

# POŽÁRNÍ ODOLNOST ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ A ZÓNOVÁ METODA PŘI NAVRHOVÁNÍ SLOUPŮ STRUCTURAL FIRE DESIGN OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS AND ZONE METHOD

LIBOR ŠVEJDA, PAVEL MAREK

Požadavky na požární bezpečnost tvoří důležitou součást předpisů pro stavební objekty v zemích EU a tedy i v České republice. Nové evropské normy do stavební praxe přinesly moderní, spolehlivější metody, jakými lze konstrukci na zatížení požárem posoudit. U konkrétního typu konstrukce s vyšší požadovanou požární odolností může být posudek na požár rozhodujícím návrhovým stavem. Posuzování současných novostaveb a rekonstrukcí pomocí obvykle užívaných tabelárních metod (ČSN, DIN nebo i EN) je často příliš konzervativní nebo není pro daný stavební dílec použitelné z důvodu nesplnění výchozích předpokladů (okrajové podmínky – např. výška sloupu větší než 3 m, výstřednost zatížení aj.). Požadovanou požární odolnost lze pak v těchto případech prokázat pouze za pomoci modernějších metod, dle ČSN EN 1992-1-2 např. zónovou metodou.

Fire resistance and safety are in EU countries and therefore also in the Czech Republic an important component of regulations for buildings. New European standards have brought progressive, reliable methods into construction profession, which allow assessment and design of structures under fire loads. A structural fire design of a particular construction with a higher required fire resistance could turn out to be

a decisive limited state. The assessment of contemporary new buildings and reconstructions with an aid of common tabular methods (i.e. ČSN, DIN or EN standards) seems to be rather conservative or is not applicable in terms of fulfillment of base assumptions (i.e. column higher than 3 m, load eccentricity, etc.). In these cases the required fire resistance can be designed and proved only by use of more progressive methods such as Zone method according to the standard ČSN EN 1992-1-2.

## HISTORIE POŽÁRNÍ LEGISLATIVY A SOUČASNÝ STAV

Vznik nejstaršího požárního řádu v Praze spadá do 14. století. První požární předpisy pro projektování budov byly v ČR uzákoněny v roce 1953. V roce 1977 byl zaveden kompletní požární kodex, který je reprezentován zejména normou ČSN 73 0810: Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení.

V průběhu 90. let 20. století jsou sepsány evropské normy, které jsou dále revidovány a zaváděny v podobě předběžných norem ENV. Od roku 2002 tyto normy přecházejí do soustavy norem EN. V současné době soustava ČSN obsahuje všechny normy EN pro posouzení požární návrhové situace včetně národních příloh. Souběžná platnost souboru národních norem ČSN 73 08xx a ČSN EN končí březnem 2010. V průběhu této doby bude možné na skutečných

konstrukcích objektivně porovnat výsledky požárních analýz a následně připravit revize národní přílohy.

Požární odolnost lze v souladu s evropskými normami ověřit na základě výpočtu pomocí tabulkových, zjednodušených nebo zdokonalených výpočetních metod.

Navrhování železobetonových konstrukcí na účinky požáru se týká zejména následujících norem:

- ČSN EN 1991-1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru (2005)
- ČSN EN 1992-1-2: Navrhování betonových konstrukcí – Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru (2006)

## TABELÁRNÍ METODY

Nejjednodušším způsobem pro ověření požární bezpečnosti je použít tabulkové údaje z ČSN EN 1992-1-2, které odpovídají ohřevu prvků podle normové teplotní křivky. Vzhledem k širokému použití tabulek, které nezahrnují mnohé fyzikálně-materiálové vlastnosti, jsou však výsledné hodnoty příliš konzervativní a neekonomické. Limitujícím faktorem tabulkových metod je také oblast jejich použití, která se u železobetonových sloupů váže na splnění tří základních podmínek:

- sloupy jsou masivní,
- vodorovně ztužené,
- zatížení nepřesahuje dovolenou výstřednost.



Obr. 1 Možné metody navrhování požární odolnosti dle ČSN EN 1992-1-2

Fig. 1 Methods of structural fire design according to the standard ČSN EN 1992-1-2

Obr. 2 Teplotně závislé pracovní diagramy betonu

Fig. 2 Stress-strain diagrams of concrete depending on temperature

Obr. 3 Teplotně závislé pracovní diagramy výztuže

Fig. 3 Stress-strain diagrams of reinforcement depending on temperature

V příloze C normy jsou dále uvedeny tabulkové hodnoty i pro štíhlé sloupy, avšak jejich použití je opět vázáno na podmínku vodorovného zabezpečení proti posunům a podmínku nepřekročení rozměru průřezu. Proto pro mnohé konstrukce, např. průmyslové haly s posuvnými styčníky, je třeba použít jiné, přesnější výpočtové metody.

Pro návrh požární odolnosti lze použít také starší ČSN 73 0821 (1973). S ohledem na odlišně nastavenou úroveň spolehlivosti souborů norem však kombinování původních Československých norem s Eurokódy nelze doporučit.

### PŘESNĚJŠÍ METODY

Část nové normy EN 1992-1-2, zabývající se požární odolností, umožňuje výpočet i neztužených sloupů. Výpočty tohoto typu nebyly ve stavební praxi doposud obvyklé. Vůbec poprvé umožňují termickou analýzu průřezu na základě teplotních profilů s účinky teploty dle tzv. normové teplotní křivky. V tomto smyslu se budeme v dalším zabývat tzv. zjednodušenou výpočetní metodou B2 pro železobetonové sloupy, namáhané mj. vysokými teplotami, která se rovněž označuje jako zónová metoda.

Tab. 1 Vliv teploty na fyzikální vlastnosti betonu

Tab. 1 Temperature influence on physical properties of concrete

Teplotní chování betonu	
100 °C	odpařování volné a částečně fyzikálně vázané vody » zvýšení $f_c$ , snížení $E_c$
100 až 400 °C	pevnost betonu v tlaku se příliš neliší od původní hodnoty
400 až 500 °C	v závislosti na použitém cementu uvolňování chemicky vázané vody (dehydratace hydroxidu vápenatého) » snížení $f_c$ , snížení $E_c$
< 500 °C	velmi krátkodobé působení teploty pevnost významně neovlivňuje
1600 °C	tavení betonu

### Vliv teploty na fyzikální vlastnosti oceli a betonu

Vliv teploty na fyzikální vlastnosti betonu uvádí tab. 1. Z hlediska statického návrhu železobetonového průřezu se projevuje posunem a zploštěním pracovního diagramu napětí – přetvoření (obr. 2).

Dalším významným činitelem tepelně-fyzikálních vlastností betonu je kamenivo, které se za vyšších teplot v závislosti na jeho druhu (hutné kamenivo: křemičité; lehké kamenivo: čediče, škvára, struska, expandované jíly, pemza, vápencové štěrky) projevuje odlišnými průběhy pevnostních a tepelných charakteristik.

Chování ocele betonářské výztuže je rovněž závislé na teplotě (obr. 3).

Překročením teploty 100 °C se navíc součinitele teplotní roztažnosti betonu a oceli významně odlišují a vzniká tak napětí vedoucí k možné ztrátě soudržnosti, odprýskávání krytí a boulení výztuže. Tyto rozdíly teplotní roztažnosti je možné částečně omezit volbou lehkého kameniva nebo vhodnými přísadami (polypropylenová vlákna).

### MECHANICKÉ ZATÍŽENÍ KONSTRUKCI BĚHEM POŽÁRU

U mechanických účinků se v případě požáru postupuje podle obecného pravidla pro mimořádnou návrhovou situaci (ČSN EN 1990)

$$E_{d,fi,t} = \sum \gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + A_d(t)$$

přičemž hodnoty kombinačních součinitelů  $\gamma$  jsou rovny 1,0, hodnoty součinitelů  $\psi$  stanovuje Národní příloha A  $A_d$  představuje vedlejší návrhový účinek požáru (např. vliv požáru okolních konstrukcí v požárním úseku).

Na straně spolehlivosti materiálů jsou všechny součinitele 1,0. Veškerá návrhová bezpečnost tedy spočívá v účinných zatíženích.

### TEPLOTNÍ ZATÍŽENÍ KONSTRUKCI BĚHEM POŽÁRU

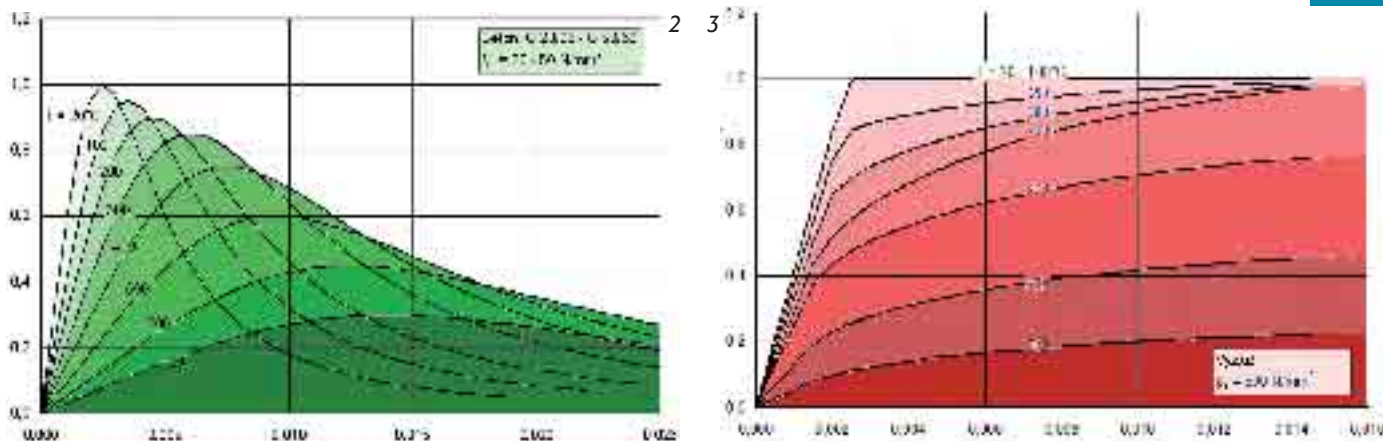
Teplotní zatížení se v případě zmíněných zjednodušených výpočetních metod uvažuje pomocí Normových teplotních křivek (NTK), které relativně konzervativním způsobem vyjadřují účinek přirozeného požáru (teplota závisí pouze na době požáru) a mají pro různé druhy hořavin a prostředí (pozemní stavby: zpravidla hoření tuhých látek, dále kapaliny, tunely aj.) odlišný průběh (obr. 4).

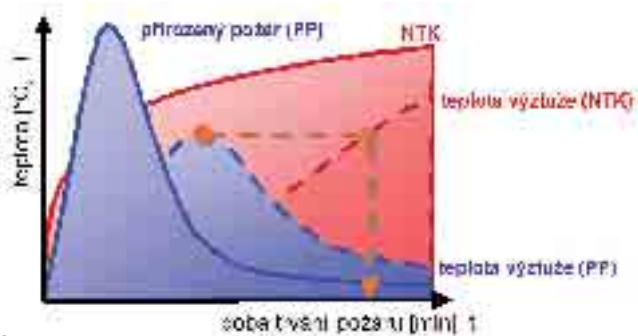
Teplotní účinek požáru se uvažuje po výšce sloupu konstantní. Z praktického hlediska lze proto návrh požární odolnosti vícepodlažního sloupu vést jako jednopodlažní.

Dalšími významnými teplotními vlivy, resp. výchozími předpoklady jsou:

- symetrie/asymetrie účinkům požáru: všestranné, jedno-, dvou- nebo třístranné ohoření,
- teploty dílců v intervalu 20 až 1 200 °C,
- rychlost ohřevu v intervalu 2 až 50 K/min, tj. neřeší případ exploze,
- teplota dílců je při požáru rostoucí.

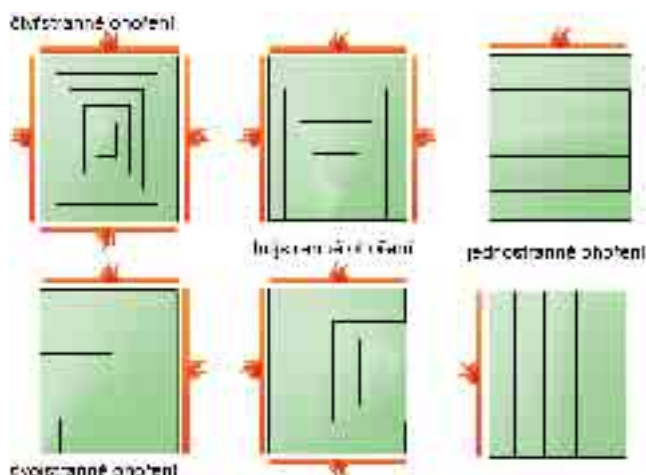
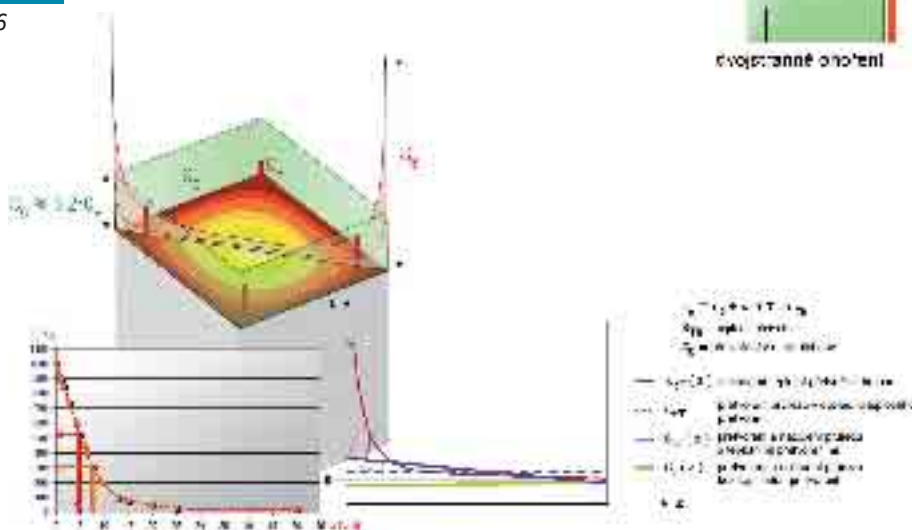
Průběh teploty v dílci (= průřezu) z dané NTK lze stanovit např. řešením Fourierových diferenciálních rovnic. V běžné stavební praxi lze využít teplotních profilů (izoterem) uváděných v příslušných normách a popř. zpřesněnými reálnými zkouškami.





4

6



5

Obr. 4 Příklad normových teplotních křivek pro hoření tuhých látek

Fig. 4 Standard temperature-time curve for fire of solid substances

Obr. 5 Příklad teplotních zón v průřezu

Fig. 5 Temperature profiles of cross sections

Obr. 6 Rozdílné teplotní roztahnosti betonu a výztuže vedou na vynucená přetvoření průřezu

Fig. 6 Different thermal elongations of concrete and reinforcement lead to induced strains

Software RIB BEST pracuje s normovou teplotní křivkou pro hoření tuhých látek, průběh teplot v průřezu stanovuje z normových teplotních profilů kalibrovaných výsledky praktických zkoušek institutu iBMB Technické univerzity v Braunschweigu.

#### POŠKOZENÁ POUVRCHOVÁ VRSTVA PRŮŘEZU

V povrchové vrstvě betonu vystavené účinkům požáru dochází k degradaci a ztrátě fyzikálních vlastností.

Hloubka této rozdrobené vrstvy se určí z průběhu teploty v průřezu. Z mechanického hlediska se jedná o redukci průřezu.

#### TEPLONĚ INDUKOVANÁ VYNUCENÁ PŘETVOŘENÍ

V kompozitním, tedy nehomogenním železobetonovém průřezu vznikají vynucená přetvoření (obr. 6) v důsledku

- různého teplotního protažení betonu a výztuže,
- vnějšího zamezení deformace (okrajové podmínky),
- nesymetrického vystavení účinkům požáru (teplotní zakřivení),

- zachování základní výchozí podmínky rovinnosti průřezu.

Tato vynucená přetvoření mají u nelineárních výpočtů neztužených sloupů velký vliv na jejich mechanické chování a nemohou být proto zanedbána. Velikost vlivu závisí zejména na teplotě výztuže, kterou lze zásadně ovlivnit krytím.

#### NÁVRH ÚNOSNOSTI ŽELEZOBETONOVÝCH SLOUPŮ DLE EN 1992-1-1 PŘI POŽÁRU

Z výše uvedeného lze sestavit následující schematický postup pro návrh únosnosti průřezů a vzpěrné stability železobetonového sloupu při požární návrhové situaci:

- návrh sloupu probíhá po výšce v  $m$  kontrolních průřezích,
- kontrolní průřez se rozdělí na  $n$  ekvidistantních zón,
- z NTK a teplotních profilů se určí průběh teploty v každém průřezu, ze kterého se pak dále stanovuje:
  - teplota v těžišti výztuže,
  - průměrná teplota tlacené zóny betonu,
  - šířka poškozené zóny vysokou teplotou,
- výpočet redukovaných průřezových

charakteristik pro teplotně poškozené průřezy,

- pro každý typ průřezu a každou zónu se přiřadí: teplotně závislé pracovní diagramy  $\sigma-\epsilon$  betonu a výztuže,
- přetvoření v tlacené oblasti se omezí hodnotou  $\epsilon_{cT}(T)$ , v tažené oblasti  $\epsilon_s(T)$ ,
- dílčí součinitel spolehlivosti materiálu  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ ,
- dlouhodobý součinitel betonu  $\alpha_{cc} = 1,0$ ,
- mimořádná návrhová kombinace  $\gamma_{GA} = \gamma_{QA} = 1,0$ ,
- u neztužených sloupů se současně zohledňují vynucená přetvoření z teplotních deformací a nepřímé účinky požáru.

Pokud se tedy vyskytují u jednoho sloupu různé průřezy nebo různá krytí výztuže, pak tyto průřezy mají ve svých jednotlivých zónách i různé pracovní diagramy napětí – přetvoření.

Návrh železobetonového sloupu na požadovanou požární odolnost zónovou metodou lze tedy realizovat vhodnými úpravami standardního algoritmu materiálové a geometricky nelineárního výpočtu a návrhu únosnosti a vzpěrné stability železobetonového sloupu za běž-



ných teplot. Jeho možné iterativní schéma zobrazuje obr. 7.

Modifikace algoritmu pro návrh požární odolnosti pak spočívá v úvodní teplotní analýze a dále v redukci průřezů, stanovení teplotních deformací a přetvoření, modifikaci pracovních diagramů dosažením příslušných kombinačních součinitelů a součinitelů spolehlivosti (obr. 8).

**PŘÍKLAD VÝPOČTU NEZTUŽENÉHO SLOUPU**

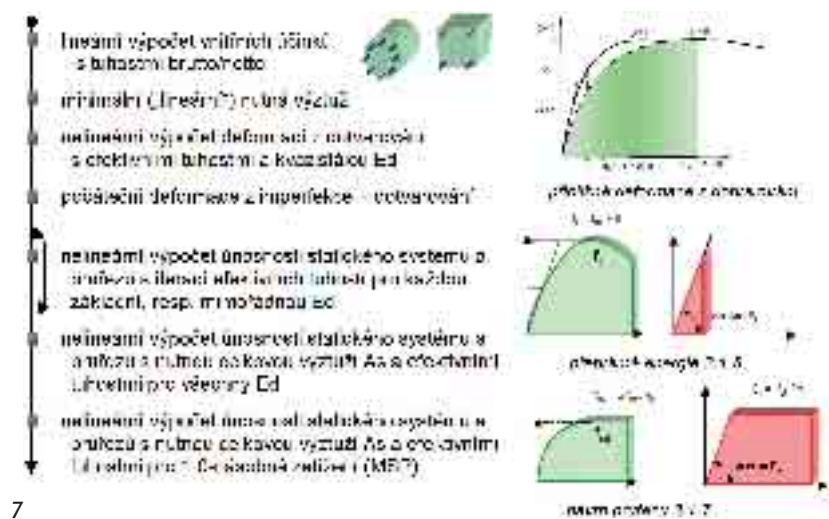
Jako praktický příklad výpočtu uvádíme reálnou konstrukci inženýrské kanceláře Zilch+Müller, Mnichov, SRN. Jedná se o vnitřní, samostatně stojící, neztužený železobetonový sloup s průřezem 400 x 400 mm, 4,5 m vysoký, beton C30/37, třída prostředí XC1, výztuž B500N. Uvažuje se symetrický účinek požáru pro požadovanou odolnost R 90.

Vstupní parametry návrhu požární odolnosti jsou:

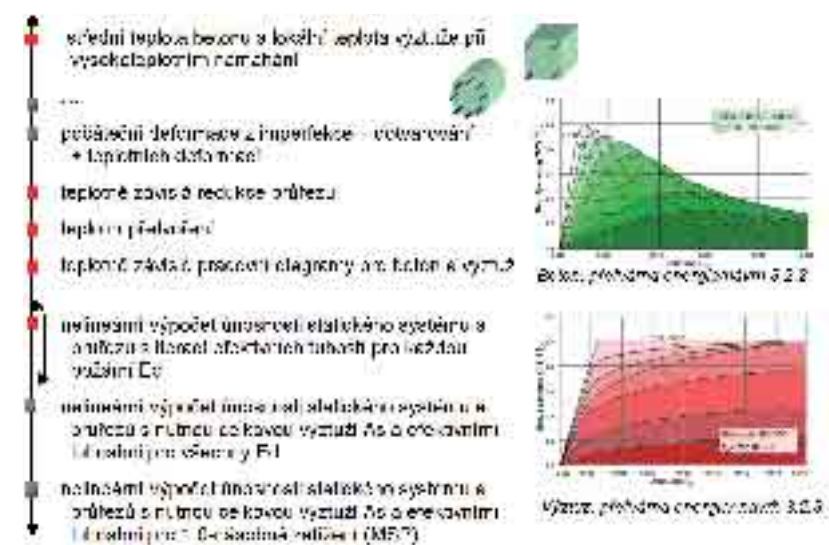
- požadovaná třída požární odolnosti,
- druh kameniva betonu,
- způsob výroby výztuže,
- počet stran vystavených účinkům požáru.

Úvodní teplotní analýzou byla zjištěna průměrná teplota betonu 241 °C a průměrná teplota výztuže 525 °C (obr. 10).

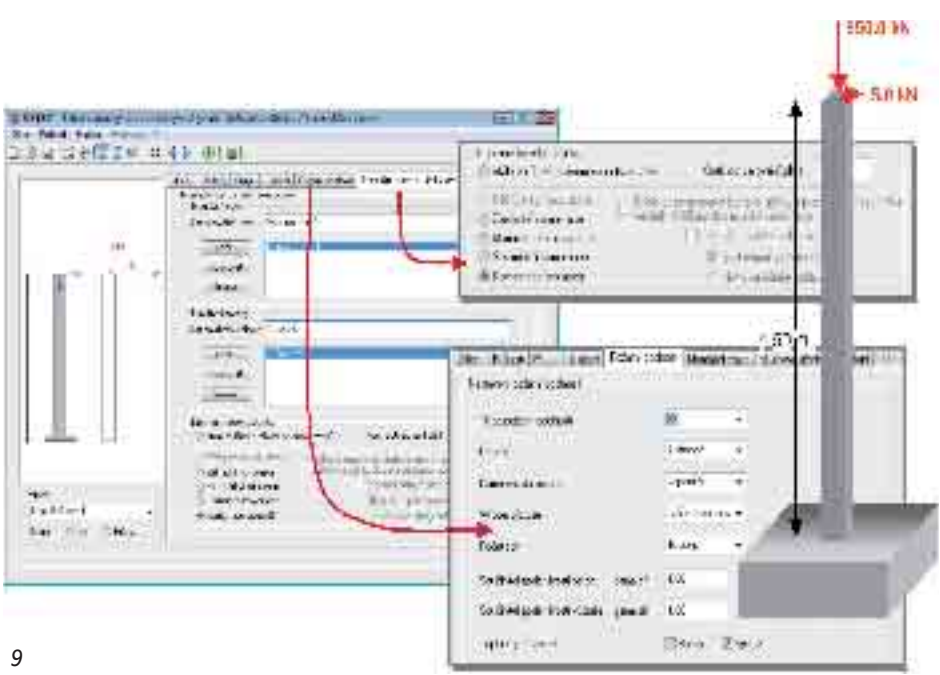
Dosažené výsledky, resp. provedená parametrická studie, ukazují v tab. 2 značný rozptyl staticky nutné výztuže, a to jmenovitě v závislosti na druhu použitého kameniva, zohlednění/nezohlednění vlivu teplotních přetvoření a způsobu tváření betonářské výztuže. Nutná výztuž  $A_s = 1\ 560\ \text{mm}^2$  vyplývající z běžného návrhu na MSÚ pro Základní kombinaci je 4x nižší, než reálné provedení sloupu s  $A_s = 6\ 390\ \text{mm}^2$  pro požadovanou třídu požární odolnosti R 90.



7



8



9

Obr. 7 Postup nelineárního výpočtu ŽB sloupu za běžných teplot

Fig. 7 Procedure of a non-linear analysis of reinforced concrete columns under normal temperature

Obr. 8 Modifikace algoritmu pro návrh požární odolnosti

Fig. 8 Modified procedure in case of structural fire design

Obr. 9 Příklad výpočtu neztuženého sloupu

Fig. 9 Structural fire design of an unbraced column

**Materiál při běžné teplotě**

Parametr	Symbol	Uč. hodnota	Uč. hodnota	Uč. hodnota
Teplotní roztažnost	$\alpha$	10,0 K/mK	10,0 K/mK	10,0 K/mK
Výztuž	$A_s$	200 kN/m <sup>2</sup>	200 kN/m <sup>2</sup>	200 kN/m <sup>2</sup>

**Teplotní materiálové parametry při běžné teplotě**

Teplotní	Spec. teplo	Suchá hustota	Emise	Vlhkost	Souř. vodivost
Uč. hodnota	J/kg K	kg/m <sup>3</sup>	-	Max. %	10-6 m <sup>2</sup> /s
2,00	900	2100	0,10	< 4	0,90

**Teplotní analýza dle EN 1992-1-2 pro NTK 90 pro Tg=1000°C**

Uč. hodnota	Průměrná teplota	Podkovová	Os. křivka	Osofoni
10	241	181	1,16	1,00

**Materiál pod vysokou teplotou pro NTK 90**

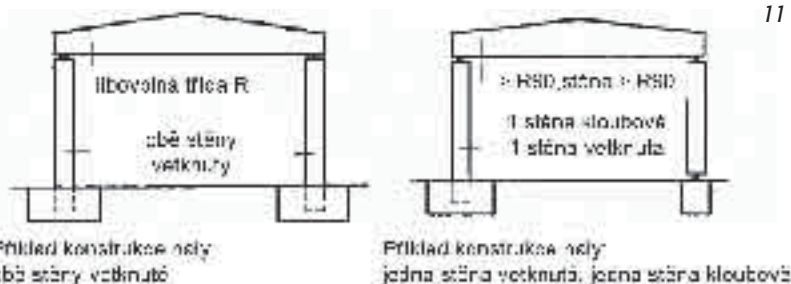
Parametr	Symbol	Uč. hodnota	Uč. hodnota
Teplotní roztažnost	$\alpha$	10,0 K/mK	10,0 K/mK
Výztuž	$A_s$	200 kN/m <sup>2</sup>	200 kN/m <sup>2</sup>

**Teplotní analýza dle EN 1992-1-2 (bez automatického zohlednění zkrácení)**

Uč. hodnota	Průměrná teplota	Podkovová	Os. křivka	Osofoni
10	241	181	1,16	1,00

10

Obr. 10 Protokol teplotní analýzy  
Fig. 10 Printout of thermal analysis



11

Obr. 11 Vliv konstrukčního uspořádání na posuzování požární odolnosti  
Fig. 11 Impact of a constructional constellation on the structural fire design

Tab. 2 Přehled výsledků nutné výztuže  $A_s$  pro R 90 pro různé parametry zadání  
Tab. 2 Results of required reinforcement for R 90 with various input parameters

■ Uvedené hodnoty ( ) bez vlivu teplotního přetvoření výztuže		
■ Uvedené s vlivem teplotního přetvoření		
teplotní analýza	výztuž	beton
teplota [°C]	525	241
výztuž [mm <sup>2</sup> ]	výztuž tvář. za tepla	výztuž tvář. za studena
vápenité kamenivo	6800 (3950)	6240 (4050)
křemičité kamenivo	6950 (4480)	6450 (4590)
teplotní přetvoření [%]	výztuž	beton
vápenité kamenivo	5,64	1,52
křemičité kamenivo	4,85	2,31

- nutná výztuž z běžného návrhu na MSÚ  $A_s = 1560 \text{ m}^2$
- stavebně provedené vyztužení  $A_s = 6390 \text{ m}^2$  (4 x 28 mm + 8 x 25 mm)

**ZÁVĚR A DOPORUČENÍ**

Uvedený praktický příklad ukazuje, že návrh na požadovanou požární odolnost může být pro konkrétní stavební dílec rozhodujícím mezním stavem, přičemž navýšení staticky nutné výztuže  $A_s$  může být podstatné. Možnosti úspory výztuže z hlediska požární odolnosti spočívají zejména

- ve zvýšení krytí výztuže,
- v rozkladu jednotlivých rohových prutů na skupinu více prutů s menším průměrem, čímž současně dojde k posuvu těžiště směrem dovnitř sloupu,
- v použití vápenitého kameniva u běžných betonů a čedičového kameniva u vysokopevnostních betonů,
- ve zvětšení průřezu,
- v aplikaci vhodných příměsí do betonu snižujících teplotní vodivost a riziko oprýskávání,
- v použití speciálních protipožárních nátěrů a opláštění, které z výpočetního hlediska požární odolnosti navyšuje vrstvu krytí.

Při hodnocení požární odolnosti stavebních objektů zpravidla postačuje posouzení jednotlivých konstrukčních dílců, současně je však nutné uvážit jejich vzájemné spolupůsobení, jak názorně demonstuje obr. 11.

Obvyklý funkční rozsah softwaru nabízí návrh a posouzení požární odolnosti tabelárními metodami volitelně dle EN 1992-1-2, tab. 5.2a nebo dle DIN 1045-1, tab. 31. Tyto tabelární metody jsou použitelné pouze pro ztužené sloupy, vedou ke konzervativním výsledkům a jsou významně limitovány rozměry sloupu. Volitelné funkční rozšíření softwaru RIB BEST o zónovou metodu umožňuje v souladu s Eurokódý návrh požární odolnosti ztužených i neztužených železobetonových sloupů moderní výpočetní metodou a bez zmíněných, omezujících podmínek.

Ing. Libor Švejda  
RIB stavební software, s. r. o.  
Zelený pruh 1560/99, 140 00 Praha 4  
tel.: 241 442 078, 608 953 721  
fax: 241 442 085  
email: info@rib.cz, www.rib.cz

Ing. Pavel Marek  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6  
e-mail: pavel.marek@fsv.cvut.cz