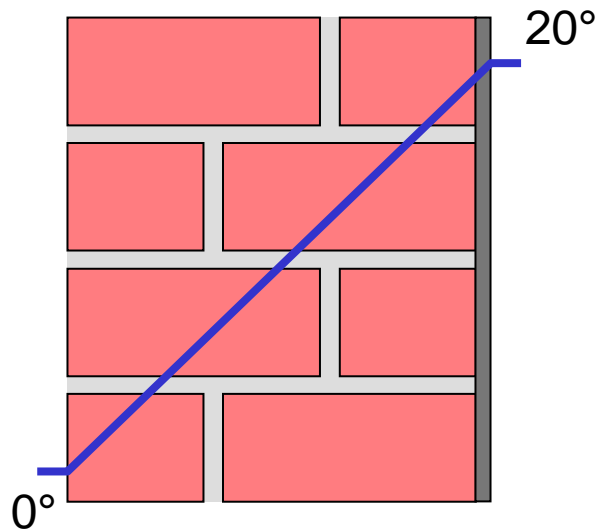


# Warmtetransmissiecoëfficiënt U

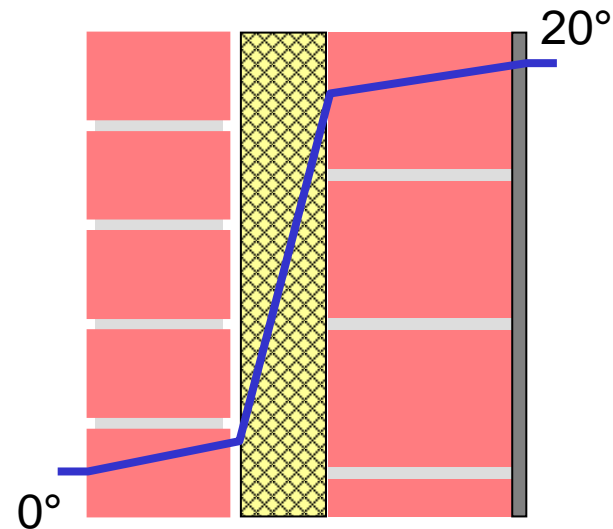
Voor een constructie tussen binnen- en buitenomgeving opgebouwd uit parallelle lagen kan men 1D warmtetransport onderstellen.

temperatuurverloop bij stationair warmtetransport

woning jaren 30



nieuwbouwwoning



$$q = \Delta T / R_T \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$R_T \approx 0.3 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_T \approx 2.9 \text{ m}^2\text{K/W}$$



# Warmtetransmissiecoëfficiënt U

Voor een constructie tussen binnen- en buitenomgeving opgebouwd uit parallelle lagen kan men 1D warmtetransport onderstellen. De warmteoverdracht van *binnenomgeving* naar *buitenomgeving* (door convectie, straling en geleiding)

$$q = \frac{\theta_i - \theta_e}{R_i + \sum_{j=1}^n R_j + R_e} = \frac{\theta_i - \theta_e}{1/h_i + \sum_{j=1}^n R_j + 1/h_e}$$

of  $q = U(\theta_i - \theta_e)$  met  $U = (1/h_i + \sum_{j=1}^n R_j + 1/h_e)^{-1}$

Deze laatste formule is de definitie van de **warmtetransmissiecoëfficiënt** of U-waarde van de constructie.

## U-waarde

De hoeveelheid warmte die per seconde door één vierkante meter dak, gevel of vloer gaat, bij een temperatuursverschil van 1°C tussen binnen en buiten



# Warmtetransmissiecoëfficiënt U

Voor een constructie tussen binnen- en buitenomgeving opgebouwd uit parallelle lagen kan men 1D warmtetransport onderstellen. De warmteoverdracht van binnenomgeving naar buitenomgeving (door convectie, straling en geleiding)

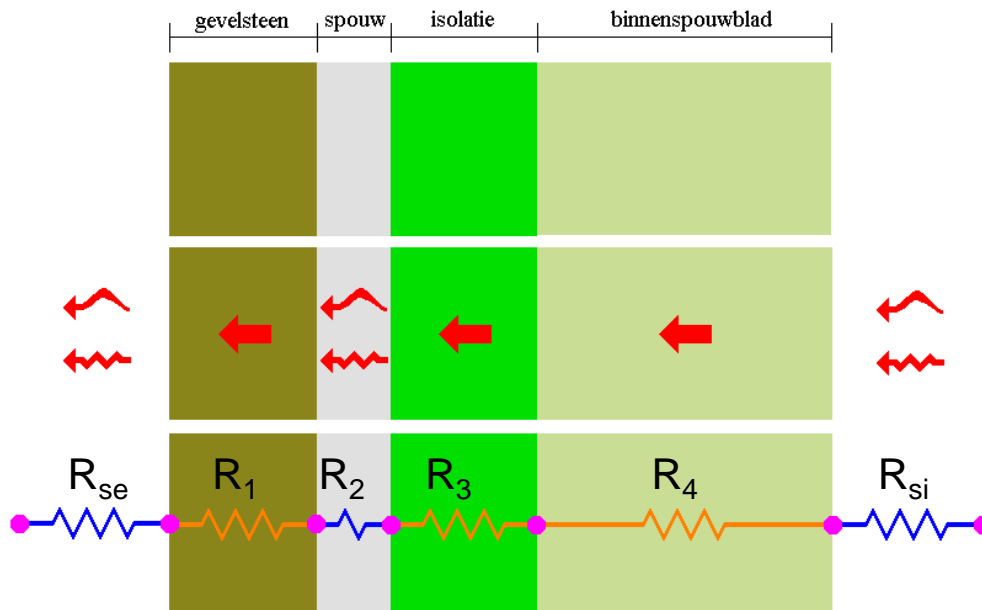
Het warmteverlies door transmissie van een gebouw door wanden, daken, vloeren etc. kan dan berekend worden op basis van kennis van de U-waardes:

$$Q = SU(\theta_i - \theta_e)$$



# Warmtetransmissiecoëfficiënt U

Voor een constructie tussen binnen- en buitenomgeving opgebouwd uit parallelle lagen kan men 1D warmtetransport onderstellen. De warmteoverdracht van *binnenomgeving* naar *buitenomgeving* (door convectie, straling en geleiding)



$$R_{\text{totaal}} = R_{\text{se}} + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_{\text{si}}$$

$$U = \frac{1}{R_{\text{totaal}}}$$

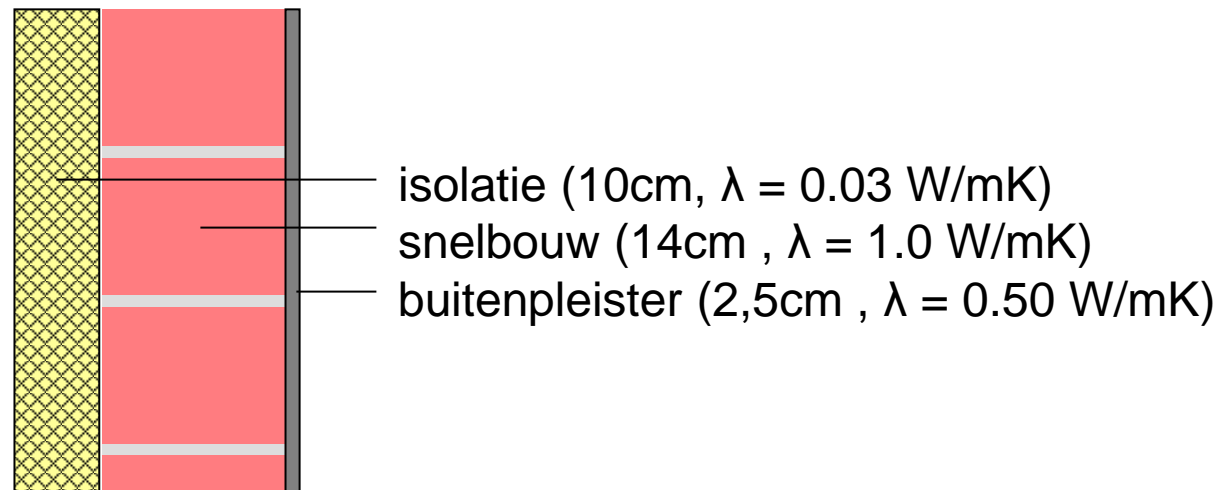


# Warmtetransmissiecoëfficiënt U

Rekenvoorbeeld

	Direction of heat flow		
	Upwards	Horizontal	Downwards
$h_i$ [W/m <sup>2</sup> .K]	10	7.7	5.9
$h_e$ [W/m <sup>2</sup> .K]	25	25	25

bv. Binnenisolatie (binnen 20°C, buiten -10°C)



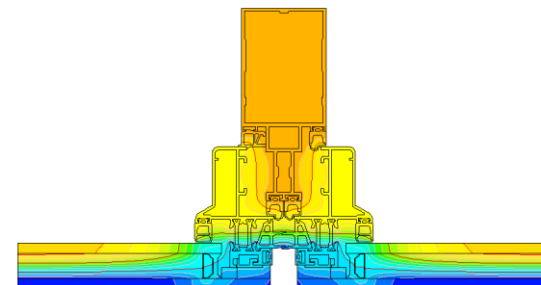
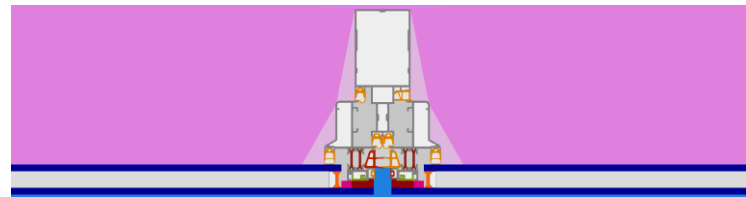
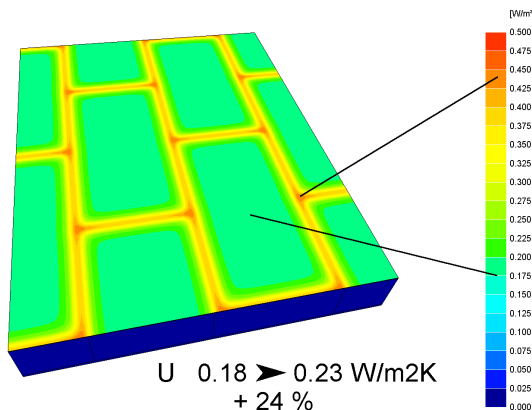
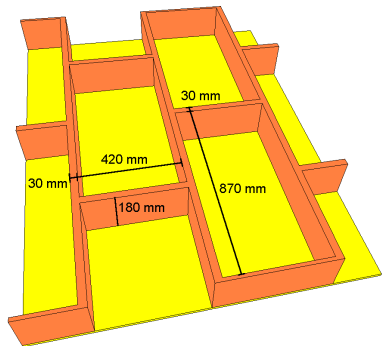
- 1) U-waarde met/zonder isolatie?
- 2) Oppervlakte temperatuur met/zonder isolatie?

# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Voor een constructie tussen binnen- en buitenomgeving opgebouwd uit parallelle lagen kan men 1D warmtetransport onderstellen.

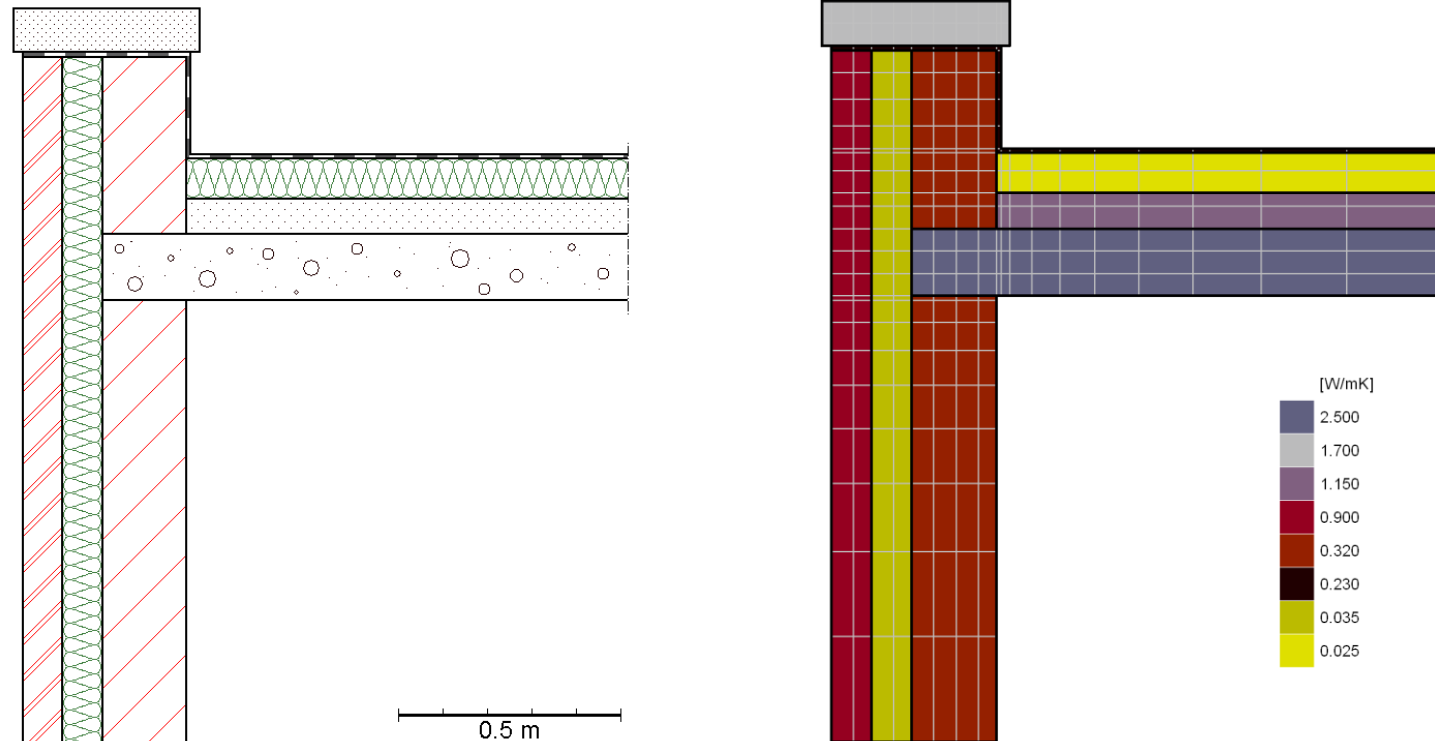
→ Eenvoudigste geval: U-waarde met de hand te berekenen

→ Complexere gevallen (2D/3D): enkel numeriek te berekenen



# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

→ Complexere gevallen (2D/3D): enkel numeriek te berekenen



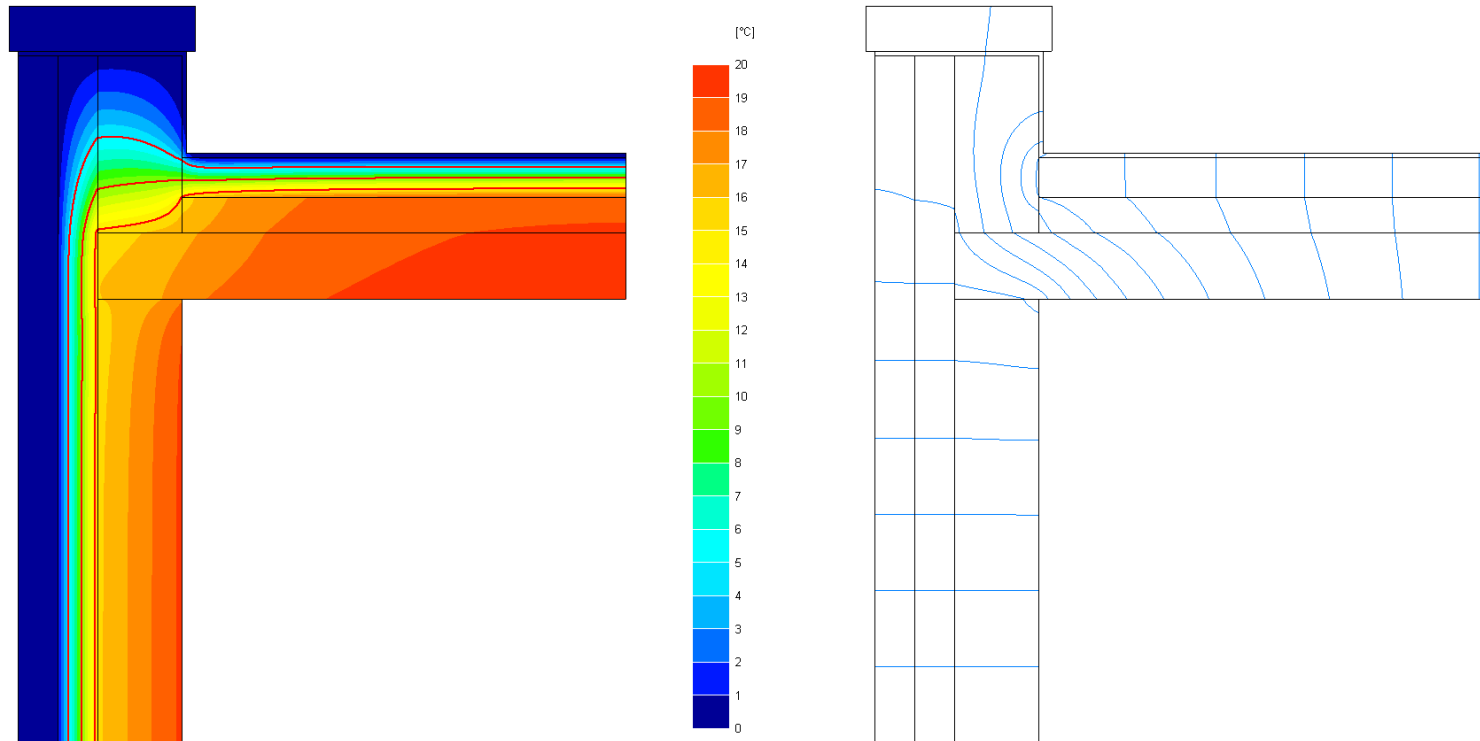
Een numerieke methode (eindige elementen) verdeelt de 2D/3D geometrie in delen (elementen) waarop de warmtetransportwetten worden toegepast. Dit is gelijkwaardig aan een netwerk van (warmte-)weerstand.<sup>57</sup>





# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

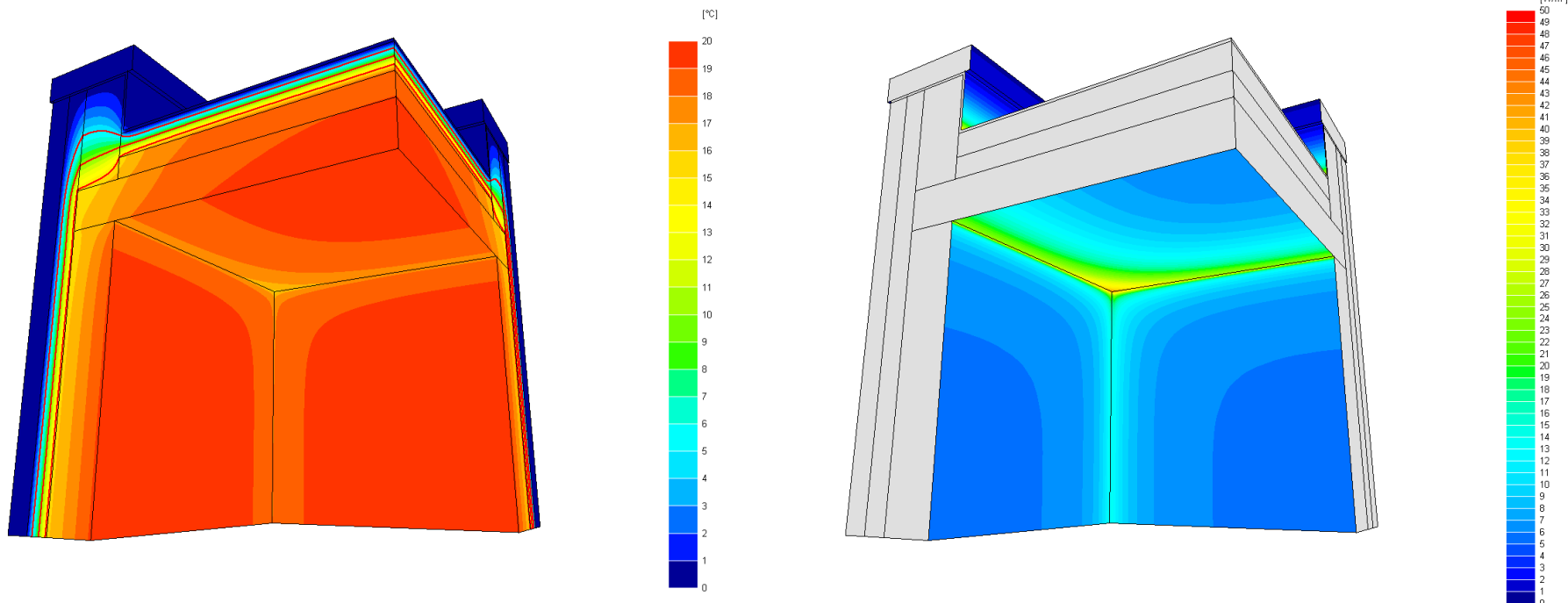
→ Complexere gevallen (2D/3D): enkel numeriek te berekenen



De numerieke methode levert het verloop van temperaturen (isothermen) en warmtestromen (2D warmtestroomlijnen).

# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

→ Complexere gevallen (2D/3D): enkel numeriek te berekenen



De numerieke methode levert het verloop van temperaturen (isothermen) en warmtestromen (3D warmtestroomdichtheden).

# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies*  $Q$  van complexe geometrie

→ Correcte *boekhouding* van warmteverlies  $Q$  in  $U$ ,  $\Psi$  en  $X$

Optie 1

En/of

Optie 2

Veralgemeende definitie van  $U$ -waarde waarin alle 2D/3D effecten vervat zitten

$$U = \frac{Q}{S(\theta_i - \theta_e)}$$

$U$ -waardes voor 1D

$\Psi$ -waardes voor 2D

$X$ -waardes voor 3D

$$H_t = \sum_i U_i S_i + \sum_j \Psi_j L_j + \sum_k \chi_k$$

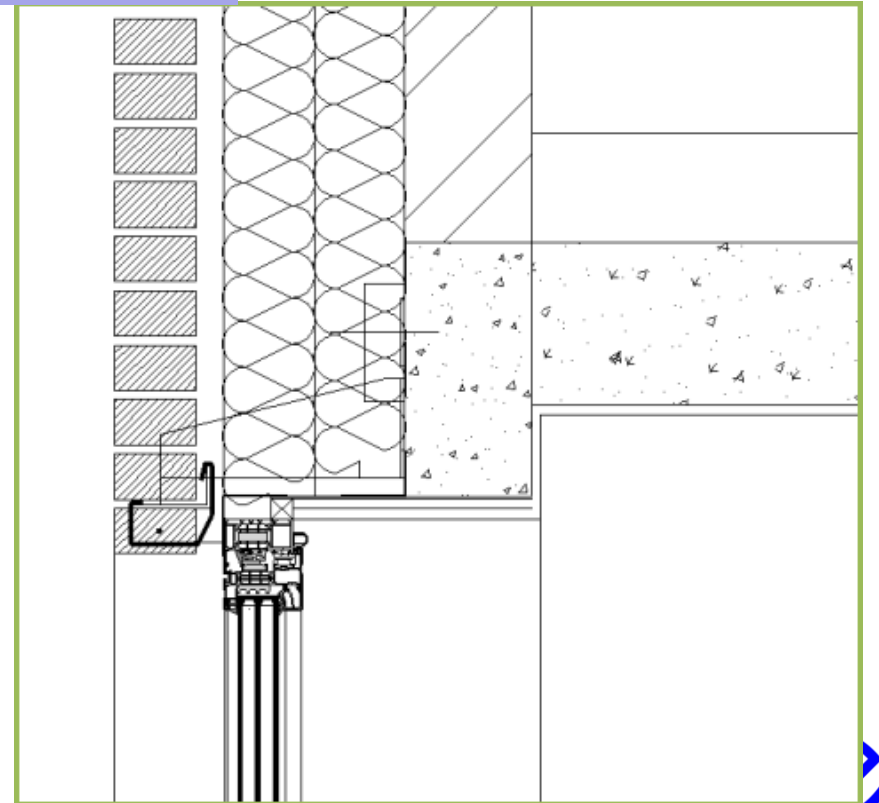
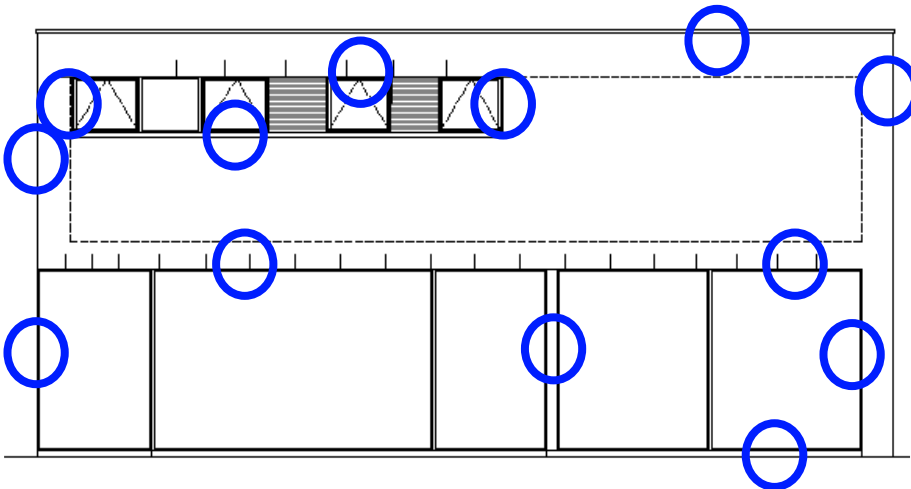


# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* van complexe geometrie

$$H_t = \sum_i U_i S_i + \sum_j \Psi_j L_j + \sum_k \chi_k$$



# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* van complexe geometrie

U equivalente warmtedoorgangscoefficiënt [W/m<sup>2</sup>K]

bv. Wand

ψ Lijnwarmtedoorgangscoefficiënt [W/mK]

bv. Aansluiting 2 constructiedelen

χ Puntwarmtedoorgangscoefficiënt [W/K]

bv. Mechanische bevestiging

$$H_t = \sum_i U_i S_i + \sum_j \Psi_j L_j + \sum_k \chi_k$$



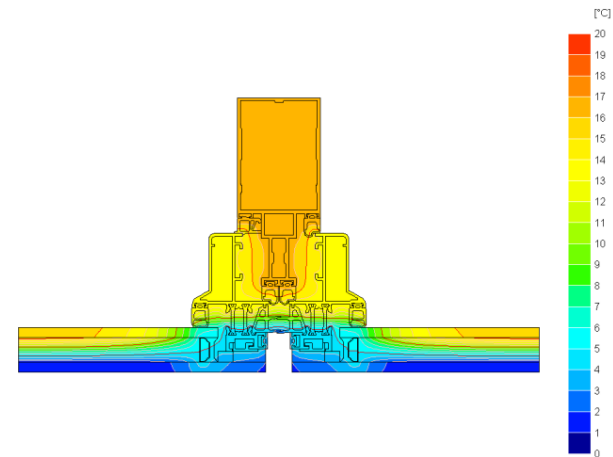
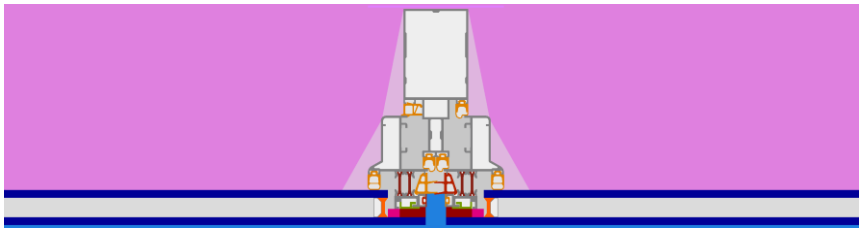
# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* van complexe geometrie

## Optie 1

Bv. 2D-berekening in BISCO geeft totaal warmteverlies  $Q_{2D}$  van 28.68 W/m (en breedte model  $w_{tot}$  0.667 m)



$$U_{eq} = Q / ((\theta_i - \theta_e) * w_{tot}) = 2.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$



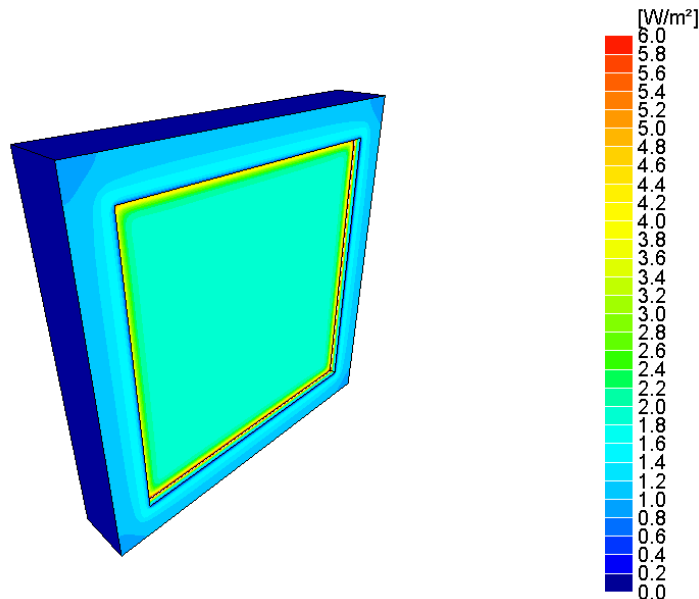
# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* van complexe geometrie

## Optie 1

Bv. 3D-berekening in TRISCO geeft totaal warmteverlies  $Q_{3D}$  van 41.0 W (en oppervlakte model  $S$  1 m<sup>2</sup>)



$$U_{\text{window}} = Q_{3D} / S (\theta_i - \theta_e) = L_{3D} / S$$

$$L_{3D} = 2.05 \text{ W}$$

$$S = 1 \text{ m}^2$$

$$U_{\text{window}} = 2.05 \text{ W/m}^2\text{K}$$



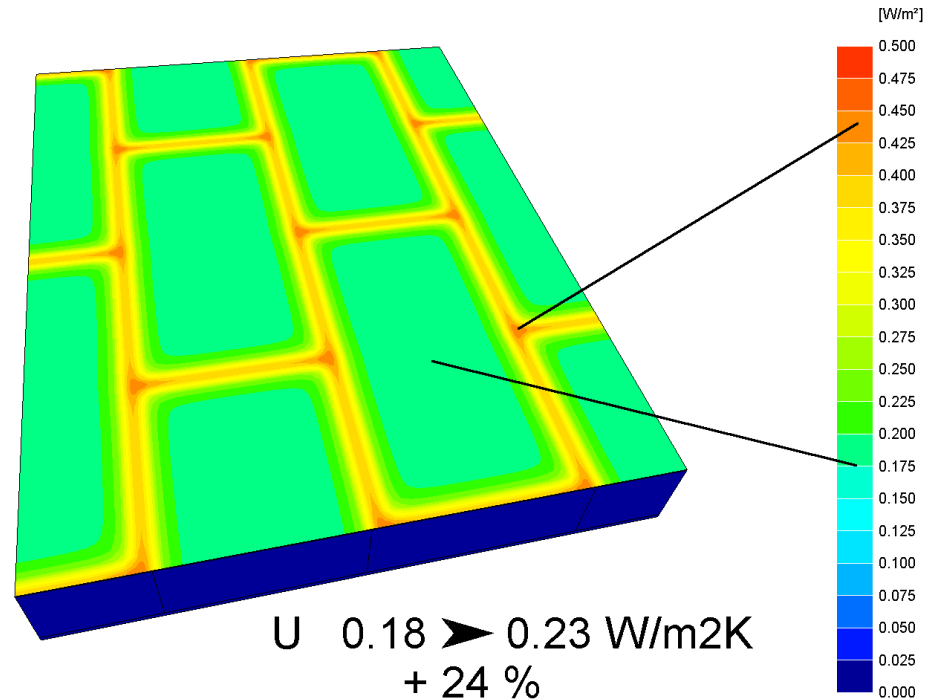
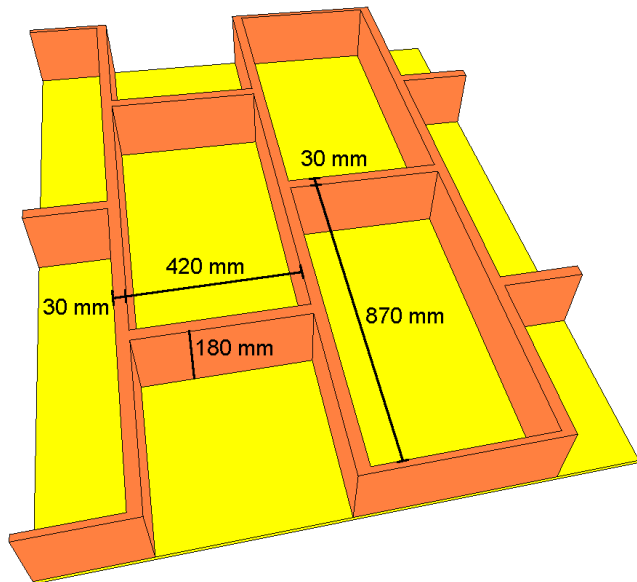
# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* van complexe geometrie

Optie 1

Bv.





# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* van complexe geometrie

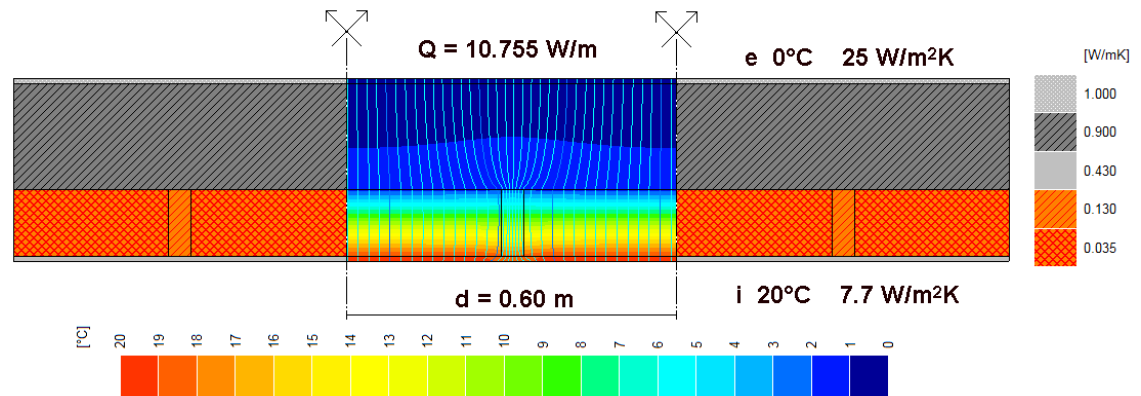
Optie 1

Bv.

Example

$$U = 3.585 / (0.6 \times 20) \text{ W/m}^2\text{K}$$
$$= 0.299 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{1D} = 0.260 \text{ W/m}^2\text{K}$$



# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* van complexe geometrie

## Optie 1

Bv. Gevel met buitenisolatie

$$U_0 = 0.296 \text{ W/m}^2\text{K}$$

### Gevelopbouw

- binnenpleister 20 mm
- volle baksteen 180 mm
- hard plastic 6 mm
- alu winkelhaak L 40/100/150 mm d = 3 mm
- stalen schroefbevestiging  $\varnothing$  10 mm
- alu profiel T 56/150 d = 3 mm
- thermische isolatie 100 mm
- spouw 20 mm
- bekledingspaneel 10 mm

$$U = 0.430 \text{ W/m}^2\text{K}$$

+ 45 %

beschouwde breedte

= 600 mm (h.o.h. afstand profielen)

beschouwde hoogte

= 1200 mm (h.o.h. afstand winkelhaken)



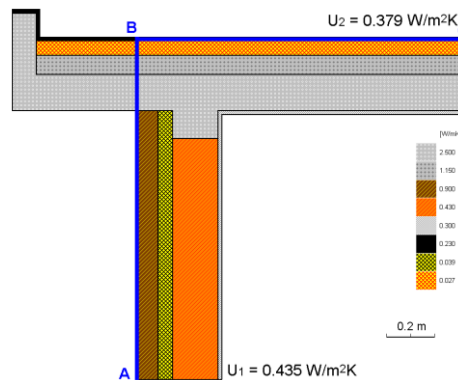
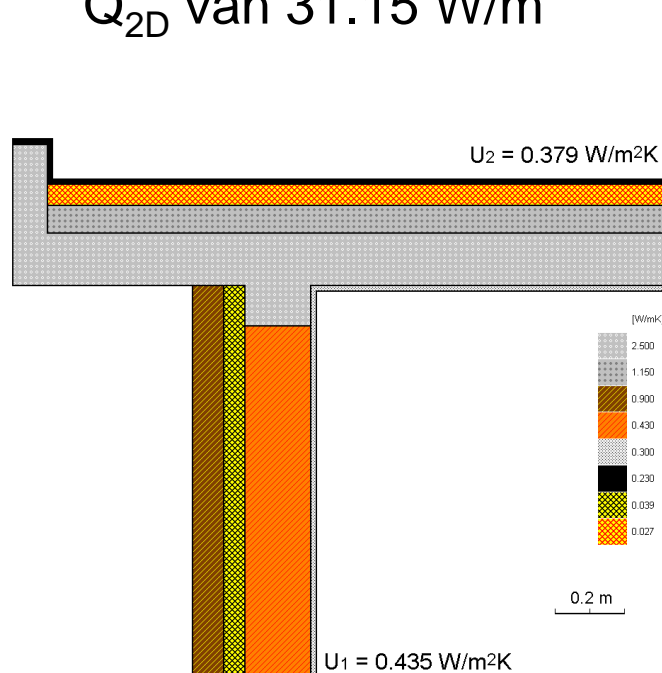
# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

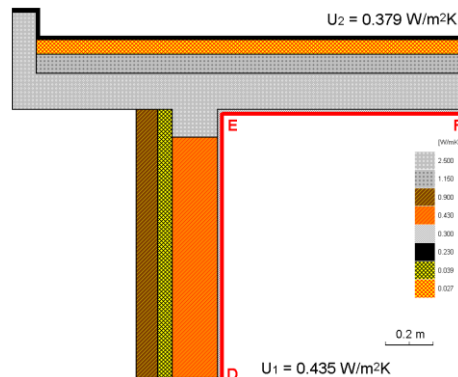
→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* van complexe geometrie

## Optie 2

Bv. Aansluiting plat dak, 2D-berekening in TRISCO geeft totaal warmteverlies  $Q_{2D}$  van 31.15 W/m



$$\psi_e = \frac{Q_{2D}}{\Delta\theta_{ie}} - U_1 AB - U_2 BC = 0.43 \text{ W/mK}$$



$$\psi_i = \frac{Q_{2D}}{\Delta\theta_{ie}} - U_1 DE - U_2 EF = 0.70 \text{ W/mK}$$



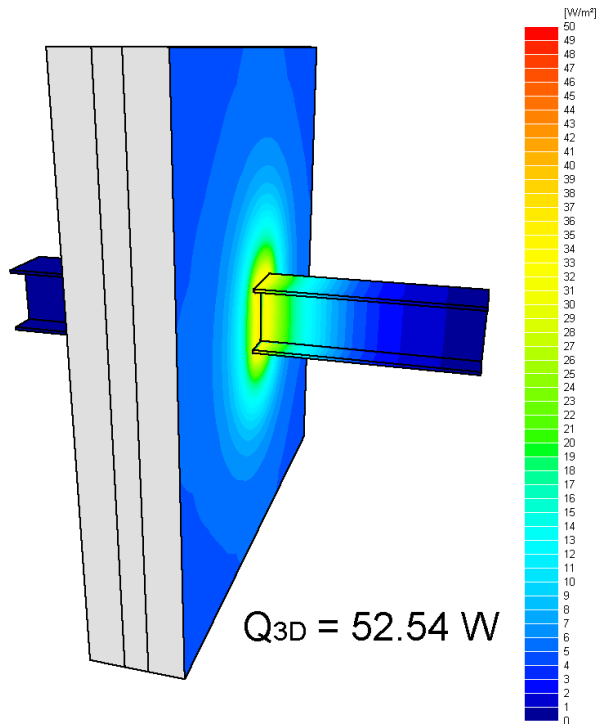
# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* van complexe geometrie

## Optie 2

Bv. Uitkragend profiel, 3D-berekening in TRISCO geeft totaal warmteverlies  $Q_{3D}$  van 52.54 W



$$\chi = \frac{Q_{3D}}{\Delta\theta_{ie}} - US = \frac{52.54}{20} - 0.233 \times 5.26 W/K = 1.40 W/K$$

# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies*  $Q$  van complexe geometrie

→ Correcte *boekhouding* van warmteverlies  $Q$  in  $U$ ,  $\Psi$  en  $X$

Optie 1

En/of

Optie 2

Wanneer welke optie? Typisch gedefinieerd in de relevante norm

- EN ISO 10077-2 voor raamprofielen
- EN ISO 12631 voor lichte gevels
- EN 1873 voor dakkoepels

...



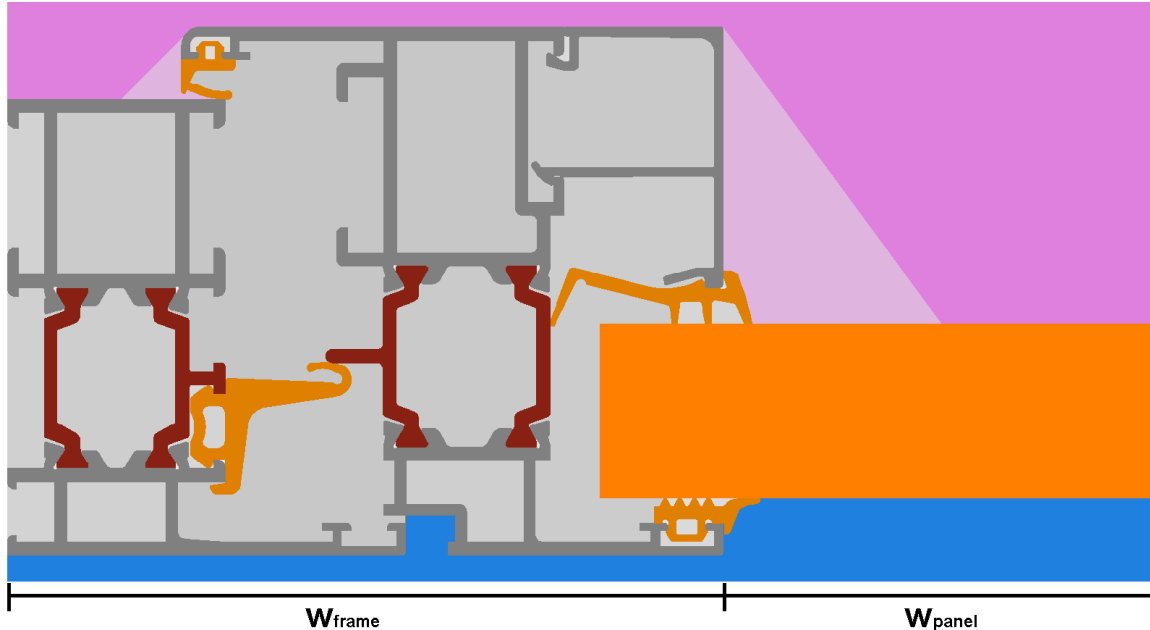
# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* Q van complexe geometrie

Bv. EN 10077-2 voor raamprofielen

Berekening  $U_f$ -waarde van het profiel



$$U = \frac{\frac{Q}{\theta_i - \theta_e} - U_{panel} W_{panel}}{W_{frame}}$$



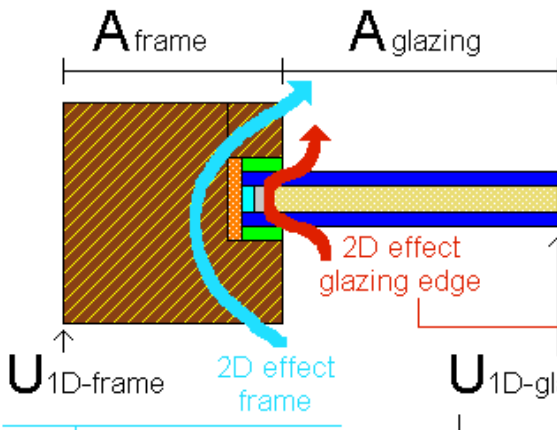
# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* Q van complexe geometrie

Bv. EN 10077-2 voor raamprofielen

Berekening  $\Psi$ -waarde van de afstandshouder van het glas



The diagram illustrates a window cross-section. On the left is a brown hatched wall with a blue arrow indicating heat flow. A window frame is shown with a blue arrow labeled '2D effect frame' pointing to it. The frame area is labeled  $A_{\text{frame}}$ . To the right is the glazing unit, with a red arrow labeled '2D effect glazing edge' pointing to its edge. The glazing area is labeled  $A_{\text{glazing}}$ . Below the frame, the 1D thermal transmittance is labeled  $U_{1D\text{-frame}}$ . Below the glazing, the 1D thermal transmittance is labeled  $U_{1D\text{-glazing}}$ . Below the diagram is the equation for the overall window thermal transmittance  $U_{\text{window}}$ .

$$U_{\text{window}} = \frac{U_{\text{frame}} \times A_{\text{frame}} + U_{\text{glazing}} \times A_{\text{glazing}} + \psi \times l}{A_{\text{frame}} + A_{\text{glazing}}}$$



# Warmtetransmissiecoëfficiënt 2D/3D

Complexere gevallen: enkel numeriek te berekenen

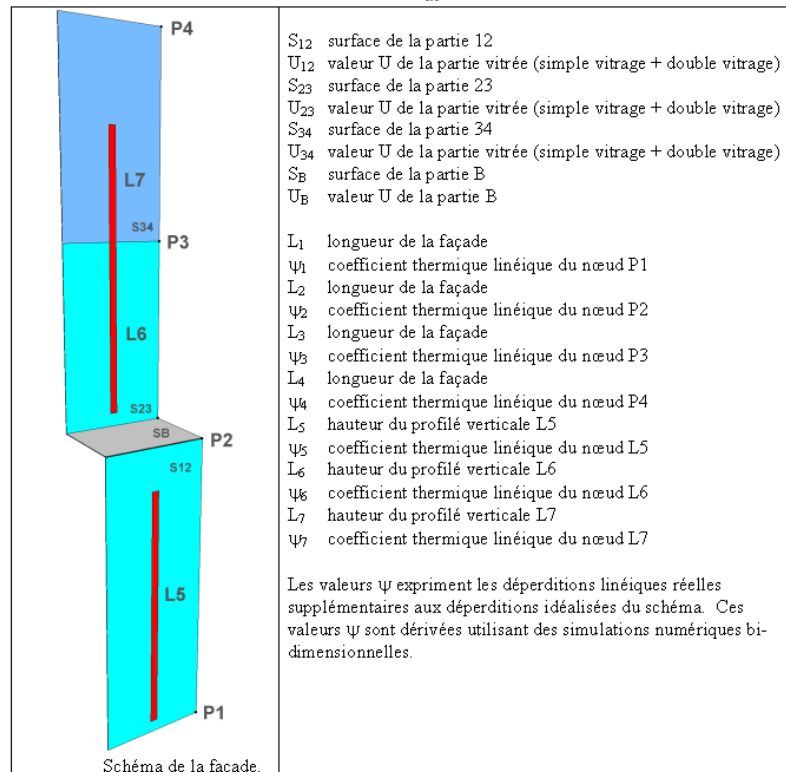
→ Numerieke berekening van het *warmteverlies* Q van complexe geometrie

→ Correcte *boekhouding* van warmteverlies Q in U,  $\Psi$  en X

→ Kan complex worden, belangrijk is consequent te zijn (ook naar dimensies!)



$$U_{\text{façade}} = \frac{S_{12}U_{12} + S_{23}U_{23} + S_{34}U_{34} + S_B U_B + L_1\Psi_1 + L_2\Psi_2 + L_3\Psi_3 + L_4\Psi_4 + L_5\Psi_5 + L_6\Psi_6 + L_7\Psi_7}{S_{\text{tot}}}$$





# Overzicht

## Les 1: warmtetransport

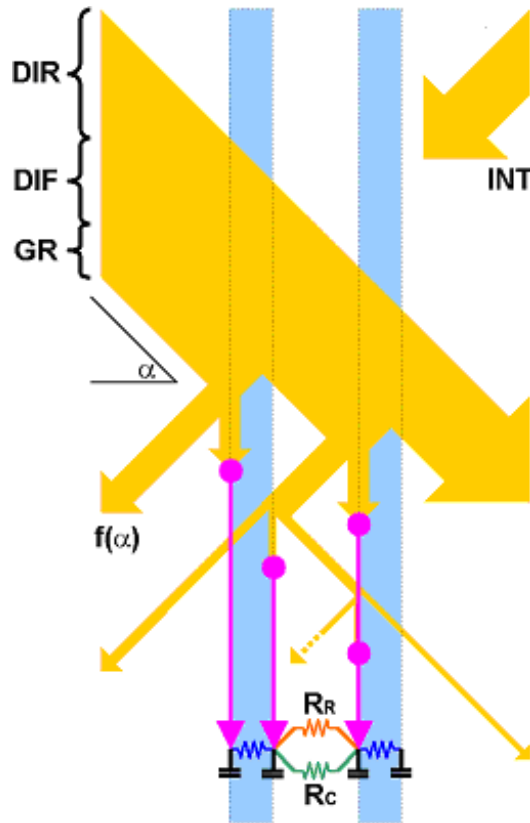
- Inleiding
- Theorie warmtetransport
- Afgeleide thermische eigenschappen:  $U$ ,  $\Psi$ ,  $X$
- **Niet-stationair: bezonning**

Les 2: warmte-, lucht- en vochttransport

Les 3: Bouwfysische evaluatie



# Zonstraling



Zonstraling wordt door de materialen deels gereflecteerd, getransmitteerd en geabsorbeerd. De lokale absorpties van zonstraling kunnen als warmtebronnen worden beschouwd.

Bij de thermische simulatie van schrijnwerk volgens EN ISO 10077-2 gaat men uit van een **zon-loze** situatie (representatief voor warmteverliezen).

Bij de simulatie van glasbreuk, dubbele gevels, oververhitting, passieve zon-energie speelt zonstraling een essentiële rol.

# Straling: praktisch

Absorptiefactor (=emissiefactor), reflectiefactor en transmissiefactor zijn golflengte-afhankelijk. Praktisch volstaat het om 2 golflengtegebieden te beschouwen, kortgolvlige straling (zonstraling) en langgolvlige straling (infrarode straling), elk met specifieke waarden voor  $\alpha=\varepsilon$ ,  $\rho$  en  $\tau$ .

Stralingsemmissie door een oppervlak op hoge temperatuur  
= kortgolvlige straling, praktisch zonstraling

	$\alpha_k = \varepsilon_k$	$\rho_k$	$\tau_k$
klaar glas	0.1	0.1	0.8
opaak materiaal wit	0.3	0.7	0
opaak materiaal zwart	0.9	0.1	0

Stralingsemmissie door een oppervlak op lage temperatuur  
= langgolvlige straling of infrarode straling

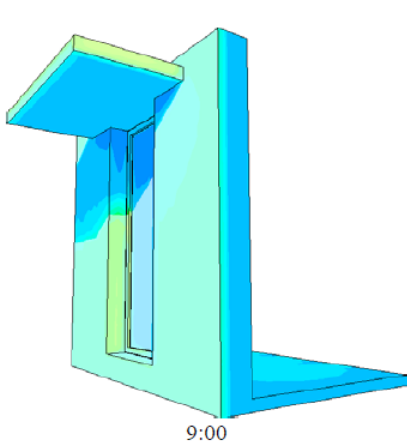
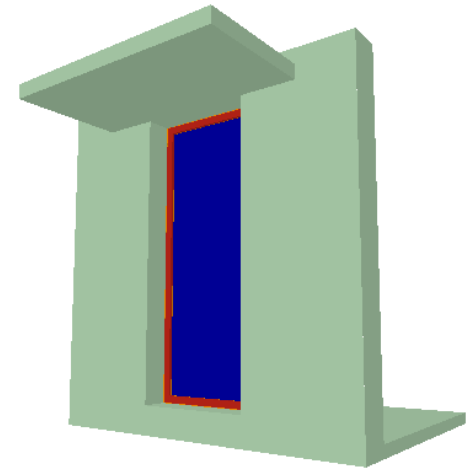
	$\alpha_l = \varepsilon_l$	$\rho_l$	$\tau_l$
glas	0.9	0.1	0
meeste bouwmaterialen	0.9	0.1	0
gepolijst metaal	0.1	0.9	0



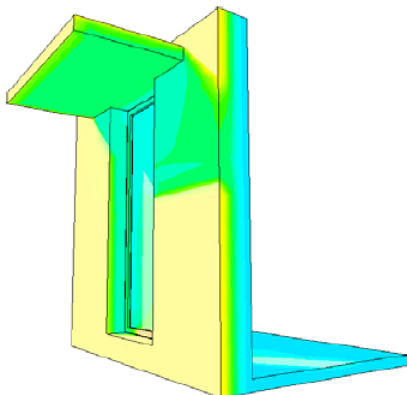
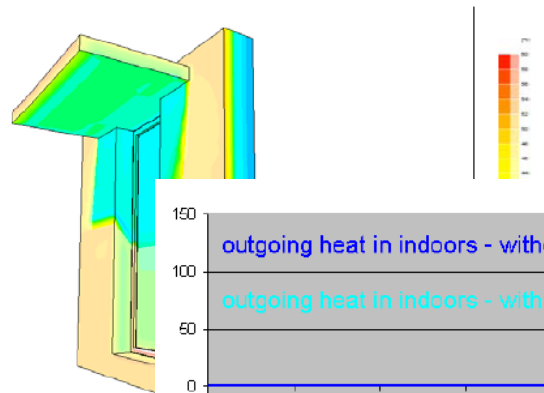
# Berekening niet-stationair

Niet-stationaire berekening warmtetransport:

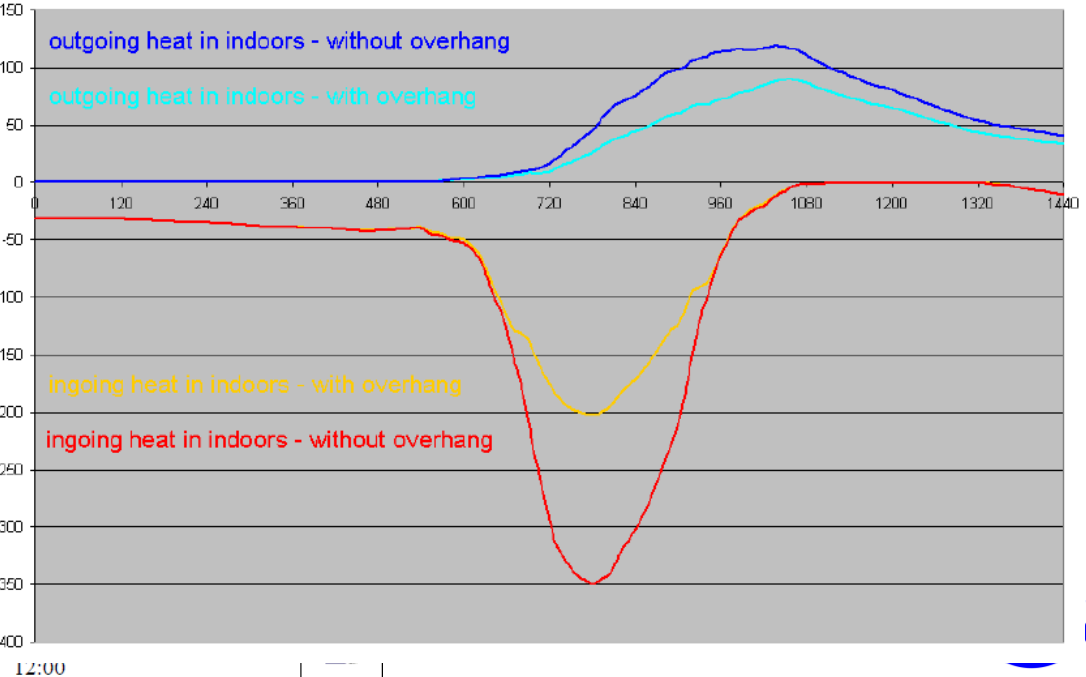
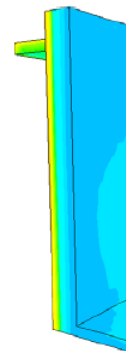
- Tijdsfactor
- Rekening houden bezonning
- Rekening houden warmtecapaciteit van materialen



9:00



15:00



12:00

# Berekening niet-stationair

Niet-stationaire berekening warmtetransport:

- Tijdsfactor
- Rekening houden bezonning
- Rekening houden warmtecapaciteit van materialen



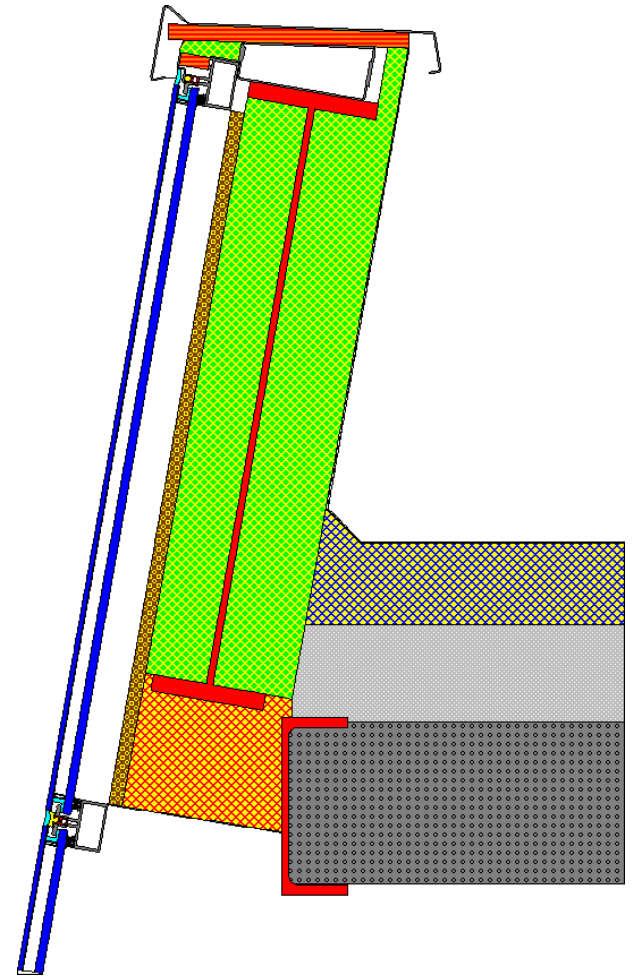
- removable roof
- box double glazing
- box wall (material)
- copper box (color)
- copper plate
- datalogger space



Verloop 1 dag

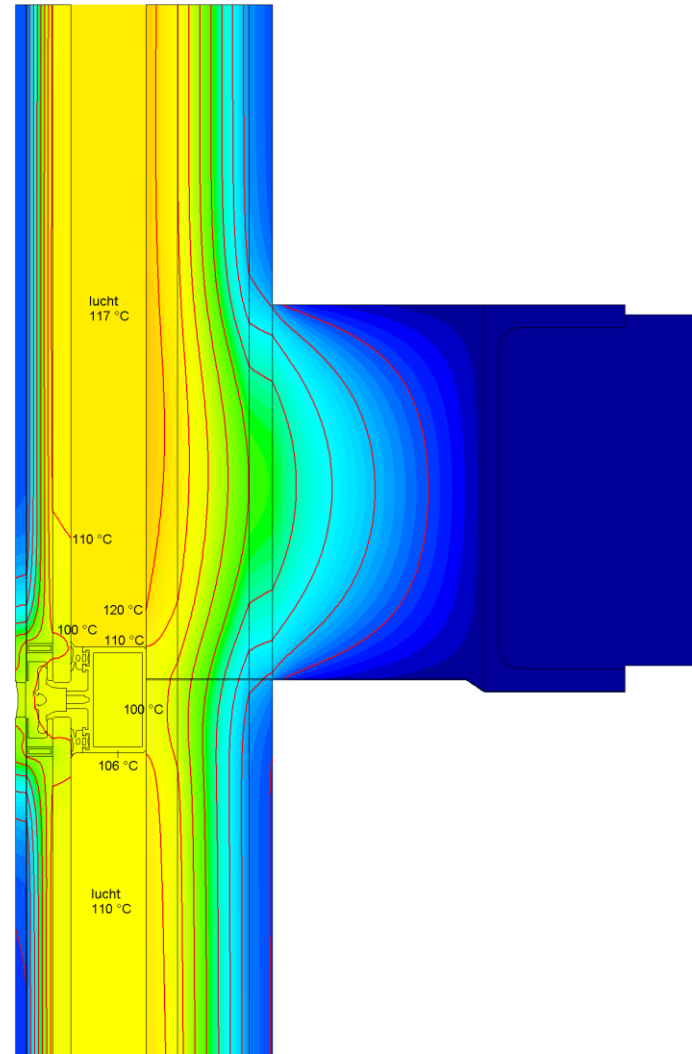


# Toepassing 1: oververhitting



# Toepassing 1: oververhitting

Temperatuurverloop in de gevel, zomermiddag



# Toepassing 1: oververhitting





# Toepassing 2: oververhitting

west orientation, Paris, 8 September



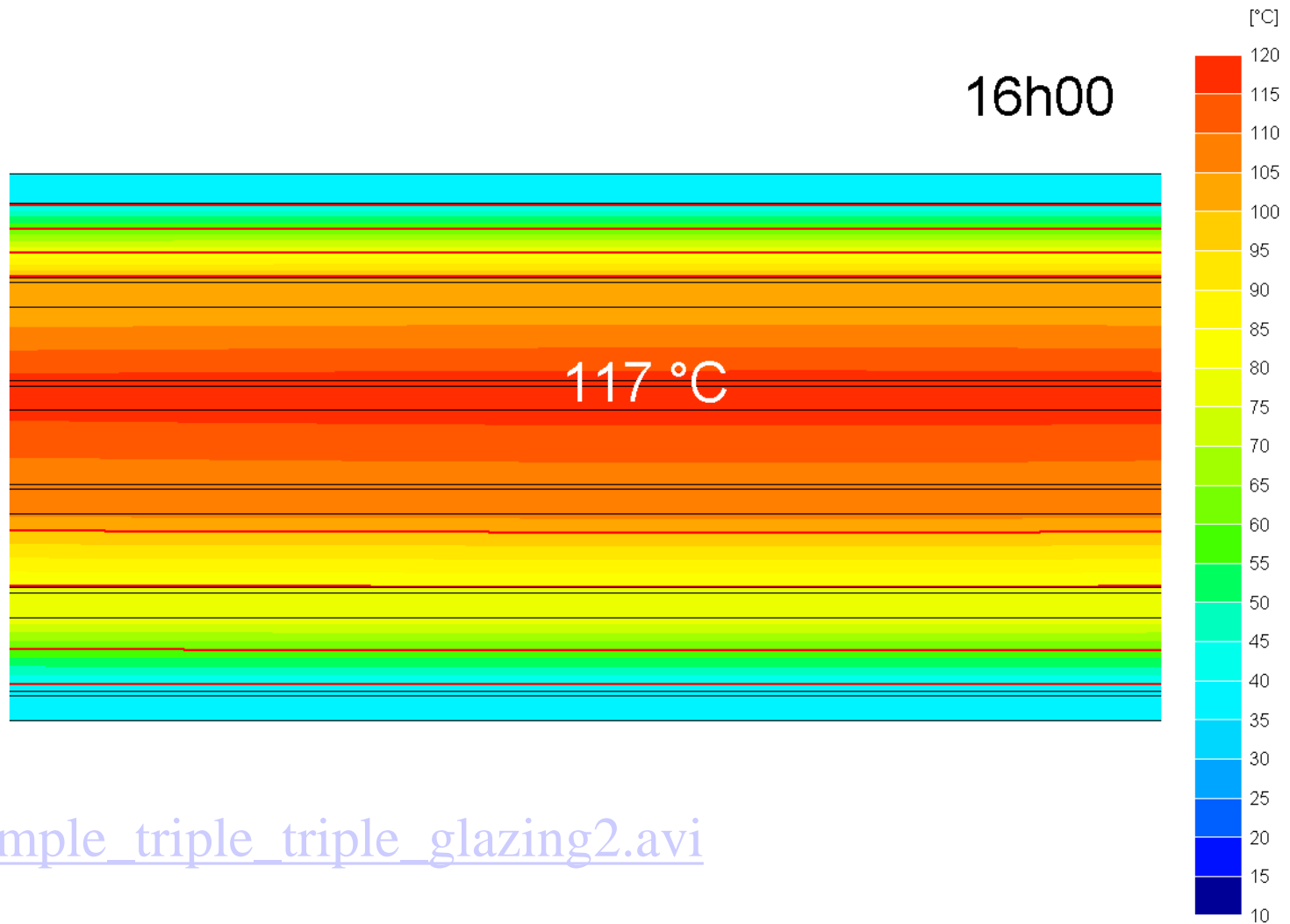
■ glas  $\lambda = 1 \text{ W/mK}$        $\alpha_s = 0.14$       indoors  $25 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $\rho = 2500 \text{ W/mK}$        $\tau_s = 0.79$   
 $c = 750 \text{ J/kgK}$        $\rho_s = 0.07$

■ coating  $\varepsilon = 0.03$

■ argon  $\lambda = 0.17 \text{ W/mK}$   
 $\rho = 1.7 \text{ W/mK}$   
 $c = 519 \text{ J/kgK}$



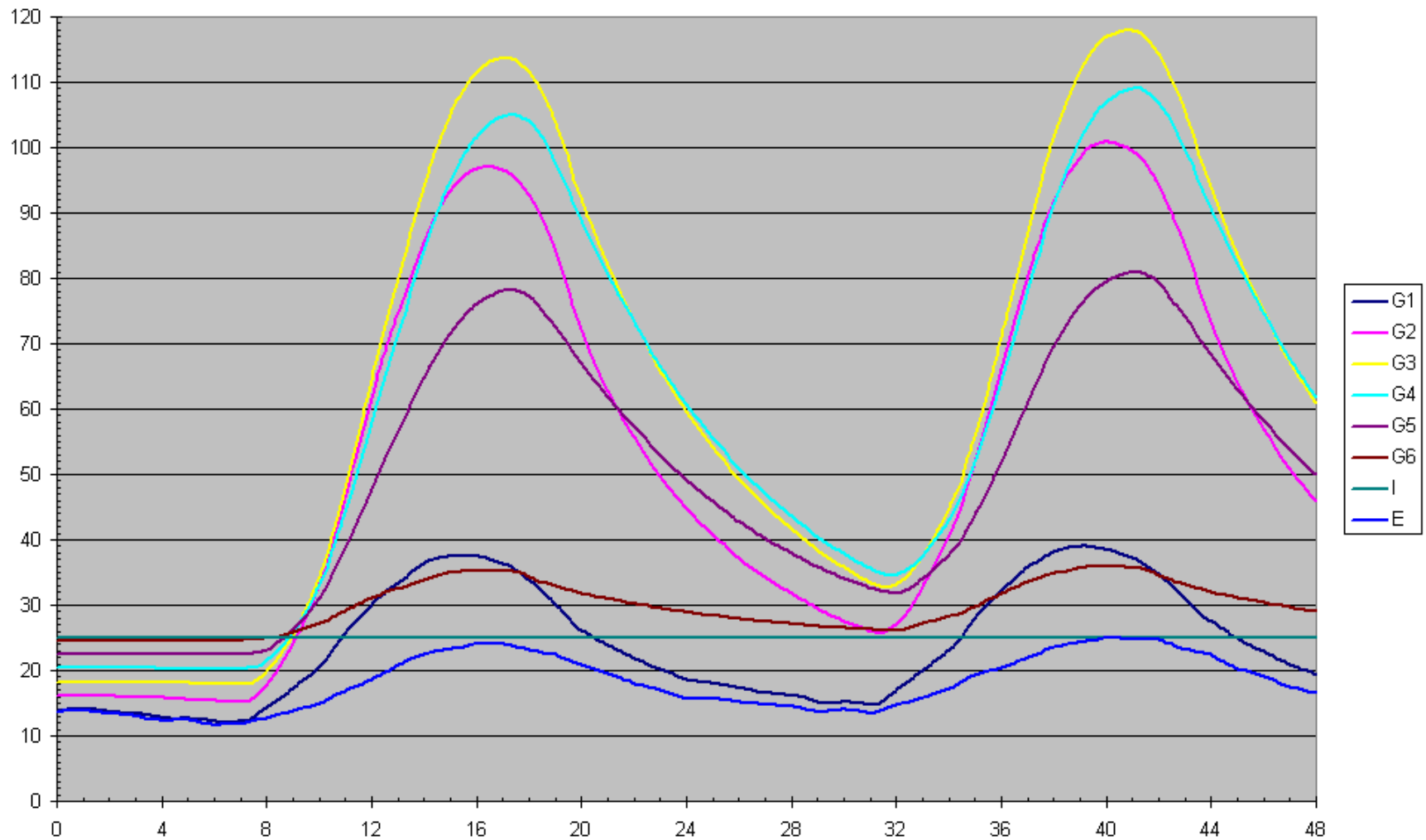
# Toepassing 2: oververhitting



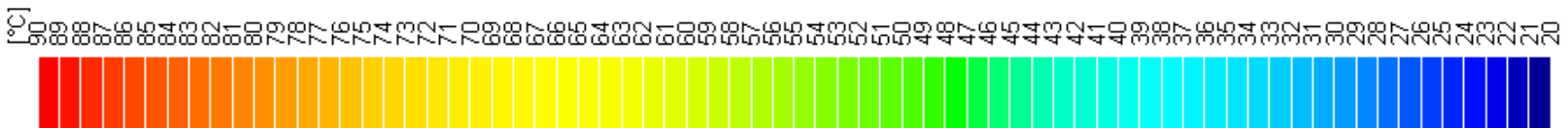
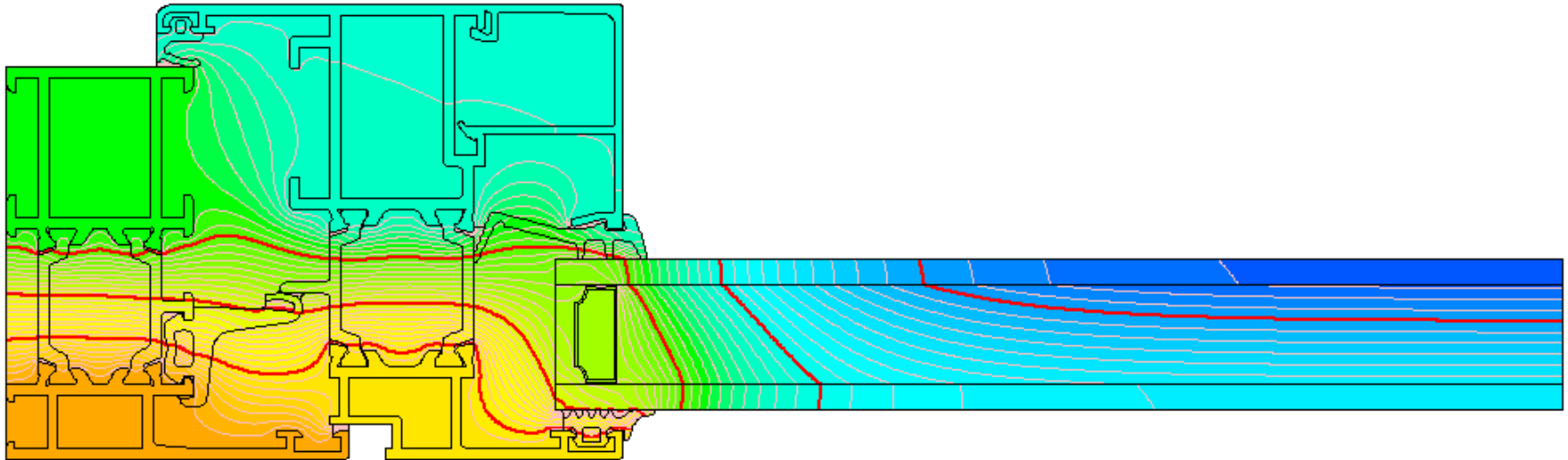
[example\\_triple\\_triple\\_glazing2.avi](#)



# Toepassing 2: oververhitting

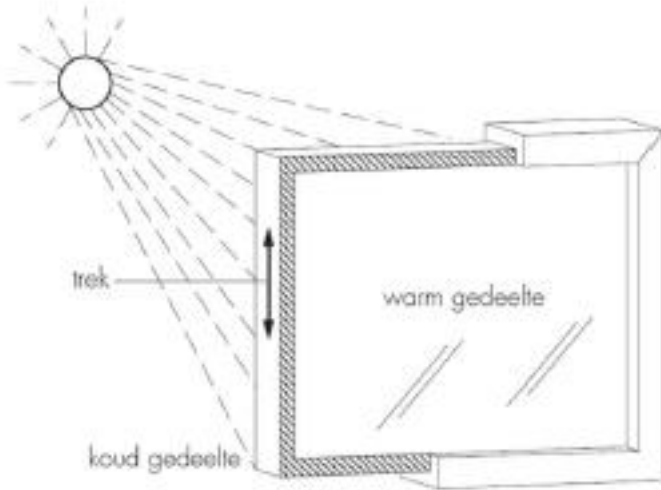


# Toepassing 3: oververhitting



# Toepassing 4: glasbreuk

Indien  $\Delta T$  over glasplaat te groot wordt  $\rightarrow$  risico op glasbreuk



Maximale en minimale temperatuur stationair of niet-stationair te berekenen

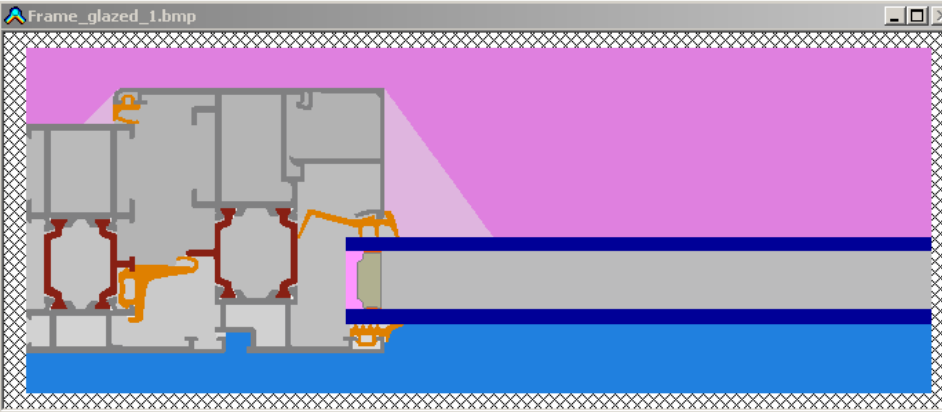
$\rightarrow$  niet-stationair preciezer!

Thesis Ugent M. Vandenpoel (2010)

# Toepassing 4: glasbreuk

**BISCO - Frame\_glazed\_1.bsc**  
 File Edit Zoom Bitmap Colours Calc Output Window Settings

Frame\_glazed\_1.bmp



**Measures**

Col.	Width [pix.]	Width [m]	Height [pix.]	Height [m]	Area [pix.]	Zones	Triang. [pix.]
	1	0.0001	1	0.0001			
All	2500	0.2500	950	0.0950			5.00
8	990	0.0990	730	0.0730	110676	5	5.00
17	1520	0.1520	160	0.0160	243200	1	5.00
18	1618	0.1618	240	0.0240	129440	2	5.00

**Borderline BCs**

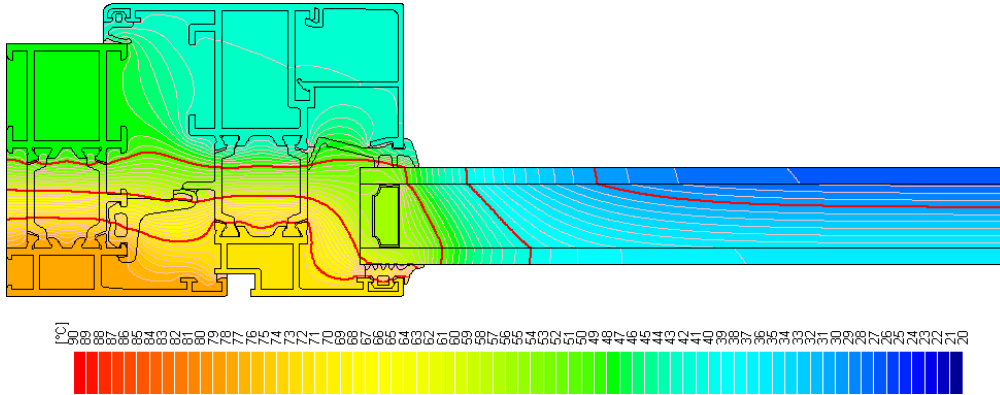
No.	Col.1	Col.2	Type	$\theta$ [°C]	q [W/m²]
1	8	170	FLUX		810
2	60	170	FLUX		810
3	18	170	FLUX		90

**Colours**

Col.	Type	CEN-rule	Name	Pat.	$\lambda$ [W/mK]	$\epsilon$ [-]	$\theta$ [°C]	h [W/m²K]	q [W/m²]	$\theta_a$ [°C]	hc [W/m²K]	Pc [W/m]	$\theta_r$ [°C]	C1	C2	C3
8	MATERIAL		aluminium		160.000											
17	EQUIMAT	NIHIL	equivalent U = 1.1 W/m2K		0.022											
18	MATERIAL		soda lime		1.000											
44	MATERIAL		polyamid reinf.		0.300											
60	MATERIAL		EPDM		0.250											
86	MATERIAL		polysulfide		0.400											
92	MATERIAL		butyl hot melt		0.240											
105	MATERIAL		molecular sieve		0.100											
170	BC_SIMPL	NIHIL	exterior				30.0	13.50	0							
174	BC_SIMPL	HI_NORML	interior (normal)				25.0	7.70	0							
182	BC_SIMPL	HI_REDUC	interior (reduced)				25.0	5.00	0							

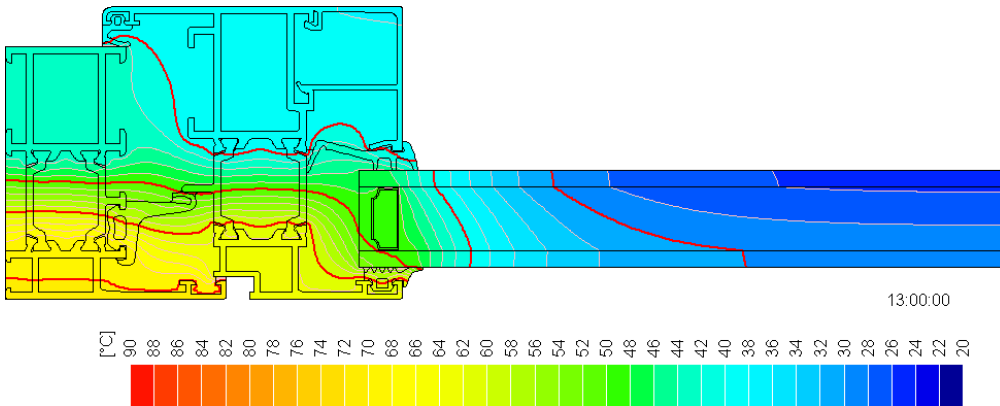


# Toepassing 4: glasbreuk



Stationair

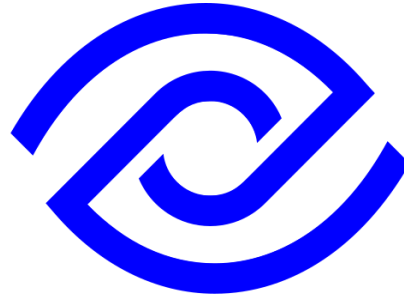
$T_{max} = 77.1^{\circ}\text{C}$



Niet-stationair

$T_{max} = 70.1^{\circ}\text{C}$  (13u)

**made visible by**



**physibel**

**mail@physibel.be**

**www.physibel.be**

downloadable program demo versions

