

Požarna odpornost lesenih konstrukcij – določitev mehanske odpornosti



Tomaž Hozjan

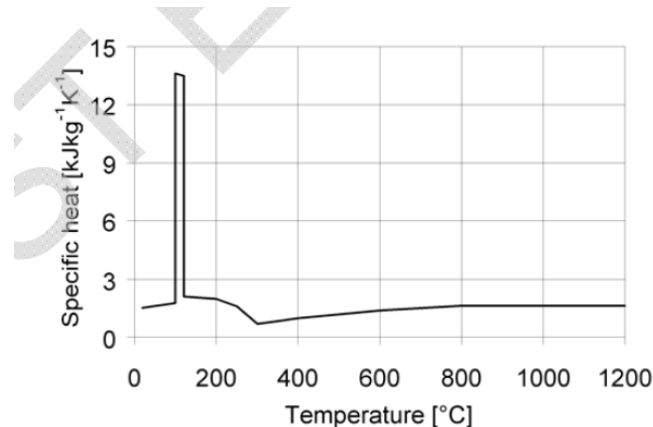
e-mail: tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si

soba: 503

Mehansko obnašanje lesenih konstrukcij v požaru – oglečenje lesa

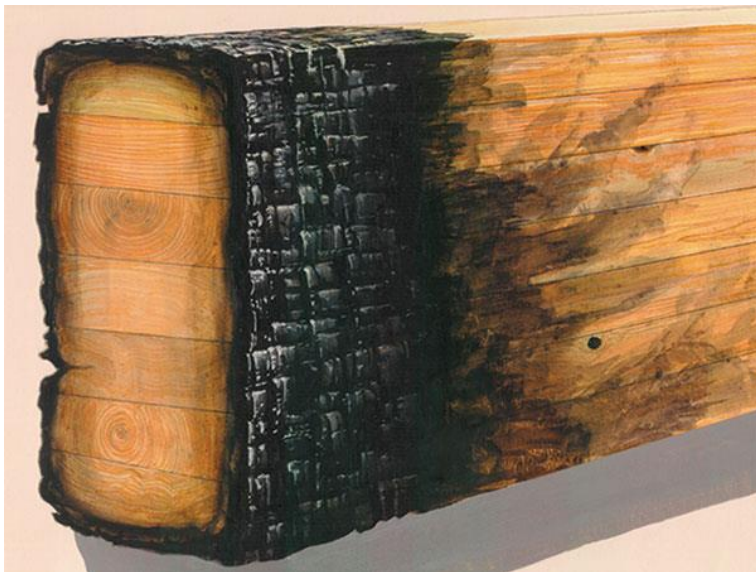
Les je naraven material

- Vsebuje vlago
- V toplotni (temperaturni) analizi lahko zajamemo vpliv vlage na razpored temperature (počasnejše segrevanje)



- Oglečenje lesa (okoli 300 °C)
- Predstavlja zaščito za notranji del prereza

Odziv lesenih konstrukcij v požaru



Oglenenje lesa

Konstrukcija ohrani
nosilnost tudi v
primeru požara



Oglenenje lesa

- Piroliza: termična razgradnja lesa, vnetljivi plini, ki jih spremlja izguba mase (okoli 250 °C)

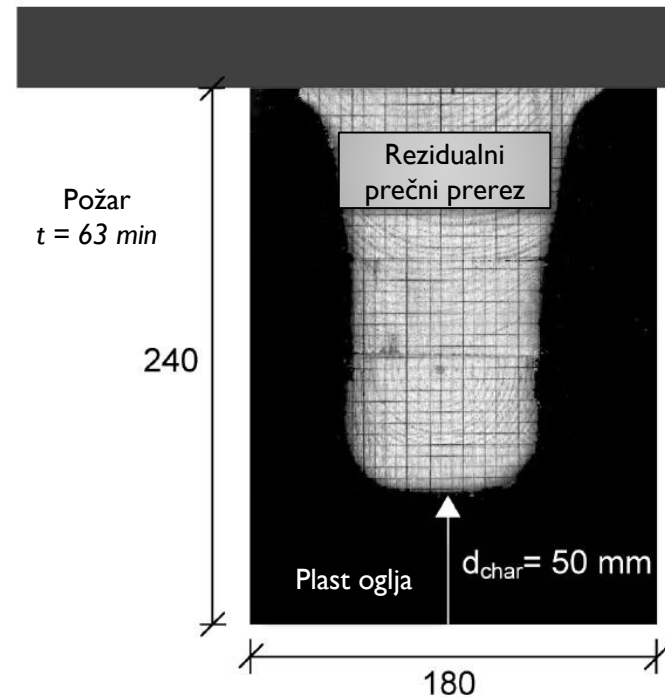
- Hitrost oglenjenja β

*razmerje med debelino
zoglenele plasti in časom*

[v mm/min]

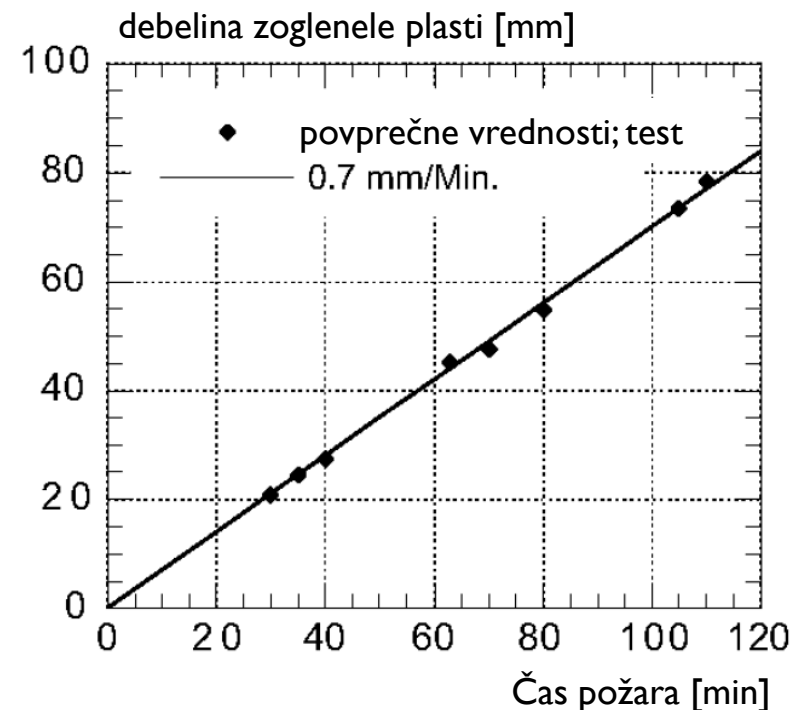
$$\beta = \frac{d_{char}}{t}$$

$$\beta = \frac{d_{char}}{t} = \frac{50\text{mm}}{63\text{min}} = 0.8\text{mm/min}$$



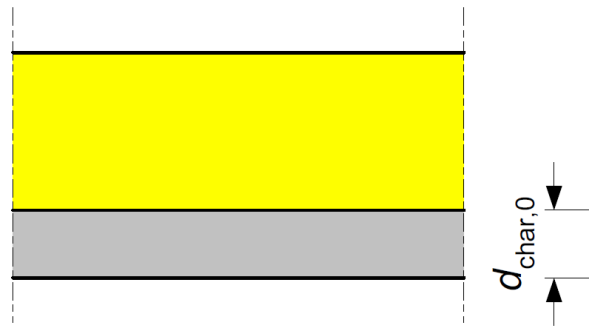
Hitrost oglenjenja lesa

- Odvisna od požara, od jakosti toplotnega toka [kW/m^2]
 - Za standarden požar (ISO 834) lahko privzamemo konstantno vrednost (podana v SIST EN 1995-1-2)
- Odvisna od vrste lesa
 - smreka, $\beta \approx 0.7 \text{ mm/min}$
- Vpliv vlage in gostote na hitrost oglenjenja (??)



Hitrost oglenjenja lesa – skladno s SIST EN 1995-1-2

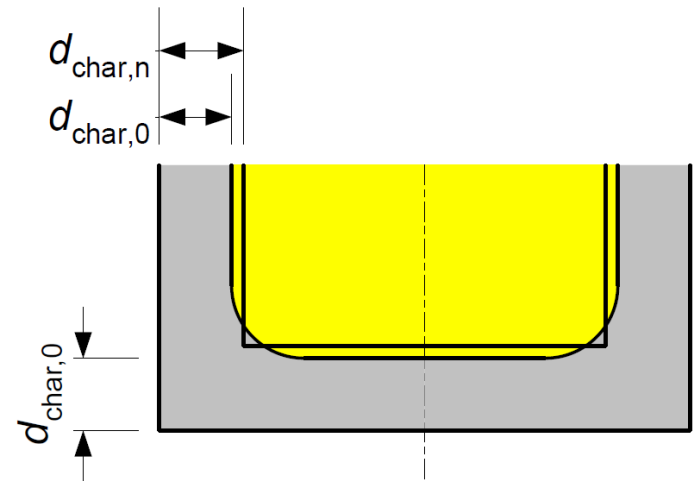
Enodimenzionalno oglenenje
Izpostavljenost požaru z ene
strani (plošče, stene,...)



Debelino zoglenele plasti
izračunamo kot:

$$d_{char,0} = \beta_0 [\text{mm/min}] * t [\text{min}]$$

Večdimenzionalno oglenenje
Izpostavljenost požaru z več
strani (nosilci, stebri,...)



Debelino zoglenele plasti
izračunamo kot:

$$d_{char,n} = \beta_n [\text{mm/min}] * t [\text{min}]$$

Hitrost oglečenja lesa – skladno s SIST EN 1995-1-2

Hitrost oglečenja v primeru **STANDARDNE** požarne izpostavljenosti je podana v tabeli 3.1 (SIST EN 1995-1-2)

Table 3.1 – Design charring rates β_0 and β_n of timber, LVL, wood panelling and wood-based panels

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Softwood and beech Glued laminated timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Solid timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,65	0,7 0,8
b) Hardwood Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of 290 kg/m^3 Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,50	0,7 0,55
c) LVL with a characteristic density of $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Panels Wood panelling Plywood Wood-based panels other than plywood	0,9 ^a 1,0 ^a 0,9 ^a	– – –
^a The values apply to a characteristic density of 450 kg/m^3 and a panel thickness of 20 mm; see 3.4.2(9) for other thicknesses and densities.		

Mehansko obnašanje lesenih konstrukcij v požaru – ogleenje lesa

- Račun odpornosti skladno s SIST EN 1995-1-2
 - Hitrost ogleenja velja samo za standardno požarno izpostavljenost (okoli 0,8 mm/min)
 - V primeru parametrične požarne krivulje potrebno stopnjo ogleenja izračunati (dodatek A, omejitve)
 - Pri analizi z naprednimi računskimi modeli, lahko predpostavimo, da ogleenje nastopi, ko dosežemo temperaturo 300 °C
 - $\varepsilon_{\text{tot}} = \varepsilon_{\text{meh}} + \varepsilon_{\text{th}}$ (TRDNOST)

Kriterij **R** - nosilnost

Skladno s standardom SIST EN 1995-1-2 je kriteriju R zadoščeno, če med trajanjem požara **t** velja:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

Kjer sta:

$R_{fi,d,t}$ – pripadajoča nosilnost konstrukcije v požarnem projektne stanju,

$E_{fi,d,t}$ – projektna vrednost notranjih sil pri požarnem projektne stanju.

Določitev $E_{fi,d,t}$ - obremenitev

Poenostavljen pristop skladno s SIST EN 1991-1-2 in 1995-1-2

- Pri metodah požarnega projektiranja po Evrokodih, se pogosto pojavlja pomembna količina, imenovana **faktor redukcije nivoja obremenitve za požarno projektno stanje** η_{fi} :

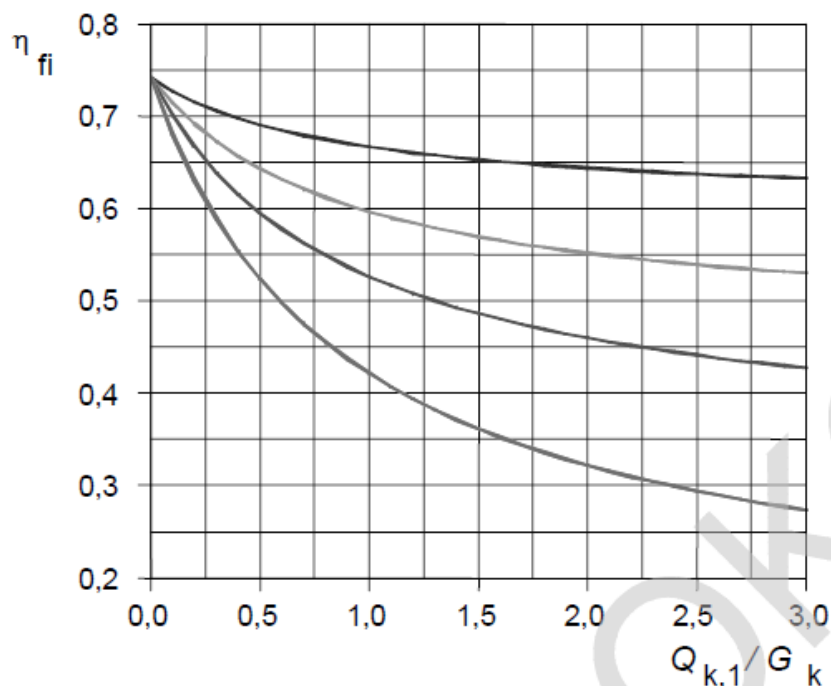
$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} E_d$$

Redukcijski faktor

Projektna vrednost notranje sile določena pri sobni temperaturi za trajno projektno stanje ob upoštevanju osnovne kombinacije vplivov (EN 1990).

Določitev redukcijskega faktorja η_{fi} skladno s SIST EN 1995-1-2

Primer: Vrednost redukcijskega faktorja η_{fi} glede na razmerje $Q_{k,1}/G_k$, za različne vrednosti kombinacijskega faktorja $\Psi_{1,1}$ pri upoštevanju $\gamma_G = 1,35$ in $\gamma_{Q,1} = 1,5$



$\Psi_{fi,1} = 0,9$

$\Psi_{fi,1} = 0,7$

$\Psi_{fi,1} = 0,5$

$\Psi_{fi,1} = 0,2$

**DODATNA
POENOSTAVITEV
(SIST EN 1995-1-2)**

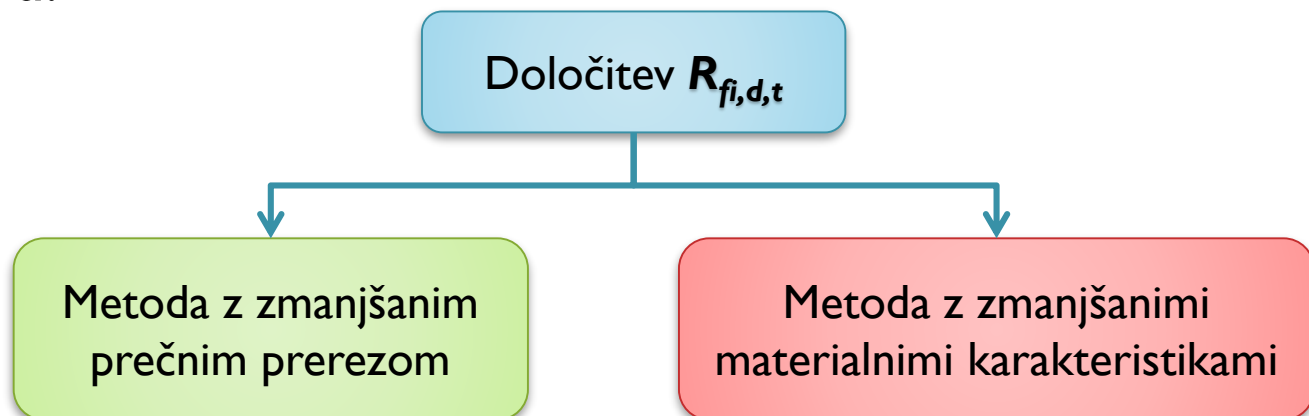
$\eta_{fi} = 0,60$

za kategorije stavb E
pa **$\eta_{fi} = 0,70$**

Določitev $R_{fi,d,t}$

Skladno s standardom SIST EN 1995-1-2 požarno odpornost $R_{fi,d,t}$ po poenostavljenem postopku določimo skladno s standardom SIST 1995-1-1 (odpornost pri sobni temperaturi), pri čemer upoštevamo zmanjšanje prečnega prereza zaradi oglenenja in materialne lastnosti pri požarnem projektnejem stanju.

Poznamo dve metodi za določitev odpornosti elementa pri požaru:



Projektne vrednosti lastnosti materialov

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}$$

Projektne vrednosti lastnosti materialov

$f_{d,fi}$: Projektna trdnost pri požarnem projektnejm stanju

$k_{mod,fi}$: modifikacijski faktor (vpliv vlage (pri sobni), vpliv požara)

f_{20} : 20% fraktila trdnosti pri sobni temperaturi

$\gamma_{M,fi}$: Delni varnostni faktor, pri požarnem projektnejm stanju in je enak **1,0**

$$f_{20} = k_{fi} f_k$$

f_{20} : 20% fraktila trdnosti pri sobni temperaturi

k_{fi} : Faktor določen skladno s tabelo 2.1 v SIST EN 1995-1-2

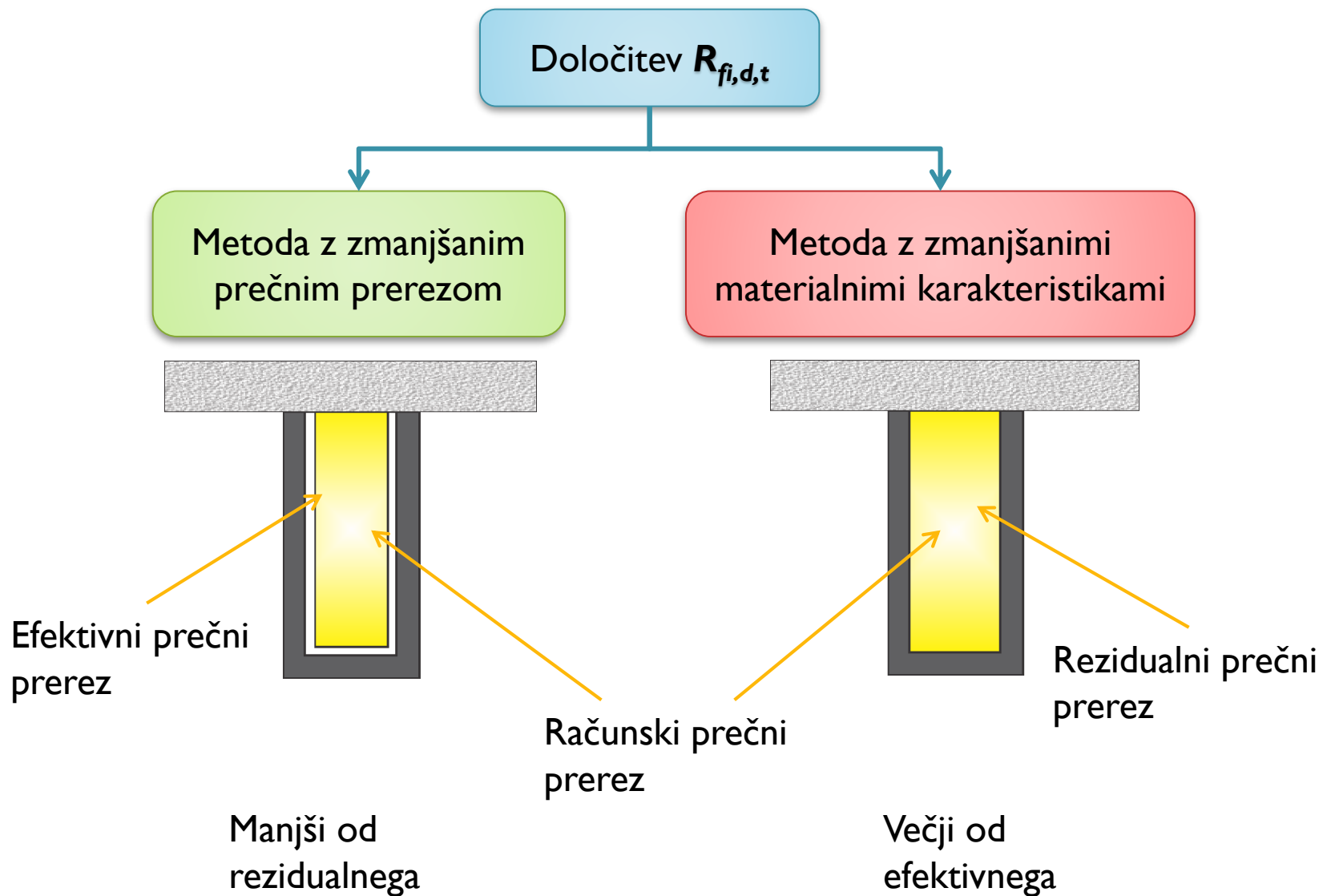
f_k : Karakteristična trdnosti pri sobni temperaturi

Določitev faktorja k_{fi}

Table 2.1 — Values of k_{fi}

	k_{fi}
Solid timber (Masiven les)	1,25
Glued-laminated timber (Lepljen les)	1,15
Wood-based panels	1,15
LVL	1,1
Connections with fasteners in shear with side members of wood and wood-based panels	1,15
Connections with fasteners in shear with side members of steel	1,05
Connections with axially loaded fasteners	1,05

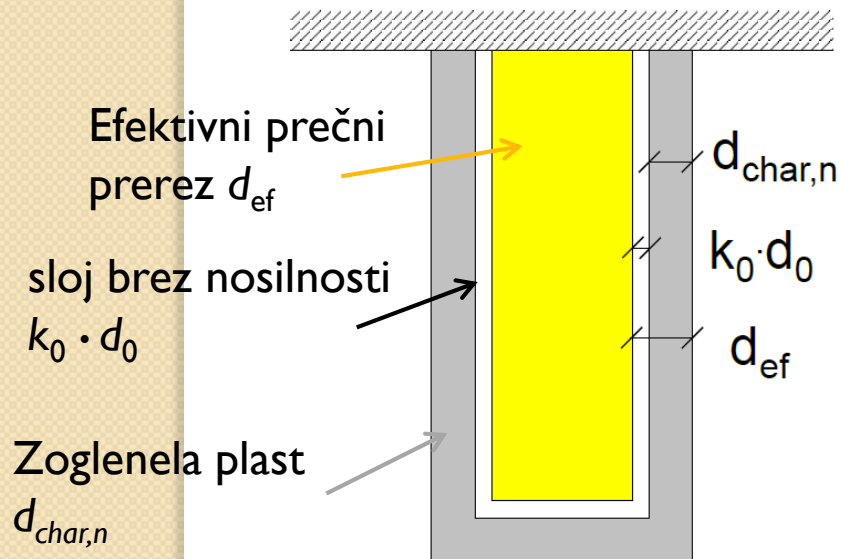
Določitev $R_{fi,d,t}$



Določitev $R_{fi,d,t}$ po metodi z zmanjšanim prečnim prerezom

Določitev $R_{fi,d,t}$

Metoda z zmanjšanim prečnim prerezom



LASTNOSTI METODE:

- Odpornost elementa določimo na osnovi **EFEKTIVNEGA PREČNEGA PREZA**
- Materialne karakteristike privzamemo, da so enake kot pri sobni temperaturi (**brez redukcije**)

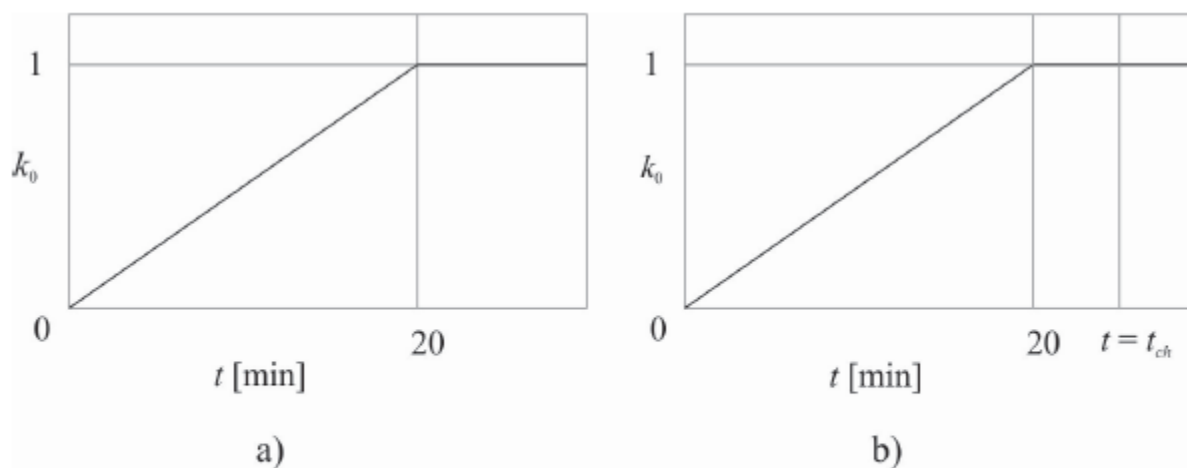
$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0$$

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$

$$k_{mod,fi} = 1.0$$

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot f_k = k_{fi} \cdot f_k = f_{20}$$

Določitev faktorja k_0



Slika 2: a) vrednost faktorja k_0 za zaščitene in nezaščitene elemente, $t_{ch} \leq 20$ min, b) za zaščitene elemente, $t_{ch} \geq 20$ min

Določitev $R_{fi,d,t}$ po metodi z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami

LASTNOSTI METODE:

- Odpornost elementa določimo na osnovi **REZIDUALNEGA PREČNEGA PREZA**
- Materialne karakteristike **REDUCIRAMO** z modifikacijskim faktorjem $k_{mod,fi}$ in so manjše kot pri sobni temperaturi

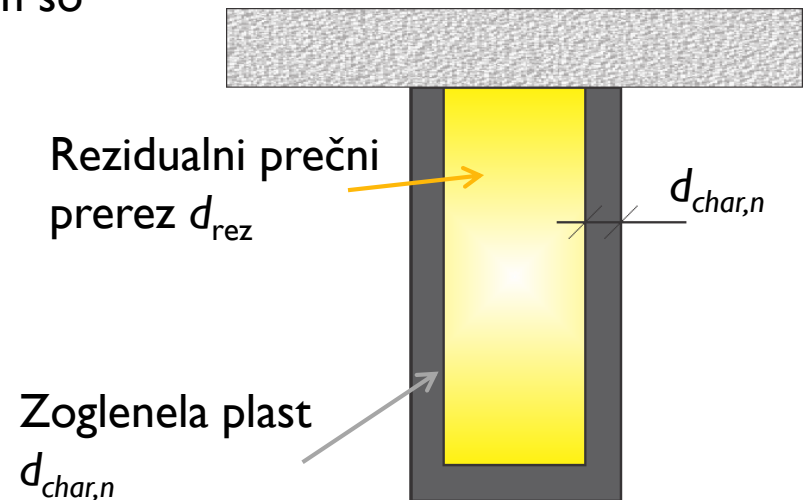
$$d_{rez} = d_{char,n}$$

$$k_{mod,fi} < 1.0$$

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot f_{20} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot f_k$$

Določitev $R_{fi,d,t}$

Metoda z zmanjšanimi materialnimi karakteristikami



Določitev modifikacijskega faktorja

$$k_{\text{mod,fi}}$$

Za požar, ki traja več kot 20 min, se faktor $k_{\text{mod,fi}}$ izračuna kot

- Za upogibno trdnost:

$$k_{\text{mod,fi}} = 1.0 - \frac{1}{200} \cdot \frac{p}{A_r},$$

- za tlačno trdnost:

$$k_{\text{mod,fi}} = 1.0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{p}{A_r},$$

- za natezno trdnost in modul elastičnosti:

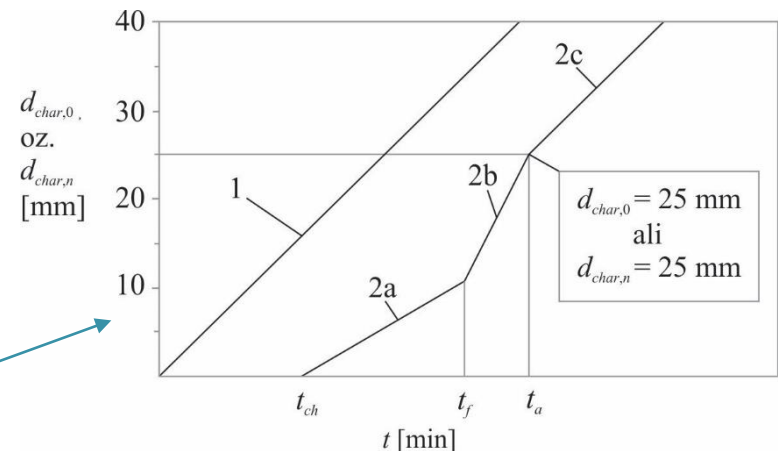
$$k_{\text{mod,fi}} = 1.0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{p}{A_r}.$$

Za nezaščitene in zaščitene elemente je pri času $t = 0$ vrednost faktorja enaka 1.

Za čase $0 \leq t \leq 20$ min se vrednost faktorja določi z linearno interpolacijo.

Zaščiteni leseni elementi

- Račun začetka oglečenja t_{ch}
 - Oglečenje se lahko prične preden obloga odpove
 - Hitrost oglečenja manjša v primerjavi z nezaščitenimi elementi, faktor k_2 (EN 1995-1-2)
- Požarna zaščita odpove pri času t_f
 - Hitrost oglečenja je sprva večja kot za nezaščiteni elemente vse do debeline oglja 25 mm, to dosežemo pri času t_a

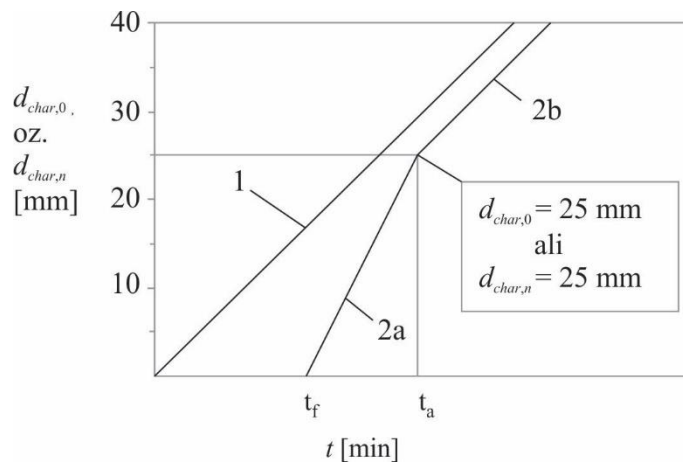


Oglečenje začne pred odpovedjo zaščite

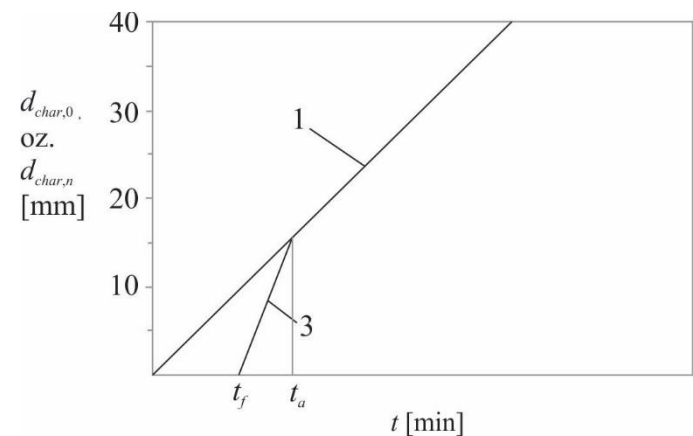
Zaščiteni leseni elementi

- Oglenenje po odpovedi obloge

- debelina zoglenele plasti pri času t_a je 25 mm



- debelina zoglenele plasti pri času t_a je manjša od 25 mm



- Določitev t_a , t_f in hitrosti oglenenja do časa t_a

Čas odpovedi zaščitnih oblog

Porušitev zaščitnih oblog lahko nastopi zaradi:

- oglenenja ali mehanske degradacije obloge,
- nezadostne dolžine veznih sredstev (vijakov, žabljev) v globino nezoglenelega lesa (min 10 mm v ne zoglenel del)
- neprimerne razporeditve veznih sredstev.

Za obloge iz lesne osnove, in mavčne plošče razreda A in H $t_f = t_{ch}$

Za mavčne plošče razreda F in zaščite iz kamene volne podatek podan od proizvajalca (testiranja)

Čas odpovedi zaščitnih oblog

Za obloge iz lesne osnove

$$t_{ch} = \frac{h_p}{\beta_0},$$

Za mavčne plošče razreda A, F in H (EN 520) s širino odprtine manjšo od 2 mm

$$t_{ch} = 2.8 h_p - 14,$$

Za širino odprtine več kot 2 mm

$$t_{ch} = 2.8h_p - 23.$$

Za elemente zaščitene s kameno volno (h_{ins} – debelina [mm], ρ_{ins} gostota [kg/m³])

$$t_{ch} = 0.07(h_{ins} - 20) \cdot \sqrt{\rho_{ins}},$$

Stopnja oglečenja zaščitenih elementov

Za čas $t_{ch} \leq t \leq t_f$

Osnovna stopnjo oglečenja pomnožena s faktorjem k_2

$$k_2 = 1 - 0.018 h_p,$$

Debelina h_{ins} [mm]	k_2
20	1
≥ 45	0.6

Kamena volna > 20 mm;
vmes linearna interpolacija

Za čas $t_f \leq t \leq t_a$

Osnovna stopnjo oglečenja pomnožena s faktorjem $k_3 = 2$

Račun časa t_a

$$t_{ch} = t_a$$

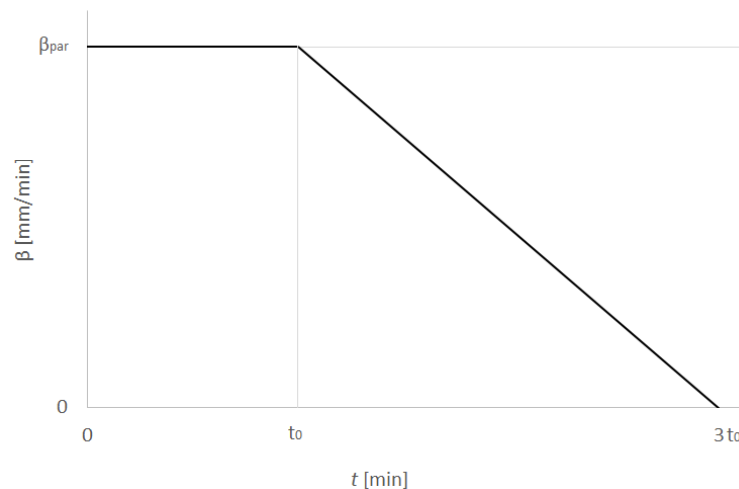
$$t_a = \min \left\{ \frac{2t_f}{k_3\beta_n} + t_f \right.$$

$$t_{ch} < t_f$$

$$t_a = \frac{25 - (t_f - t_{ch})k_2\beta_n}{k_3\beta_n} + t_f$$

Določitev debeline zoglenele plasti pri parametričnem požaru

- Stopnjo oglečenja β_{par} v primeru parametrične požarne krivulje določimo po enačbi:
- $\beta_{\text{par}} = 1,5\beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma-0,04}}{0,16\sqrt{\Gamma+0,08}}$, kjer sta
- Γ je brezdimenzijski parameter (SIST EN 1991-1-2, dodatek A)
- β_n večdimenzijska stopnaja oglečenja za standardni požar

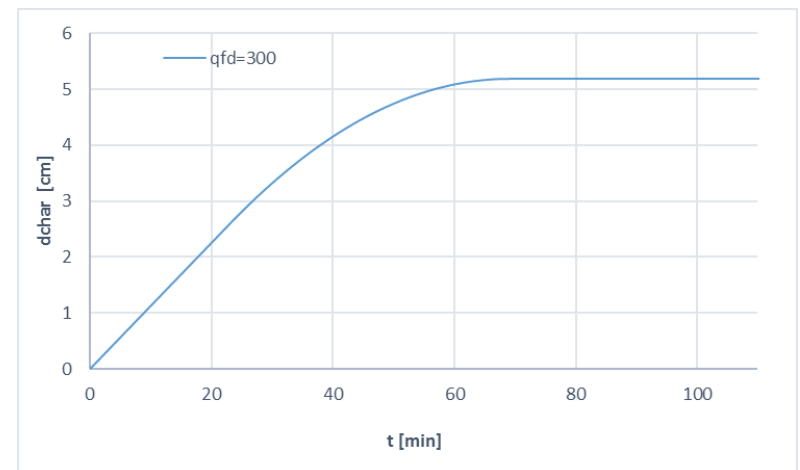
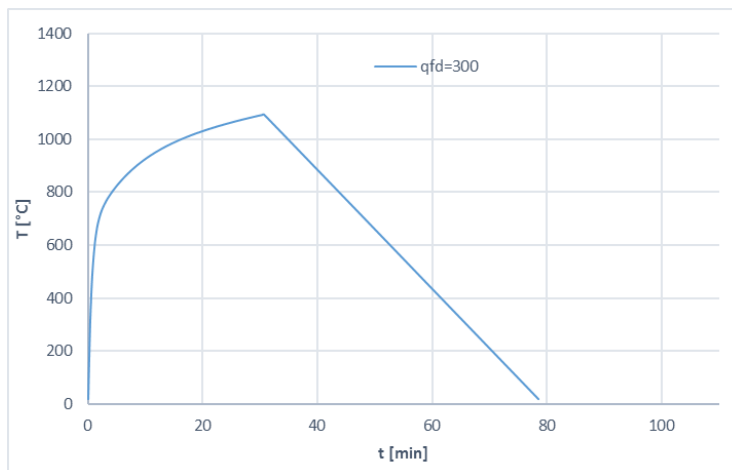


Določitev debeline zoglenele plasti pri parametričnem požaru

- Debelino zoglenele plasti pri parametrični analizi določimo po spodnjih izrazih, njen razvoj je odvisen od časa. :

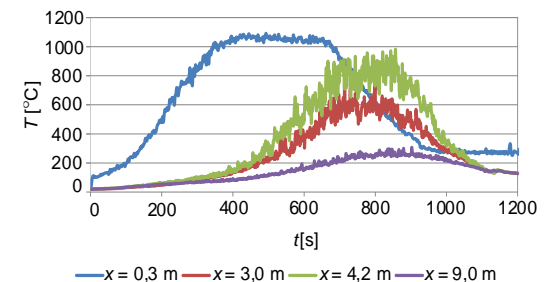
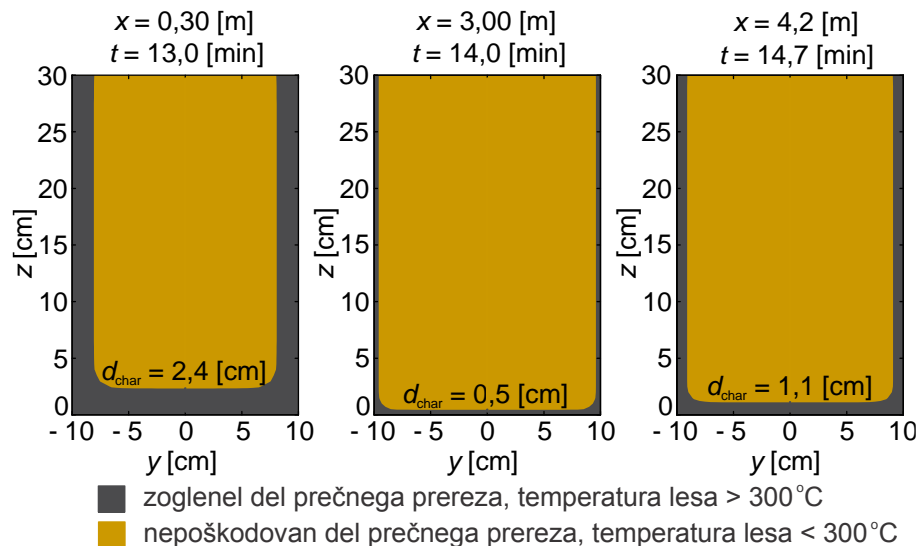
$$d_{\text{char}} = \begin{cases} \beta_{\text{par}} \cdot t; & t \leq t_0 \\ \beta_{\text{par}} \left(1,5t - \frac{t^2}{4t_0} - \frac{t_0}{4} \right); & t_0 \leq t \leq 3t_0 \\ 2\beta_{\text{par}} \cdot t_0; & 3t_0 \leq t \leq 5t_0 \end{cases}$$

- Pri čemer je $t_0 = 0,009 \frac{q_{fd}}{o}$; Predpostavke: $t_0 \leq 40$ min, $d_{\text{char}} \leq \frac{b}{4}$, $d_{\text{char}} \leq \frac{h}{4}$



Določitev debeline zoglenele plasti pri naravnem požaru

- S toplotno analizo, določimo potek temperature po prečnem prerezu.
- Upoštevamo, da zogljeni del prečnega prereza, ki se segreje nad 300°C in tako odčitamo debelino zoglenele plasti v posameznem prečnem prerezu (d_{char}).



Razvoj temperature vročega zraka v požarnem prostoru

Debelina zoglenele plasti (d_{char})

Vir: Pečenko R., Huč S., Hozjan T., "Performančni način projektiranja požarne odpornosti lepljenega lesenega nosilca - 2. Del: toplotna in mehanska analiza", Gradbeni vestnik, junij 2015.