

*České vysoké učení technické v Praze*

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

## **Diplomová práce**

# **POSUZOVÁNÍ POŽÁRNÍ ODOLNOSTI BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ S VYUŽITÍM RŮZNÝCH MODELŮ POŽÁRU**

**ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF CONCRETE STRUCTURES WITH  
THE USE OF DIFFERENT FIRE MODELS**

Bc. Tomáš Lánský

vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Praha, 2019

# Zadání



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta stavební  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Lánský	Jméno: Tomáš	Osobní číslo: 412632
Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Posuzování požární odolnosti betonových konstrukcí s využitím různých modelů požáru	
Název diplomové práce anglicky: Assessment of Fire Resistance of Concrete Structures with the Use of Different Fire Models	
Pokyny pro vypracování: Rešerše literatury. Parametrická studie vlivu modelu požáru. Vyhodnocení. Závěr.	
Seznam doporučené literatury: ČSN EN 1992-1-2. Navrhování betonových konstrukcí - část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČNI, 2009. Fire design of concrete structures - materials, structures and modeling (Bulletin 38). Lausanne: fib, 2007. Procházka, Jaroslav, a další. Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru. Praha: ČVUT, 2010. Kučera, Petr. Požární inženýrství: dynamika požáru. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009.	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 10. 10. 2018	Termín odevzdání diplomové práce: 6. 1. 2019 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

10. 10. 2018	Podpis studenta(ky)
Datum převzetí zadání	

---

## **Prohlášení:**

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

V Praze, dne 6. ledna 2019

.....

podpis

---

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Radku Štefanovi, Ph.D. a Ing. Martinu Benýškovi za poskytnuté odborné konzultace a také za ochotu a trpělivost. V neposlední řadě patří velké díky mé rodině za podporu v těch nejtěžších chvílích a za to, že mně bylo umožněno studovat na vysoké škole.

---

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá modelováním požáru a modelováním železobetonových konstrukcí vystavených účinkům požáru. V první části je popsán požár, modely požáru a fyzikální jevy s tím spojené. Druhá část řeší příklad posouzení požární odolnosti železobetonové desky pro případ použití různých modelů požáru. V závěru praktické části jsou porovnány výsledky, tak aby byl vidět vliv volby modelu požáru na výslednou požární odolnost železobetonové desky.

### **Klíčová slova**

požární odolnost; modely požáru; betonové konstrukce; železobetonová deska; únosnost

## **Abstract**

This thesis deals with the design of fire models and fire design of concrete structures. The first part describes fire models and the second part deals with the assessment of fire resistance of the reinforced concrete slab with the use of different fire models. Conclusion of the second part compares results in the way to display influence of the fire model selection on the ultimate fire resistance of the reinforced concrete slab.

### **Keywords**

fire resistance; fire models; concrete structures; reinforced concrete slab; load capacity

---

# Obsah

ZADÁNÍ .....	I
PROHLÁŠENÍ: .....	II
PODĚKOVÁNÍ .....	III
ABSTRAKT .....	IV
ABSTRACT .....	IV
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	VII
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
MOTIVACE: .....	1
<b>2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ .....</b>	<b>2</b>
2.1 PROCES HOŘENÍ.....	2
2.2 SDÍLENÍ TEPLA .....	2
2.3 POŽÁR V UZAVŘENÉM PROSTORU .....	5
2.4 MODELOVÁNÍ POŽÁRU V UZAVŘENÉM PROSTORU .....	8
2.4.1 <i>Nominální teplotní křivky</i> .....	9
2.4.2 <i>Přirozené modely požáru</i> .....	11
2.4.3 <i>Stanovení rychlosti uvolňování tepla</i> .....	14
2.5 TEPLTNÍ ANALÝZA KONSTRUKCE .....	17
2.5.1 <i>Čistý tepelný tok</i> .....	17
2.5.2 <i>Vedení tepla</i> .....	19
2.6 NÁVRH ŽB KONSTRUKCE ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT .....	20
2.6.1 <i>Mechanické zatížení při požární situaci</i> .....	20
2.6.2 <i>Materiálové vlastnosti za požární situace</i> .....	21
2.6.3 <i>Návrhové metody</i> .....	21
2.6.4 <i>Zjednodušené výpočtové metody</i> .....	23
<b>3 PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>26</b>
3.1 POPIS MODELOVANÝCH POŽÁRNÍCH ÚSEKŮ .....	26
3.2 POSOUZENÍ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY ZA BĚŽNÉ TEPLoty .....	28
3.2.1 <i>Vnitřní síly za běžné teploty</i> .....	28
3.2.2 <i>Geometrie průřezu a materiálové vlastnosti za běžné teploty</i> .....	29
3.2.3 <i>Posouzení momentu únosnosti za běžné teploty</i> .....	31
3.3 TEPLota PLYNU V POSUZOVANÝCH POŽÁRNÍCH ÚSECÍCH .....	32
3.3.1 <i>Normová teplotní křivka</i> .....	32
3.3.2 <i>Parametrická teplotní křivka</i> .....	32
3.3.3 <i>Dvouzónové modely</i> .....	35
3.4 TEPLota V OSE VÝZTUŽE DLE RŮZNÝCH MODELŮ POŽÁRU .....	38
3.4.1 <i>Průběh teploty v ose výztužných prutů dle normové teplotní křivky</i> .....	41
3.4.2 <i>Průběh teploty v ose výztužných prutů dle parametrické teplotní křivky</i> .....	42
3.4.3 <i>Teploty v ose výztužných prutů dle dvouzónového modelu</i> .....	42
3.5 POSOUZENÍ POŽÁRNÍ ODOLNOSTI PROSTĚ PODEPŘENÉ DESKY PRO RŮZNÉ MODELy POŽÁRU .....	44
3.5.1 <i>Vnitřní síly za požární situace</i> .....	44
3.5.2 <i>Výpočet průběhu momentu únosnosti požáru metodou izotermy 500 °C</i> .....	45
<b>4 ZÁVĚR.....</b>	<b>49</b>
<b>5 PŘÍLOHA PŘEHLEDNÉHO SHRnutí VÝSLEDKŮ PRO OBĚ VARIANTY KRYTÍ HLAVNÍ NOSNÉ VÝZTUŽE.....</b>	<b>51</b>

---

5.1	VÝSLEDKY PRO KRYTÍ C=15 MM .....	51
5.2	VÝSLEDKY PRO KRYTÍ C=25 MM .....	52
<b>6</b>	<b>SEZNAMY OBRÁZKŮ A TABULEK .....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURA.....</b>	<b>56</b>

---

## Seznam použitých zkratk

tl.	Tloušťka
PO	Požární odolnost
PÚ	Požární úsek
ŽB	Železobeton
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
RHR (HRR)	Rate of Heat Release (Heat Release Rate) – Rychlost rozvoje požaru



# 1 Úvod

V dnešní době se požadavky na požární bezpečnost staveb stále zvyšují, navíc dochází k realizaci složitějších staveb z hlediska všech stavebních oborů včetně požární bezpečnosti. Tyto okolnosti mohou vést mimo jiné k vyššímu požadavku na požární odolnost nosných železobetonových konstrukcí. Při posuzování požární odolnosti těchto konstrukcí je zásadní právě volba modelu požáru, ze které vychází jak rozložení a nárůst teploty plynů v daném požárním úseku, tak rozložení teploty v samotné železobetonové konstrukci. Tyto průběhy teplot pak přímo ovlivňují únosnost konstrukce v průběhu požáru.

Mezi modely požáru, které se pro posuzování požární odolnosti konstrukcí používají nejčastěji, patří především normová teplotní křivka, podle které jsou stanoveny i tabulkové hodnoty požárních odolností uvedené v českých technických normách. Normová teplotní křivka patří mezi nominální teplotní křivky, do kterých vstupuje jako proměnná pouze čas. Dalšími možnostmi, jak určit průběh teploty v uzavřeném prostoru, je využití zjednodušených modelů, mezi které se řadí například parametrická teplotní křivka v případě prostorového požáru a dvě metody pro případ lokalizovaného požáru. V současnosti však začínají hrát významnou roli především komplexní počítačové modely zónové a CFD modely (Computational Fluid Dynamics), které jsou založeny na principu dynamického proudění tekutin.

## **Motivace:**

Některé modely požáru jsou mezi odbornou veřejností považovány jako konzervativní a u jiných se předpokládá dosažení výsledků, které lépe zastupují průběh skutečného požáru. Motivací této práce je bližší seznámení s modely požáru, způsoby posuzování konstrukce při požáru a jejich kombinacemi. Lze dosáhnout ekonomičtějšího a zároveň bezpečného návrhu nosné železobetonové konstrukce použitím přesnějšího modelování požáru? Odpovědí by mělo být zjištění, v jaké míře a jakým způsobem je ovlivněna vypočtená požární odolnost železobetonové konstrukce právě tím, jaký model požáru byl zvolen.

## 2 Současný stav poznání

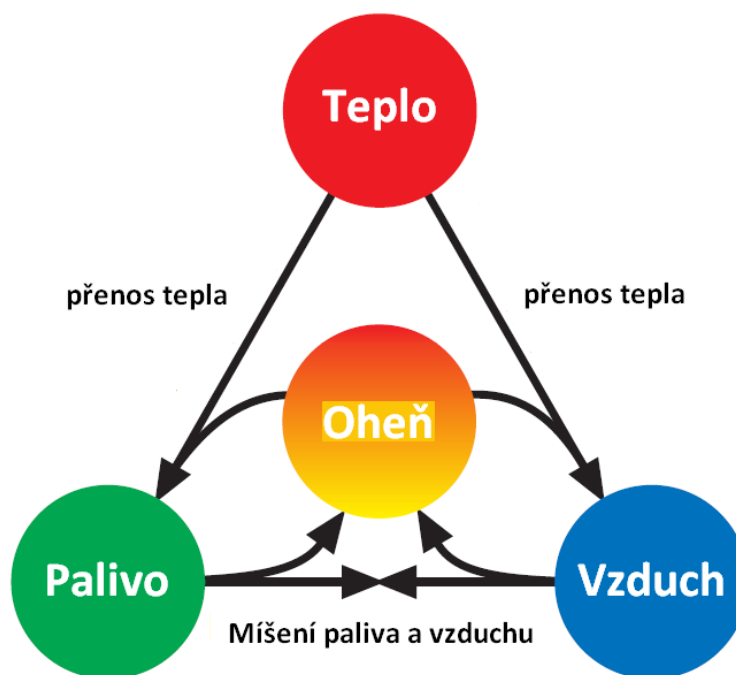
Pro návrh nosné konstrukce zatížené požárem je nejprve potřeba znát průběh teploty v požárním úseku a vývoj teploty v konstrukci samotné. Tato kapitola popisuje fyzikální a matematické zákonitosti a postupy s tímto spojené.

### 2.1 Proces hoření

Hoření je fyzikálně chemická oxidační reakce, při které hořlavá látka reaguje vysokou rychlostí s oxidačním prostředkem za vzniku energie ve formě tepla a světla (1).

K tomu, aby došlo k hoření, a tedy i ke vzniku požáru je nutná přítomnost tří činitelů, které dohromady tvoří tzv. „trojúhelník hoření“:

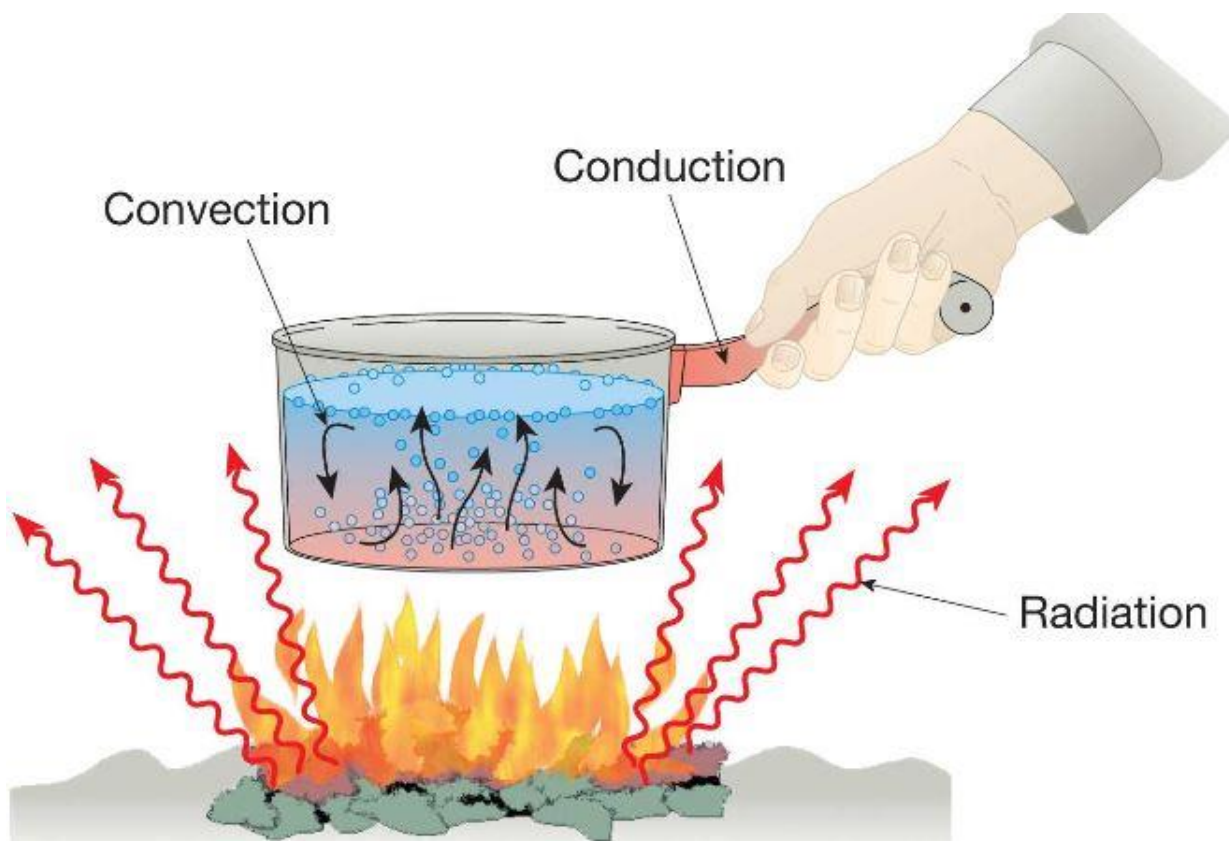
- hořlavé látky
- oxidačního prostředku
- zdroje zapálení s dostatečným množstvím energie a vysokou teplotou



Obr. 1 Trojúhelník hoření (1)

### 2.2 Sdílení tepla

Teplota charakterizuje okamžitý tepelný stav látky. Teplotní rozdíly v tělesech nebo mezi tělesy se v průběhu času neustále vyrovnávají tak, že se teplo sděluje z míst s vyšší okamžitou teplotou do míst s nižší teplotou. Tepelná rovnováha nevyžaduje, aby se současně vyrovnávaly i tlaky nebo jiné fyzikální parametry (2).



Obr. 2 formy sdílení tepla (3)

Přenos energie ve formě tepla probíhá třemi základními způsoby (3):

- Vedením (kondukcí)
- Prouděním (konvekci)
- Sáláním (radiací)

**Vedení** je charakteristický způsob sdílení tepla především pro pevné látky, v menším měřítku probíhá ovšem i v kapalinách a plynech. Nemá-li v celém rozsahu látka stejnou teplotu, dochází při molekulárním pohybu k vzájemnému sdělování pohybu elementárních částic a tím k vyrovnávání jejich kinetické energie. Tento proces se pak jeví jako sdílení tepla z míst o vyšší teplotě do míst o nižší teplotě (2).

Z pohledu požární bezpečnosti je tento jev významný především při teplotní analýze konstrukčních prvků. Zde je nutné řešit zároveň problematiku přestupu tepla (viz. kap. 2.5.1.1)

Základním zákonem vedení tepla v konstrukci je Fourierův zákon udávající vztah mezi hustotou tepelného toku a teplotním gradientem (4):

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t$$

kde:

- $q$  ... hustota tepelného toku [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $\lambda$  ... součinitel tepelné vodivosti (materiálová charakteristika) [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]
- $\text{grad } t$  ... teplotní gradient [ $\text{K}/\text{m}$ ]

Pro ustálené vedení tepla rovinou konstrukcí s rozdílnou teplotou povrchů (např. stěna ohřátá z jedné strany) lze z předešlé rovnice odvodit vztah (4):

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta\theta}{d} \cdot S \cdot \tau$$

kde:

- $Q$  ... množství tepla prošlé vrstvou [ $\text{J}$ ]
- $\lambda$  ... součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]
- $\Delta\theta$  ... rozdíl teplot povrchů [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $d$  ... tloušťka [ $\text{m}$ ]
- $S$  ... plocha [ $\text{m}^2$ ]
- $\tau$  ... čas [ $\text{s}$ ]

**Prouděním** se teplo přenáší v kapalinách a plynech díky pohybu makroskopických částic, z nichž každá obsahuje velký počet molekul, které teplo přenášejí. Sdílení tepla mezi jednotlivými částicemi se pak děje vedením. I když se jedná, o kombinovaný způsob sdílení tepla vedením a prouděním nazýváme ho sdílení tepla prouděním (2).

Tato forma sdílení tepla je důležitým faktorem při šíření plamenů, kouře a horkých plynů. Jedná se o jev potřebný k teplotní analýze požárního úseku (3).

**Sálání** je v podstatě elektromagnetické vlnění v určitém rozsahu vlnových délek. Sálání mezi dvěma tělesy je velmi složitým procesem, který sestává z vyzařování, pohlcování i propouštění energie. Uskutečňuje se i tehdy, když prostor mezi tělesy není vyplněn žádnou látkou (2).

Energie vyzařovaná tělesem prudce vzrůstá s jeho teplotou. Stefan-Boltzmannův zákon vyjadřuje intenzitu vyzařování jako (4):

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \theta$$

kde:

- $E$  ...intenzita vyzařování [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $\varepsilon$  ...experimentálně určený emisní součinitel
- $\sigma$  ...Stefan-Boltzmannova konstanta  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$

V případě požáru je sálání velmi podstatným faktorem, neboť se jedná o hlavní mechanismus sdílení tepla mezi plameny a povrchy okolních těles, mezi horkými plyny a stavebními konstrukcemi a mezi hořícími budovami a sousedními objekty (3).

### 2.3 Požár v uzavřeném prostoru

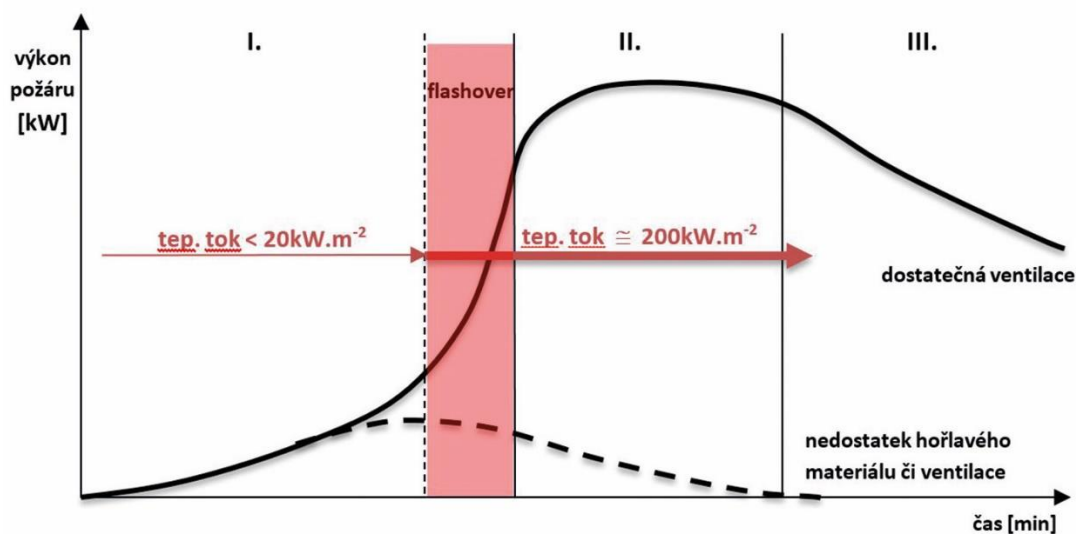
Požáry v uzavřených prostorech jsou specifické z pohledu sdílení tepla. Vznikající teplo neuniká zcela do okolní atmosféry, ale jeho významná část snižena o ztráty (teplo spotřebované na ohřev stavebních konstrukcí či teplo odvedené ve formě kouřových plynů) se postupně kumuluje v místnosti a dále působí na okolní hořlavé látky, které postupně zahřívá a připravuje je tak k hoření. (5)

Po zahoření některého z předmětů v místnosti (vzniku lokálního požáru) mohou následně nastat v celku tři různé scénáře (6):

- I. Nedojde k rozšíření požáru, zapálený prvek shoří bez toho, aniž by došlo k hoření okolních předmětů nebo konstrukcí.
- II. Pokud jsou nevhodné podmínky ventilace (nedostatečný přístup kyslíku v souvislosti s požárem), může mít požár samozhášivou funkci, nebo pokračovat v hoření v malé míře. V těchto případech může při znovu zpřístupnění kyslíku dojít k tzv. „*backdraught*“ efektu.
- III. V případě, že je dostatek hořlavého materiálu a je umožněn přístup kyslíku, přechází požár do prostorového vzplanutí „*flashover*“..

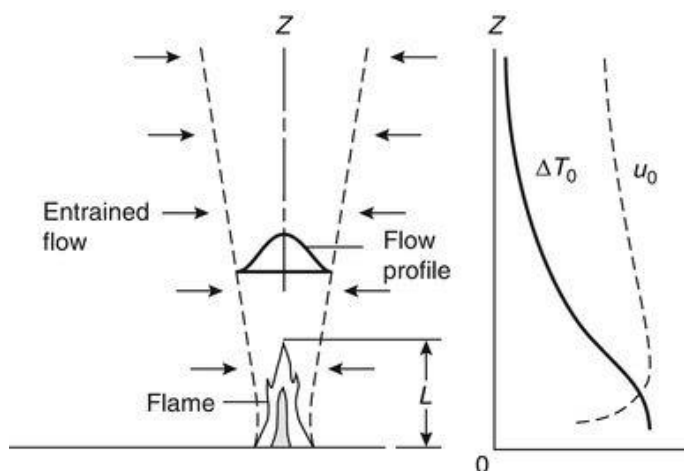
Proces rozvoje požáru při předpokladu, že dojde k flashover efektu, je možné rozdělit do tří charakteristických fází (5):

- I. Fáze rozvoje,
- II. Plně rozvinutý požár,
- III. Fáze dohořívání.



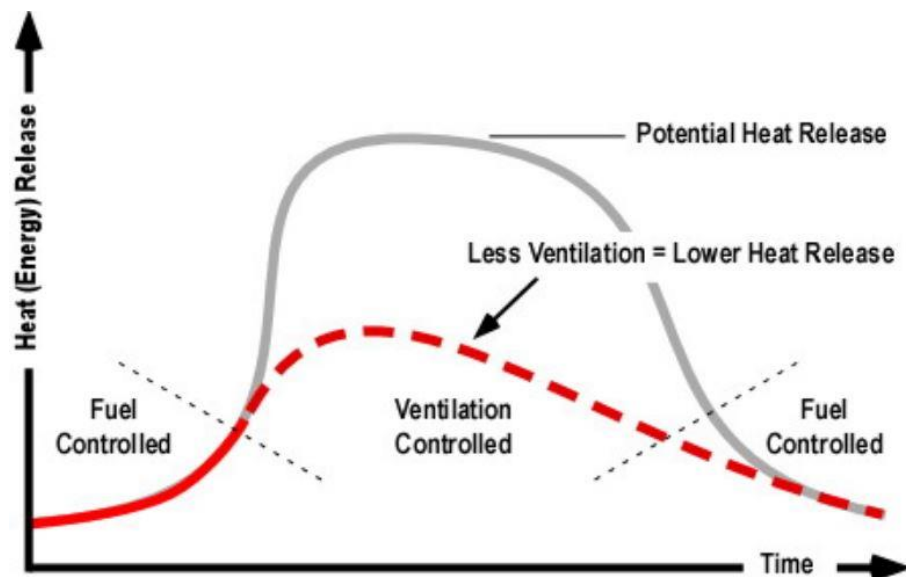
Obr. 3 rozvoj požáru v uzavřeném prostoru (7)

**Fáze rozvoje** – po iniciaci se požár rozrůstá a produkuje stále větší množství energie. Postupně dochází ke zvyšování teploty produktů hoření a snižování jejich hustoty, což má za následek nárůst teplotní diference a vzniku vztlaku. Nad hořícím materiálem se formuje sloupec horkých plynů tzv. fire plume (viz. Obr. 4). Sloupec zplodin postupně stoupá až na úroveň stropu, kde se začne rozprostírat až k ohraničujícím stavebním konstrukcím. Díky takto vzniklému proudění je do horkého kouře přísáván chladnější vzduch, což způsobuje další zvětšování objemu. Dochází k ochlazení kouře v důsledku odvodu tepla do ohraničujících konstrukcí, k tepelné radiaci z kouře a také k jeho ředění přiváděným vzduchem. Poté, co kouřové plyny dosáhnou stavebních konstrukcí, tak vytvářejí vrstvu kouře, která postupně klesá k podlaze a vytváří tzv. neutrální rovinu. Protože dochází k ustálení hmotnostního úbytku na jednotku hořlavého materiálu, požár začíná být limitován pouze dostupností kyslíku (8) (9).



Obr. 4 Fire plume (9)

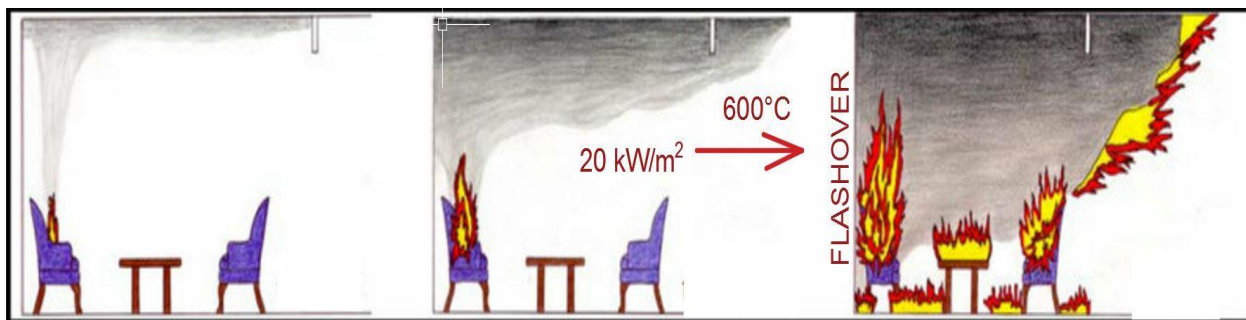
**Plně rozvinutý požár** za daných podmínek dosahuje maximální rychlosti odhořívání pevných a kapalných hořlavých látek, hodnota tepelného toku může dosahovat hodnot až  $200 \text{ kW/m}^2$ , teplota v místnosti až  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ . V této fázi může být intenzita hoření řízena buď dostupným palivem nebo existujícím větráním. Pro posuzování požární odolnosti stavebních konstrukcí je právě tato fáze stěžejní (5) (8).



Obr. 5 Požár řízený palivem nebo ventilací (10)

**Fáze dohořívání** – Rychlost odhořívání a intenzita požáru postupně klesá, dochází k dohořívání tlejících a žhnoucích částí hořlavých materiálů. Za počátek této fáze se obvykle bere okamžik, kdy dojde k vyhoření 70 % dostupného paliva. Pokud byl požár řízený odvětráním, přechází postupně do požáru řízeného palivem (5) (8).

**Flashover** – Nastává, pokud požáru vystavené povrchy hořlavých těles dosáhnou teploty zapálení a požár se rozšiřuje rychle do prostoru. Hlavní příčinou tohoto jevu je současné zahřátí všech hořlavých hmot v místnosti zplodinami hoření na takovou teplotu, při níž uvolňují ze svého objemu hořlavé plyny a páry. Tento efekt nastává při přechodu mezi fází rozvoje požáru a fází plně rozvinutého požáru, zpravidla překročí-li vrstva kouře teplotu  $500$  až  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  nebo dojde-li na úrovni podlahy k tepelnému toku větší než  $20 \text{ kW.m}^{-2}$ . Tento okamžik se chování požáru výrazně mění. Proudění vzduchu a plyných spalin se stává velmi neuspořádaným (8). Na vznik flashover efektu mají vliv dva hlavní faktory. Za prvé, palivo musí mít dostatečnou tepelnou energii pro vytvoření podmínek flashover efektu. Za druhé, podmínky ventilace musejí být takové, aby byl zajištěn dostatečný přístup vzduchu. (11).



Obr. 6 flashover (12)

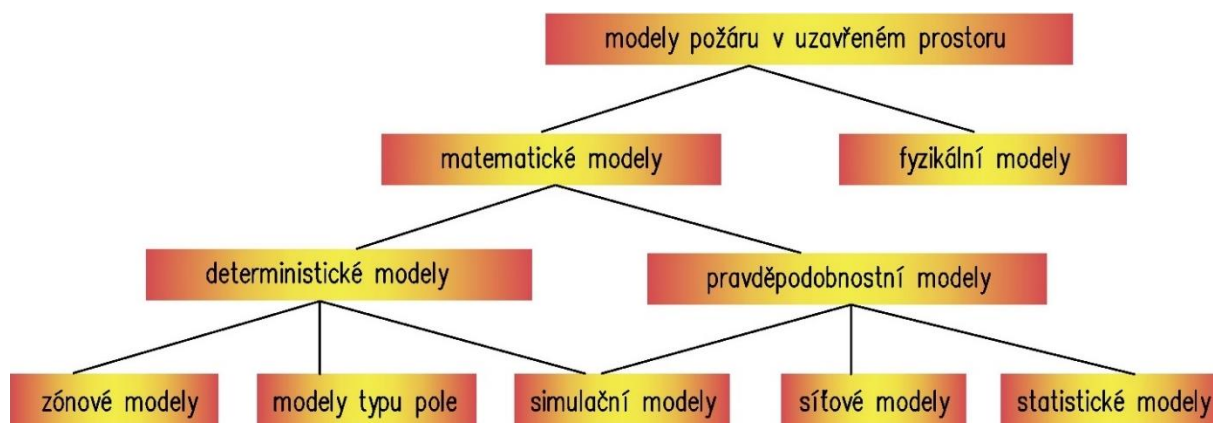
## 2.4 Modelování požáru v uzavřeném prostoru

Pro posouzení konstrukce za požáru je nutné postupně řešit tři základní kapitoly, jako první je potřeba stanovit teplotní analýzu požárního úseku viz. Tab. 1.

Tab. 1 Návrh požární odolnosti konstrukce (7)

postup	Vstupy	Návrh požární odolnosti konstrukce	Normy
1.	Požární zatížení Geometrie požárního úseku Charakteristiky hoření	<b>Teplotní analýza požárního úseku</b>	EN 1991-1-2
2.	Geometrie prvků Termální vlastnosti Součinitel přestupu tepla	<b>Přestup a vedení tepla v konstrukci</b>	EN 199x-1-2
3.	Mechanické zatížení Geometrie prvků Uložení prvků (spoje) Mechanické vlastnosti	<b>Návrh konstrukce za zvýšených teplot</b>	

Modely požáru v uzavřeném prostoru lze rozdělit do dvou základních skupin: *fyzikální modely* a *matematické modely*.



Obr. 7 Přehled modelů požáru v uzavřeném prostoru



Smyslem *fyzikálních modelů* požáru je napodobení požáru za zjednodušených fyzikálních podmínek. Rozměry těchto modelů jsou velmi rozmanité. Velkorozměrové zkoušky se sice blíží průběhu požáru v reálných podmínkách, avšak jejich nevýhodou je značná náročnost a složitost při sestavování a v neposlední řadě pak jejich cena, což může být příčinou jejich neproveditelnost. *Matematické modely* naopak využívají předností výpočetní techniky a řeší jednotlivé požární scénáře pomocí souboru rovnic, které popisují chování fyzikálních soustav za požáru. Mezi fyzikálními a matematickými modely lze nalézt určitou provázanost a možnost doplňování sledovaných veličin a vztahů. Přehled matematických modelů je znázorněn v Tab. 2 (13).

Tab. 2 přehled matematických modelů požáru

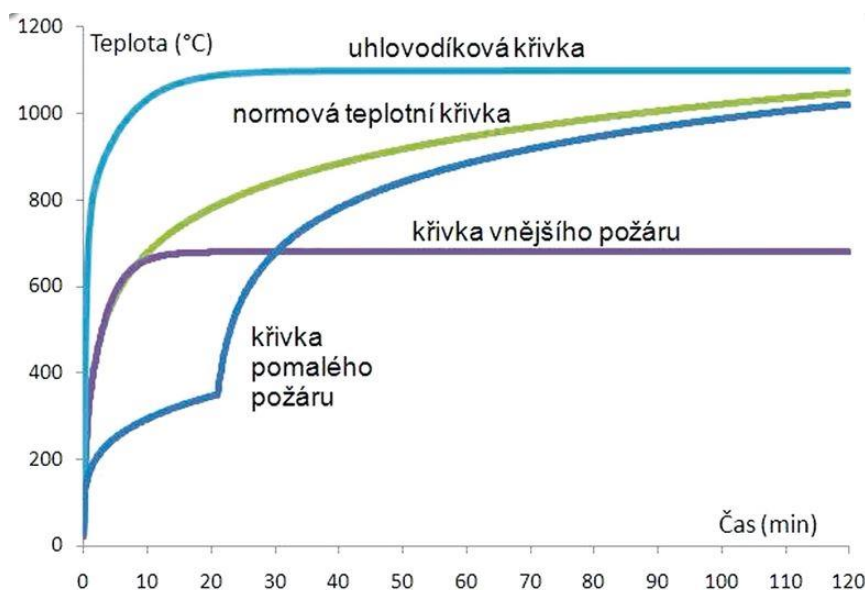
<b>Zjednodušené výpočtové modely pro stanovení teploty v prostoru</b>		
<b>MODEL POŽÁRU</b>	<b>PRŮBĚH POŽÁRU</b>	<b>TEPLOTA V PROSTORU</b>
<i>Lokální požár</i>	<i>Před flashover efektem</i>	<i>Osová teplota fire plume</i>
<i>Nominální teplotní křivky</i>	<i>Po flashover efektu</i>	<i>Jednotná teplota v celém prostoru</i>
<i>Parametrické teplotní křivky</i>		
<b>Stanovení teploty v prostoru pro deterministické modely požáru</b>		
<i>Zónové modely</i>	<i>Celý průběh požáru</i>	<i>Jednotná teplota ve vrstvě (zóně)</i>
<i>Modely typu pole</i>		<i>Časová a prostorová závislost</i>

#### 2.4.1 Nominální teplotní křivky

Nejjednodušším přístupem pro modelování požáru je použití tzv. nominálních teplotních křivek, které definují teplotu plynů v požárním úseku pouze jako funkci závislou na čase. Tyto křivky popisují fázi plně rozvinutého požáru, tedy fázi, která nastává po flashover efektu (3).

V normě ČSN EN 1991-1-2 jsou uvedeny tyto nominální teplotní křivky:

- Normová teplotní křivka
- Křivka vnějšího požáru
- Uhlovodíková křivka
- Křivka pomalého zahřívání



Obr. 8 nominální teplotní křivky (14)

#### 2.4.1.1 Normová teplotní křivka

Na základě statistiky byl mezinárodně stanoven jednotný časový průběh teploty při požáru normovou teplotní křivkou, která se často označuje jako křivka ISO nebo křivka ISO 834 a je dána rovnicí:

$$\theta_g = 20 + 345 \times \log(8t + 1)$$

kde:

- $\theta_g$  ...teplota plynů v požárním úseku [ °C]
- $t$  ...čas trvání požáru [min]

Tato křivka odpovídá tzv. celulóзовému hoření (hoření dřeva, papíru, oděvů apod.) a její použití je velmi časté. Vztahuje se k ní většina dostupných výsledků zkoušek a výpočtů. Účinky požárů definovaný jinými křivkami se obvykle převádějí právě na účinek požáru podle normové teplotní křivky (3).

#### 2.4.1.2 Křivka vnějšího požáru

Je dána vztahem (3):

$$\theta_g = 20 + 660 \times (1 - 0,687 \times e^{-0,32t} - 0,0675 \times e^{-3,8t})$$

kde:

- $\theta_g$  ...teplota plynů v požárním úseku [ °C]
- $t$  ...čas trvání požáru [min]

Tato křivka se vztahuje k požárům působícím na vnější lince obvodových stěn (3).

### 2.4.1.3 Uhlovodíková křivka

Je dána vztahem (3):

$$\theta_g = 20 + 1080 \times (1 - 0,325 \times e^{-0,167t} - 0,675 \times e^{-2,5t})$$

kde:

- $\theta_g$  ...teplota plynů v požárním úseku [ °C]
- $t$  ...čas trvání požáru [min]

Tato křivka popisuje hoření ropy a ropných produktů (uplatní se např. pro simulaci požárů v garážích apod.)

### 2.4.1.4 Křivka pomalého zahřívání

Je popsána rovnicí (3):

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

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

kde:

- $\theta_g$  ...teplota plynů v požárním úseku [ °C]
- $t$  ...čas trvání požáru [min]

Tato křivka se uplatní např. při modelování požáru v dutinách zdvojených podlah nebo podhledů (3).

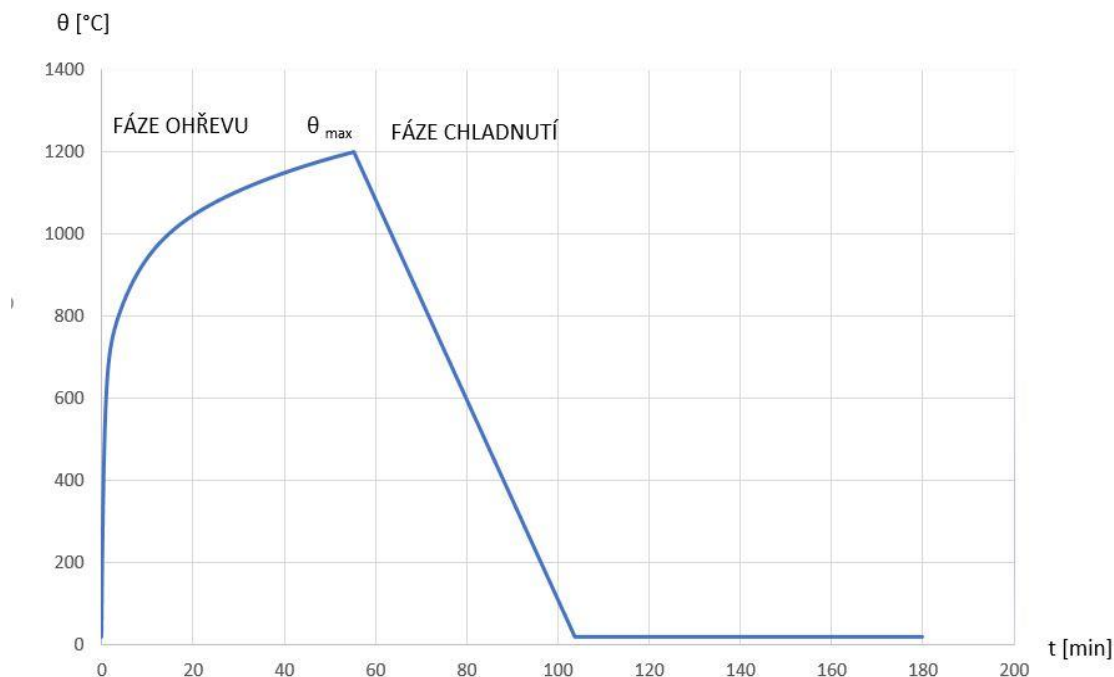
## 2.4.2 Přirozené modely požáru

Přirozené modely lze dále rozdělit na **zjednodušené modely**, mezi které patří parametrické teplotní křivky a lokální požáry a na **zpřesněné modely**, mezi které se řadí jednozónový model, dvouzónový model a CFD modely.

### 2.4.2.1 Parametrická křivka

Stejně jako nominální teplotní křivka popisuje fázi požáru po flashover efektu. Popis závislosti teploty v požárním úseku na čase je navíc doplněn o další parametry, díky kterým je lépe vystiženo působení skutečného požáru. Jedná se o zohlednění vlivu odvětrání, různé hustoty požárního zatížení a odlišných fyzikálních vlastností konstrukcí ohraničujících PÚ. Rovnice pro určení průběhu teploty dle parametrických teplotních křivek vznikly na základě rovnice tepelné rovnováhy. Při jejich popisu se pracuje s požárním zatížením (hustotou požárního zatížení  $q_{f,d}$ ), parametrem odvětrání  $O$  a vlivem ztráty tepla do ohraničujících konstrukcí zastoupeným součinitelem  $b$ . Oproti nominálním teplotním křivkám navíc tyto teplotní křivky popisují i fázi chladnutí požáru (15). Podrobný popis této křivky lze nalézt v normě ČSN EN 1991-1-2. Typický tvar křivky je znázorněn na Obr. 9.

Parametrická teplotní křivka (knihovna)



Obr. 9 Typický tvar parametrické teplotní křivky

Použití této křivky je omezeno rozměry a způsobem odvětrání posuzovaného PÚ. Lze použít pouze pro PÚ s maximální podlahovou plochou  $500 \text{ m}^2$ , bez otvorů ve stropu a maximální výškou PÚ do 4 m (3).

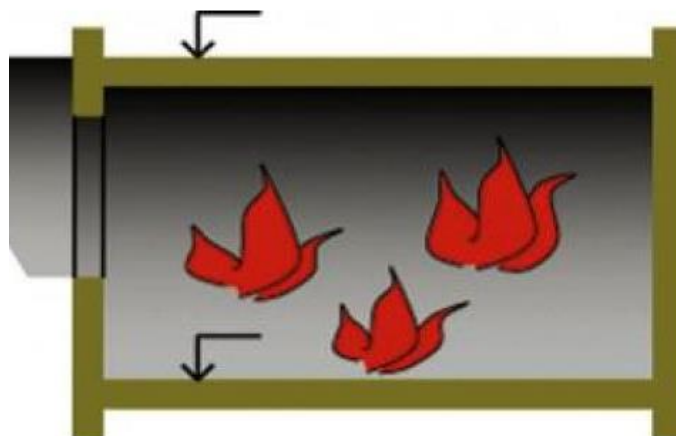
#### 2.4.2.2 Lokální požáry

Popisují průběh požáru ve fázi před flashover efektem. Způsob výpočtu teploty a tepelného zatížení při lokálním požáru je popsán v příloze C normy ČSN EN 1991-1-2. Požár před flashover efektem a jeho modelování hraje významnou roli především při analýze evakuace osob. Pro výpočet únosnosti železobetonových konstrukcí při požáru nehraje významnou roli (5).

#### 2.4.2.3 Jednozónový model

Odpovídá podmínkám po flashover efektu. Rozložení teploty, hustoty, vnitřní energie a tlaku plynu se předpokládá časově závislé a prostorově nezávislé (rovnoměrné). Model musí respektovat (3):

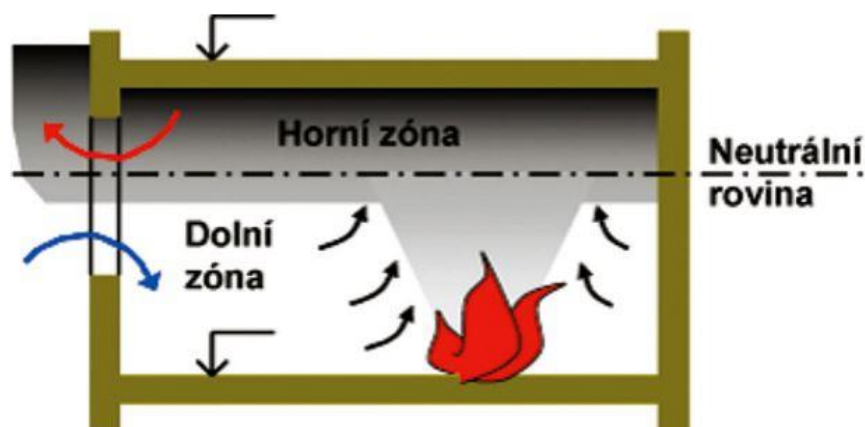
- Zachování hmoty a energie
- Výměnu hmoty mezi vnitřním plynem, vnějším plynem a ohněm
- Výměnu energie mezi ohněm, vnitřním plynem, stěnami a otvory



Obr. 3 Schéma jednozónového modelu (16)

#### 2.4.2.4 Dvouzónový model

Na rozdíl od jednozónového modelu dvouzónový model rozděluje řešený prostor (místnost) po výšce na dvě homogenní zóny (vrstvy), kde každá vrstva má stejnoměrnou hustotu, teplotu a koncentraci plynů. Dolní, studená vrstva se ochlazuje přívodem vzduchu z vnějšku (např. okny) a horní vrstva se ohřívá vzestupným prouděním zplodin požáru. Modely pracují s parciálními diferenciálními rovnicemi pro zachování hmoty a energie mezi jednotlivými vrstvami a obvykle řeší základní otázky teploty horké vrstvy pod stropem, rychlosti uvolňování tepla, optické hustoty kouře, polohy neutrální roviny, výměny plynů s okolím skrze otvory apod (16).



Obr. 10 Schéma dvouzónového modelu (16)

Předností těchto modelů je jednoduchost řešení, neboť výpočet probíhá mezi dvěma kontrolními objemy (zónami), což snižuje nároky na hardwarové vybavení. Nejrozšířenějšími programy pro výpočet zónových modelů jsou v současné době ARGOS, BRANZFIRE, CFAST, O'ZONE apod. (16).

#### 2.4.2.5 Výpočetní dynamické modely kapalin a plynů (tzv CFD modely)

CFD modely se řadí mezi modely typu pole a jsou postavené na algoritmech výpočtového proudění tekutin (Computation Fluid Dynamics). Na rozdíl od zónových modelů je zde výpočtová

oblast rozdělena do velkého množství počtu trojrozměrných kontrolních objemů (buněk) vytvářejících prostorovou síť s konečným množstvím buněk. Pro každou buňku jsou pak řešeny stavové rovnice a rovnice zachování energie, hmoty a chemických látek navíc spolu s rovnicemi zachování hybnosti. Samostatná metodika CFD neřeší požární specifika a ta jsou pak definována jako nadstavba – tzv. požární submodely (17).

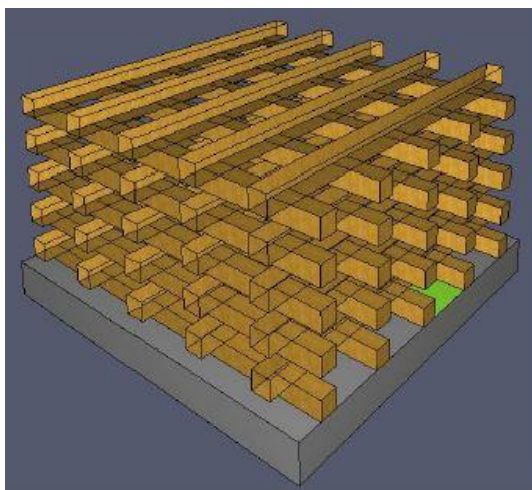
Metoda CFD je vhodná pro celou řadu problémů, které zónové modely nemohou pokrýt. Například je možné zahrnout vliv teplotních gradientů v prostoru před požárem, stejně tak jako vliv venkovního tlaku vzduchu. Metoda je úspěšná pro simulaci pohybu plynných zplodin hoření uzavřeným prostorem (13).

Naopak nevýhodou CFD modelů je způsob zadávání vstupních dat, který bývá v některých případech dosti komplikovaný, a dále požadavky na hardware. Výstupy z CFD modelů jsou velmi ovlivnitelné hodnotami vstupních proměnných (13).

### 2.4.3 Stanovení rychlosti uvolňování tepla

Rychlost uvolňování tepla slouží jako hlavní vstupní proměnná zejména pro zpřesněné modely i lokální požáry. Pro modelování požáru pomocí zónových modelů nebo modelů typu pole je možné při definování požáru postupovat několika způsoby (15) (5):

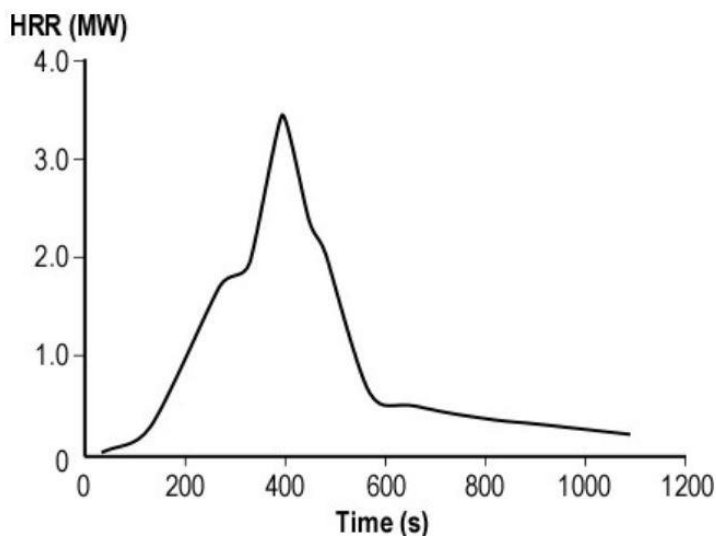
- a) Vytvoření dřevěných hraniček jejichž množství se spočítá na základě požárního zatížení nebo požárního rizika. Tento způsob je možné použít v FDS modelech, výpočet je však časově velmi náročný.



Obr. 11 hranice dřeva modelovaná v programu FDS (15)

- b) Použití naměřených hodnot rychlosti uvolňování tepla předmětů v místnosti. Například předpoklad, že požár vznikne zapálením některého z předmětů v místnosti (sedačka, skříň, koš...) a bude se postupně šířit na ostatní předměty při dosažení určité teploty jejich povrchů nebo hustoty tepelného toku. Tento způsob modelování požáru by měl velmi

dobře zastupovat reálnou situaci, avšak při jeho použití nemusí vždy dojít k flashover efektu, není tedy vhodný pro srovnávání s normovou nebo parametrickou teplotní křivkou.



Obr. 12 Rychlost uvolňování tepla pro sedačku (18)

### c) Návrhový požár dle ČSN 1991-1-2

Metoda výpočtu je obsahem přílohy E normy ČSN 1991-1-2. *Fáze rozvoje* je popsána rovnicí t-kvadratického požáru, pro *plně rozvinutou fázi* jsou k dispozici vztahy jak pro požár řízený palivem, tak pro požár řízený ventilací a *fáze dohořívání* může být popsána lineární funkcí.

- Fáze rozvoje

$$Q = 10^6 \cdot \left[ \frac{t}{t_\alpha} \right]^2$$

kde:

- $Q$  ... rychlost uvolňování tepla [W]
- $t$  ... čas [s]
- $t_\alpha$  ... doba potřebná pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW [s]

- Plně rozvinutá fáze

Případ pro požár řízený palivem:

$$Q = RHR_f \cdot A_{fi}$$

kde:

- $Q$  ... rychlost uvolňování tepla [W]

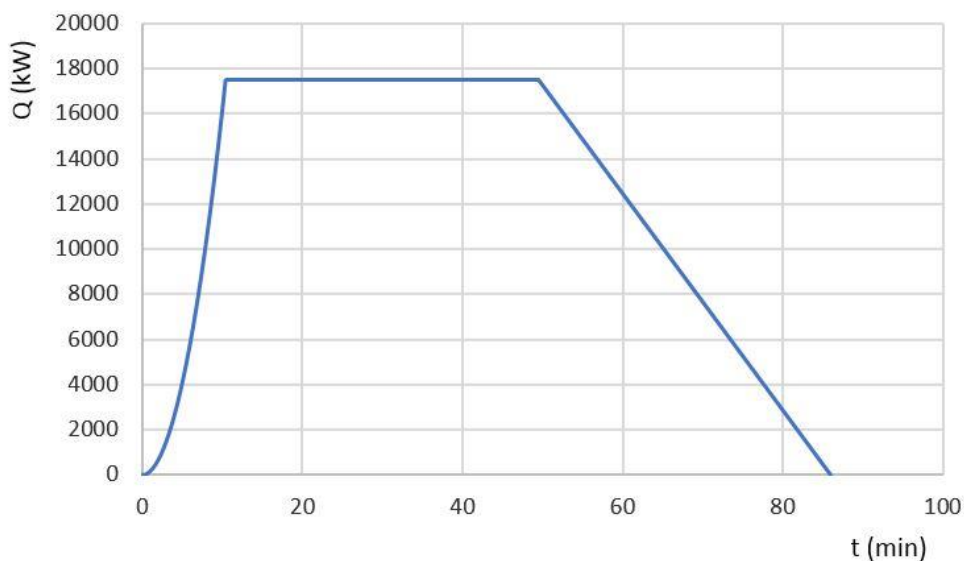
- $RHR_f$  ... maximální rychlost uvolňování tepla produkovaná požárem řízeným palivem [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]
- $A_{fi}$  ... maximální plocha požáru [ $\text{m}^2$ ]

Pro případ požáru řízeného ventilací:

$$Q_{max} = 0,1 \cdot m \cdot H_u \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}$$

kde:

- $Q_{max}$  ... maximální rychlost uvolňování tepla [W]
- $m$  ... součinitel hoření, zpravidla  $m = 0,8$  [-]
- $H_u$  ... hodnota čisté výhřevnosti dřeva  $H_u = 17,5$  [MJ/kg]
- $A_v$  ... plocha otvorů [ $\text{m}^2$ ]
- $h_{eq}$  ... průměrná výška otvorů [m]
- Fáze dohořívání začíná při vyhoření 70% paliva a končí při jeho úplném vyhoření, lze jí vyjádřit jako lineární pokles.



Obr. 13 Typický průběh návrhového požáru



## 2.5 Teplotní analýza konstrukce

Předchozí kapitola popisovala, jakým způsobem lze modelovat teploty a jiné požární charakteristiky v uzavřeném prostoru. Při měnící se teplotě plynů v PÚ se mění i rozložení teploty v konstrukcích, které se v PÚ nacházejí, proto je třeba řešit úlohu sdílení tepla (viz. 2.2) pro kterou jsou zásadní vstupy uvedené v Tab. 3 (3).

Tab. 3 Návrh požární odolnosti konstrukce (7)

<i>postup</i>	<i>Vstupy</i>	<i>Návrh požární odolnosti konstrukce</i>	<i>Normy</i>
1.	<i>Požární zatížení Geometrie požárního úseku Charakteristiky hoření</i>	<b><i>Teplotní analýza požárního úseku</i></b>	<i>EN 1991-1-2</i>
2.	<i>Geometrie prvků Termální vlastnosti Součinitel přestupu tepla</i>	<b><i>Přestup a vedení tepla v konstrukci</i></b>	<i>EN 199x-1-2</i>
3.	<i>Mechanické zatížení Geometrie prvků Uložení prvků (spoje) Mechanické vlastnosti</i>	<b><i>Návrh konstrukce za zvýšených teplot</i></b>	

Při teplotní analýze konstrukcí vystavených požáru je třeba řešit tzv. nestacionární stav, protože rozložení teploty v konstrukci se v čase mění. Problém sdílení tepla lze popsat rovnicí vedení tepla doplněnou o počáteční podmínku a příslušné okrajové podmínky, které zohledňují sdílení tepla prouděním a sáláním (3).

### 2.5.1 Čistý tepelný tok

Čistý tepelný tok na hranici vystavené požáru (3):

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$$

kde:

- $\dot{h}_{net,c}$  ...složka čistého tepelného toku od proudění [W/m<sup>2</sup>]
- $\dot{h}_{net,r}$  ...složka čistého sálavého tepelného toku [W/m<sup>2</sup>]

Složka čistého tepelného toku prouděním:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m)$$

kde:

- $\theta_g$  ...teplota plynů v požárním úseku [ °C]

- $\theta_m$  ...povrchová teplota konstrukce [ °C]
- $\alpha_c$  ...součinitel přestupu tepla prouděním (reprezentativní hodnoty jsou uvedeny v normě ČSN EN 1991-1-2)

Složka čistého tepelného toku sáláním:

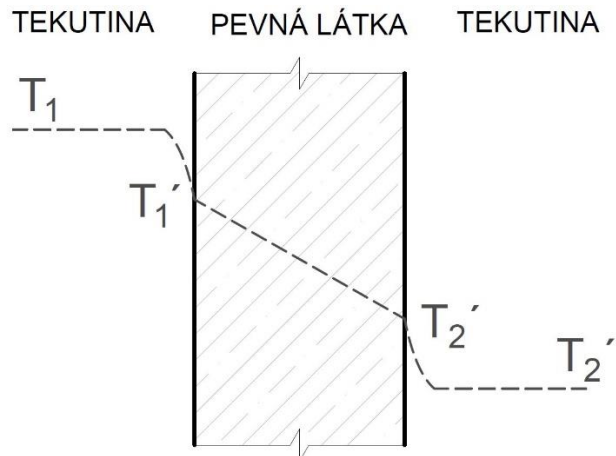
$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\theta_r + 273,15)^4 - (\theta_m + 273,15)^4]$$

kde:

- $\Phi$  ...polohový faktor, výpočet je popsán v příloze G normy ČSN EN 1991-1-2
- $\theta_m$  ...povrchová teplota konstrukce [ °C]
- $\varepsilon_m$  ...povrchová emisivita prvku
- $\varepsilon_f$  ...emisivita požáru
- $\sigma$  ...Stephan-Boltzmannova konstanta

### 2.5.1.1 Přestup tepla

Děj, ke kterému dochází na rozhraní plynu nebo kapaliny a pevné látky se nazývá přestup tepla. Dochází k němu na rozhraní, kde se mění způsob šíření tepla z proudění na vedení (resp. Obráceně).



Obr. 14 Schéma průběhu teploty při zohlednění přestupu tepla

Přestup tepla je důležitý jev, který může zdánlivě jednoduché úlohy týkající se stacionárního vedení tepla značně komplikovat. Je to proto, že koeficient přestupu tepla  $\alpha_c$  [W/m<sup>2</sup>K] není konstantní, ale závisí na parametrech, které se v průběhu požáru mohou měnit (hustota, viskozita, tepelná vodivost média, rychlost proudění apod.) (19).

## 2.5.2 Vedení tepla

Vedení tepla v konstrukci, která je vystavena teplotám proměnným v čase lze popsat Fourierovou parciální diferenciální rovnicí nestacionárního vedení tepla (7):

$$\frac{\delta}{\delta x} \left( \lambda(\theta) \frac{\delta}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( \lambda(\theta) \frac{\delta}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left( \lambda(\theta) \frac{\delta}{\delta z} \right) + \dot{h}_{net} = \rho c(\theta) \frac{d\theta}{dt}$$

kde:

- $x, y, z \dots$  pravouhlé souřadnice prvku [m]
- $\theta \dots$  teplota [ °C]
- $\lambda(\theta) \dots$  tepelná vodivost v závislosti na teplotě [W/m K]
- $\rho \dots$  hustota [kg/m<sup>3</sup>]
- $c(\theta) \dots$  měrná tepelná kapacita v závislosti na teplotě [J/kg K]
- $\dot{h}_{net} \dots$  tepelný tok [W/m<sup>2</sup>]

Pro řešení otázky vedení tepla je třeba znát, jakým způsobem se v závislosti na teplotě mění vlastnosti daného materiálu vstupující do rovnice vedení tepla. Průběh jednotlivých veličin v závislosti na teplotě je uveden v ČSN EN 1992-1-2.

## 2.6 Návrh ŽB konstrukce za zvýšených teplot

Poté co je vyřešen průběh teploty v požárním úseku a je známo rozložení teplot v konstrukci, následuje samotné posouzení konstrukce za zvýšených teplot. Mezi vstupní parametry patří mechanické zatížení, geometrie prvků, způsob uložení prvku a mechanické vlastnosti materiálů za zvýšených teplot (7).

Tab. 4 Návrh požární odolnosti konstrukce (7)

<i>postup</i>	<i>Vstupy</i>	<i>Návrh požární odolnosti konstrukce</i>	<i>Normy</i>
1.	<i>Požární zatížení Geometrie požárního úseku Charakteristiky hoření</i>	<b><i>Teplotní analýza požárního úseku</i></b>	<i>EN 1991-1-2</i>
2.	<i>Geometrie prvků Termální vlastnosti Součinitel přestupu tepla</i>	<b><i>Přestup a vedení tepla v konstrukci</i></b>	<i>EN 1992-1-2 (pro případ ŽB konstrukce)</i>
3.	<i>Mechanické zatížení Geometrie prvků Uložení prvků (spoje) Mechanické vlastnosti</i>	<b><i>Návrh konstrukce za zvýšených teplot</i></b>	

### 2.6.1 Mechanické zatížení při požární situaci

Pro výpočet účinků zatížení při požární situaci  $E_{d,fi,t}$  se uvažuje mimořádná návrhová situace podle ČSN EN 1990 (3):

$$E_d = E\{G_{kj}; P; A_d; (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1}; \psi_{1,1} \cdot Q_{k,i}\}$$

kde:

- x, y, z... pravouhlé souřadnice prvku [m]
- $G_{kj}$ ... charakteristická hodnota  $j$ -tého zatížení
- $P$ ... příslušná reprezentativní hodnota zatížení od předpětí
- $A_d$ ... návrhová hodnota mimořádného zatížení (požárního)
- $\psi_1$ ... součinitel pro častou hodnotu proměnného zatížení
- $\psi_2$ ... součinitel pro kvazistálou hodnotu proměnného zatížení
- $Q_{k,1}$ ... charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení
- $Q_{k,i}$ ... charakteristická hodnota  $i$ -tého proměnného zatížení

Zjednodušeně lze uvažovat účinky zatížení při požární situaci odvozené z účinků stanovených v návrhu při normální teplotě:

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

kde:

- $E_{fi,d}$ ... účinek zatížení při požáru
- $\eta_{fi}$ ... redukční součinitel pro úroveň zatížení při požáru (stanoví se dle ČSN EN 1990, nebo lze zjednodušeně uvažovat jako 0,7)
- $E_d$ ... návrhová hodnota síly nebo momentu při běžné teplotě

## 2.6.2 Materiálové vlastnosti za požární situace

Návrhové hodnoty mechanických vlastností materiálu při požární situaci  $X_{d,fi}$  určuje vztah (3):

$$X_{d,fi} = k_{\theta} \cdot \frac{X_k}{\gamma_{M,fi}}$$

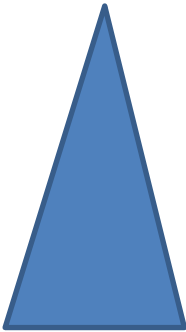
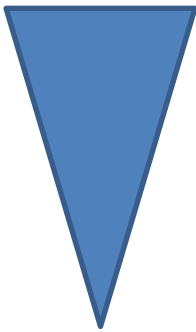
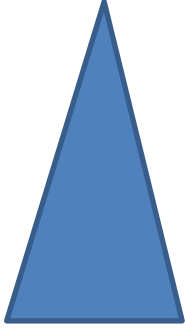
kde:

- $x, y, z$ ... pravoúhlé souřadnice prvku [m]
- $X_k$ ... charakteristická hodnota pevnostní nebo přetvárné vlastnosti materiálu pro návrh při běžné teplotě
- $k_{\theta}$ ... součinitel pro redukci charakteristické hodnoty materiálové vlastnosti v závislosti na teplotě materiálu (uvedeny v ČSN EN 1992-1-2)
- $\gamma_{M,fi}$ ... dílčí součinitel spolehlivosti materiálu při požární situaci (pro beton i betonářskou výztuž se uvažuje  $\gamma_{M,fi} = 1$ )

## 2.6.3 Návrhové metody

Pro návržení konstrukce na účinky požáru lze rozlišit několik základních přístupů, které se liší svou přesností, komplexností a složitostí. Důležitým faktorem, který ovlivňuje použitelnost, přesnost a bezpečnost dosažených výsledků je právě volba návrhového přístupu. Jednotlivé metody jsou vypsány podle jejich přesnosti a složitosti v Tab. 5.

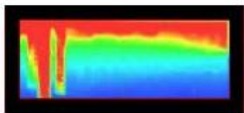
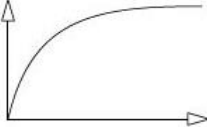
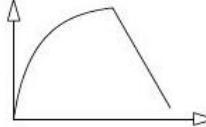























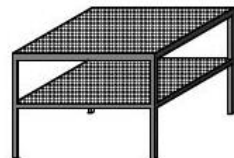





Tab. 5 Výčet návrhových metod dle jejich složitosti (20)

	<i>PŘESNOST</i>	<i>KONVENČNÍ</i>	<i>NÁROČNOST</i>
<i>Založeno na normalizovaných zkouškách požární odolnosti</i>			
<i>Tabulkové hodnoty</i>			
<i>Zjednodušené výpočetní metody</i>			
<i>Zpřesněné výpočetní metody</i>			
<i>Zkoušky celé konstrukce</i>			






Mezi kritéria pro volbu návrhového přístupu patří (20):

- charakter konstrukce
- charakter provozu v PÚ
- Požadavek na přesnost výsledků
- dostupnost výpočetního aparátu
- charakter použitých materiálů (tradiční/netradiční)
- časová náročnost

Možné využití jednotlivých metod pro posuzování požární odolnosti konstrukcí v souvislosti s modelem konstrukce a způsobem modelování požáru v daném prostoru znázorňuje Obr. 15 (20).

MODEL POŽÁRU MODEL KONSTRUKCE	Rovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku		Nerovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku 
	nominální křivky 	parametrické křivky 	
konstrukční prvek 	   	  ?  	   
část konstrukce 	 ?  ? 	 ?  ? 	  
celá konstrukce 			  

	požární zkoušky		možné v budoucnu ?
	tabulkové hodnoty		
	zjednodušené metody		
	zpřesněné metody		

Obr. 15 Možné kombinace pro návrhové přístupy

### 2.6.4 Zjednodušené výpočtové metody

Mezi tyto metody se řadí: Metoda izotermie 500 °C, zónová metoda, metoda pro štíhlé sloupy, metoda pro ověření únosnosti ve smyku a kroucení, zjednodušená výpočtová metoda pro nosníky a desky. Zjednodušené metody stanovují mezní únosnost průřezu na základě jeho teplotního profilu. Tato mezní únosnost průřezu vystaveného požáru se srovnává s odpovídajícím namáháním za požáru. Podrobný popis jednotlivých metod je uveden v ČSN EN 1992-1-2 v přílohách B, D a E (21). V praktické části této práce je použita metoda izotermie 500 °C.

### Metoda izotermy 500 °C

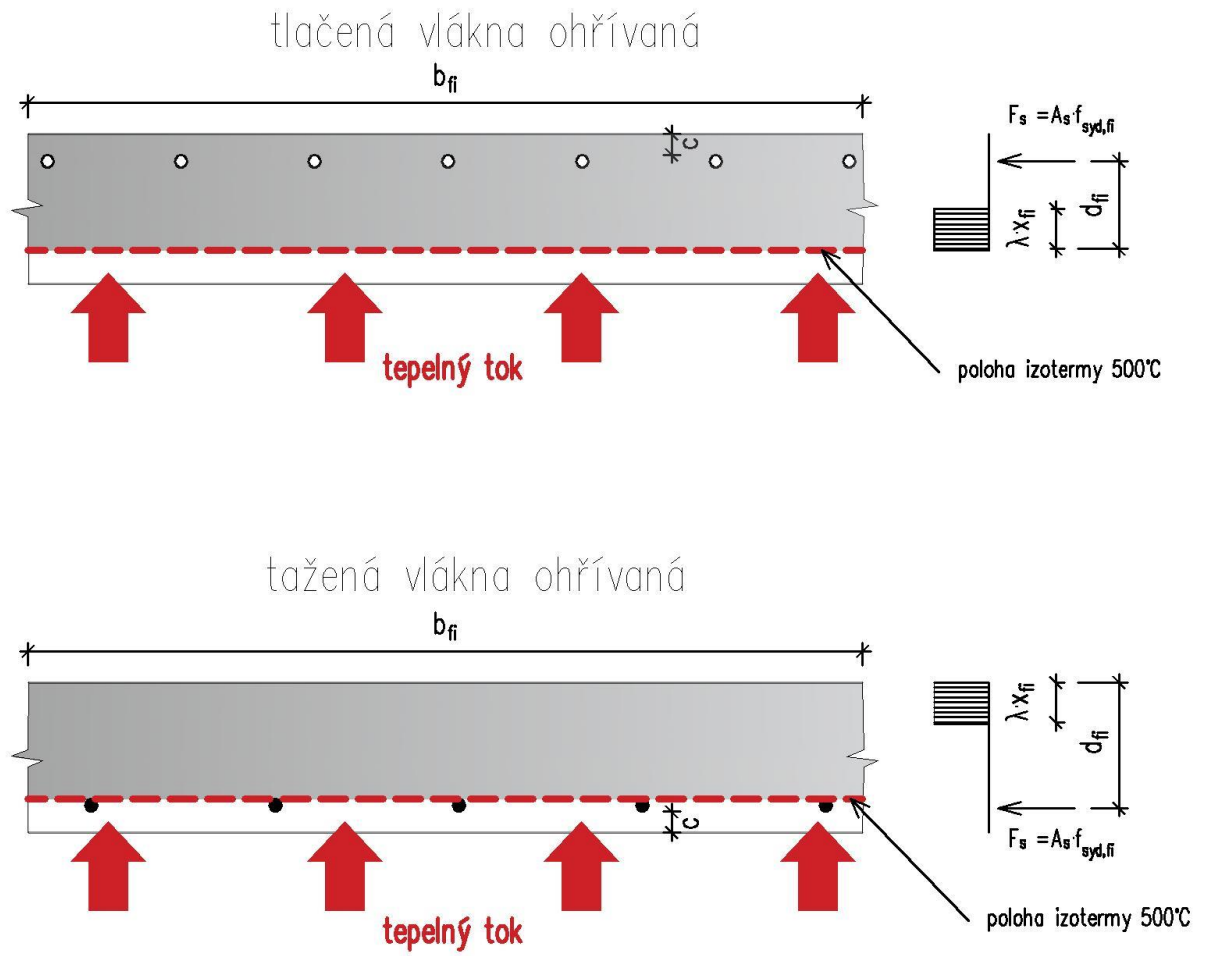
Používá se pro prvky namáhané normálovou silou nebo ohybovým momentem nebo v případě kombinace normálové síly a ohybového momentu. Principem metody izotermy 500 °C je předpoklad, že beton o teplotě vyšší než 500 °C nepřispívá k únosnosti průřezu, naopak beton o teplotě nižší než 500 °C vykazuje stejné mechanické vlastnosti jako při běžné teplotě. Mechanické vlastnosti výztuže se pak redukuje úměrně její teplotě (22).

Použití této metody je možné v souvislosti s normovou teplotní křivkou nebo parametrickou teplotní křivkou. Další podmínky, které musí být splněny, aby mohla být tato metoda použita, jsou uvedeny v příloze B normy ČSN EN 1992-1-2.

#### POSTUP VÝPOČTU (21):

- Stanovení teplotního profilu posuzovaného průřezu pro požadovanou požární odolnost a určení polohy izotermy 500 °C
- Určení nové šířky průřezu  $b_{fi}$  a nové účinné výšky průřezu  $d_{fi}$ , při vyloučení betonu o vyšší teplotě než 500 °C. Obr. 16 (zaoblený tvar izotermy lze idealizovat na pravouhlý)
- Stanovení teploty v těžišti jednotlivých výztužných prutů a určení redukované meze kluzu oceli  $f_{syd,fi}$ .
- Stanovení mezní únosnost redukovaného průřezu obvyklým postupem
- Porovnání účinku návrhového zatížení při požární situaci s únosností redukovaného průřezu





Obr. 16 Schéma postupu při využití metody izotermy 500 °C pro ŽB desku

## 3 Praktická část

Praktickou částí této práce je analýza požární odolnosti železobetonové stropní desky v případě tří různých modelů požáru. Účelem je především zjištění toho, jaký vliv má volba modelu požáru na výslednou požární odolnost posuzované ŽB desky.

### Požární úseky:

Jako příklad byly vytvořeny čtyři reprezentativní požární úseky, které jsou rozměrově i *konstrukčně* stejné a liší se pouze provozem. Jedná se o školní třídu, kanceláře, byt a knihovnu. Tyto provozy byly zvoleny tak, aby byl vliv volby modelu požáru vidět pro různé hodnoty požárního zatížení, různé křivky rychlosti uvolňování tepla a další vstupní parametry týkající se provozu.

### Modely požáru:

V těchto požárních úsecích je popsán průběh teploty plynu pomocí dvou zjednodušených modelů požáru a jednoho zpřesněného modelu požáru. Zjednodušenými modely jsou: normová teplotní křivka a parametrická teplotní křivka. Jako zpřesněný model byl použit model dvouzónový v programu CFAST. Tento model umožňuje dosažení vcelku přesných výsledků v přijatelném výpočetním čase. U programů založených na principu CFD (například FDS) je problémem právě dlouhá doba výpočtu a vysoké nároky na software. Jednodušší zpřesněný model byl zvolen i s ohledem na to, že pro posouzení ŽB desky je zvolena zjednodušená metoda (metoda izotermy 500 °C).

### Výpočet požární odolnosti:

Zjednodušenou výpočetní metodou – metodou izotermy 500 °C je proveden výpočet průběhu momentu únosnosti za požáru, pro všechny modely požáru a všechny provozy. Tento algoritmus je navíc proveden pro dvě různé hodnoty krytí hlavní nosné výztuže ( $c=15\text{ mm}$  a  $c=25\text{ mm}$ ). Výsledné průběhy momentu únosnosti a ostatní vypočtená data jsou porovnávána v grafech tak, aby byl vidět právě vliv volby modelu požáru na průběh únosnosti ŽB desky za požáru.

### 3.1 Popis modelovaných požárních úseků

Rozměry místnosti jsou stejné pro všechny provozy patrné ze schématu (Obr. 17). Modelovaný prostor se liší vždy pouze provozem.

Plocha:	$A_f = 35\text{ m}^2$
Provoz:	a) školní třída
	b) kanceláře
	c) byt

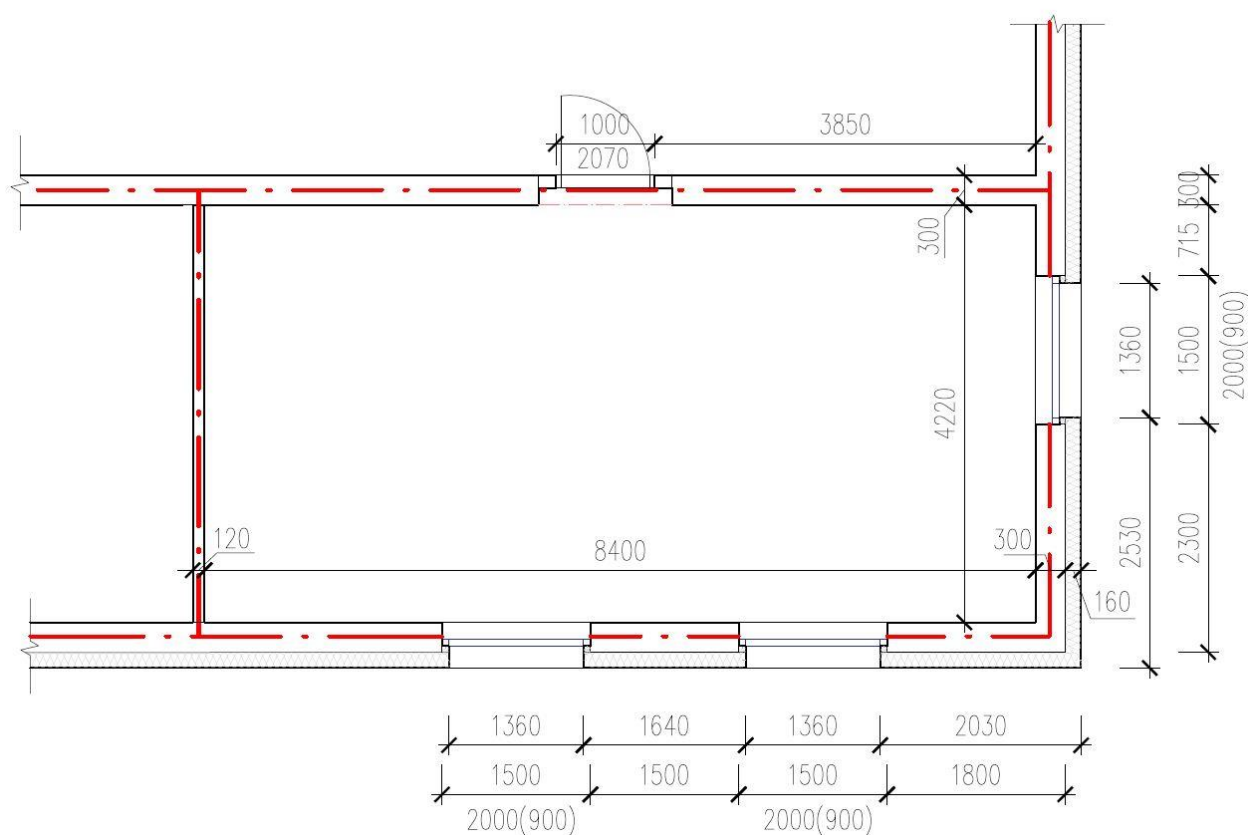
## d) knihovna

Světlá výška:

$S_v = 3,3 \text{ m}$

Ohraničující konstrukce:

- Vnitřní nosné stěny vápenopískové cihly tl. 300 mm
  - Příčky vápenopískové cihly tl. 120 mm
  - Obvodové stěny vápenopískové cihly tl. 300 mm
  - Podlaha dřevěné parkety na ŽB desce
  - Strop ŽB deska
- <sup>1</sup>Vnější izolační desky z EPS tl. 180 mm



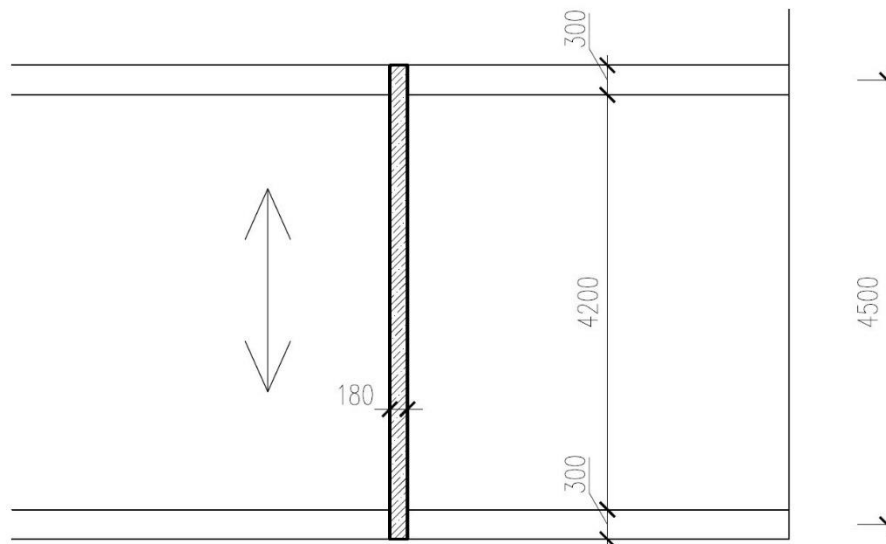
Obr. 17 schéma posuzovaného prostoru

<sup>1</sup>Tepelně technické vlastnosti vnější izolační vrstvy nemají při výpočtu součinitele  $b$  vliv (v souvislosti s parametrickou teplotní křivkou v kap. 3.3.2 Parametrická teplotní křivka). Jedná se o materiál s velice nízkou hustotou a nízkým součinitelem tepelné vodivosti, proto je dle ČSN EN 1991-1-2 (příloha A) uvažován pouze vliv vrstvy vnitřní (zdiva z vápenopískových cihel).

### 3.2 Posouzení železobetonové desky za běžné teploty

Předmětem praktické části je analýza momentu únosnosti ŽB desky za požární situace. V řešeném příkladu se jedná o železobetonovou desku jednosměrně pnutou mezi nosné stěny. Schéma uložení desky je patrné z Obr.18

Obr. 18.



Obr. 18 schéma uložení ŽB desky

#### 3.2.1 Vnitřní síly za běžné teploty

Zatížení stálé:

- vlastní tíha  $h_d \cdot 25 = 0,18 \cdot 25 = 4,5 \text{ kN/m}^2$
- ostatní stálé  $1,5 \text{ kN/m}^2$

$$g_k = 1,5 + 4,5 = 6 \text{ kN/m}^2$$

$$g_d = g_k \cdot 1,35 = 6 \cdot 1,35 = 8,1 \text{ kN/m}^2$$

Zatížení proměnné:

- užitné  $3 \text{ kN/m}^2$

užitné zatížení je uvažováno stejné ve všech případech (školní třída, kanceláře, byt, knihovna)

$$q_k = 3 \text{ kN/m}^2$$

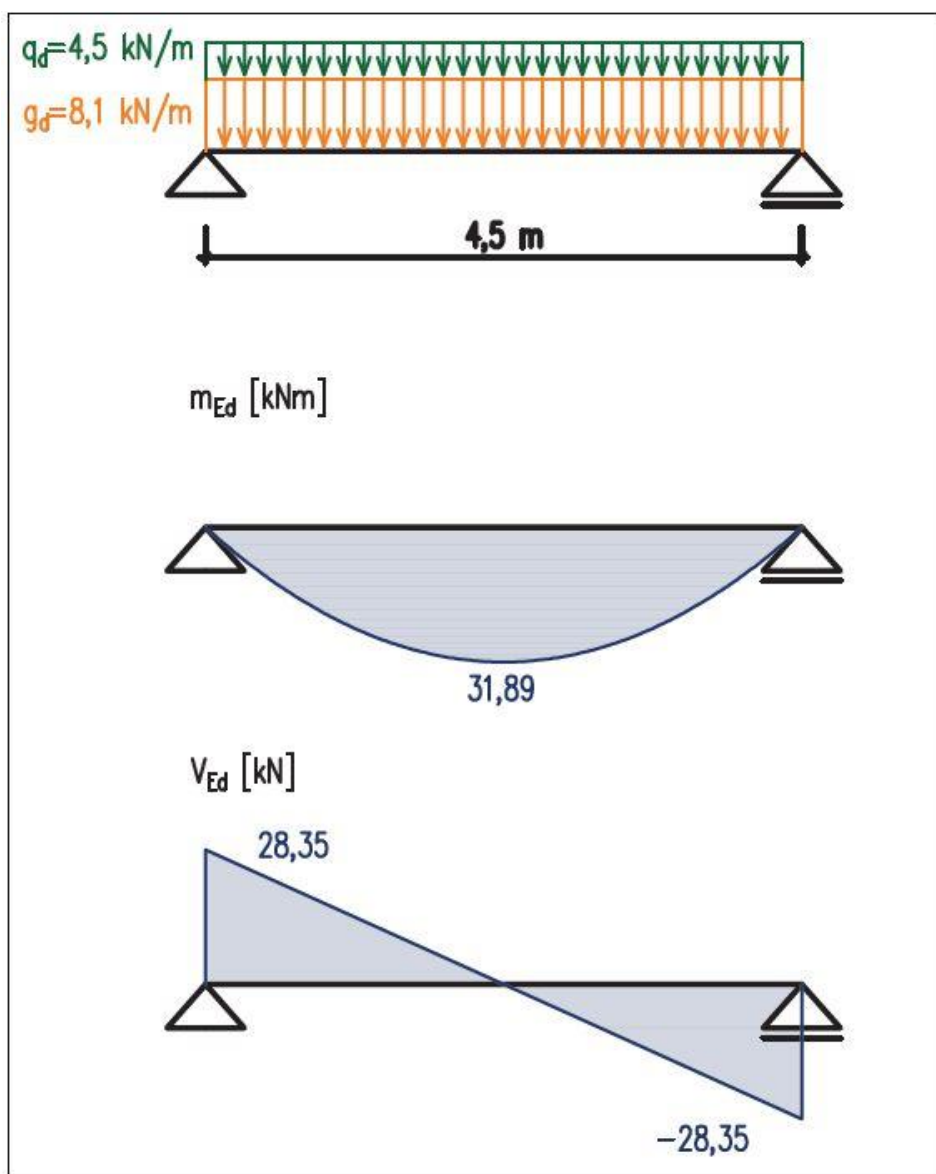
$$q_d = q_k \cdot 1,5 = 3 \cdot 1,5 = 4,5 \text{ kN/m}^2$$

Návrhový ohybový moment:

$$m_{Ed,max} = \frac{1}{8} f_d \cdot l^2 = \frac{1}{8} 12,6 \cdot 4,5^2 = 31,89 \text{ kNm}$$

Návrhová posouvající síla:

$$v_{Ed,max} = \frac{1}{2} f_d \cdot l = \frac{1}{2} 12,6 \cdot 4,5 = 28,35 \text{ kN}$$



Obr. 19 Zatížení a vnitřní síly za běžné teploty

### 3.2.2 Geometrie průřezu a materiálové vlastnosti za běžné teploty

Materiálové vlastnosti:

- Beton C 30/37

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{cd,fi} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{c,fi}} = \frac{30}{1} = 30 \text{ MPa}$$

- Ocel B500B

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa}$$

$$f_{yd,fi} = k_{s,\theta} \frac{f_{yk}}{\gamma_{s,fi}} = k_{s,\theta} \cdot \frac{500}{1} = k_{s,\theta} \cdot 500 \text{ MPa}$$

Geometrie průřezu (Obr. 20):

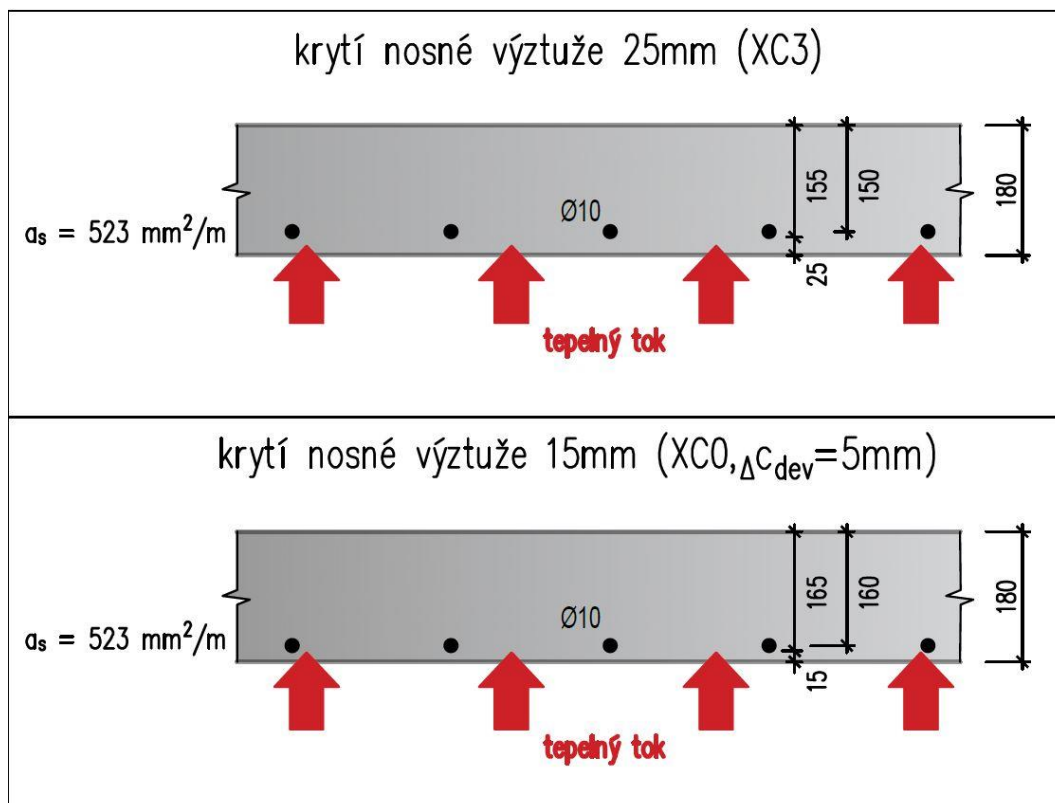
- Výška desky:  $h_d = 180 \text{ mm}$
- Krytí hlavní nosné výztuže:

Pro krytí hlavní nosné výztuže ŽB desky byly zvoleny 2 různé hodnoty především proto, že vzdálenost výztužných prutů k líci desky vystavenému požáru hraje velmi významnou roli při posuzování průřezu při požární situaci. Hodnota  $25 \text{ mm}$  představuje horní hranici (pro případ vysokého stupně vlivu prostředí) a hodnota  $15 \text{ mm}$  představuje dolní hranici (pro případ nízkého stupně vlivu prostředí). Posouzení momentu únosnosti za běžné teploty bude uvedeno pouze pro případ kdy  $c = 25 \text{ mm}$  (menší rameno vnitřních sil, tedy i menší moment únosnosti).

a)  $c = 25 \text{ mm}$

b)  $c = 15 \text{ mm}$

- Plocha hlavní nosné výztuže:  $a_{s,prov} = 523,6 \text{ mm}^2/\text{m}$  ( $\emptyset 10$ , á150)



Obr. 20 Schéma posuzovaných průřezů

### 3.2.3 Posouzení momentu únosnosti za běžné teploty

- Kontrola vyztužení:

$$a_{s,min} = \max\left(\frac{0,26 \cdot f_{ctm} \cdot b_t \cdot d}{f_{yk}}; 0,0013 \cdot b_t \cdot d\right)$$

$$a_{s,prov} \geq \max\left(\frac{0,26 \cdot 2,9 \cdot 1 \cdot 0,16}{500}; 0,0013 \cdot 1 \cdot 0,16\right)$$

$$a_{s,prov} \geq \max(0,241 \cdot 10^{-3}; 0,208 \cdot 10^{-3}) \text{ m}^2$$

$$\underline{523 \text{ mm}^2 \geq 241 \text{ mm}^2 \dots \text{vyhovuje}}$$

- Posouzení v ohybu:

Účinná výška průřezu:

$$d = h - c - 0,5 \cdot \phi = 180 - 25 - 0,5 \cdot 10 = \underline{150 \text{ mm}}$$

Výška tlačené oblasti:

$$x = \frac{a_s \cdot f_{yd}}{b \cdot 0,8 \cdot f_{cd}} = \frac{524 \cdot 435}{1000 \cdot 0,8 \cdot 20} = \underline{14,24 \text{ mm}}$$

Poměrná výška tlačené oblasti:

$$\xi \leq \xi_{max} = 0,45$$

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{14,24}{150} = 0,095$$

$$\xi = 0,095 \leq \xi_{max} = 0,45 \dots \text{vyhovuje}$$

Moment únosnosti:

$$m_{Rd} \leq m_{Ed} = 31,89 \text{ kNm}$$

$$m_{Rd} = a_{s,prov} \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,5 \cdot 0,8 \cdot x)$$

$$m_{Rd} = 524 \cdot 435 \cdot (150 - 0,5 \cdot 0,8 \cdot 14,24) = 35,13 \text{ kNm}$$

$$\underline{m_{Rd} = 35,13 \text{ kNm} \leq m_{Ed} = 31,89 \text{ kNm} \dots \text{vyhovuje}}$$

### 3.3 Teplota plynu v posuzovaných požárních úsecích

Pro výpočet průběhu teploty normovou a parametrickou křivkou byl použit program FMC – Fire Models Calculator (23), který umožňuje export výsledků a jejich následné využití pro další teplotní a mechanickou analýzu posuzované konstrukce. Dvouzónové modely byly vytvořeny v programu CFAST (24).

Teplota plynu byla stanovena pro tyto případy:

- Normová teplotní křivka (průběh teploty nezávislý na provozu)
- Parametrická křivka (4 různé provozu)
- Dvouzónový model (4 různé provozu)

#### 3.3.1 Normová teplotní křivka

Průběh teploty plynu je v případě této křivky závislý pouze na čase (viz 2.4.1.1), bude tedy stejný ve všech požárních úsecích nezávisle na provozu.

#### 3.3.2 Parametrická teplotní křivka

Pro použití parametrické teplotní křivky musí být splněny podmínky uvedené v příloze B normy ČSN EN 1991-1-2:

$$A_f \leq 500 \text{ m}^2 \quad \underline{A_f = 35 \text{ m}^2 \leq 500 \text{ m}^2}$$

$$h_s \leq 4 \text{ m} \quad \underline{h_s = 3,3 \text{ m} \leq 4 \text{ m}}$$

Vstupní hodnoty byly spočteny dle přílohy E normy ČSN EN 1991-1-2:

- koeficient otvorů (stejný pro všechny provozu):

$$O = A_v \cdot \frac{\sqrt{h_{eq}}}{A_t} = 9 \cdot \frac{\sqrt{2}}{153,7} = 0,08$$



kde:

- $A_v$ ...celková plocha svislých otvorů [ $m^2$ ]
- $h_{eq}$ ...vážený průměr výšky okenních otvorů [m]
- $A_t$ ...celková plocha konstrukcí ohraničující požární úsek včetně otvorů [ $m^2$ ]
- součinitel tepelné charakteristiky ohraničujících povrchů, stěny z vápenopískových cihel, stropy a podlaha železobetonová (stejně pro všechny provozy):

$$b_j = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda}, \quad b = \frac{\sum(b_j \cdot A_j)}{A_t - A_v}, \quad b = 960,3 \text{ Js}^{-0,5} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

kde:

- $b_j$ ...tepelná charakteristika povrchu j-té konstrukce [ $\text{J s}^{-0,5} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
- $A_j$ ...plocha j-té ohraničující konstrukce [ $m^2$ ]
- $b$ ...celková společná tepelná charakteristika povrchu ohraničujících konstrukcí [ $\text{J s}^{-0,5} \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
- $\rho$ ...hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $c$ ...celková plocha konstrukcí ohraničující požární úsek včetně otvorů [ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ]
- $\lambda$ ...tepelná vodivost [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ]
- rychlost rozvoje požáru
 

a) školní třída	střední
b) kanceláře	střední
c) byt	střední
d) knihovna	vysoká
- návrhová hodnota hustoty požárního zatížení

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_{qn}$$

kde:

- $q_{f,d}$ ...návrhová hustota požárního zatížení [ $\text{MJ/m}^2$ ]
- $q_{f,k}$ ...charakteristická hodnota hustoty požárního zatížení [ $\text{MJ/m}^2$ ]
- $m$ ...součinitel hoření ( $m=0,8$ ) [-]
- $\delta_{q1}$ ...součinitel vyjadřující nebezpečí vzniku požáru v závislosti na velikosti požárního úseku
- $\delta_{q2}$ ...součinitel zohledňující nebezpečí vzniku požáru vlivem druhu provozu

–  $\delta_{qn}$ ...součinitel, kterým se do výpočtu zavádí aktivní požární ochrana

- |                 |                                  |
|-----------------|----------------------------------|
| a) školní třída | $q_{f,d} = 312,9 \text{ MJm}^2$  |
| b) kanceláře    | $q_{f,d} = 460,7 \text{ MJm}^2$  |
| c) byt          | $q_{f,d} = 854,7 \text{ MJm}^2$  |
| d) knihovna     | $q_{f,d} = 1644,5 \text{ MJm}^2$ |

- návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená k ploše povrchů:

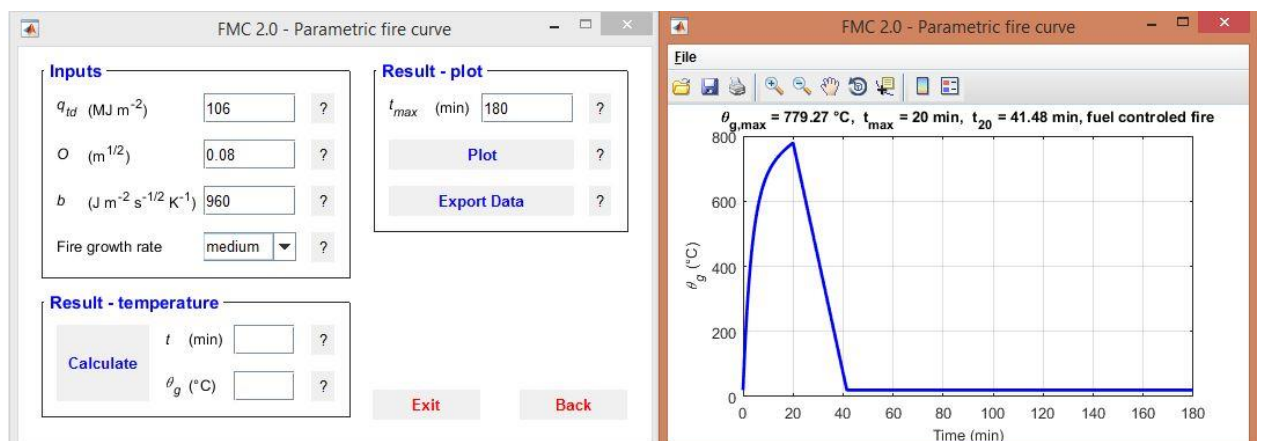
$$q_{t,d} = \frac{q_{f,d} \cdot A_f}{A_t}$$

kde:

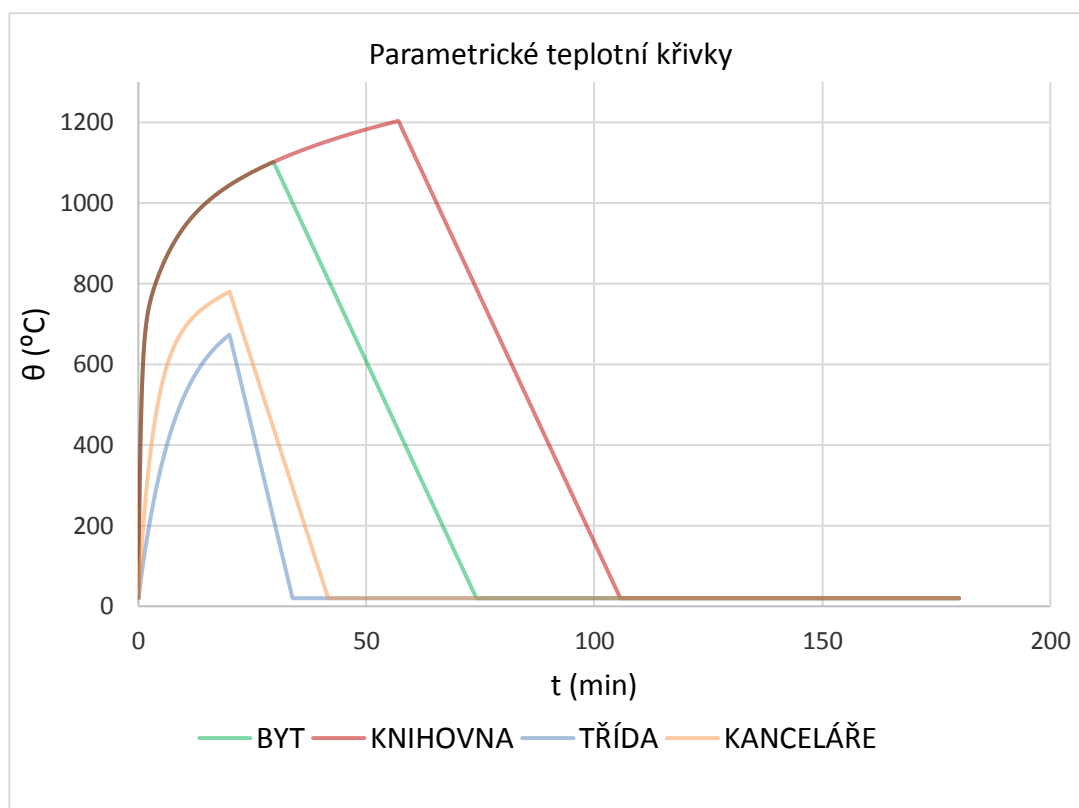
- $q_{t,d}$ ...návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená k ploše povrchů [ $\text{MJ/m}^2$ ]
- $q_{f,d}$ ...návrhová hustota požárního zatížení [ $\text{MJ/m}^2$ ]
- $A_f$ ...plocha podlahy [ $\text{m}^2$ ]
- $A_t$ ...celková plocha konstrukcí ohraničující požární úsek včetně otvorů [ $\text{m}^2$ ]

- |                 |                                  |
|-----------------|----------------------------------|
| a) školní třída | $q_{t,d} = 72,35 \text{ MJm}^2$  |
| b) kanceláře    | $q_{t,d} = 106,54 \text{ MJm}^2$ |
| c) byt          | $q_{t,d} = 197,65 \text{ MJm}^2$ |
| d) knihovna     | $q_{t,d} = 380,29 \text{ MJm}^2$ |

- Výsledné průběhy teplot byly spočteny v programu FMC a exportovány do formátu *xls*.



Obr. 21 Ukázka výpočtu a výstupu z programu FMC (průběh teploty v kanceláři)



Obr. 22 Teplota plynu dle parametrické teplotní křivky

### 3.3.3 Dvouzónové modely

Pro výpočet teploty pomocí dvouzónového modelu byl použit software CFAST, ve kterém je požár definován rychlostí uvolňování tepla dle ČSN EN 1991-1-2 (viz. 2.4.3).

#### 3.3.3.1 Výpočet křivky rychlosti uvolňování tepla

Jako vstupní parametr pro výpočet teploty dle dvouzónového modelu je tedy nejprve potřeba stanovit křivku rychlosti uvolňování tepla. Výpočet této křivky byl proveden v programu FMC.

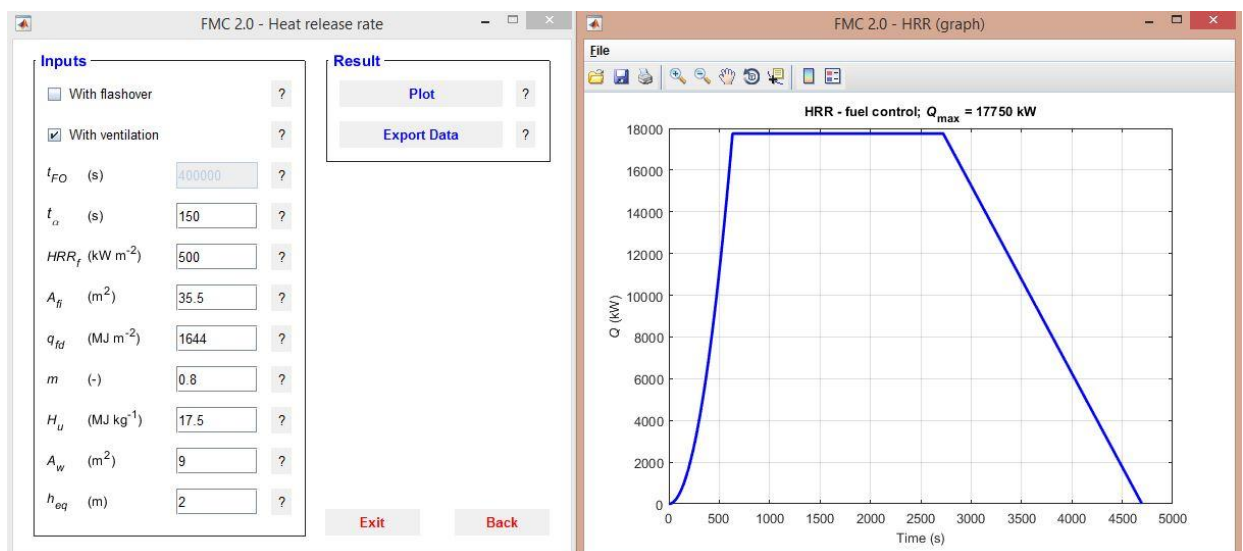
Vstupní parametry (spočteny již v kapitole 3.3.2):

- $t_{\alpha}$ ...čas pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW [s]
- $HRR_f$ ...maximální hodnota rychlosti uvolňování tepla [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]

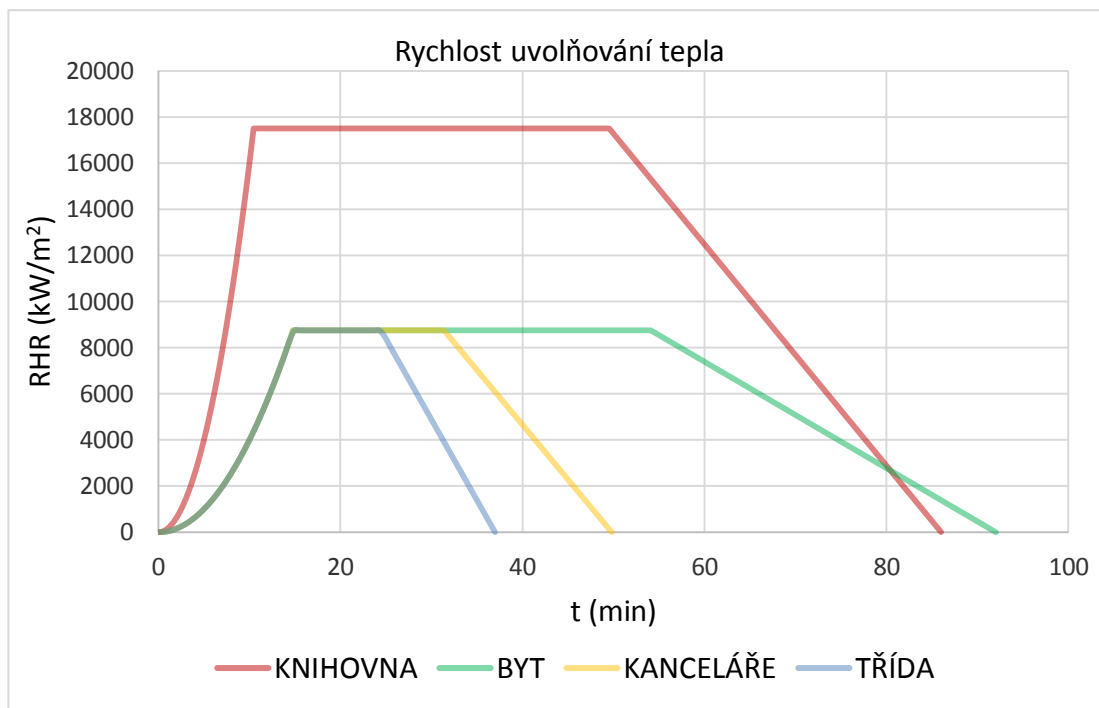
Maximální rychlost uvolňování tepla $RHR_f$			
provoz	Rychlost rozvoje požáru	$t_{\alpha}$ [s]	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
byty	Střední	300	250
nemocnice (pokoje)	Střední	300	250
hotely (pokoje)	Střední	300	250
knihovny	Velká	150	500
kanceláře	Střední	300	250
školní třídy	Střední	300	250
nákupní centrum	Velká	150	250
divadla (kina)	Velká	150	500
doprava (prostory pro veřejnost)	Malá	600	250

Obr. 23 Rychlost rozvoje požáru a  $HRR_f$  pro různé provozy dle ČSN EN 1991-1-2

- $A_{fi}$ ...plocha požáru [m<sup>2</sup>]
- $q_{f,d}$ ...návrhová hustota požárního zatížení [MJ/m<sup>2</sup>]
- $m$ ...součinitel hoření ( $m=0,8$ ) [-]
- $H_u$ ...čistá výhřevnost dřeva [MJ/m<sup>2</sup>]
- $A_w$ ...celková plocha otvorů [m<sup>2</sup>]
- $h_{eq}$ ...vážený průměr výšky okenních otvorů [m]



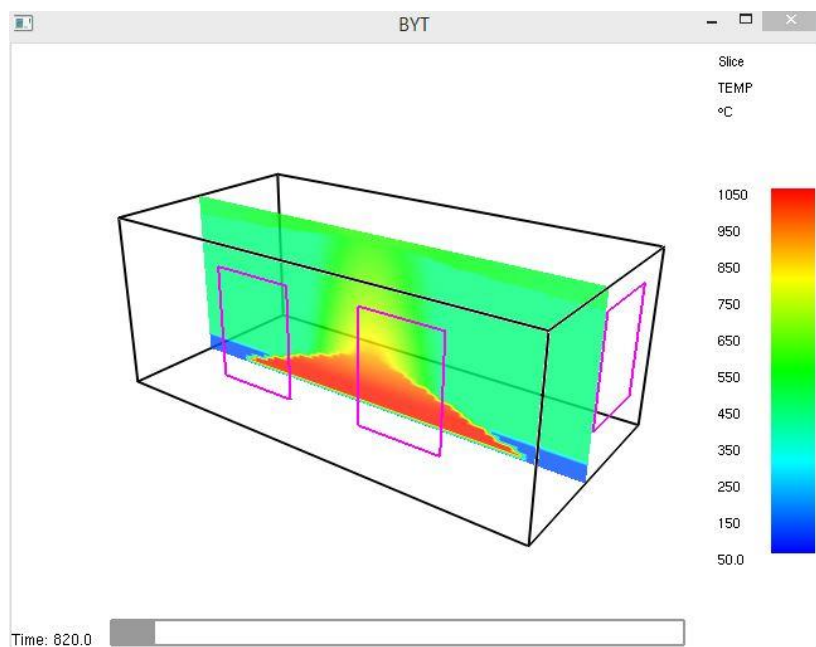
Obr. 24 Ukázka výpočtu a výstupu z programu FMC (rychlost uvolňování tepla pro knihovnu)



Obr. 25 Rychlost uvolňování tepla dle návrhového požáru <sup>2</sup>

### 3.3.3.2 Teplota horní vrstvy

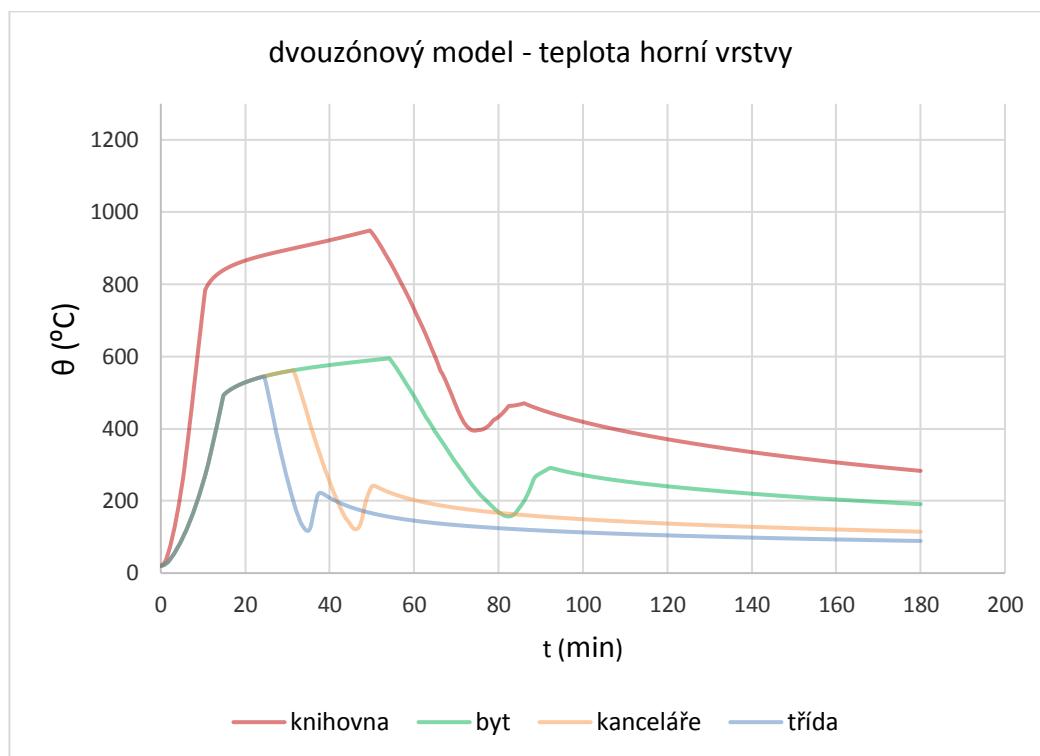
Model byl vytvořen za účelem získat teplotu plynu u spodního líce ŽB stropní desky, výstupem z programu CFAST je tedy teplota horní kouřové vrstvy (zóny).



Obr. 26 Ukázka dvouzónového modelu v programu CFAST (by)

<sup>2</sup> Při výpočtu křivky rychlosti uvolňování tepla bylo zjištěno, že ve všech čtyřech případech se jedná o požár řízený palivem.

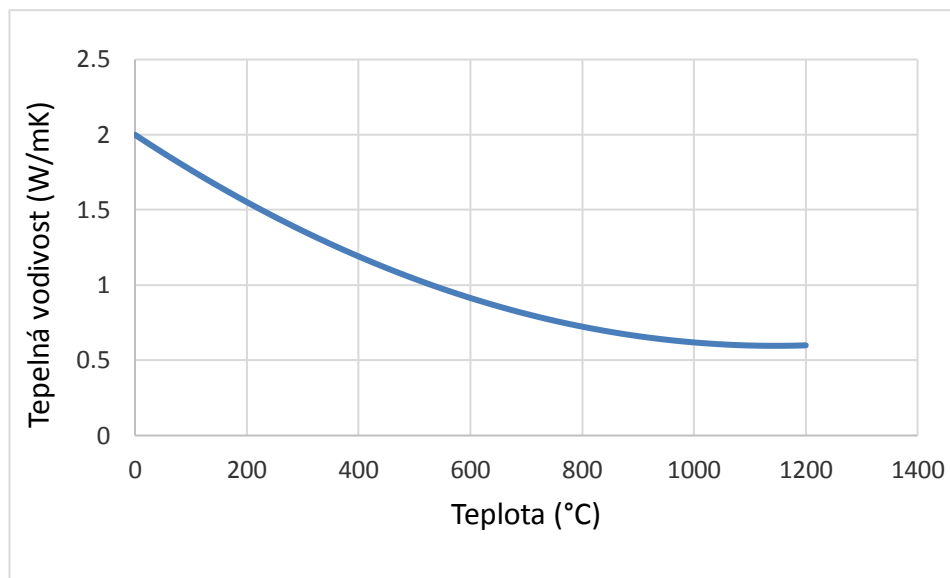
Průběh teploty v případě knihovny se výrazně odlišuje od ostatních provozů. Způsobeno je to tím, že knihovna je zde jediným PÚ, ve kterém je maximální rychlost uvolňování tepla produkovaná 1 m<sup>2</sup> požáru uvažována jako 500 kW/m<sup>2</sup>, kdežto u ostatních provozů je hodnota poloviční. Hodnoty odpovídají ČSN EN 1991-1-2. Rozdíly mezi průběhy teploty v kanceláři, třídě a bytě jsou pak způsobeny odlišnými hodnotami požárního zatížení.



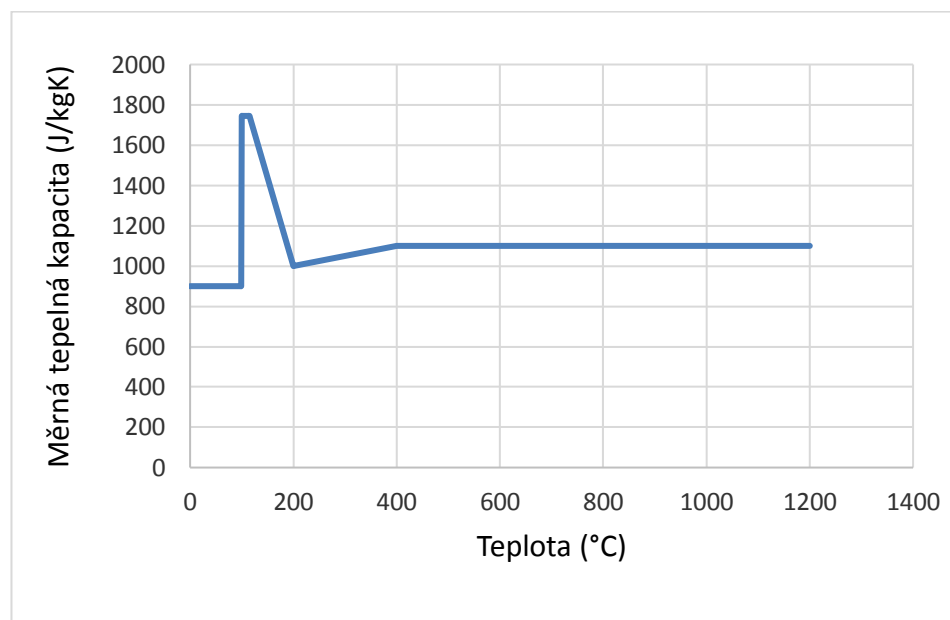
Obr. 27 Průběhy teploty horní vrstvy dle dvouzónového modelu z programu CFAST

### 3.4 Teplota v ose výztuže dle různých modelů požáru

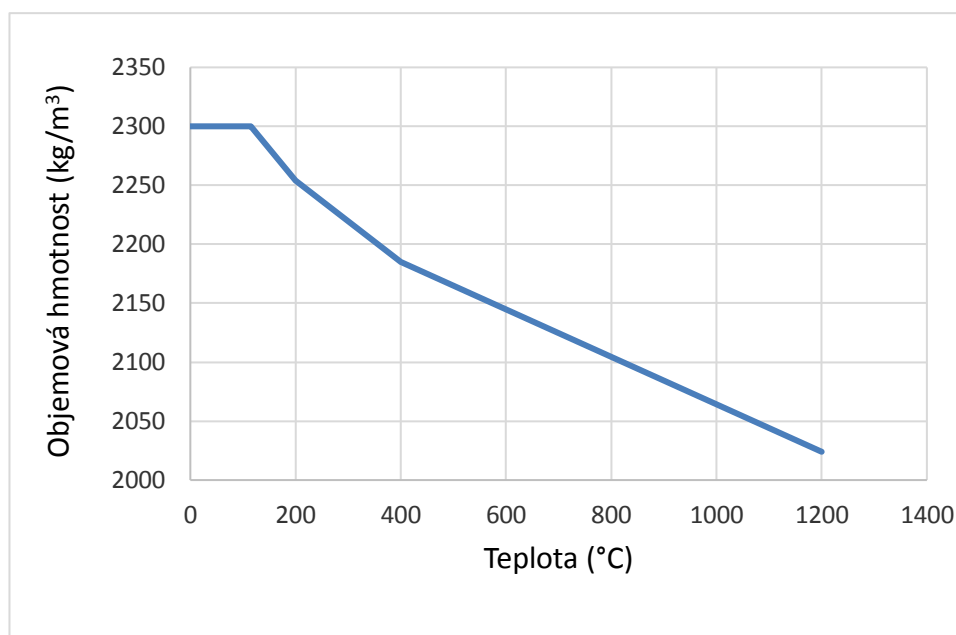
V programu TA\_s (25) byly určeny průběhy teploty v osách výztužných prutů v závislosti na teplotě plynu v posuzovaném PÚ. Program umožňuje import jakéhokoliv průběhu teploty z tabulkového procesoru. Při řešení nestacionárního vedení tepla je vliv výztuže zanedbán. Tepelně technické materiálové vlastnosti betonu v závislosti na teplotě lze do programu zadávat také pomocí souboru z tabulkového procesoru, tyto vlastnosti jsou uvažovány dle ČSN EN 1992-1-2 (Obr. 28, Obr. 29, Obr. 30).



Obr. 28 Tepelná vodivost betonu  $\lambda_{c,\theta}$  v závislosti na teplotě – horní mez dle ČSN EN 1992-1-2



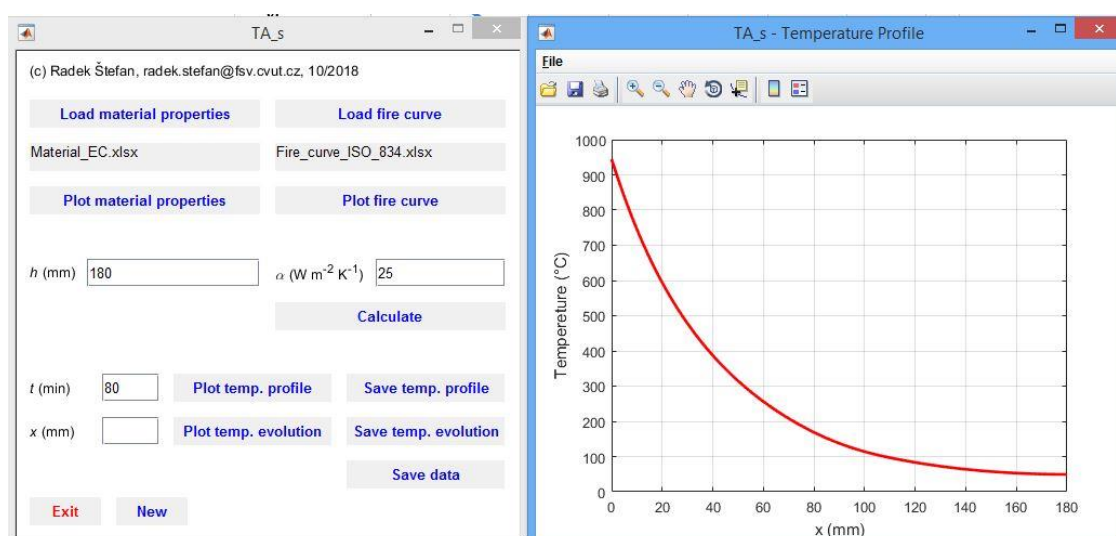
Obr. 29 Měrná tepelná kapacita betonu  $c_{p,\theta}$  v závislosti na teplotě – při vlhkosti 2,2%



Obr. 30 Objemová hmotnost betonu v závislosti na teplotě dle ČSN EN 1992-1-2

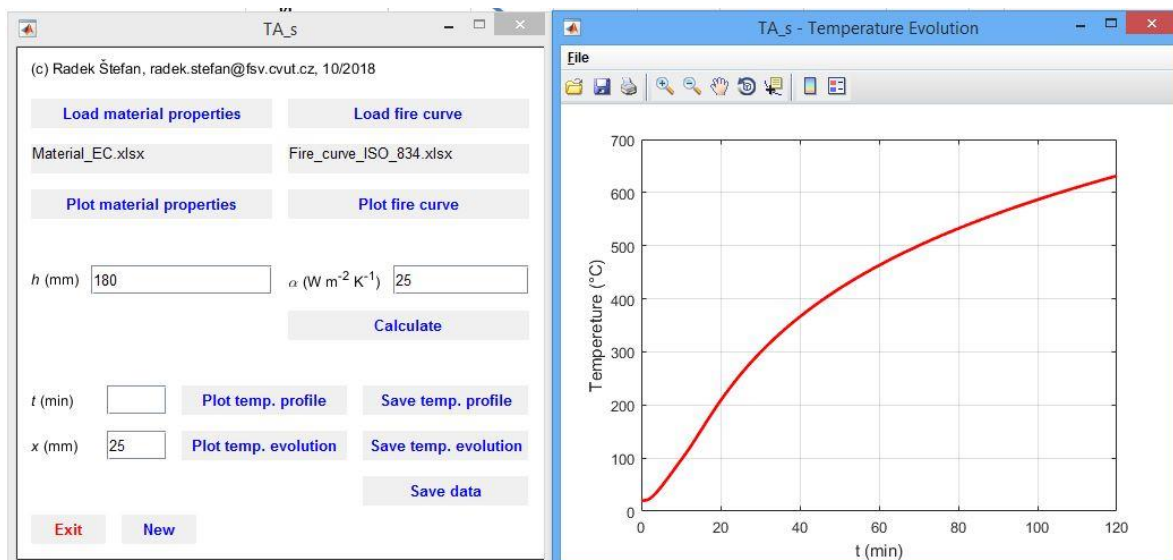
Program Temp analys science (25) umožňuje výpočet teplotního profilu zadaného průřezu v kterémkoliv čase požáru, zároveň umožňuje výpočet průběhu teploty v kterémkoliv vzdálenosti od ohřívání lince průřezu. Pro výpočet průběhu momentu únosnosti je důležitý právě průběh teploty v ose výztužných prutů.

Zásadní vliv na teplotu v ose výztužných prutů má především hodnota krycí betonové vrstvy, která způsobuje to, že průběh teploty výztuže vykazuje určité „zpoždění“ oproti průběhu teploty plynu v PÚ. Výpočet byl proveden pro hodnotu krycí vrstvy  $c=15\text{ mm}$  a  $c=25\text{ mm}$ . V praktické části této práce jsou uvedeny výsledky pro hodnotu krycí vrstvy  $c=15\text{ mm}$ , výsledky pro hodnotu krycí vrstvy  $c=25\text{ mm}$  jsou obsahem přílohy. Ochrana ocelové výztuže betonovou krycí vrstvou je jednou z hlavních výhod ŽB konstrukcí nejen v souvislosti s požární odolností.



Obr. 31 Ukázka výpočtu teplotního profilu v programu Temp analys science dle normové teplotní křivky v čase  $t=80\text{ min}$  (25)

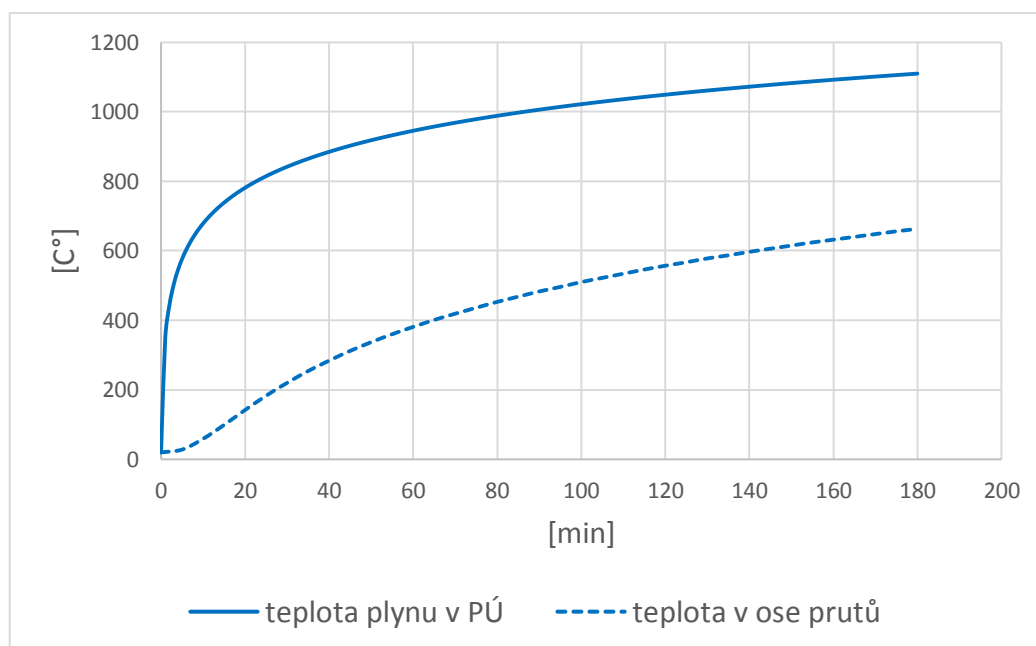




Obr. 32 Ukázka výpočtu průběhu teploty v ose výztužných prutů v programu Temp analys science dle normové teplotní křivky pro krytí hlavní nosné výztuže  $c=15$  mm (25)

### 3.4.1 Průběh teploty v ose výztužných prutů dle normové teplotní křivky

Následující graf (Obr. 33) znázorňuje teplotu plynů v PÚ spolu s teplotou v osách výztužných prutů.

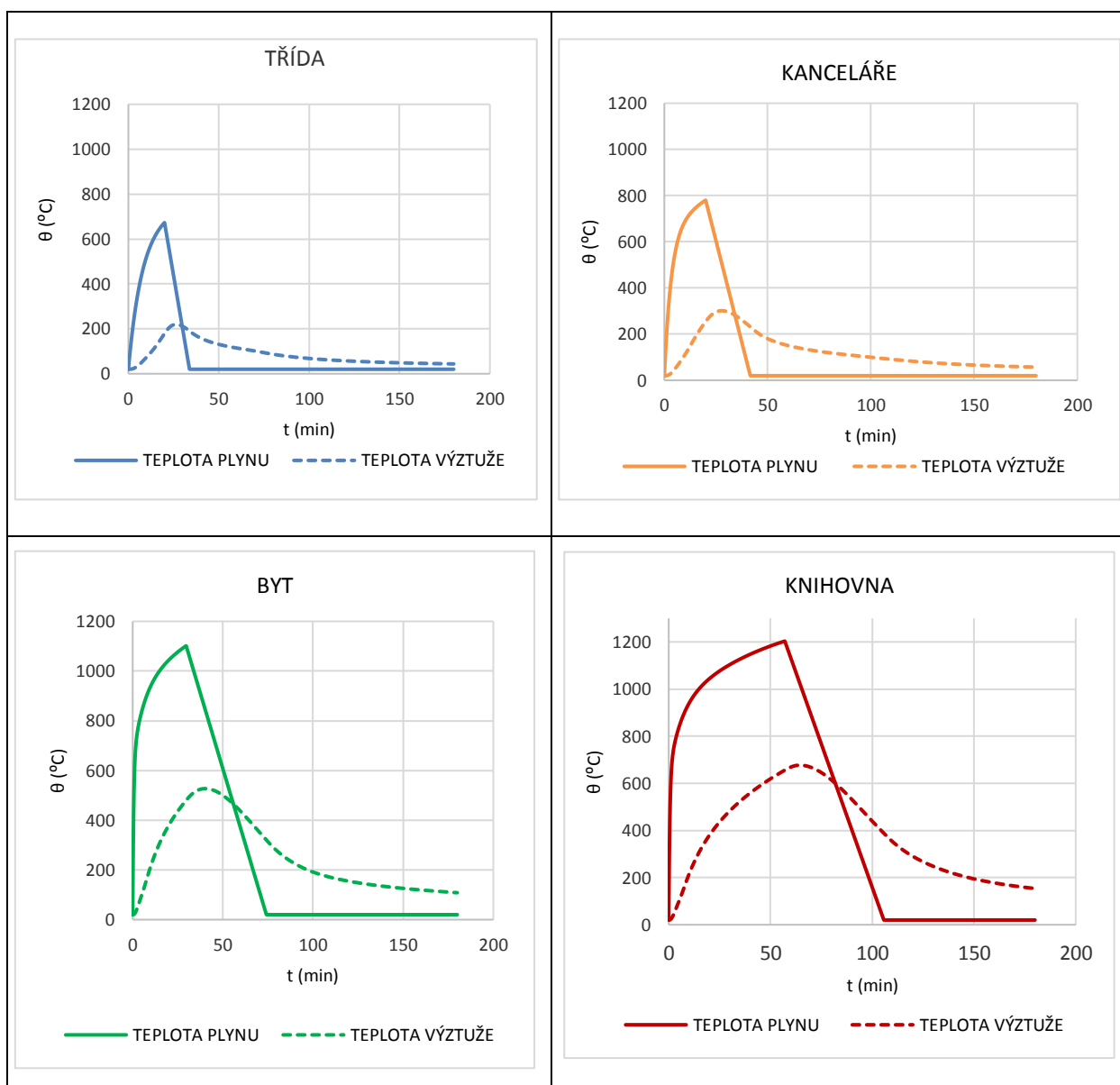


Obr. 33 Teplota plynu a teplota výztuže dle normové teplotní křivky

### 3.4.2 Průběh teploty v ose výztužných prutů dle parametrické teplotní křivky

Oproti průběhu teplot v případě normové teplotní křivky lze u parametrické křivky a dvouzónového modelu sledovat i chladnutí výztuže (Tab. 6). Akumulace tepla v konstrukci způsobuje, že konstrukce si zachovává svou teplotu, i když se teplota okolního plynu zásadně změní. Výztuž reaguje se zpožděním jak v případě zahřívání, tak v případě ochlazování.

Tab. 6 Průběhy teplot v osách výztužných prutů v závislosti na teplotě plynu dle parametrické teplotní křivky

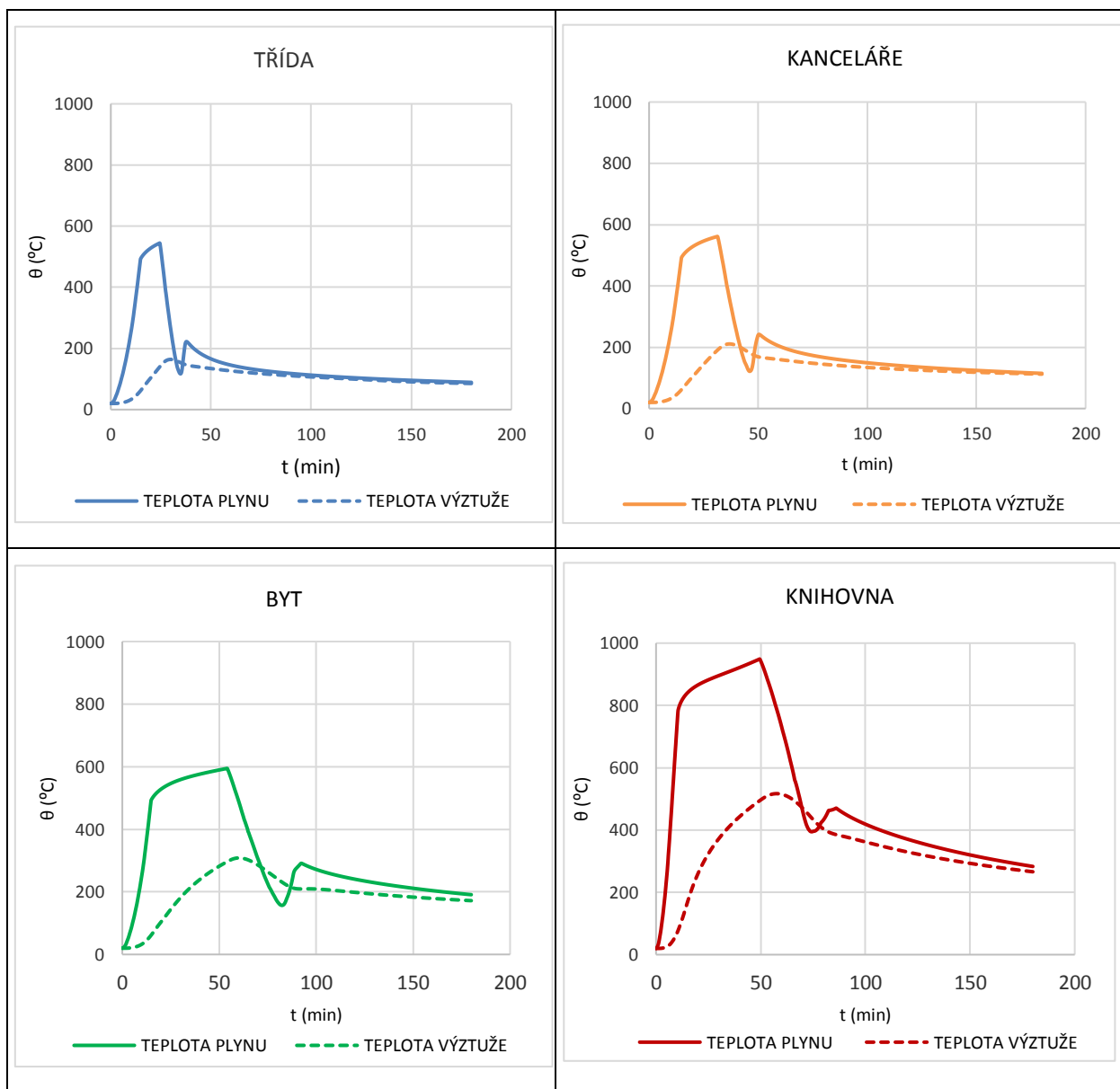


### 3.4.3 Teploty v ose výztužných prutů dle dvouzónového modelu

Jelikož jsou maximální teploty plynu dle dvouzónového modelu nejnižší ve srovnání s ostatními modely požáru, jsou i maximální teploty v ose výztužných prutů dle dvouzónového modelu nejnižší. Zároveň je možné sledovat, že v případě dvouzónových modelů je nárůst teploty plynu

pomalejší oproti parametrické a normové teplotní křivce. To má za následek, že teploty ve výztuži dosahují svých maximálních hodnot později než v případě parametrické teplotní křivky.

Tab. 7 Průběhy teplot v osách výztužných prutů v závislosti na teplotě plynu dle dvouzónového modelu



### 3.5 Posouzení požární odolnosti prostě podepřené desky pro různé modely požáru

Výše uvedené průběhy teploty v osách výztužných prutů byly použity jako vstupní data pro výpočet průběhu momentu únosnosti při požární situaci  $M_{Rd,fi}$  metodou izotermy 500 °C. V grafech jsou výsledky vypočtené dle různých modelů požáru porovnány s momentem od zatížení při požární situaci  $M_{Ed,fi}$ . Průběhy momentu únosnosti jsou uvedeny i v časovém intervalu kdy dochází k poklesu teplot v ose výztuže. V této fázi lze uvažovat, že redukováná mez kluzu oceli bude postupně nabývat své původní hodnoty, lze ji uvažovat jako plně obnovitelnou. Kdežto pro beton nelze po dosažení vysokých teplot uvažovat obnovitelnou mez pevnosti (26). Při vykreslení průběhu  $M_{Rd,fi}$  pro ŽB prostě podepřenou desku v poli se projeví pouze postupné obnovování meze kluzu oceli, protože se jedná o případ, kdy je zahříván pouze spodní líc desky (tažená vlákna). Teplota v oblasti tlačných betonových vláken nedosáhne takových hodnot, aby se mez pevnosti betonu musela redukovat.

Pokud má konstrukce splnit požadovanou požární odolnost z hlediska únosnosti (kritérium R), musí si svou únosnost zachovat po celou dobu požadované požární odolnosti. Skutečná požární odolnost (kritérium R, ohyb) konstrukce je čas, kdy nastává rovnost mezi momentem od zatížení a momentem únosnosti v závislosti na teplotě.

#### 3.5.1 Vnitřní síly za požární situace

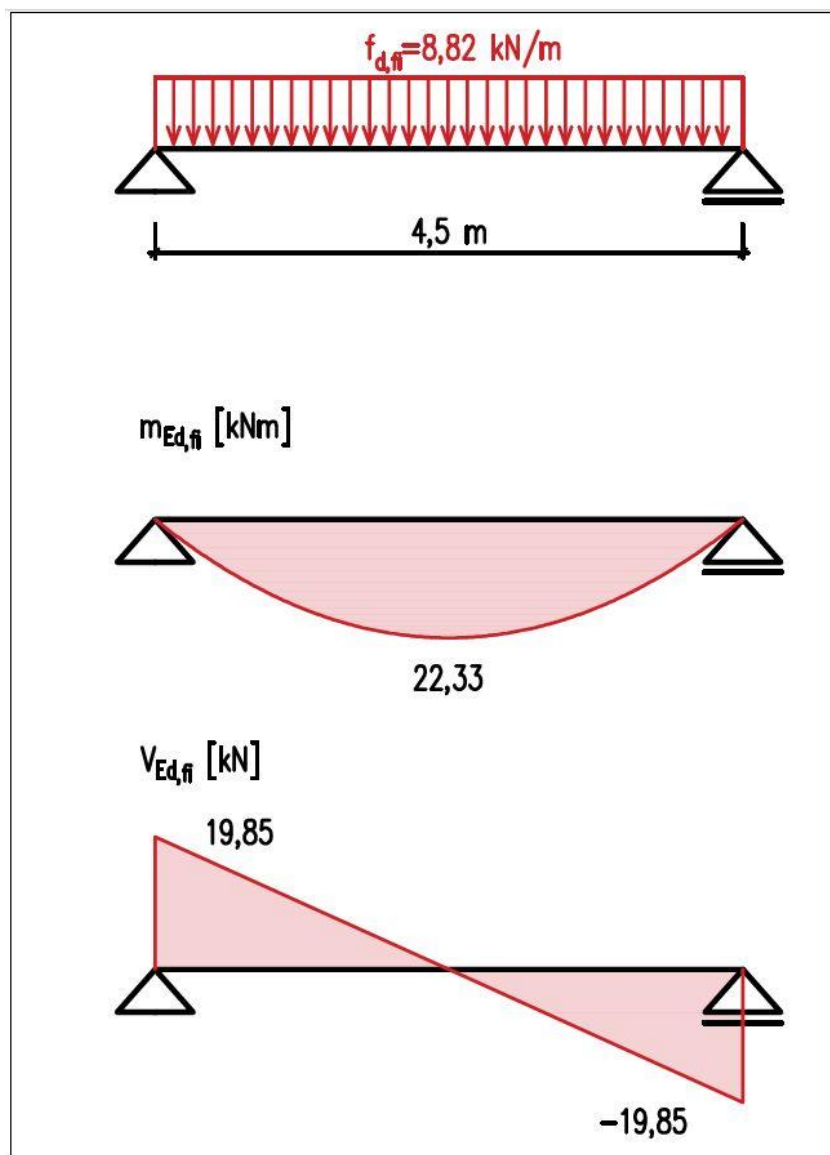
Návrhová hodnota příslušných účinků zatížení za požární situace je určena konzervativně pomocí redukčního součinitele pro úroveň návrhového zatížení při požární situaci  $\eta_{fi}=0,7$ .

Návrhový ohybový moment za požární situace:

$$M_{Ed,fi,max} = \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot \eta_{fi} \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot 12,6 \cdot 0,7 \cdot 4,5^2 = 22,33 \text{ kNm}$$

Návrhová posouvající síla za požární situace:

$$V_{Ed,fi,max} = \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot \eta_{fi} \cdot l = \frac{1}{2} \cdot 12,6 \cdot 0,7 \cdot 4,5 = 19,85 \text{ kN}$$



Obr. 34 Vnitřní síly za požární situace

### 3.5.2 Výpočet průběhu momentu únosnosti požáru metodou izotermy 500 °C

Postup výpočtu metody izotermy 500 °C je uveden v kapitole 2.6.3. Nejprve je nutné stanovit součinitel pro redukci meze kluzu oceli za zvýšených teplot  $k_{y,\theta}$ . a. spočítat průběh redukované meze kluzu oceli. Tento součinitel (respektive jeho průběh v závislosti na teplotě v ose výztužných prutů) je zde stanoven na základě ČSN EN 1992-1-2 (pro křivku č. 3). Jedná se o případ, kdy jsou ohřívána dolní tažená vlákna desky. Pevnost betonu v redukovaném průřezu se uvažuje stejná jako charakteristická hodnota pevnosti betonu za běžné teploty (v tlačené části průřezu desky nebylo dosaženo teplot takových, aby se musela pevnost betonu redukovat).

Obvyklým způsobem se stanoví návrhová hodnota únosnosti redukovaného průřezu s uvážením příslušných průběhů materiálových charakteristik. Tučně jsou označeny vstupní parametry měnící se v čase v závislosti na teplotě.

- Výška tlačené oblasti desky:

$$x_{fi} = \frac{A_s \cdot f_{syd,fi}}{b_{fi} \cdot 0,8 \cdot f_{cd,fi,20^\circ C}}$$

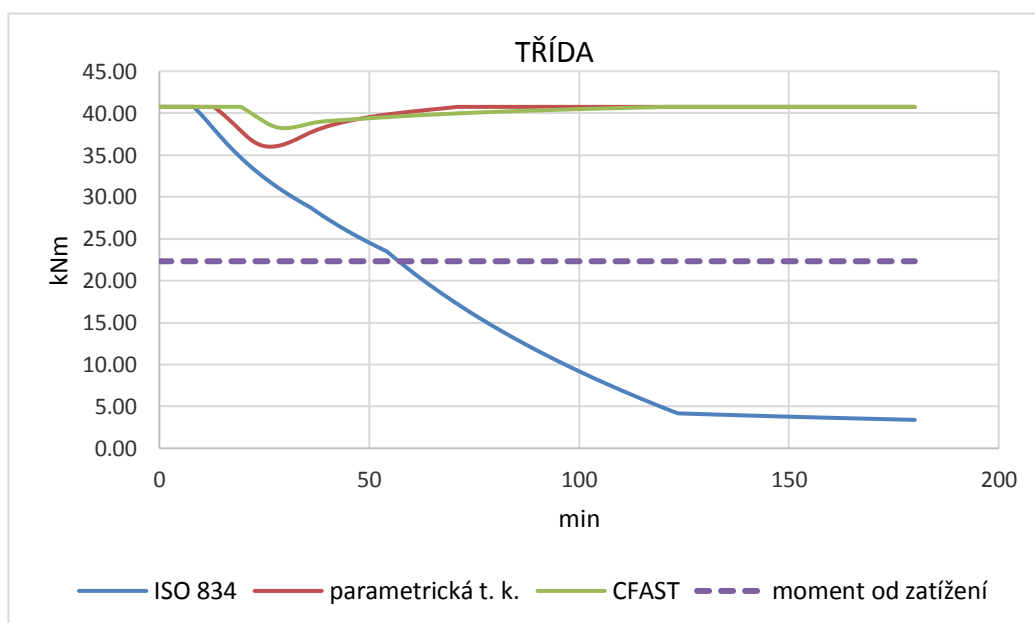
- Moment únosnosti při požární situaci

$$M_{Rd,fi} = A_s \cdot f_{syd,fi} \cdot (d_{fi} - 0,5 \cdot 0,8 \cdot x_{fi})$$

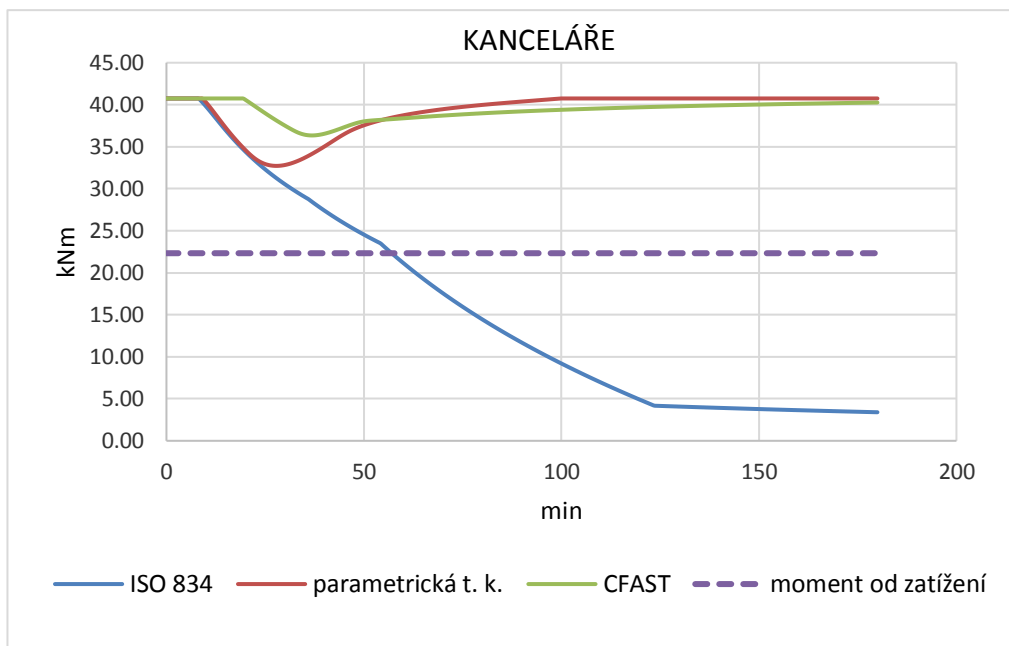
kde:

- $A_s$ ... plocha výztuže na šířku desky 1 metr ( $A_s = 523,6 \text{ mm}^2$ )
- $f_{syd,fi}$ ... návrhová hodnota meze kluzu výztuže při požární situaci (závislá na průběhu teploty v osách prutů)
- $b_{fi}$ ... šířka průřezu ( $b_{fi} = 1000 \text{ mm}^2$ )
- $f_{cd,fi,20^\circ C}$ ... návrhová hodnota tlakové pevnosti betonu v redukovaném průřezu (pro C 30/37  $f_{cd,fi,20^\circ C} = 30 \text{ MPa}$ )
- $d_{fi}$ ... účinná výška průřezu za požární situace ( $d_{fi} = 160 \text{ mm}$  pro krytí hlavní nosné výztuže  $c = 15 \text{ mm}$ ,  $d_{fi} = 150 \text{ mm}$  pro krytí  $c = 25 \text{ mm}$ )

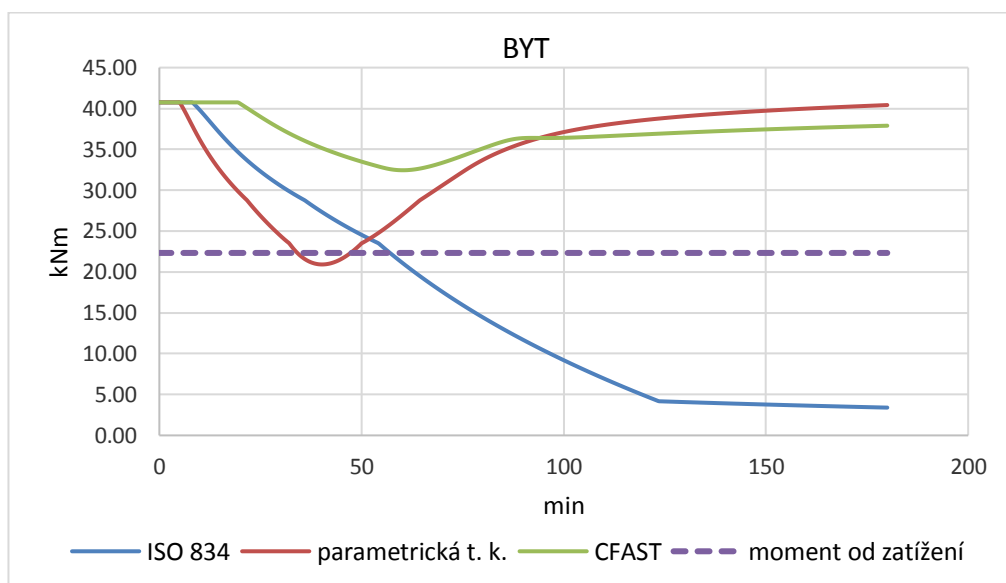
Výpočet výše uvedených veličin měnících se v čase v závislosti na teplotě proběhl v programu MS Excel. V následujících grafech (Obr. 35, Obr. 36, Obr. 37, Obr. 38) jsou uvedeny výsledné průběhy momentu únosnosti  $M_{Rd,fi}$  spolu s momentem od zatížení při požární situaci  $M_{Ed,fi}$  pro krytí hlavní nosné výztuže  $c = 15 \text{ mm}$ . Čas, při kterém poprvé dojde k rovnosti těchto dvou hodnot, je skutečnou požární odolností konstrukce z hlediska kritéria R (nosnosti).



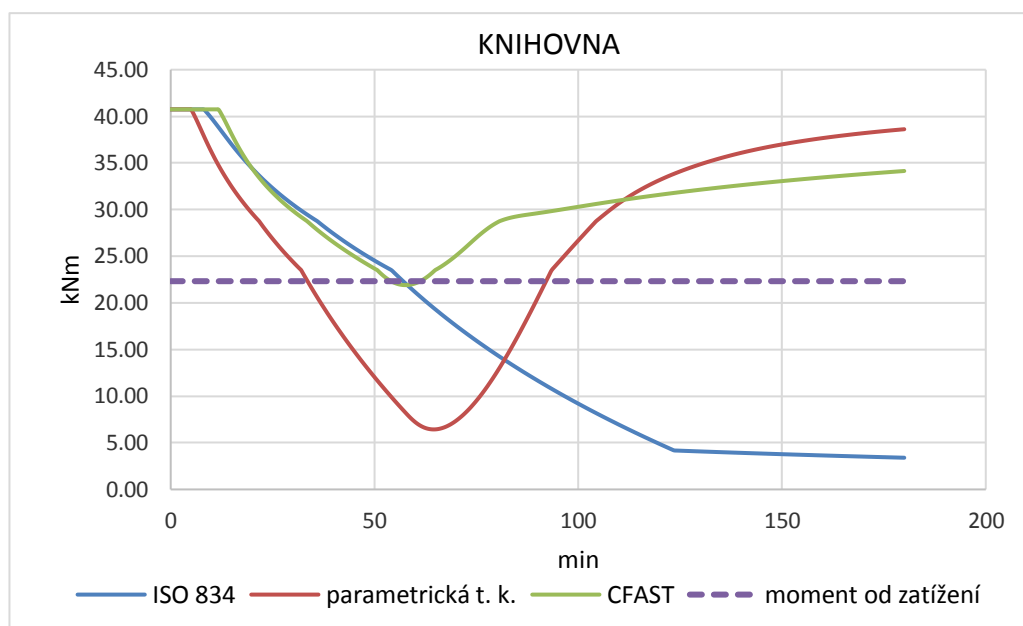
Obr. 35 Průběh momentu únosnosti za požární situace dle různých modelů požáru pro PÚ TŘÍDY



Obr. 36 Průběh momentu únosnosti za požární situace dle různých modelů požáru pro PÚ KANCELÁŘE



Obr. 37 Průběh momentu únosnosti za požární situace dle různých modelů požáru pro PÚ BYTU



Obr. 38 Průběh momentu únosnosti za požární situace dle různých modelů požáru pro PÚ KNIHOVNY

Tab. 8 Čas skutečné požární odolnosti ŽB desky pro různé modely požáru pro krytí hlavní nosné výztuže  $c=15\text{ mm}$  a  $c=25\text{ mm}$

		Skutečná PO	
		15 mm	25 mm
	KRYTÍ →		
ISO 834		57 min	93 min
PARAMETRICKÁ T.K.	třída	~	~
	kanceláře	~	~
	byt	34 min	~
	knihovna	33 min	55 min
CFAST	třída	~	~
	kanceláře	~	~
	byt	~	~
	knihovna	54 min	~
~ znamená, že nedošlo k překročení únosnosti po celou dobu trvání požáru			



## 4 Závěr

Pro posouzení únosnosti konstrukce při požáru je nejdříve třeba získat potřebné údaje o konstrukci, průběhu teploty v jejím okolí a uvnitř konstrukce samotné. V dnešní době je na rozdíl od minulosti dostupná celá řada možností, jakým způsobem modelovat požár, konstrukci a jakým způsobem přistoupit k jejímu posouzení. Volba různých kombinací těchto postupů vede zpravidla k odlišným výsledkům. To, jaký přístup je pro posouzení zvolen, hraje významnou roli.

Praktická část této práce porovnává tři různé modely požáru. Sledován je jejich vliv na průběh teploty v PÚ, vliv na průběh teploty ve výztuži a vliv na průběh momentu únosnosti prostě podepřené ŽB desky. Požární úseky byly zvoleny tak, aby byly zastoupeny jak provozy s nízkou hustotou požárního zatížení, tak provozy s vysokou hustotou požárního zatížení.

Porovnávali-li teploty plynu v PÚ s nižší hustotou požárního zatížení (třída a kanceláře), je vidět, že parametrická teplotní křivka se ve své počáteční fázi téměř shoduje s průběhem dle normové teplotní křivky. Průběh teploty dle dvouzónového modelu v programu CFAST dosahuje zhruba o 200 až 300 °C nižších maximálních teplot. Nejvíce se průběhy liší pro PÚ bytu, kde parametrická teplotní křivka dosahuje ve své počáteční fázi výrazně vyšších teplot než normová teplotní křivka, teploty dle dvouzónového modelu jsou však téměř ve stejném poměru, jako je tomu v PÚ třídy a kanceláře. V PÚ knihovny, kde je nejvyšší hustota požárního zatížení, pak parametrická teplotní křivka opět výrazně převyšuje normovou teplotní křivku a teplota dle dvouzónového modelu dosahuje podobných hodnot jako dle normové křivky. O normové teplotní křivce se mluví jako o konzervativní, z výsledků plyne, že při porovnání s parametrickou teplotní křivkou tomu tak nemusí být (viz. porovnání průběhu teplot v PÚ bytu a PÚ knihovny). Normová teplotní křivka je v souvislosti s posuzování PO ŽB konstrukcí konzervativní především v tom, že nezahrnuje fázi chladnutí.

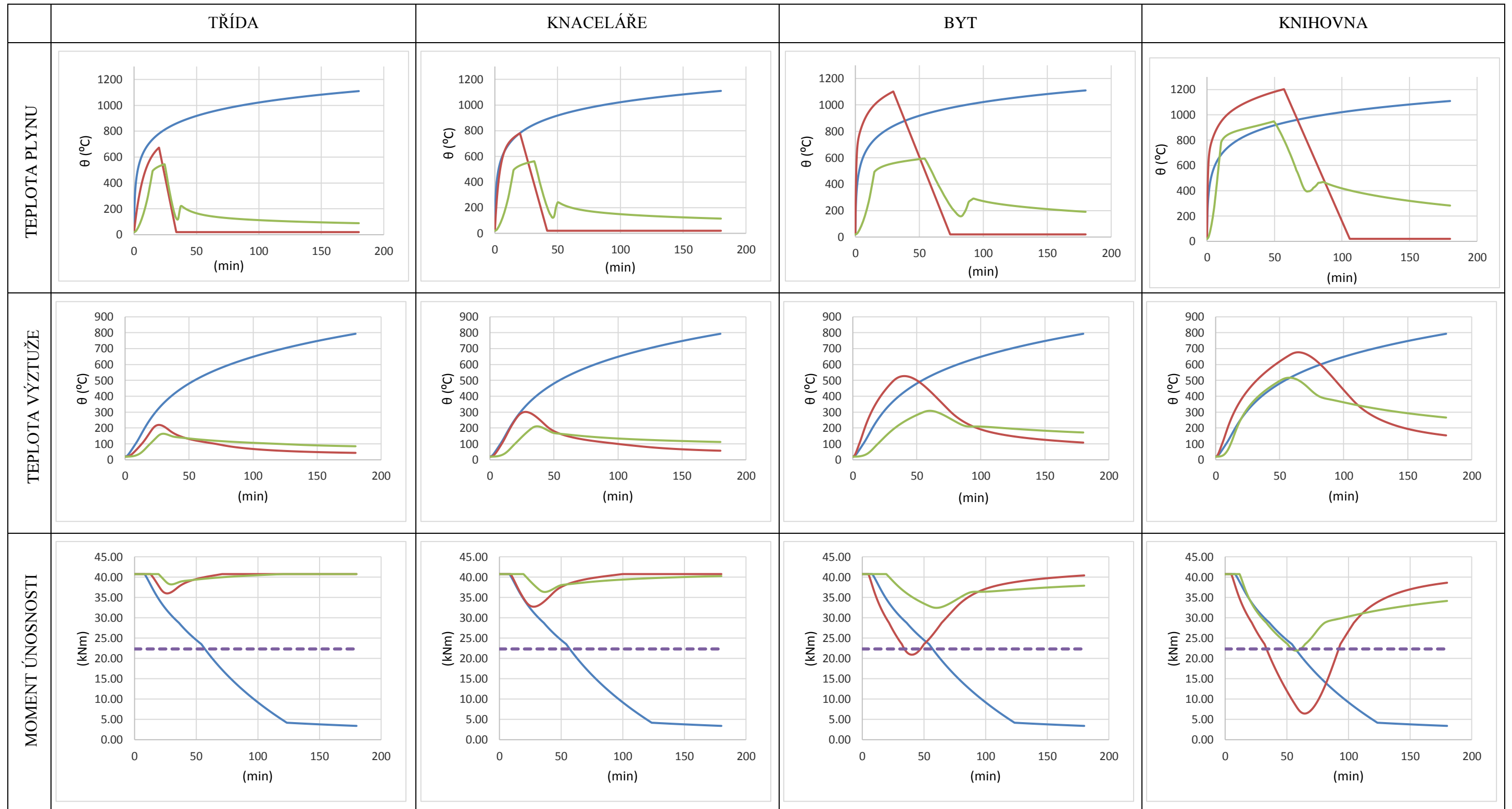
Výše popsání odlišnosti v průběhu teploty plynu se výrazně projevují při posouzení PO ŽB prostě podepřené desky s hodnotou krytí hlavní nosné výztuže  $c=15\text{ mm}$ . Nejlépe jsou výsledky vidět v grafech (Obr. 35, Obr. 38) a tabulce (Tab. 8). Například, pokud by byla požadovaná požární odolnost této desky 45 minut, pak by byla dle normové teplotní křivky a dvouzónového modelu splněna ve všech PÚ, kdežto dle parametrické teplotní křivky by pro PÚ knihovny a bytu splněna nebyla (knihovna: porušení v 33 minutě, byt: porušení v 34 minutě). Takovýchto příkladů lze vymyslet několik, a to i pro desku s krytím hlavní nosné výztuže  $c=25\text{ mm}$ .

Na základě těchto výsledků je zřejmé, že pokud bychom chtěli dokazovat PO ŽB konstrukce v PÚ s vyšším požadavkem na PO (např. 60 minut a výše), je dobré zvolit zpřesněné modely požáru. Pomocí parametrické teplotní křivky lze dosáhnout úspornějšího návrhu oproti normové teplotní křivce pouze v souvislosti s PÚ s relativně nízkým požárním zatížením (třída a kanceláře). Důvodem je to, že dle parametrické teplotní křivky v PÚ s nízkou hodnotou požárního zatížení (třída a kanceláře) nebude po celou dobu trvání požáru dosaženo takové teploty v osách výztužných prutů, aby došlo k porušení prvku. Přestože se průběh teploty v počáteční fázi dle normové a parametrické teplotní křivky moc neliší, zásadním se stává fakt, že parametrická

křivka zahrnuje i fázi chladnutí, kdežto normová křivka tuto fázi postrádá. Jelikož průběh teploty ve výztuži má oproti průběhu teploty v PÚ „zpoždění“ (díky krycí betonové vrstvě), nestihne se výztuž zahřát tak, aby došlo k porušení prvku. Naopak u PÚ s relativně vysokým požárním zatížením (byt a knihovna) jsou výsledky dle parametrické teplotní křivky ještě více konzervativní, nežli je tomu u normové teplotní křivky. Teploty působí dostatečně dlouho na to, aby se výztuž zahřála. Nejekonomičtějšího návrhu lze dosáhnout v případě dvouzónového modelu, kdy k porušení prvku dojde pouze v PÚ knihovny v čase 54 min (33 min dle parametrické křivky, 57 min dle normové křivky). Při použití dvouzónového modelu v ostatních provozech (třída, kanceláře, knihovna) nedojde k porušení desky po celou dobu trvání požáru.

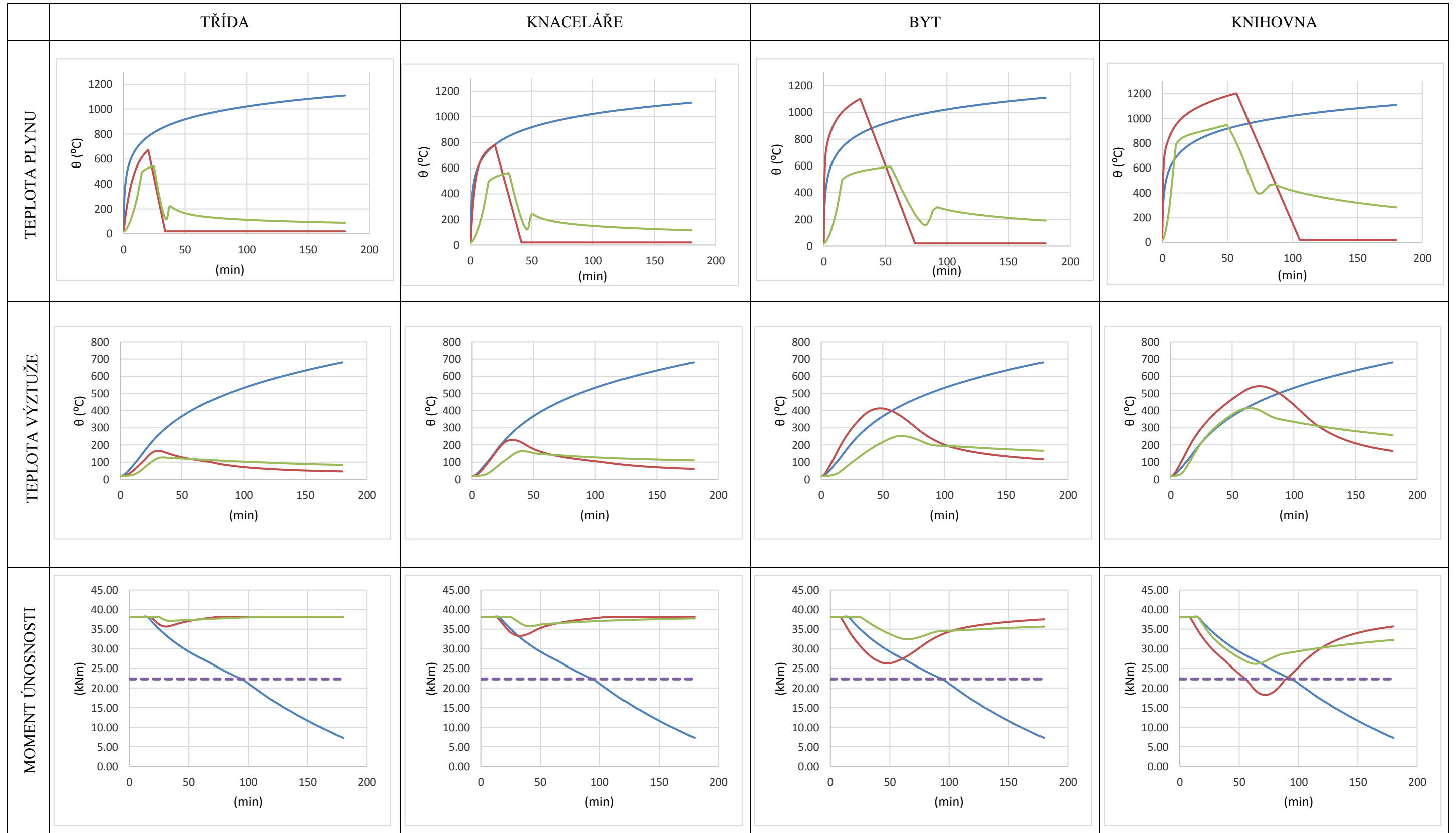
## 5 Příloha přehledného shrnutí výsledků pro obě varianty krytí hlavní nosné výztuže

### 5.1 Výsledky pro krytí $c=15$ mm



— NORMOVÁ T. K. — PARAMETRICKÁ T. K. — CFAST UPER L. — moment od zatížení

## 5.2 Výsledky pro krytí c=25 mm



— NORMOVÁ T. K. — PARAMETRICKÁ T. K. — CFAST UPER L. — moment od zatížení

## 6 Seznamy obrázků a tabulek

### Seznam obrázků

Obr. 1 Trojúhelník hoření (1) .....	2
Obr. 2 formy sdílení tepla (3) .....	3
Obr. 3 rozvoj požáru v uzavřeném prostoru (7) .....	6
Obr. 4 Fire plume (9) .....	6
Obr. 5 Požár řízený palivem nebo ventilací (10) .....	7
Obr. 6 flashover (12) .....	8
Obr. 7 Přehled modelů požáru v uzavřeném prostoru .....	8
Obr. 8 nominální teplotní křivky (14) .....	10
Obr. 9 Typický tvar parametrické teplotní křivky .....	12
Obr. 10 Schéma dvouzónového modelu (16) .....	13
Obr. 11 hranice dřeva modelovaná v programu FDS (15) .....	14
Obr. 12 Rychlost uvolňování tepla pro sedačku (18) .....	15
Obr. 13 Typický průběh návrhového požáru .....	16
Obr. 14 Schéma průběhu teploty při zohlednění přestupu tepla .....	18
Obr. 15 Možné kombinace pro návrhové přístupy .....	23
Obr. 16 Schéma postupu při využití metody izotermie 500 °C pro ŽB desku .....	25
Obr. 17 schéma posuzovaného prostoru .....	27
Obr. 18 schéma uložení ŽB desky .....	28
Obr. 19 Zatížení a vnitřní síly za běžné teploty .....	29
Obr. 20 Schéma posuzovaných průřezů .....	31
Obr. 21 Ukázka výpočtu a výstupu z programu FMC (průběh teploty v kanceláři) .....	34
Obr. 22 Teplota plynu dle parametrické teplotní křivky .....	35
Obr. 23 Rychlost rozvoje požáru a $HRR_f$ pro různé provozní podmínky dle ČSN EN 1991-1-2 .....	36
Obr. 24 Ukázka výpočtu a výstupu z programu FMC (rychlost uvolňování tepla pro knihovnu) .....	36
Obr. 25 Rychlost uvolňování tepla dle návrhového požáru .....	37
Obr. 26 Ukázka dvouzónového modelu v programu CFAST (byt) .....	37
Obr. 27 Průběhy teploty horní vrstvy dle dvouzónového modelu z programu CFAST .....	38

---

Obr. 28 Tepelná vodivost betonu $\lambda c, \theta$ v závislosti na teplotě – horní mez dle ČSN EN 1992-1-2.....	39
Obr. 29 Měrná tepelná kapacita betonu $cp, \theta$ v závislosti na teplotě – při vlhkosti 2,2%.....	39
Obr. 30 Objemová hmotnost betonu v závislosti na teplotě dle ČSN EN 1992-1-2.....	40
Obr. 31 Ukázka výpočtu teplotního profilu v programu Temp analys science dle normové teplotní křivky v čase $t=80$ min (25).....	40
Obr. 32 Ukázka výpočtu průběhu teploty v ose výztužných prutů v programu Temp analys science dle normové teplotní křivky pro krytí hlavní nosné výztuže $c=15$ mm (25).....	41
Obr. 33 Teplota plynu a teplota výztuže dle normové teplotní křivky.....	41
Obr. 34 Vnitřní síly za požární situace.....	45
Obr. 35 Průběh momentu únosnosti za požární situace dle různých modelů požáru pro PÚ TŘÍDY.....	46
Obr. 36 Průběh momentu únosnosti za požární situace dle různých modelů požáru pro PÚ KANCELÁŘE.....	47
Obr. 37 Průběh momentu únosnosti za požární situace dle různých modelů požáru pro PÚ BYTU.....	47
Obr. 38 Průběh momentu únosnosti za požární situace dle různých modelů požáru pro PÚ KNIHOVNY.....	48

## Seznam tabulek

Tab. 1 Návrh požární odolnosti konstrukce (7).....	8
Tab. 2 přehled matematických modelů požáru .....	9
Tab. 3 Návrh požární odolnosti konstrukce (7).....	17
Tab. 4 Návrh požární odolnosti konstrukce (7).....	20
Tab. 5 Výčet návrhových metod dle jejich složitosti (20) .....	22
Tab. 6 Průběhy teplot v osách výztužných prutů v závislosti na teplotě plynu dle parametrické teplotní křivky .....	42
Tab. 7 Průběhy teplot v osách výztužných prutů v závislosti na teplotě plynu dle dvouzónového modelu .....	43
Tab. 8 Čas skutečné požární odolnosti ŽB desky pro různé modely požáru pro krytí hlavní nosné výztuže $c=15$ mm a $c=25$ mm.....	48

## 7 Literatura

1. **Brumovská, Irena.** *Speciální chemie pro požární ochranu: učební texty.* Praha : Ministerstvo vnitra, generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2008.
2. **Sýkora, Karel.** *Základy sdílení tepla.* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
3. **Procházka, Jaroslav, Štefan, Radek a Vašková, Jitka.** *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru.* Praha : ČVUT, 2010.
4. **Blahož, Vladimír a Kadlec, Zdeněk.** *Základy sdílení tepla.* Ostrava : SPBI, 2011.
5. **Kučera, Petr.** *Požární inženýrství: dynamika požáru.* Ostrava : SPBI, 2009. 987-80-7385-074-6.
6. **Drysdale, Dougal.** *An Introduction to Fire Dynamics, Third Edition.* Edinburg : John Wiley, 2011. 978-0-470-31903-1.
7. **Wald, František.** *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2005.
8. **Kopecký, Stanislav, Řepík, Jaroslav a Škoda, Jakub.** Vliv ventilace na způsob vyšetřování požáru v uzavřeném prostoru. *Časopis 112.* XVI, 2017, 11.
9. **Wei, Yao, Shouxiang, Lu a Jian, Wang.** Numerical prediction of effects of gravity on the centerline temperature and velocity of axi-symmetric fire plumes. *Journal of Fire Sciences.* MLA 8. Edition, 2018, Sv. XXV, 5.
10. **Hartín, Ed.** Understanding Flashover. *CFBT-US.* [Online] 31. srpen 2010. [Citace: 2. Prosinec 2018.] <http://cfbt-us.com/wordpress/?p=775>.
11. **Karlsson, Bjorn a Quintiere, James.** *Enclosure Fire Dynamics.* Boca Raton, Florida : CRC press LCC, 2010. 0-8493-1300-7.
12. **Provázek, Jaroslav.** zachranar.cz. *ZÁCHRANÁŘ.* [Online] 28. leden 2014. <https://zachranar.cz/2014/01/flashover/>.
13. **Kučera, Petr a Pezdová, Zdeňka.** *Základy matematického modelování požáru.* Ostrava : SPBI, 2010.
14. **Kučera, Petr a Pokorný, Jiří.** Stanovení teplotního zatížení stavebních konstrukcí při požáru. *Časopis Konstrukce.* 2010.
15. **Benýšek, Martin.** *Analýza požární odolnosti betonových prvků s uvažováním zjednodušených a zpřesněných modelů požáru. Diplomová práce.* Praha : ČVUT v Praze, 2013.
16. **Pokorný, Marek.** *Instalační šachty z požárního hlediska. Disertační práce.* Praha : ČVUT v Praze, 2012.
17. **Wald, František, a další.** *Modelování dynamiky požáru v budovách.* Praha : ČVUT v Praze, 2017.



- 
18. **Ed, Hartin.** cfbt-us. [Online] 2. únor 2009. [Citace: 10. listopad 2018.] <http://cfbt-us.com/wordpress/?tag=compartment-fire-behavior>.
  19. **Švec, Jiří a Pavel, Švec.** Přestup tepla. *Požární ochrana*. Technická univerzita Ostrava; SPBI, 2010, Sv. XIX.
  20. *Fire desing of concrete structures - materials, structures and modeling (Bulletin 38)*. Lausanne : fib, 2007.
  21. **ČSN EN 1992-1-2.** *Navrhování betonových konstrukcí - část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinka požáru*. Praha : ČNI, 2009.
  22. **Procházka, Jaroslav, a další.** *Navrhování betonových konstrukcí příručka k ČSN EN 1992-1-1 a ČSN EN1992-1-2*. Praha : ČKAIT, 2010.
  23. **Benýšek, Martin a Radek, Štefan.** FMC Fire Models Calculator, version 2.0 [software]. Březen 2017.
  24. **NIST - National Institute of Standards and Technology .** CFAST 7.2.3 [software]. Srpen 2017.
  25. **Štefan, Radek.** TA\_s Temp Analysis science [software]. Říjen 2018.
  26. **Dimia, Salah Mohamed, a další.** Collapse of concrete columns during and after the cooling phase of fire. *Journal of Fire Protection Engineering*. 2011, 21.
  27. *Beton a požár*. György L. Balázs, Éva Lublóy, Sándor Mezei. 1/2013, : BETON THS, S. R. O., 2013.
  28. **ČSN EN 1991-1-2.** *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha : ČNI, 2004.
  29. **Chen, Shicai, Zhang, Yong, Ren, Aizhu.** A simple method for combining fire and structural models and its application to fire safety evaluation. *Automation in Construction*. 2018, 87.
  30. **Benýšek, Martin, Štefan, Radek, Procházka, Jaroslav.** Analysis of Fire Resistance of Concrete Structural Members Based on Different Fire Models: An Illustrative Example of the Slab Panel Assessment. *25th Czech Concrete Day*. 2018.