

Požarna odpornost lesenih konstrukcij – določitev mehanske odpornosti



Tomaž Hozjan

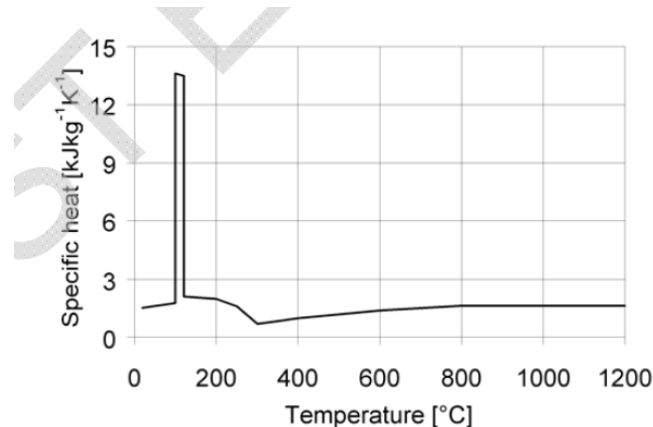
e-mail: tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si

soba: 503

Mehansko obnašanje lesenih konstrukcij v požaru – oglečenje lesa

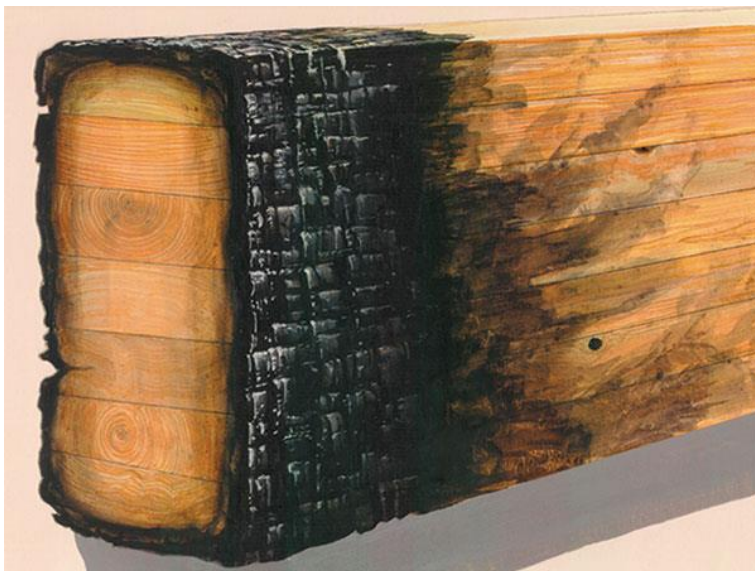
Les je naraven material

- 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)

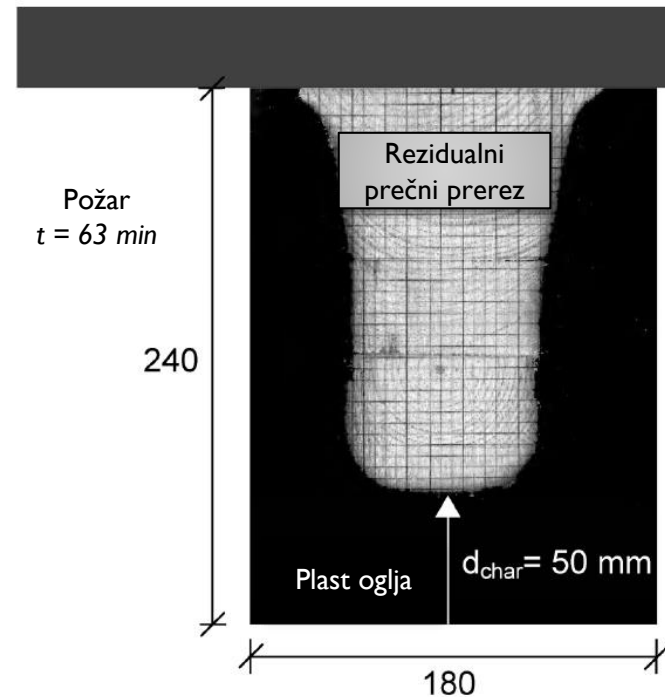
- Hitrost oglenjenja β

*razmerje med debelino
zoglenele plasti in časom*

[v mm/min]

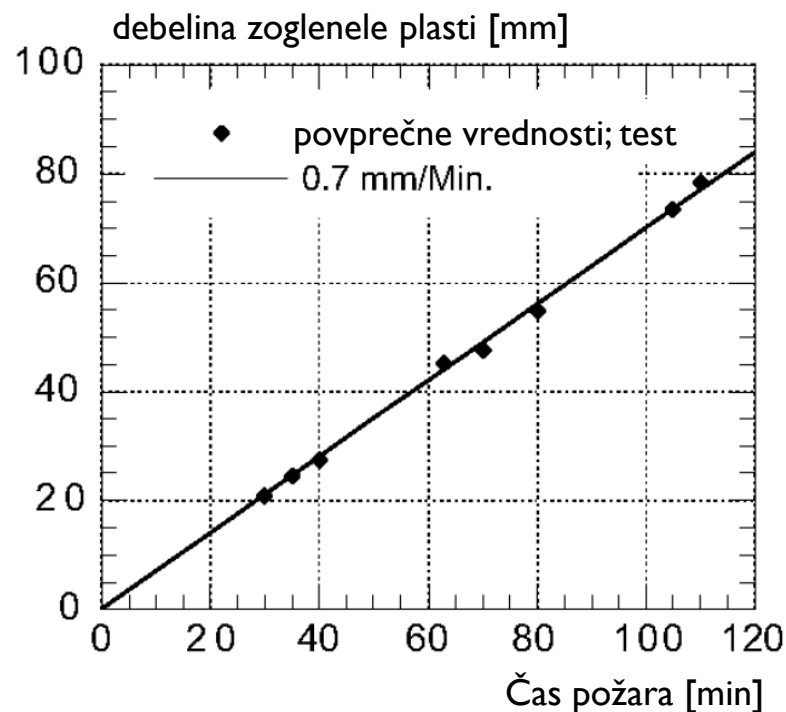
$$\beta = \frac{d_{char}}{t}$$

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



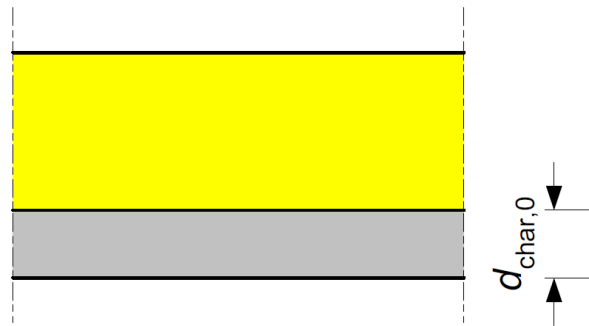
Hitrost oglenenja lesa

- 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, $\beta \approx 0.7\text{mm}/\text{min}$
- Vpliv vlage in gostote na hitrost oglenenja (??)



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

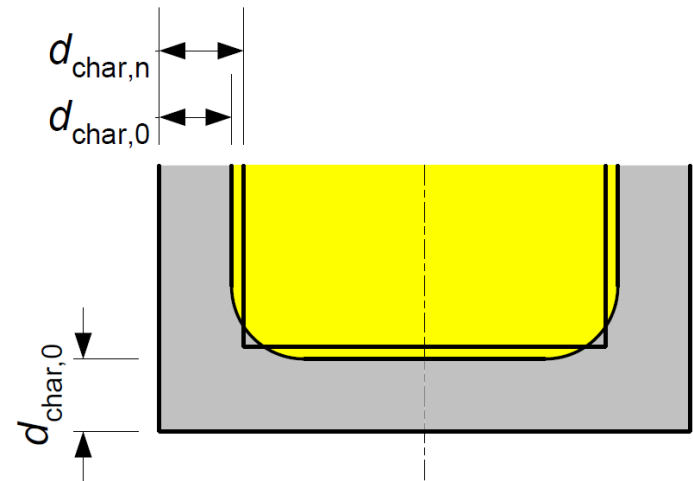
Enodimenzionalno oglenenje
Izpostavljenost požaru z ene
strani (plošče, stene,...)



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 oglenenja lesa – skladno s SIST EN 1995-1-2

Hitrost oglenenja 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} :

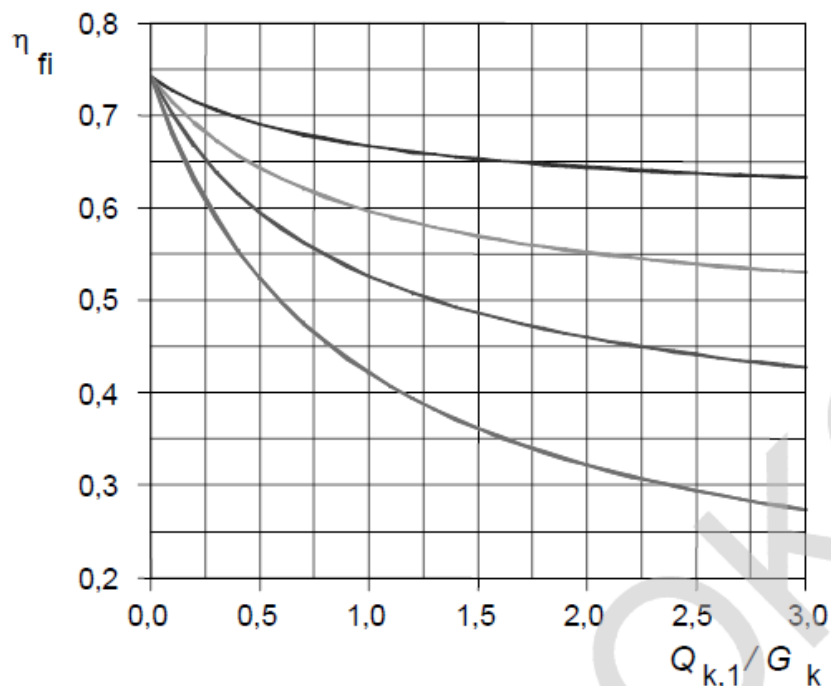
$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} E_d$$

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 $\gamma_{Q,1} = 1,5$



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

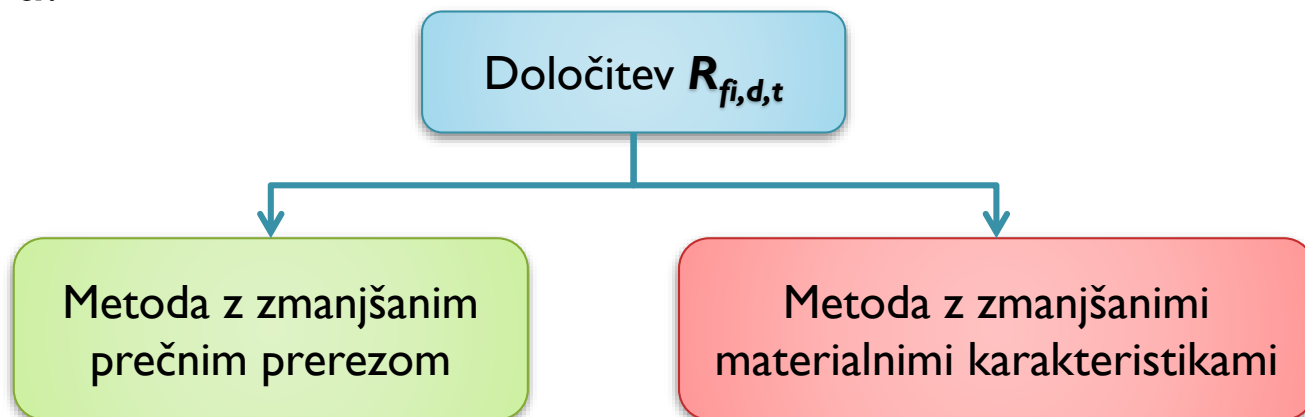
$\eta_{fi} = 0,60$

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

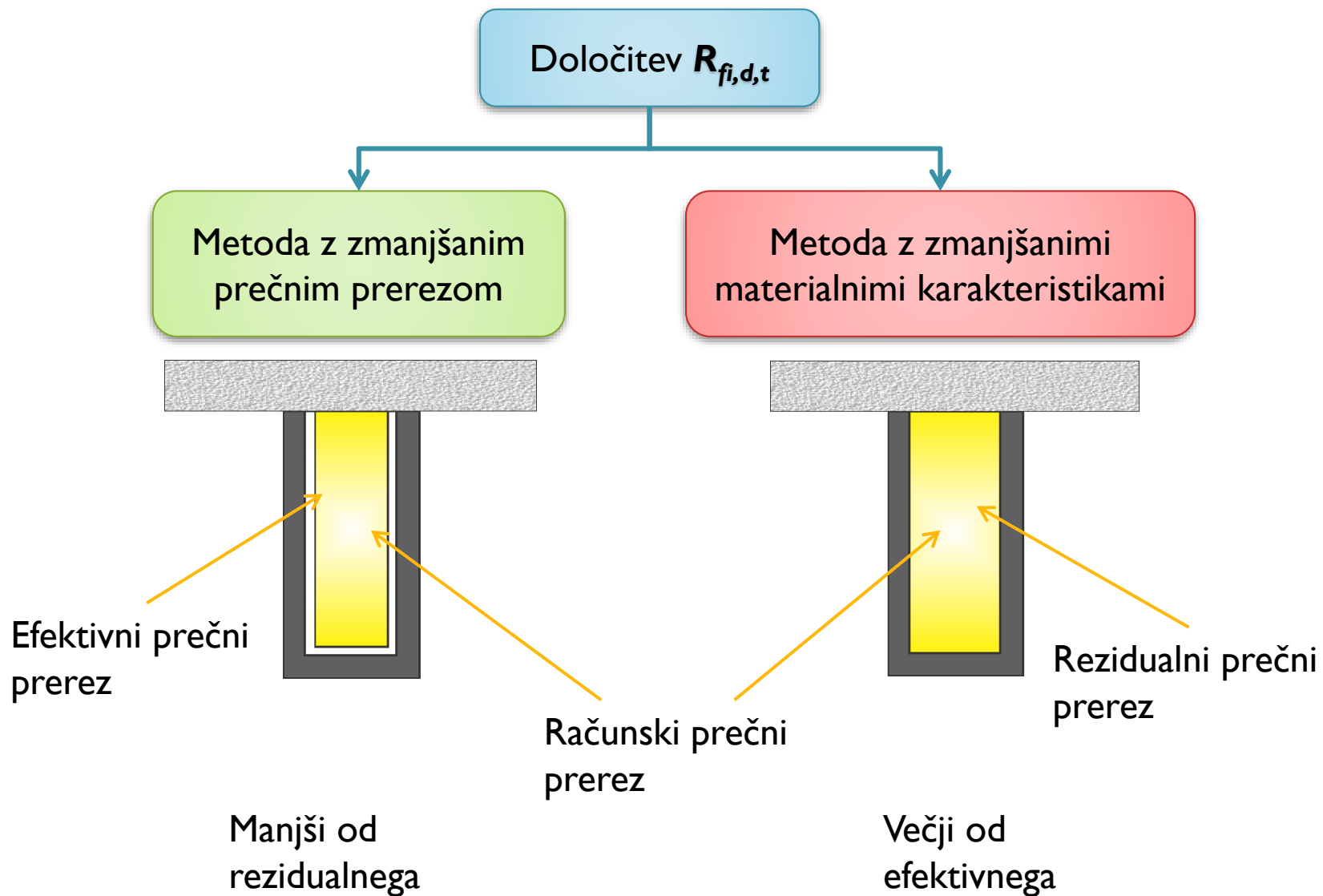
f_k : Karakteristična trdnosti pri sobni temperaturi

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

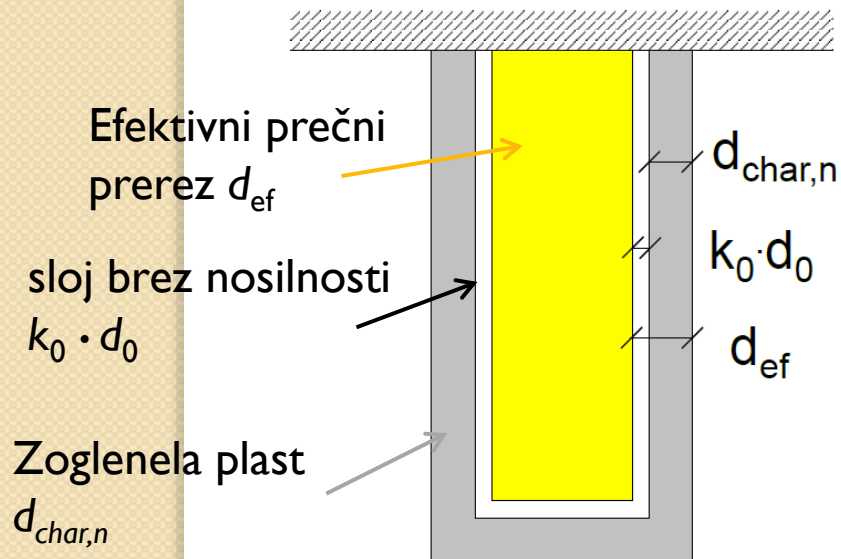
Določitev $R_{fi,d,t}$



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**)

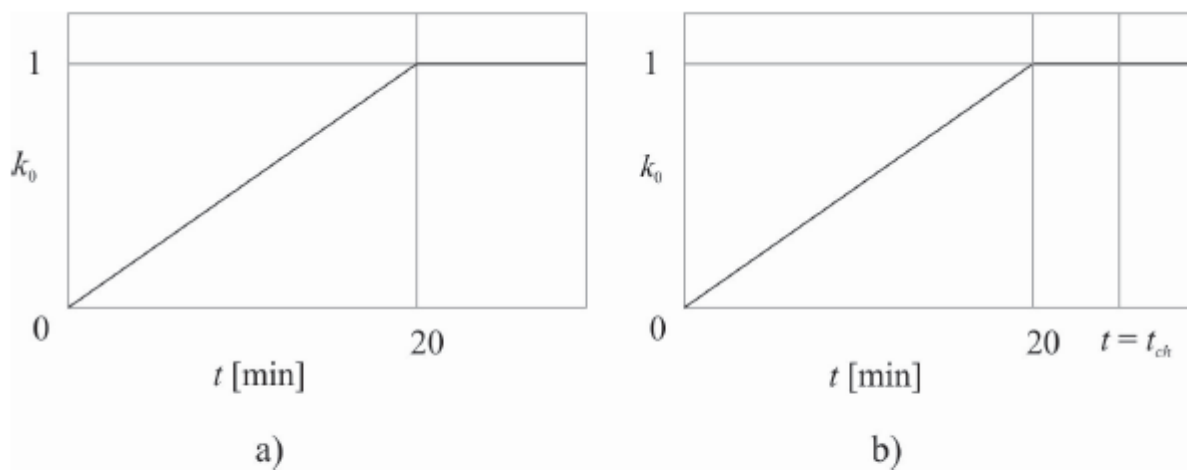
$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0$$

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

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

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

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

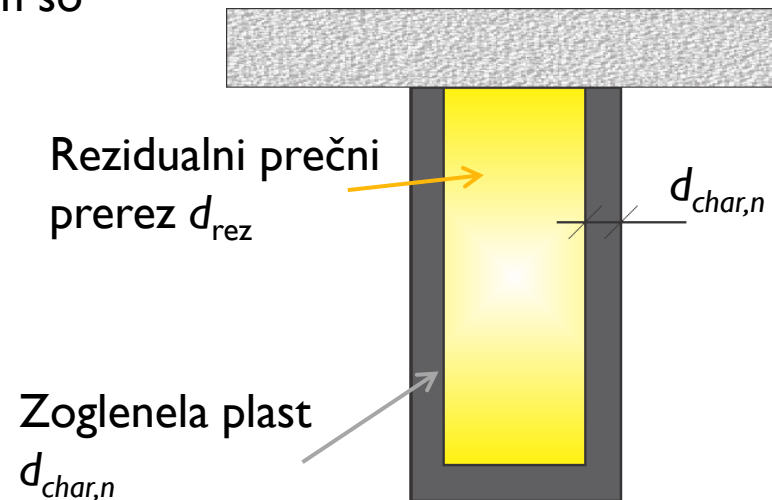
$$d_{rez} = d_{char,n}$$

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

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

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:

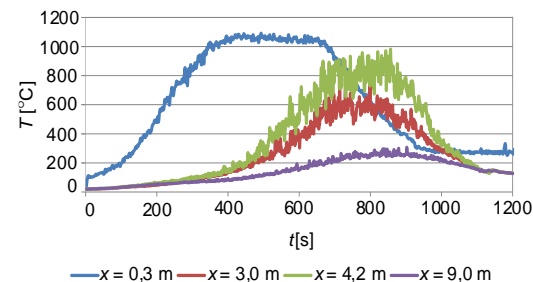
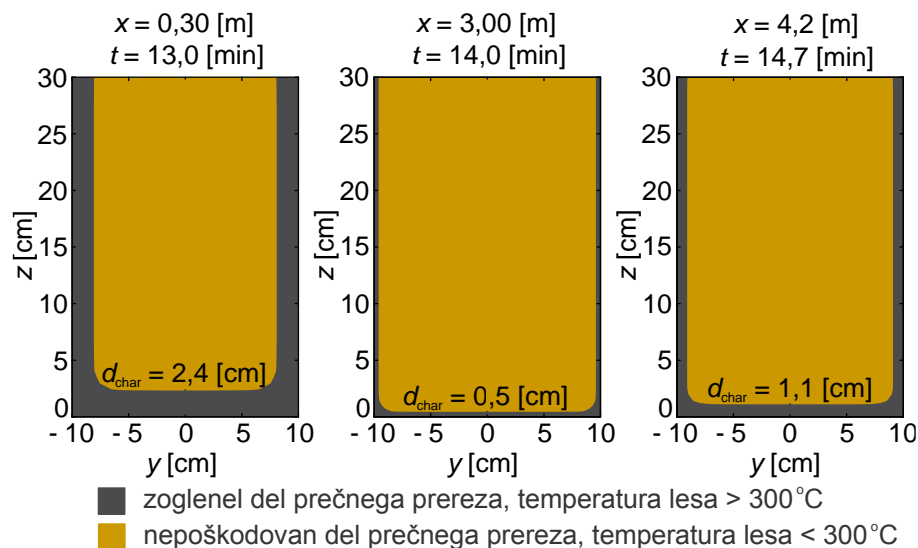
$$k_{\text{mod},fi} = 1.0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{p}{A_r}.$$

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.

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}).



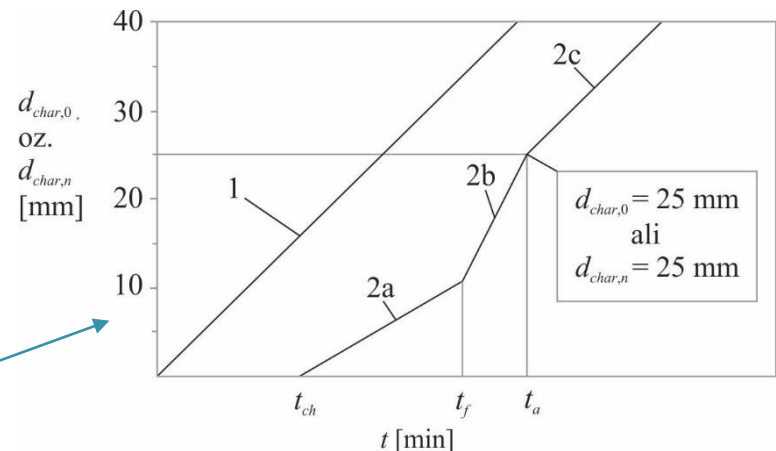
Razvoj temperature vročega zraka v požarnem prostoru

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.

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

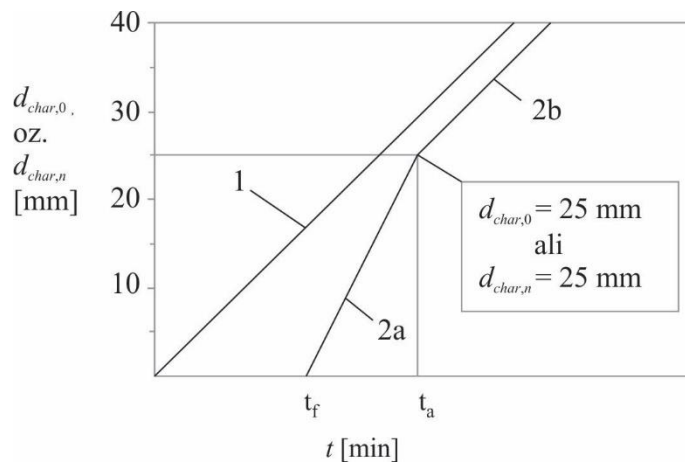


Oglečenje začne pred odpovedjo zaščite

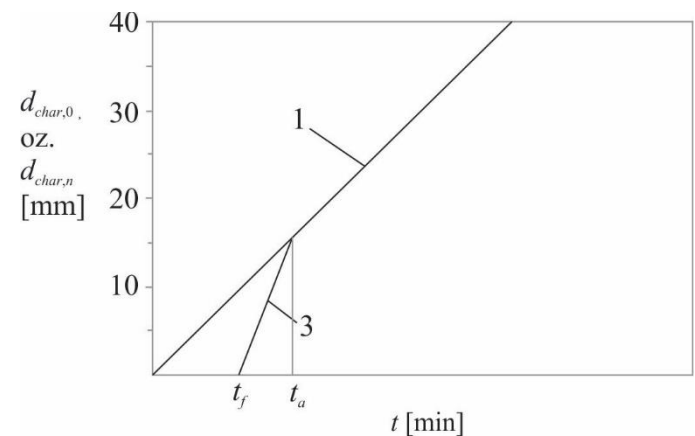
Zaščiteni leseni elementi

- 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 oglečenja 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 z 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

$$t_{ch} = t_a$$

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

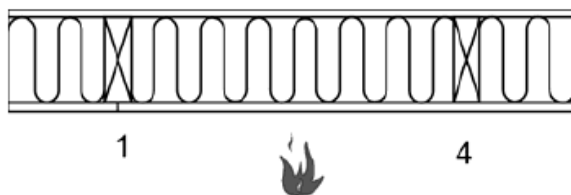
$$t_{ch} < t_f$$

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

Požarna odpornost lesnih sten in stropov

Sklopi z zapolnjenimi prazninami

- Dodatek C EN 1995-1-2
- Polnilo iz kamene ali steklene volne, stebri so uklonsko zavarovani



Oglenenje zaščitnih elementov

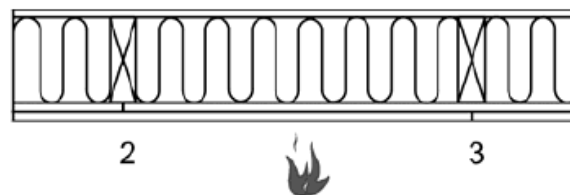
$$\beta_n = k_s k_2 k_n \beta_0 \quad \text{for } t_{ch} \leq t \leq t_f$$

$$\beta_n = k_s k_3 k_n \beta_0 \quad \text{for } t \geq t_f$$

Faktor širine nosilnega elementa

b mm	k_s
38	1,4
45	1,3
60	1,1

Faktor nepravilne
oblike oglenjenja
 $k_n = 1,5$



Za mavčne plošče F ali F +A (notranja)

$$k_2 = 1,05 - 0,0073 h_p$$

$$k_2 = 0,86 - 0,0037 h_p$$

$$t_f = \frac{h_p}{\beta_0} - 4 \quad \text{Lesne obloge}$$

$$t_f = 2,8 h_p - 14 \quad \text{Mavčne obloge}$$

Vezna sredstva, iztrg!

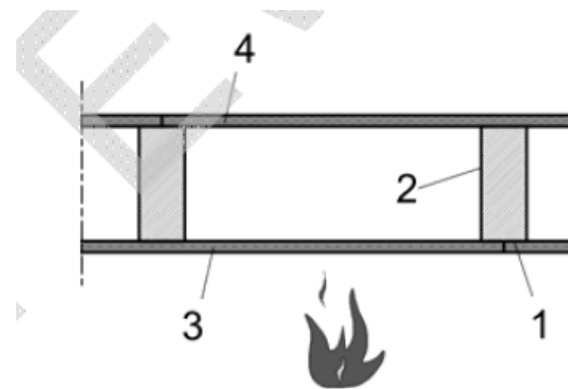
Požarna odpornost lesnih sten in stropov

Sklopi s prazninami

- Za obloge iz lesa

$$t_{ch} = t_f$$

$$t_f = \frac{h_p}{\beta_0} - 4$$



- Za mavčne plošče

- Na izpostavljeni strani (stranica 1), enako kot za plošče tipa A, F in H

$$t_{ch} = 2,8 h_p - 14$$

Odprtine manjše od 2 mm

$$t_{ch} = 2,8 h_p - 23$$

Večje odprtine od 2 mm

- Na strani proti odprtini (stranica 2) (mavčne plošče A, H)

$$t_{ch} = t_f \quad t_f = 2,8 h_p - 11$$

$$t_f = 2,8 h_p - 12$$

Razmak med podpornimi elementi (lesen, jekleni stebri) manjši od 400 mm

Razmak med podpornimi elementi večji od 400 mm manjši od 600 mm

Določitev kriterija I za lesene stenske in stropne konstrukcije, Dodatek E

Vsota odpornosti posameznih sloiev

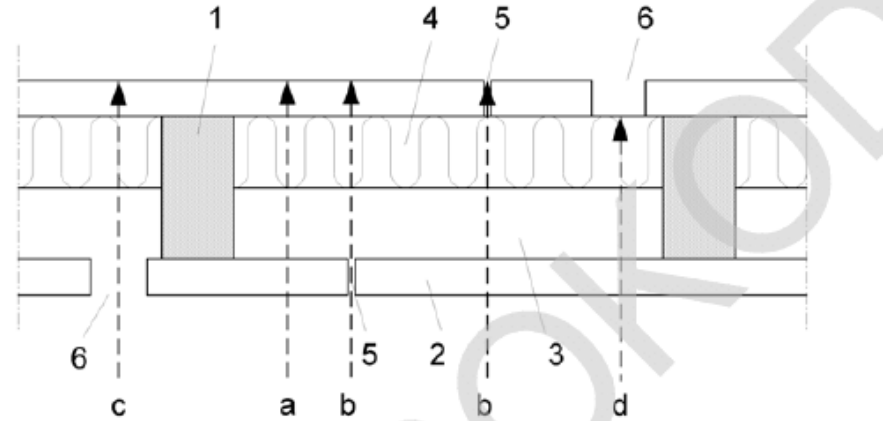
$$t_{\text{ins}} = \sum_i t_{\text{ins},0,i} k_{\text{pos}} k_j$$

k_{pos} faktor pozicije,
 k_j faktor stika, za lesene sklope enak 1, zajet v faktorju pozicije

Za zapolnitve stikov z izolativnimi materiali

Cavity material	Density kg/m ³	k_{dens}^a
Glass fibre	15	0,9
	20	1,0
	26	1,2
Rock fibre	26	1,0
	50	1,1

^a For intermediate densities, linear interpolation may be applied



Preverit je potrebno več možnih poti
 prehoda toplote
 Od a do d

Določitev kriterija I za lesene stenske in stropne konstrukcije, Dodatek E

Osnovi časi izolativnosti

- Vezana plošča ($\rho \geq 450 \text{ kg/m}^3$)

$$t_{\text{ins},0} = 0,95 h_p$$



- Iverne (iveral) in vlaknene plošče (MDF) ($\rho \geq 600 \text{ kg/m}^3$)

$$t_{\text{ins},0} = 1,1 h_p$$



- Lesni paneli ($\rho \geq 400 \text{ kg/m}^3$)

$$t_{\text{ins},0} = 0,5 h_p$$



- Mavčno kartonaste plošče (A, F, R in H razreda)

$$t_{\text{ins},0} = 1,4 h_p$$



- Kamena in steklena volna



$$t_{\text{ins},0,i} = 0,2 h_{\text{ins}} k_{\text{dens}}$$

$$t_{\text{ins},0,i} = 0,1 h_{\text{ins}} k_{\text{dens}}$$

Določitev kriterija I za lesene stenske in stropne konstrukcije, Dodatek E

Faktor pozicije za sklope z enojnimi ploščami, izpostavljena stran

Panel	Thickness mm	Position coefficient for panels backed by	
		rock or glass fibre insulation	void
Plywood with characteristic density $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	9 to 25	Expression (E.9)	0,8
Particleboard, fibreboard with characteristic density $\geq 600 \text{ kg/m}^3$	9 to 25		
Wood panelling with characteristic density $\geq 400 \text{ kg/m}^3$	15 to 19		
Gypsum plasterboard type A, H, F	9 to 15		

$$k_{\text{pos}} = \min \begin{cases} 0,02 h_p + 0,54 \\ 1 \end{cases} \quad (\text{E.9})$$

$$k_{\text{pos}} = 0,07 h_p - 0,17 \quad (\text{E.10})$$

Določitev kriterija I za lesene stenske in stropne konstrukcije, Dodatek E

Faktor pozicije za sklope z enojnimi ploščami, neizpostavljena stran

Panel	Thickness of panel on unexposed side mm	Position coefficient for panels preceded by				
		Glass fibre	Rock fibre of thickness ^a			Void
			45 to 95	145	195	
Plywood with density $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	9 to 25	Expression (E.10)	1,5	3,9	4,9	0,6
Particleboard and fibreboard with density $\geq 600 \text{ kg/m}^3$	9 to 25	Expression (E.10)				0,6
Wood panelling with density $\geq 400 \text{ kg/m}^3$	15 19	0,45 0,67				0,6
Gypsum plasterboard type A, H, F	9 to 15	Expression (E.10)				0,7

^a For intermediate values, linear interpolation may be applied.

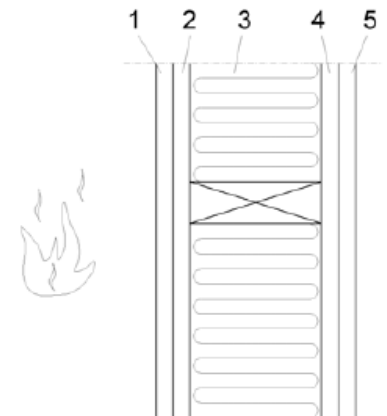
$$k_{\text{pos}} = \min \begin{cases} 0,02 h_p + 0,54 \\ 1 \end{cases} \quad (\text{E.9})$$

$$k_{\text{pos}} = 0,07 h_p - 0,17 \quad (\text{E.10})$$

Določitev kriterija I za lesene stenske in stropne konstrukcije, Dodatek E

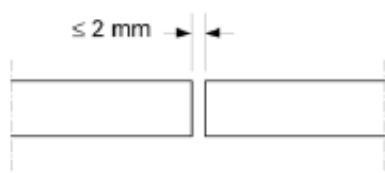
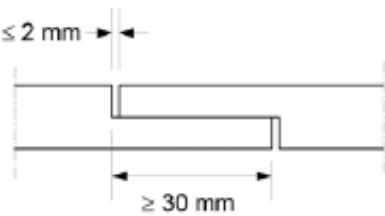
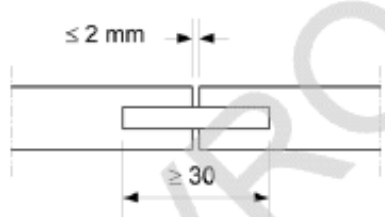
Faktor pozicije za sklope z dvojnimi ploščami

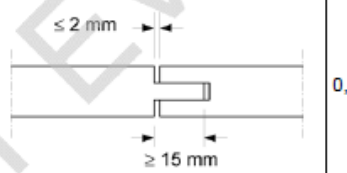
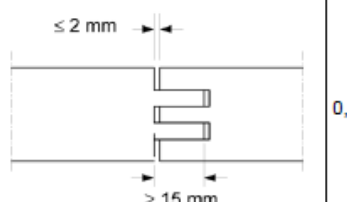
Construction: Layer number and material		Layer number				
		1	2	3	4	5
1, 2, 4, 5 3	Wood-based panel Void	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7
1, 2, 4, 5 3	Gypsum plasterboard type A or H Void	1,0	0,8	1,0	0,8	0,7
1, 5 2, 4 3	Gypsum plasterboard type A or H Wood-based panel Void	1,0	0,8	1,0	0,8	0,7
1, 5 2, 4 3	Wood-based panel Gypsum plasterboard type A or H Void	1,0	0,6	1,0	0,8	0,7
1, 2, 4, 5 3	Wood-based panel Rock fibre batts	0,7	0,6	1,0	1,0	1,5
1, 2, 4, 5 3	Gypsum plasterboard type A or H Rock fibre batts	1,0	0,6	1,0	0,9	1,5
1, 5 2, 4 3	Gypsum plasterboard type A or H Wood-based panel Rock fibre batts	1,0	0,8	1,0	1,0	1,2
1, 5 2, 4 3	Wood-based panel Gypsum plasterboard type A or H Rock fibre batts	1,0	0,6	1,0	1,0	1,5




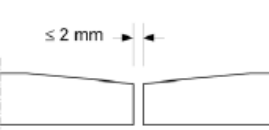
Določitev kriterija I za lesene stenske in stropne konstrukcije, Dodatek E

Faktor stika

	Joint type	k_f
a		0,2
b		0,3
c		0,4

d		0,4
e		0,6

Za stikovanje MKP plošč

	Joint type	Type	k_f	
			Filled joints	Unfilled joints
a		A, H, F	1,0	0,2
b		A, H, F	1,0	0,15