

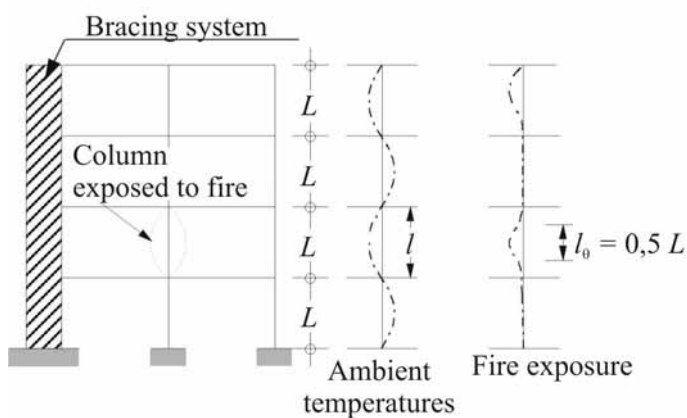
Část 5.8 Částečně obetonovaný sprážený ocelobetonový sloup

P. Schaumann, T. Trautmann
University of Hannover

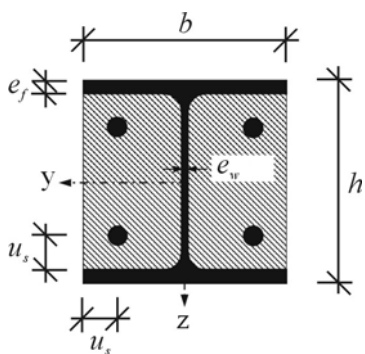
J. Žižka
České vysoké učení technické v Praze

1 ZADÁNÍ

V příkladu je navržen částečně obetonovaný sprážený ocelobetonový sloup, který je součástí administrativní budovy. Konstrukční výška podlaží je $L = 4,0$ m. Sloup je součástí vyztuženého rámu a s horním i spodním sloupem je tuze spojen, proto lze jeho vzpěrnou délku uvažovat dle obrázku 1. Pro výpočet je použit jednoduchý výpočetní model a tabulkové hodnoty. Požadovaná požární odolnost je R 60.



Obrázek 1. Vzpěrné délky sloupů za běžné teploty (označeno jako Ambient temperatures) a při vystavení požáru (Fire exposure)



Obrázek 2. Průřez sloupu

Materiálové vlastnosti:

Ocelový sloup:

Profil:	HEB 300
Ocel:	S 235
Výška:	$h = 300$ mm
Šířka:	$b = 300$ mm
Tloušťka stojiny:	$e_w = 11$ mm
Tloušťka pásnice:	$e_f = 19$ mm
Průřezová plocha:	$A_a = 14900$ mm ²
Mez kluzu:	$f_y = 235$ N/mm ²
Modul pružnosti:	$E_a = 210\,000$ N/mm ²
Moment setrvačnosti:	$I_z = 8560$ cm ⁴

Výztuž:

Ocel:	S 500
Průměr:	4 Ø 25
Průřezová plocha:	$A_s = 1960$ mm ²
Mez kluzu:	$f_s = 500$ N/mm ²
Modul pružnosti:	$E_s = 210\,000$ N/mm ²
Moment setrvačnosti:	$I_s = 4 \cdot 4,9 \cdot (30,0 / 2 - 5,0)^2 = 1960$ cm ⁴
Osová vzdálenost:	$u_s = 50$ mm

Beton:

Třída:	C 25/30
Průřezová plocha:	$A_c = 300 \cdot 300 - 14900 - 1960 = 73\,140$ mm ²
Pevnost v tlaku:	$f_c = 25$ N/mm ²
Modul pružnosti:	$E_{cm} = 30\,500$ N/mm ²
Moment setrvačnosti:	$I_c = 30 \cdot 30^3 / 12 - 8560 - 1960 = 56\,980$ cm ⁴

Zatížení:

Stálé:	$G_k = 960$ kN
Nahodilé:	$P_k = 612,5$ kN

2 POŽÁRNÍ ODOLNOST ČÁSTEČNĚ OBETNOVANÉHO SPŘAŽENÉHO SLOUPU

2.1 Zatížení během požáru

EN 1991-1-2

Zatížení při požáru se určí jako zatížení při mimořádné situaci:

$$E_{dA} = E \left(\sum G_k + A_d + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right)$$

Čl 4.3

Použití součinitele kombinace $\psi_{2,1} = 0.3$ dává návrhové zatížení během požáru:

$$N_{fi,d} = 1,0 \cdot 960 + 0,3 \cdot 612,5 = 1143,8 \text{ kN}$$

2.2 Ověření pomocí jednoduchých výpočtů

EN 1994-1-2

2.2.1 Platnost použití

Jednoduché výpočetní postupy ověřují konstrukci z hlediska únosnosti. Musí být prokázáno, že návrhové zatížení při zvýšené teplotě je menší než návrhová únosnost.

$$N_{fi,d} / N_{fi,Rd} \leq 1$$

čl 4.3.5.1

Návrhová únosnost v tlaku se ztrátou stability kolmo k ose z (měkká osa) se určí jako:

$$N_{fi,Rd,z} = \chi_z \cdot N_{fi,pl,Rd}$$

kde:

χ_z Součinitel vzpěru, zde podle vzpěrnostní křivky c
 $N_{fi,pl,Rd}$ Návrhová hodnota tlakové únosnosti při požáru v prostém tlaku

Jednoduchý výpočetní model lze použít, pokud je sloup součástí vyztuženého rámu a pokud splňuje podmínky uvedené v tabulce 1.

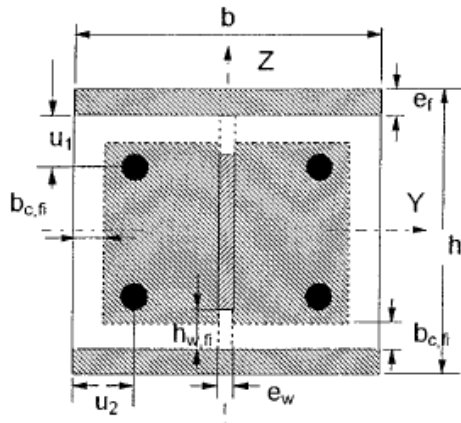
Tabulka 1. Podmínky pro použití jednoduchého výpočetního modelu

Podmínka	Hodnota	
$\max l_\theta = 13,5 \cdot b = 13,5 \cdot 0,3 = 4,05 \text{ m}$	$l_\theta = 0,5 \cdot 4,0 = 2,0 \text{ m}$	✓
$230 \text{ mm} \leq h \leq 1100 \text{ mm}$	$h = 300 \text{ mm}$	✓
$230 \text{ mm} \leq b \leq 500 \text{ mm}$	$b = 300 \text{ mm}$	✓
$1\% \leq A_s / (A_c + A_s) \leq 6\%$	$19,6 / (731,4 + 19,6) = 0,03 = 3\%$	✓
max R 120	R 60	✓
$l_\theta < 10 \cdot b$ pro $\begin{cases} 230 \leq b < 300 \text{ nebo} \\ h/b > 3 \end{cases}$	$b = 300 \text{ mm}$ $h/b = 300/300 = 1$	
$l_\theta < 10 \cdot b = 10 \cdot 300 \text{ mm} = 3 \text{ m}$	$l_\theta = 0,5 \cdot 4,0 = 2,0 \text{ m}$	✓

čl 4.3.5.2
 čl G.8

2.2.2 Výpočet plastické návrhové únosnosti a efektivní ohybové tuhosti

Podle Přílohy G normy EN 1994-1-2 se průřez spřaženého sloupu redukuje. Některé části průřezu se redukuje pomocí redukce meze kluzu a ostatní pomocí redukce průřezové plochy, viz obrázek 3.



Obrázek 3. Redukovaná plocha průřezu při požárním návrhu

U pásnic ocelového průřezu je redukována mez kluzu a modul pružnosti pomocí redukčních součinitelů. Velikost redukčních součinitelů závisí na průměrné teplotě v pásnicích:

$$\theta_{f,t} = \theta_{o,t} + k_t \cdot A_m / V$$

čl G.2

Teplota $\theta_{o,t}$ a redukční součinitel k_t jsou dány v tabulce 2. Součinitel průřezu se vypočítá jako:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{2 \cdot (h + b)}{h \cdot b} = \frac{2 \cdot (0,3 + 0,3)}{0,3 \cdot 0,3} = 13,3 \text{ m}^{-1}$$

Tabulka 2. Parametry pro výpočet průměrné teploty pásnic
(viz EN 1994-1-2, příloha G, tabulka G.1)

Požární odolnost	$\theta_{o,t}$ [°C]	k_t [m°C]
R 30	550	9,65
R 60	680	9,55
R 90	805	6,15
R 120	900	4,65

Průměrná teplota v pásnici pro požární odolnost R 60:

$$\theta_{f,t} = 680 + 9,55 \cdot 13,3 = 807 \text{ °C}$$

Redukční součinitele $k_{y,\theta}$ a $k_{E,\theta}$ pro tuto teplotu jsou uvedeny v tabulce 3.2 normy EN 1994-1-2. V této tabulce lze určit mezilehlé hodnoty lineární interpolací.

$$k_{y,\theta} = 0,06 + ((900 - 807)/(900 - 800)) \cdot (0,11 - 0,06) = 0,107$$

$$k_{E,\theta} = 0,0675 + ((900 - 807)/(900 - 800)) \cdot (0,09 - 0,0675) = 0,088$$

Plastická návrhová únosnost pásnice v tlaku při zvýšené teplotě:

$$N_{f_i,pl,Rd,f} = 2 \cdot (b \cdot e_f \cdot k_{y,\theta} \cdot f_{ay,f}) / \gamma_{M,f_i,a} = 2 \cdot (30 \cdot 1,9 \cdot 0,107 \cdot 23,5) / 1,0 \\ = 286,65 \text{ kN}$$

Ohybová tuhost pásnic při zvýšené teplotě:

$$(EI)_{f_i,f,z} = k_{E,\theta} \cdot E_{a,f} \cdot (e_f \cdot b^3) / 6 = 0,088 \cdot 21\,000 \cdot (1,9 \cdot 30^3) / 6 \\ = 1,58 \cdot 10^7 \text{ kNcm}^2$$

U stojiny je redukována jak mez kluzu, tak průřezová plocha. Průřezová plocha je redukována pomocí snížení výšky stojiny, jež je na obou koncích stojiny stejně veliké.

$$h_{w,f_i} = 0,5 \cdot (h - 2 \cdot e_f) \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 0,16 \cdot (H_t/h)}\right)$$

čl G.3

Parametr H_t viz tabulka 3.

Tabulka 3. Parametr pro redukcí výšky stojiny
(viz EN 1994-1-2, příloha G, tabulka G.2)

Požární odolnost	H_t [mm]
R 30	350
R 60	770
R 90	1100
R 120	1250

Redukovaná výška stojiny h_{w,f_i} :

$$h_{w,f_i} = 0,5 \cdot (30 - 2 \cdot 1,9) \cdot \left(1 - \sqrt{1 - 0,16 \cdot (77/30)}\right) = 3,04 \text{ cm}$$

Redukce meze kluzu stojiny:

$$f_{ay,w,t} = f_{ay,w} \cdot \sqrt{1 - 0,16 \cdot (H_t/h)} = 23,5 \cdot \sqrt{1 - 0,16 \cdot (77/30)} = 18,04 \text{ kN/cm}^2$$

Únosnost stojiny v tlaku při zvýšené teplotě:

$$\begin{aligned}
 N_{fi,pl,Rd,w} &= \left[e_w \cdot (h - 2 \cdot e_f - 2 \cdot h_{w,fi}) \cdot f_{ay,w,t} \right] / \gamma_{M,fi,a} \\
 &= \left[1,1 \cdot (30 - 2 \cdot 1,9 - 2 \cdot 3,04) \cdot 18,04 \right] / 1,0 \\
 &= 399,26 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Ohybová tuhost stojiny při zvýšené teplotě:

$$\begin{aligned}
 (EI)_{fi,w,z} &= \left[E_{a,w} \cdot (h - 2 \cdot e_f - 2 \cdot h_{w,fi}) \cdot e_w^3 \right] / 12 \\
 &= \left[21\,000 \cdot (30 - 2 \cdot 1,9 - 2 \cdot 3,04) \cdot 1,1^3 \right] / 12 \\
 &= 0,0047 \cdot 10^7 \text{ kNcm}
 \end{aligned}$$

Vnější vrstva betonu o tloušťce $b_{c,fi}$ (viz tabulka 4) se ve výpočtu neuvažuje.

$$\Rightarrow b_{c,fi} = 1,5 \text{ cm}$$

Tabulka 4. Redukce tloušťky betonu (viz EN 1994-1-2, příloha G, tabulka G.3)

Požární odolnost	$b_{c,fi}$ [mm]
R30	4,0
R 60	15,0
R 90	$0,5 \cdot (A_m/V) + 22,5$
R 120	$2,0 \cdot (A_m/V) + 24,0$

čl G.4

U zbytku betonového průřezu je redukována pevnost betonu redukčním součinitelem $k_{c,\theta}$, který je závislý na teplotě betonu. Průměrná teplota betonu je závislá na součiniteli průřezu A_m/V a je dána v tabulce 5.

Tabulka 5. Průměrná teplota betonu v závislosti na součiniteli průřezu (viz EN 1994-1-2, příloha G, tabulka G.4)

R 30		R 60		R 90		R 120	
A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]	A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]	A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]	A_m/V [m ⁻¹]	$\theta_{c,t}$ [°C]
4	136	4	214	4	256	4	265
23	300	9	300	6	300	5	300
46	400	21	400	13	400	9	400
---	---	50	600	33	600	23	600
---	---	---	---	54	800	38	800
---	---	---	---	---	---	41	900
---	---	---	---	---	---	43	1000

$$\Rightarrow \theta_{c,t} = 400 - \left((21 - 13,3) / (21 - 9) \right) \cdot (400 - 300) = 336 \text{ °C}$$

kde

$$A_m/V = 13,3 \text{ m}^{-1},$$

Redukční součinitel $k_{c,\theta}$ a přetvoření $\varepsilon_{cu,\theta}$ pro $f_{c,\theta}$ jsou uvedeny v tabulce 3.3 normy EN 1994-1-2.

$$k_{c,\theta} = 0,75 + \left((400 - 336) / (400 - 300) \right) \cdot (0,85 - 0,75) = 0,814$$

$$\varepsilon_{cu,\theta} = \left[10 - \left((400 - 336) / (400 - 300) \right) \cdot (10 - 7) \right] \cdot 10^{-3} = 8,08 \cdot 10^{-3}$$

Sečný modul pružnosti betonu:

$$E_{c,sec,\theta} = k_{c,\theta} \cdot f_c / \varepsilon_{cu,\theta} = 0,814 \cdot 2,5 / (8,08 \cdot 10^{-3}) = 251,9 \text{ kN/cm}^2$$

Návrhová osová únosnost betonové části při zvýšené teplotě:

$$\begin{aligned} N_{f_i,pl,Rd,c} &= 0,86 \cdot \left(\left((h - 2 \cdot e_f - 2 \cdot b_{c,fi}) \cdot (b - e_w - 2 \cdot b_{c,fi}) \right) - A_s \right) \\ &\quad \cdot f_{c,\theta} / \gamma_{M_s,fi,c} \\ &= 0,86 \cdot \left(\left((30 - 2 \cdot 1,9 - 2 \cdot 1,5) \cdot (30 - 1,1 - 2 \cdot 1,5) \right) - 19,6 \right) \\ &\quad \cdot (0,814 \cdot 2,5) / 1,0 \\ &= 1017,3 \text{ kN} \end{aligned}$$

Ohybová tuhost betonu při zvýšené teplotě:

$$\begin{aligned} (EI)_{f_i,c,z} &= E_{c,sec,\theta} \cdot \left(\left((h - 2 \cdot e_f - 2 \cdot b_{c,fi}) \cdot \left((b - 2 \cdot b_{c,fi})^3 - e_w^3 \right) / 12 \right) - I_{s,z} \right) \\ &= 251,9 \cdot \left(\left((30 - 2 \cdot 1,9 - 2 \cdot 1,5) \cdot \left((30 - 2 \cdot 1,5)^3 - 1,1^3 \right) / 12 \right) - 1960 \right) \\ &= 0,909 \cdot 10^7 \text{ kNcm}^2 \end{aligned}$$

U prutů výztuže se redukuje pouze mez kluzu a modul pružnosti. Součinitel pro redukci meze kluzu $k_{y,t}$ je uveden v tabulce 6 a součinitel $k_{E,t}$ pro redukci modulu pružnosti je v tabulce 7. Oba součinitele jsou závislé na třídě požární odolnosti a na geometricky průměrné vzdálenosti u mezi výztužnými pruty a okrajem betonu.

$$u = \sqrt{u_1 \cdot u_2} = \sqrt{50 \cdot 50} = 50 \text{ mm}$$

čl G.5

kde:

- u_1 je osová vzdálenost od krajního prutu výztuže k okraji vnitřní pásnice
- u_2 je vzdálenost od krajního prutu výztuže k povrchu betonu

Tabulka 6. Redukční součinitel $k_{y,t}$ pro mez kluzu f_{sy} prutů výztuže (viz EN 1994-1-2, příloha G, tabulka G.5)

Požární odolnost	u [mm]				
	40	45	50	55	60
R 30	1	1	1	1	1
R 60	0,789	0,883	0,976	1	1
R 90	0,314	0,434	0,572	0,696	0,822
R 120	0,170	0,223	0,288	0,367	0,436

Tabulka 7. Redukční součinitel $k_{E,t}$ pro modul pružnosti E_s prutů výztuže (viz EN 1994-1-2, příloha G, tabulka G.6)

Požární odolnost	u [mm]				
	40	45	50	55	60
R 30	0,830	0,865	0,888	0,914	0,935
R 60	0,604	0,647	0,689	0,729	0,763
R 90	0,193	0,283	0,406	0,522	0,619
R 120	0,110	0,128	0,173	0,233	0,285

$$\Rightarrow k_{y,t} = 0,976$$

$$k_{E,t} = 0,689$$

Plastická návrhová únosnost prutu výztuže při zvýšené teplotě

$$N_{f_i,pl,Rd,s} = A_s \cdot k_{y,t} \cdot f_{sy} / \gamma_{M_s,fi,s} = 19,6 \cdot 0,976 \cdot 50,0 / 1,0 = 956,5 \text{ kN}$$

Ohybová tuhost prutů výztuže při zvýšené teplotě

$$(EI)_{fi,s,z} = k_{E,t} \cdot E_s \cdot I_{s,z} = 0,689 \cdot 21\,000 \cdot 1960 = 2,836 \cdot 10^7 \text{ kNcm}^2$$

Návrhová únosnost celého průřezu při zvýšené teplotě:

$$\begin{aligned} N_{fi,pl,Rd} &= N_{fi,pl,Rd,f} + N_{fi,pl,Rd,w} + N_{fi,pl,Rd,c} + N_{fi,pl,Rd,s} \\ &= 286,7 + 399,3 + 1017,3 + 956,5 \\ &= 2659,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

Pro výpočet celkové ohybové tuhosti průřezu je nutné určit redukční součinitele $\varphi_{i,\theta}$, které jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8. Redukční součinitele pro výpočet efektivní ohybové tuhosti (viz EN 1994-1-2, příloha G, tabulka G.7)

Požární odolnost	$\varphi_{f,\theta}$	$\varphi_{w,\theta}$	$\varphi_{c,\theta}$	$\varphi_{s,\theta}$
R 30	1,0	1,0	0,8	1,0
R 60	0,9	1,0	0,8	0,9
R 90	0,8	1,0	0,8	0,8
R 120	1,0	1,0	0,8	1,0

$$\begin{aligned} (EI)_{fi,eff,z} &= \varphi_{f,\theta} \cdot (EI)_{fi,f,z} + \varphi_{w,\theta} \cdot (EI)_{fi,w,z} + \varphi_{c,\theta} \cdot (EI)_{fi,c,z} + \varphi_{s,\theta} \cdot (EI)_{fi,s,z} \\ &= 0,9 \cdot 1,58 \cdot 10^7 + 1,0 \cdot 0,0047 \cdot 10^7 + 0,8 \cdot 0,909 \cdot 10^7 + 0,9 \cdot 2,836 \cdot 10^7 \\ &= 4,70 \cdot 10^7 \text{ kNcm}^2 \end{aligned}$$

2.2.3 Výpočet únosnosti ve vzpěrném tlaku při zvýšené teplotě

Kritické Eulerovo břemeno pro vybočení prutu v elastickém stavu:

$$N_{fi,cr,z} = \pi^2 \cdot (EI)_{fi,eff,z} / l_\theta^2 = \pi^2 \cdot 4,70 \cdot 10^7 / (0,5 \cdot 400)^2 = 11610,7 \text{ kN}$$

kde:

l_θ vzpěrná délka sloupu při požáru

Poměrná štíhlost prutu:

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{N_{fi,pl,R} / N_{fi,cr,z}} = \sqrt{2659,8 / 11610} = 0,48$$

kde:

$N_{fi,pl,R}$ je $N_{fi,pl,Rd}$ za použití dílčích součinitelů spolehlivosti $\gamma_{M,fi,I} = 1,0$

Vzpěrnostní součinitel χ_z se určí za použití vzpěrnostní křivky c tabulky 6.1 normy EN 1993-1-1 a bezrozměrné poměrné štíhlosti při požáru $\bar{\lambda}_\theta$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0,68 + \sqrt{0,68^2 - 0,48^2}} = 0,86$$

kde:

$$\begin{aligned} \Phi &= 0,5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_\theta - 0,2) + \bar{\lambda}_\theta^2 \right) = 0,5 \cdot \left(1 + 0,49 \cdot (0,48 - 0,2) + 0,48^2 \right) \\ &= 0,68 \end{aligned}$$

Návrhová vzpěrná únosnost prutu:

$$N_{fi,Rd,z} = \chi_z \cdot N_{fi,pl,Rd} = 0,86 \cdot 2659,8 = 2287,4 \text{ kN}$$

Posudek:

čl G.6

EN 1993-1-1

čl 6.3.1.2

EN 1994-1-2

$$N_{f_i,d} / N_{f_i,Rd,z} = 1143,8 / 2287,4 = 0,50 < 1 \quad \checkmark$$

2.3 Posouzení podle tabulkových hodnot

Posouzení proběhne podle ověření únosnosti.

čl 4.2.3.3

Pro možnost redukčního součinitele zatížení $\eta_{f_i,t}$ musí ležet stupeň vyztužení průřezu mezi hodnotami 1% a 6%. Větší či menší stupeň vyztužení nelze uvažovat.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{A_s}{A_c + A_s} \geq 1\% \\ \frac{A_s}{A_c + A_s} \leq 6\% \end{array} \right\}$$

$$\frac{19,6}{731,4 + 19,6} = 0,03 = 3\% \left\{ \begin{array}{l} > 1\% \\ < 6\% \end{array} \right.$$

Redukční součinitel zatížení:

$$\eta_{f_i,t} = E_{f_i,d,t} / R_d = N_{f_i,d} / N_{Rd} = 1143,8 / 4130,4 = 0,28$$

Mezilehlé hodnoty parametrů v tabulce 4.6 normy EN 1994-1-2 lze získat lineární interpolací. V tomto konkrétním případě se nemusí interpolovat.

Tabulka 9. Ověření částečně obetonovaného spráženého nosníku

Minimum	Hodnota	
$\min e_w / e_f = 0,5$	$e_w / e_f = 1,1 / 1,9 = 0,58$	✓
$\min b = \min h = 200 \text{ mm}$	$b = h = 300 \text{ mm}$	✓
$\min u_s = 50 \text{ mm}$	$u_s = 50 \text{ mm}$	✓
$\min A_s / (A_c + A_s) = 4\%$	$A_s / (A_c + A_s) = 3\%$	✗

Stupeň vyztužení spráženého sloupu je malý. Lze ho zvýšit buď zvětšením průměru prutů výztuže, nebo přidáním výztužných prutů.

Ověření jednoduchým výpočetním modelem vyhovělo, výsledky ukazují, že ověření pomocí tabulkových hodnot je konzervativní.

LITERATURA

- EN 1991, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*, Brussels: CEN, November 2002
- EN 1993, *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules*, Brussels: CEN, May 2005
- EN 1994, *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design*, Brussels: CEN, November 2006