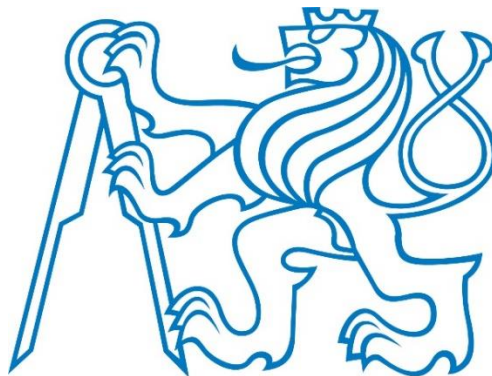


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Diplomová práce



Návrh spřaženého ocelobetonového sloupu uzavřeného průřezu
vystaveného požáru

Design of the composite steel and concrete hollow section column
exposed to fire

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Bc. Martin Čapek

20. 5. 2016

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Františku Waldovi, CSc. za skvělé vedení, užitečné rady a poskytnuté materiály k dané problematice. Ing. Zdeňku Sokolovi, Ph.D. za pomoc s výpočetním programem Ansys.

Abstrakt:

Diplomová práce je zaměřena na vliv výztuže na šíření tepla v průřezích ocelobetonového uzavřeného průřezu. Je shrnuta problematika chování ocelobetonových sloupů za běžné a zvýšené teploty a teplotní vlastnosti materiálů ocelobetonových sloupů při požáru. Pro rozbor vlivu výztuže na šíření tepla je připraven MKP model, který je validován na experimentu z literatury a verifikován na návrhových tabulkách z normy. Je studován vliv hustoty sítě na správnost výsledků. V práci se uvažuje sloup vystavený požáru podle nominální normové křivky ze čtyř a ze dvou stran bez výztuže, vyztužený beronářskou výztužím i ocelovými průřezy.

Klíčová slova:

Ocelobetonový sloup, rozvoj tepla v průřezu ocelobetonovém prvku, metoda konečných prvků, validace, verifikace

Abstract:

The thesis is focused on the influence of reinforcement on heat propagation in the composite steel and concrete hollow cross sections. It summed up the behavior of composite columns at ambient and elevated temperatures and thermal properties of materials of composite columns under fire. To analyze the effect of reinforcement on the propagation of heat is prepared the FEM model, which is validated with experimental from literature and verified to design the tables from standard. Is prepared the effects of mesh density on the accuracy of results. The work is considered columns heated according to by nominal standard fire curve from four and two sides without reinforcement, reinforced by bars and steel sections.

Keywords:

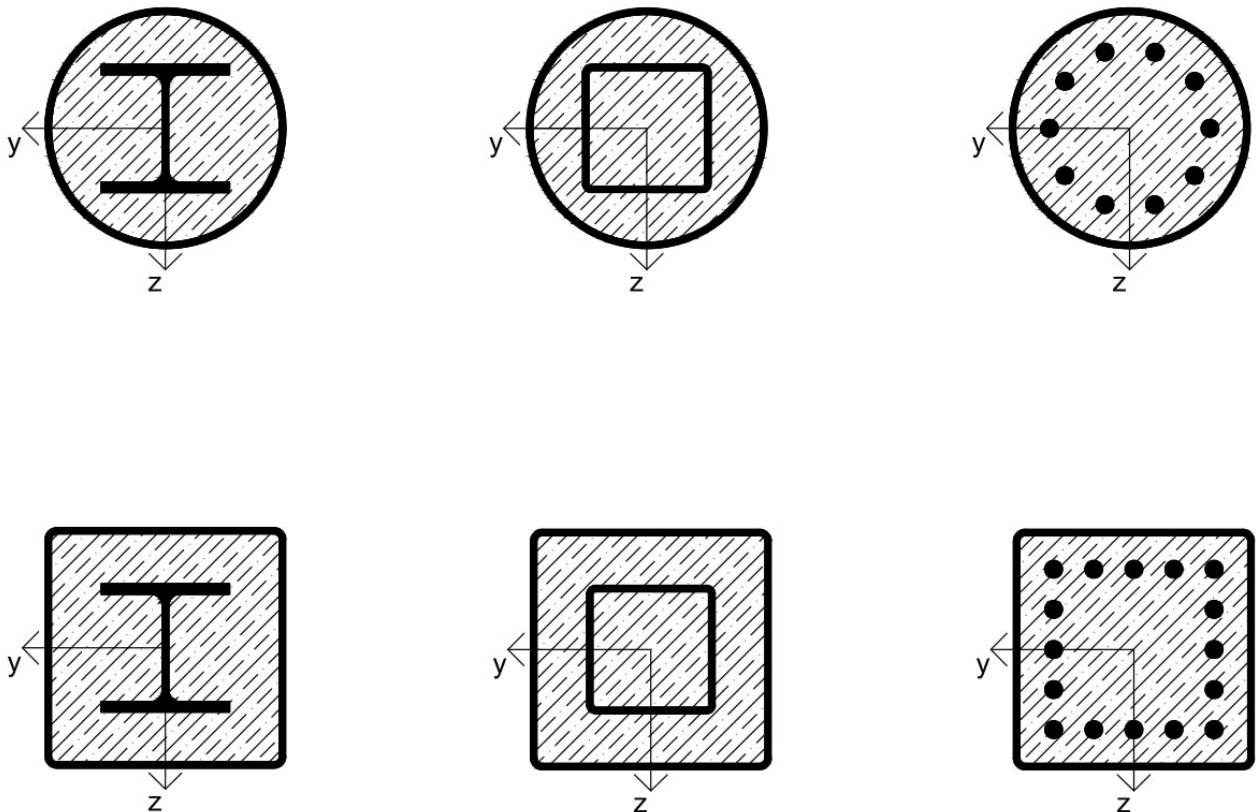
Steel columns, heat development is steel and concrete cross section, finite element method, validation, verification.

Úvod.....	8
1. Mechanické vlastnosti materiálu za běžné teplot.....	10
1.1 Konstrukční ocel.....	10
1.2 Betonářská výztuž.....	10
1.3 Prostý beton.....	11
2. Analytický model ocelobetonového sloupu uzavřeného průřezu za běžné teploty.....	13
2.1 Centrický tlak.....	14
2.2 Ohyb.....	18
2.3 Tlak a ohyb.....	21
2.4 Smyková napětí.....	24
3. Požární odolnost konstrukce	25
3.1 Teplotní křivky.....	25
4. Návrh ocelobetonového sloupu uzavřeného průřezu za zvýšené teploty.....	27
4.1. Mechanické vlastnosti materiálu za zvýšené teploty.....	27
4.1.1 Konstrukční ocel.....	27
4.1.2 Beton.....	31
4.2. Tepelné vlastnosti za zvýšené teploty.....	33
4.2.1 Konstrukční ocel a betonářská výztuž.....	33
4.2.2 Beton.....	35
5. Cíle práce.....	36
6. Teplotní analýza výpočetním programem.....	37
6.1 Metoda konečných prvků	37
6.2 Výpočetní program.....	37
6.3 Volba sítě	40

7. Verifikace modelu.....	42
7.1 Únosnost sloupu za zvýšené teploty určená pomocí normových tabulek.....	43
7.2 Únosnost sloupu při zvýšené teplotě určená výpočetním modelem.....	46
7.3 Porovnání výsledků.....	55
8. Validace požárních testů.....	57
8.1 Čtvercový průřez 315 x 5 mm.....	60
8.2 Čtvercový průřez 630 x 10 mm.....	61
8.3 Kruhový průřez 300 x 5 mm.....	62
9. Studie citlivosti.....	64
9.1 Vliv výztuže na rozložení teploty po průřezu	67
9.1.1 Kruhové průřezy.....	68
9.1.2 Čtvercové průřezy.....	73
9.2 Kruhový průřez vystavený požáru z poloviny svého pláště	77
10. Shrnutí.....	79
Použitá literatura a další zdroje.....	82
Zdroje obrázků.....	83
Zdroje tabulek.....	85

Úvod

Jedny z hlavních materiálů používaných ve stavebnictví jsou beton a ocel, každý má své výhody a nevýhody. Konstrukce tvořeny pouze z oceli vynikají velkou únosností, ale tuhost je často nedostačující, při výstavbě betonových konstrukcí se s nízkou tuhostí příliš nesetkáváme, avšak zásadní nevýhodou betonu je pevnost v tahu, s kterou v podstatě neuvažujeme a tah přebírá v betonových konstrukcích ocelová výztuž. Pokud použijeme oba materiály do jedné konstrukce vznikají tzv. kompozitní konstrukce neboli spřažené konstrukce. Ty využívají kladných vlastností z obou materiálů jako je tuhost u betonu, či vysokou únosnost oceli a naopak navzájem odstraňuje záporné vlastnosti samostatně působících materiálů. Kompozitní konstrukce získává příznivé vlastnosti i při zvýšených teplotách, či vystavení požáru. Při vystavení oceli požáru ztrácí materiál svou únosnost, beton je ovlivněn podobně, ale díky pomalejšímu prohřívání dochází k degradaci pomaleji. Díky tomu je ocelobetonová konstrukce odolnější než samostatně působící ocelové prvky. Tato skutečnost nám umožňuje použít ocelobetonové prvky například ve výškových budovách, kde jsou vysoké požadavky na požární odolnost konstrukce.



Obr. 1 Příklad vyztužených ocelobetonových sloupů

Je velké množství konstrukčních ocelobetonových prvků. Jsou to například válcované nosníky s vybetonovaným prostorem mezi pásnicemi, či ocelobetonové stropní desky spřažené pomocí trnů s nosníkem. Další prvkem využívající výhod spolupůsobení oceli s betonem jsou sloupy. Často jsou tvořeny válcovaným profilem s vybetonovaným prostorem mezi pásnicemi, nebo obetonované ocelové sloupy s tuhou výztuží. Tato práce se však zabývá konkrétním druhem ocelobetonových sloupů vystavených účinkům požáru. Ty jsou tvořeny dutým ocelovým uzavřeným profilem různých tvarů, který je vyplněn betonem a vyztužen pruty, válcovaným profilem nebo trubkovým profilem viz obr. 1. Betonové jádro nám významně zvyšuje požární odolnost sloupu, dále zvyšuje tuhost a tím se snižuje štíhlost a zvyšuje únosnost v centrickém i excentricky působícím tlaku.

1. Mechanické vlastnosti materiálu za běžné teploty

1.1 Konstrukční ocel

Na tvorbu ocelobetonových konstrukcí se používá konstrukční ocel. Vyšší třída než S450 se pro ocelobetonové konstrukce nepoužívá. Charakteristické hodnoty meze kluzu f_y a mezní pevnost v tahu f_u pro běžně používanou ocel jsou uvedeny v tab. 1 a rozděleny podle tloušťky materiálu.

Součinitel příčného přetvoření $\nu = 0,3$. Modul pružnosti je 210 GPa, modul pružnosti ve smyku se uvažuje 81 GPa. U ocelobetonových konstrukcí se součinitel délkové teplotní roztažnosti uvažuje stejný jako pro beton.

Tab. 1 Jmenovité hodnoty meze kluzu f_y a mezní pevnosti f_u pro konstrukční oceli v N/mm²

Druh oceli dle EN 10025 – 2	Jmenovitá tloušťka prvku t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t < 80 mm	
	f_y	f_u	f_y	f_u
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550

1.2 Betonářská výztuž

Pro výztuž ocelobetonových prvků se nejčastěji používána ocel 10 505. Tato ocel odpovídá zahraničním betonářským ocelím a zavedené evropské normě ČSN EN10080. Základní průměry betonářských ocelí jsou: 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28 a 32 mm, ale lze se setkat i s profily 39 nebo 50 mm. Současné značení betonářské oceli je ve tvaru např. B500A, viz tab. 2 kde B značí betonářskou ocel, číslo určuje mez kluzu v N/mm² a poslední písmeno tažnost. Tažnost se dělí na tři druhy a to A – normální, B – vysoká a C – velmi vysoká. Modul pružnosti pro betonářské výztuže je 210 GPa.

Tab. 2 Charakteristické meze kluzu pro betonářskou výztuž

Označení dle EN	Mez kluzu f_{yk} [N/mm ²]
B 420B	420
B 500A	500
B 500B	500
B 550A	550
B 550B	550

1.2 Prostý beton

Beton je jedním ze základních stavebních materiálů. Je tvořen třemi základními přísadami a to z pojiva, plniva a vody. V ocelobetonových konstrukcích se nejčastěji používá prostý beton s hutným kamenivem, ale výjimkou nejsou ani betony s lehkým kamenivem. Jednotlivé pevnostní třídy betonu znázorňuje tab. 3 ve které

f_{ck} je charakteristická pevnost v tlaku měřená na válcích,

f_{ctm} střední hodnota pevnosti v tahu,

$f_{ctk}^{0,05}$ resp. $f_{ctk}^{0,95}$ charakteristické pevnosti v tahu (index udává kvantil).

Tab. 3 Pevnostní třídy betonu v N/mm²

Třída betonu	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75
f_{ck}	20	25	30	35	40	45	50	55	60
f_{ctm}	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4
$f_{ctk}^{0,05}$	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1
$f_{ctk}^{0,95}$	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7

První číslo ve značení třídy betonu udává válcovou pevnost a druhé krychelnou. Obě pevnosti jsou v charakteristických hodnotách. Pro ocelobetonové konstrukce se nemá použít nižší třída betonu než C20/25 a vyšší než C60/75.

Hodnoty sečnového modulu pružnosti E_{cm} pro jednotlivé pevnostní třídy betonu jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Hodnoty sečnového modulu pružnosti E_{cm} v kN/mm²

Třída betonu	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75
E_{cm}	30	31	33	34	35	36	37	38	39

Součinitel délkové teplotní roztažnosti se pro beton uvažuje $\alpha = 12 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a součinitel příčného přetvoření betonu je $\nu = 0,2$. Příčné přetvoření v tahu se u betonu neuvažuje $\nu = 0$.

2. Analytický model ocelobetonového sloupu uzavřeného průřezu za běžné teploty

Ocelobetonové sloupy díky spolupůsobení obou materiálů získávají velmi dobré statické vlastnosti. Celková únosnost je tvořena jak betonovou tak ocelovou částí, toto má výhodu především pro účinky centrického tlaku.

Při navrhování ocelobetonových sloupů uzavřeného průřezu lze zvolit ze dvou metod zjednodušené, nebo obecné metody. Obecná metoda je založena na teorii druhého řádu.

Při návrhu ocelobetonových sloupů uzavřeného průřezu je potřeba zabránit lokálnímu boulení, proto musíme dodržet následující podmínky

$$\begin{array}{ll} d/t \leq 90\varepsilon^2 & \text{pro kruhové uzavřené profily,} \\ h/t \leq 52\varepsilon^2 & \text{pro pravoúhlé uzavřené profily,} \end{array}$$

kde d je vnější průměr trubky [mm],

t tloušťka stěny profilu [mm],

h největší vnější rozměr pravoúhlého uzavřeného profilu [mm],

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ kde f_y je mez kluzu v [N/mm²].

U Ocelobetonových sloupů uzavřeného průřezu často není nutná vnitřní podélná výztuž, pokud vzrůstají požadavky například na požární odolnost je nutné průřez vyztužit.

Zjednodušená metoda se smí použít pouze na průřezy sloupů, které jsou dvouose souměrné, konstantní po délce a za předpokladu splnění následujících podmínek

$$0,2 < \delta < 0,9 \quad \text{kde } \delta \text{ je poměr únosnosti ocelové části průřezu k únosnosti celého průřezu}$$

$$\delta = (A_a f_y / \gamma_a) / N_{pl,Rd}$$

$$\bar{\lambda} \leq 2,0 \quad \text{poměrná štíhlost,}$$

$$0,2 \leq h/b \leq 5,0. \quad \text{poměr výšky ku šířce.}$$

2.1 Centrický tlak

Únosnost v tlaku $N_{pl,Rd}$ ocelobetonového sloupu uzavřeného průřezu při předpokladu plné plastifikace lze určit ze vzorce

$$N_{pl,Rd} = A_a \frac{f_y}{\gamma_a} + A_c \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

U ocelobetonového sloupu uzavřeného průřezu, můžeme uvažovat se zvýšenou pevností betonu. Beton je uzavřený uvnitř ocelového pláště, díky tomu se nemůže samovolně roztahovat. Beton se snaží uvnitř trubky deformovat a to má za následek vznik příčných napětí uvnitř průřezu, tento jev se nazývá ovinutí betonu. Díky vnitřnímu napětí uvnitř profilu musí být snížena návrhová pevnost ocelového profilu.

Ovinutí betonu lze uvažovat pouze u sloupů, splňujících následující podmínky

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} &\leq 0,5 && \text{pro krátké sloupy,} \\ e &\leq d/10 && \text{síla musí působit téměř centrická.} \end{aligned}$$

Po splnění předchozích podmínek můžeme únosnost v tlaku pro uzavřené profily vyplněné betonem určit následujícím vzorcem:

$$N_{pl,Rd} = A_a \eta_a \frac{f_y}{\gamma_a} + A_c \left[1 + \eta_c (t/d) (f_y/f_{ck}) \right] \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

Tento vzorec neuvažuje vybočení sloupu, proto je vhodný pouze pro krátké sloupy, kde není vybočení pravděpodobné.

Vliv excentricity

při centrickém tlaku ($e = 0$) je:

$$\eta_c = \eta_{c0} = 4,9 - 18,5 \lambda + 17 \lambda^2 \quad (\text{vždy } \geq 0)$$

$$\eta_a = \eta_{a0} = 0,25 (3 + 2 \bar{\lambda}) \quad (\text{vždy } \leq 1)$$

při excentricitě $0 < e \leq d/10$ je:

$$\eta_c = \eta_{c0} (1 - 10e/d)$$

$$\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) (10e/d)$$

Při uvažování $e > d/10$ je $\eta_c = 0$ a $\eta_a = 1,0$. Po dosazení těchto hodnot do vzorce pro únosnost sloupu s uvažováním vlivu ovinutí betonu zjistíme, že pro $e > d/10$ se vliv ovinutí ruší.

U dlouhých sloupů ($\bar{\lambda} > 0,2$) se nesmí zanedbat možnost vybočení.

Kritické břemeno ideálního ocelobetonového prutu bez imperfekt

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{l^2}$$

Ohybová tuhost

$$(EI)_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + 0,6 E_c I_c$$

Kde

$E_a = E_s$ je modul pružnosti pro výztuž a ocelový plášť,

I_a, I_s, I_c moment setrvačnosti ocelové, betonové části a betonářské výztuže,

E_{cm} sečnový modul pružnosti betonu,

l vzpěrná délka.

U štíhlých sloupů mohou dlouhodobé účinky zatížení výrazně ovlivnit ohybovou tuhost. Tento fakt lze vyjádřit následujícím vztahem pro modul pružnosti betonu

$$E_c = E_{cm} \frac{1}{1 + \frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \phi_t}$$

kde

$N_{G,Ed}$ je dlouhodobá složka síly N_{Ed} ,

ϕ_t součinitel dotvarování, uvažujeme 100% vlhkosti pro uzavřené profily vyplněný betonem.

V případě, že je sloup součástí rámové konstrukce je zapotřebí ho počítat dle teorie 2. řádu, imperfekce rámu se započítávají stejně jako u ocelové konstrukce a imperfekce jednotlivých prutů dle tab. 6. Výpočet dle teorie 2. řádu lze zjednodušit pomocí součinitele k , který zvětší momenty vypočtené dle 1.řádu

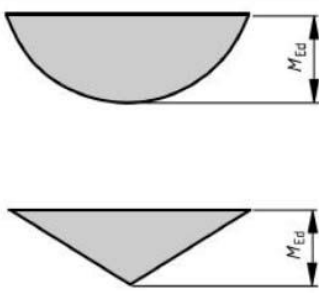
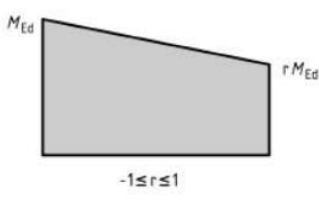
$$k = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}}$$

kde

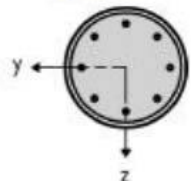
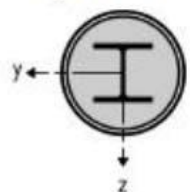
N_{cr} kritická síla pro vzpěrnou délku rovnou délce prutu,

β součinitel dle tab. 5.

Tab. 5 Hodnota součinitele β

Průběh momentu	Součinitel β	Poznámka
	<p>Ohybový moment prvního řádu plynoucí z imperfekce prutu nebo příčného zatížení:</p> $\beta = 1,0$	<p>M_{Ed} je největší ohybový moment na délce sloupu, při zanedbání vlivů druhého řádu</p>
	<p>Koncové momenty:</p> $\beta = 0,66 + 0,44 r$ <p>ale $\beta \geq 0,44$</p>	<p>M_{Ed} a $r M_{Ed}$ jsou koncové momenty z globální analýzy prvního nebo druhého řádu</p>

Tab. 6 Imperfekce ocelobetonového sloupu uzavřeného průřezu a příslušné křivky vzpěrnosti

Průřez	Omezení	Osa vybočení	Křivka vzpěrnosti	Imperfekce prvku
<p>Kruhový nebo pravoúhlý dutý ocelový průřez</p> 	$\rho_s \leq 3 \%$	libovolná	a	$L/300$
	$3 \% < \rho_s \leq 6 \%$	libovolná	b	$L/200$
<p>Kruhový dutý ocelový průřez s přidáním I průřezem</p> 		y-y	b	$L/200$
		z-z	b	$L/200$

Při globální analýze u rámových stojek s momenty na koncích lze zanedbat vliv imperfekcí pokud jejich štíhlost je:

$$\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{Ed}}}$$

Je-li při centrickém tlaku u sloupů s neposuvnými konci splněna podmínka $N_{cr} \geq 10 N_{Ed}$, tyto sloupy se nemusí posuzovat dle teorie 2. řádu.

Účinky dlouhodobého zatížení se musí zkoumat u prutů, které nespĺňují podmínku poměrné štíhlosti uvedené v tab. 7, která platí pro centricky tlačené sloupy, nebo pro sloupy s malou excentricitou ($e/d < 2$). Hodnota d představuje rozměr sloupu měřený v rovině ohybu. Účinky dlouhodobého zatížení při výpočtu $\bar{\lambda}$ lze zanedbat.

Tab. 7 Mezní hodnoty poměrné štíhlosti $\bar{\lambda}$

Konstrukce	max $\bar{\lambda}$	
	bez posuvu	s posuvem
obetonované průřezy částečně obetonované průřezy	0,8	0,5
uzavřené profily vyplněné betonem	$\frac{0,8}{(1 - \delta)}$	$\frac{0,5}{(1 - \delta)}$

Ohybová tuhost ocelobetonového sloupu při výpočtu dle teorie 2. řádu

$$(EI)_{\text{eff,d}} = 0,5 (E_a I_a + E_s I_s + 0,9 E_{cm} I_c)$$

Poměrná štíhlost sloupu

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{cr}}}$$

Po určení poměrné štíhlosti přiřadíme správnou křivku vzpěrnosti pomocí tab. 6. Z tabulek určíme součinitel vzpěrnosti χ .

Mezní stav únosnosti

$$N_{b,Rd} = \chi N_{pl,Rd}$$

Únosnost sloupu vyhoví, pokud platí vztah

$$N_{Ed} \leq \chi N_{pl,Rd}$$

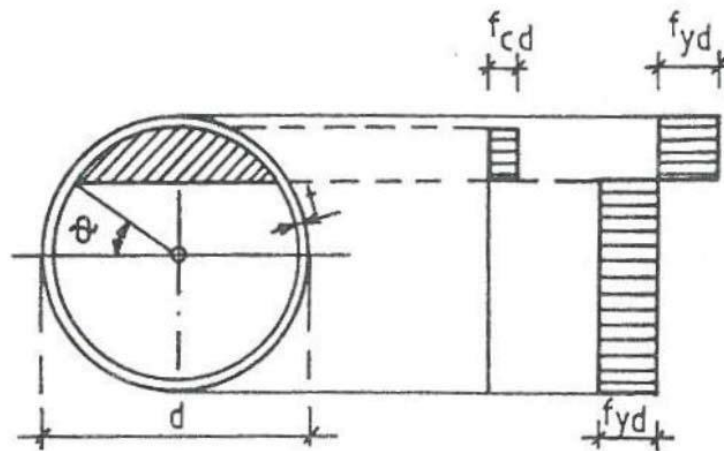
Kde N_{Ed} je zatěžovací návrhová síla

2.2 Ohyb

Moment únosnosti ocelobetonového sloupu uzavřeného průřezu lze vypočítat pomocí plastického rozdělení napětí. Při výpočtu uvažujeme se skutečností, že betonové jádro působí pouze v tlaku. Tyto průřezy sloupů většinou odpovídají požadavkům třídy 1 nebo 2.

Kruhový ocelobetonový sloup uzavřeného průřezu

Pro správné rozložení napětí uvnitř profilu je zapotřebí nejprve nalézt neutrální osu. U kruhových profilů je nalezení neutrální osy složitější než u pravoúhlých profilů. Řešením je zjištění úhlu θ , podle kterého se poloha určí.



Obr. 2 Kruhový ocelobetonový sloup uzavřeného průřezu a rozložením napětí

Rovnice rovnováhy po integraci

$$\frac{f_{cd} (d-2t)^2}{8} (\pi - 2\theta - 2\sin\theta) = 2 f_{yd} t (d-t) \theta$$

Moment únosnosti

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,a} f_{yd} (1 + 0,01\Psi)$$

Plastický průřezový modul ocelového profilu

$$W_{pl,a} = t^3 (d/t - 1)^2$$

součinitel Ψ získáme interpolací z tab. 8.

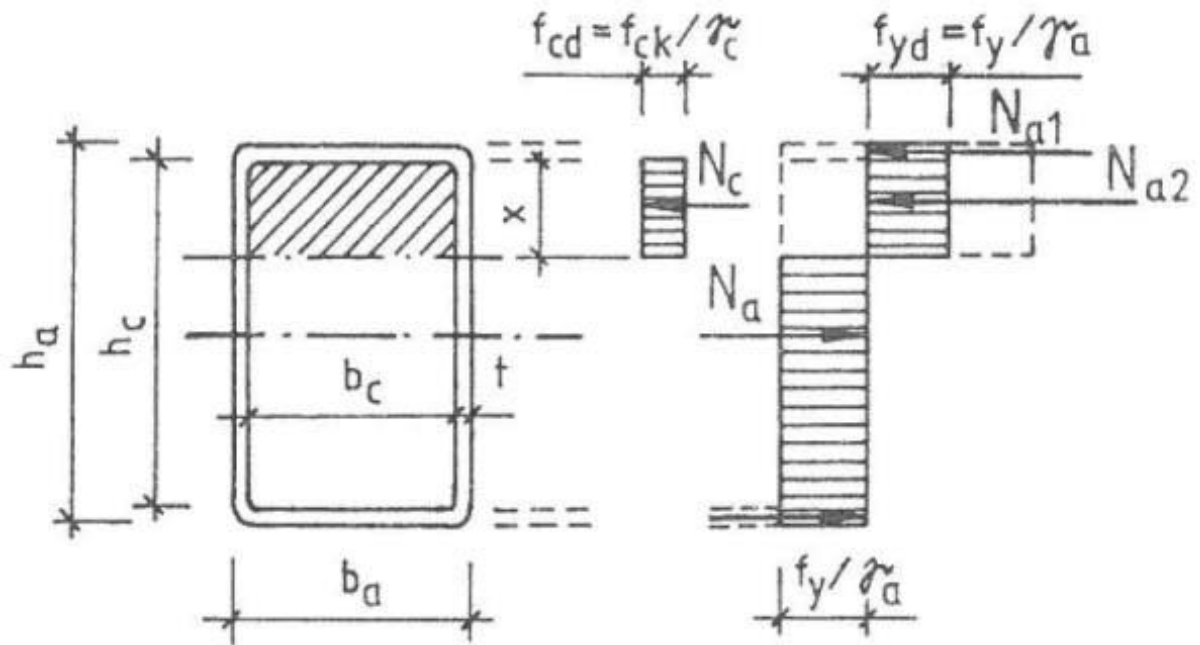
Tab. 8 Součinitel Ψ pro kruhové průřezy

f_{cd}/f_{yd}	d/t												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
0,01	0,52	1,30	2,05	2,78	3,47	4,14	4,78	5,40	6,00	6,57	7,12	7,66	8,18
0,02	1,02	2,51	3,89	5,16	6,35	7,45	8,48	9,45	10,36	11,21	12,02	12,78	13,51
0,03	1,51	3,64	5,54	7,25	8,78	10,18	11,46	12,63	13,72	14,72	15,66	16,53	17,35
0,04	1,99	4,69	7,04	9,08	10,88	12,49	13,93	15,23	16,42	17,51	18,51	19,44	20,30
0,05	2,46	5,69	8,41	10,72	12,72	14,47	16,02	17,41	18,66	19,79	20,83	21,79	22,67
0,06	2,91	6,62	9,66	12,19	14,34	16,20	17,82	19,26	20,55	21,71	22,77	23,74	24,63
0,07	3,35	7,51	10,82	13,52	15,79	17,72	19,40	20,87	22,19	23,36	24,43	25,39	26,28
0,08	3,78	8,34	11,89	14,74	17,09	19,08	20,08	22,29	23,62	24,80	25,86	26,83	27,71
0,09	4,20	9,14	12,89	15,86	18,28	20,31	22,05	23,55	24,88	26,06	27,12	28,08	28,95
0,10	4,61	9,89	13,82	16,88	19,36	21,42	23,17	24,69	26,01	27,19	28,24	29,19	30,05
0,11	5,01	10,61	14,69	17,84	20,36	22,44	24,20	25,71	27,03	28,20	29,25	30,18	31,04
0,12	5,40	11,29	15,51	18,72	21,28	23,37	25,13	26,64	27,96	29,12	30,15	31,08	31,92
0,13	5,78	11,94	16,29	19,55	22,13	24,23	25,99	27,50	28,81	29,96	30,98	31,89	32,72
0,14	6,15	12,57	17,01	20,32	22,92	25,03	26,79	28,28	29,58	30,72	31,73	32,64	33,46
0,15	6,52	13,17	17,70	21,05	23,66	25,77	27,52	29,01	30,30	31,43	32,43	33,32	34,13
0,16	6,87	13,74	18,36	21,74	24,35	26,46	28,21	29,69	30,96	32,08	33,07	33,95	34,75
0,17	7,22	14,29	18,98	22,38	25,00	27,11	28,85	30,32	31,58	32,69	33,66	34,54	35,32
0,18	7,56	14,82	19,57	22,99	25,62	27,72	29,45	30,91	32,16	33,25	34,22	35,08	35,85
0,19	7,89	15,33	20,14	23,57	26,20	28,29	30,01	31,46	32,70	33,78	34,74	35,59	36,35
0,20	8,22	15,82	20,68	24,13	26,75	28,83	30,54	31,98	33,21	34,28	35,22	36,06	36,82

Kde f_{cd} a f_{yd} jsou návrhové pevnosti betonu a oceli.

Pravoúhlý ocelobetonový sloup uzavřeného průřezu

V případě pravoúhlých ocelobetonových uzavřených sloupů je hledání neutrální osy jednodušší.



Obr. 3 Pravoúhlý ocelobetonový sloup uzavřeného průřezu a rozložením napětí

Rovnice rovnováhy napětí uvnitř průřezu obr. 3

$$N_c + N_{a1} + N_{a2} = N_a$$

$$x b_c f_{cd} + b_a t 2 f_{yd} + 2 x t 2 f_{yd} = A_a f_{yd}$$

Poloha neutrální osy

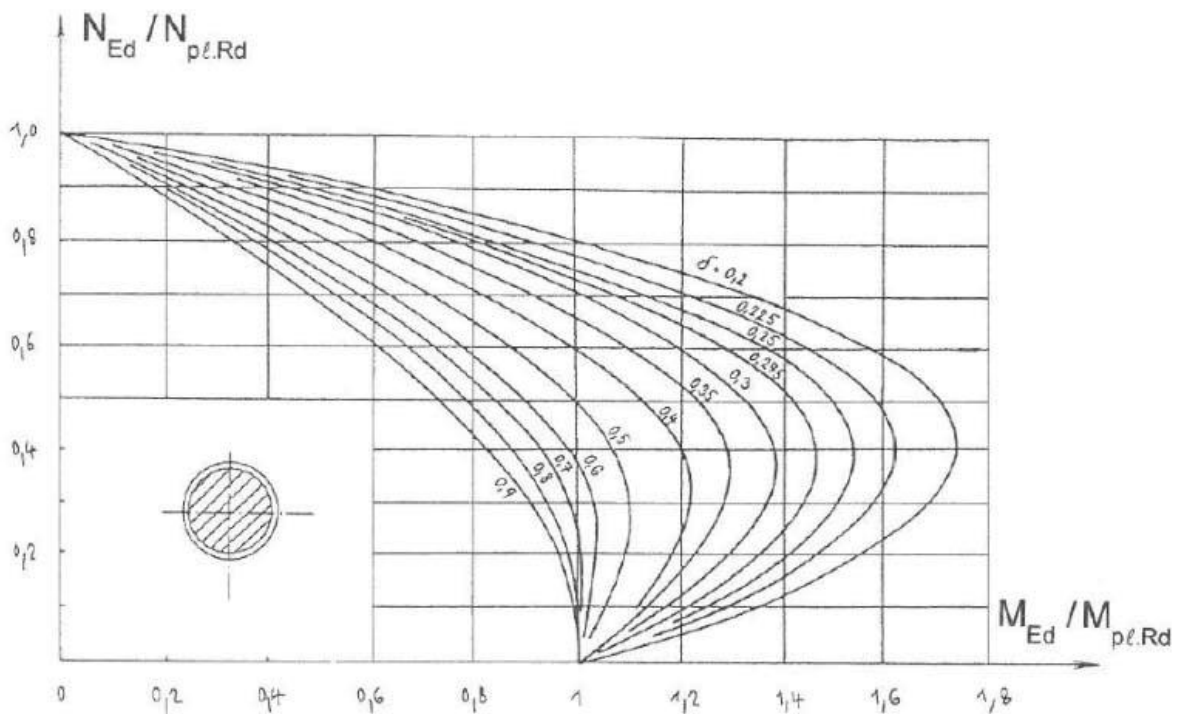
$$x = \frac{A_a - 2b_a t}{4t + b_c \left(\frac{f_{cd}}{f_{yd}}\right)}$$

Moment únosnosti

$$M_{pl,Rd} = [0,5A_a (h_c - x) + b_a t (x + t)] f_{yd}$$

2.3 Tlak a ohyb

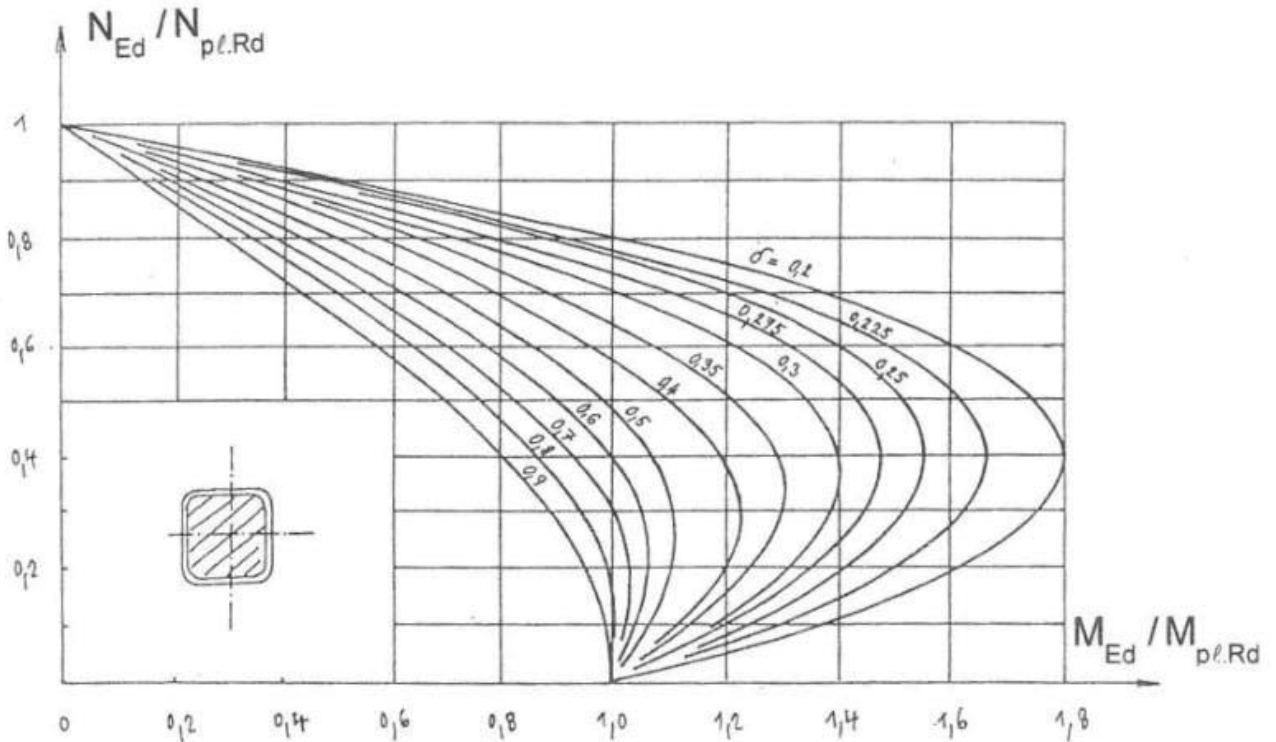
Pokud nám působí na ocelobetonový sloup uzavřeného průřezu ohybový moment a tlaková síla v jedné rovině posuzujeme profil na kombinaci obou těchto účinků v rovině ohybu. Ke kombinaci tlaku a ohybu se nejčastěji využívá interakční křivka. Interakční křivky jsou tvořeny osou vodorovnou, na kterou se vynese moment a osou svislou na kterou vynášíme osovou sílu. Začátek interakčního diagramu na svislé ose značí centrický tlak a konec interakčního diagramu na vodorovné ose značí ohyb. Interakční křivku lze vytvořit pro jakýkoliv ocelobetonový sloup uzavřeného průřezu. Na obr. 4 a obr. 5 jsou znázorněny interakční křivky pro kruhový a pravoúhlý ocelobetonový sloup.



Obr. 4 Interakční závislost pro kruhové uzavřené profily vyplněné betonem

Interakční křivky jsou pro běžné případy zpracovány pro různé hodnoty průměru δ vystihující příspěvek oceli k celkové únosnosti spřaženého průřezu v tlaku.

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}}$$



Obr. 5 Interakční závislost pro pravoúhlé uzavřené profily vyplněné betonem

V Případě zatížení sloupu příčnými silami je zapotřebí ověřit smykovou únosnost sloupu.

Sloup namáhaný současně normálovou silou N_{Ed} a ohybovým momentem M_{Ed} musí vyhovět podmínce

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{M_{Ed}}{\mu_d M_{pl,Rd}} \leq \alpha_m$$

kde

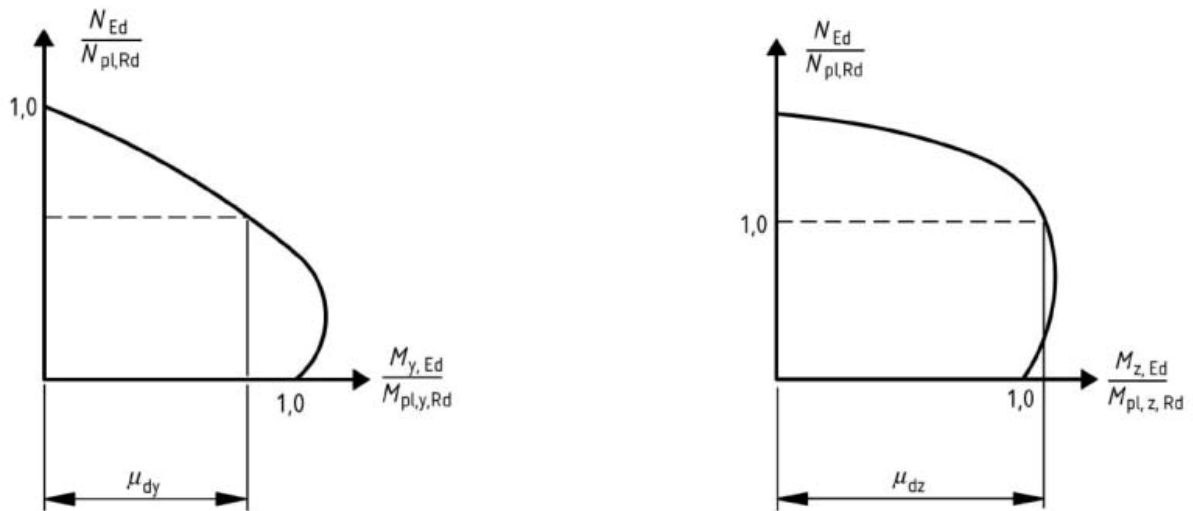
$\alpha_m = 0,9$ pro oceli tříd S235 a S355,

$\alpha_m = 0,8$ pro oceli třídy S420 a S460,

$\mu_d = \mu_{d,z} = \mu_{d,y}$ určíme pomocí rovin ohybu,

$\mu_d > 1,0$ lze použít, pokud je ohybový moment v průřezu zapříčiněn excentrickou normálovou silou,

$\mu_d < 1,0$ pro příčně zatížené sloupy.



Obr. 6 Hodnoty μ_d

Pokud působí normálové síly a ohybové momenty v obou rovinách průřezu musí platit následující vztahy

$$\frac{M_{y,Ed}}{\mu_{d,y} M_{pl,y,Rd}} \leq 0,9$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{\mu_{d,z} M_{pl,z,Rd}} \leq 0,9$$

Nejvyšší ohybové únosnosti dosáhne ocelobetonový sloup za působení osové síly. Pokud působí osová síla a ohybový moment nezávisle, musí se uvažovat s náhodným poklesem síly, a proto se snižuje příznivý účinek síly na 80 %. Toto se projeví v menší hodnotě součinitele μ_d .

2.4 Smyková napětí

V ocelobetonových profilech vznikají při působení koncových momentů, či při příčném zatížení smyková napětí. Tato napětí se mohou přenášet mezi ocelovým prvkem a betonovou částí pomocí spřahovacích prvků, nebo se přenesou pomocí tření a soudržnosti. V případě námi zkoumaných ocelobetonových sloupů dutých průřezů se porušení soudržnosti ocelového pláště a betonového jádra smykovou silou neuvažuje a předpokládáme, že vzniklé smykové síly jsou přeneseny třením a soudržností. Návrhové smykové pevnosti v soudržnosti pro jednotlivé druhy ocelobetonových průřezů určuje tab. 9.

Tab. 9 Smykové pevnosti v soudržnosti τ_{Rd} dle typu průřezu

Typ průřezu	Smyková pevnost τ_{Rd} v N/mm ²
Plně obetonovaný průřez	0,30
Kruhový uzavřený profil vyplněný betonem	0,55
Pravoúhlý uzavřený profil vyplněný betonem	0,40
Pásnice částečně obetonovaných profilů	0,20
Stěny částečně obetonovaných profilů	0,00

Z tab. 9 je patrné, že ocelobetonové sloupy uzavřeného průřezu mají mnohem vyšší smykovou pevnost, oproti ostatním druhům ocelobetonových sloupů.

3. Požární odolnost konstrukce

Požární odolnost konstrukce je doba v min, během které je prvek schopen odolávat účinkům požárního zatížení, aniž by došlo ke ztrátě jeho požadovaných schopností. Pro popis posuzovaných mezních stavů konstrukce je vytvořené značení

- R – nosnost konstrukce,
- E – celistvost (během požadované doby požární odolnosti nesmí dojít ke vzniku trhlin na neohřívané straně požárně dělící konstrukce),
- I – izolační schopnost (teplota na neohřívaném povrchu požárně dělící konstrukce nesmí překročit 140 °C),
- W – radiace (tepelný tok na neohřívané straně požárně dělící konstrukce nesmí překročit 15 kW/m²),
- M - kritérium mechanické odolnosti vůči nárazu.

K mezním stavům jsou vždy přiřazeny časy v min. Tyto časy nám udávají dobu, během které má prvek plnit předepsané vlastnosti. Předepsané intervaly jsou: 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 ,240 nebo 360 min.

3.1 Teplotní křivky

K modelování požáru jsou k dispozici čtyři druhy nominálních teplotních křivek. Tyto křivky určují teploty plynů v daném požárně zatíženém prostoru. Teplota těchto křivek je funkcí závislá na čase v min. Druhy teplotních nominálních křivek

- Normová teplotní křivka (ISO 834) – nejčastěji používaná křivka, (celulózové hoření)

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

kde θ_g je teplota plynů v požárním úseku [° C],

t čas [min].

- Teplotní křivka vnějšího požáru – požár působící na obvodové stěny z vnější strany

$$\theta_g = 20 + 660 (1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t})$$

kde θ_g je teplota plynů v blízkosti zatěžovaného prvku [°C],

t čas [min].

- Uhlovodíková teplotní křivka – hoření ropných produktů

$$\theta_g = 20 + 1080 (1 - 0,355 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t})$$

kde θ_g teplota plynů v požárním úseku [$^{\circ}\text{C}$],

t čas [min].

- Křivka pomalého zahřívání – požáry v dutinách podlah či podhledů

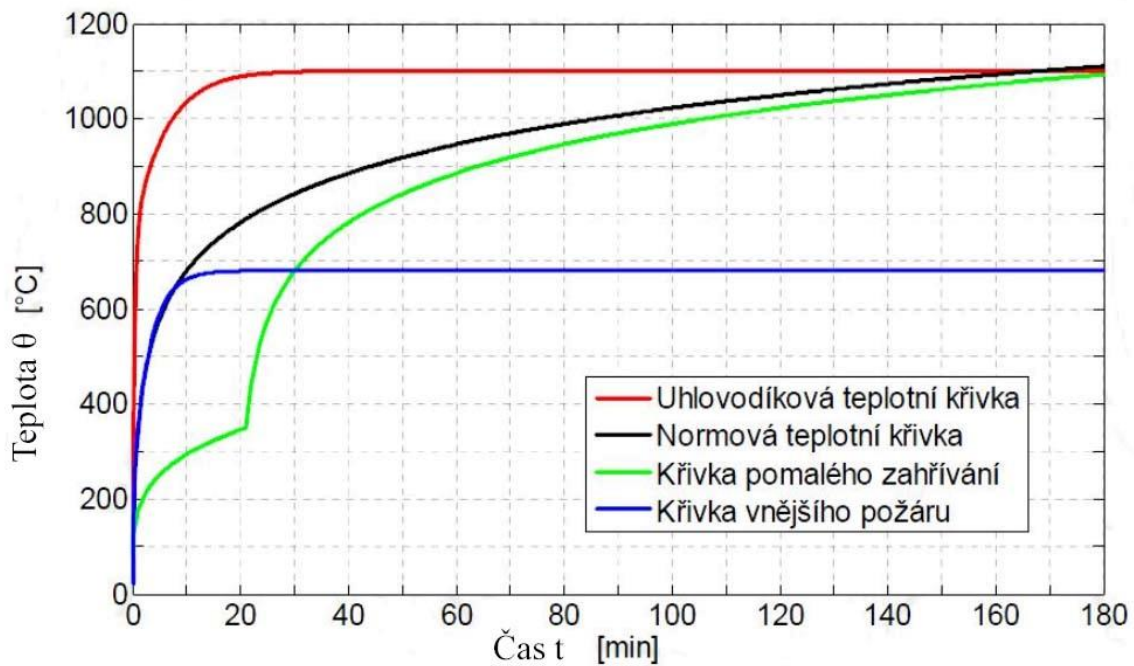
$$\theta_g = 20 + 154t^{0,25} \quad \text{platí pro} \quad 0 < t \leq 21$$

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} [8(t-20) + 1] \quad \text{platí pro} \quad t > 21$$

kde θ_g teplota plynů v požárním úseku [$^{\circ}\text{C}$],

t čas [min].

Na obr. 7 jsou znázorněny nominální teplotní křivky používané při modelování požárního zatížení konstrukcí. Křivky jsou znázorněny v závislosti na čase.



Obr. 7 Nominální teplotní křivky

4. Návrh ocelobetonového sloupu uzavřeného průřezu za zvýšené teploty

Beton i ocel se zvyšující se teplotou ztrácejí své vlastnosti. U ocelových prvků dochází při zvýšené teplotě k poklesu modulu pružnosti a mezi kluzu. U betonových prvků také dochází ke ztrátě únosnosti, ale díky pomalejšímu šíření tepla a masivnosti betonu nejsou ztráty únosnosti tak výrazné. Proto vznikají ocelobetonové prvky, které využívají výhod obou materiálů. Díky betonovému jádru se u ocelobetonových uzavřených sloupů pomaleji prohřívá výztuž a ztráta únosnosti výztuže není tak razantní jako u obvodového ocelového pláště.

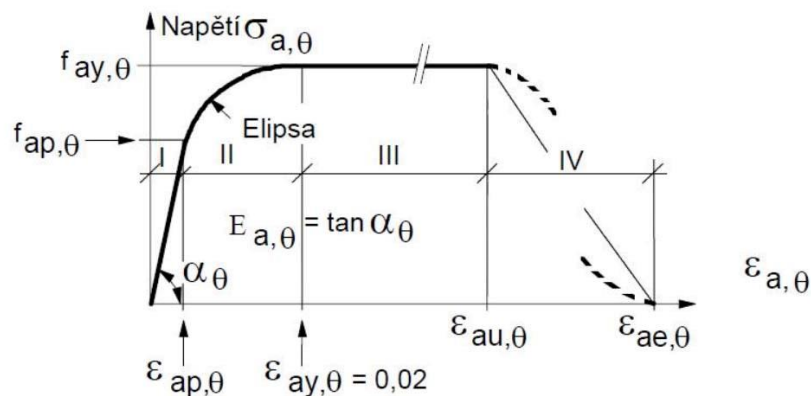
Únosnost ocelobetonových sloupů za zvýšené teploty lze stanovit

- složitými výpočty zahrnující všechny změny vlastností materiálů
- zjednodušené výpočty
- tabulky normy ČSN EN1994-1-2 udávající požadavky na rozměry průřezu pro požadovanou dobu požární odolnosti

4.1 Mechanické vlastnosti materiálů za zvýšené teploty

Jak ocel, tak i beton s rostoucí teplotou mění své mechanické vlastnosti. Pro určení nových vlastností vycházíme z charakteristických hodnot materiálu za běžné teploty, které jsou redukovány součinitel pro pevnostní nebo deformační vlastnosti závisící na teplotě.

4.1.1 Konstrukční ocel



Obr. 8 Pracovní diagram oceli za zvýšené teploty

Na obr. 8 je pracovní diagram popisující průběh pevnostních a deformačních vlastností konstrukční oceli za zvýšené teploty. Tento diagram je možné využít, pokud rychlost ohřívání je mezi 2 až 50 K/min. Pracovní diagram tvoří tři základní části

- I / Pružná část
- II / Eliptická (přechodová) část
- III / Plastická část

Pro tyto tři základní části jsou v tab. 10 vzorce parametrů popisující křivku pracovního diagramu oceli.

Tab. 10 Parametry popisující křivku pracovního diagramu oceli za zvýšené teploty

Poměrné přetvoření	Napětí σ	Tangentový modul
I / pružné $\varepsilon \leq \varepsilon_{ap,\theta}$	$E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
II / eliptický přechod $\varepsilon_{ap,\theta} \leq \varepsilon$ $\varepsilon \leq \varepsilon_{ay,\theta}$	$\left(f_{ap,\theta} - c\right) + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)^2}$ <p style="text-align: center;">kde</p> $a^2 = \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} + c / E_{a,\theta}\right)$ $b^2 = E_{a,\theta} \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) c + c^2$ $c = \frac{\left(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta}\right)^2}{E_{a,\theta} \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}\right) - 2 \left(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta}\right)}$	$\frac{b \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)}{a \sqrt{a^2 - \left(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta}\right)^2}}$
III / plastické $\varepsilon_{ay,\theta} \leq \varepsilon$ $\varepsilon \leq \varepsilon_{au,\theta}$	$f_{ay,\theta}$	0

kde

$f_{ap,\theta}$ je mez úměrnosti,

$f_{ay,\theta}$ nejvyšší úroveň napětí v požární situaci,

$E_{a,\theta}$ modul pružnosti,

$\varepsilon_{ap,\theta}$ poměrné přetvoření na mezi úměrnosti,

$\varepsilon_{ay,\theta}$ poměrné přetvoření při nejvyšší úrovni napětí.

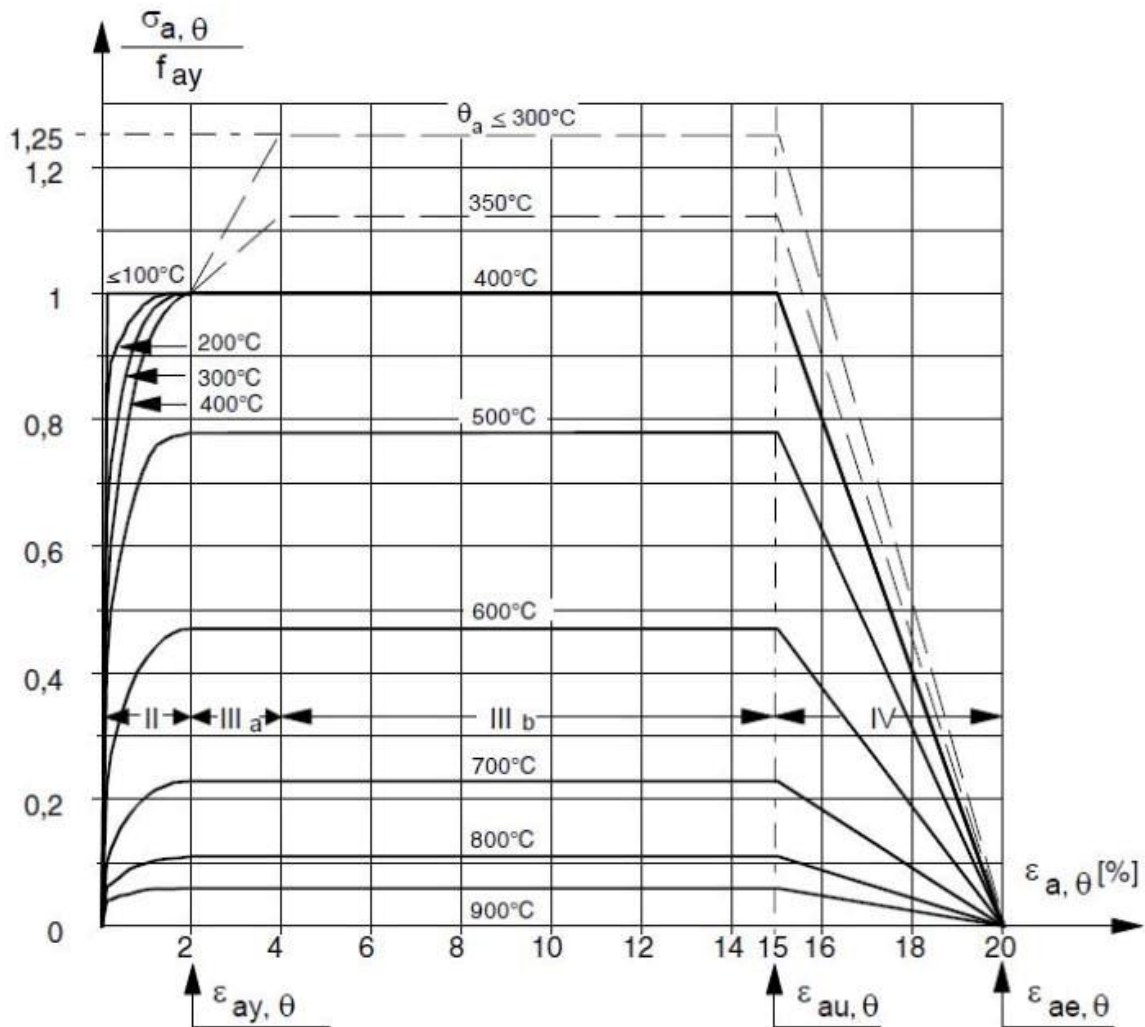
Z tab. 11 získáme redukční součinitele k_θ pro konstrukční ocel za zvýšené teploty.

Tab. 11 Redukční součinitele k_{θ} pro ocel za zvýšené teploty

Teplota oceli θ_a [°C]	$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{ap,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{y,\theta} = \frac{f_{ay,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{u,\theta} = \frac{f_{au,\theta}}{f_{ay}}$
20	1,00	1,00	1,00	1,25
100	1,00	1,00	1,00	1,25
200	0,90	0,807	1,00	1,25
300	0,80	0,613	1,00	1,25
400	0,70	0,420	1,00	
500	0,60	0,360	0,78	
600	0,31	0,180	0,47	
700	0,13	0,075	0,23	
800	0,09	0,050	0,11	
900	0,0675	0,0375	0,06	
1 000	0,0450	0,0250	0,04	
1 100	0,0225	0,0125	0,02	
1 200	0	0	0	

Na obr. 9 je pracovní diagramy oceli pro jednotlivé teploty. Pro teploty menší než 400°C je možné pracovní diagram rozšířit o vliv zpevnění. Podmínky pro využití vlivu zpevnění

- $f_{a_{u,\theta}} / f_{ay} \leq 1,25$
- nesmí dojít k lokálnímu porušení (lokální vyboulení, rozštěpení betonu, smykové porušení)
- výpočet pomocí zpřesněných modelů



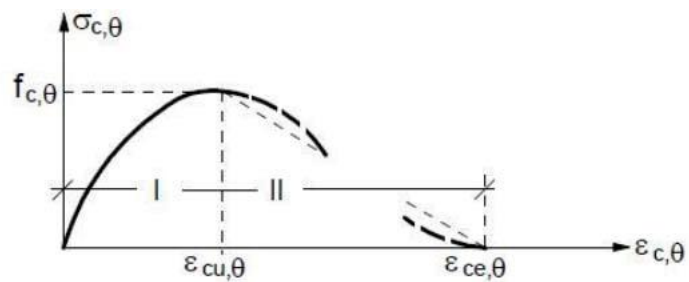
Obr. 9 Pracovní diagramy konstrukční oceli pro určité zvýšené teploty s uvažováním zpevnění

Uvedené vztahy lze použít pro betonářskou ocel s výjimkou betonářské oceli zpracované za studena.

4.1.2 Beton

Obr. 10 Nám znázorňuje pracovní diagram betonu za zvýšené teploty a výpočetní vzorce. Diagram je tvořen dvěma parametry při teplotě θ °C.

- $f_{c,\theta}$ pevnost betonu v tlaku pro danou teplotu
- $\varepsilon_{c1,\theta}$ poměrné přetvoření



Úsek I:

$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} \left[3 \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \right) / \left\{ 2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{cu,\theta}} \right)^3 \right\} \right]$$

$$\left. \begin{array}{l} k_{c,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{f_c} \\ a \quad \varepsilon_{cu,\theta} \end{array} \right\}$$

Úsek II:

Z numerických důvodů se má použít sestupná větev

Obr. 10 Pracovní diagram betonu v tlaku za zvýšené teploty a výpočtové vzorce

Tab. 12 uvádí hodnoty redukovaných mechanických vlastností prostého betonu s křemičitým kamenivem za zvýšené teploty. Tahová pevnost betonu se uvažuje nulová.

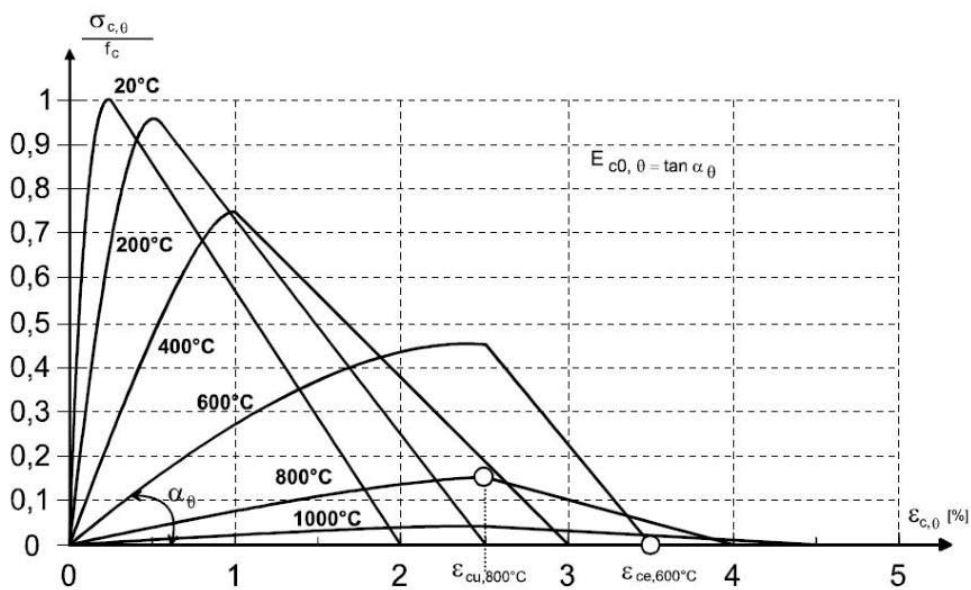
Tab. 12 Hodnoty redukovaných mechanických vlastností pro prostý beton s křemičitým kamenivem za zvýšené teploty

Teplota betonu θ_c [°C]	$k_{c,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{f_c}$	$\varepsilon_{cu,\theta}$
20	1,00	0,0025
100	1,00	0,0040
200	0,95	0,0055
300	0,85	0,0070
400	0,75	0,010
500	0,60	0,015
600	0,45	0,025
700	0,30	0,025
800	0,15	0,025
900	0,08	0,025
1 000	0,04	0,025
1 100	0,01	0,025
1 200	0	-

Kde f_{ck} je pevnost betonu v tlaku za pokojové teploty.

Obr. 11 nám zobrazuje pracovní diagramy betonu s křemičitým kamenivem za zvýšené teploty.

Diagramy nám korespondují s hodnotami určenými v tab. 12



Obr. 11 Pracovní diagramy prostého betonu s křemičitým kamenivem za zvýšené teploty

4.2 Tepelné vlastnosti za zvýšené teploty

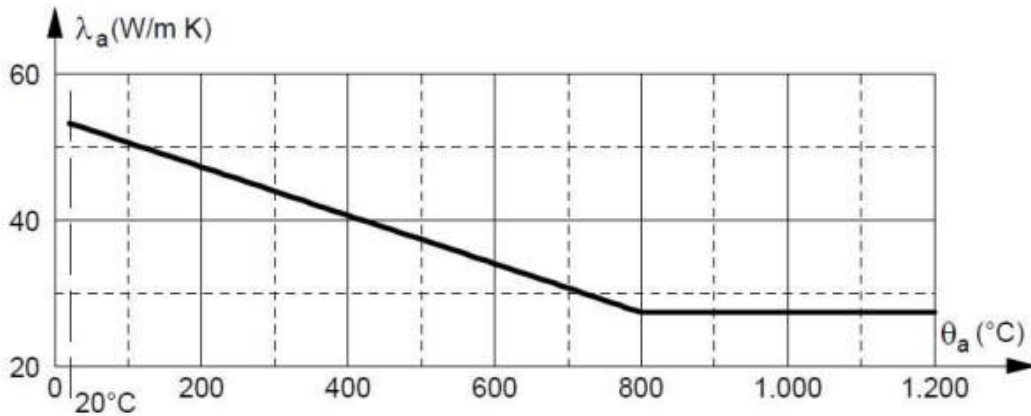
4.2.1 Konstrukční ocel a výztuž

Se změnou teploty oceli se mění jeho tepelné vlastnosti. Tab. 13 nám popisuje změnu tepelné vodivosti a měrného tepla v závislosti na teplotě materiálu. Hodnoty je možné použít pro všechny třídy konstrukční oceli a výztuže. Objemová hmotnost oceli má hodnotu $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ a se změnou teploty se nemění. Hodnoty určené v tabulce jsou v souladu s ČSN EN1994-1-2.

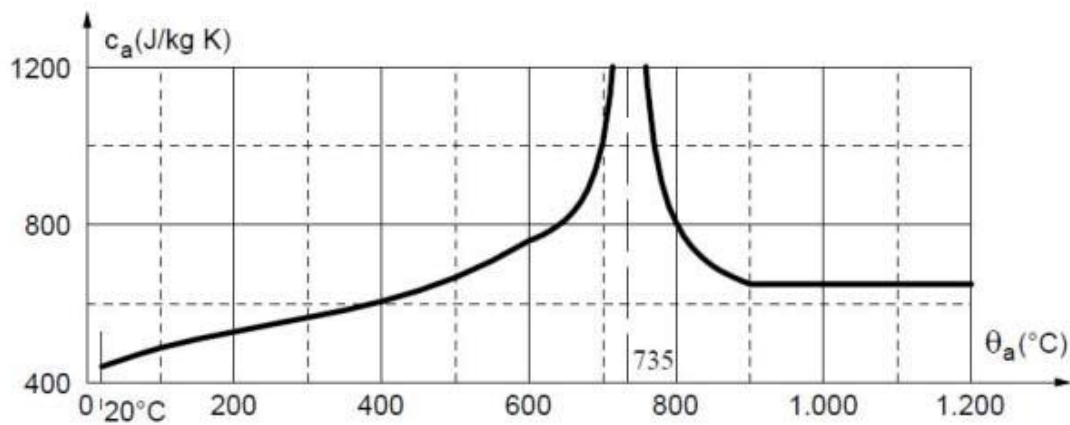
Tab. 13 Tepelné vlastnosti oceli za zvýšené teploty

Teplota [°C]	Tepelná vodivost [W/m K]	Měrné teplo [J/kg K]
20	53.3340	440
50	52.3350	460
100	50.6700	488
150	49.0050	510
200	47.3400	530
250	45.6750	547
300	44.0100	565
350	42.3450	584
400	40.6800	606
410	40.3470	611
445	39.1815	630
450	39.0150	633
500	37.3500	667
550	35.6850	708
600	34.0200	760
650	32.3550	814
700	30.6900	1008
750	29.0250	1483
800	27.3600	803
850	27.3000	695
900	27.3000	650
950	27.3000	650
1000	27.3000	650
1200	27.3000	650

Obr. 12 a obr. 13 nám vykreslují průběh tepelné vodivosti a měrného tepla v závislosti na narůstající teplotě oceli z tab. 13.



Obr. 12 Tepelné vodivost oceli za zvýšené teploty



Obr. 13 Měrné teplo oceli za zvýšené teploty

Tyto hodnoty byly použity pro výpočet šíření tepla průřezem pomocí programu Ansys mechanical v nadcházejících kapitolách.

4.2.2 Beton

Tab. 14 nám popisuje teplotní vlastnosti betonu při zvýšené teplotě. Oproti oceli dochází při změně teploty k úbytku hmotnosti betonu. V tabulce jsou uvedeny hodnoty pro horní a dolní hodnotu tepelné vodivosti betonu λ_c , které uvádí norma ČSN EN1992-1-2. Všechny Tyto hodnoty byly použity pro výpočet šíření tepla průřezem pomocí programu Ansys mechanical v nadcházejících kapitolách.

Tab. 14 Tepelné vlastnosti betonu za zvýšené teploty

Teplota [°C]	Horní mez tepelné vodivosti [W/m K]	Dolní mez tepelné vodivosti [W/m K]	Měrné teplo [J/kg K]	Úbytek hmotnosti [kg/m ³]
20	1.9514	1.3330	900	2300
50	1.8801	1.2934	900	2300
100	1.7656	1.2297	900	2300
115	1.7323	1.2111	915	2300
140	1.6778	1.1808	940	2286
150	1.6564	1.1688	950	2281
160	1.6352	1.1570	960	2276
200	1.5526	1.1108	1000	2254
250	1.4541	1.0556	1025	2237
300	1.3610	1.0033	1050	2220
350	1.2732	0.9538	1075	2202
400	1.1908	0.9072	1100	2185
410	1.1750	0.8982	1100	2183
445	1.1212	0.8677	1100	2176
450	1.1137	0.8634	1100	2175
500	1.0420	0.8225	1100	2165
550	0.9756	0.7844	1100	2155
600	0.9146	0.7492	1100	2145
650	0.8589	0.7168	1100	2135
700	0.8086	0.6873	1100	2125
750	0.7636	0.6606	1100	2115
800	0.7240	0.6368	1100	2105
850	0.6897	0.6158	1100	2094
900	0.6608	0.5977	1100	2084
950	0.6372	0.5824	1100	2074
1000	0.6190	0.5700	1100	2064
1200	0.5996	0.5488	1100	2024

5. Cíle práce

Cílem práce je rozbor vlivu výztužení ocelobetonového uzavřeného průřezu na šíření tepla při vystavení požáru podle nominální normové křivky.

Dílčím cílem práce je shrnutí navrhování ocelobetonových sloupů uzavřených průřezů. Model rozvoje tepla v průřezu MKP se validuje na experimentu z literatury. Model se verifikuje pomocí tabulek z EN1994-1-2. Vlivu hustoty sítě na přesnost předpovědi se připraví na konkrétním řešeném průřezu. Studie citlivosti vlivu výztužení na šíření tepla průřezem se připraví pro kruhové a čtvercové uzavřené průřezy. Pro každý z nich se uvažuje tři možnosti výztužení ocelovými pruty, válcovaným průřezem, nebo dutým uzavřeným průřezem. Bude řešeno zahřívání podle nominální teplotní křivky 60, 90 a 120 min ze čtyř nebo z dvou stran.

6. Teplotní analýza výpočetním programem

Teplotní analýzy pro tuto práci byly zpracovány pomocí programu Ansys mechanical, který využívá metody konečných prvků pro určení šíření tepla v daném průřezu.

6.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, proudění tepla, a jiných jevů. Na vytvořeném fyzikálním modelu. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Metoda konečných prvků je užívána především pro kontrolu již navržených prvků, nebo pro stanovení kritického (nejnamáhanějšího) místa konstrukce. Ačkoliv jsou principy této metody známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní technik

Objekt, který zkoumáme, musí být rozdělen na určitý počet objemů, které nám tvoří síť. Příklad této sítě je na obrázku obr. 14. Síť tvoří uzly a to jsou jednotlivé konečné prvky. Síť tvořená těmito prvky by měla být co nejjednodušší a počet uzlů volíme podle potřeby korektnosti výsledků. Čím vyšší je hustota sítě tím získáme přesnější výsledky. Jednotlivé uzly jsou spojeny úsečkami neboli liniemi. Změny mezi jednotlivými uzly probíhají podél těchto úseček. Program Ansys umí pracovat jak s lineárním průběhem úseček tak i nelineárním. Lineární systémy jsou daleko snadnější a neberou v úvahu plastickou deformaci. Nelineární systémy berou v úvahu plastickou deformaci a je možné testovat materiál až do úplné deformace. Obecně existují dva typy analýz, které se používají: 2D modelování a 3D modelování. 2D modelování je jednodušší, není příliš náročné na rychlost počítače v kterém je software nainstalovaný.

6.2 Výpočetní program

Ansys mechanical je software pro komplexní analýzu prvků pomocí MKP (metodu konečných prvků). Program umí pracovat s mechanickými, termickými, akustickými, piezoelektrickými, tepelně strukturálními a termoelektrickými analýzami. Ve stavebnictví díky využití MKP dokáže rychle a jednoduše řešit složité stavební problémy a simulovat všechny strukturální aspekty produktu. Program Ansys dosahuje opravdu vysoké věrohodnosti díky nabízené široké škále materiálních modelů, kvalitní knihovně prvků a schopnosti modelovat každý produkt a to buď jednotlivé samostatné prvky, nebo

složité soustavy s mnoha komponenty. Pro tuto práci je však nejdůležitější schopnost programu určení rozložení a šíření teploty v průřezu při normovém požáru.

Ovládání programu je možné dvěma způsoby. Pomocí ovládací nabídky na levé straně plochy nebo pomocí APDL (Ansys Parametric Design Language), neboli Ansys parametrický navrhovací jazyk. Jde o skriptovací jazyk, který lze použít k navrhování běžných i složitých modelů pomocí příkazů. Všechny možnosti, které program nabízí lze také ovládat použitím APDL. Tato funkce dokáže velice usnadnit a zrychlit práci s programem, tento skriptovací jazyk zahrnuje širokou škálu funkcí, jako jsou příkazy, vektorové, skalární a maticové operace či použití APDL jako MACRO jazyk.

V případě, že používáme často sekvenci stejných příkazů, můžeme vytvořit soubor příkazů neboli MACRO. Jde o soubor, pomocí kterého vytvoříme náš vlastní příkaz složený z více základních příkazů. Tato funkce nám velice zjednoduší a zrychlí práci s programem, protože při načtení MACRO spustí software všechny příkazy tvořící náš soubor.

Soubor MACRO lze vytvořit dvěma způsoby, pomocí samotného programu Ansys, nebo pomocí jednoduchého textového editoru jako je například wordpad s příponou txt. Pokud se jedná o jednoduchý a krátký soubor příkazů můžeme pro vytvoření využít ANSYS, pokud chceme vytvořit složitější soubor příkazů, je vhodné na sepsání zvolit textový editor. Díky přepisovatelnému textovému souboru je možnost použít jednotlivé jednoduší MACRO na vytvoření složitější souborů, či na pouhé menší úpravy a tak vytvoření nového souboru. Takto si můžeme vytvořit bohatou knihovnu souborů, která nám usnadní a urychlí práci s programem.

Pro správnou spolupráci MACRO souboru a softwaru ANSYS musí být správně zvolený název souboru. MACRO je posloupnost jednotlivých příkazů a v názvu souboru se tyto příkazy nesmí objevit, nebo alespoň první 4 znaky musí být od ANSYS příkazů odlišné, protože by program provedl vnitřní příkaz místo příkazu MACRO. Omezení pro název souboru jsou následující:

- Název souboru nesmí mít více jak 32 znaků
- Název souboru nesmí začínat číslicí
- Název souboru nebo jeho přípona nesmí obsahovat mezeru
- Název souboru nebo jeho přípona nesmí obsahovat systémové zakázané znaky

Základním modelem výpočtu teplotního pole v průřezu je vedení tepla. Pro vedení tepla v pevných látkách je základním vztahem Fourierova rovnice. V systému Kartézské soustavy souřadnic může být napsána následovně

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

kde

- x, y, z jsou vektory Kartézské soustavy souřadnic [m],
 t teplota [K],
 k tepelná vodivost [W/mK],
 Q člen, který představuje interní zdroj tepla [W/m³],
 ρ objemová hmotnost [kg/m³],
 c měrné teplo [J/kg K],
 t čas [s].

Na povrchu konstrukce (směrem k požáru nebo prostředí s pokojovou teplotou) a ve vnitřních dutinách je přestup tepla založen na lineárním proudění a na definici šedých těles, což znamená, že tok vysálaného tepla nezávisí na vlnové délce elektromagnetického vlnění.

$$h_c = h (T_g - T_s)$$

kde

- h_c je tepelný tok prouděním mezi plynem a pevnou látkou [W/m²],
 h součinitel přestupu tepla prouděním [W/m² K],
 T_g teplota plynu [K],
 T_s teplota povrchu pevné látky [K].

$$h_r = \sigma \varepsilon T_s^4$$

kde

- h_r je tepelný tok sáláním vyzářený pevnou látkou [W/m²],
 σ Stefan-Boltzmanova konstanta [5,67 x10⁻⁸ W/mK⁴],
 ε emisivita povrchu pevné látky [-],
 T_s teplota povrchu pevné látky [K].

Pokud je v materiálu určité množství odpařitelné vody, energie spotřebovaná pro její odpaření je ve výpočtu zohledněna, ale přesun par v modelu s eventuální re-kondenzací není brán v úvahu. Pokud stavební konstrukce obsahující dutiny, ve kterých je přítomen plyn místo pevné látky, nebo uvnitř uzavřených profilů, je model přestupu tepla založen na následujících předpokladech:

- není bráno v úvahu vedení tepla v plynné látce, která je v dutině,
- měrné teplo plynu v dutině je zanedbáno,
- plyn v dutině je transparentní pro sálání.

6.3 Volba sítě

V případě využití metody konečných prvků k určení šíření tepla průřezem, musíme rozdělit průřez na jednotlivé uzly neboli konečné prvky. Tím se nám v průřezu vytvoří síť. Přesnost konečných výsledků je závislá na hustotě vytvořené sítě. V případě vytvoření velmi řídké sítě jsou výsledky nepřesné, pokud vytvoříme naopak příliš hustou síť jsou výsledky přesné, ale doba zpracování výsledků je časově náročná a s tím vznikají i nároky na rychlost použitého zařízení, v kterém je program nainstalován. Proto je vhodné zvolit takovou hustotu sítě, pro níž budou výsledky dostačující a nebude výpočet časově náročný.

Pro test vlivu hustoty sítě na korektnost teplotních výsledků jsme zvolili kruhový ocelobetonový sloup dutého průřezu o rozměrech 300 x 8 mm. Tento průřez byl testován na několika vzorcích s rozdílnou hustotou sítě viz. tab. 15 a byla určena optimální hustota sítě pro míru přijatelného odchýlení od nejpřesnějších výsledků. Pro srovnání výsledků byli zvoleny 3 body. Bod č. 1 je umístěn uprostřed průřezu, bod č. 2 v polovině průměru betonového jádra neboli 71 mm od středu průřezu, bod č. 3 je umístěn na okraj betonového jádra tedy 142 mm od středu průřezu.

Tab. 15 Porovnání závislosti hustoty sítě na korektnosti výsledků

	Vzdálenost mezi body [mm] ve směru od středu k povrchu	Počet uzlů (konečných prvků)	T1[°C]	T2[°C]	T3[°C]	Odchylka
1	1	63617	233,573	381,231	1033,600	0%
2	2	15401	233,487	381,167	1033,610	0,03%
3	4	4105	233,518	381,167	1033,630	0,03%
4	6	1872	233,685	381,280	1033,660	0,05%
5	8	1081	233,922	381,434	1033,680	0,15%
6	10	673	234,286	381,675	1033,710	0,30%
7	12	505	234,628	381,915	1033,730	0,45%
8	14	361	235,216	382,320	1033,790	0,70%
9	18	241	236,348	383,162	1033,900	1,19%
10	24	145	238,930	385,226	1034,100	2,29%
11	36	73	246,32	391,573	1034,670	5,46%
12	71	25	280,878	417,24	1038,030	20,25%

Bylo otestováno 12 sítí, jejichž hustota uzlů v daném průřezu postupně řídla. Pro každou z nich byla vypočtena procentuální odchylka od nejpřesnějších získaných hodnot, které tvořil prvek č. 1. Přijatelná odchylka pro naše testy byla stanovena na 0,2%. tomuto požadavku vyhovělo prvních 5 sítí. Poslední Sít' s vyhovujícími výsledky je č. 5 vyobrazena na obr. 14 je tvořena 1081 uzly a vytváříme z ní podmínku pro minimální hustotu sítě pro další výpočty této práce.

Plocha průřezu

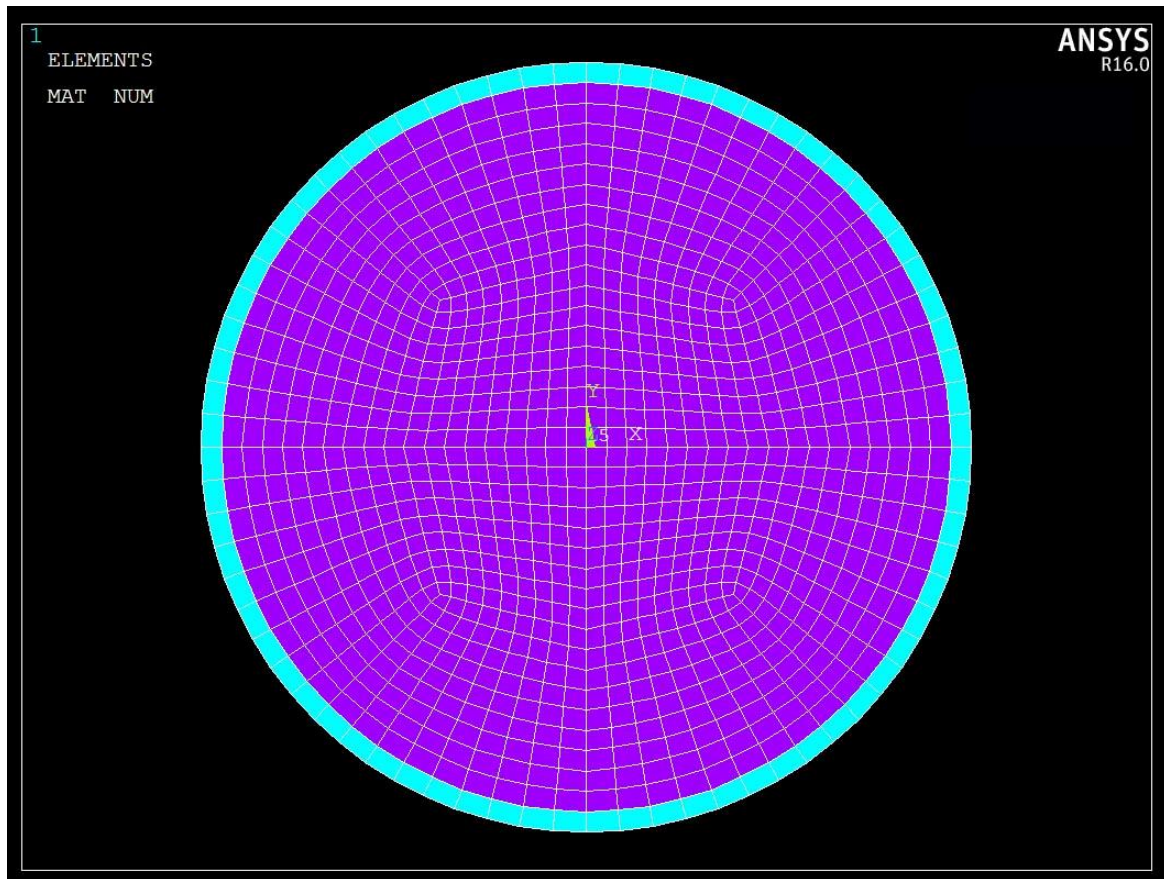
$$A = \pi r^2 = \pi 150^2 = 70\,686 \text{ mm}^2$$

Počet konečných prvků

$$n = 1081$$

Maximální plocha připadající na jeden uzel

$$A/n = 70\,686 / 1081 = 65,4 \text{ mm}^2$$



Obr. 14 Sít' vzorku č. 5 pro ocelobetonový průřez 300 x 8 mm

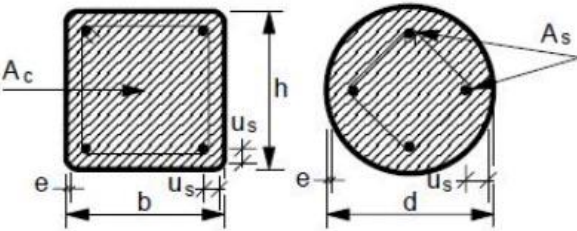
7. Verifikace modelu

Byly zkoumány teplotní vlastnosti ocelového dutého profilu o průřezu 300 x 8 mm vyplněného samozhutnitelným betonem. Tento sloup byl vystaven 60, 90 a 120 min požáru podle normové teplotní křivky. K ověření správnosti získaných teplotních vlastností sloupu byla vypočtena jednoduchým výpočtním modelem únosnost sloupu ve třech stupních zatížení R60, R90 a R120. Získané únosnosti sloupu byly porovnány s únosnostmi získanými pomocí tabulek normy ČSN EN1994-1-2. V tabulkách získáme lineární interpolací hodnoty $\eta_{fi,t}$, které nám určují míru vytížení, kterou je schopný sloup odolat. Pro získání únosnosti sloupu pomocí tabulek při zvýšené teplotě je zapotřebí určit únosnost sloupu za běžné teploty, poté se únosnost vynásobí součinitel $\eta_{fi,t}$.

7.1 Únosnost ocelobetonového sloupu za zvýšené teploty určena pomocí normových tabulek

Norma ČSN EN1994-1-2 udává tabulky viz tab. 16 pro snadné určení únosnosti průřezu při zvýšené teplotě. Míra vytížení $\eta_{fi,t}$ je závislé na rozměrech průřezu, míře vyztužení, vzdálenosti výztuže u_s a na požadované normové požární odolnosti. Dále je potřeba dodržet průřezové vlastnosti pro kruhové profily $d/e \geq 25$, nebo čtvercové profily $b/e \geq 25$. Vytížení $\eta_{fi,t}$ se určí pomocí lineární interpolace z tab. 16, která udává minimální rozměry průřezu, minimální míru vyztužení, minimální vzdálenosti výztuže při určení míry vytížení $\eta_{fi,t}$ pro dané normové požární odolnosti vybetonovaných dutých ocelových průřezů.

Tab. 16 Požární odolnosti vybetonovaných dutých ocelových průřezů

 <p>Ocelový průřez: $(b/e) \geq 25$ nebo $(d/e) \geq 25$</p>		Normová požární odolnost				
		R 30	R 60	R 90	R 120	R 180
1	Minimální rozměry průřezu pro úroveň zatížení $\eta_{fi,t} \leq 0,28$					
1.1	Minimální h a b nebo minimální d [mm]	160	200	220	260	400
1.2	Minimální vyztužení $A_s / (A_c + A_s)$ v %	0	1,5	3,0	6,0	6,0
1.3	Minimální vzdálenost výztuže u_s [mm]	-	30	40	50	60
2	Minimální rozměry průřezu pro úroveň zatížení $\eta_{fi,t} \leq 0,47$					
2.1	Minimální h a b nebo minimální d [mm]	260	260	400	450	500
2.2	Minimální vyztužení $A_s / (A_c + A_s)$ v %	0	3,0	6,0	6,0	6,0
2.3	Minimální vzdálenost výztuže u_s [mm]	-	30	40	50	60
3	Minimální rozměry průřezu pro úroveň zatížení $\eta_{fi,t} \leq 0,66$					
3.1	Minimální h a b nebo minimální d [mm]	260	450	550	-	-
3.2	Minimální vyztužení $A_s / (A_c + A_s)$ v %	3,0	6,0	6,0	-	-
3.3	Minimální vzdálenost výztuže u_s [mm]	25	30	40	-	-

Únosnost ocelobetonového sloupu za běžné teploty analytickým modelem

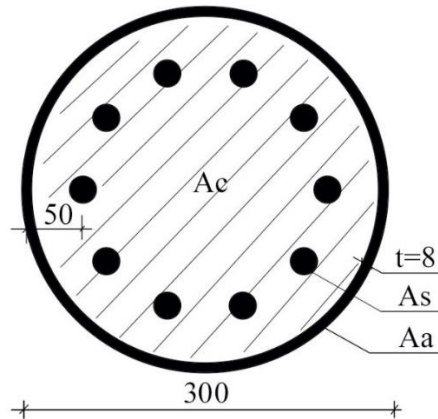
Průřez: 300 x 8 mm

Ocel S355; $f_{ay} = 355 \text{ N/mm}^2$; $E_a = 210\,000 \text{ N/mm}^2$

Výztuž: 10 x $\varnothing 22 \text{ mm}$; B500B; $f_{sy} = 500 \text{ N/mm}^2$; $E_s = 210\,000 \text{ N/mm}^2$, krytí výztuže $c = 50 \text{ mm}$

Beton C30/37; $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$; $E_c = 33\,000 \text{ N/mm}^2$

Délka sloupu: 4 m ; Vzpěrná délka: 4 m



Obr. 15 Průřez ocelobetonovým sloupem pro výpočet únosnosti

Procento vyztužení

$$\frac{A_s}{(A_s + A_c)} = \frac{10 \cdot \pi \cdot 11^2}{\pi \cdot 142^2} = 6,0\%$$

Průřezové charakteristiky

$$A_a = 7\,338,76 \text{ mm}^2; I_a = 78,28 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A_s = 3\,801,33 \text{ mm}^2; I_s = 17,75 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A_c = 59\,545,74 \text{ mm}^2; I_c = 301,58 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Pevnostní charakteristiky

$$f_{yk} = 355 \text{ MPa}; f_{yd} = 355 \text{ MPa} \quad \text{Ocel}$$

$$f_{sk} = 500 \text{ MPa}; f_{sd} = 434,8 \text{ MPa} \quad \text{Výztuž}$$

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}; f_{cd} = 20 \text{ MPa} \quad \text{Beton}$$

Únosnost průřezu za běžné teploty

$$N_{pL,Rd} = A_a f_{yd} + A_s f_{sd} + A_c f_{cd} = 7\,338,76 \cdot 355 + 3\,801,33 \cdot 434,8 + 59\,545,74 \cdot 20 = 5\,449,0 \text{ kN}$$

$$N_{pL,Rk} = A_a f_{yk} + A_s f_{sk} + A_c f_{ck} = 7\,338,76 \cdot 355 + 3\,801,33 \cdot 500 + 59\,545,74 \cdot 30 = 6\,292,3 \text{ kN}$$

Ohybová tuhost sloupu:

$$(EI)_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + 0,6 E_c I_c = 210\,000 \cdot 78,28 \cdot 10^6 + 210\,000 \cdot 17,75 \cdot 10^6 + 0,6 \cdot 33\,000 \cdot 301,58 \cdot 10^6 = 2,614 \cdot 10^{13} \text{ Nmm}^2$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{l^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,614 \cdot 10^{13}}{4000^2} = 16\,124,5 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{6292,3}{16124,5}} = 0,625$$

křivka b: $\chi = 0,825$

Únosnost sloupu za běžné teploty

$$N_{b,Rd} = \chi N_{pl,Rd} = 0,825 \cdot 5449,0 = 4\,495,4 \text{ kN}$$

Určení vytížení $\eta_{fi,t}$ pomocí tab. 16 pro námi zvolený průřez

Průřez 300 x 8 mm ; krytí výztuže c = 50mm ; míra vyztužení = 6 % ; $N_{b,Rd} = 4\,495,4 \text{ kN}$

Podmínky: $300/8 \geq 25$ vyhovuje

Únosnost sloupu pro normovou požární odolnost:

$$N_{fi,pl,Rd} = N_{b,Rd} \eta_{fi,t}$$

Tab. 17 Schopnost sloupu odolat vytížení $\eta_{fi,t}$ pro požární odolnosti R60,R90 a R120 a určení

únosnosti $N_{fi,pl,Rd}$

	$\eta_{fi,t}$ [%]	$N_{fi,pl,Rd}$ [kN]
R60	0,510	2292,7
R90	0,364	1636,3
R120	0,320	1438,5

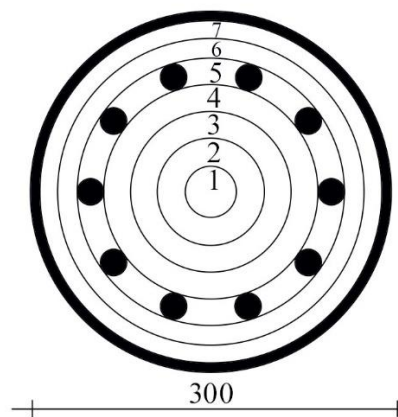
7.2 Únosnost sloupu při zvýšené teplotě určená jednoduchým výpočetním modelem

Jednoduchý výpočetní model je založen na principu rozdělení průřezu do jednotlivých vrstev s rostoucím počtem vrstev se zvyšuje přesnost výpočtu. Pro každou z nich se určí průměrná teplota, plocha, moment setrvačnosti a nové materiálové vlastnosti v závislosti na určené teplotě. Teploty byly určeny pomocí programu Ansys mechanical při vystavení požáru podle normové teplotní křivky po dobu 60 , 90 a 120 min.

Sloup je navržen na požární odolnost R120, proto musíme nejprve zkontrolovat, zda jsou splněny základní podmínky

Průměr $d = 300\text{mm}$	$260\text{ mm} \leq 300\text{ mm} \leq 450\text{ mm}$	VYHOVUJE
Krycí vrstva výztuže $u_s = 50\text{mm}$	$50\text{ mm} \leq 50\text{ mm}$	VYHOVUJE
Vzpěrná délka $l = 4\text{m}$	$4\text{ m} \leq 4,5\text{ m}$	VYHOVUJE
Beton C30/37	$\text{C}20/25 \leq \text{C}30/37 \leq \text{C}40/50$	VYHOVUJE
Procento vyztužení 6%	$6\% \leq 6\%$	VYHOVUJE

Obr. 16 znázorňuje rozdělení průřezu na vrstvy. Betonové jádro je rozděleno na 7 částí, očíslované od středu profilu ve směru k ocelovému plášti. V úrovni vrstvy č. 5 se nachází konstrukční výztuž, která sama tvoří jednu z vrstev. Poslední vrstvu tvoří ocelová Plášť.



Obr. 16 Rozdělení průřezu na vrstvy

V tab. 18 Jsou vypočtené plochy a momenty setrvačnosti pro jednotlivé vrstvy a určené tloušťky každé z nich.

Tab. 18 Plochy a momenty setrvačnosti jednotlivých vrstev

t [mm]	Vrstva	Plocha A_i [mm ²]	Moment setrvačnosti I_i [mm ⁴]
21,25	1	1418,6	0,16 10 ⁶
21,25	2	4255,9	2,40 10 ⁶
21,25	3	7093,1	10,41 10 ⁶
21,25	4	9930,4	28,03 10 ⁶
22	5	9468,8	44,20 10 ⁶
22	Výztuž	3801,3	17,75 10 ⁶
17,5	6	12727,4	85,75 10 ⁶
17,5	7	14651,6	130,63 10 ⁶
8	Ocelový plášť	7338,8	78,28 10 ⁶

V tab. 19 se nacházejí naměřené teploty pro jednotlivé vrstvy v závislosti na délce zatížení 60, 90 a 120 min.

Tab. 19 Průměrné teploty vrstev

Vrstva	Průměrná teplota vrstvy [°C]		
	R60	R90	R120
1	79,6	165,9	253,3
2	96,5	187,6	277,0
3	133,0	233,0	325,9
4	213,0	326,4	423,5
5 + Výztuž	290,9	422,9	511,8
6	412,0	530,4	622,7
7	730,2	801,3	891,0
Ocelový plášť	913,8	984,8	1033,1

Výpočet je založen na zpřesňování vypočtených hodnot $N_{fi,cr}$ a $N_{fi,pl,Rd}$ pomocí poměrného přetvoření. Poměrné přetvoření začíná na hodnotě $\varepsilon = 0,0005$, tato hodnota se postupně zvyšuje, a současně se nám zpřesňují hodnoty $N_{fi,cr}$ a $N_{fi,pl,Rd}$. Hodnota poměrného přetvoření se zvyšuje, dokud nedosáhneme následující rovnováhy

$$N_{fi,cr} = N_{fi,pl,Rd}$$

kde kritická síla při požáru

$$N_{fi,cr} = \frac{\pi^2 (E_{a,\theta,\sigma} I_a + E_{c,\theta,\sigma} I_c + E_{i,\theta,\sigma} I_s)}{l_\theta^2}$$

návrhová hodnota plastické únosnosti v tlaku celého průřezu při požáru

$$N_{fi,pl,Rd} = A_a \sigma_{a,\theta} / \gamma_{M,fi,a} + A_s \sigma_{s,\theta} / \gamma_{M,fi,s} + A_c \sigma_{c,\theta} / \gamma_{M,f}$$

kde

l_θ je vzpěrná délka sloupu při požáru,

$E_{i,\theta,\sigma}$ tangentský modul pro i – tý materiál při teplotě θ a napětí σ ,

I_i moment setrvačnosti i – tého materiálu vztažený k těžišťové ose y nebo z spřaženého průřezu,

A_i plocha i – tého materiálu průřezu,

$\sigma_{i,\theta}$ napětí v i – tém materiálu průřezu při teplotě θ ,

$\gamma_{M,fi,i}$ dílčí součinitel i – tého materiálu (uvažuje se 1,0).

Tab. 20 Určení napětí oceli a tangentového modulu

Poměrné přetvoření	Napětí σ	Tangentový modul
I / pružné $\varepsilon \leq \varepsilon_{ap,\theta}$	$E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
II / eliptický přechod $\varepsilon_{ap,\theta} \leq \varepsilon$ $\varepsilon \leq \varepsilon_{ay,\theta}$	$(f_{ap,\theta} - c) + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})^2}$ <p>kde</p> $a^2 = (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta})(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} + c/E_{a,\theta})$ $b^2 = E_{a,\theta} (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}) c + c^2$ $c = \frac{(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta})^2}{E_{a,\theta} (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}) - 2(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta})}$	$\frac{b(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})}{a \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})^2}}$
III / plastické $\varepsilon_{ay,\theta} \leq \varepsilon$ $\varepsilon \leq \varepsilon_{au,\theta}$	$f_{ay,\theta}$	0

kde

$f_{ap,\theta} = k_{p,\theta} f_{ay}$ je mez úměrnosti,

$f_{ay,\theta} = k_{y,\theta} f_{ay}$ nejvyšší úroveň napětí v požární situaci,

$E_{a,\theta} = k_{E,\theta} E_a$ sklon lineární části pracovního diagramu oceli při zvýšené teplotě,

$k_{i,\theta}$ redukční součinitel pro zvýšenou teplotu. Pro mezilehlé teploty lze redukční součinitel zjistit lineární interpolací.

$\varepsilon_{ap,\theta} = f_{ap,\theta} / E_{a,\theta}$ je poměrné přetvoření na mezi úměrnosti,

$\varepsilon_{ay,\theta} = 0,002$ poměrné přetvoření při nejvyšší úrovni napětí,

$\varepsilon_{au,\theta} = 0,0015$ největší poměrné přetvoření.

Pomocí lineární interpolace získáme z tab. 21 redukované vlastnosti ocelového pláště pro jednotlivá teplotní zatížení. V tab. 22 máme uvedené redukované hodnoty ocelového pláště.

Tab. 21 Redukční součinitele pro ocel

Teplota oceli θ_a [°C]	$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{ap,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{y,\theta} = \frac{f_{ay,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{u,\theta} = \frac{f_{au,\theta}}{f_{ay}}$
20	1,00	1,00	1,00	1,25
100	1,00	1,00	1,00	1,25
200	0,90	0,807	1,00	1,25
300	0,80	0,613	1,00	1,25
400	0,70	0,420	1,00	
500	0,60	0,360	0,78	
600	0,31	0,180	0,47	
700	0,13	0,075	0,23	
800	0,09	0,050	0,11	
900	0,0675	0,0375	0,06	
1 000	0,0450	0,0250	0,04	
1 100	0,0225	0,0125	0,02	
1 200	0	0	0	

Tab. 22 Redukované hodnoty pro ocelový plášť

Zatížení	Vrstva	$E_{a,\theta}$ [N/mm ²]	$f_{ap,\theta}$ [N/mm ²]	$f_{ay,\theta}$ [N/mm ²]	$\epsilon_{ap,\theta}$ [N/mm ²]
R60	Ocelový plášť	13 523,0	12,7	20,3	0,00094
R90	Ocelový plášť	10 168,2	9,6	15,3	0,00094
R120	Ocelový plášť	7 886,0	7,4	11,9	0,00094

Pomocí lineární interpolace získáme z tab. 23 redukované vlastnosti prutové výztuže pro jednotlivá teplotní zatížení. V tab. 24 Máme uvedené redukované hodnoty výztuže.

Tab. 23 Redukční součinitel oceli za studena zpracovanou

Teplota výztuže θ_s [°C]	$k_{E,\theta} = \frac{E_{s,\theta}}{E_s}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{sp,\theta}}{f_{sy}}$	$k_{y,\theta} = \frac{f_{sy,\theta}}{f_{sy}}$
20	1,00	1,00	1,00
100	1,00	0,96	1,00
200	0,87	0,92	1,00
300	0,72	0,81	1,00
400	0,56	0,63	0,94
500	0,40	0,44	0,67
600	0,24	0,26	0,40
700	0,08	0,08	0,12
800	0,06	0,06	0,11
900	0,05	0,05	0,08
1 000	0,03	0,03	0,05
1 100	0,02	0,02	0,03
1 200	0	0	0

Tab. 24 Výsledky redukovaných vlastností prutové výztuže

Zatížení	Vrstva	$E_{s,\theta}$ [N/mm ²]	$f_{sp,\theta}$ [N/mm ²]	$f_{sy,\theta}$ [N/mm ²]	$\epsilon_{sp,\theta}$ [N/mm ²]
R60	Výztuž	154 066,5	419,9	500	0,00263
R90	Výztuž	109 905,6	320,5	471,8	0,00268
R120	Výztuž	80 304,0	210,0	320,2	0,00428

Pomocí lineární interpolace získáme z tab. 25 redukované vlastnosti jednotlivých betonových vrstev pro daná teplotní zatížení.

Tab. 25 Redukční součinitele pro beton

Teplota betonu θ_c [°C]	$k_{c,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{f_c}$	$\epsilon_{cu,\theta}$
20	1,00	0,0025
100	1,00	0,0040
200	0,95	0,0055
300	0,85	0,0070
400	0,75	0,010
500	0,60	0,015
600	0,45	0,025
700	0,30	0,025
800	0,15	0,025
900	0,08	0,025
1 000	0,04	0,025
1 100	0,01	0,025
1 200	0	-

Výsledky redukovaných vlastností pro betonové vrstvy uvádí tab. 26.

Tab. 26 Výsledky redukovaných vlastností pro beton

Vrstva	R60		R90		R120	
	$f_{c,\theta}$ [N/mm ²]	$\epsilon_{cu,\theta}$	$f_{c,\theta}$ [N/mm ²]	$\epsilon_{cu,\theta}$	$f_{c,\theta}$ [N/mm ²]	$\epsilon_{cu,\theta}$
1	30	0,0035	29,0	0,0050	26,9	0,0063
2	30	0,0037	27,7	0,0053	26,2	0,0067
3	29,5	0,0045	27,5	0,0060	24,7	0,0077
4	28,1	0,0057	24,7	0,0078	21,4	0,0110
5	25,8	0,0069	21,5	0,0111	16,6	0,0182
6	22,0	0,0106	16,6	0,0180	12,5	0,0250
7	7,64	0,0250	4,5	0,0250	2,6	0,0250

Nyní se určuje v závislosti na poměrném přetvoření napětí a tangentský modul betonu. Začínáme s nejnižší hodnotou poměrného přetvoření.

Počáteční hodnota poměrného přetvoření

$$\varepsilon_a = \varepsilon_c = \varepsilon = 0,0005$$

Hodnota poměrného přetvoření se po krocích zvyšuje, dokud neplatí

$$N_{fi,cr} = N_{fi,pl,Rd}$$

Napětí v betonu pro dané poměrné přetvoření se určí dle vztahu

$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} [3 (\varepsilon_{c,\theta} / \varepsilon_{c,u\theta}) / 2 + (\varepsilon_{c,\theta} / \varepsilon_{c,u\theta})^3]$$

Tangentský modul betonu se určí ze vztahu:

$$E_{c,\theta} = \frac{6f_{c,\theta} \cdot 1 - (\varepsilon_{c,\theta} / \varepsilon_{c,u\theta})^3}{\varepsilon_{c,u\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c,u\theta}}\right)^3\right)^2}$$

V tab. 27 jsou vypočítány hodnoty napětí a tangentského modulu jednotlivých betonových vrstev pro dané teplotní zatížení a poměrné přetvoření.

Tab. 27 Výsledné napětí v betonu a tangentský modul pro dané poměrné přetvoření

Vrstva	R60		R90		R120	
	$\sigma_{c,\theta}$ [N/mm ²]	$E_{c,\theta,\sigma}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,\theta}$ [N/mm ²]	$E_{c,\theta,\sigma}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,\theta}$ [N/mm ²]	$E_{c,\theta,\sigma}$ [N/mm ²]
1	6,51	12782,36	4,38	8682,62	3,22	6398,36
2	6,16	12102,26	4,09	8109,01	2,94	5860,80
3	4,96	9806,39	3,45	6867,05	2,41	4809,05
4	3,72	7387,39	2,38	4747,50	1,46	2917,63
5	2,81	5604,43	1,45	2904,87	0,68	1368,08
6	1,56	3112,55	0,69	1383,27	0,37	748,19
7	0,23	458,39	0,14	269,00	0,078	155,34

Napětí v ocelovém plášti a prutové výztuži pro počáteční poměrné přetvoření

$$\sigma_{a,\theta} = E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta} = 13\,523,0 \cdot 0,0005 = 6,76 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{s,\theta} = E_{s,\theta} \varepsilon_{s,\theta} = 154\,066,5 \cdot 0,0005 = 77,03 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

tangentový modul

$$E_{a,\theta,\sigma} = E_{a,\theta} = 13\,523,0 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$E_{s,\theta,\sigma} = E_{s,\theta} = 154\,066,5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

V tab. 28 jsou vypočítány hodnoty napětí a tangentového modulu prutové výztuže a ocelového pláště pro dané teplotní zatížení a poměrné přetvoření.

Tab. 28 Výsledné napětí v oceli, výztuži a tangentový modul pro dané poměrné přetvoření ($\varepsilon = 0,0005$)

	R60		R90		R120	
Vrstva	$\sigma_{a,\theta}$ [N/mm ²]	$E_{a,\theta,\sigma}$ [N/mm ²]	$\sigma_{a,\theta}$ [N/mm ²]	$E_{a,\theta,\sigma}$ [N/mm ²]	$\sigma_{a,\theta}$ [N/mm ²]	$E_{a,\theta,\sigma}$ [N/mm ²]
Výztuž	77,03	154 066,50	54,95	109 905,60	40,15	80 304,00
Ocelový plášť	6,76	13 523,00	5,08	10 168,20	3,94	7 886,00

Určení hodnoty $N_{fi,cr}$ a $N_{fi,pl,Rd}$ pro poměrné přetvoření 0,0005.

$$N_{fi,cr} = \frac{\pi^2 (E_{a,\theta,\sigma} I_a + E_{c,\theta,\sigma} I_c + E_{i,\theta,\sigma} I_s)}{l_\theta^2}$$

$$N_{fi,pl,Rd} = A_a \sigma_{a,\theta} / \gamma_{M,fi,a} + A_s \sigma_{s,\theta} / \gamma_{M,fi,s} + A_c \sigma_{c,\theta} / \gamma_{M,fi}$$

Nyní se bude měnit proměnné přetvoření od nejnižší počáteční hodnoty, dokud nebude platit podmínka

$$N_{fi,cr} = N_{fi,pl,Rd}$$

Tab. 29 nám uvádí postupné porovnávání kritické síly a návrhové hodnoty plastické únosnosti v tlaku, dokud nedojde k rovnováze mezi těmito silami a získání únosnosti sloupu pro danou délku požárního zatížení. Hodnoty označené jsou výsledné únosnosti.

Tab. 29 Hodnoty sil $N_{fi,cr}$ a $N_{fi,pl,Rd}$ v závislosti na poměrném přetvoření

Poměrné přetvoření	R60		R90		R120	
	$N_{fi,cr}$ [kN]	$N_{fi,pl,Rd}$ [kN]	$N_{fi,cr}$ [kN]	$N_{fi,pl,Rd}$ [kN]	$N_{fi,cr}$ [kN]	$N_{fi,pl,Rd}$ [kN]
0,0005	2901,2	499,8	2007,5	342,5	1438,6	242,7
0,001	2897,1	1005,9	2006,6	687,0	1438,4	486,2
0,002	2866,0	2061,0	1999,3	1390,7	1436,3	978,9
0,0025	2835,3	2623,6	1991,7	1753,9	1434,2	1229,9
0,0026	2828,0	2739,6	1989,8	1827,7	1433,7	1280,5
0,00267	2822,6	2821,5				
0,00281			1985,4	1984,2		
0,002895					1431,8	1431,0

7.3 Porovnání výsledků získaných z normových tabulek a jednoduchého výpočetního modelu

Tab. 30 únosnost sloupu pro dané požární zatížení

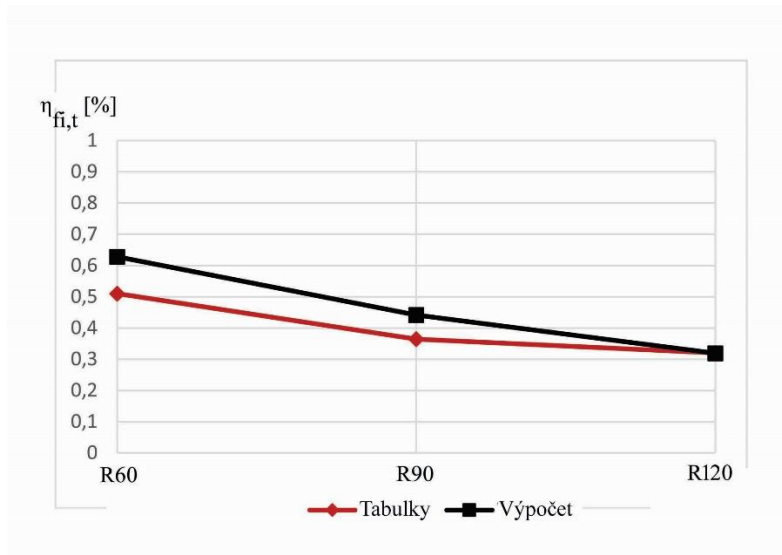
$N_{fi,pl,Rd}$ [kN]	R60	R90	R120
Tabulky	2292,7	1636,3	1438,5
Výpočet	2821,5	1984,2	1431,0

Pro možnost srovnání tabulkového vytížení s výpočetní hodnotou je zapotřebí vypočítat míru zbylé únosnosti. Výsledky jsou zobrazeny v tab. 31 a obr. 17

$$\eta_{fi,R60} = \frac{N_{fi,pl,Rd}}{N_{b,Rd}} = \frac{2821,5}{4495,4} = 0,628$$

$$\eta_{fi,R90} = \frac{N_{fi,pl,Rd}}{N_{b,Rd}} = \frac{1984,2}{4495,4} = 0,441$$

$$\eta_{fi,R120} = \frac{N_{fi,pl,Rd}}{N_{b,Rd}} = \frac{1431,0}{4495,4} = 0,319$$



Obr. 17 Míra zbytkové únosnosti sloupu pro dané požární zatížení

Profil byl navržen, aby vyhověl pro požární odolnost 120min. Jelikož byly použity minimální hodnoty pro zatížení R120 jako je minimální krytí výztuže $u_s = 50$ mm a minimální míra vyztužení 6% došlo k přibližné shodě obou hodnot výsledného úbytku únosnosti výpočetního modelu a tabulkové hodnoty.

V případě zatížení profilu po dobu 90 min jsou tabulkové požadavky na minimální krytí výztuže $u_s = 40$ mm a minimální míra vyztužení 4,4%, jelikož námi zkoumaný model obě minimální hodnoty převyšuje dochází ke snížení ztráty únosnosti v případě výpočetního modelu a tudíž únosnost určená výpočtem je vyšší než únosnost získaná z tabulkových hodnot.

V případě zatížení profilu po dobu 60 min jsou tabulkové požadavky na minimální krytí výztuže $u_s = 30$ mm a minimální míra vyztužení 3%. Námi zvolený model výrazně převyšuje míru vyztužení i krytí výztuže, to má za příčinu ještě výraznější rozdíl mezi ztrátami únosnosti vypočítané pomocí normové tabulky a vypočítané pomocí jednoduchého výpočetního modelu.

Tab. 31 Míra zbytkové únosnosti sloupu pro dané požární zatížení

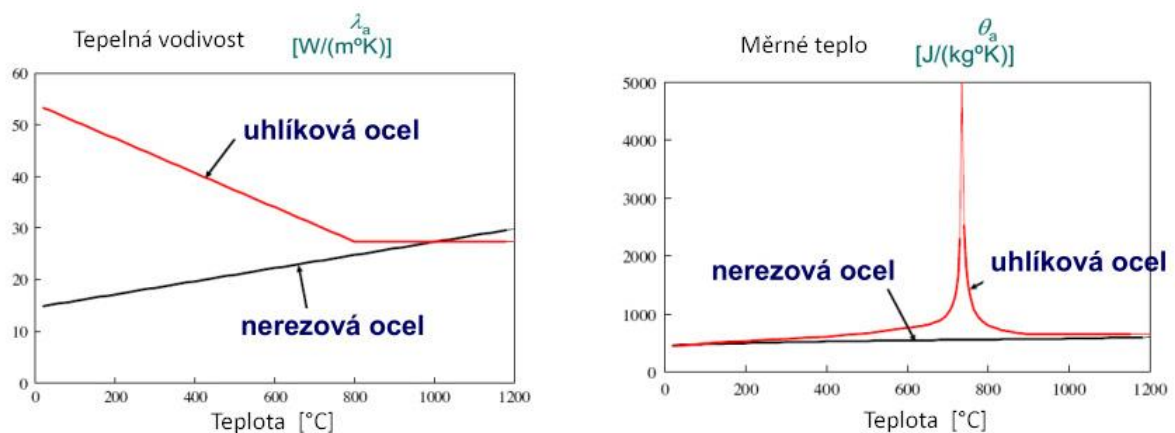
$\eta_{fi,t}$	R60	R90	R120
Tabulky	0,510	0,364	0,320
Výpočet	0,628	0,441	0,319
Odchylka [%]	23,2	21,2	0,3

8. Validace požárních testů

Pro validaci byl zvolen článek zabývající se požárními zkouškami na třech různých profilech CFSST sloupů (Fire performance of concrete filled stainless steel tubular columns). Tyto profily byli vystaveny standartnímu požárnímu zatížení a teploty jednotlivých bodů získané testováním byly vyneseny do grafů v závislosti na délce teplotního zatížení. K porovnání výsledků testů byly určeny předpoklady průběhu teplot jednotlivých bodů průřezů pomocí programu Ansys mechanical při vystavení požáru podle normové teplotní křivky.

Pro tvorbu testovaných profilů byla použita austenitická nerezová ocel s označením S30408 (EN 1.4301 nebo AISI 304). Konstrukce tvořené nerezovou ocelí mají několik výhod proti použití uhlíkové oceli či nízkolegovaných oceli. Jednou z pozitivních vlastností může být například pozitivní vzhled, ale důležitější vlastností je poměrně dobrá odolnost proti korozi, což vede ke snížení nákladů na ochranu oceli proti korozi a snížení cyklů potřebných pro údržbu těchto konstrukcí, zejména v pobřežních oblastech, kde je ocel více zatížená vlhkostí a salinitou v ovzduší. Kromě toho má nerezová ocel lepší tvárnost a vyšší pevnost. Pro nás nejdůležitější faktorem je požární odolnost CFSST sloupů. Srovnání nerezové a uhlíkové oceli ukázali, že nerezová ocel má lepší vlastnosti při vysokých teplotách. Z toho důvodu můžeme předpokládat že CFSST sloupy budou mít lepší požární vlastnosti než při použití CFST sloupů s běžnou ocelí.

Obr. 18 zobrazuje rozdílné vlastnosti při zvýšené teplotě mezi běžnou uhlíkovou ocelí a nerezovou ocelí. Tepelná vodivost nerezové oceli je nižší v porovnání s běžnou ocelí a s rostoucí teplotou stoupá, až při vysokých teplotách dosahuje podobných hodnot jako běžná ocel. Měrné teplo je u nerezové oceli oproti uhlíkové oceli lineární.



Obr. 18 Porovnání tepelné vodivosti a měrného tepla nerezové a uhlíkové oceli

Tab. 32 Tepelné vlastnosti nerezové oceli za zvýšené teploty

Teplota [°C]	Tepelná vodivost [W/m K]	Měrné teplo [J/kg K]
20	14,893	458,3
100	15,893	471,1
200	17,143	487,2
300	18,392	503,2
400	19,642	519,2
500	20,891	535,2
600	22,141	551,2
700	23,391	567,3
800	24,640	583,3
900	25,890	599,4
1000	27,140	615,4

Hodnoty uvedené v tab. 32 Byly použity pro výpočet přestupu tepla v programu Ansys mechanical. Objemová hmotnost nerezové oceli je nezávislá na teplotě a uvažuje se hodnota $\rho_s = 7900 \text{ kg/m}^3$.

Všechny profily byly vyplněny samozhutitelným betonem (SCC) se složením: cement: 340 kg/m^3 , popílek: 60 kg/m^3 , voda: 165 kg/m^3 , písek: 822 kg/m^3 , hrubé kamenivo: 920 kg/m^3 . Průměrná pevnost v tlaku (f_{cu}) a modul pružnosti (E_c) betonu po 28 dnech jsou $53,2 \text{ MPa}$ a $37,305 \text{ N/mm}^2$.

Pro zkoušky byly zvoleny tři různé profily.

- a) Čtvercový profil $315 \times 5 \text{ mm}$
- b) Čtvercový profil $630 \times 10 \text{ mm}$
- c) Kruhový profil $300 \times 5 \text{ mm}$

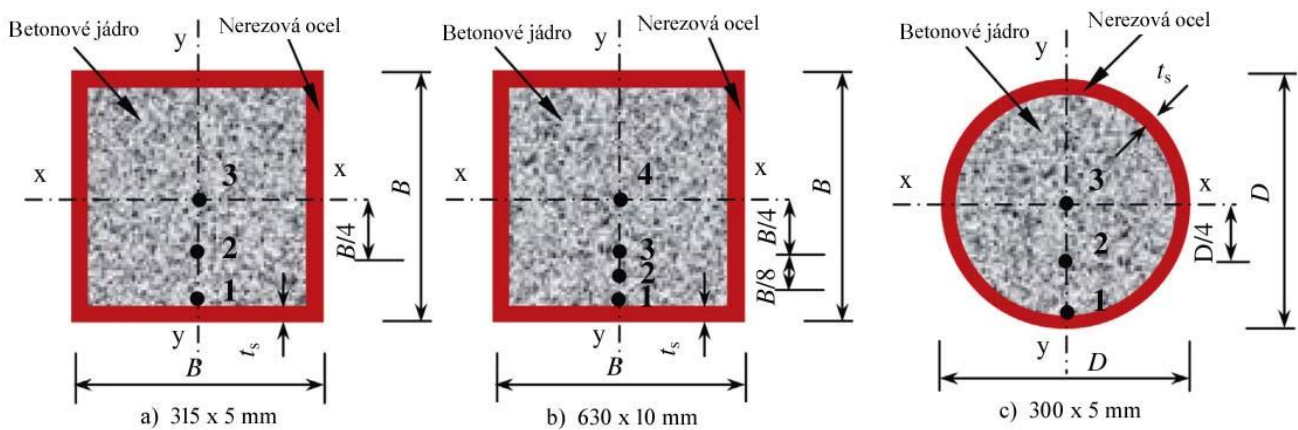
Všechny tyto sloupy byly vystaveny standardnímu požárnímu a axiálnímu zatížení. Axiální zatížení sloupu se pohybovali mezi 0,15 až 0,45 násobku únosnosti sloupu viz. tab. 33.

Information of CFSST specimens.

No.	Specimen label	Sectional dimension $B(D) \times t_s$ (mm \times mm)	Load N_F (kN)	Load level n_F	Measured fire resistance (min)	Predicted fire resistance (min)			Failure mode
						EC4 (2004)	DBJ (2010)	Kodur (2007)	
1	S300-0.15	$\square 315 \times 5$	940	0.15	>240	–	107	107	–
2	S300-0.3	$\square 315 \times 5$	1880	0.3	148	75	42.7	75	Compression
3	S600-0.3	$\square 630 \times 10$	7870	0.3	220	–	53.4	209	Compression
4	C300-0.3	$\circ 300 \times 5$	1400	0.3	132	70	44.3	88	Compression
5	C300-0.45	$\circ 300 \times 5$	2100	0.45	67	45	27.8	72	Compression

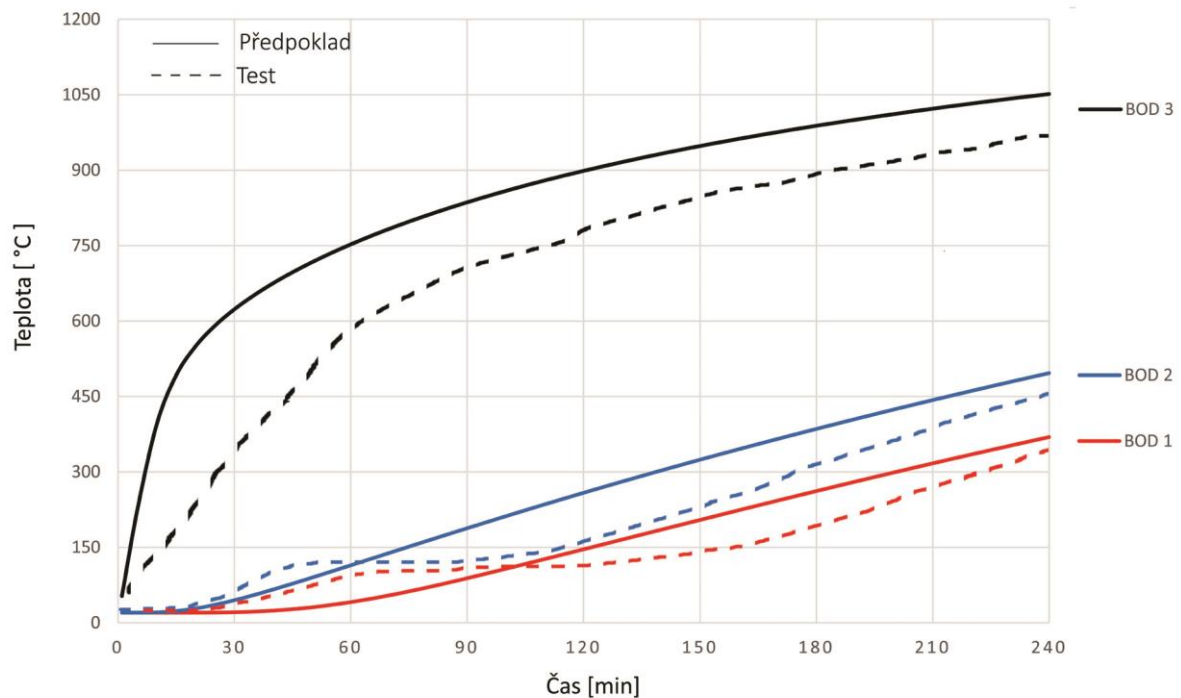
Tab. 33 Zvolené profily s mírou zatížení a zjištěnou požární odolnost

Do každého profilu byly umístěny teplotní čidla, jejich umístění vidíme na obr. 19. Do čtvercového průřezu a) byly umístěny 3 čidla, které byly rovnoměrně rozmístěny od středu betonového jádra až k okraji, kde spolupůsobí betonové jádro s nerezovou ocelí (bod č. 1). Ve čtvercovém průřezu b) bylo z důvodu velikosti použito o jedno čidlo navíc, čidla jsou rozmístěna od středu až po okraj betonového jádra. Bod č. 4 se nachází uprostřed jádra, bod č. 3 v $\frac{1}{4}$ celkové šířky betonového jádra od bodu č. 4, bod č. 2 je v $\frac{1}{8}$ šířky jádra od bodu č. 3 a bod č. 1 se nachází na okraji betonového jádra. Kruhový průřez c) má jen tři čidla rozmístěny rovnoměrně od středu betonového jádra k okraji.



Obr. 19 Testované průřezy s umístěním teplotních čidel

8.1 Čtvercový průřez 315 x 5 mm

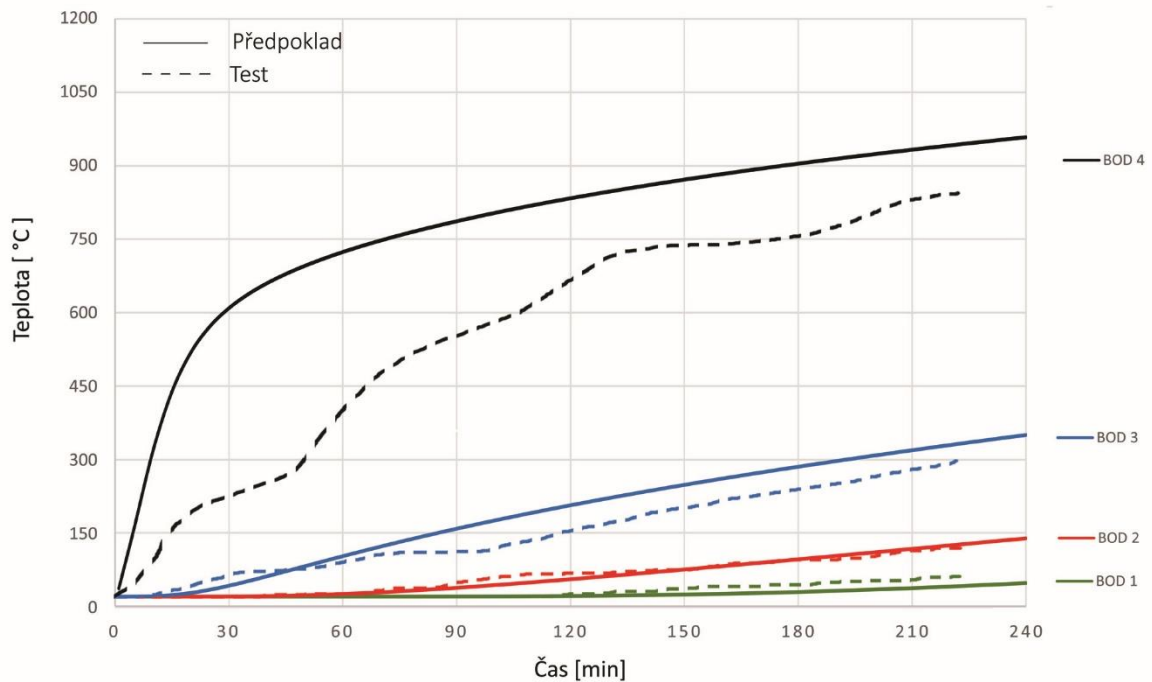


Obr.20 Graf pro předpokládaný a testovaný průběh teplot ve vybraných bodech při teplotním zatížení průřezu 315x5

Sloup byl vystaven požárů podle normové teplotní křivky po dobu 240 min a byl centricky zatížen 15% své únosnosti za běžné teploty. Obr. 20 nám popisuje průběh teploty třech vybraných bodů. Plné čáry určují předpokládaný průběh teploty určený pomocí programu, šrafované čáry určují skutečné teploty získané z čidel umístěných uvnitř ocelobetonového průřezu během požárních zkoušek. Bod č. 3 se nachází pod ocelovým pláštěm a je nejvíce vystaven účinkům požárního zatížení, proto křivka kopíruje standardní normovou teplotní křivku. Bod č. 2 byl umístěn v polovině poloměru průřezu a bod č. 1 uprostřed průřezu.

Ze šrafovaných křivek je patrný ve fázi 40 – 50 min náhlý nárůst teploty v betonovém jádru a s tím je spojená částečná ztráta teploty u ocelového pláště oproti předpokládanému průběhu teploty. Tento jev je příčinou odpařování vody uvnitř betonového jádra. Vodní páry šířené profilem nám rychleji ohřívají betonové jádro a zároveň ochlazují ocelový plášť. Po odpaření většiny volné vody se průběh teplot ustálí a pokračuje v předpokládaném růstu.

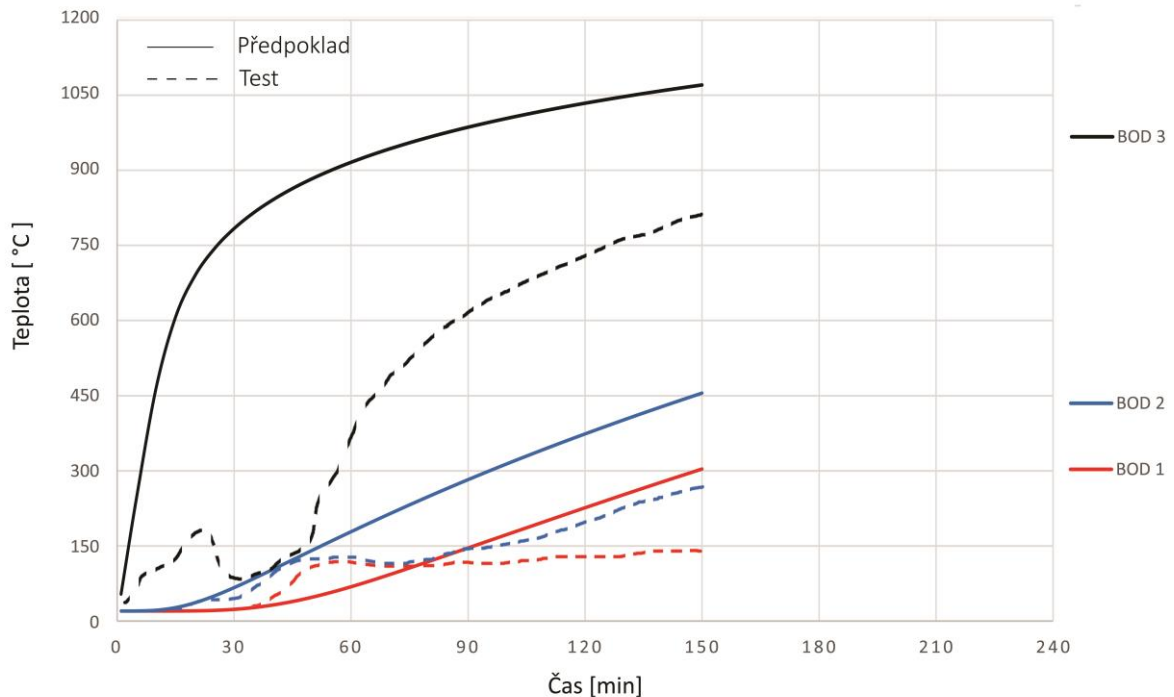
8.2 Čtvercový průřez 630 x 10 mm



Obr. 21 Graf pro předpokládaný a testovaný průběh teplot ve vybraných bodech při teplotním zatížení průřezu 630x10

Hranol 630 x 10 mm vyplněný prostým betonem byl vystaven požárů podle normové teplotní křivky po dobu 240min a zatížen axiálním zatížením rovnému 0,3 násobku únosnosti sloupu za běžné teploty. Profil má díky své velikosti o jedno čidlo navíc. Průběhy jednotlivých křivek z větší části odpovídají předpokládu. Průběh křivky pro bod č. 4 má v celé délce požárního zatížení několik viditelných ztrát teploty oproti předpokládanému průběhu. Díky masivnímu průřezu se všechna voda odpařuje postupně v celé délce požárního zatížení, jelikož bod č.1 nedosahuje vysokých teplot nepředpokládáme úplné odpaření vody z průřezu. Jednotlivé propady teplot u křivky pro bod č. 1 má s největší pravděpodobností za příčinu postupná degradace betonu a následné šíření vodních par průřezem, které mohou nárazově ochlazovat ocelový plášť a tím vznikají propady na křivce znázorňující průběh teploty při požárním testu.

8.3 Kruhový průřez 300x5



Obr. 22 Graf pro předpokládaný a testovaný průběh teplot ve vybraných bodech při teplotním zatížení průřezu 300x5

Poslední testovaný sloup je kruhového průřezu, byl vystaven požárů podle normové teplotní křivky po dobu 150min a zatížen axiálním zatížením rovnému 0,3 násobku únosnosti sloupu za běžné teploty. Srovnání testu a předpokladu nám jasně ukazuje, že došlo ve sloupu při požárním testování k porušení vzorku. Testovaný vzorek se dá rozdělit do tří fází.

- První fáze (0 - 20min) je fáze kdy se ohřívá vnější plášť a s ním roste teplota podle Předpokladu.
- Druhá fáze (20 – 50 min) po 20ti minutách dochází k náhlému ochlazení pláště a poklesu teploty na podobné hodnoty jako jsou hodnoty uvnitř betonu. S největší pravděpodobností má toto chování za příčinu oddělení vnějšího pláště od betonového jádra. V druhé fázi se nacházíme v teplotách mezi 100°C až 120°C. V betonu dochází k odpařování vody a díky vzniku mezery mezi pláštěm a betonem nám pára a volná voda expanduje do prostoru mezi beton a ocelový plášť.

Toto chování má za následek náhlé ochlazení vnějšího Pláště.

- Třetí fáze (50 – 150 min) téměř veškerá voda je z profilu odpařena a křivky pro všechny tři body pokračují dle předpokládaného průběhu.

9. Studie citlivosti

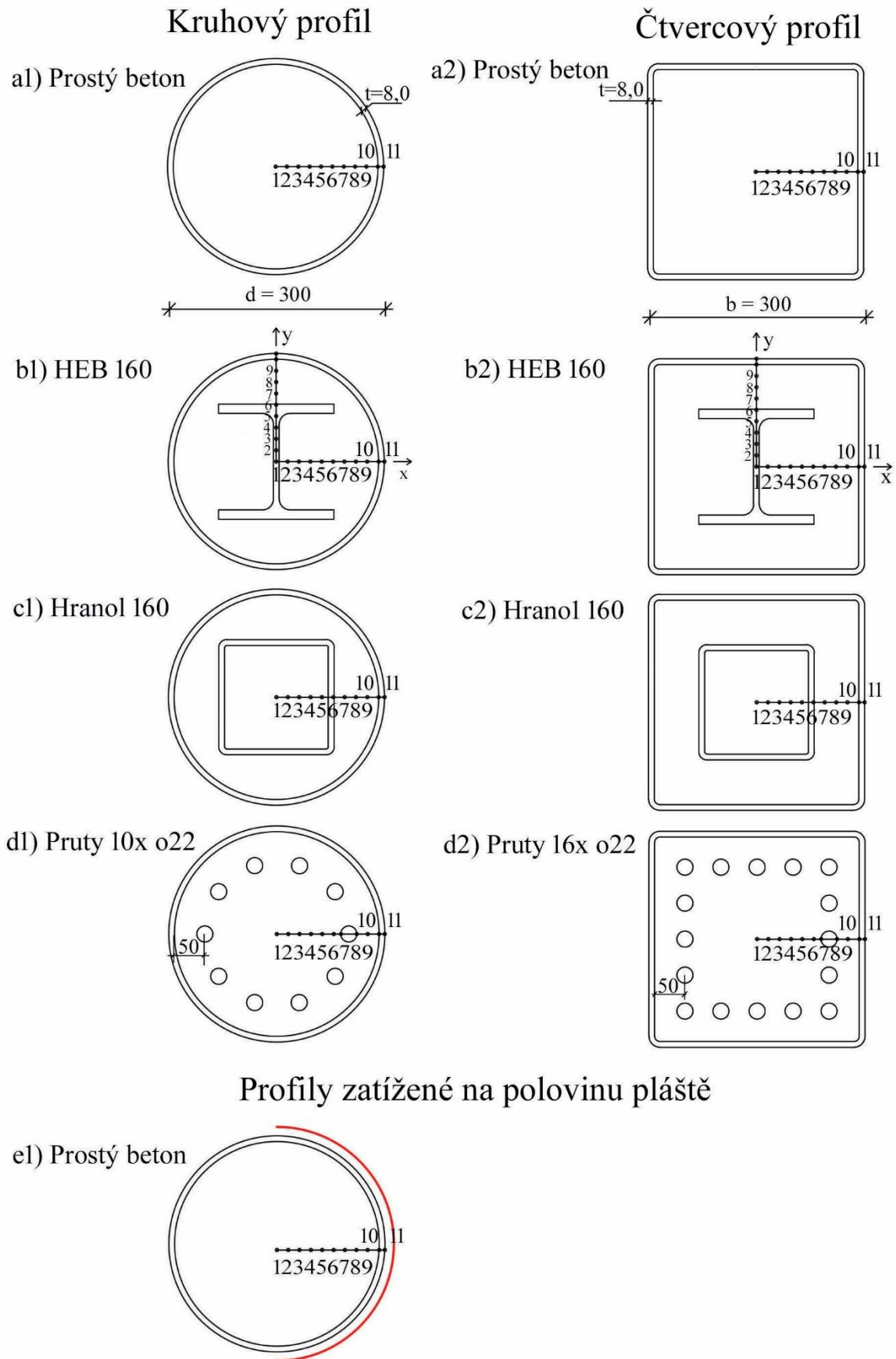
Pomocí programu ansys bylo zkoumáno šíření tepla průřezem u vybraných profilů a jejich citlivost na rozdílné vyztužení, či zahřívání podle normové teplotní křivky 60, 90 a 120 min ze čtyř nebo z dvou stran.

Zvoleny byly dva typy dutých ocelových profilů. Pro každý z nich bylo vytvořeno pět průřezů rozdílného vyztužení či zatížení. První průřez je ocelový plášť vyplněný prostý betonem, další tři průřezy jsou odlišně vyztuženy a poslední průřez je totožný s prvním, ale zatížen pouze ze dvou stran pláště. Jeden z ocelových plášťů byl zvolen kruhový průřez o rozměrech 300 x 8 mm, druhý profil byl čtvercový o rozměrech 300 x 8 mm, jejich vnější pláště byly vystaveny požáru podle normové teplotní křivky po dobu 60, 90 a 120 min.

Materiálové vlastnosti za zvýšené teploty použité ve výpočtovém programu jsou shodné s hodnotami v kapitole 4.2. U betonu jsme uvažovali s horní mezí tepelné vodivosti.

Model byl vytvářen ve výpočtovém programu ve 2D rozvržení, proto byl zvolen souřadný systém x, y .

Na obr. 23 jsou zobrazeny průřezy vybraných ocelobetonových sloupů. V každém průřezu byly definovány body pro zjištění konkrétních teplot pro daný bod. Bod č. 1 se nachází ve všech profilech uprostřed průřezu. Bod č. 10 je umístěn na vnitřní stranu ocelového pláště a bod č. 11 na vnější straně pláště. Body nacházející se mezi bodem č.1 a bodem č.10 jsou ve všech případech rovnoměrně rozvrženy po průřezu a to ve vzdálenosti $142\text{mm} / 9 = 15,78 \text{ mm}$, kde 142 mm je vzdálenost středu a vnitřní části pláště průřezu, jak pro kruhové tak pro čtvercové průřezy. Body jsou rozvrženy po kladné ose x , s výjimkou dvou průřezů a to průřezu b1 a b2, které jsou vyztuženy ocelovým profilem HEB 160. Tento profil oproti ostatním průřezům není v obou směrech symetrický, proto zavádíme další řadu bodů na kladnou osu y pro zkoumání teploty. Tyto body jsou po délce rozvrženy stejně jako na ose x .



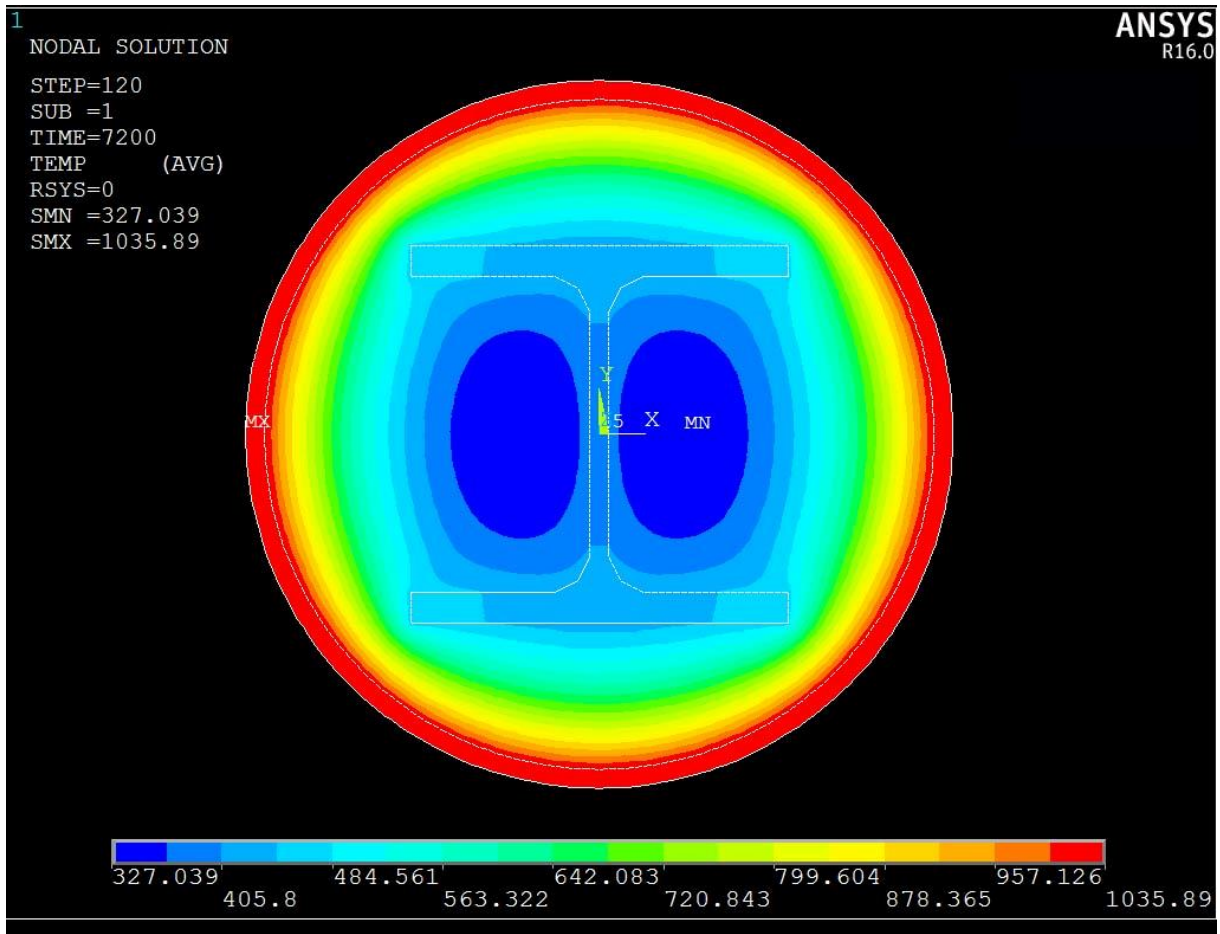
Obr. 23 Zvolené průřezy s rozmístěním bodů

Zvolené průřezy

- Průřezy a1) a a2) jsou tvořeny pouze ocelovým pláštěm kruhového a čtvercového tvaru, vyplněné prostým betonem bez další dodatečně výztuže.
 $A_s = 0 \text{ mm}^2$ plocha výztužení.
- Průřezy b1) a b2) jsou tvořeny ocelovým pláštěm kruhového a čtvercového tvaru, sloup je výztužen válcovaným profilem HEB 160 a průřez je vyplněn betonem. Tyto dva profily jediné zkoumáme v obou směrech z důvodu nesymetrie výztuže. Bod č. 1 je pro oba směry stejný a nachází se uprostřed výztuže.
 $A_s = 5\,425 \text{ mm}^2$ plocha výztužení.
- Průřezy c1) a c2) jsou tvořeny ocelovým pláštěm kruhového a čtvercového tvaru, sloup je výztužen čtvercovou trubkou, o rozměrech 160x160 a tlošťkou pláště $t_p = 8 \text{ mm}$. Sloup je vyplněn jak v prostoru mezi pláštěm a trubkou, tak i uprostřed trubky samozhutitelným betonem. Bod č. 6 se nachází na vnější straně výztuže.
 $A_s = 4\,800 \text{ mm}^2$ plocha výztužení.
- Průřezy d1) a d2) jsou tvořeny ocelovým pláštěm kruhového a čtvercového tvaru, sloup je výztužen prutovou výztuží a sloup je vyplněn samozhutitelným betonem.
d1) 10 x prut $\varnothing 22 \text{ mm}$ $A_s = 3801 \text{ mm}^2$
d2) 16 x prut $\varnothing 22 \text{ mm}$ $A_s = 6082 \text{ mm}^2$
- Průřez e1) Je totožný s průřezem a1), liší se pouze zatížením. Průřez e1 je zahříván pouze ze dvou stran jak je vidět červeně vyznačenou čarou na obr. 23.
 $A_s = 0 \text{ mm}^2$ plocha výztužení.

9.1 Vliv výztuže na rozložení teploty po průřezu

Průřezy byli vystaveny požáru podle normové teplotní křivky po dobu 60, 90 a 120 min. Pro tyto mezní stavy byly určeny teploty v daných bodech jednotlivých průřezů a následně porovnány pomocí grafů. Na obr. 24 je grafické znázornění prohřátí průřezu pro jeden z vybraných profilů po 120 min vystavení požáru. Z obrázku je patrný vliv výztuže na prohřátí středu průřezu.



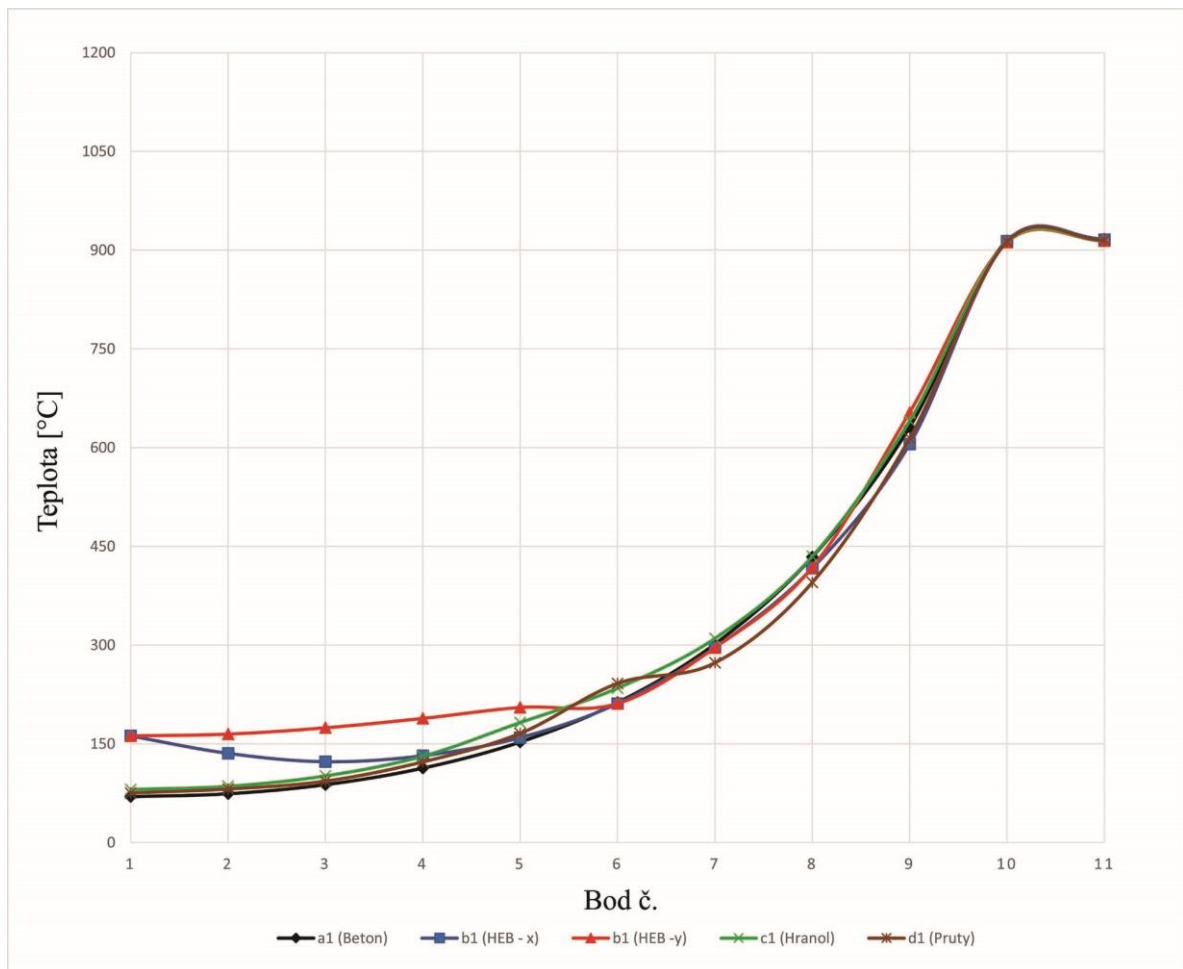
Obr. 24 Prohřátí průřezu b2 s výztuží z profilu HEB

9.1.1 Kruhové průřezy

Pro rozbor vlivu výztuží na prohřátí průřezu byly vytvořeny grafy, pro jednotlivé mezní stavy R60, R90, R120. Graf znázorňuje číslo bodu od středu (bod č. 1) až po vnější stranu ocelového pláště (bod č. 11) a jeho teplotu při konkrétním požárním zatížení.

R60

Obr. 25 znázorňuje šíření tepla průřezu v 60. min vystavení požáru.



Obr. 25 Porovnání teplot kruhových průřezů v 60. min

Již v 60. min vystavení požáru, je z grafu zřetelně patrný vliv výztuže profilu b1, kdy ocelový profil HEB zasahuje do středu průřezu a postupně dochází k prohřívání středu. Zajímavostí je rozdíl křivky b1 (HEB – x) a b1 (HEB – y). Křivka b1 (HEB – y) je tvořena body, které procházejí celým průřezem výztuže HEB a proto dochází k postupnému nárůstu teploty mezi bodem č. 1 až 6. Bod č. 1 křivky b1 (HEB – x) je součástí výztuže HEB, ale body č. 2 až 6 jsou součástí betonového jádra, proto dochází k propadu teploty. V obou případech od bodu č. 6 začínají křivky kopírovat křivku prostého betonu a1.

Nejnižší Teplota průřezu b1 se nachází oproti ostatním průřezům v bodě č. 3. To můžeme také vidět na obr. 24 , kde je nejnižší teplota označena.

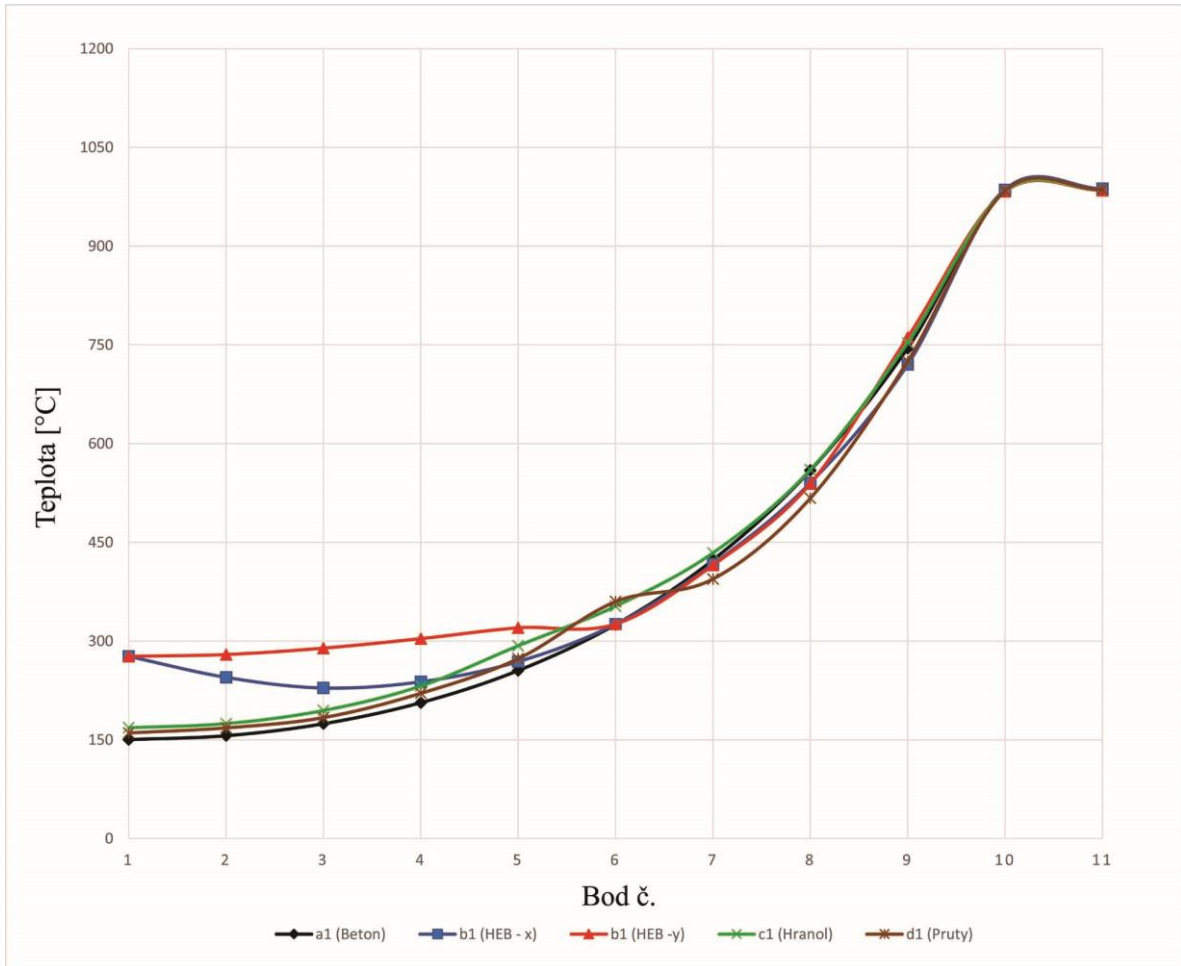
Ostatní druhy výztuže mají v 60. min požáru malý vliv na prohřátí jádra průřezu. Výchylky křivek c1 a e1 v bodech č. 6 a 7 jsou způsobeny průchodem danou výztuží. Minimální teploty vyztužených průřezů a nárůst teploty oproti průřezu s prostým betonem je zobrazena v tab. 34. V případě průřezu b1 uvažujeme nejnižší teplotu v bodě č. 3.

Tab. 34 Minimální teploty průřezů pro R60

	a1 [°C]	b1 [°C]	c1 [°C]	d1 [°C]
Bod č. 1	69,7	161,9	80,6	75,3
Bod č. 3		122,8		
Nárůst teploty [%]	-	76	15,6	8

R90

Obr. 26 znázorňuje šíření tepla jednotlivými průřezy v 90. min vystavení požáru a tab. 35 minimální teploty vyztužených průřezů a nárůst teploty oproti průřezu s prostým betonem.



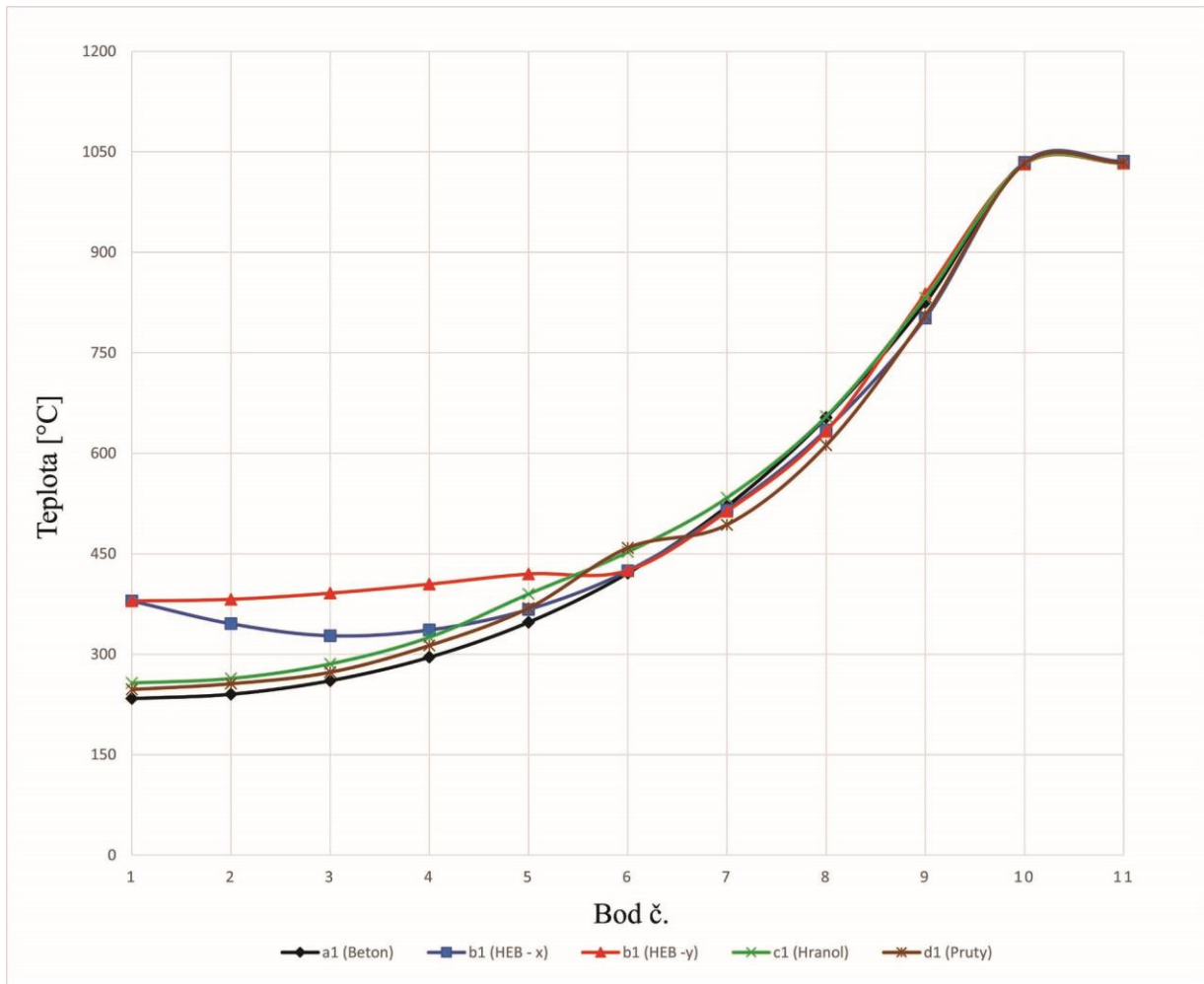
Obr. 26 Porovnání teplot kruhových průřezů v 90. min

Tab. 35 Minimální teploty průřezů pro R90

	a1 [°C]	b1 [°C]	c1 [°C]	d1 [°C]
Bod č. 1	150,3	276,8	168,3	160,4
Bod č. 3		228,7		
Nárůst teploty [%]	-	52	12	7

R120

Obr. 27 znázorňuje šíření tepla jednotlivými průřezy ve 120. min vystavení požáru a tab. 35 minimální teploty vyztužených průřezů a nárůst teploty v porovnání s průřezem z prostého betonu.

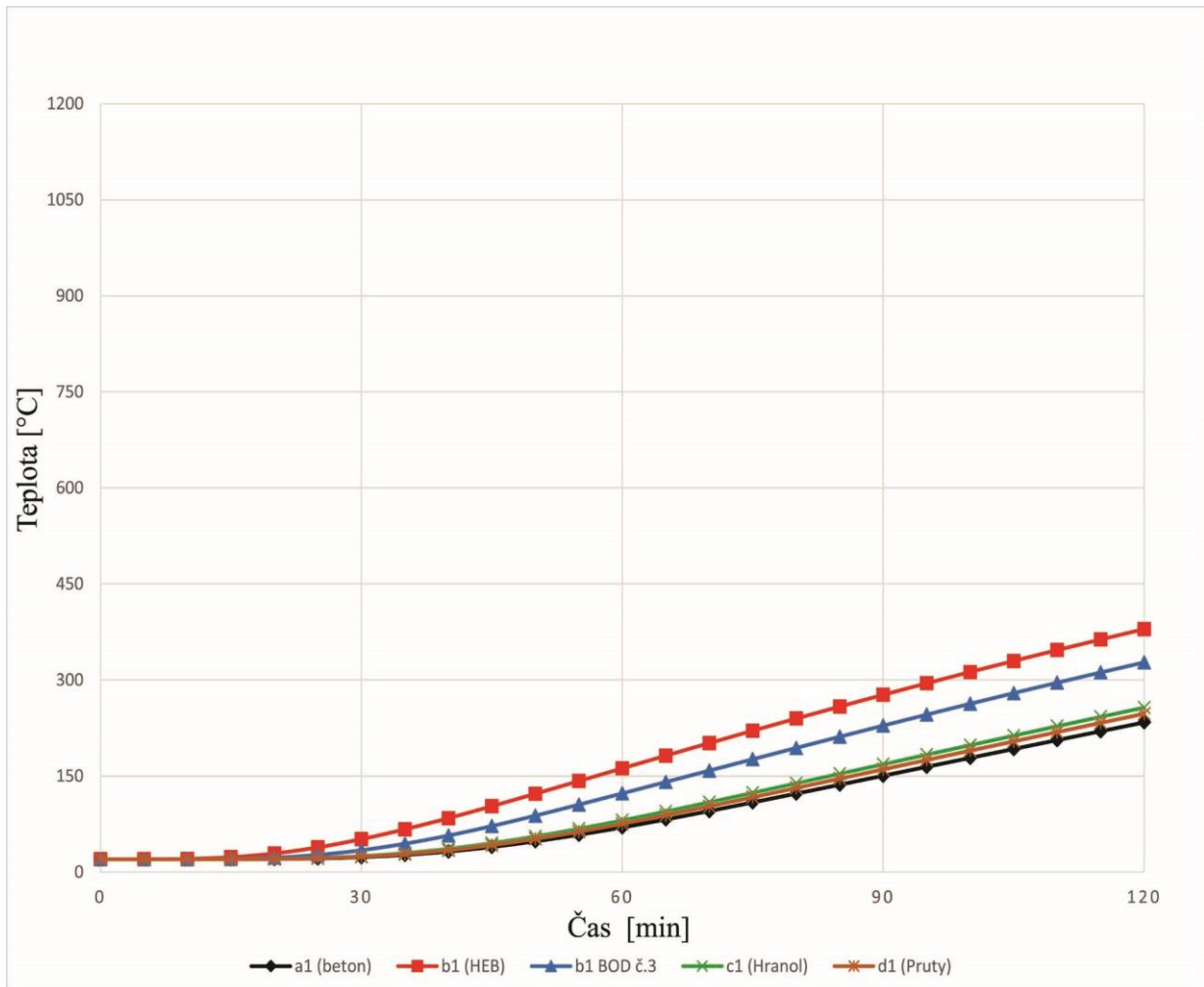


Obr. 27 Porovnání teplot kruhových průřezů ve 120. min

Tab. 36 Minimální teploty průřezů pro R120

	a1 [°C]	b1 [°C]	c1 [°C]	d1 [°C]
Bod č. 1	233,7	379,4	256,9	247,3
Bod č. 3		327,5		
Nárůst teploty [%]	-	40	10	6

Pro průběh nárůstu teploty uprostřed průřezů a bodu č. 3 pro průřez b1 v závislosti na čase byl vykreslen v obr. 28 graf, podle kterého si můžeme ověřit získané výsledky v předchozích tabulkách.



Obr. 28 Prohřátí středů průřezů a bodu č. 3 pro průřez b1 v závislosti na čase

Po porovnání výsledků vlivu výztuže na prohřátí jednotlivých kruhových průřezů jsme došli k závěrům. Nejvyšší vliv na prohřátí betonového jádra ocelobetonového kruhového průřezu má výztuž tvořena válcovaným profilem HEB. Tato výztuž se ohřívá na koncích svého profilu a díky teplotní vodivosti oceli přenáší teplo do středu průřezu. To má za následek rychlejší prohřívání sloupu. Nárůst teploty v místě s nejnižší teplotou je při srovnání s prostým betonem pro R60 76 %, pro R90 52 % a pro R120 40 % nárůstu.

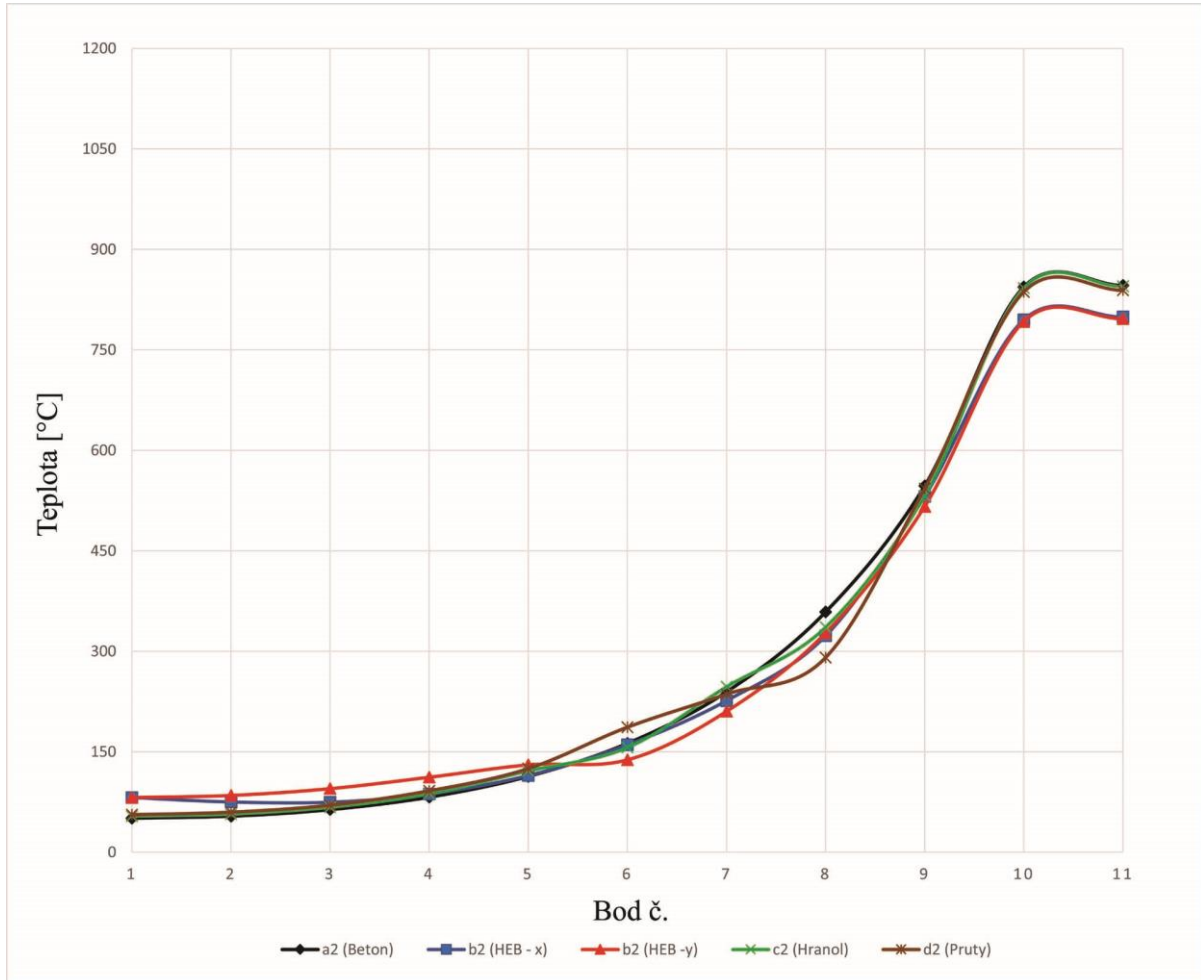
Pravoúhlá trubková výztuž použitá v průřezu c1, má malý vliv na prohřátí betonového jádra, ke zvýšením teplotám dochází v místech průniku výztuže. Nárůst teploty uprostřed průřezu je při srovnání s prostým betonem pro R60 15,6 %, pro R90 12 % a pro R120 10% nárůstu.

Prutová výztuž nejméně přispívá k prohřátí průřezu, plocha výztuže je oproti ostatním příkladům vyztužení nižší. Nárůst teploty uprostřed průřezu je při srovnání s prostým betonem pro R60 8 %, pro R90 7 % a pro R120 6 % nárůstu.

9.1.2 Čtvercové průřezy

R60

Obr. 29 znázorňuje šíření tepla jednotlivými průřezy v 60. min vystavení požáru a tab. 37 minimální teploty vyztužených průřezů a nárůst teploty oproti průřezu s prostým betonem.



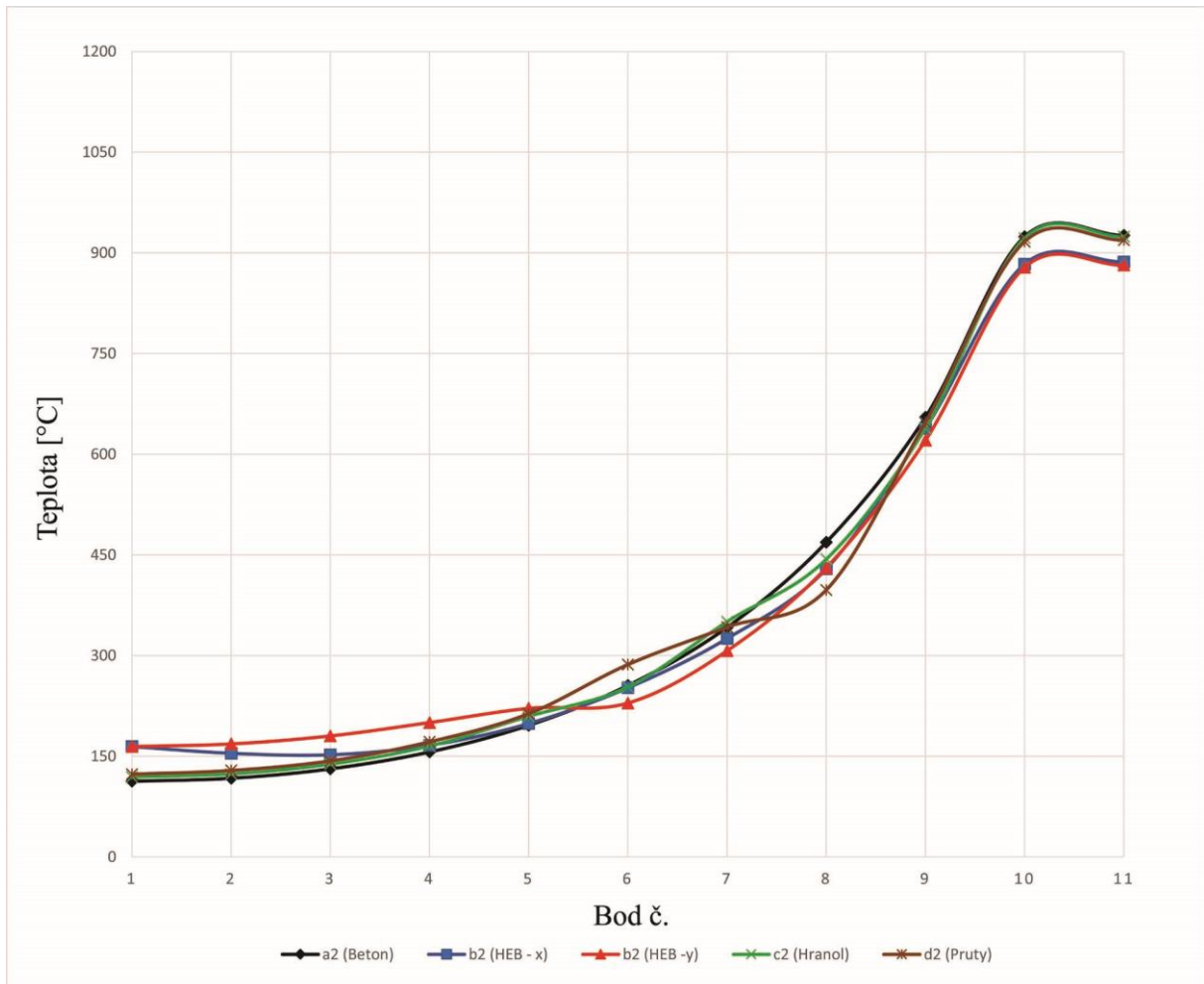
Obr. 29 Porovnání teplot čtvercových průřezů v 60. min

Tab. 37 Minimální teploty průřezů pro R60

	a2 [°C]	b2 [°C]	c2 [°C]	d2 [°C]
Bod č. 1	50,8	81,6	53,7	56
Bod č. 3		74,6		
Nárůst teploty [%]	-	47	6	10,2

R90

Obr. 30 znázorňuje šíření tepla jednotlivými průřezmi v 90. min vystavení požáru a tab. 38 minimální teploty vyztužených průřezů a nárůst teploty oproti průřezu s prostým betonem.



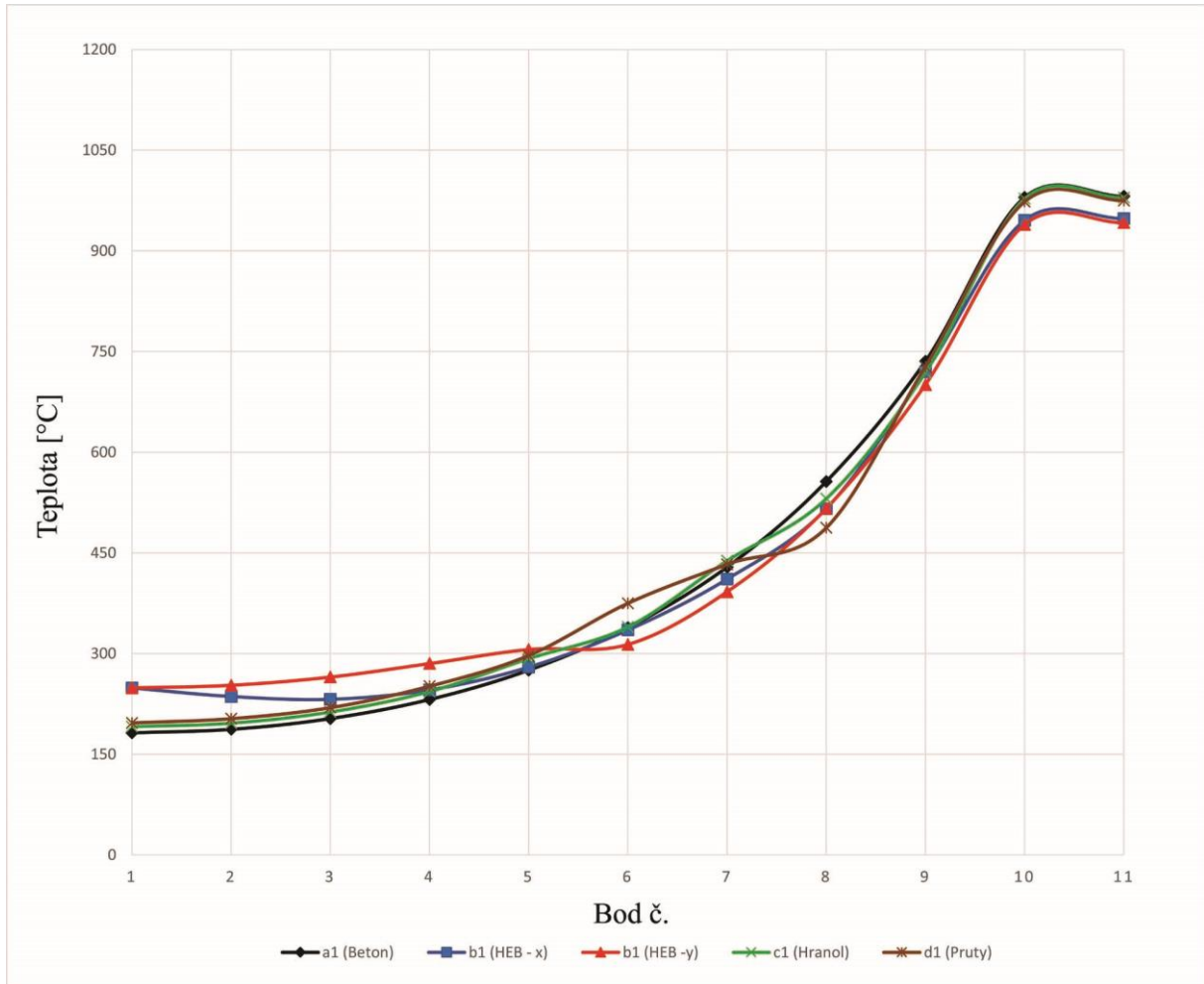
Obr. 30 Porovnání teplot čtvercových průřezů v 90. min

Tab. 38 Minimální teploty průřezů pro R90

	a2 [°C]	b2 [°C]	c2 [°C]	d2 [°C]
Bod č. 1	112,6	164,3	119,1	123,2
Bod č. 3		152,1		
Nárůst teploty [%]	-	35	5,8	9,4

R120

Obr. 31 znázorňuje šíření tepla jednotlivými průřezy ve 120. min vystavení požáru a tab. 39 minimální teploty vyztužených průřezů a nárůst teploty v porovnání s průřezem z prostého betonu.

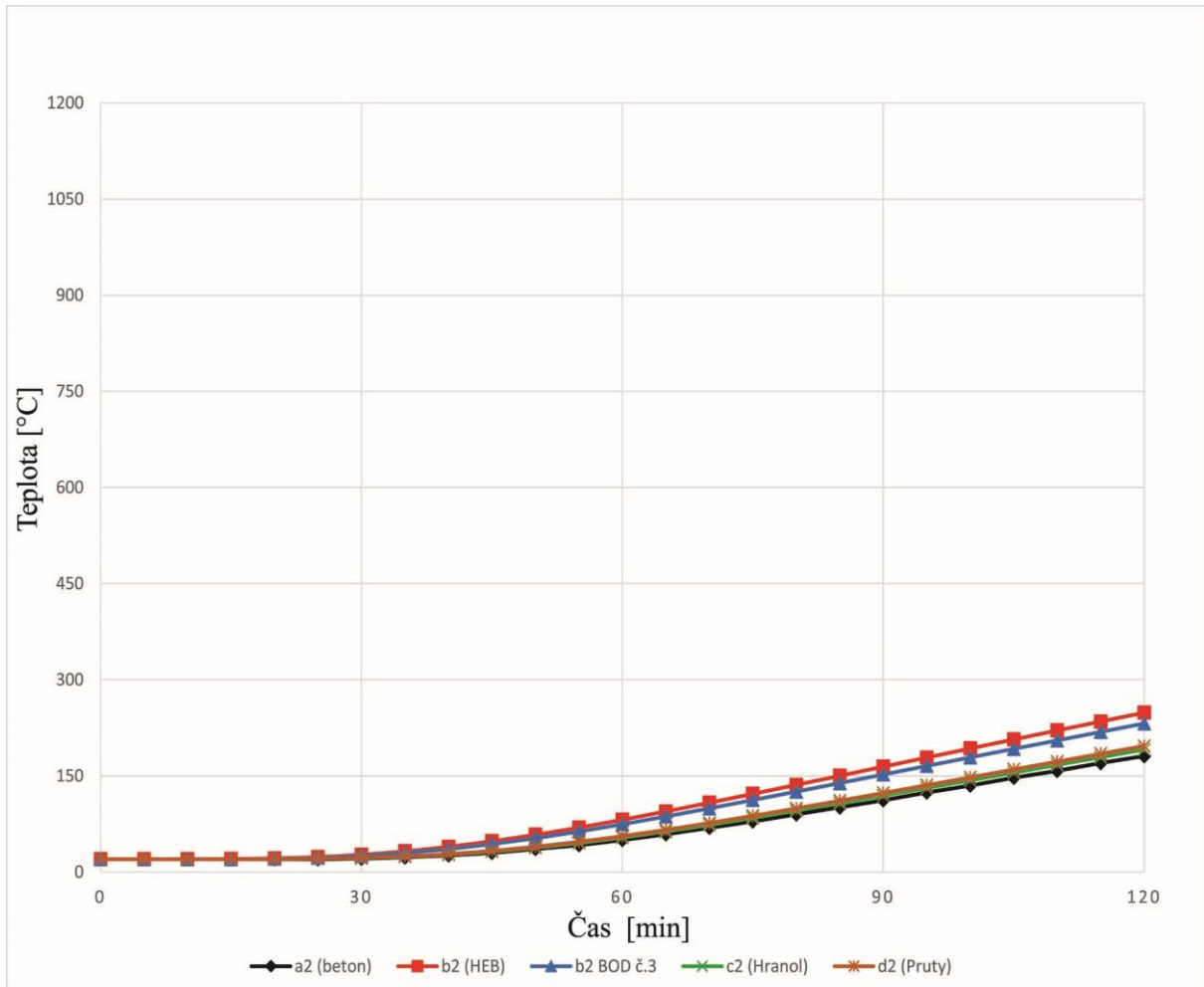


Obr. 31 Porovnání teplot čtvercových průřezů po 120ti min.

Tab. 39 Minimální teploty průřezů pro R120

	a2 [°C]	b2 [°C]	c2 [°C]	d2 [°C]
Bod č. 1	181,89	248,7	191,1	196,6
Bod č. 3		231,8		
Nárůst teploty [%]	-	27	5	8

Pro průběh nárůstu teploty uprostřed průřezů a bodu č. 3 pro průřez b2 v závislosti na čase byl vykreslen v obr. 32 graf, podle kterého si můžeme ověřit získané výsledky v předchozích tabulkách.



Obr. 32 Prohřátí středů průřezů a bodu č. 3 pro průřez b2 v závislosti na čase

Po porovnání výsledků vlivu výztuže na prohřátí jednotlivých čtvercových průřezů jsme došli k závěrům

Výztuž tvořena válcovaným profilem HEB průřezu b2, neměla na prohřátí průřezu tak významný vliv jako u kruhového sloupu. Nárůst nejnižší teploty v průřezu pro R120 činil 27% oproti teplotě průřezu s prostým betonem. Výztuž měla ovšem vliv na prohřívání vnějšího ocelového pláště, kdy odvod tepla profilem HEB do betonového jádra měla za příčinu snížení teplot ocelového pláště, tento jev můžeme vidět na obr. 31 u bodů č. 10 a č. 11. Nárůst teploty v průřezu pro R90 činil 35 % a pro R60 27 %.

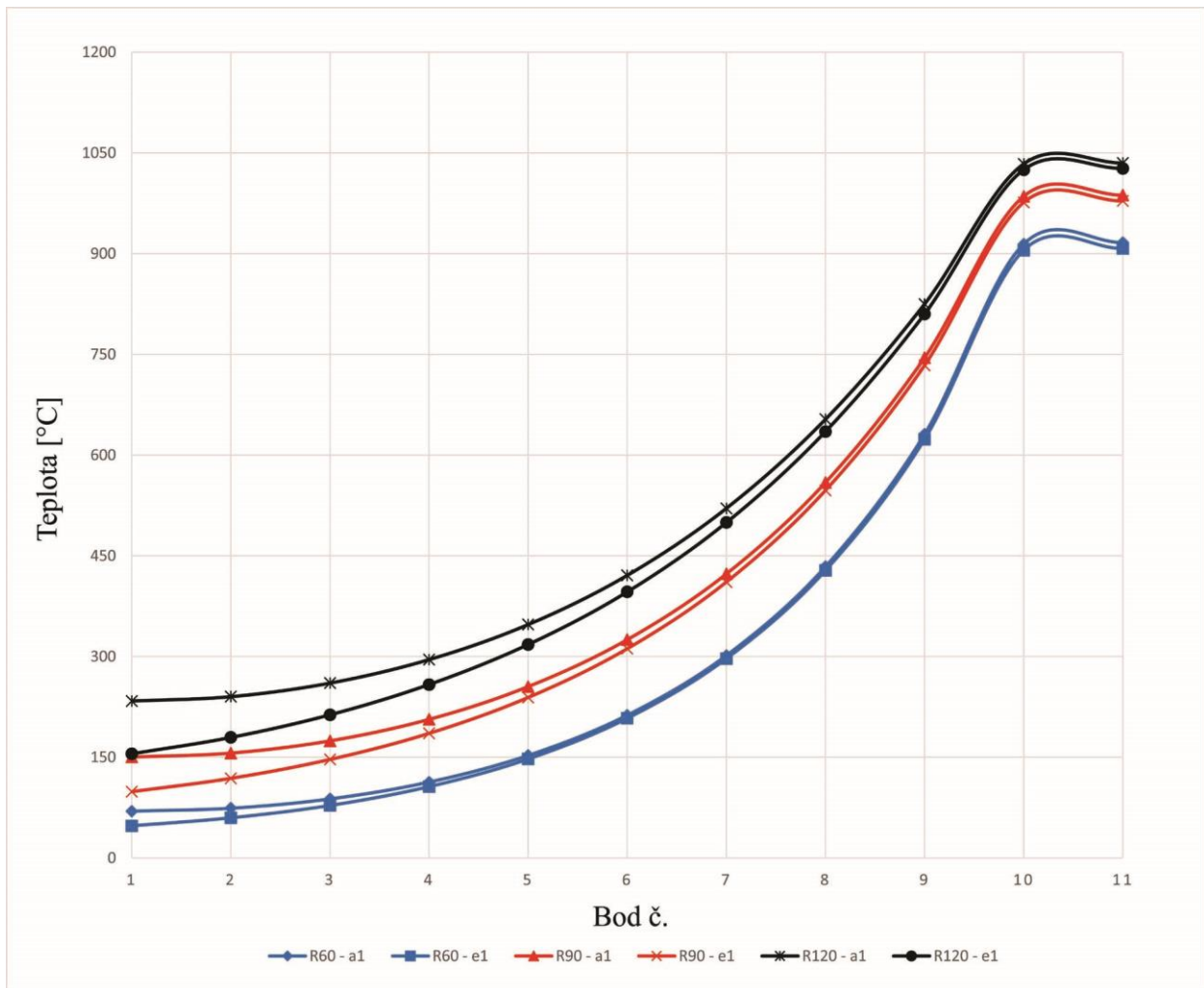
Nejmenší odchylku od teplotní křivky průřezu a2 s prostým betonem, tvořil prvek c2 vyztužený čtvercovým profilem. Viditelné teplotní změny nastali pouze v místech výztuže. Nárůst teploty uprostřed průřezu je při srovnání s prostým betonem pro R60 6 %, pro R90 5,8 % a pro R120 5% nárůstu.

V případě průřezu d1 jsou viditelné změny mezi bodem č. 7 a bodem č. 8. Bod č. 7 se nachází na vnitřní straně a bod č. 8 na vnější straně betonářské výztuže. Díky vysokému vedení tepla v oceli nám křivka mezi body ve srovnání s křivkou a2 propadá. Rozdíl teplot mezi vnitřní a vnější částí prutu při R120 činí 5,8°C. Nárůst teploty uprostřed průřezu je při srovnání s prostým betonem pro R60 10,2 %, pro R90 9,4 % a pro R120 8 % nárůstu.

9.2 kruhový průřez vystavený požáru z poloviny svého pláště

Průřezy a1 a e1 byly vystaveny požáru podle normové teplotní křivky po dobu 60, 90 a 120 min. průřez e1 pouze z poloviny kruhového průřezu. Teploty byly získány z 11-ti bodů. Bod č. 1 se nachází ve středu průřezu a další body postupují ve směru zatěžovaného pláště až po bod č. 11, který se nachází na vnějším plášti.

Obr. 34 nám popisuje rozdíly teplot naměřené v jednotlivých bodech průřezu a1 a e1. Graf byl vyhotoven pro všechny stupně požárního zatížení R60, R90 a R120.

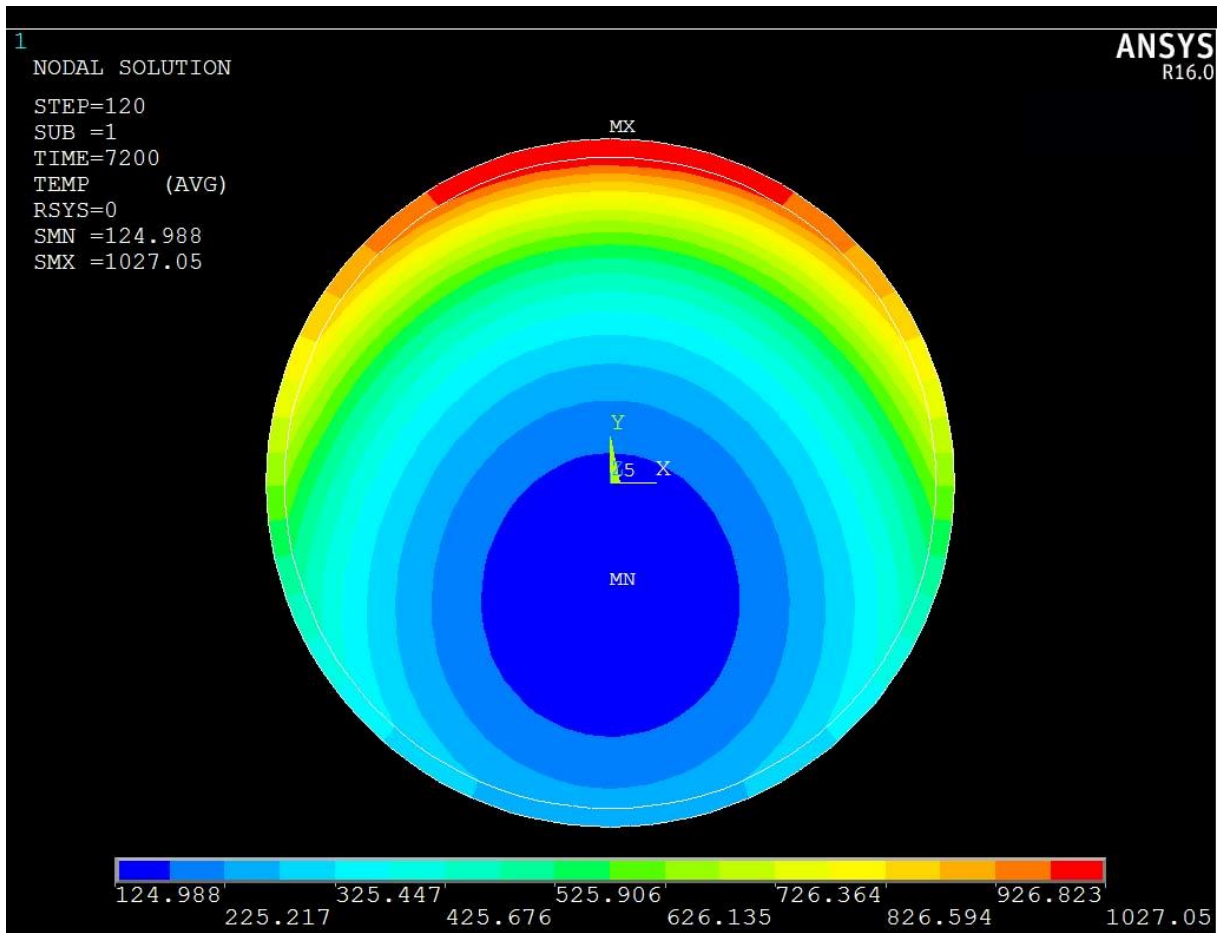


Obr. 33 Teploty v průřezu a1, e1 pro požární zatížení R60, R90, R120

Tab. 40 Pokles teploty v případě vystavení požáru z poloviny svého průřezu

	a1 [°C]	e1 [°C]	Pokles teploty [%]
R60	69,7	48	31,1
R90	150,4	98,7	34,4
R120	233,7	155,1	34,0

Z tab. 40 je patrné, že pokles teploty středu průřezu při zatížení pouze poloviny pláště je v rozmezí 31-34,4% pro R60 až R120 oproti vystavení celého pláště účinkům požáru. V Průřezech e1 se minimální hodnota teploty nenachází uprostřed průřezu, ale pro porovnání s průřezem a1 jsme uvažovali pouze s body od středu k plášti vystaveného požárnímu zatížení. Obr. 34 je grafické znázornění prohřátí průřezu e1 ve 120. min. Značkou MN je označen bod s minimální teplotou v průřezu.



Obr. 34 Rozložení teploty v průřezu e1 pro R120

10. Shrnutí

V práci byla připravena studie vlivu výztuže na šíření tepla v průřezích ocelobetonového uzavřeného průřezu, při celkovém částečném vystavení požáru.

Na začátku je shrnuto navrhování ocelobetonových sloupů uzavřených průřezů.

Byl připraven model rozvoje tepla v průřezu MKP v programu Ansys.

Model vytvořený v programu Ansys byl validován modelem n;a experimentech z literatury. Pro pravoúhlý průřez 315 x 5 mm byla stanovena v 60, 90 a 120. min požáru přesnost viz. Tab. 41.

Tab. 41 Odchylka předpokládaných teplot od testovaných hodnot pro R60, R90, R120

	R60	R90	R120
Bod č.1 předpoklad [°C]	50	89	150
Bod č.1 test [°C]	89	110	119
Odchylka [%]	43	19	26
Bod č.2 předpoklad [°C]	121	180	256
Bod č.2 test [°C]	120	123	160
Odchylka [%]	1	46	60
Bod č.3 předpoklad [°C]	751	840	903
Bod č.3 test [°C]	598	698	788
Odchylka [%]	25	20	15

Model byl verifikován pomocí tabulek z EN1994-1-2. Tab. 42 stanovuje odchylku mezi tabulkovými a výpočetními hodnotami. Jelikož byl model navržen na R120 odchylka se zvyšuje pro nižší požární odolnosti.

Tab. 42 Odchylka tabulkových a výpočetních hodnot

$N_{fi,pl,Rd}$ [kN]	R60	R90	R120
Tabulky	2292,7	1636,3	1438,5
Výpočet	2821,5	1984,2	1431,0
Odchylka [%]	23,2	21,2	0,3

Vliv hustoty sítě na přesnost předpovědi byla připravena pro kruhový průřez 300 x 5 mm. Na výpočet hustoty sítě byla využita metoda konečných prvků, dostačující plocha připadající na jeden uzel byla stanovena na 65,4 mm².

Studie citlivosti vlivu vyztužení na rozvoj tepla průřezem kruhového uzavřeného průřezu ukázala, že Nejvyšší vliv na prohřátí betonového jádra ocelobetonového kruhového průřezu má výztuž tvořena válcovaným profilem HEB. Tato výztuž se ohřívá na koncích svého profilu a díky teplotní vodivosti oceli přenáší teplo do středu průřezu. To má za následek rychlejší prohřívání sloupu. Nárůst teploty v místě s nejnižší teplotou je při srovnání s prostým betonem pro R60 76 %, pro R90 52 % a pro R120 40 % nárůstu. Pravoúhlá trubková výztuž použitá v průřezu c1, má malý vliv na prohřátí betonového jádra, ke zvýšeným teplotám dochází v místech průniku výztuže. Nárůst teploty uprostřed průřezu je při srovnání s prostým betonem pro R60 15,6 %, pro R90 12 % a pro R120 10% nárůstu. Prutová výztuž nejméně přispívá k prohřátí průřezu, plocha výztuže je oproti ostatním příkladům vyztužení nižší. Nárůst teploty uprostřed průřezu je při srovnání s prostým betonem pro R60 8 %, pro R90 7 % a pro R120 6 % nárůstu.

Studie citlivosti vlivu vyztužení na rozvoj tepla průřezem čtvercového uzavřeného průřezu ukázala, že výztuž tvořena válcovaným profilem HEB průřezu b2, neměla na prohřátí průřezu tak významný vliv jako u kruhového sloupu. Nárůst nejnižší teploty v průřezu pro R120 činil 27% oproti teplotě průřezu s prostým betonem. Výztuž měla ovšem vliv na prohřívání vnějšího ocelového pláště, kdy odvod tepla profilem HEB do betonového jádra měla za příčinu snížení teplot ocelového pláště, tento jev můžeme vidět na obr. 31 u bodů č. 10 a č. 11. Nárůst teploty v průřezu pro R90 činil 35 % a pro R60 27 %. Nejmenší odchylku od teplotní křivky průřezu a2 s prostým betonem, tvořil prvek c2 vyztužený čtvercovým profilem. Viditelné teplotní změny nastali pouze v místech výztuže. Nárůst teploty uprostřed průřezu je při srovnání s prostým betonem pro R60 6 %, pro R90 5,8 % a pro R120 5% nárůstu. V případě průřezu s prutovou výztuží jsou viditelné změny mezi bodem č. 7 a bodem č. 8. Bod č. 7 se nachází na vnitřní straně a bod č. 8 na vnější straně betonářské výztuže. Díky vysokému vedení tepla v oceli nám křivka mezi body ve srovnání s křivkou a2 propadá. Rozdíl teplot mezi vnitřní a vnější částí prutu při R120 činí 5,8°C. Nárůst teploty uprostřed průřezu je při srovnání s prostým betonem pro R60 10,2 %, pro R90 9,4 % a pro R120 8 % nárůstu.

Při zahřívání podle normové teplotní křivky ze 4 nebo ze 2 stran pro kruhový uzavřený průřez dochází k poklesu teploty uprostřed jádra viz. tab. 43.

Tab.43 Pokles teplot při částečně zahřátém průřezu

	a1 [°C]	e1 [°C]	Pokles teploty[%]
R60	69,7	48	31,1
R90	150,4	98,7	34,4
R120	233,7	155,1	34,0

Další práce

Pro další práci by bylo možné dopracovat jednotlivé průřezy řešené ve studii citlivosti do únosnosti. Použití 3D modelu pro šíření tepla sloupem a nerovnoměrné ohřívání po výšce. Využití rozptýlené výztuže. Návrh jiných požárních scénářů podle parametrické křivky. Využití problematiky u dutých dvouplášťových ocelobetonových sloupů

Použitá literatura a další zdroje

Studnička, J.: *Ocelobetonové konstrukce 20*, ČVUT Praha, 2005;

Vraný, T. –Wald, F.: *Ocelové konstrukce –Tabulky*, ČVUT Praha, 2009;

Feng Chen - Fei-Yu Liao - Zhong Tao: *Fire performance of concrete filled stainless steel tubular columns*;

Xiao Ling Zhao – Lin Hai Han – Hui Lu: *Concrete – filled tubular members and connections*, Spon Press, 2010;

Jukka Myllymaki - Djebar Baroudi: *Simple Method to Predict Fire Resistance of Composite Columns*;

Min Yu- Xiaoxiong Zha - Jianqiao Ye a,c - Baolin Wang b: *A unified method for calculating fire resistance of solid and hollow concrete-filled steel tube columns based on average temperature*;

V. Moliner - A. Espinos - M. L. Romero - A. Hospitaler: *Fire behavior of eccentrically loaded slender high strength concrete-filled tubular columns*;

Dr. David I. Rush: *Residual capacity of fire – exposed concrete-filled steel hollow section columns*;

ČSN EN1991-1-2: *Zatížení konstrukcí. Obecná zatížení. Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*, ČSNI, Praha, 2004;

ČSN EN1992-1-1: *Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČSNI, Praha, 2006;

ČSN EN1992-1-2: *Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006;

ČSN EN1993-1-1: *Navrhování ocelových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČSNI, Praha, 2006;

ČSN EN1993-1-2: *Navrhování ocelových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006;

ČSN EN1994-1-1: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČSNI, Praha, 2006;

ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006;

Zdroje obrázků

Obr. 1 Příklad vyztužených ocelobetonových sloupů, *Vlastní zdroj*;

Obr. 2 Kruhový ocelobetonový sloup uzavřeného průřezu a rozložením napětí, In: Studnička, J.: *Ocelobetonové konstrukce 20, ČVUT Praha, 2005*

Obr. 3 Pravoúhlý ocelobetonový sloup uzavřeného průřezu a rozložením napětí, In: Studnička J.: *Ocelobetonové konstrukce 20, ČVUT Praha, 2005*;

Obr. 4 Interakční závislost pro kruhové uzavřené profily vyplněné betonem, In: ČSN EN1994-1-1: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČSNI, Praha, 2006*;

Obr. 5 Interakční závislost pro pravoúhlé uzavřené profily vyplněné betonem, In: Studnička, J.: *Ocelobetonové konstrukce 20, ČVUT Praha, 2005*;

Obr. 6 Hodnoty μ_d , In: ČSN EN1994-1-1: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČSNI, Praha, 2006*;

Obr. 7 Nominální teplotní křivky, In: Radek Štefan [online]. © 2009 - 2013 Radek Štefan. [vid. 7. 12. 2013]. Dostupné z: http://concrete.fsv.cvut.cz/~stefan/vyuka/133PSB/133PSB_Prednaska_1.pdf;

Obr. 8 Pracovní diagram oceli za zvýšené teploty, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČSNI, Praha, 2006*

Obr. 9 Pracovní diagramy konstrukční oceli pro určité zvýšené teploty s uvažováním zpevnění, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČSNI, Praha, 2006*

Obr. 10 Pracovní diagram betonu v tlaku za zvýšené teploty a výpočtové vzorce, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČSNI, Praha, 2006*;

Obr. 11 Pracovní diagramy prostého betonu s křemičitým kamenivem za zvýšené teploty, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČSNI, Praha, 2006*;

Obr. 12 Tepelné vodivost oceli za zvýšené teploty, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČSNI, Praha, 2006*;

- Obr. 13 Měrné teplo oceli za zvýšené teploty, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006;
- Obr. 14 Síť vzorku č. 5 pro ocelobetonový průřez 300 x 8 mm, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 15 Průřez ocelobetonovým sloupem pro výpočet únosnosti, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 16 Rozdělení průřezu na vrstvy, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 17 Míra zbytkové únosnosti sloupu pro dané požární zatížení, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 18 Porovnání tepelné vodivosti a měrného tepla nerezové a uhlíkové ocel, Prof. Ing. Josef Macháček (online), *Dotuspné: <http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNerez/>*;
- Obr. 19 Testované průřezy s umístěním teplotních čidel, Feng Chen - Fei-Yu Liao - Zhong Tao: *Fire performance of concrete filled stainless steel tubular columns*;
- Obr.20 Graf pro předpokládaný a testovaný průběh teplot ve vybraných bodech při teplotním zatížení průřezu 315x5, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 21 Graf pro předpokládaný a testovaný průběh teplot ve vybraných bodech při teplotním zatížení průřezu 630x10, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 22 Graf pro předpokládaný a testovaný průběh teplot ve vybraných bodech při teplotním zatížení průřezu 300x5, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 23 Zvolené průřezy s rozmístěním bodů, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 24 Prohřátí průřezu b2 s výztuží z profilu HEB, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 25 Porovnání teplot kruhových průřezů v 60. min, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 26 Porovnání teplot kruhových průřezů v 90. min, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 27 Porovnání teplot kruhových průřezů ve 120. min, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 28 Prohřátí středů průřezů a bodu č. 3 pro průřez b1 v závislosti na čase, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 29 Porovnání teplot čtvercových průřezů v 60. min, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 30 Porovnání teplot čtvercových průřezů v 90. min, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 31 Porovnání teplot čtvercových průřezů po 120ti min, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 32 Prohřátí středů průřezů a bodu č. 3 pro průřez b2 v závislosti na čase, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 33 Teploty v průřezu a1, e1 pro požární zatížení R60, R90, R120, *Vlastní zdroj*;
- Obr. 34 Rozložení teploty v průřezu e1 pro R120, *Vlastní zdroj*;

Zdroje tabulek

Tab. 1 Jmenovité hodnoty meze kluzu f_y a mezní pevnosti f_u pro konstrukční oceli v N/mm², In: ČSN EN1993-1-1: *Navrhování ocelových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 2 Charakteristické meze kluzu pro betonářskou výztuž, In: ČSN EN1993-1-1: *Navrhování ocelových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 3 Pevnostní třídy betonu v N/mm², In: ČSN EN1992-1-1: *Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 4 Hodnoty sečnového modulu pružnosti E_{cm} v kN/mm², In: ČSN EN1992-1-1: *Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 5 Hodnota součinitele β , In: ČSN EN1994-1-1: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 6 Imperfekce ocelobetonového sloupu uzavřeného průřezu a příslušné křivky vzpěrnosti, In: ČSN EN1994-1-1: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 7 Mezní hodnoty poměrné štíhlosti $\bar{\lambda}$, In: Studnička, J.: *Ocelobetonové konstrukce 20*, ČVUT Praha, 2005;

Tab. 8 Součinitel Ψ pro kruhové průřezy, In: Studnička, J.: *Ocelobetonové konstrukce 20*, ČVUT Praha, 2005;

Tab. 9 Smykové pevnosti v soudržnosti τ_{Rd} dle typu průřezu, In: ČSN EN1994-1-1: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 10 Parametry popisující křivku pracovního diagramu oceli za zvýšené teploty, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006

Tab. 11 Redukční součinitele k_θ pro ocel za zvýšené teploty, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 12 Hodnoty redukováných mechanických vlastností pro prostý beton s křemičitým kamenivem za zvýšené teploty, In: ČSN EN1992-1-2: *Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006

Tab. 13 Tepelné vlastnosti oceli za zvýšené teploty, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006

Tab. 14 Tepelné vlastnosti betonu za zvýšené teploty, In: ČSN EN1992-1-2: *Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006

Tab. 15 Porovnání závislosti hustoty sítě na korektnosti výsledků, *Vlastní zdroj*;

Tab. 16 Požární odolnosti vybetonovaných dutých ocelových průřezů, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 17 Schopnost sloupu odolat vytížení $\eta_{fi,t}$ pro požární odolnosti R60,R90 a R120 a určení únosnosti $N_{fi,pl,Rd}$, *Vlastní zdroj*;

Tab. 18 Plochy a momenty setrvačnosti jednotlivých vrstev, *Vlastní zdroj*;

Tab. 19 Průměrné teploty vrstev, *Vlastní zdroj*;

Tab. 20 Určení napětí oceli a tangentsvého modulu, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 21 Redukční součinitele pro ocel, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006

Tab. 22 Redukované hodnoty pro ocelový plášť, *Vlastní zdroj*;

Tab. 23 Redukční součinitel oceli za studena zpracovanou, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 24 Výsledky redukovaných vlastností prutové výztuže, *Vlastní zdroj*;

Tab. 25 Redukční součinitele pro beton, In: ČSN EN1994-1-2: *Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí. Obecná pravidla. Navrhování konstrukcí na účinky požáru*, ČSNI, Praha, 2006;

Tab. 26 Výsledky redukovaných vlastností pro beton, *Vlastní zdroj*;

Tab. 27 Výsledné napětí v betonu a tangentsvé modul pro dané poměrné přetvoření, *Vlastní zdroj*;

Tab. 28 Výsledné napětí v oceli, výztuži a tangentsvé modul pro dané poměrné přetvoření ($\epsilon = 0,0005$), *Vlastní zdroj*;

- Tab. 29 Hodnoty sil $N_{fi,cr}$ a $N_{fi,pl,Rd}$ v závislosti na poměrném přetvoření, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 30 únosnost sloupu pro dané požární zatížení, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 31 Míra zbytkové únosnosti sloupu pro dané požární zatížení, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 32 Tepelné vlastnosti nerezové oceli za zvýšené teploty, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 33 Zvolené profily s mírou zatížení a zjištěnou požární odolnost, Feng Chen - Fei-Yu Liao - Zhong Tao: *Fire performance of concrete filled stainless steel tubular columns*;
- Tab. 34 Minimální teploty průřezů pro R60, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 35 Minimální teploty průřezů pro R90, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 36 Minimální teploty průřezů pro R120, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 37 Minimální teploty průřezů pro R60, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 38 Minimální teploty průřezů pro R90, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 39 Minimální teploty průřezů pro R120, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 40 Pokles teploty v případě vystavení požáru z poloviny svého průřezu, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 41 Odchylka předpokládaných teplot od testovaných hodnot pro R60, R90, R120, *Vlastní zdroj*;
- Tab. 42 Odchylka tabulkových a výpočetních hodnot, *Vlastní zdroj*;
- Tab.43 Pokles teplot při částečně zahřátém průřezu, *Vlastní zdroj*;