

Prenos toplote v konstrukciji med požarom



Tomaž Hozjan

e-mail: tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si

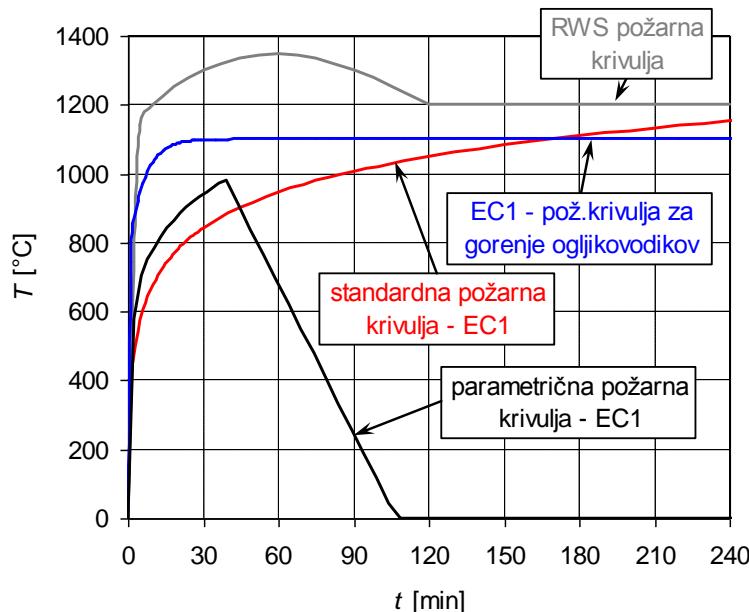
soba: 503

Postopek projektiranja konstrukcij v požarnem projektnem stanju

Pri projektni analizi konstrukcije za primer požara je treba kot relevantne upoštevati naslednje korake:

- izbira za projektiranje merodajnih požarnih scenarijev;
požarna obtežba, razvoj požara (HRR) (poznamo),
- določitev ustreznih projektnih požarov (poznamo).

Rezultat:



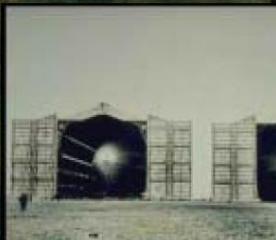
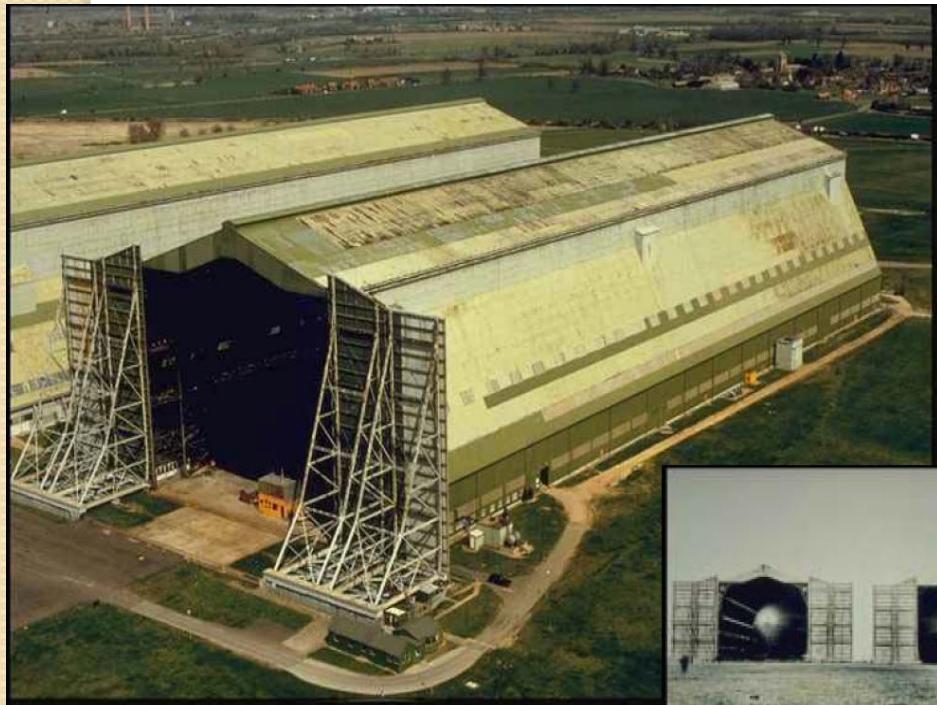
***požarne krivulje (krivulje temperatura-čas):** podajajo temperaturo plinov v okolini površine elementa kot funkcijo časa

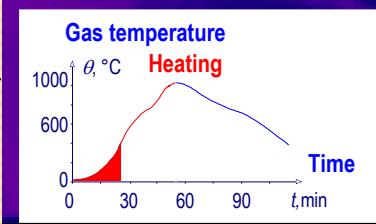
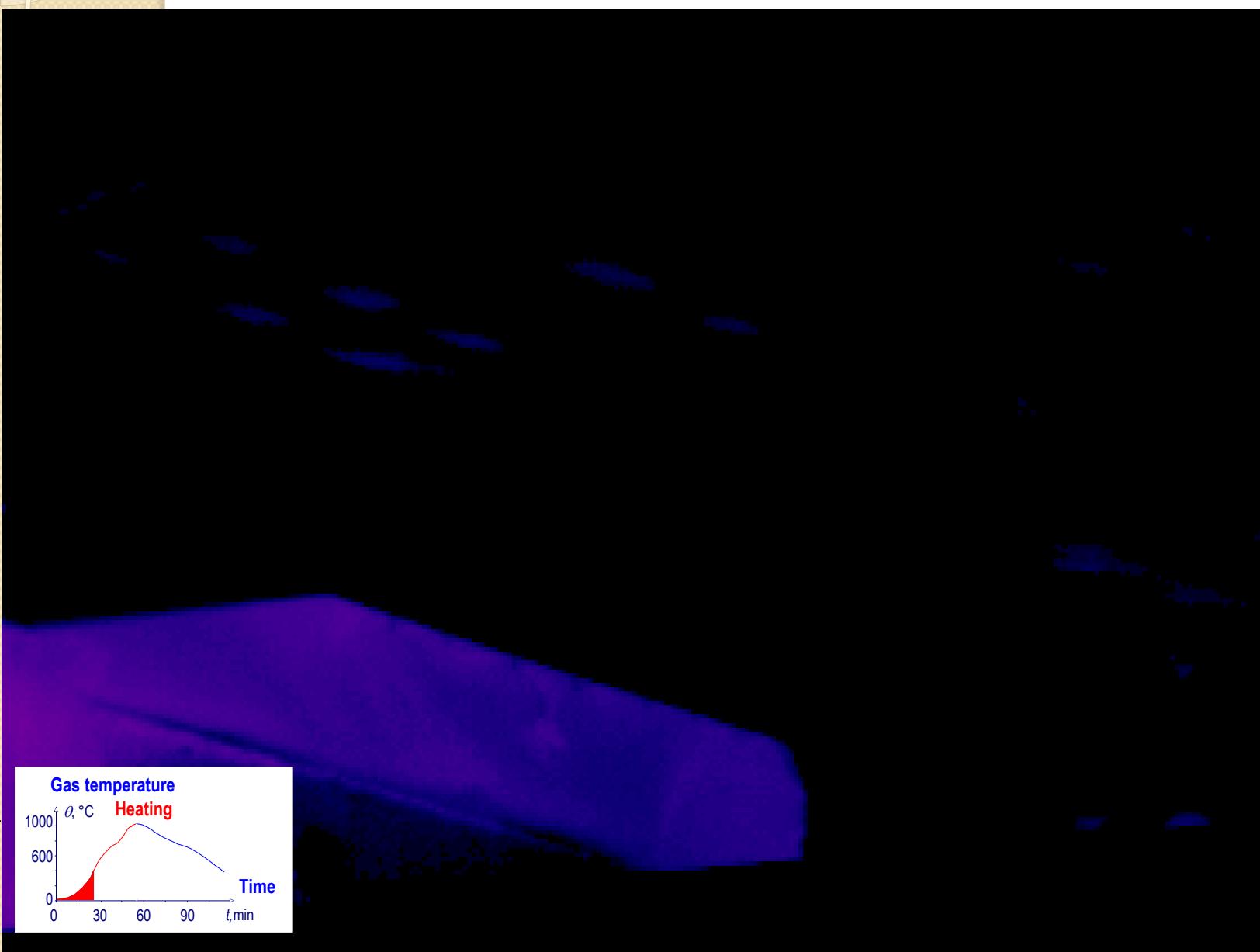
Postopek projektiranja konstrukcij v požarnem projektnem stanju

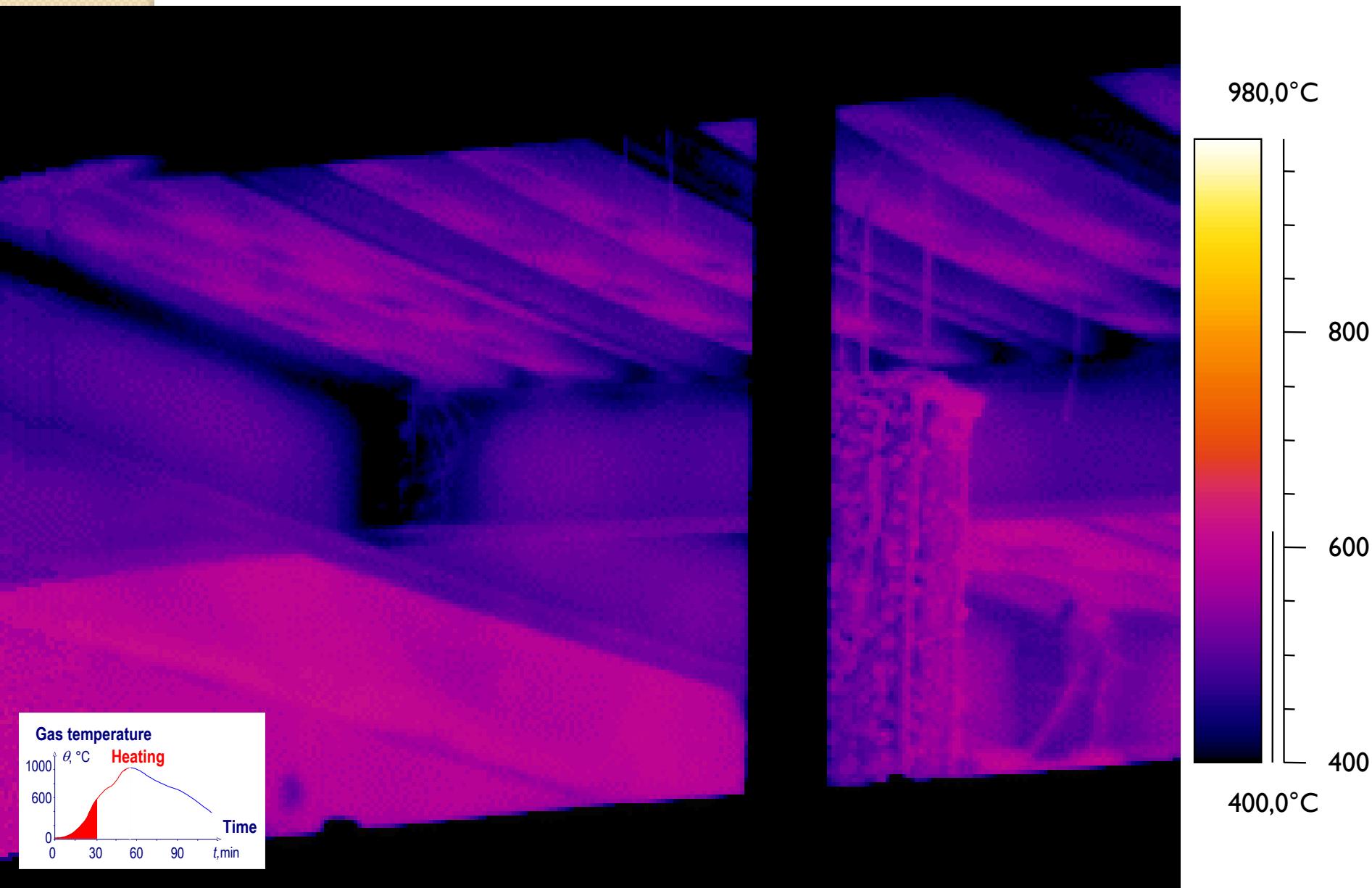
Pri projektni analizi konstrukcije za primer požara je treba kot relevantne upoštevati naslednje korake:

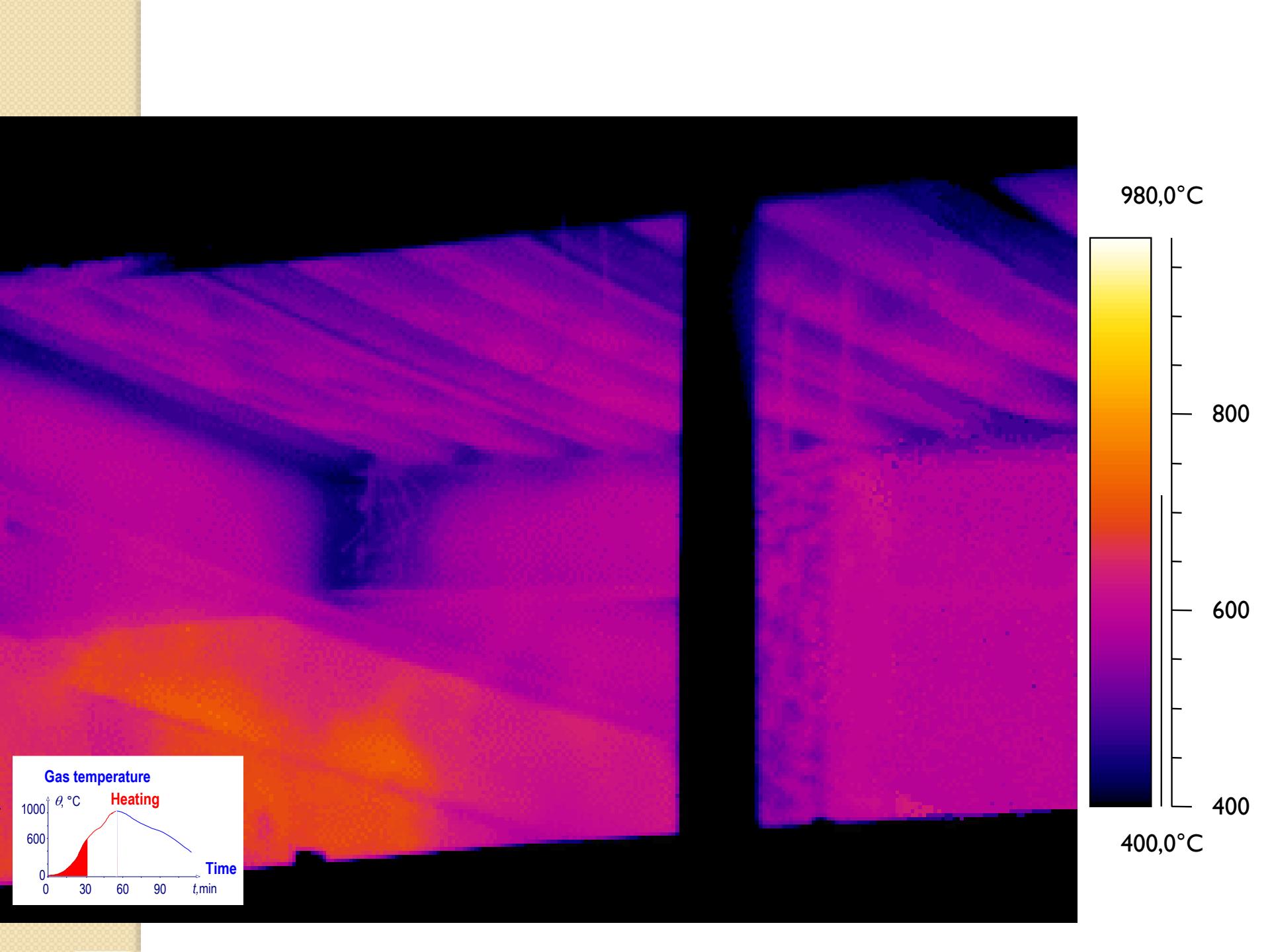
- izbira za projektiranje merodajnih požarnih scenarijev (*poznamo*)
- določitev ustreznih projektnih požarov (*poznamo*)
- **izračun razvoja temperaturnega polja konstrukcijskih elementov**
(trenutno obravnavamo)
- **CILJ:** izračun mehanskega odziva obravnavane konstrukcije v požaru (*požarna odpornost*)

Eksperiment CARDINGTON (1993, 2003)

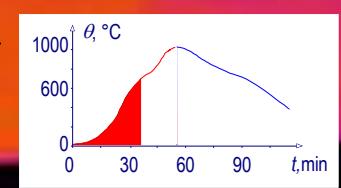
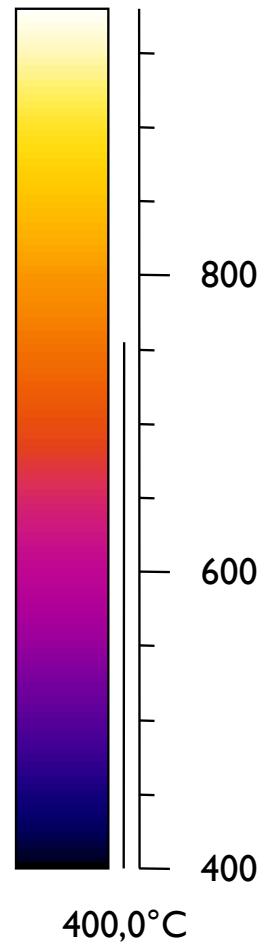


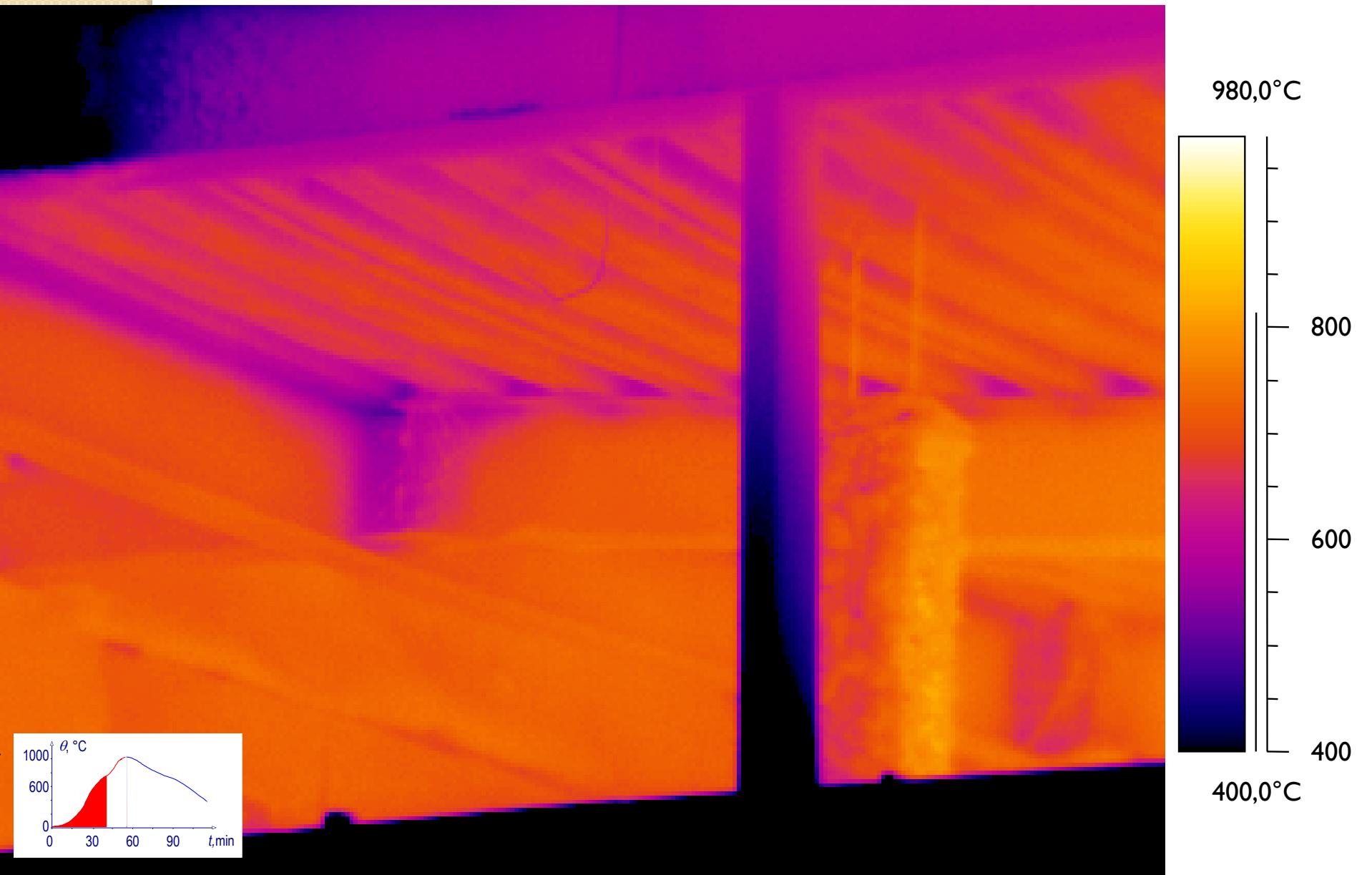


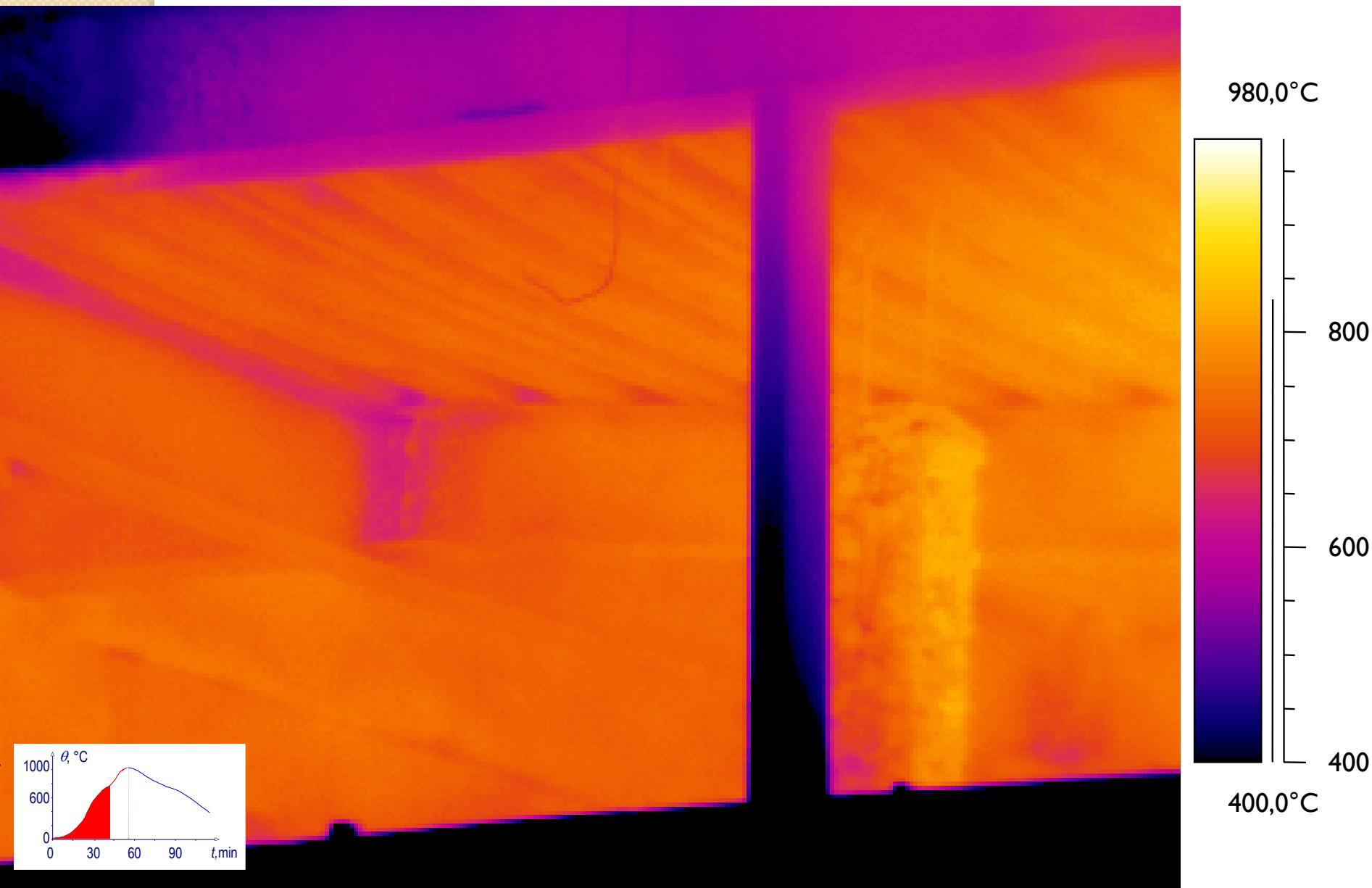


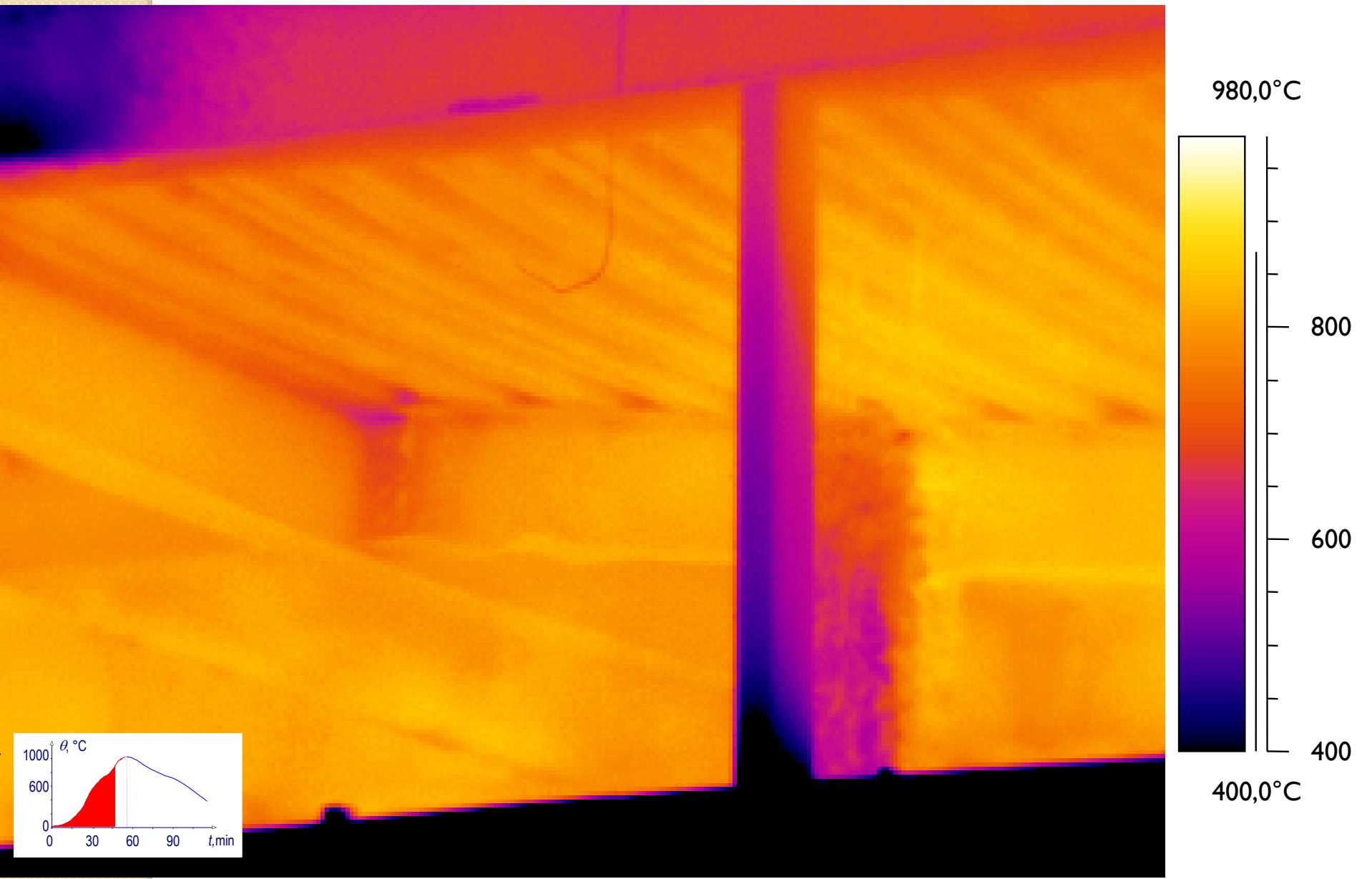


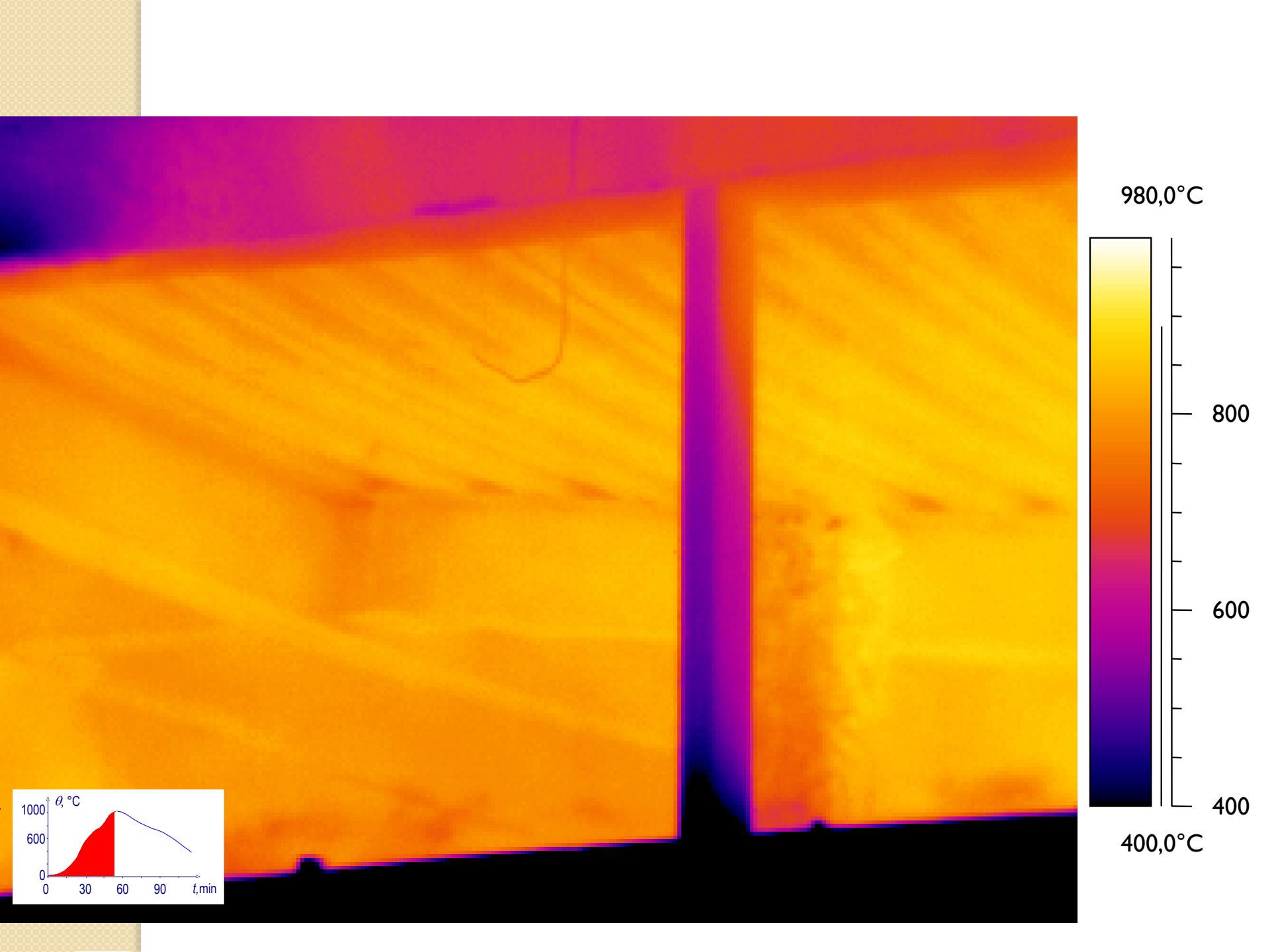
980,0°C

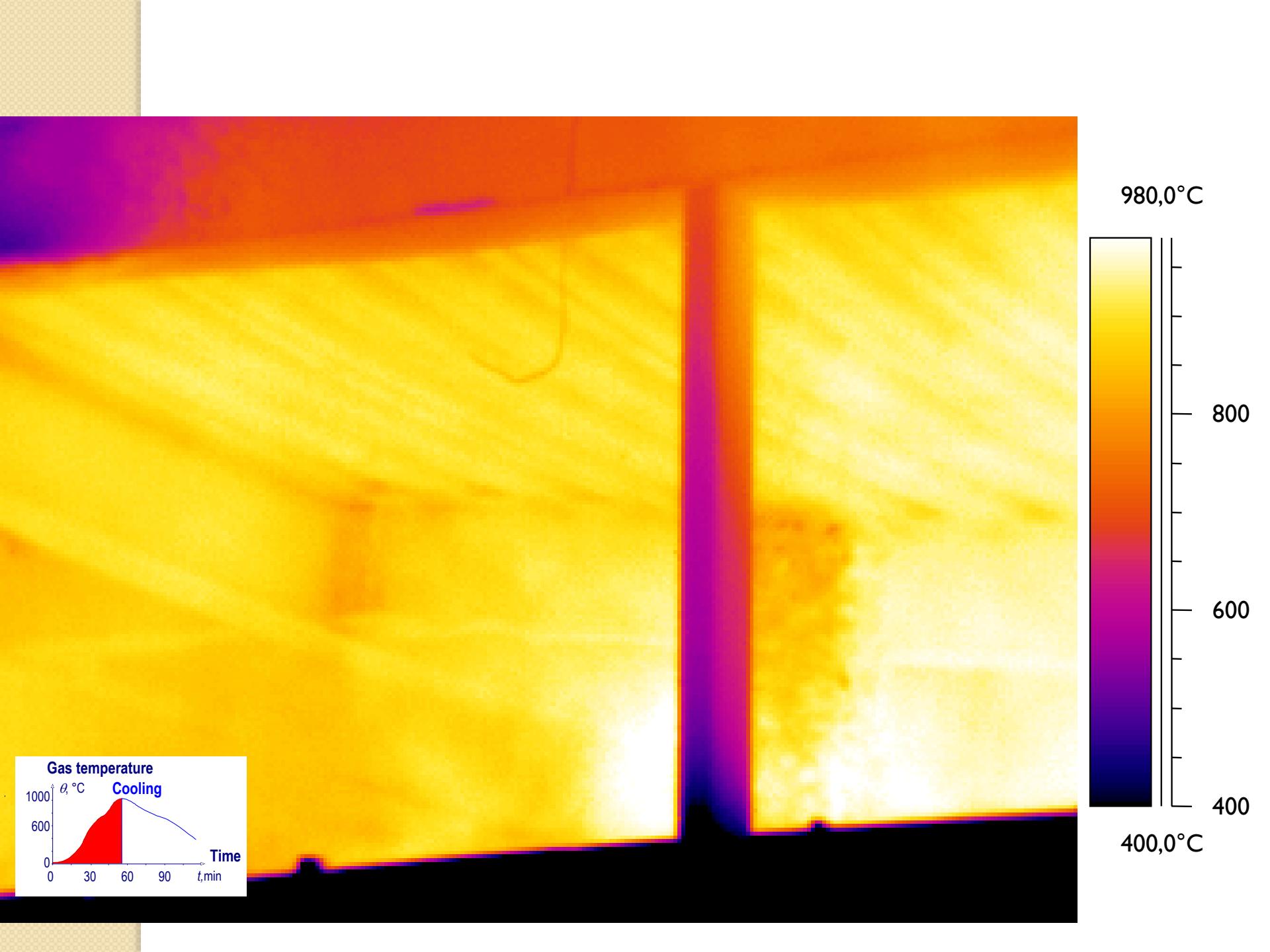






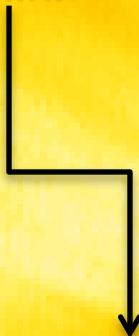






980,0°C

Največja temperatura 908,3°C
dosežena po 63 min.

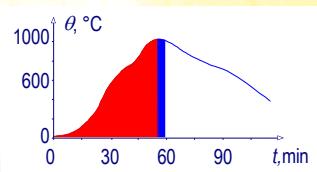


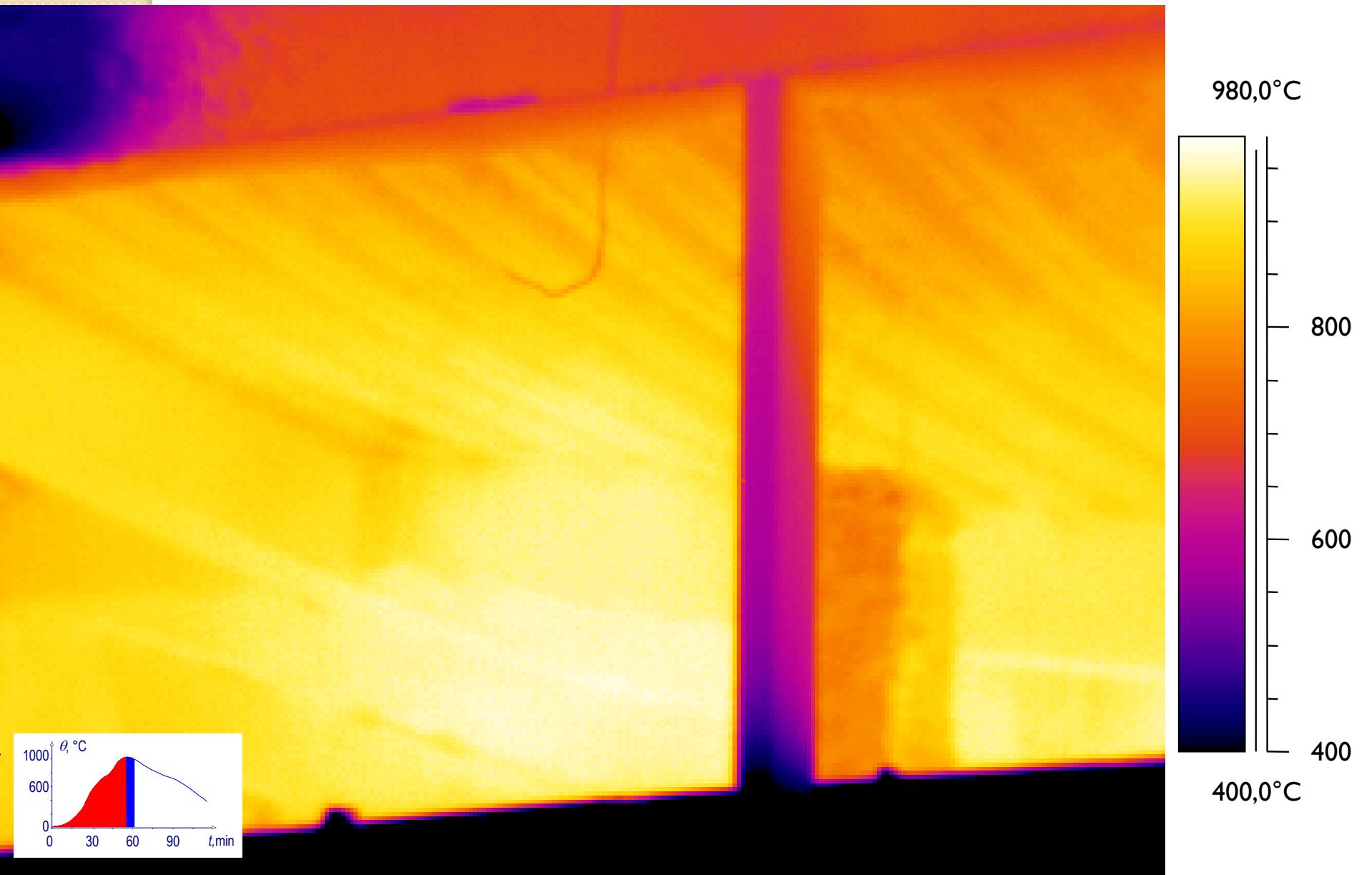
800

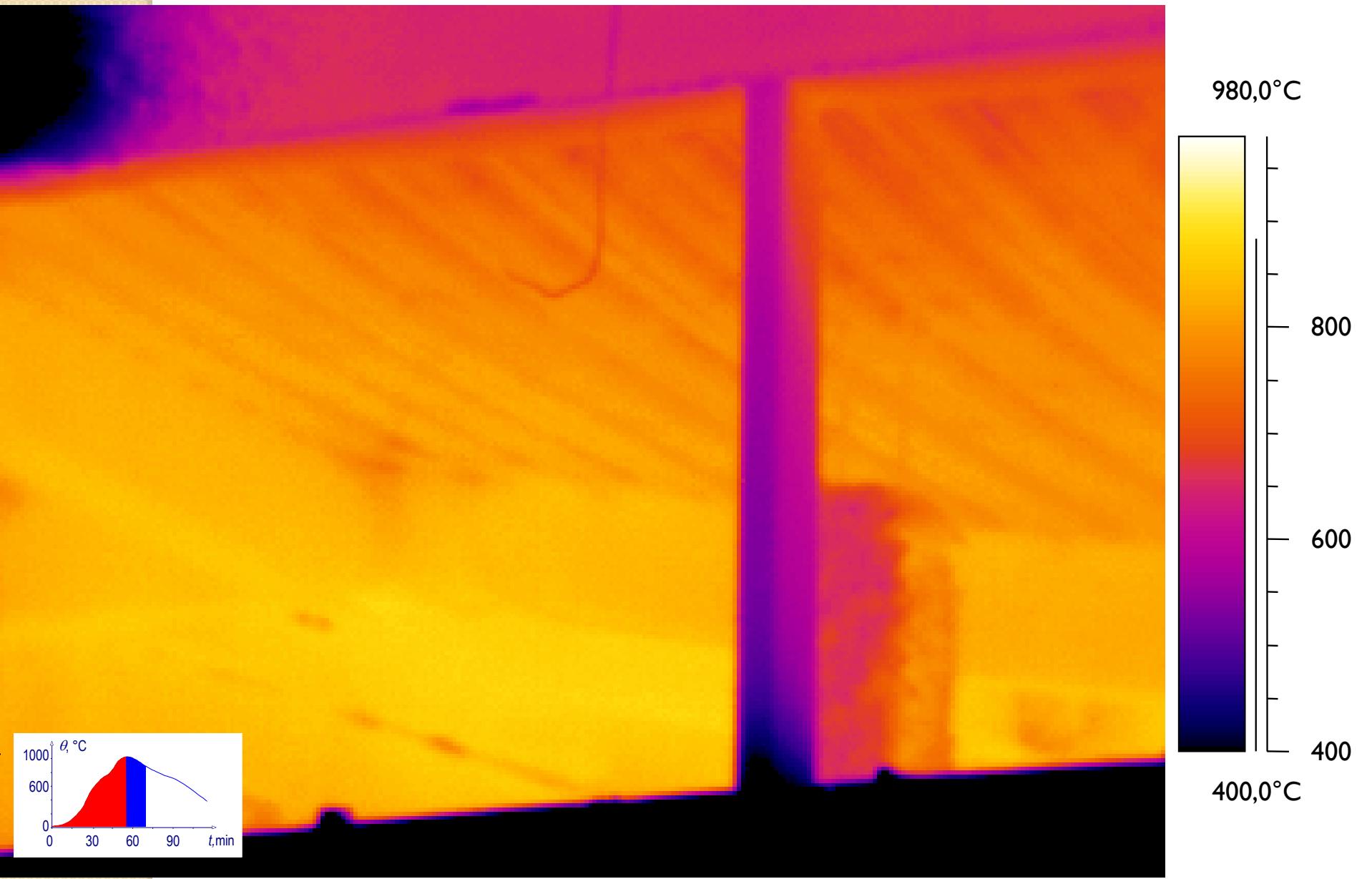
600

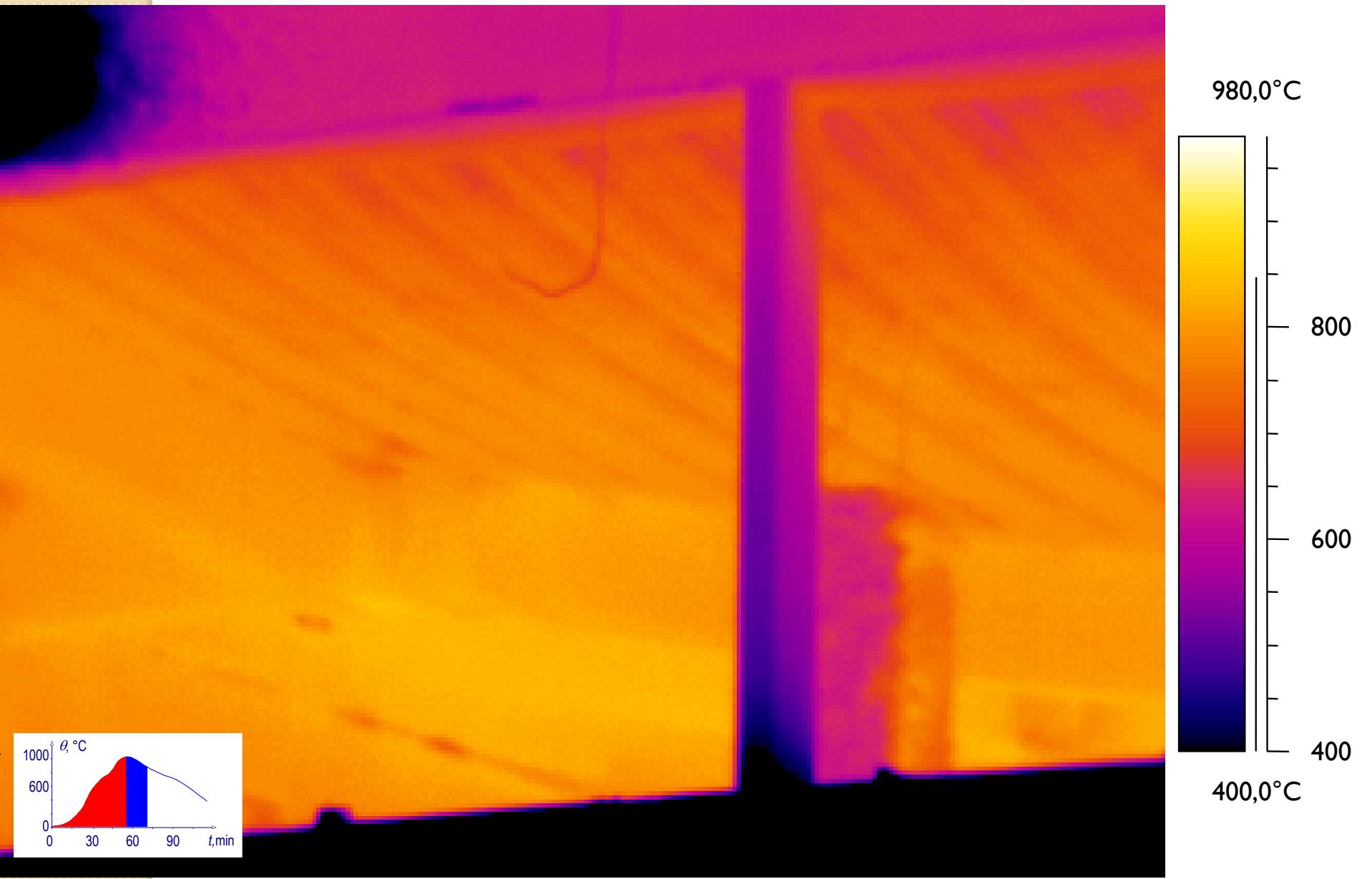
400

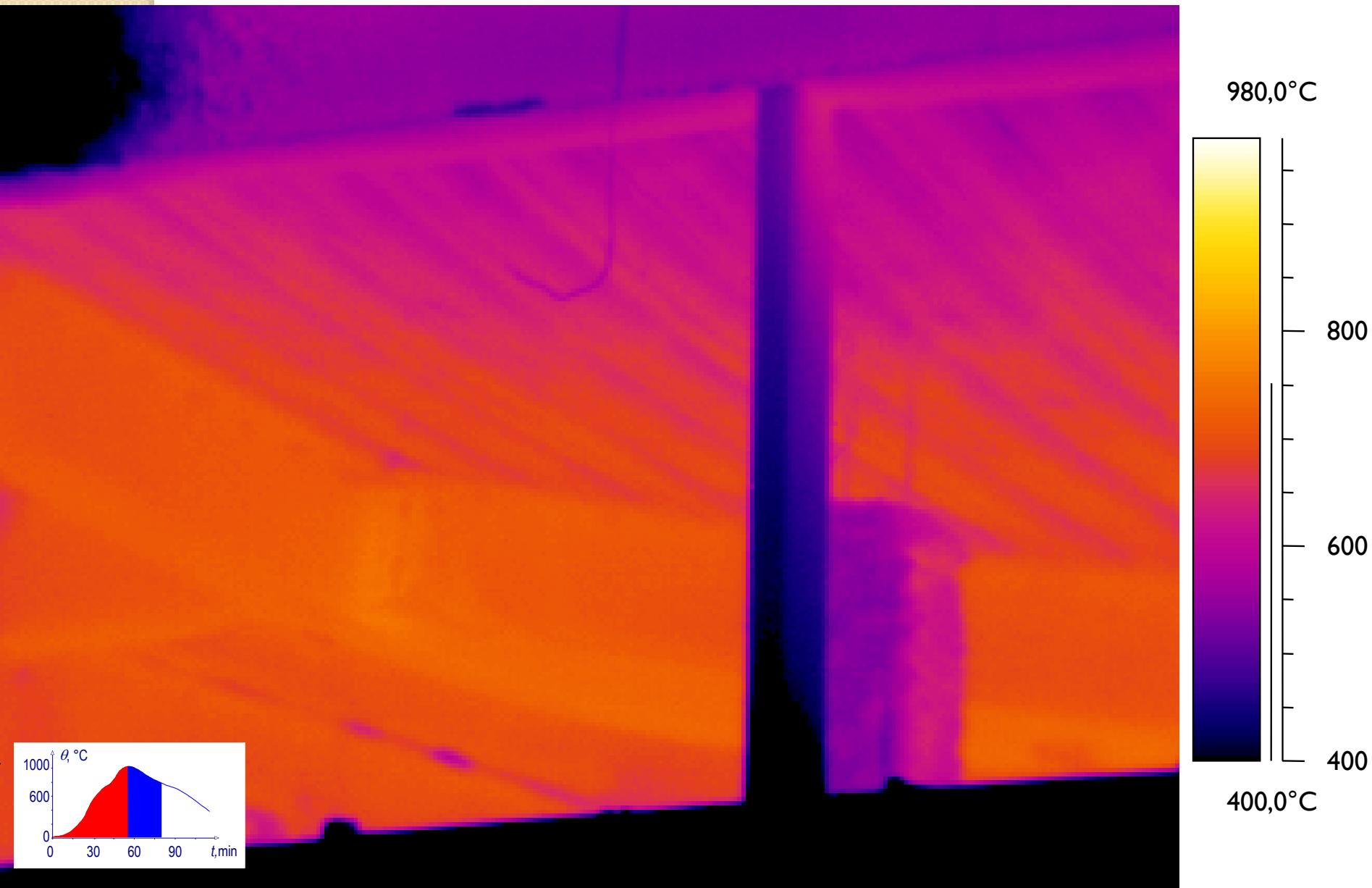
400,0°C

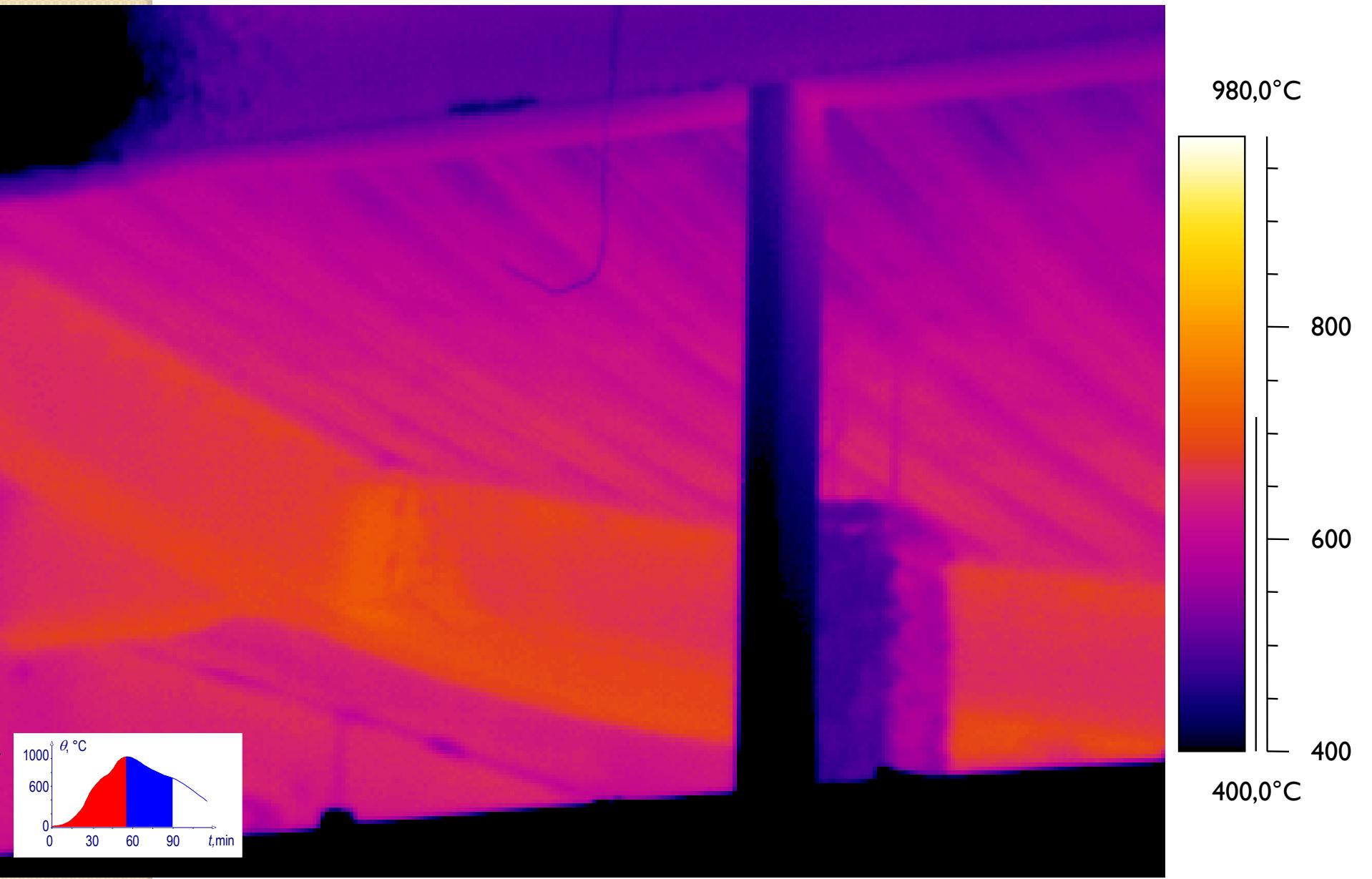


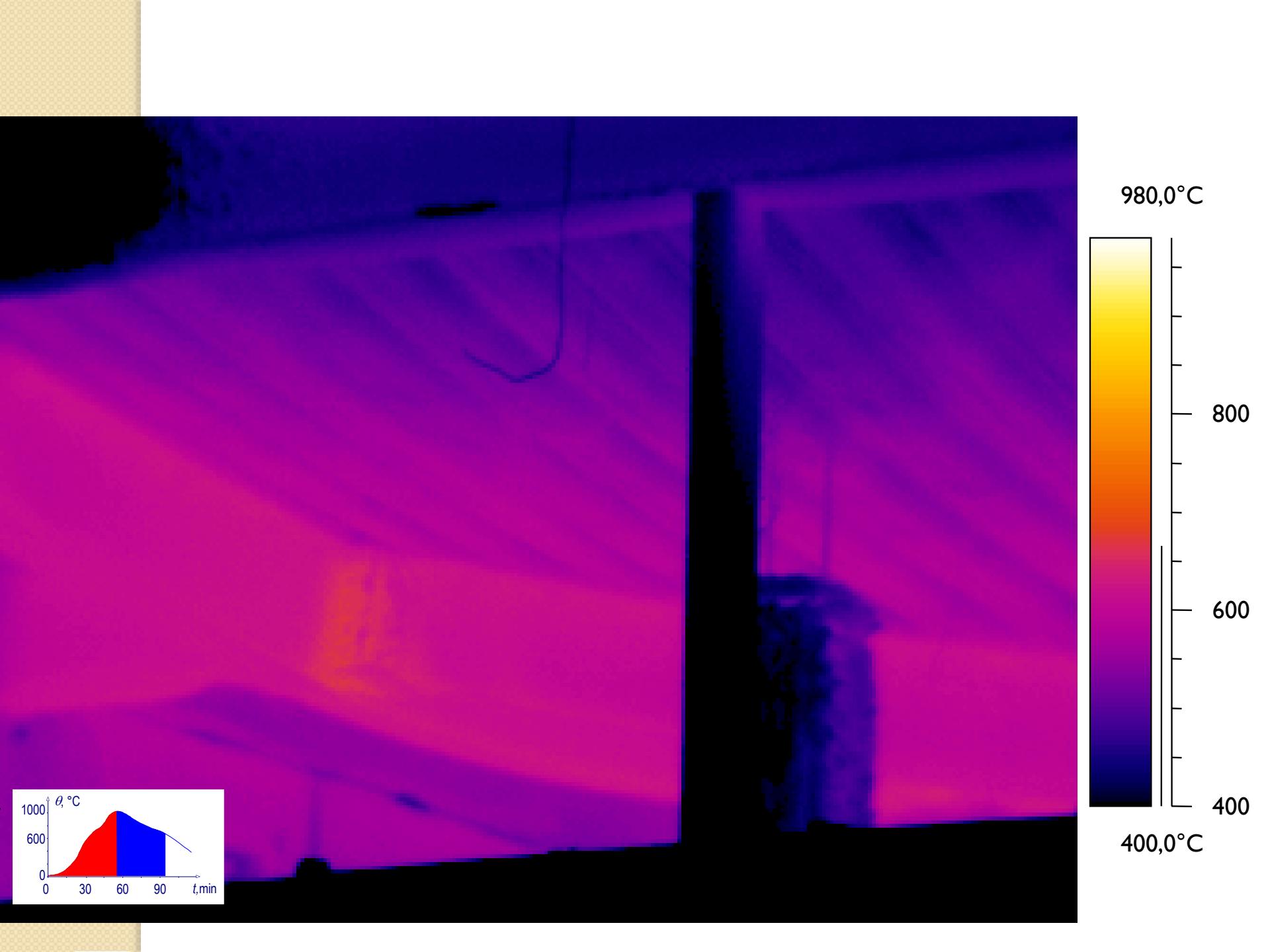


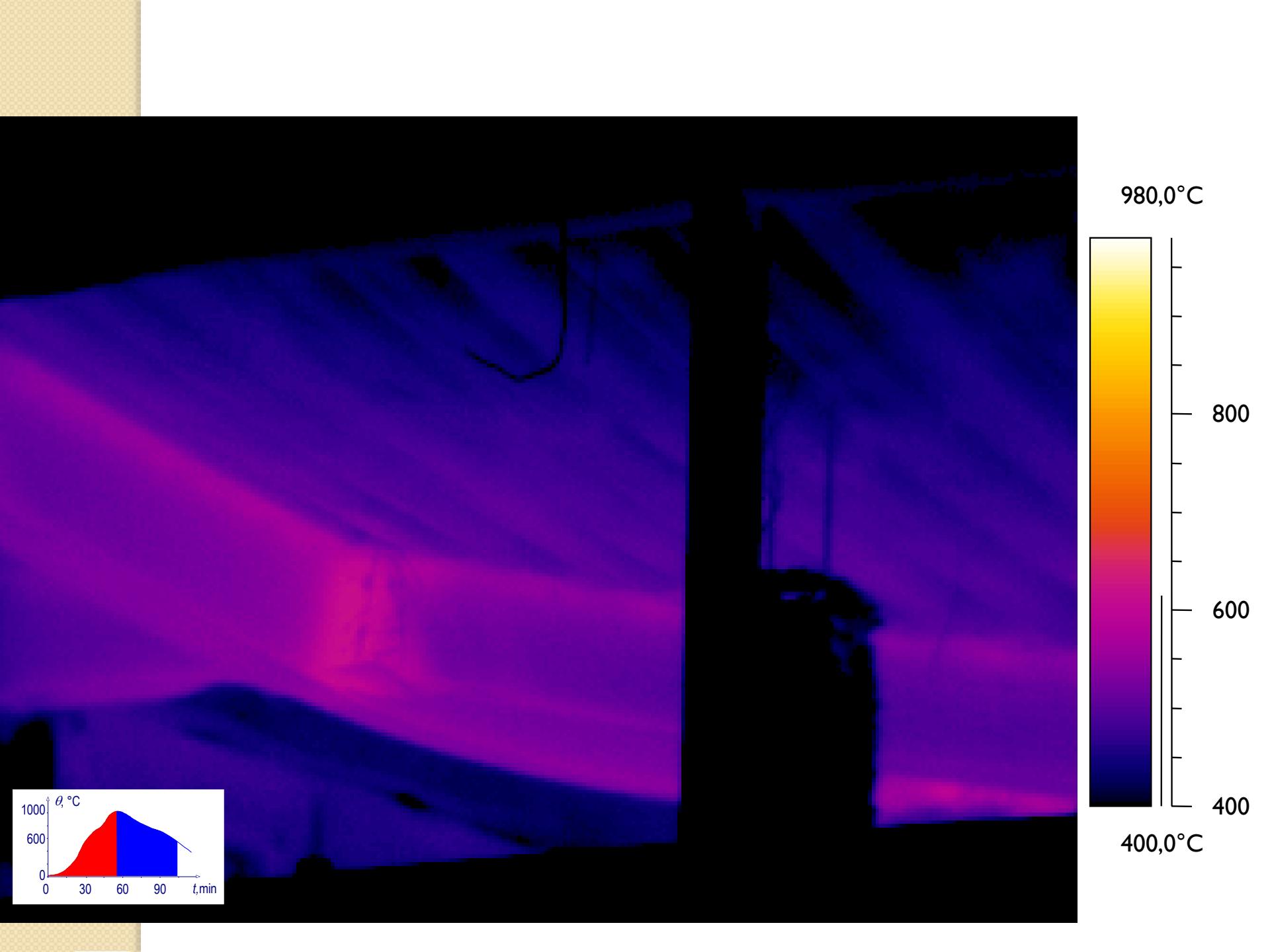




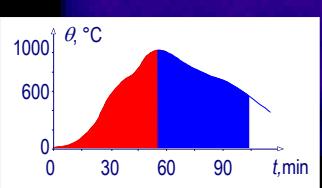
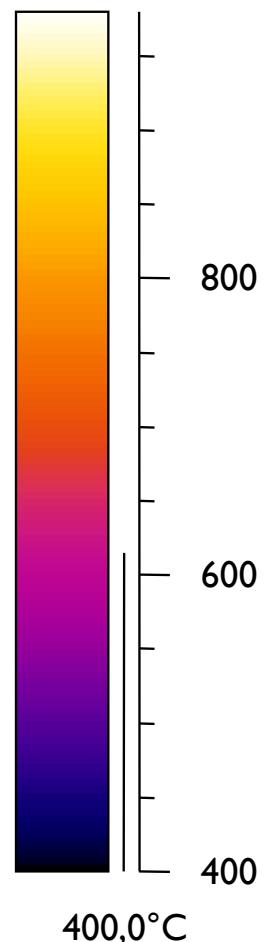




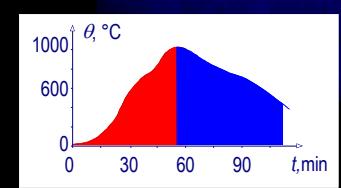
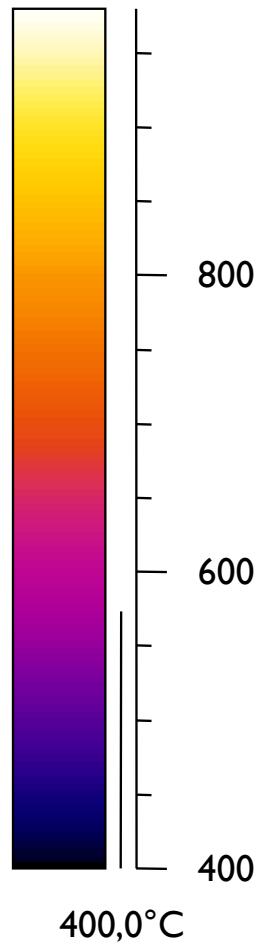


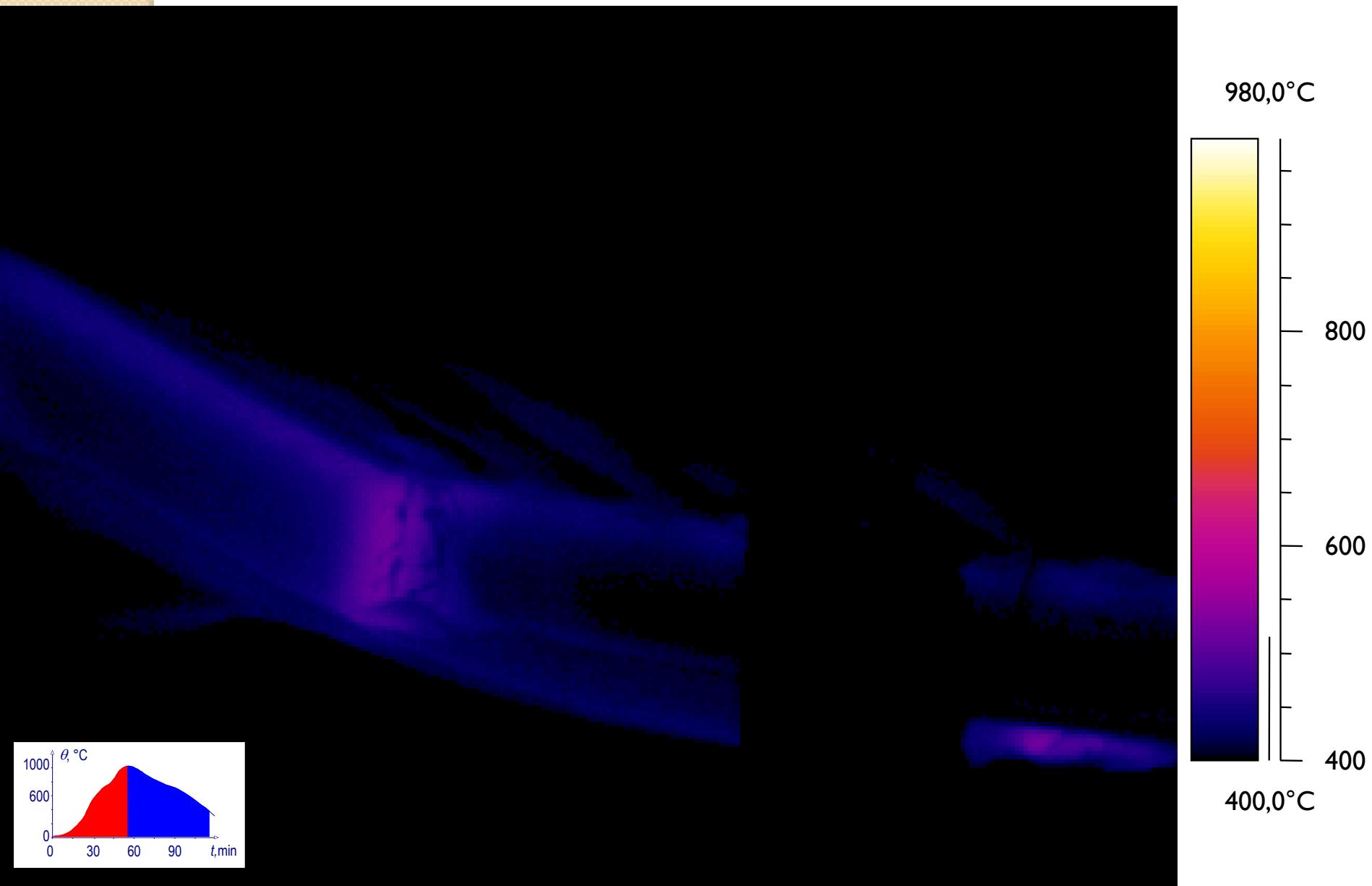


980,0°C

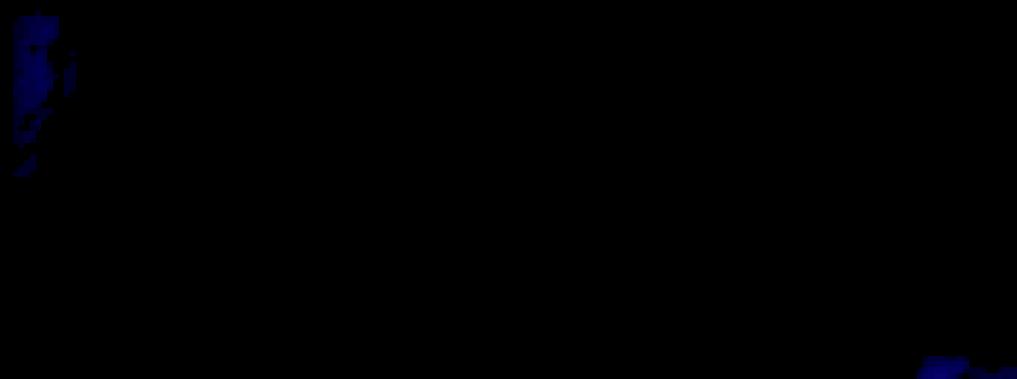


980,0°C





Po dveh urah požara temperatura v konstrukciji pada pod 400°C .



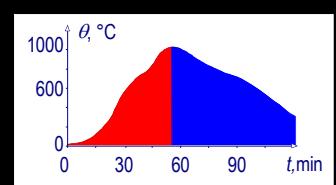
$980,0^{\circ}\text{C}$

800

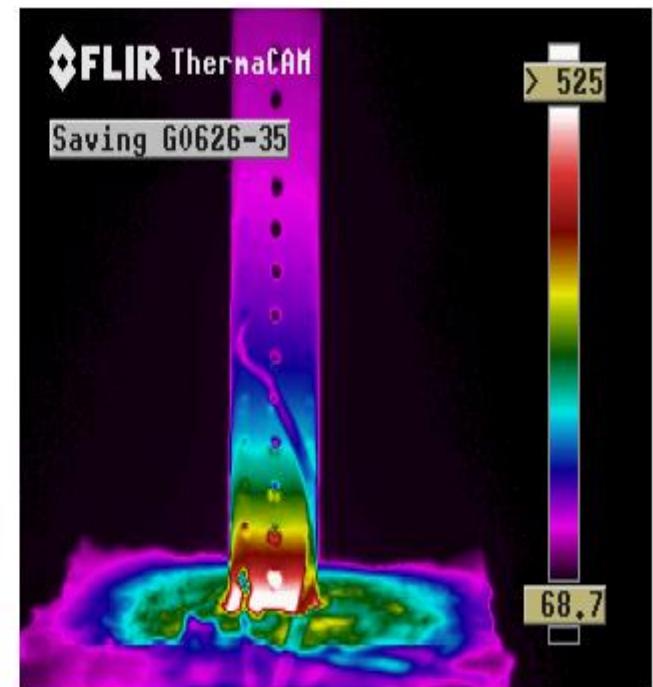
600

400

$400,0^{\circ}\text{C}$



Primer prenosa toplote v jeklenem elementu



Osnove prenosa toplote

Način prenosa toplota

- KONDUKCIJA (trdna snov)
- KONVEKCIJA (tekočine, plini)
- RADIACIJA (valovanje)

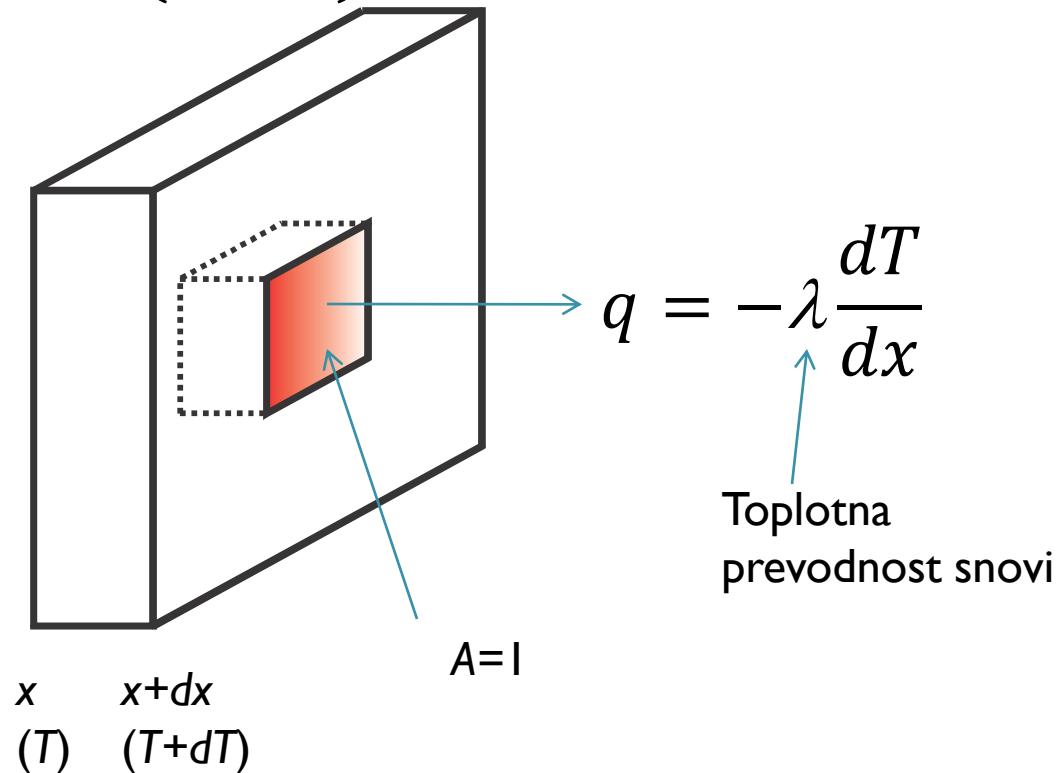
Osnove prenosa toplote v primeru POŽARA

- KONDUKCIJA (trdna snov)
 - rešujemo ta problem
- KONVEKCIJA (tekočine, plini)
 - robni pogoj
- RADIACIJA (valovanje)
 - robni pogoj

Fourierjeva enačba prevajanja toplote, stacionarno stanje

$$\frac{\dot{Q}}{A(A=1)} = q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

Gostota toplotnega toka [W/m²]



Toplotna prevodnost snovi λ

- Parameter λ ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$) je **toplotna prevodnost snovi**, ki je v splošnem **odvisna od vrste snovi, temperature in tlaka**.
- Pri zmernih tlakih je λ za trdne snovi, kapljevine in celo pline **odvisen le od temperature**.
- Kapljevine od 0,1 do 0,3 $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$.
- Kovine med nekaj 10 do nekaj 100 $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$.
- Primesi in nečistoče znižujejo prevodnost.
- Prevodnost čistih kovin z rastočo temperaturo praviloma pada.

Toplotna prevodnost nekaterih materialov pri sobni temperaturi

gradbeni material	λ (W/m·K)
kamen - granit, marmor - sadra	2,8 2,15
beton - suh, penast - gost, armiran	0,2 1,5
opeka - običajna - votla, porozna - polna, zelo gosta	0,7 0,2 1,2
notranji omet	0,7 ÷ 0,9
zunanji omet	0,9 ÷ 1,2
gibs	0,48
okensko steklo	0,78
pireks steklo	1,09
trd les - hrast - vzdolž vlaken - radialno skozi letnice	0,17 0,19
mehek les - jelka - vzdolž vlaken - radialno skozi letnice	0,11 0,14
strešna lepenka	0,15 ÷ 0,35
azbest	0,16
plutovina	0,033 ÷ 0,039
steklena volna	0,035 ÷ 0,055
kamena volna	0,040
stiropor	0,036

Notranja energija

Sprememba notranje energije zaradi segrevanja (oz. ohlajevanja) je enaka:

$$\dot{Q} = mc \frac{dT}{dt}$$

Specifična toplota
snovi

Specifična toplota snovi c_p

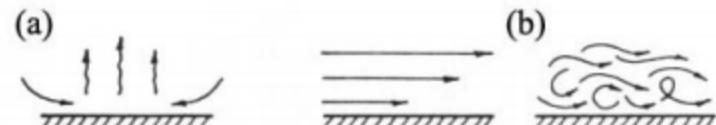
- Specifična toplota je v fiziki toplota, potrebna, da en kilogram snovi segrejemo za en kelvin [J/kgK]
- Pri homogenih telesih je specifična toplota enaka toplotni kapaciteti na enoto mase telesa.

Snov	c_p [J/kgK]
voda	4200
jeklo	450
beton	1000
les	1360

Prenos toplote med požarom

KONVEKCIJA

- Ko je prvotno mirujoča tekočina v stiku s toplejšo površino, se njeni deli segrevajo, posledično pade njihova gostota, zato se zaradi vzgona pričnejo dvigati, na njihovo mesto pa doteka sveža tekočina - **naravna konvekcija (a)**.
 - Takšno gibanje makroskopskih delcev povzroči bistveno hitrejši prenos toplote, kot je sam prevod skozi tekočino.
- Ko je gibanje tekočine povzročeno npr. z mešalom, črpalko ali ventilatorjem, govorimo o **prisilni konvekciji (b)**.
 - Mešanje tekočinskih delcev se vrši predvsem zaradi vztrajnostnih sil, ki lahko prevladujejo nad vzgonskimi, zato je prestop toplote še intenzivnejši, kot pri naravni konvekciji.



Prenos toplote med požarom

KONVEKCIJA

- Zapišemo z enačbo (Newtonov zakon prestopanja toplote):

$$q = h(T_{fi} - T_s)$$

- h – prestopni toplotni koeficient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
- T_{fi} – temperatura zraka v okolini elementa
- T_s – temperatura na površini elementa

- h – prestopni toplotni koeficient
[W/m²K]

vrsta konvekcije	α (W/m ² K)
naravna konvekcija plinov	2 ÷ 25
naravna konvekcija kapljevin	50 ÷ 1000
prisilna konvekcija plinov	25 ÷ 250
prisilna konvekcija vode	250 ÷ 15 000
vrela voda	2500 ÷ 25 000
kondenzirajoča para	5 000 ÷ 100 000

Prenos toplote med požarom

RADIACIJA

- Sevanje je elektromagnetno valovanje. Znotraj snovi se valovi absorbirajo, do izraza pa pridejo valovi, ki jih sevajo gradniki tik pod površjem snovi.
- Prenos toplote s sevanjem se razlikuje od konduktivnega in konvektivnega prenosa toplote
 - prvič po tem, da se lahko vrši tudi skozi prazen prostor in
 - drugič, da je prenesena toplota sorazmerna temperaturi na četrto potenco.
 - Čeprav pri sobni temperaturi seva vsaka snov, je večinoma potrebno sevalni prenos toplote pride do izraza pri **visokih temperaturah (požar)**.

Prenos toplote med požarom

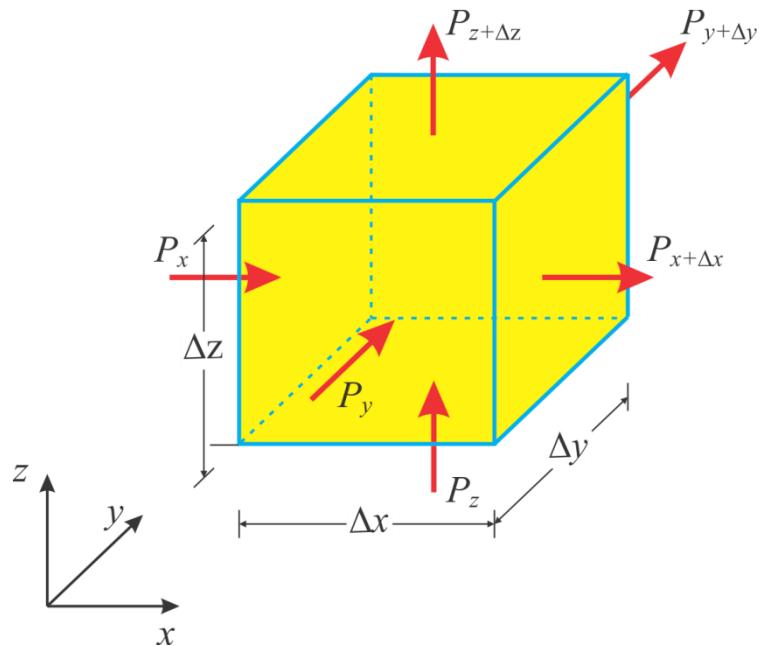
RADIACIJA

- Stefanov zakon:

$$q = \sigma \varepsilon_{res} (T_{fi}^4 - T_s^4)$$

- ε_{res} – resultirajoča emisivnost $\varepsilon_{res} = \varepsilon_{fi} \varepsilon_m$
- T_{fi} – temperatura zraka v okolini elementa
- T_s – temperatura na površini elementa
- σ – Stefan-Boltzmanova konstanta
 $5.6697 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$

Prenos toplote po trdni snovi (kondukcija, nestacionarno stanje)



Zakon o ohranitvi energije (kocka velikosti $\Delta x, \Delta y, \Delta z$):

$$\left(\begin{array}{c} \text{Toplotni tok} \\ \text{pri } x, y, z \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Toplotni tok} \\ \text{pri } x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Toplotni tok} \\ \text{zaradi toplotnega} \\ \text{vira v telesu} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Spremembra} \\ \text{notranje energije} \\ \text{zaradi segrevanja/ohlajjanja} \end{array} \right)$$

Fourierjeva parcialna diferencialna enačba za prenos toplote po trdni snovi (kondukcija)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \frac{d\bar{Q}_n}{dt} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Posebni primeri enačbe

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \frac{d\bar{Q}_n}{dt} = 0 \quad \text{Stacionarno stanje, (Poissonova En.)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Nestacionarno stanje brez notranjega vira, (Fourierova En.)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}) = 0 \quad \text{Stacionarno stanje brez notranjega vira, (Laplaceova En.)}$$

Reševanje Fourierjeve parcialne diferencialne enačba za prenos toplote po trdni snovi (kondukcija)

Upoštevanje ustreznih začetnih in robnih pogojev

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$$

Kjer je T_0 znana funkcija koordinat (x, y, z)

Robni pogoji:

- predpisana temperatura
- predpisana gostota toplotnega toka
- konvekcija
- sevanje
- konvekcija+sevanje

Reševanje Fourierjeve parcialne diferencialne enačba za prenos toplote po trdni snovi (kondukcija)

Robni pogoji, predpisana gostota temperaturnega toka

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} e_{nx} + \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} \right) \Big|_{x_r, y_r, z_r} = q_z(t)$$

Poseben primer toplotno izolirana zunanja ploskev

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} e_{nx} + \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} \right) \Big|_{x_r, y_r, z_r} = 0$$

Poseben primer, kontakt dveh teles A in B

$$q_A = q_B \quad \xrightarrow{1D} \quad -\lambda_A \frac{\partial T_A(x_c, t)}{\partial x} = -\lambda_B \frac{\partial T_B(x_c, t)}{\partial x}$$

$$T_A(x_c, t) = T_B(x_c, t)$$

Robni pogoji, konvekcija in sevanje



Konvekcija

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} e_{nx} + \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} \right) \Big|_{x_r, y_r, z_r} = h_c [T(x_r, y_r, z_r) - T_a]$$

Kjer je h_c prestopni koeficient.

SIST EN 1991-1-2, priporoča za normalne požare (ISO 834) vrednost 25 W/m²K, za CH-pa 50 W/m²K, za parametričen požar pa 50 W/m²K

Sevanje

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} e_{nx} + \frac{\partial T}{\partial y} e_{ny} + \frac{\partial T}{\partial z} e_{nz} \right) \Big|_{x_r, y_r, z_r} = \sigma e [T(x_r, y_r, z_r)^4 - T_r^4]$$

Kjer je T_r temperatura sevajočih predmetov v okolini, e pa rezultirajoča emisivnost .

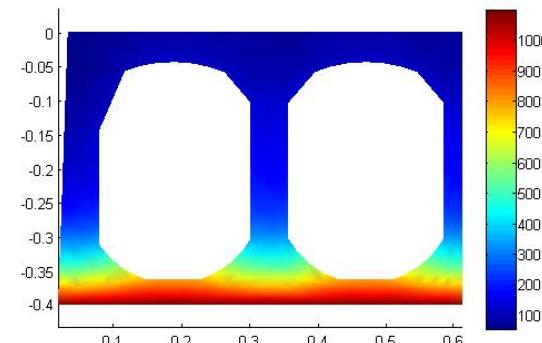
$$e = e_m e_f \quad \text{SIST EN 1991-1-2}$$

Reševanje enačbe prevajanja toplote po trdni snovi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \frac{d\bar{Q}_n}{dt} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Analitična rešitev običajno ni možna.

- posebni primeri:
 - stacionarno in nestacionarno prevajanje toplote skozi steno
- Poslužujemo se numeričnih metod
 - defirenčna metoda
 - metoda končnih elementov
 - HeatC (FGG)
 - Josip (FGG)
 - MoistureHeat, Heatko, (FGG (MatLab))
 - mnogo komercialnih programov (Safir, Ansys, Comsol,....)



Poseben primer, prenos toplote v jeklenih elementih

- Predpostavimo, da je temperatura v vsakem trenutku enakomerna po celotnem elementu konstrukcije.
- Predpostavimo, da je tudi temperatura v okolici obravnavanega elementa konstrukcije enakomerna in da je specifični površinski toplotni pretok konstanten po celotni površini elementa.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$

k_{sh}

A_m / V

A_m

V

c_a

ρ_a

\dot{h}_{net}

Δt

korekcijski faktor za vplive zasenčenja,
faktor prereza za nezaščiten jekleni element
[m⁻¹],

površina elementa na enoto dolžine [m²/m],

volumen elementa na enoto dolžine [m³/m],

specifična toplota jekla [J/kgK],

gostota jekla [kg/m³],

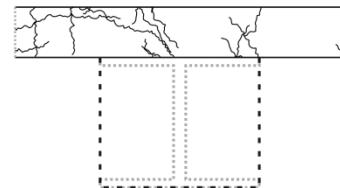
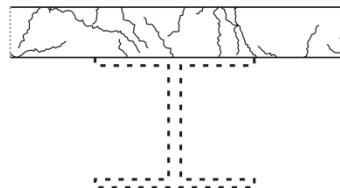
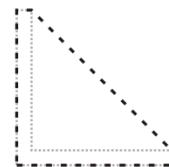
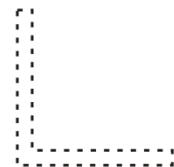
projektna vrednost neto toplotnega toka,
časovni interval [s].

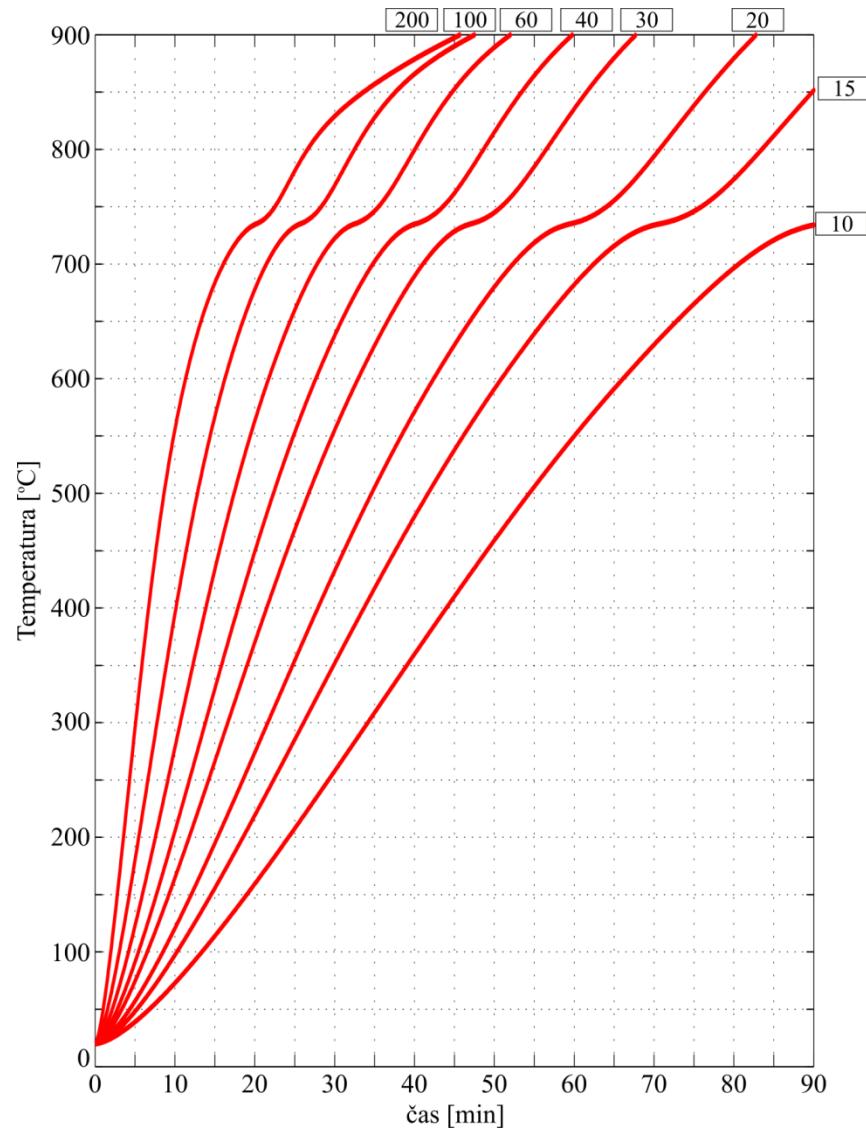
Površina prereza A_m in površina namišljene škatle $A_{m,b}$

A_m



$A_{m,b}$





Časovni razvoj temperature nezaščitenih jeklenih elementov izpostavljenim standardnemu požaru ISO 834 za različne faktorje prereza

Poseben primer, prenos toplote v izoliranih jeklenih elementih

- Predpostavimo, da je temperatura v vsakem trenutku enakomerna po celotnem elementu konstrukcije.
- Temelji na več predpostavkah debelina izolacije je majhna (Wickstrom),

$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{1 + \phi / 3} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta \theta_{g,t},$$

- Pomen oznak na naslednjem slajdu.

Pomen oznak

A_p / V faktor prereza zaščitenega jeklenega elementa [m^{-1}],

A_p ustrezena površina materiala požarne zaščite elementa na enoto dolžine elementa [m^2/m],

V volumen elementa na enoto dolžine [m^3/m],

c_a specifična toplota jekla [J/kgK],

c_p specifična toplota materiala za požarno zaščito [J/kgK],

d_p debelina materiala za požarno zaščito,

Δt časovni interval [s],

$\theta_{a,t}$ temperatuta jekla v času t [${}^\circ\text{C}$],

$\theta_{g,t}$ temperatuta plinov v požarnem sektorju v času t [${}^\circ\text{C}$],

$\Delta\theta_{g,t}$ povečanje temperature plinov v požarnem sektorju v časovnem intervalu Δt [K],

λ_p toplotna prevodnost sistema požarne zaščite [W/mK],

ρ_a gostota jekla [kg/m^3],

ρ_p gostota materiala požarne zaščite.

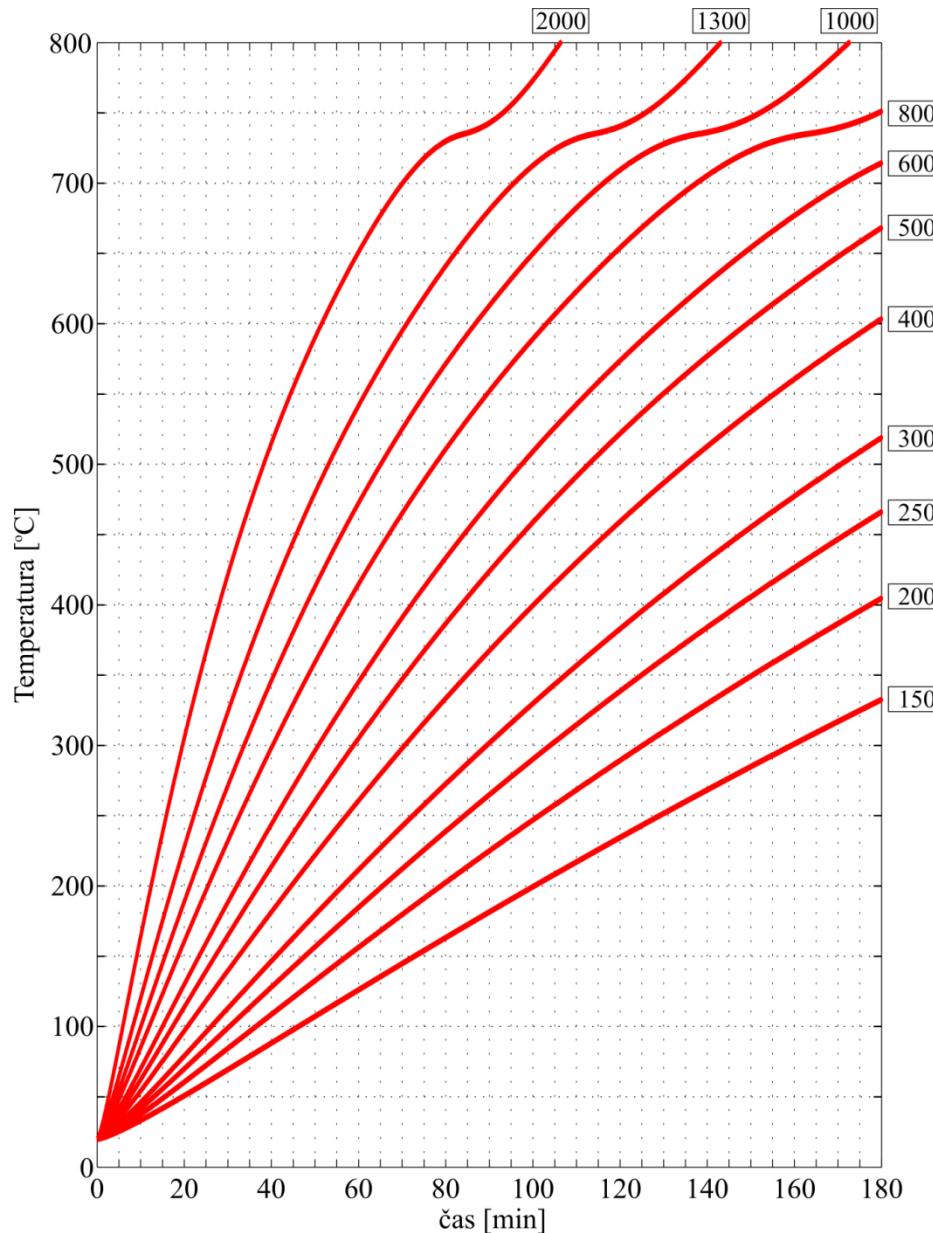
Poseben primer, prenos toplote v izoliranih jeklenih elementih

- Enačbo lahko dodatno poenostavimo, s tem da zanemarimo specifično toploto materiala za požarno zaščito c_p , s tem je člen Φ , ki nastopa v enačbi enak 0, in dobimo naslednjo poenostavljeni enačbo:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{d_p V} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{c_a \rho_a} \Delta t.$$

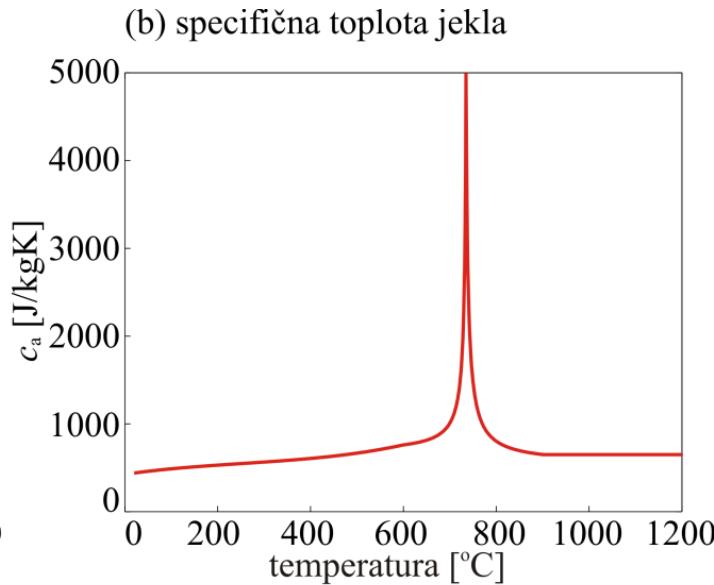
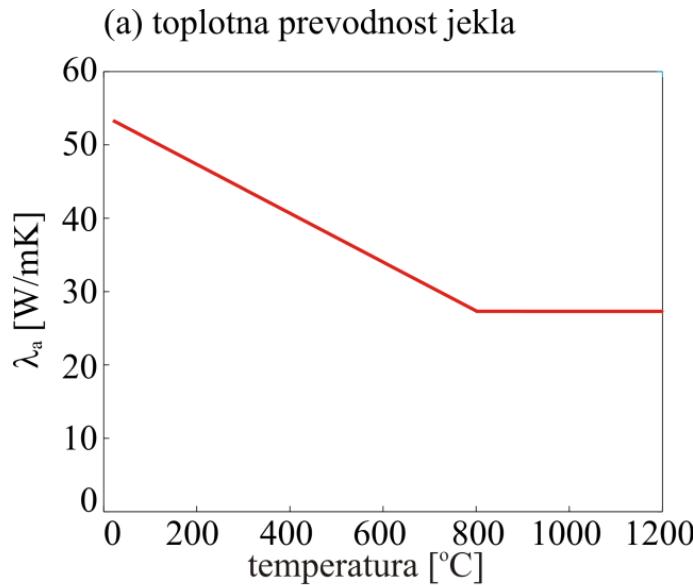
- Parametre, ki opisujejo jeklen prečni rez in lastnosti materiala za požarno zaščito lahko združimo v en sam parameter

$$k_p = \frac{\lambda_p A_p}{d_p V}.$$



Časovni razvoj temperature zaščitenih jeklenih elementov izpostavljenim standardnemu požaru ISO 834 za različne faktorje k_p [W/m³K].

Termične lastnosti jekla pri povišani temperaturi

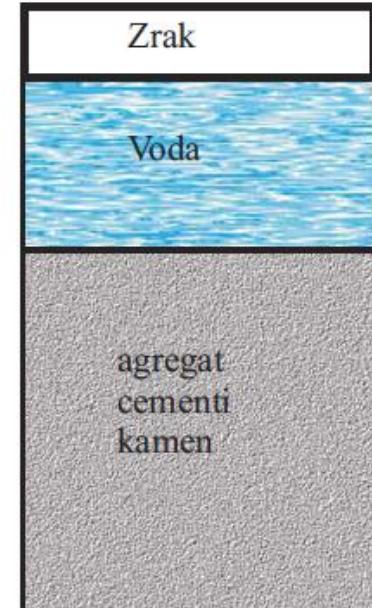
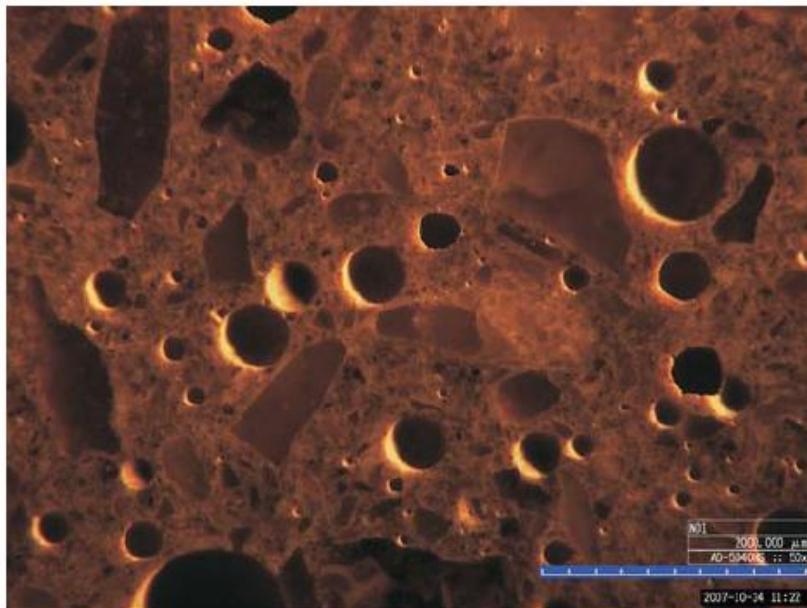


(a) Spreminjanje toplotne prevodnosti jekla v odvisnosti od temperature. (b) Spreminjanje specifične toplote jekla v odvisnosti od temperature.

Prenos toplote po betonskih elementih

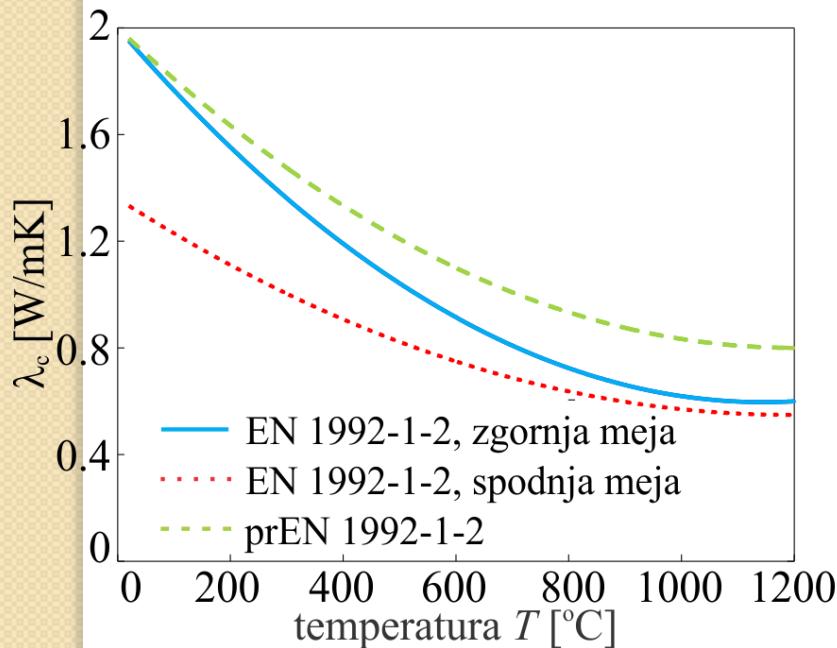
Beton je porozen medij

poleg prenosa toplote + masni prenos (vlaga)

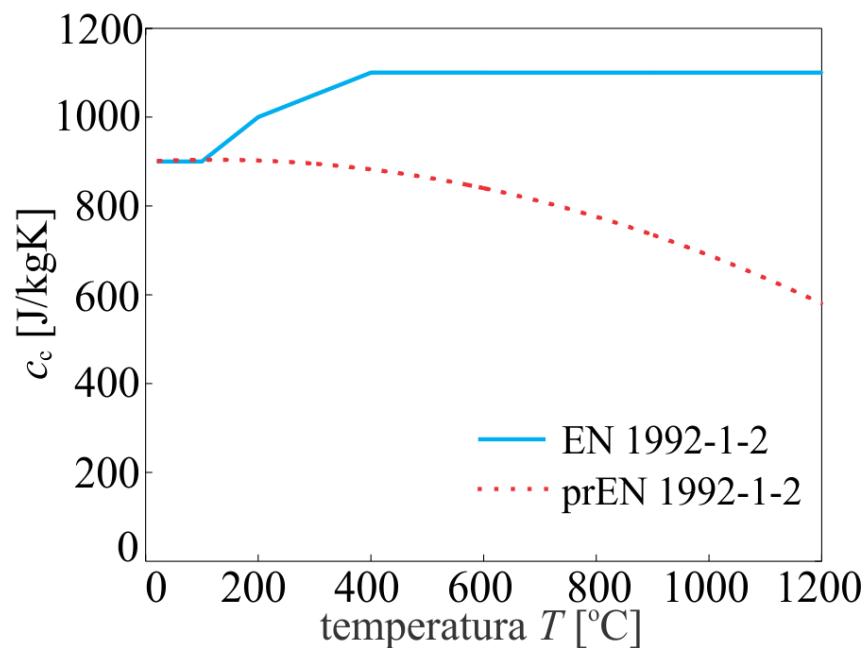


Termične lastnosti betona pri povišani temperaturi

(a) toplotna prevodnost betona

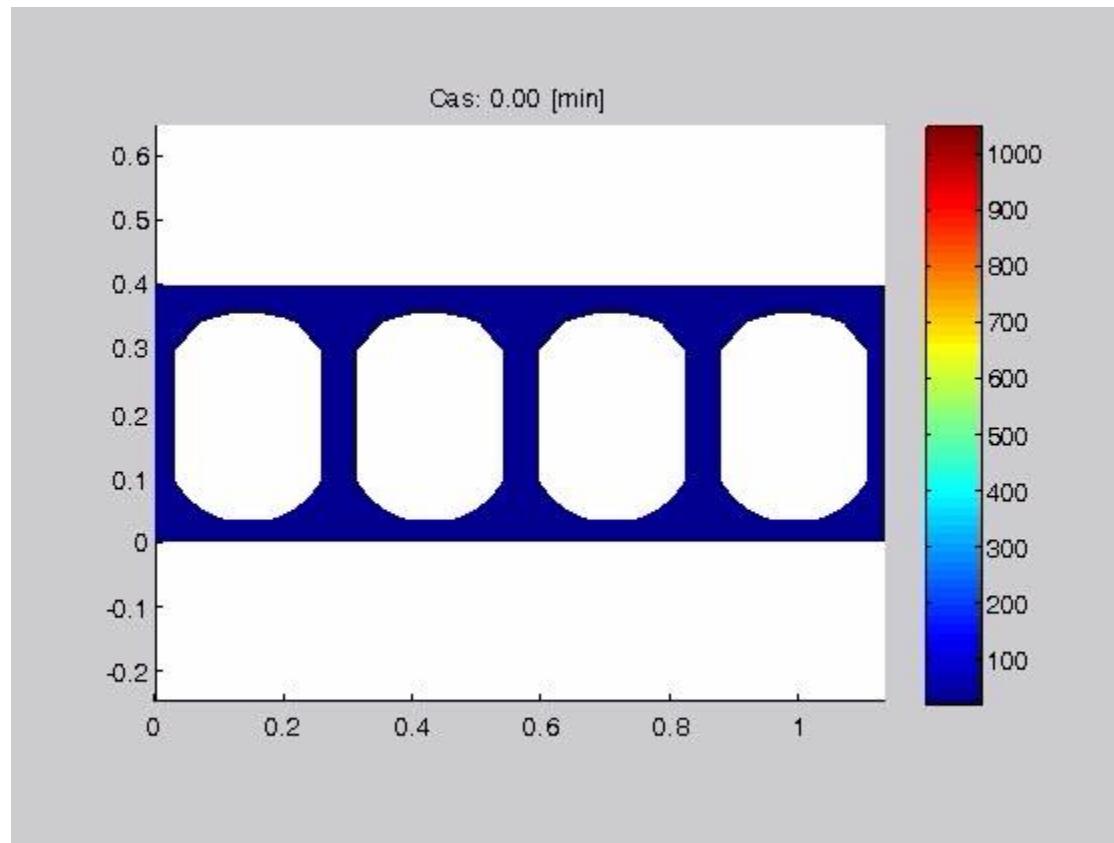


(b) specifična toplota betona



(a) Spreminjanje toplotne prevodnosti betona v odvisnosti od temperature. (b) Spreminjanje specifične toplote betona v odvisnosti od temperature.

Razvoj temperatur po prečnem prerezu (program Heatko)



Razvoj temperatur po prečnem prerezu (program Moisture Heat)

