

Warmtetransport & thermische isolatie

Hoofdstuk 1

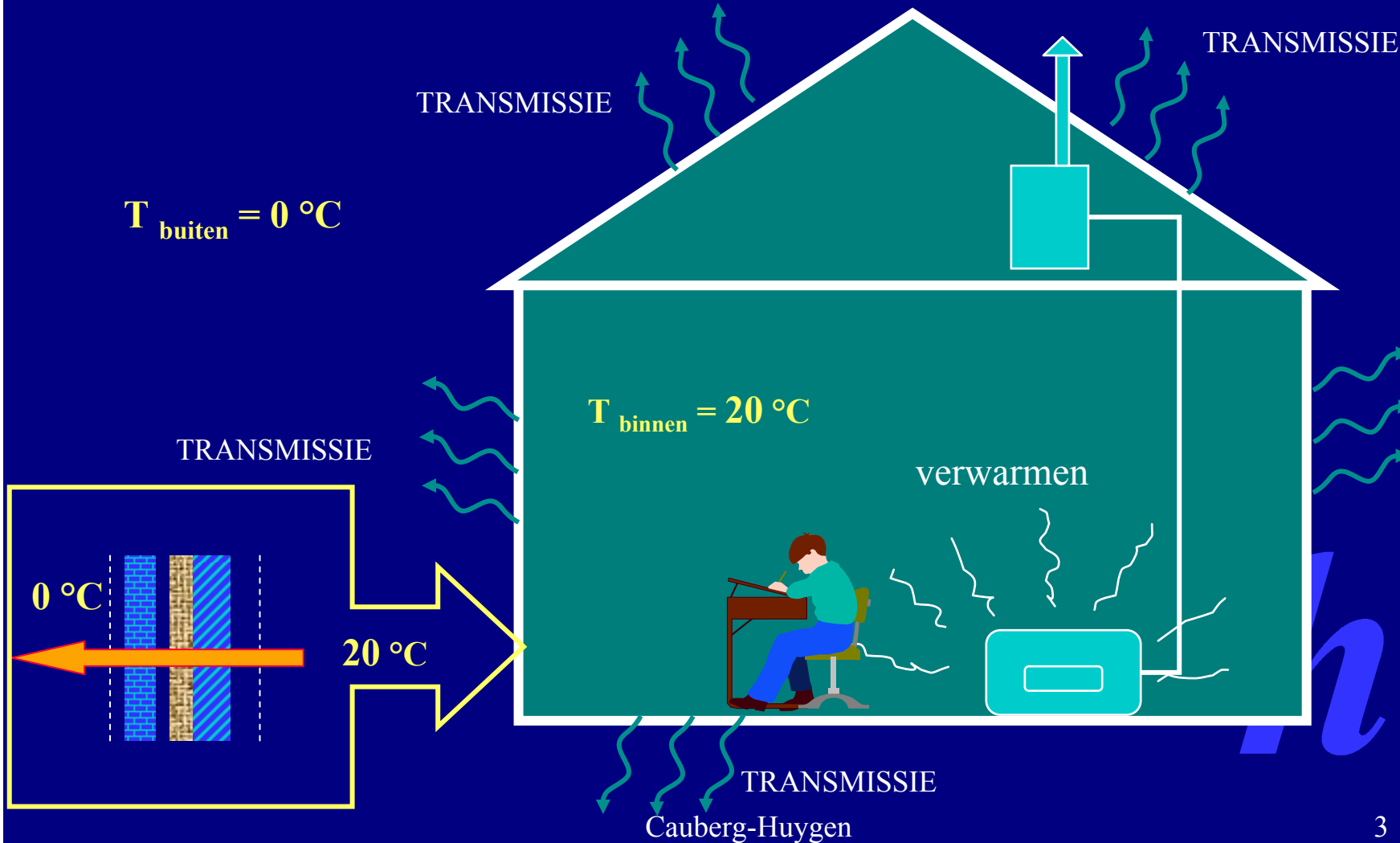
Ch

Warmte

- De drie warmtetransport-mechanismen
- Warmteoverdracht van/naar constructies
- Berekening warmteweerstand constructies
- Energieberekeningen
- Berekening oppervlakte temperatuur



Warmtetransport



Warmte

Warmte is een vorm van energie in Joule [J]

Eigenschappen:

- Stroomt van hoge naar lage temperatuur
- Is niet te bewaren of vast te houden

Begrippen:

- Warmtestroom, Q [J/s = W]
- Warmtestroomdichtheid, q [W/m²]
- Warmtedoorgangscoefficiënt, U [W/m²K]

Warmtetransport door constructies

Warmtestroom



warmtestroomdichtheid

Φ

q

in Watt

in W/m^2

Ch

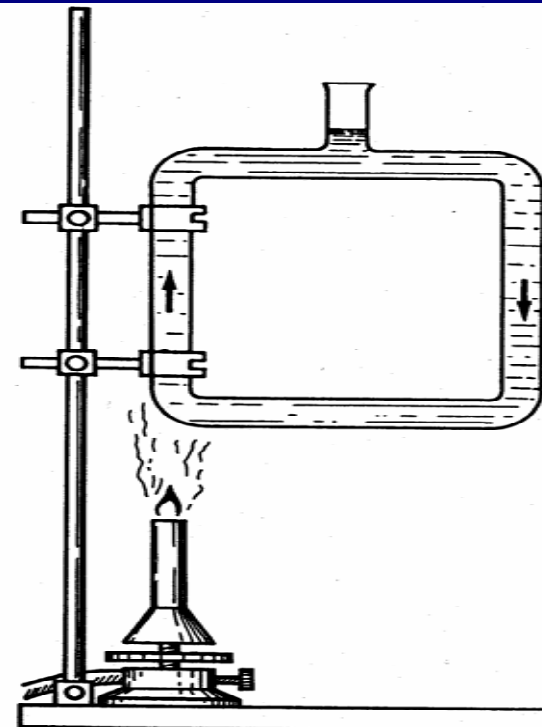
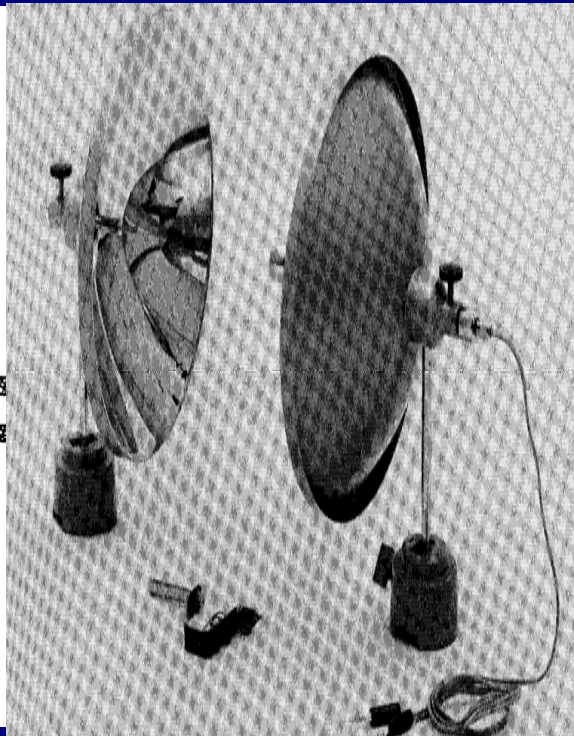
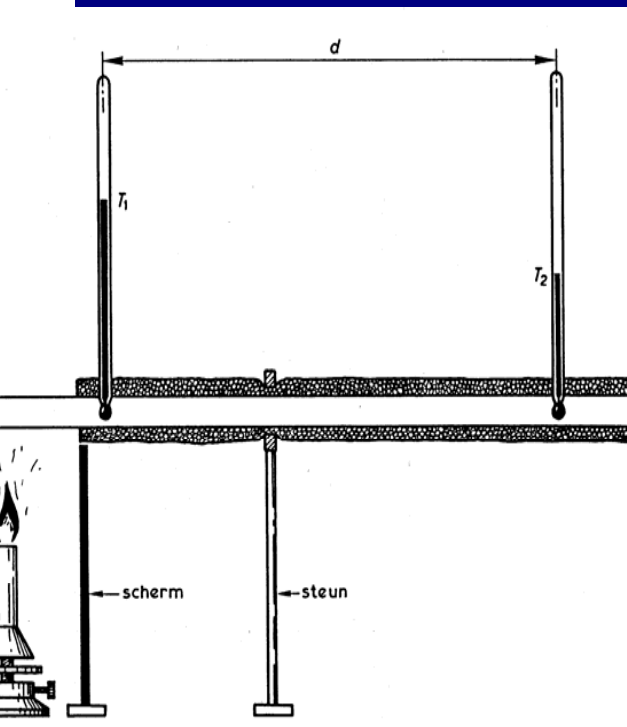
Warmtetransport

Warmtetransport is mogelijk door:

Geleiding

Straling

Convectie



Warmtetransport door geleiding (conductie)

■ Voorwaarden:

- een vast medium met een bepaalde dikte
- een temperatuurverschil over het medium

■ Eigenschap:

- doorgifte van hoge naar lage temperatuur
- mate van geleiding is materiaalafhankelijk

warmtegeleidingscoëfficiënt λ [W/mK]

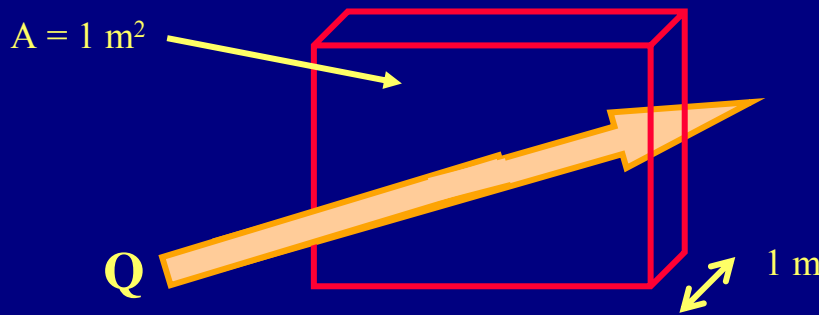
Warmtetransport

- Door straling
- Door convectie
- Door geleiding

Warmtegeleidings-
coëfficiënt

↓

λ in $\frac{W}{mK}$

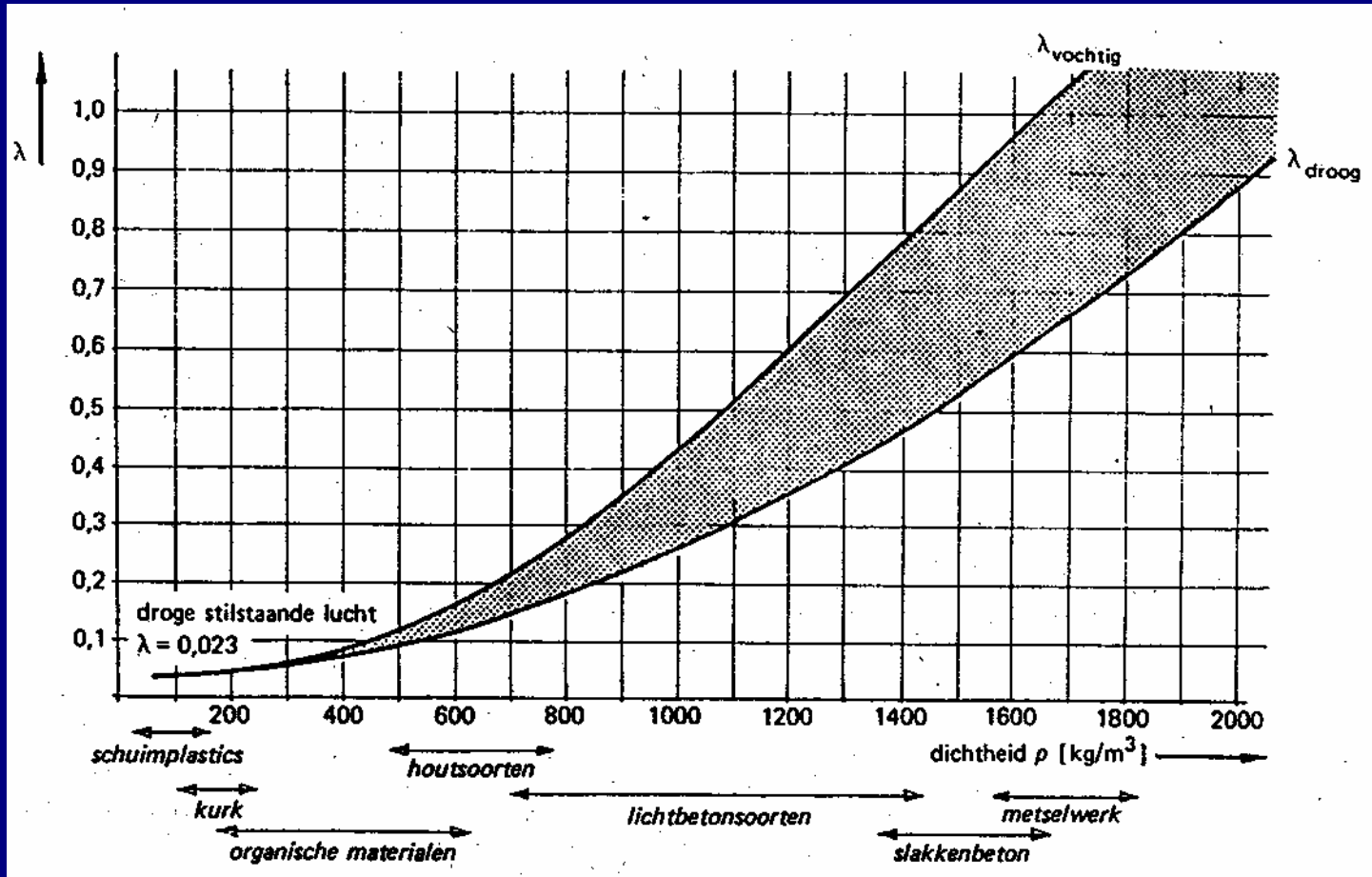


Warmteweerstand van een laag:

$$R_m = \frac{d}{\lambda}$$

Warmte

λ -waarde voor diverse materialen



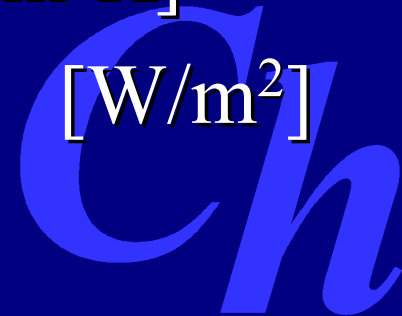
Warmtetransport door geleiding

Formules:

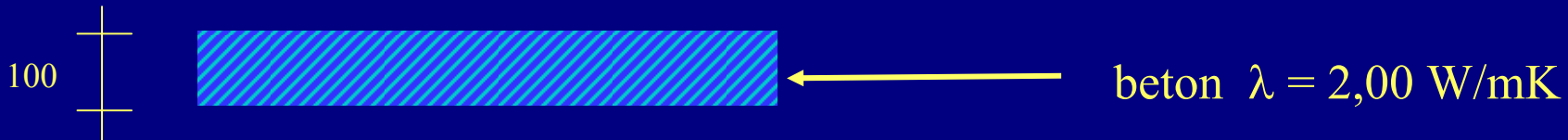
Warmteweerstand: $R = d/\lambda$ [m²K/W]

Warmtedoorg.coëff.: $U = 1/R_{1.0.1}$ [W/m²K]

Warmtestroomdichtheid: $q = U \cdot \Delta T$ [W/m²]



Warmtetransport door geleiding



Voorbeeld:

$$T_i = 293 / T_e = 263 \text{ [K]}$$

$$R = 0,1 / 2,0 = 0,05 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

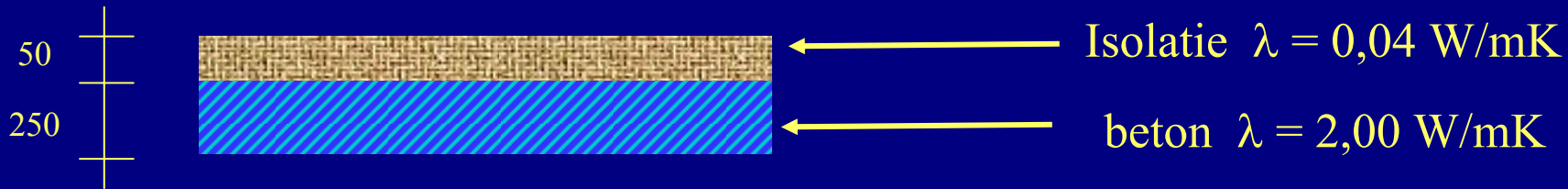
$$U = 2,0 / 0,1 = 20 \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$q = 20 * 30 = 600 \quad [\text{W/m}^2]$$

$$R_m = \frac{d}{\lambda}$$

$$q = U \cdot \Delta T$$

Warmtetransport door geleiding



$$R_c = R_{iso} + R_{beton} = \frac{d_{iso}}{\lambda_{iso}} + \frac{d_{beton}}{\lambda_{beton}} =$$
$$= \frac{0,05}{0,04} + \frac{0,25}{2,00} = 1,25 + 0,125 = 1,38 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

Ch

Warmtetransport door convectie

■ Voorwaarden:

- er moet een stromend medium zijn

■ Eigenschap:

- energietransport door meevoering
- medium met hogere temperatuur stroomt ↑
- met name afhankelijk van
luchtstroomsnelheid langs een oppervlak



Warmtetransport door straling

■ Voorwaarden:

- er moet(en) stralingsoppervlak(ken) zijn
- temperatuur moet hoger zijn dan 0 Kelvin
- emissiecoëfficiënt (ε) groter dan 0

■ Eigenschappen:

- overdracht mogelijk zonder medium
- overdracht van hoge naar lage temperatuur
- mate van overdracht afhankelijk van emissiecoëfficiënt ε van het oppervlak



Warmtetransport door straling

■ Formules:

Warmtestroomdichtheid van afgegeven straling:

$$q_s = \varepsilon * 56,7 * 10^{-9} * T^4$$

Netto warmtestroomdichtheid door straling:

$$q_s = (\varepsilon_1 * \varepsilon_2) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_1 * \varepsilon_2 + \varepsilon_2) * 56,7 * 10^{-9} * (T_1^4 - T_2^4)$$

Voorbeeld radiator zonder/met folie erachter:

$$\varepsilon_{1,2} = 0,95, \varepsilon_{\text{folie}} = 0,05, T_{\text{wand}} = 273 \text{ [K]}, T_{\text{rad}} = 363 \text{ [K]}$$

$$q_{s;\text{zonder folie}} = 606 \text{ [W/m}^2\text{]}, q_{s;\text{met folie}} = 33 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Warmtetransport door straling

■ Formules:

Warmtestroomdichtheid van afgegeven straling:

$$q_s = \varepsilon * 56,7 * 10^{-9} * T^4$$

Netto warmtestroomdichtheid door straling:

$$q_s = (\varepsilon_1 * \varepsilon_2) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_1 * \varepsilon_2 + \varepsilon_2) * 56,7 * 10^{-9} * (T_1^4 - T_2^4)$$

Ch

Warmtetransport door straling

Voorbeeld radiator zonder/met folie:

$$\varepsilon_{1,2}=0,95, \varepsilon_{\text{folie}}=0,05,$$

$$T_{\text{wand}}=273 \text{ [K]}, T_{\text{rad}}=363 \text{ [K]}$$

$$q_{s;\text{zonder folie}} = 606 \text{ [W/m}^2\text{]},$$

$$q_{s;\text{met folie}} = 33 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Ch

Warmteoverdracht van/naar constructieoppervlak

■ Convectie: $q_c = \alpha_c \times (T_1 - T_2),$ $[\text{W}/\text{m}^2]$

■ Straling: $q_s = \alpha_s \times (T_1 - T_2),$ $[\text{W}/\text{m}^2]$

■ Geleiding: $q_g = \alpha_g \times (T_1 - T_2),$ $[\text{W}/\text{m}^2]$



Warmte

Convectie:

$$Q_c = \alpha_c \cdot (T_1 - T_2)$$

Q_c = warmtestroomdichtheid [W/m²]

α_c = warmteovergangscoefficiënt [W/m²K]

T_1, T_2 = absolute temperatuur [K]

$\alpha_c = 0,7$ (spouw), 3,0 (binnen), 20 (buiten)

(langs verticale oppervlakken)

Warmte

Straling:

$$Q_s = \alpha_s \cdot (T_1 - T_2)$$

Q_s = warmtestroomdichtheid [W/m²]

α_s = warmteovergangscoefficiënt [W/ m²k]

T_1, T_2 = absolute temperatuur [K]

$\alpha_s = 4,8$ (spouw, binnen), $5,0$ (buiten)

Warmte

Geleiding:

$$Q_g = \alpha_g \cdot (T_1 - T_2)$$

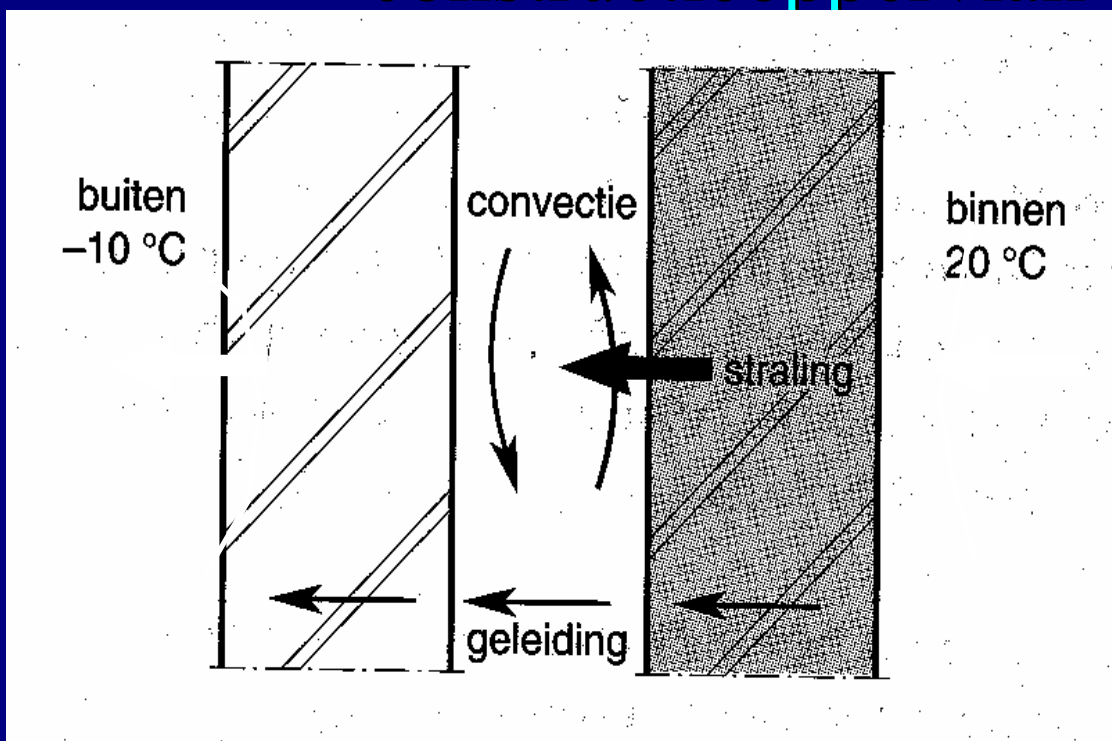
Q_g = warmtestroomdichtheid [W/m²]

α_G = warmteovergangscoefficiënt [W/m²k]

T_1, T_2 = absolute temperatuur [K]

$\alpha_G = 0,50$ (spouw) Cauberg-Huygen

Warmteoverdracht van/naar constructieoppervlak



↔
 Straling
 convectie

↔
 geleiding

↔
 straling
 convectie

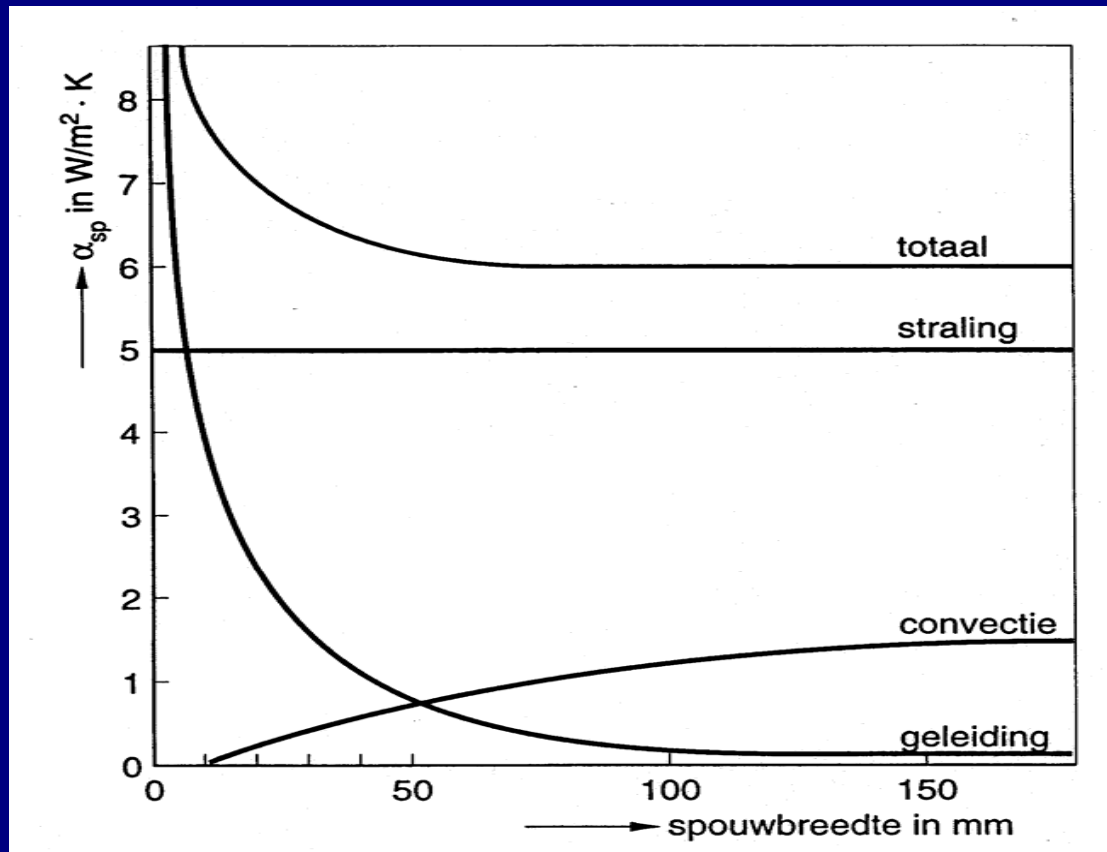
↔
 geleiding

↔
 straling
 convectie

Ch

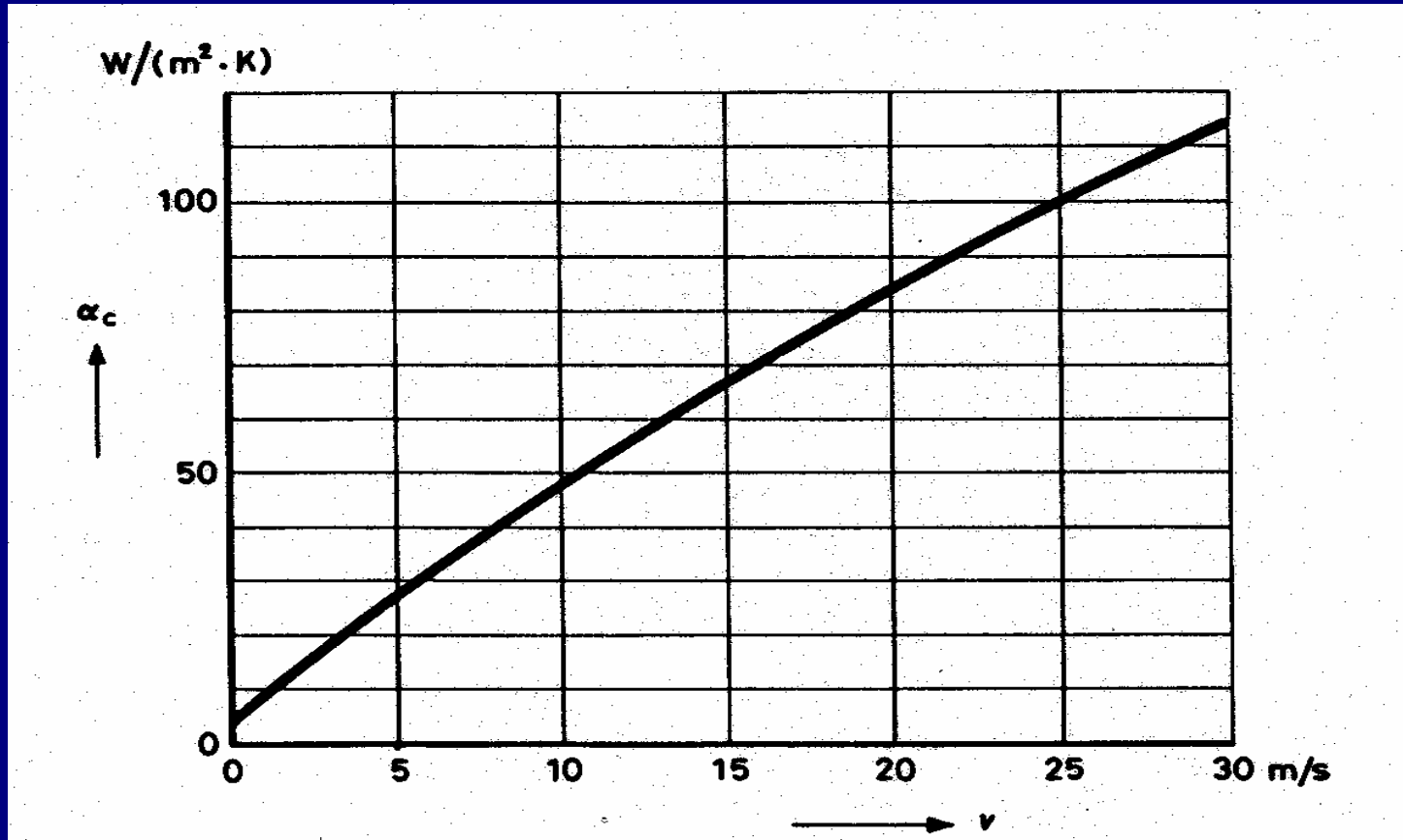
Warmte

Warmteoverdracht in spouwconstructies:

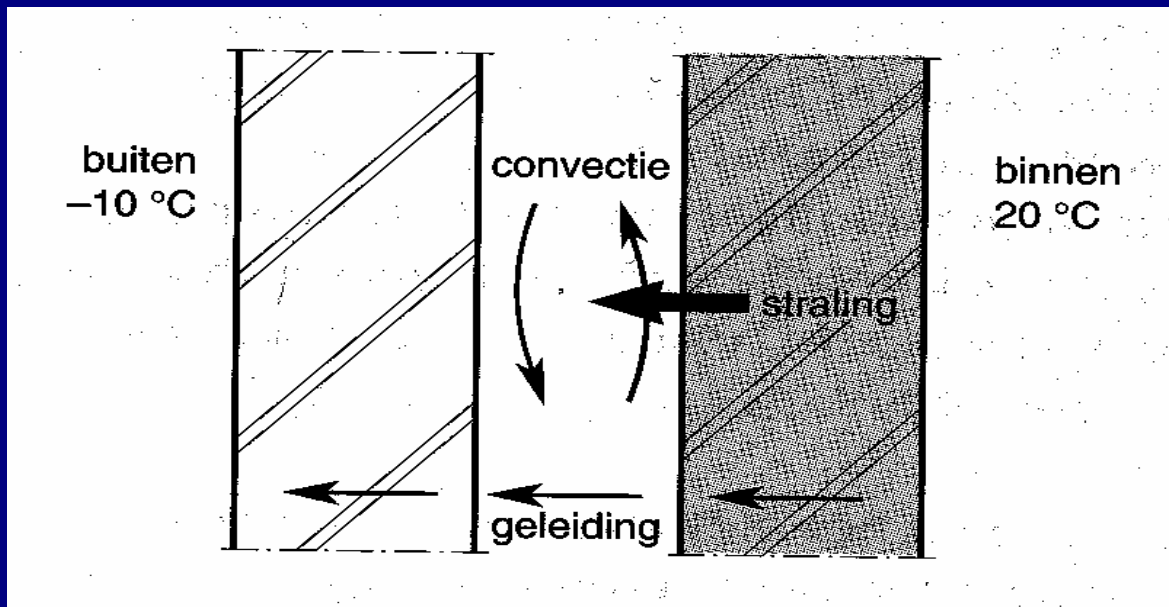


Warmte

Warmteoverdracht langs oppervlak afh. van v



Warmteoverdrachtsweerstand



←————→	
straling	5,0
convectie	20,0
—————+—————	
$\alpha_e = 25,0$	

$R_e = 1 / 25,0 = 0,04$

←————→	
straling	4,8
convectie	0,7
geleiding	0,5 +
—————+—————	
$\alpha_{\text{spouw}} = 6,0$	

$R_{\text{spouw}} = 1 / 6,0 = 0,17$

←————→	
straling	4,8
convectie	3,0
—————+—————	
$\alpha_i = 7,8$	

$R_i = 1 / 7,8 = 0,13 \frac{m^2 K}{W}$

Warmteweerstand van een (verticale) spouwconstructie

De warmteweerstand van een spouwconstructie wordt bepaald door straling, stroming en geleiding binnen de spouw

Berekeningen tonen aan dat als de spouwbreedte groter is dan 50 mm, voor de warmteweerstand geldt:

$$R_{spouw} = 0,17 \frac{m^2 K}{W}$$

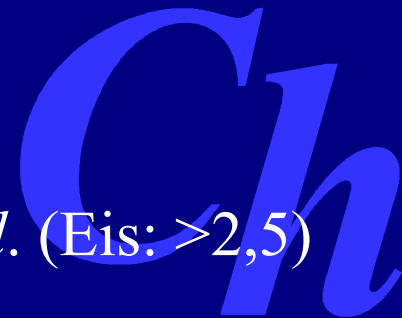
Ch

Warmteweerstand van een gelaagde constructie:

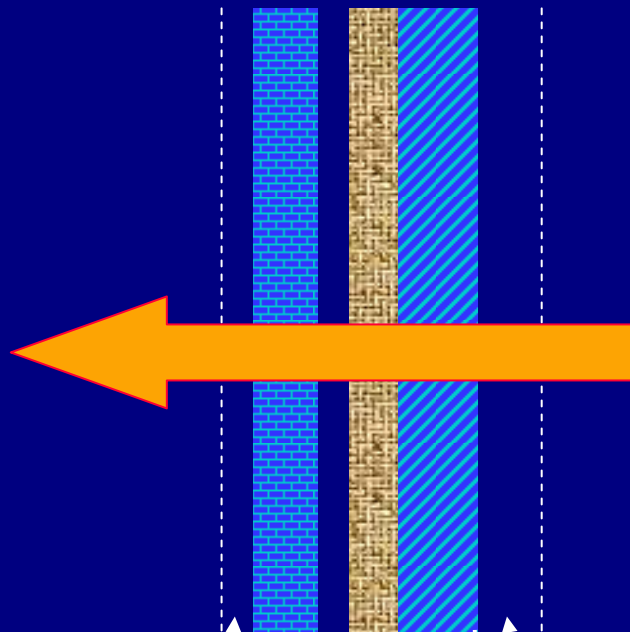
$$R_c = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \frac{m^2 K}{W}$$

$R_1, R_2, R_3 \dots$ Warmteweerstand van de afzonderlijke lagen

$R_c \dots$ Warmteweerstand van de gehele gelaagde constructie, ofwel de *specifieke warmteweerstand*. (Eis: >2,5)



Lucht-op-lucht weerstand

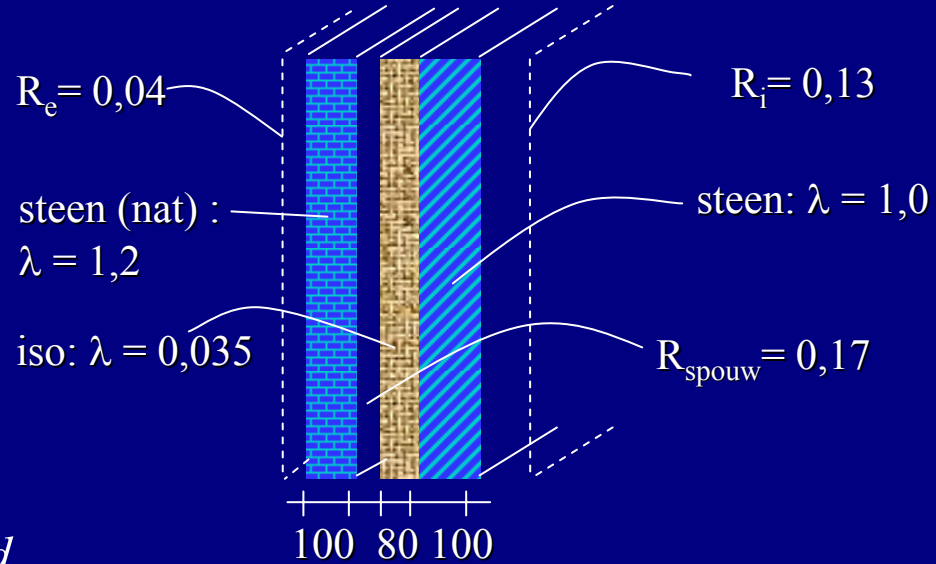


Aan de buiten en binnenzijde van een constructie bevindt zich een dun laagje lucht. Deze levert ook een overgangsweerstand op: r_i en r_e . Deze moet je optellen bij de R_c om zo de *totale* (lucht-op-lucht) weerstand te vinden

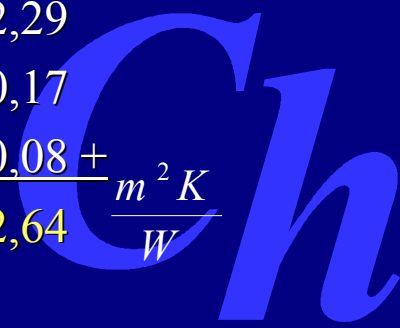
$$R_l = r_e + R_c + r_i \quad \frac{m^2 K}{W}$$

Ch

Bepaling van de warmteweerstand van een constructie



Steen	R_{steen}	$= \frac{d}{\lambda}$	$= 0,1 / 1,0$	$= 0,10$
Isolatie	R_{iso}	$= \text{''}$	$= 0,08 / 0,035$	$= 2,29$
Spouw	R_{spouw}	$=$		$= 0,17$
Steen (nat)	R_{steen}	$= \text{''}$	$= 0,1 / 1,2$	$= 0,08$
$R_c = 2,64 \frac{m^2 K}{W}$				
$U =$	$\frac{1}{R_e + R_c + R_i}$	$= \frac{1}{0,04 + 2,64 + 0,13}$	$= 0,35$	$\frac{W}{m^2 K}$



Warmtetransport

■ Typische waarden voor R:

Afdek- of afwerklaag:

$$R_m = 0,04 \frac{m^2 K}{W}$$

Niet of zwak geventileerde
luchtlaag meer dan 10 mm dik:

$$R_m = 0,17 \frac{m^2 K}{W}$$

Niet of zwak geventileerde
luchtlaag minder dan 10 mm
dik:

$$R_m = 0,00 \frac{m^2 K}{W}$$



Warmtedoorgangscoefficiënt

De warmtedoorgangscoefficiënt U geeft eigenlijk aan hoeveel Watt er, per graad Kelvin temperatuurverschil tussen binnen en buiten, en per m^2 , door de gevel naar buiten stroomt. Je drukt U dan ook uit in W/m^2K . Het uitrekenen van U is eenvoudig: neem het omgekeerde van R_l

$$U = \frac{1}{R_l} = \frac{1}{r_e + R_c + r_i} \quad \text{in} \quad \frac{W}{m^2 K}$$

Ch

Warmtetransport

Berekening R en U -waarde van spouwconstructie

Warmteweerstand (R-waarde):

$$R_c = R_{\text{laag}} + R_{\text{sp}} + R_{\text{laag}}$$

$$R_1 = R_e + R_{\text{laag}} + R_{\text{sp}} + R_{\text{laag}} + R_i$$

$$R_1 = 0,04 + d/\lambda + 0,17 + d/\lambda + 0,13 \quad [\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$$

(voor seriegeschakelde constructies)

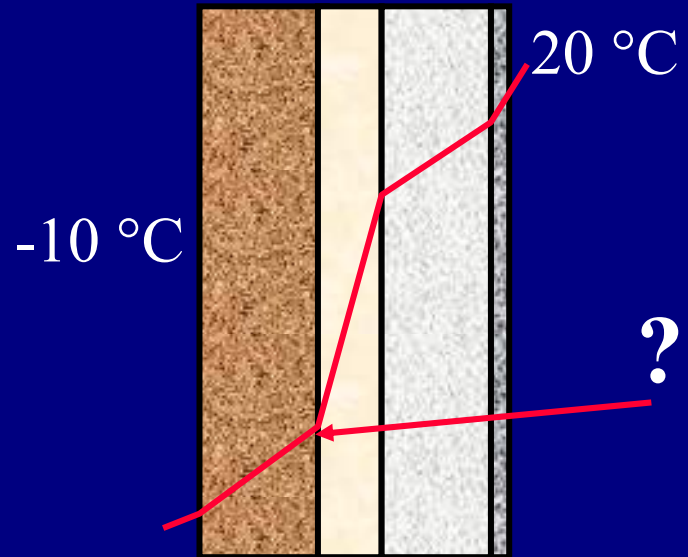
Warmtedoorgangscoefficiënt (U-waarde):

$$U = 1 / R \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$



Temperatuurverschil per laag

$$\Delta T = \frac{R_n}{R_l} \cdot \Delta T$$



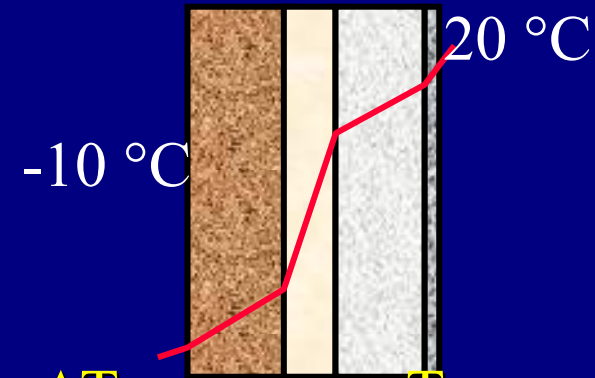
ΔT temperatuurverschil binnen/buiten (laag)

R_l warmteweerstand constructie lucht-lucht

R_n warmteweerstand constructie laag

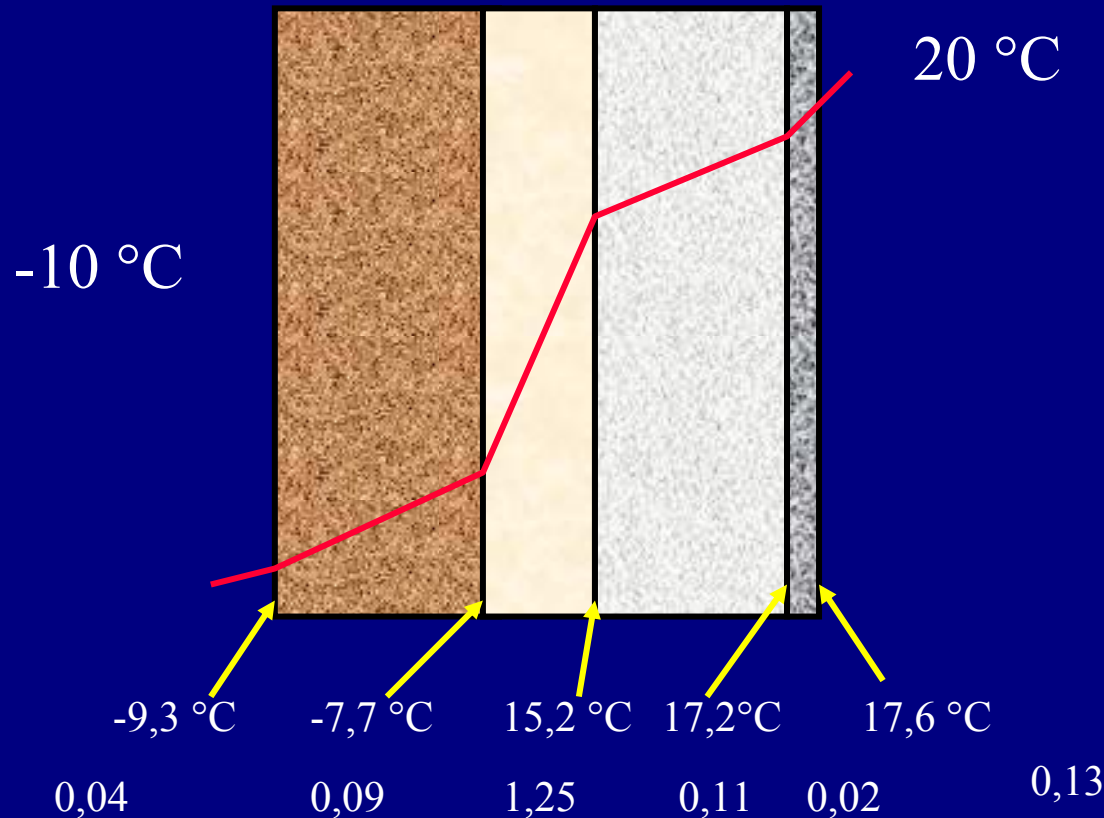
Ch

Temperatuurverloop



Laag	λ	d	R_n	$(R_n/R_1) \times \Delta T$	T_n
r_e			0,04	$(0,04/1,64) \times 30 = 0,7$	-10
hardgrauw	1,2	0,105	0,09	$(0,09/1,64) \times 30 = 1,6$	-9,3
isolatie	0,04	0,05	1,25	$(1,25/1,64) \times 30 = 22,9$	-7,7
kalkzandsteen	1,0	0,105	0,11	$(0,11/1,64) \times 30 = 2,0$	15,2
pleisterlaag			0,02	$(0,02/1,64) \times 30 = 0,4$	17,2
r_i			<u>0,13</u>	$(0,13/1,64) \times 30 = 2,4$	17,6
			$R_1 = 1,64$		20,0

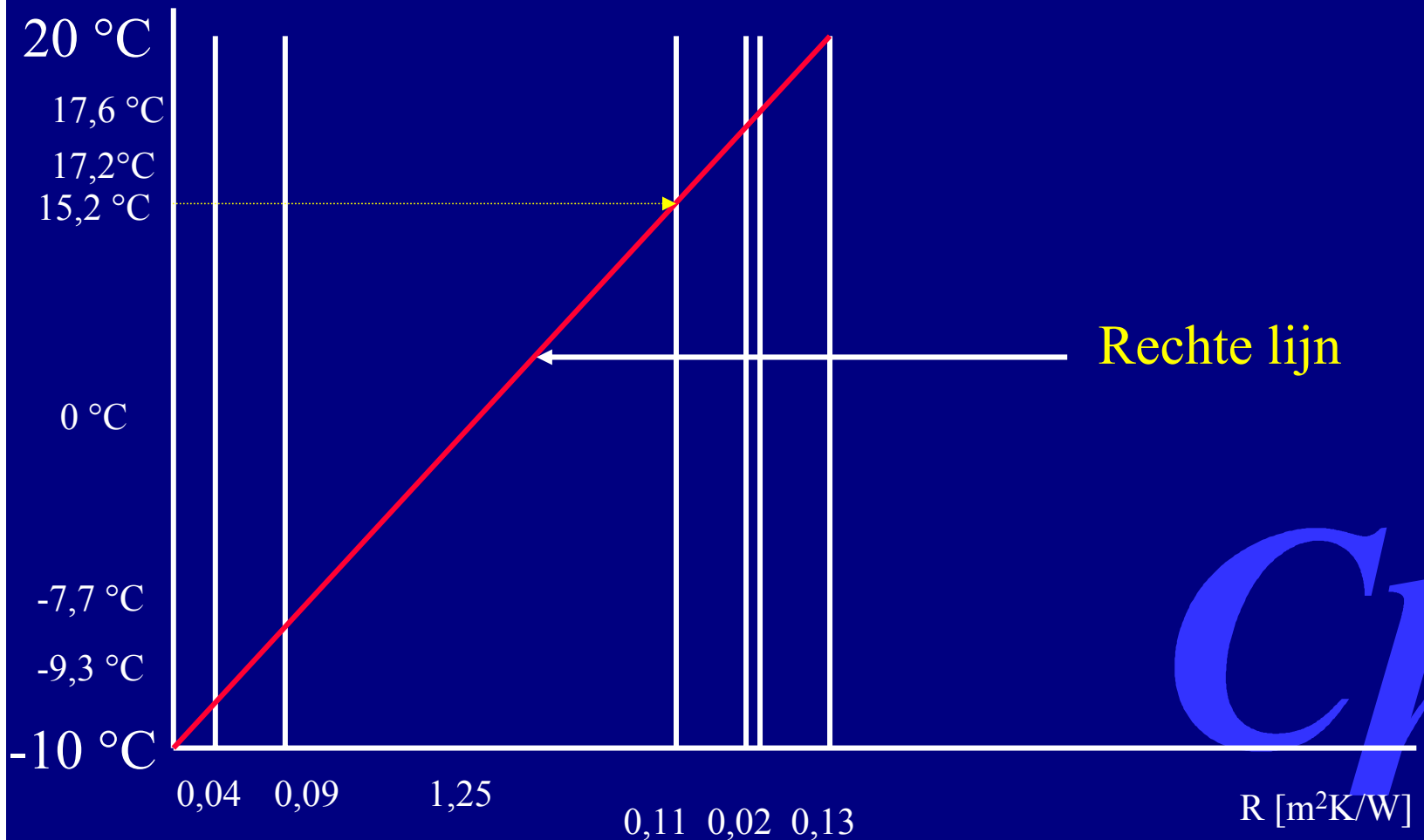
Temperatuurverloop



$$\Delta T = \frac{R_n}{R_l} \cdot \Delta T$$

Ch
temperaturen
R-waarden

Temperatuurverloop



Berekenen energieverliezen

$$R_1 = R_e + R_{\text{laag}} + R_{\text{sp}} + R_{\text{laag}} + R_i \quad [\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$$

$$U = 1 / R_1 \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$

$$q = U \times \Delta T \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$Q = U \times \Delta T \times A \quad [\text{W}]$$

$$E = U \times \Delta T \times A \times t \quad [\text{J}]$$

Ch

Warmtetransport

Voorbeeld: Slaapkamer aan buitengevel

$$U_{\text{metselwerk}} = 0,50 \text{ [W/m}^2\text{K]}, A_{\text{metselwerk}} = 10 \text{ m}^2$$

$$U_{\text{enkelglas}} = 5,0 \text{ [W/m}^2\text{K]}, A_{\text{enkelglas}} = 1 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{slaapkamer}} = 293 \text{ [K]}, T_{\text{buiten}} = 273 \text{ [K]}, t = 3600 \text{ [s]}$$

$$q_{\text{metselwerk}} = 0,5 \times 20 = 10 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$q_{\text{enkelglas}} = 5,0 \times 20 = 100 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$Q = 0,5 \times 20 \times 10 + 5,0 \times 20 \times 1 = 200 \text{ [W]}$$

$$E = 200 \times 3600 = 720000 \text{ [J]}$$

Warmtestroomdichtheid: $q = \frac{\Delta T}{R}$ [W/m²]

Warmteweerstand: $R_m = \frac{d}{\lambda}$ [m²K/W]

Warmteweerstand: $R_c = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

Warmteweerstand: $R_{l.o.l} = R_e + R_c + R_i$

Warmtedoorgcoëff.: $U = \frac{1}{R_{l.o.l}}$ [W/m²K]

Warmtestroomdichtheid: $q = U \cdot \Delta T$ [W/m²]



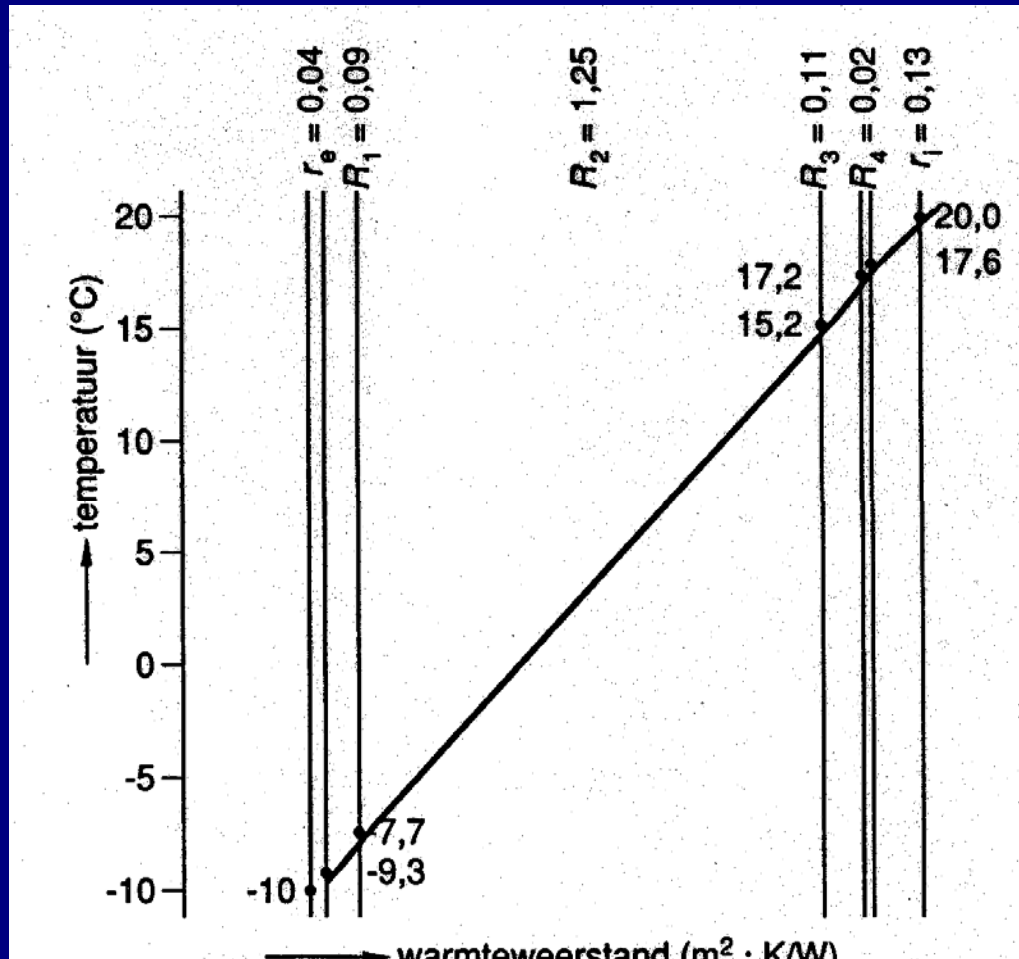
Warmte

Samenvatting

- Theorie over warmtetransport (geleiding, straling, convectie)
- Warmteoverdracht van/naar oppervlakken
- Bepalen Rc-waarde en U-waarde
- Bepalen energieverliezen

Ch

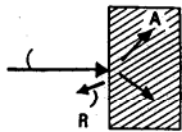
Grafisch bepalen van temperatuurverloop



Ch

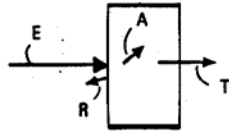
Warmte

Afb. 8.5.2.: Vier stralingswetten



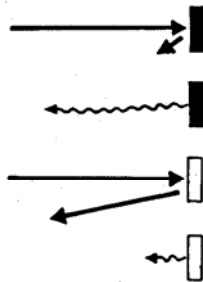
1 Stralingsbalans
 Opvallende straling E = terugkaatsing R plus absorptie A plus transmissie T .

$$E = R + A + T$$



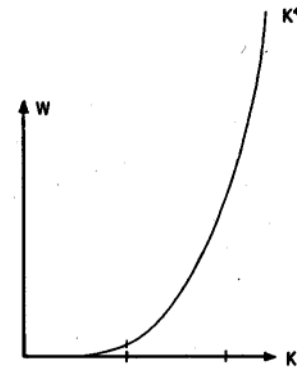
2 Emittantie (emissiviteit)
 (Wet van Kirchhoff)
 Goede absorptie levert ook goede emissie, slechte absorptie gaat samen met slechte emissie.

$$E \approx A$$



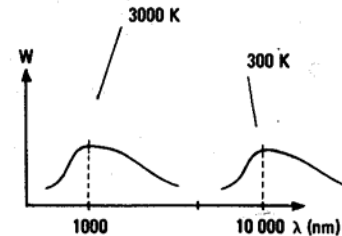
3 Geëmitteerd vermogen
 (Wet van Stefan-Boltzmann)
 Het geëmitteerd vermogen groeit met de vierde macht van de absolute temperatuur (Kelvin K) van de straler.

$$W \approx K^4$$



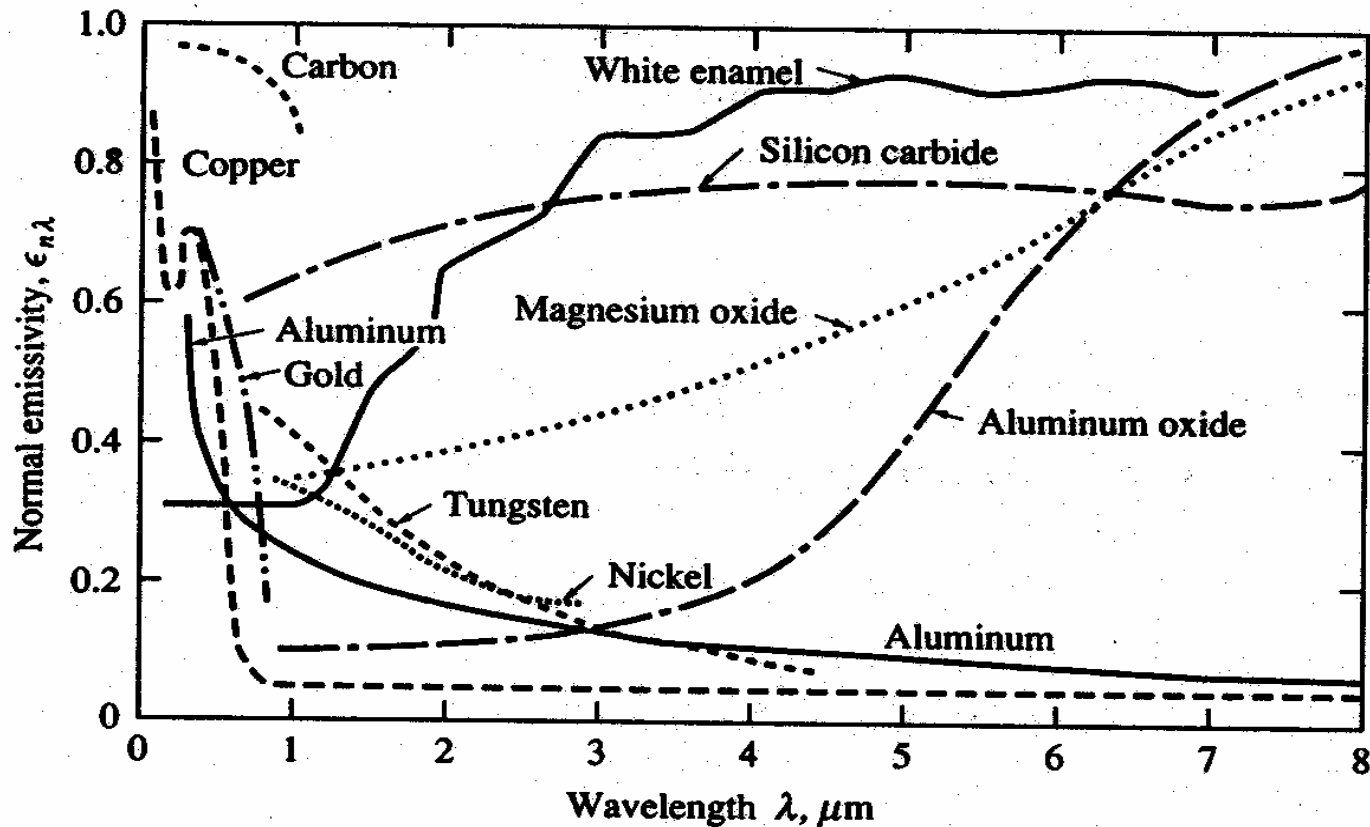
4 Emissiespectrum
 (Verschuivingswet van Wien)
 De golflengte van het stralingsmaximum is omgekeerd evenredig met de temperatuur in Kelvin (K).
 Of: met dalende temperatuur wordt de golflengte van het stralingsmaximum groter.

$$\lambda_{\max} \approx 1/K$$



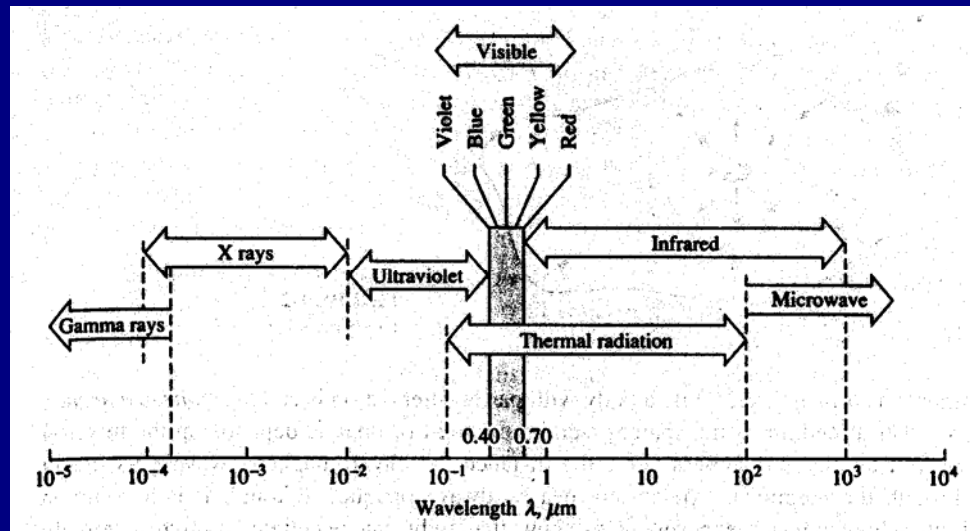
Warmte

emissiecoëfficiënt (ϵ) van materialen



Warmte

Spectrum warmtestraling



Ch

Warmtestroomdichtheid

$$q = \frac{\Delta T}{R}$$

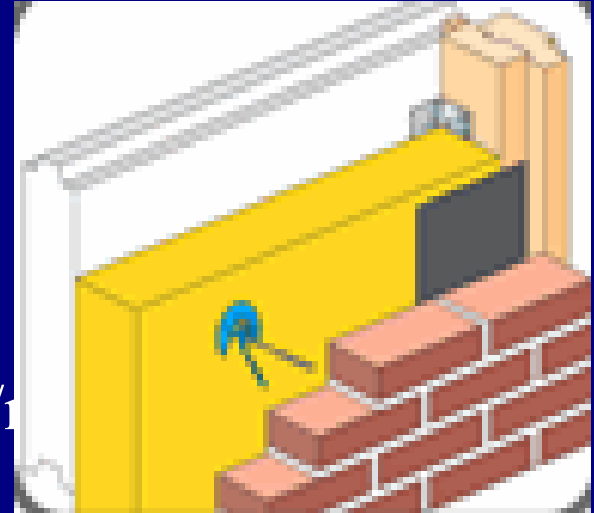
q warmtestroomdichtheid [W/m²K]

ΔT temperatuurverschil [K]

R warmte weerstand constructie [m²K/W]

warmtestroomdichtheid per laag constant

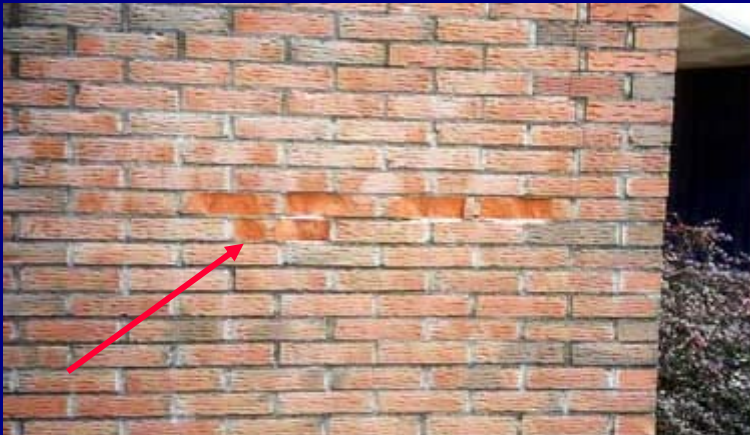
dus q gelijk:,bij grote R grote ΔT



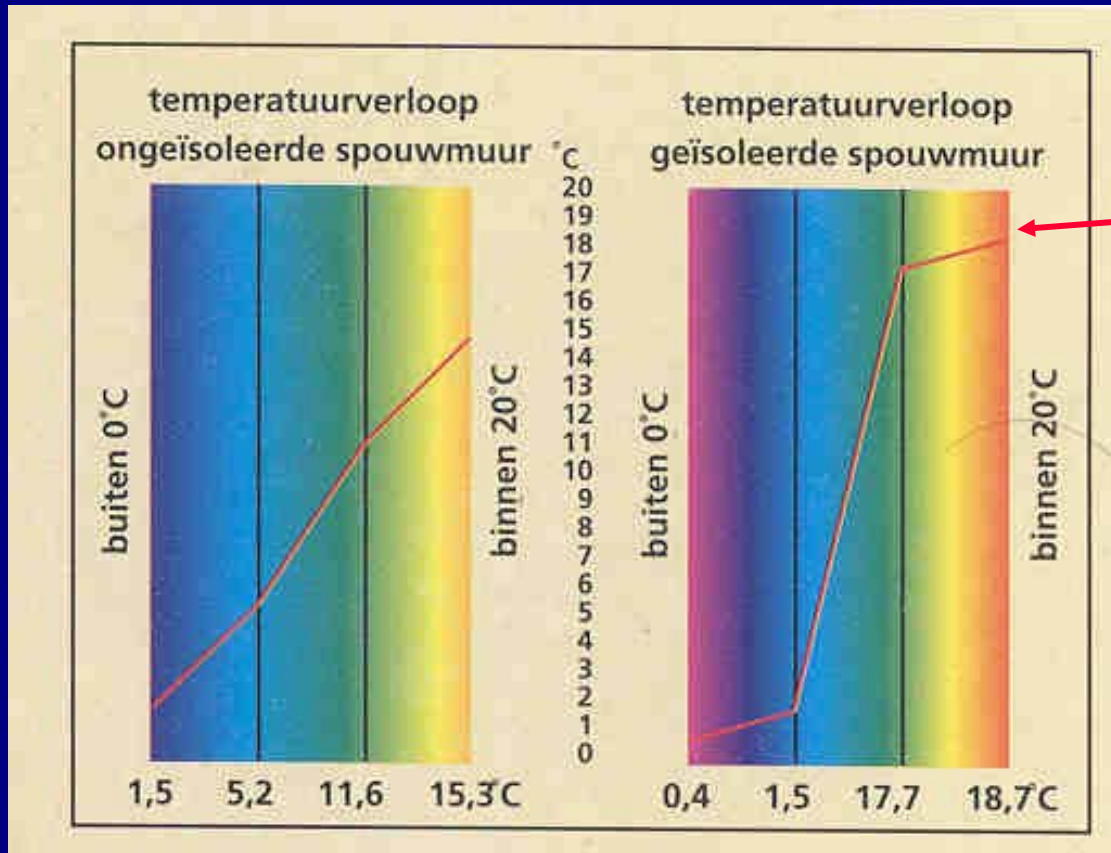
Ch

Temperatuur van de constructie

- ◆ Behaaglijkheid
- ◆ schimmels (oppervlakte temperatuur)
- ◆ condensatie
- ◆ kapot vriezen



Temperatuurverloop



Opp. temperatuur

Ch

Oppervlakte temperatuur

$$\Delta T = \frac{R_n}{R_l} \cdot \Delta T$$

$$T_{i0} = T_i - \frac{r_i}{R_l} \cdot (T_i - T_e)$$

T_{i0} oppervlakte temperatuur binnen

T_e temperatuur buiten

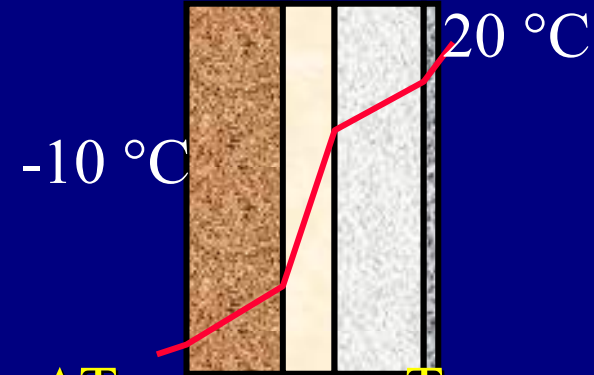
T_i temperatuur binnen

r_i overgangsweerstand binnen

R_l warmteweerstand constructie lucht-lucht

Ch

Temperatuurverloop



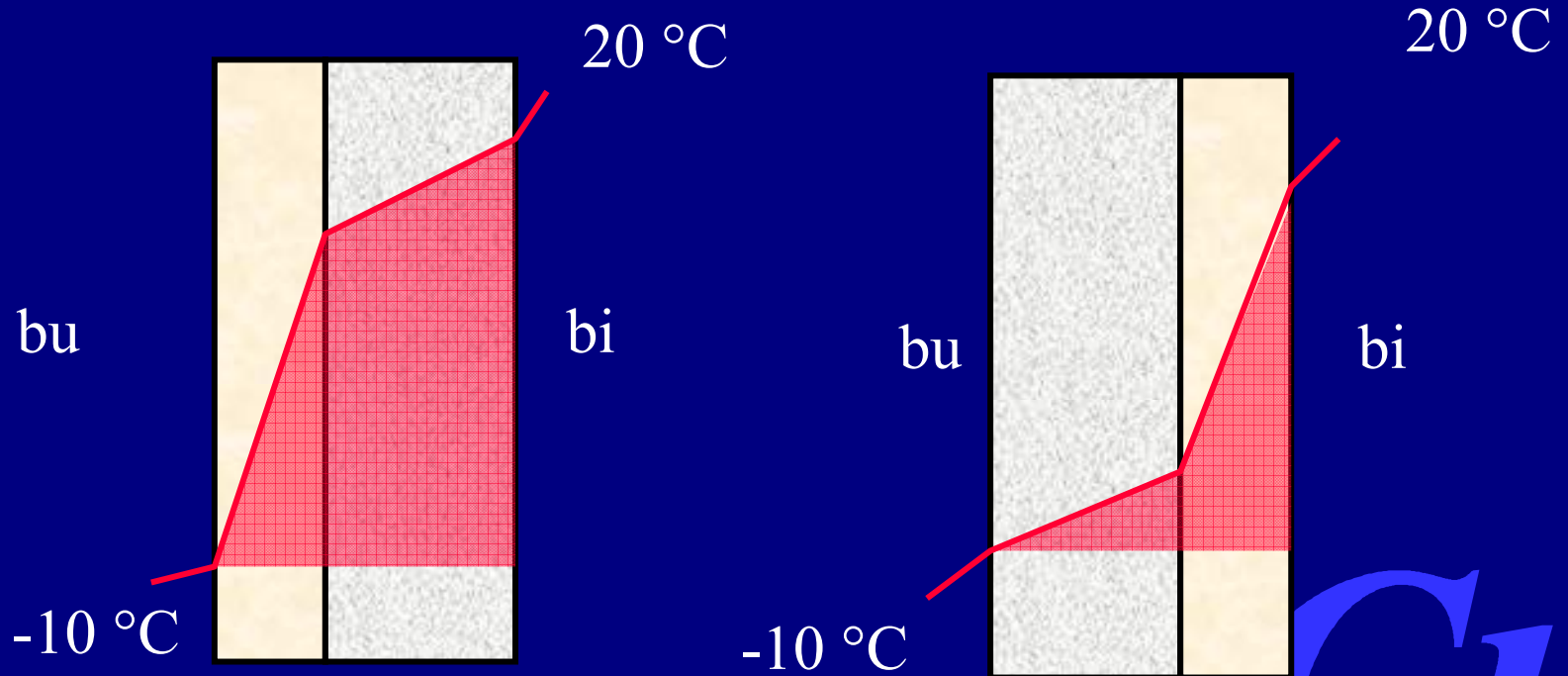
Laag	λ	d	R_n	$(R_n/R_1) \times \Delta T$	T_n
r_i			<u>0,13</u>	$(0,13/1,64) \times 30 = 2,4$	17,6
			$R_1 = 1,64$		20,0

$$T_{i0} = T_i - \frac{r_i}{R_1} \cdot (T_i - T_e)$$

$$20 - (0,13/1,64) \times (20 - (-10)) = 17,6$$

Ch

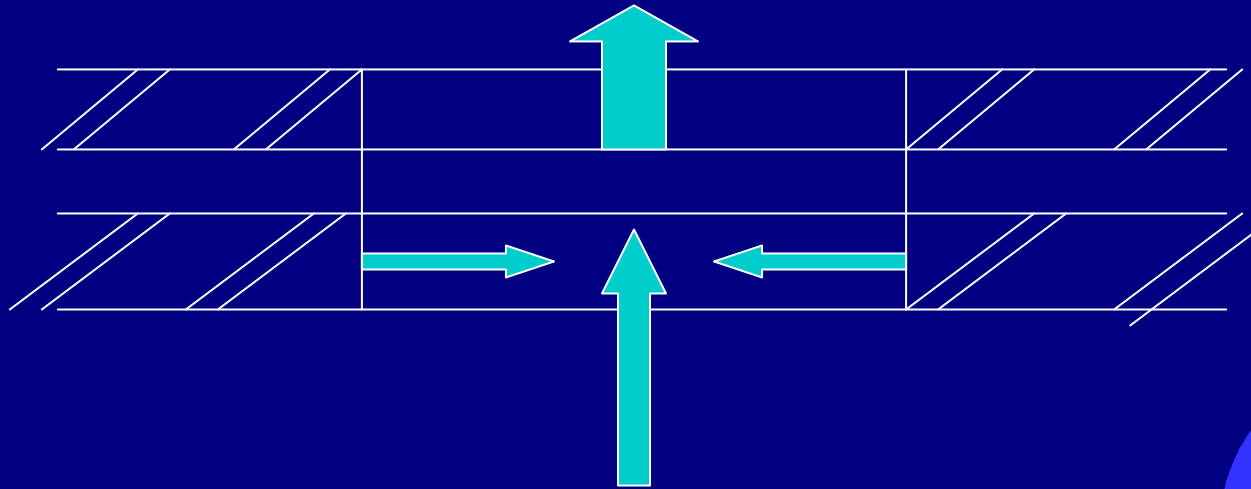
Warmteaccumulatie



$$Q = \rho \cdot c \cdot d \cdot \Delta T \quad [\text{J/m}^2]$$

Koudebrug [1.5]

Koudebrug: “lek” in de isolatie
koudebrug beïnvloedt zijn omgeving



Ch

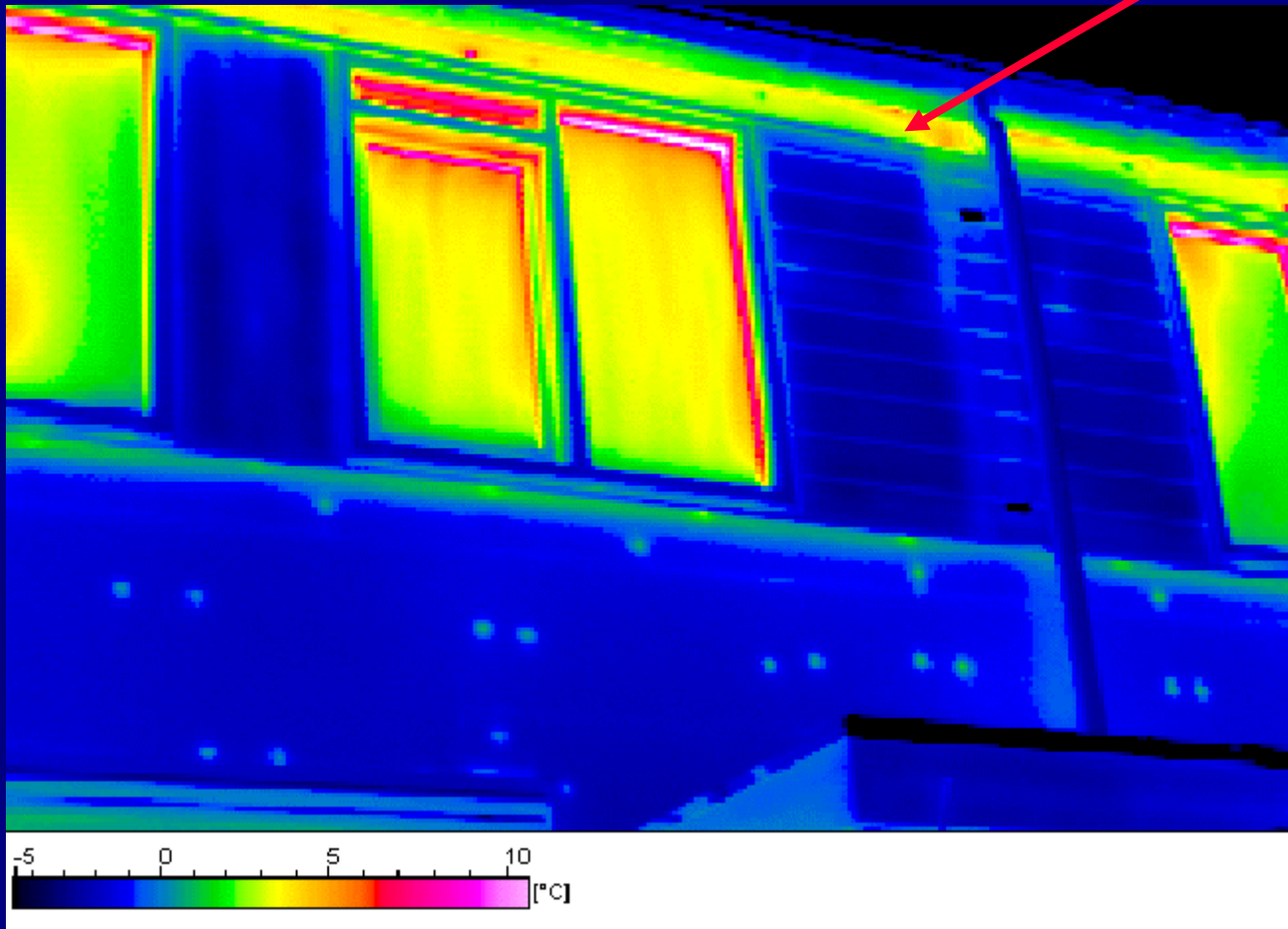
Koudebrug

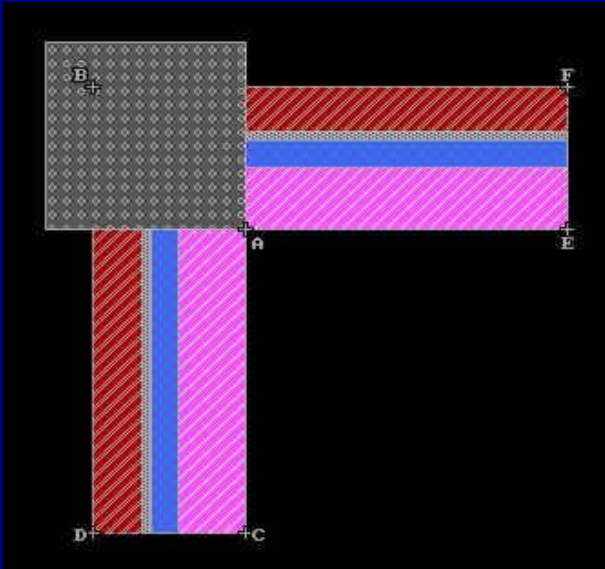


betonlatei

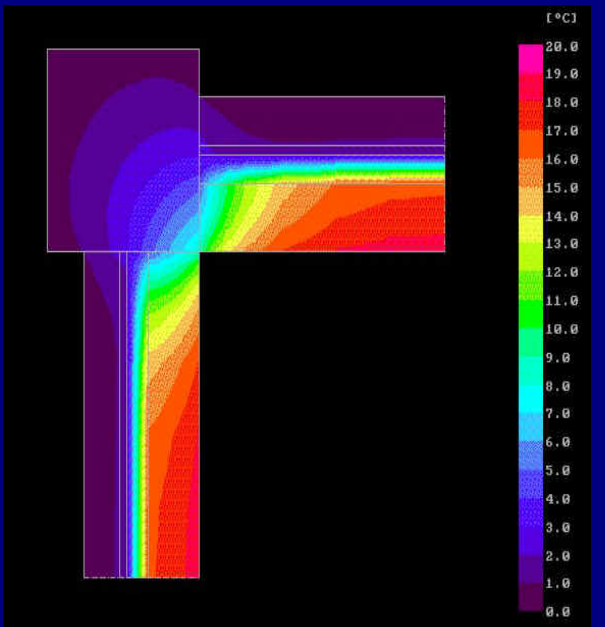
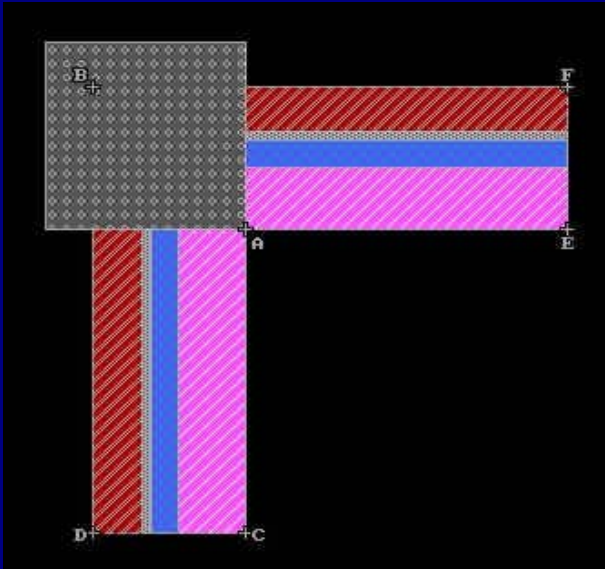
Ch

Koudebrug

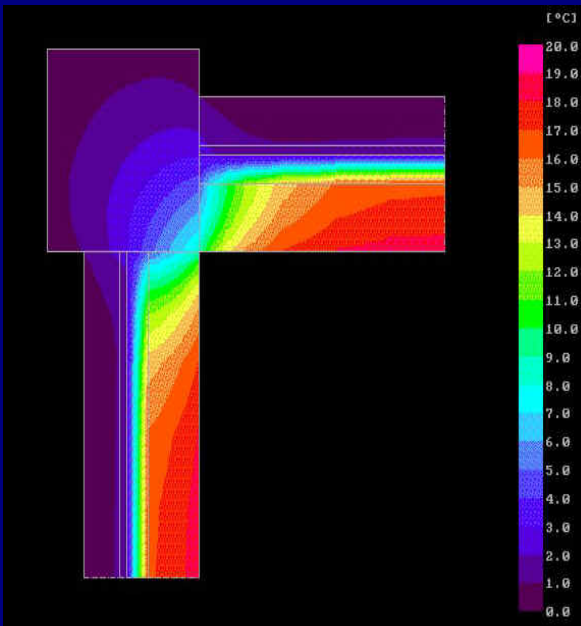
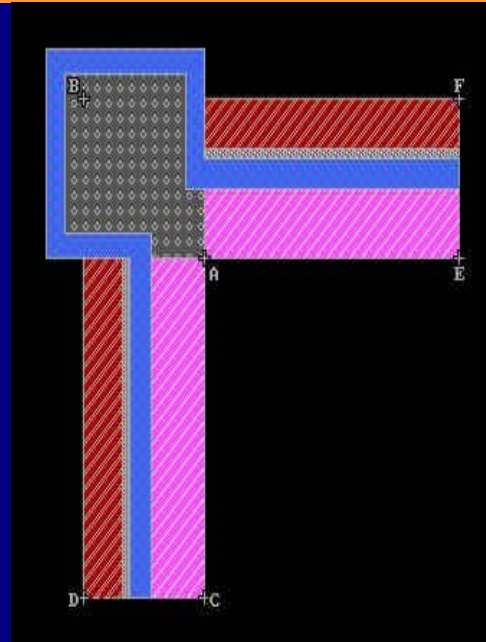
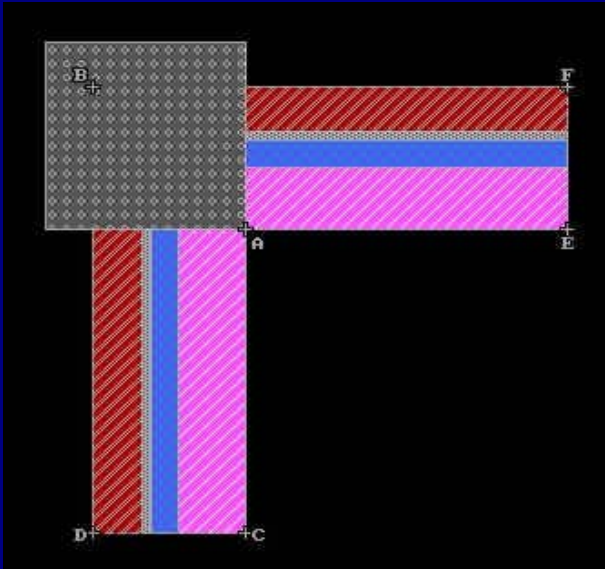




Ch



Ch



Ch

