
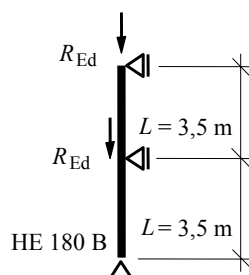


<p>VÝPOČET</p> 	Dokument:	SX044a-EN-EU	Strana	1 z 10
	Název	Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce		
	Eurokód			
	Vypracoval	Z. Sokol	Datum	Leden 2006
	Kontroloval	F. Wald	Datum	Leden 2006

Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce

V řešeném příkladu je navržen chráněný ocelový sloup přes dvě podlaží. Teplota sloupu je určena podle dokumentu SD005. Únosnost sloupu je vypočtena podle modelu v EN 1993-1-2.

Sloup průřezu HEB, na který působí zatížení ze dvou podlaží, je zobrazen na obrázku 1. Požaduje se, aby sloup měl požární odolnost R90 minut, protipožární ochranu tvoří vermikulitocementový nástřík. Průběh požáru je popsán normovou křivkou.



Obrázek 1: Schéma sloupu

Vstupní údaje

Materiálové vlastnosti

Třída oceli: S 355

Mez kluzu: $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$

Hustota: $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$

Zatížení

Stálé zatížení, síla působící v každém podlaží:

$$R_{G,k} = 185 \text{ kN}$$

Nahodilé zatížení, síla působící v každém podlaží:


$$R_{Q,k} = 175 \text{ kN}$$

Součinitele spolehlivosti

$$\gamma_G = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,50$$

$$\gamma_{M1} = 1,00$$

<p>VÝPOČET</p> 	Dokument:	SX044a-EN-EU	Strana	2 z 10
	Název	Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce		
	Eurokód			
	Vypracoval	Z. Sokol	Datum	Leden 2006
	Kontroloval	F. Wald	Datum	Leden 2006

Vstupní údaje pro požární odolnost

Vlastnosti materiálu pro protipožární ochranu

cementovermikulitový nástřík

tloušťka $d_p = 10 \text{ mm}$

hustota $\rho_p = 550 \text{ kgm}^{-3}$

měrné teplo $c_p = 1100 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

teplná vodivost $\lambda_p = 0,12 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Zatížení při běžné teplotě

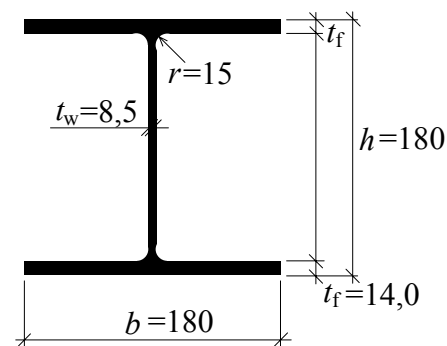
Návrhová hodnota zatížení ve spodní části sloupu je

$$N_{\text{Ed}} = 2 R_{\text{Ed}} = 2 (R_{\text{G,k}} \gamma_{\text{G}} + R_{\text{Q,k}} \gamma_{\text{Q}}) = 2 \cdot (185 \cdot 1,35 + 175 \cdot 1,5) = 1024,5 \text{ kN}$$

Posouzení při běžné teplotě

Byl navržen válcovaný průřez HE 180 B.

Průřez je 1. třídy.




Obrázek 2: Navržený průřez

Vzpěrná délka sloupu je:

$$L_{\text{cr,y}} = L_{\text{cr,z}} = 3,5 \text{ m}$$

Rozhodující je vybočení kolmo k ose z.

[EN 1993-1-1 §5.5](#)

<p style="text-align: center;">VÝPOČET</p> 	Dokument:	<i>SX044a-EN-EU</i>	Strana	3 z 10
	Název	Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce		
	Eurokód			
	Vypracoval	<i>Z. Sokol</i>	Datum	Leden 2006
	Kontroloval	<i>F. Wald</i>	Datum	Leden 2006

Kritická síla je

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 1363 \times 10^4}{3500^2} = 2306 \text{ kN}$$

[EN 1993-1-1 §6.3.1](#)

Poměrná štíhlost sloupu je

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{6530 \times 355}{2306 \times 10^3}} = 1,003$$

Vzpěrnostní součinitel pro průřezy tvar H s poměrem $h/b < 1,2$ se určí z křivky c (součinitel imperfekce $\alpha = 0,49$).

$$\Phi = 0,5 \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right) = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (1,003 - 0,2) + 1,003^2) = 1,200$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{1,200 + \sqrt{1,200^2 - 1,003^2}} = 0,538$$

Únosnost sloupu je:

$$N_{b,Rd} = \chi_z \frac{A f_y}{\gamma_{M1}} = 0,538 \cdot \frac{6525 \cdot 355}{1,0} = 1246,2 \text{ kN} > 1024,5 \text{ kN} = N_{Ed}$$

Průřez za běžné teploty vyhovuje.

Posouzení únosnosti při požáru

Zatížení při požáru

Zatížení při požáru se odvodí ze zatížení pro běžnou teplotu podle pravidel v EN 1991-2.

[EN 1991-1-2 §4.3.2](#)


Pro výpočet zatížení se použije mimořádná kombinace zatížení se součinitelem kombinace $\psi_{2,1} = 0,3$ pro administrativní budovy. Redukční součinitel zatížení je

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi Q_k}{G_k \gamma_G + Q_k \gamma_Q} = \frac{185 + 0,3 \cdot 175}{185 \cdot 1,35 + 175 \cdot 1,5} = 0,464$$

[EN 1993-1-2 §2.4.2](#)

$$N_{fi,Ed} = \eta_{fi} \cdot N_{Ed} = 0,464 \cdot 1024,5 = 475,0 \text{ kN}$$

Poznámka: Součinitel kombinace ψ může být upřesněn v národní příloze. V tomto příkladu je použita doporučená hodnota podle EN 1991-1-2.

<p>VÝPOČET</p> 	Dokument:	<i>SX044a-EN-EU</i>	Strana	<i>4 z 10</i>
	Název	<i>Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce</i>		
	Eurokód			
	Vypracoval	<i>Z. Sokol</i>	Datum	<i>Leden 2006</i>
	Kontroloval	<i>F. Wald</i>	Datum	<i>Leden 2006</i>

Výpočet teploty plynů v požárním úseku

Pro výpočet teploty plynů v požárním úseku se použije normová teplotní křivka.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

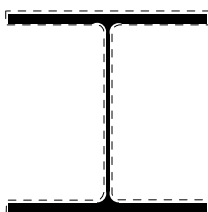
[EN 1991-1-2](#)
[§3.2.1](#)

Určení teploty sloupu

Pro určení součinitele průřezu se použije obvod průřezu vystavený účinkům požáru, který je vyznačen tečkovanou čarou, viz obrázek 3:

[SD005](#)

$$\begin{aligned} \frac{A_p}{V} &= \frac{4b + 2(h - t_w - 4r) + 2\pi r}{A} = \\ &= \frac{4 \cdot 180 + 2 \cdot (180 - 8,5 - 4 \cdot 15) + 2 \cdot \pi \cdot 15}{6525} = \\ &= 0,159 \text{ mm}^{-1} = 159 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$



Obrázek 3: Obvod průřezu vystavený účinkům požáru

Přírůstek teploty chráněného průřezu se určí ze vztahu:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad \text{ale} \quad \Delta\theta_{a,t} \geq 0$$

[EN 1993-1-2](#)
[§4.2.5.2](#)

kde

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}$$

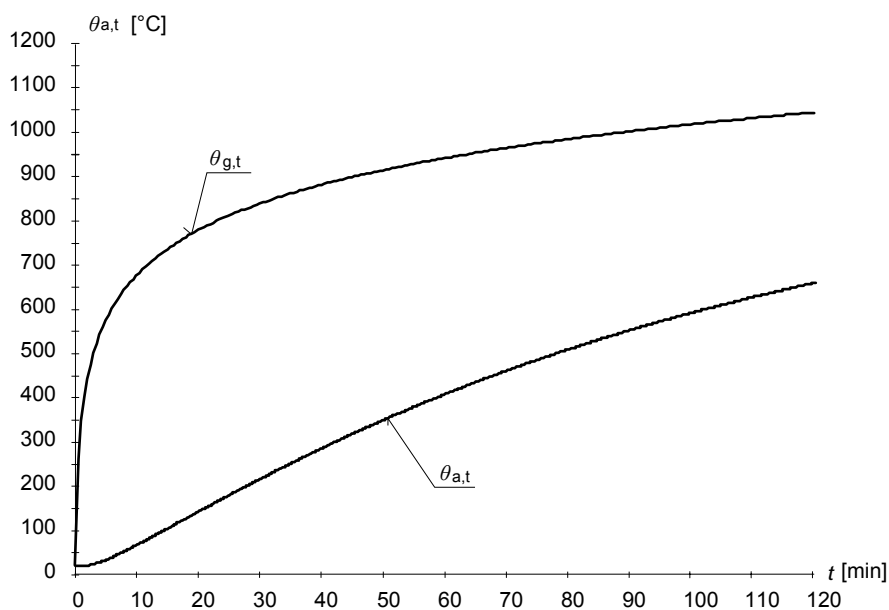
Pro výpočet se použije časový přírůstek $\Delta t = 30$ sekund.

Dokument:	<i>SX044a-EN-EU</i>	Strana	<i>5</i> z <i>10</i>
Název	<i>Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce</i>		
Eurokód			
Vypracoval	<i>Z. Sokol</i>	Datum	<i>Leden 2006</i>
Kontroloval	<i>F. Wald</i>	Datum	<i>Leden 2006</i>

Časový průběh teploty plynu a teploty průřezu je na obrázku 4 a v tabulce 1.


Tabulka 1: Výpočet teploty průřezu

min	sec	t min	θ_g °C	c_a J/kg°C	\varnothing	$\Delta\theta_{a,t}$ °C	$\theta_{a,t}$ °C
	0	0	20,0	440			20,0
	30	0,500	261,1	440	0,557	0,0	20,0
1	00	1,000	349,2	440	0,557	0,0	20,0
1	30	1,500	404,3	440	0,557	0,0	20,0
2	00	2,000	444,5	440	0,557	0,0	20,0
2	30	2,500	476,2	440	0,557	0,7	20,7
3	00	3,000	502,3	440	0,557	1,4	22,0
88	00	88,000	1002,6	700	0,350	2,1	545,5
88	30	88,500	1003,5	702	0,349	2,1	547,6
89	00	89,000	1004,3	704	0,348	2,1	549,7
89	30	89,500	1005,2	706	0,347	2,1	551,7
90	00	90,000	1006,0	708	0,346	2,1	553,8
90	30	90,500	1006,8	710	0,345	2,1	555,8



Obrázek 4: Časový průběh teploty plynu a teploty průřezu

Teplota průřezu v čase $t = 90$ minut je $\theta_a = 554^\circ\text{C}$.

<p>VÝPOČET</p> 	Dokument:	<i>SX044a-EN-EU</i>	Strana	6 z 10
	Název	Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce		
	Eurokód			
	Vypracoval	<i>Z. Sokol</i>	Datum	Leden 2006
	Kontroloval	<i>F. Wald</i>	Datum	Leden 2006

Poznámka:

Teplota ocelového průřezu může být určena pomocí dokumentu SD005. Použije se součinitel průřezu $A_p/V = 159 \text{ m}^{-1}$, po zahrnutí vlastností materiálu pro protipožární ochranu

$$\frac{A_p}{V} \frac{\lambda_p}{d_p} = 159 \cdot \frac{0,12}{0,02} = 954 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-3}$$

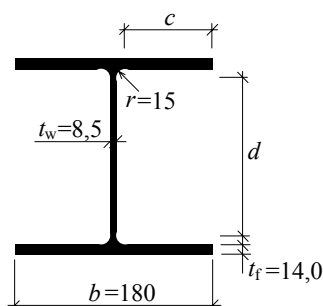
Teplota průřezu v čase $t = 90$ minut je $\theta_a = 602^\circ\text{C}$

Rozdíl mezi teplotou, která byla určena přírůstkovou metodou podle EN1993-1-2 a teplotou získanou z podkladů v dokumentu SD005 je způsoben zjednodušujícím předpokladem $\phi = 0$ (tzn. zanedbáním tepelné kapacity ochranného materiálu) při přípravě grafu v dokumentu SD005. Použití dokumentu vede ke konzervativním hodnotám únosnosti ocelových prvků při požáru.

[SD005](#)

Výpočet únosnosti

Klasifikace průřezu za zvýšené teploty



Obrázek 5: Rozměry průřezu

Štíhlost tlačené pásnice je


$$\frac{c}{t_f} = \frac{70,75}{14,0} = 5,05$$

Maximální hodnota pro 1. třídu průřezu je 9ε . Pro zatřídění při požáru se hodnota ε redukuje na 0,85 násobek hodnoty používané při běžné teplotě. Hodnota pro ocel S355 je:

$$9 \times 0,85 \times 0,814 = 6,22$$

Hodnota pro 1. třídu je překročena, pásnice je 1. třídy.

[EN 1993-1-2 §4.2.2](#)

<p style="text-align: center;">VÝPOČET</p> 	Dokument:	<i>SX044a-EN-EU</i>	Strana	<i>7 z 10</i>
	Název	<i>Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce</i>		
	Eurokód			
	Vypracoval	<i>Z. Sokol</i>	Datum	<i>Leden 2006</i>
	Kontroloval	<i>F. Wald</i>	Datum	<i>Leden 2006</i>

Štíhlost tlačené stěny je

$$\frac{d}{t_w} = \frac{122,0}{8,5} = 14,35$$

a limit pro průřezy 1. třídy je 33ε . Pro zatřídění při požáru se hodnota ε redukuje na 0,85 násobek hodnoty používané při běžné teplotě. Limit

$$33 \times 0,85 \times 0,814 = 22,8$$

není překročen, stěna je 1. třídy.

Průrez je při požáru zařazen do 1. třídy.

Redukční součinitele $k_{y,\theta}$ a $k_{E,\theta}$ pro teplotu průřezu $\theta_a = 554^\circ\text{C}$ jsou:

$$k_{y,\theta} = 0,613$$

$$k_{E,\theta} = 0,444$$

Za předpokladu, že požární odolnost stropní konstrukce je větší než požární odolnost sloupu, je možno počítat s redukovanou vzpěrnou délkou:

$$L_{cr,y,fi} = L_{cr,z,fi} = 0,7 \cdot L = 0,7 \cdot 3,5 = 2,45 \text{ m}$$

Kritické zatížení při běžné teplotě je:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 210000 \times 1363 \times 10^4}{2450^2} = 4706 \text{ kN}$$

Poměrná štíhlost při běžné teplotě je:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{6530 \cdot 355}{4706,3 \cdot 10^3}} = 0,702$$

Poměrná štíhlost při teplotě sloupu θ_a je

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} [k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0,5} = 0,702 \cdot [0,613 / 0,444]^{0,5} = 0,825$$

Součinitel imperfekce:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,53$$

[EN 1993-1-2](#)

[§3.2.1](#)


[SD003](#)

[EN 1993-1-2](#)

[§ 4.2.3.2](#)

[EN 1993-1-2](#)

[§4.2.3.2](#)

<p style="text-align: center;">VÝPOČET</p> 	Dokument:	<i>SX044a-EN-EU</i>	Strana	8 z 10
	Název	Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce		
	Eurokód			
	Vypracoval	<i>Z. Sokol</i>	Datum	Leden 2006
	Kontroloval	<i>F. Wald</i>	Datum	Leden 2006

Vzpěrnostní součinitel:

$$\phi_{z,\theta} = 0,5 \left(1 + \alpha \bar{\lambda}_{z,\theta} + \bar{\lambda}_{z,\theta}^2 \right) = 0,5 \cdot \left(1 + 0,53 \cdot 0,825 + 0,825^2 \right) = 1,058$$

$$\chi_{z,\text{fi}} = \frac{1}{\phi_{z,\theta} + \sqrt{\phi_{z,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{z,\theta}^2}} = \frac{1}{1,058 + \sqrt{1,058^2 - 0,825^2}} = 0,581$$

Návrhová únosnost ve vzpěrném tlaku při teplotě $\theta_a = 554^\circ\text{C}$ je:

$$N_{b,\text{fi},\theta,\text{Rd}} = \chi_{z,\text{fi}} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,\text{fi}}} = 0,581 \cdot 6\,525 \cdot 0,613 \cdot \frac{355}{1,0} = 825,0 \text{ kN}$$

Osová síla působící při požáru je

$$N_{\text{fi},\text{Ed}} = 475,0 \text{ kN}$$

$$N_{b,\text{fi},\theta,\text{Rd}} \geq N_{\text{fi},\text{Ed}}$$

Průřez při požáru vyhovuje.

Posouzení s teplotou určenou podle SD005

Pro porovnání bude určena únosnost sloupu s teplotou získanou s využitím grafu z dokumentu SD005.

[SD005](#)

Teplota: $\theta_a = 602^\circ\text{C}$

Redukční součinitele $k_{y,\theta}$ a $k_{E,\theta}$ pro teplotu průřezu $\theta_a = 602^\circ\text{C}$ jsou:

[SD003](#)


$$k_{y,\theta} = 0,465$$

$$k_{E,\theta} = 0,306$$

Za předpokladu, že požární odolnost stropní konstrukce je větší než požární odolnost sloupu, je možno počítat s redukovanou vzpěrnou délkou:

[EN 1993-1-2 §4.2.3.2](#)

$$L_{\text{cr},y,\text{fi}} = L_{\text{cr},z,\text{fi}} = 0,7 \cdot L = 0,7 \cdot 3,5 = 2,45 \text{ m}$$

<p style="text-align: center;">VÝPOČET</p> 	Dokument:	<i>SX044a-EN-EU</i>	Strana	9 z 10
	Název	Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce		
	Eurokód			
	Vypracoval	<i>Z. Sokol</i>	Datum	Leden 2006
	Kontroloval	<i>F. Wald</i>	Datum	Leden 2006

Kritické zatížení při běžné teplotě je:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{\pi^2 210000 \times 1363 \times 10^4}{2450^2} = 4706 \text{ kN}$$

Poměrná štíhlost při běžné teplotě je:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{6530 \times 355}{4706 \times 10^3}} = 0,702$$

Poměrná štíhlost při teplotě sloupu θ_a je

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} [k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0.5} = 0,702 \cdot [0,465 / 0,306]^{0.5} = 0,865$$

Součinitel imperfekce α :

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,53$$

Vzpěrnostní součinitel je:

$$\phi_{z,\theta} = 0,5 \left(1 + \alpha \bar{\lambda}_{z,\theta} + \bar{\lambda}_{z,\theta}^2 \right) = 0,5 \cdot \left(1 + 0,53 \cdot 0,865 + 0,865^2 \right) = 1,103$$

$$\chi_{z,\theta} = \frac{1}{\phi_{z,\theta} + \sqrt{\phi_{z,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{z,\theta}^2}} = \frac{1}{1,103 + \sqrt{1,103^2 - 0,865^2}} = 0,559$$

Návrhová únosnost ve vzpěrném tlaku při teplotě $\theta_a = 602^\circ\text{C}$ je:

$$N_{b,\theta,Rd} = \chi_{z,\theta} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,\theta}} = 0,559 \cdot 6525 \cdot 0,465 \cdot \frac{355}{1,0} = 602,6 \text{ kN}$$

Osová síla působící při požáru je


$$N_{\theta,Ed} = 475,0 \text{ kN}$$

$$N_{b,\theta,Rd} \geq N_{\theta,Ed}$$

Průřez při požáru vyhovuje.

Poznámka:

Konzervativní předpoklad při určení teploty sloupu s použitím grafu v dokumentu SD005 vedl ke snížení únosnosti o přibližně o 25%.

<p>VÝPOČET</p> 	Dokument:	<i>SX044a-EN-EU</i>	Strana	<i>10 z 10</i>
	Název	<i>Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce</i>		
	Eurokód			
	Vypracoval	<i>Z. Sokol</i>	Datum	<i>Leden 2006</i>
	Kontroloval	<i>F. Wald</i>	Datum	<i>Leden 2006</i>

Porovnání s normovou požární odolností a doporučením výrobce

Mimimální tloušťka nástřiku pro požární odolnost R90 se dá určit z podkladů dodaných výrobcem nástřiku publikovaných v dokumentu 'Fire protection for structural steel in buildings'. Tyto podklady jsou založeny na předpokladu, že kritická teplota prvku je vyšší než 550°C.

Součinitel průřezu = 159 m⁻¹

Tloušťka nástřiku = 20 mm

Porovnání metod

Metoda návrhu	Stupeň využití, μ_0	Plné využití
Teplota sloupu a únosnost vypočteny podle EN 1993-1-2	$\frac{E_{f_i,d}}{R_{f_i,d,0}} = \frac{475}{1295} = 0,37$	$\frac{N_{f_i,Ed}}{N_{b,f_i,\theta,Rd}} = 0,58$
Teplota sloupu určena s využitím dokumentu SD005 a únosnost vypočtena podle EN 1993-1-2	$\frac{E_{f_i,d}}{R_{f_i,d,0}} = \frac{475}{1295} = 0,37$	$\frac{N_{f_i,Ed}}{N_{b,f_i,\theta,Rd}} = 0,79$
Návrh podle doporučení výrobce	0,6 (nominální)	1,0 (nominální)

Skutečný stupeň využití průřezu 0,37 (vypočtený) je podstatně nižší než nominální hodnota 0,6 předpokládaná výrobcem protipožární ochrany. Při použití návrhových metod podle EN1993-1-2 lze tloušťku protipožární ochrany podstatně snížit v porovnání s hodnotami udávanými výrobcem.

Quality Record

RESOURCE TITLE	Řešený příklad: Požární návrh chráněného sloupu průřezu HEB vystaveného normové teplotní křivce		
Reference(s)			
ORIGINAL DOCUMENT			
	Name	Company	Date
Created by	Z. Sokol	CTU in Prague	11/1/06
Technical content checked by	F. Wald	CTU in Prague	30/1/06
Editorial content checked by			
Technical content endorsed by the following STEEL Partners:			
1. UK	G W Owens	SCI	30/6/08
2. France	A Bureau	CTICM	30/6/08
3. Sweden	B Uppfeldt	SBI	30/6/08
4. Germany	C Müller	RWTH	30/6/08
5. Spain	J Chica	Labein	30/6/08
6. Luxembourg	M Haller	PARE	30/6/08
Resource approved by Technical Coordinator	G W Owens	SCI	12/9/06
TRANSLATED DOCUMENT			
This Translation made and checked by:	Z. Sokol	ČVUT	29/6/07
Translated resource approved by	F. Wald	ČVUT	31/7/07
National technical contact	F. Wald		