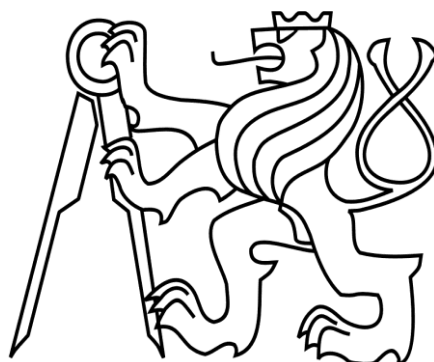


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

APLIKACE RŮZNÝCH MODELŮ POŽÁRU PRO POSOUZENÍ POŽÁRNÍ ODOLNOSTI KONSTRUKCÍ

**APPLICATION OF DIFFERENT FIRE MODELS
FOR STRUCTURAL FIRE DESIGN**

autor práce: Bc. Vladislava Svobodová

vedoucí práce: Ing. Martin Benýšek

2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Svobodová	Jméno: Vladislava	Osobní číslo: 460373
Zadávající katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Aplikace různých modelů požáru pro posouzení požární odolnosti konstrukcí	
Název diplomové práce anglicky: Application of different fire models for structural fire design	
Pokyny pro vypracování:	
Rešerše literatury	
Analýza dostupných modelů požáru	
Analýza metod pro posouzení požární odolnosti konstrukcí	
Řešený příklad	
Vyhodnocení	
Závěr	
Seznam doporučené literatury:	
ČSN EN 1991-1-2: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí, Část 1-2: Obecná zatížení - zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru	
ČSN EN 1992-1-2: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí, Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru	
DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12: National Annex - Nationally determined parameters - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire	
DS/EN 1991-1-2 DK NA:2014 National Annex to Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire	
PROCHÁZKA, J., ŠTEFAN, R., VAŠKOVÁ, J. Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru	
KARLSSON, B., QUINTIERE, J. Enclosure Fire Dynamics. College Park, Maryland, USA: CRC Press LLC, 2000. ISBN 978-048-49313-00-4	
KUČERA, P., PEZDOVÁ, Z. Základy matematického modelování požáru. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-095-1	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Martin Benýšek	
Datum zadání diplomové práce: 29.9.2020	Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<p><i>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“.</i></p>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

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

V Praze dne 4. ledna 2021

.....
Svobodová Vladislava

Poděkování:

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Martinu Benýškovi za vstřícnost, cenné rady a připomínky při konzultacích, které mi pomohly při zpracování této diplomové práce.

Dále bych chtěla poděkovat svým rodičům, kteří mi umožnili studovat na vysoké škole a po celou dobu studia mě plně podporovali.

V Praze dne 4. ledna 2021

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na matematické modely požáru a také na to, jak velký vliv mají tyto modely požáru na výslednou požární odolnost konstrukcí. V první části této diplomové práce byla provedena analýza jednotlivých matematických modelů požáru. Detailní pozornost byla zaměřena především na parametrické teplotní křivky a jejich výpočty. Konkrétně byla popsána křivka dle ČSN EN 1991-1-2, německé národní přílohy (DIN EN 1991-1-2/NA), která se též nazývá iBMB křivka a dánské národní přílohy (DS/EN 1991-1-2 DK NA). Dále byla provedena analýza metod pro posuzování požární odolnosti konstrukcí. Pro analýzu parametrických teplotních křivek byl vytvořen vlastní výpočetní program pomocí programovacího jazyka Python. Program byl vytvořen jak v české, tak anglické verzi. Pomocí vytvořeného programu byla provedena analýza vstupních parametrů pro vybrané parametrické teplotní křivky. V další části této práce byla v rámci řešeného příkladu provedena analýza vlivu parametrických teplotních křivek na výslednou požární odolnost železobetonové stropní desky a trámu. V závěru práce byl popsán vliv výběru modelu požáru na výslednou požární odolnost.

Klíčová slova

Modely požáru; parametrické teplotní křivky; iBMB křivka; požární odolnost; železobeton

Abstract

This diploma thesis focuses on mathematical fire models and on the impact of the models on the final fire resistance of the building construction. First part of the master thesis deals with analysis of individual mathematical models of fire with detail on parametric temperature-time curves and their calculations. More specifically it describes the curve of ČSN EN 1991-1-2, German national annex (DIN EN 1991-1-2/NA), also known as iBMB curve and Danish national annex (DS/EN 1991-1-2 DK NA). Further on the analysis of methods for assessing the fire resistance of structures was performed. Using the programming language Python original computing program was created to analyse parametric temperature-time curves. The computing program was created both in Czech and English versions. Using the said program an analysis was made of the entry parameters of selected parametric temperature-time curves. In the following section of this master thesis an analysis of the parametric temperature-time curves and their impact on the fire resistance of the reinforced concrete slab and beam was done as a part of a case study. Final part of this thesis looks into the impact of the selection of fire model on the resulting fire resistance.

Keywords

Fire models; parametric temperature-time curves; iBMB curve, fire resistance; reinforced concrete

Obsah

1	Úvod	12
2	Matematické modely požáru	13
2.1	Nominální teplotní křivky	13
2.1.1	Normová teplotní křivka	13
2.1.2	Křivka vnějšího požáru	14
2.1.3	Uhlovodíková teplotní křivka	14
2.1.4	Křivka pomalého zahřívání	14
2.1.5	Ostatní nominální teplotní křivky	14
2.2	Modely přirozeného požáru	14
2.2.1	Zjednodušené modely požáru	15
2.2.2	Zdokonalené modely požáru	16
3	Parametrické teplotní křivky	18
3.1	Křivka dle ČSN EN 1991-1-2	18
3.2	Křivka dle DIN EN 1991-1-2/NA	20
3.3	Křivka dle DS/EN 1991-1-2 DK NA	21
3.4	Okrajové podmínky křivek	22
4	Metody pro posouzení požární odolnosti konstrukcí	24
4.1	Tabulkové posouzení požární odolnosti	24
4.2	Výpočetní metody pro posouzení požární odolnosti konstrukcí	25
4.2.1	Metoda izotermy 500 °C	26
5	Výpočetní program PTK	27
5.1	Instalace programu	27
5.2	Popis programu	27
5.3	Analýza parametrických teplotních křivek	32
6	Řešený příklad	35
6.1	Návrh a posouzení konstrukcí za běžné teploty	36
6.1.1	Návrh a posouzení stropní desky	37
6.1.2	Návrh a posouzení trámu	40
6.2	Průběh teploty v požárním úseku	44
6.2.1	Parametry vstupující do výpočtu křivek	44
6.2.2	Vykreslení teplotních křivek	50
6.3	Stanovení požární odolnosti konstrukcí	51
6.3.1	Stanovení požární odolnosti stropní desky	51
6.3.2	Stanovení požární odolnosti trámu	55
7	Vyhodnocení	60
8	Závěr	61
	Seznam obrázků	62
	Seznam tabulek	65
	Literatura	66
	Příloha A	69

A.1	Postup výpočtu křivky dle DIN EN 1991-1-2/NA.....	69
A.2	Postup výpočtu křivky dle DS/EN 1991-1-2 DK NA.....	77

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

A_c	Plocha betonu	mm^2
A_f	Plocha podlahy	m^2
A_s	Plocha výztuže	mm^2
$A_{s,prov}$	Navržená plocha výztuže v extrémně namáhaném průřezu	mm^2
$A_{s,req}$	Plocha výztuže potřebná k přenesení extrémního momentu	mm^2
A_t	Celková plocha konstrukcí ohraničujících požární úsek	m^2
A_v	Celková plocha svislých otvorů ve všech stěnách ohraničujících požární úsek	m^2
b	Koeficient povrchů	$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})$
b_d	Šířka stropní desky	mm
b_{eff}	Spolupůsobící šířka trámu	mm
b_{fi}	Šířka průřezu za požáru	mm
b_t	Šířka trámu	mm
c	Měrná tepelná kapacita	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_{min}	Minimální tloušťka krycí vrstvy	mm
$c_{min,b}$	Minimální krycí vrstva z hlediska soudržnosti	mm
$c_{min,dur}$	Minimální krycí vrstva z hlediska podmínek prostředí	mm
c_{nom}	Jmenovitá tloušťka krycí vrstvy	mm
d	Účinná výška průřezu	mm
d_{fi}	Účinná šířka průřezu za požáru	mm
E_{cm}	Modul pružnosti betonu	GPa
E_s	Modul pružnosti výztuže	GPa
f_{cd}	Návrhová pevnost betonu v tlaku	MPa
$f_{cd,fi,20^\circ\text{C}}$	Návrhová pevnost betonu v tlaku za požáru	MPa
f_{ck}	Charakteristická pevnost betonu v tlaku	MPa
f_{ctm}	Charakteristická pevnost betonu v tahu	MPa

f_d	Návrhová hodnota zatížení	kN/m ²
$f_{syd,fi}$	Návrhová pevnost výztuže v tahu za požáru	MPa
f_{yd}	Návrhová pevnost výztuže v tahu	MPa
f_{yk}	Charakteristická pevnost výztuže v tahu	MPa
h_d	Tloušťka stropní desky	mm
h_{eq}	Vážený průměr výšek oken ve všech stěnách ohraničujících požární úsek	m
HRR	Rychlost uvolňování tepla	W
h_t	Výška trámu	mm
k_{c1}	Součinitel tvaru průřezu	-
k_{c2}	Součinitel rozpětí	-
k_{c3}	Součinitel napětí tahové výztuže	-
$k_{s,\theta}$	Součinitel pro redukci charakteristické meze kluzu výztuže	-
L	Rozpětí prvku	mm
M_{Ed}	Moment od zatížení	kN·m
$M_{Ed,fi}$	Moment od zatížení za požáru	kN·m
M_{Rd}	Moment únosnosti	kN·m
$M_{Rd,fi}$	Moment únosnosti za požáru	kN·m
O	Koeficient otvorů	m ^{1/2}
$q_{f,d}; q_{x,d}$	Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená k ploše podlahy požárního úseku	MJ/m ²
$Q_{x,d}$	Celkové požární zatížení v požárním úseku	MJ
$q_{t,d}$	Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená k ploše ohraničujících konstrukcí úseku požárního úseku	MJ/m ²
RHR_f	Maximální rychlost uvolňování tepla	MW/m ²
s	Vzdálenost výztuže	mm
s_{lim}	Mezní tloušťka materiálu vystaveného požáru	m
t_{max}	Čas kdy nastává maximální teplota	min
t_α	Rychlost rozvoje požáru	s

x	Výška tlačené oblasti	mm
x_{fi}	Výška tlačené oblasti za požáru	mm
z	Rameno vnitřních sil	mm
z_{fi}	Rameno vnitřních sil za požáru	mm
Řecké symboly		
γ	Součinitel spolehlivosti	-
$\gamma_{c,fi}$	Součinitel spolehlivosti betonu za požáru	-
$\gamma_{s,fi}$	Součinitel spolehlivosti oceli za požáru	-
Δc_{dev}	Přídavek na návrhovou odchylku	mm
$\Delta c_{dur,\gamma}$	Přídavná hodnota z hlediska spolehlivosti	mm
$\Delta c_{dur,add}$	Redukce min. krycí vrstvy při použití dodatečné ochrany	mm
$\Delta c_{dur,st}$	Redukce min. krycí vrstvy při použití nerezové oceli	mm
ε_{cu}	Přetvoření betonu	-
ε_{yd}	Přetvoření výztuže	-
ζ	Poměrné rameno vnitřních sil	-
η	Redukční součinitel	-
η_{fi}	Redukční součinitel za požáru	-
θ_g	Teplota plynů v požárním úseku	°C
θ_{max}	Maximální teplota plynů v požárním úseku	°C
λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
λ_d	Vymezující ohybová štíhlost	-
$\lambda_{d,tab}$	Vymezující ohybová štíhlost – tabulková hodnota	-
μ	Poměrný ohybový moment	-
ξ	Poměrná výška tlačené části	-
ρ	Objemová hmotnost	kg/m ³

Zkratky

CFD	Computational Fluid Dynamics
DP1, DP2, DP3	Druh konstrukční části
iBMB	Parametrická teplotní křivka dle německé národní přílohy
PO	Požární odolnost
PÚ	Požární úsek
ŽB	Železobeton

1 Úvod

Při stanovení požární odolnosti konstrukcí má velký vliv na výsledek výběr modelu požáru. Hlavní motivací pro zpracování této práce je seznámení se s dostupnými matematickými modely požáru při stanovení požární odolnosti železobetonových konstrukcí a provedení analýzy modelů požáru se zaměřením na parametrické teplotní křivky. Zároveň je také snaha o vytvoření programu pro parametrické teplotní křivky dle různých Eurokódů, jelikož v současné době neexistuje dostupný program, který by umožnil sestavení více parametrických teplotních křivek.

V první části této diplomové práce byla provedena analýza jednotlivých matematických modelů, ve které jsou detailně řešeny především parametrické teplotní křivky podle různých Eurokódů. V práci jsou konkrétně popsány křivky dle ČSN EN 1991-1-2 [1], DIN EN 1991-1-2/NA [2] a DS/EN 1991-1-2 DK NA [3].

V další části je řešena analýza metod pro posuzování požární odolnosti konstrukcí, kdy jsou popsány tabulkové a výpočetní metody pro stanovení požární odolnosti konstrukcí.

V rámci této diplomové práce byl vytvořen výpočetní program PTK v programovacím jazyce Python. Tento program umožňuje po zadání vstupních hodnot vykreslení parametrických teplotních křivek, které jsou zmíněny výše. Program byl vytvořen tak, aby bylo možné vykreslit graf zvolené křivky, případně vykreslení všech křivek do jednoho grafu. V případě potřeby je možné zjistit i teplotu ve zvoleném čase. Program také umožňuje export dat do tabulkového procesoru MS Excel. Vytvořený software je dostupný v českém i anglickém jazyce. Následně byl program PTK využit pro analýzu vstupních parametrů pro vybrané parametrické teplotní křivky.

V poslední části této práce je řešen příklad, na kterém byla provedena analýza vlivu vybraných modelů požáru na požární odolnost. Výsledkem je vyhodnocení použití různých modelů požáru na výslednou požární odolnost konstrukcí.

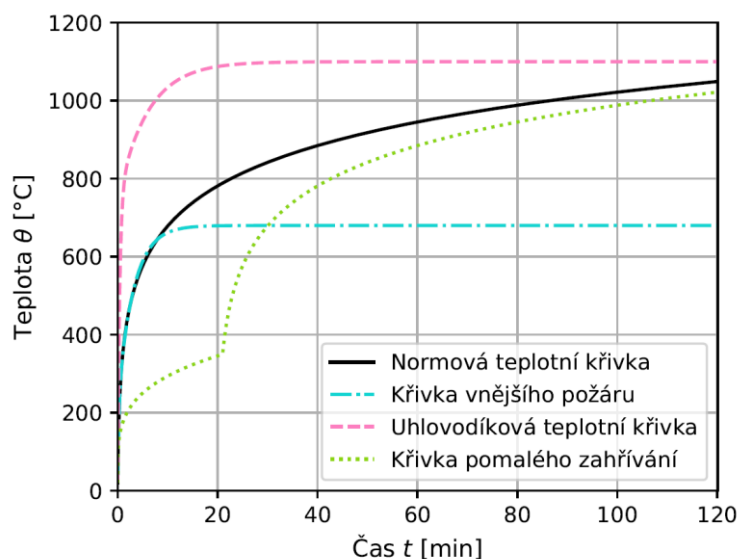
2 Matematické modely požáru

Matematický model je abstraktní model, který je popsán matematickými rovnicemi. Matematické modely požáru se používají při požárních zkouškách, k ověřování požární odolnosti stavebních konstrukcí a k simulaci rozvoje požáru. [4]

Do těchto modelů patří nominální teplotní křivky, jako je normová teplotní křivka, křivka vnějšího požáru, uhlovodíková křivka, křivka pomalého zahřívání atd., a modely přirozeného požáru, které se dále dělí na zjednodušené a zdokonalené modely požáru.

2.1 Nominální teplotní křivky

Nominální teplotní křivky (obr. 1) popisují průběh požáru po flashover efektu. Jsou to nejjednodušší modely požáru, které se používají při požárních zkouškách a ke stanovení požární odolnosti konstrukcí. V těchto křivkách nejsou zahrnuty charakteristiky požárního úseku, jako je požární zatížení, vlastnosti ohraničujících konstrukcí, rozměry požárního úseku, počet a rozměry otvorů. Díky tomu, že tyto křivky nepopisují fázi chladnutí a rostou do nekonečna, jsou značně konzervativní. [5, 6]



obr. 1: Nominální teplotní křivky. Převzato z [5]

2.1.1 Normová teplotní křivka

Křivka tzv. celulózového hoření, která se též označuje jako křivka ISO 834, je nejčastěji používanou nominální teplotní křivkou při požárních zkouškách. Také jsou k této křivce vztaženy veškeré hodnoty požárních odolností, které se uvádí v normě ČSN EN 1992-1-2. [7]

Nominální normová teplotní křivka je popsána rovnicí: [1]

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

2.1.2 Křivka vnějšího požáru

Tato křivka je určena pro konstrukce, které se vyskytují vně objektu (např. sloupy, stěny). Křivka vnějšího požáru má stejný tvar jako nominální teplotní křivka, a to do doby, než dosáhne 660 °C, poté je teplota konstantní. [5]

Křivka vnějšího požáru je popsána rovnicí: [1]

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

2.1.3 Uhlovodíková teplotní křivka

Uhlovodíková teplotní křivka popisuje plně rozvinuté požáry hořlavých kapalin, jako je například ropa. Tedy požáry s rychlým nárůstem teploty [5]. Teplota požárního úseku je po dosažení 1080 °C konstantní.

Uhlovodíková teplotní křivka je popsána rovnicí: [1]

$$\theta_g = 1\,080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

2.1.4 Křivka pomalého zahřívání

Tato křivka se používá v prostorech, kdy teplota požáru stoupá pomalu. Uplatňuje se převážně při návrhu požáru v dutinách zdvojených podlah nebo podhledů. [5]

Jestliže $0 < t \leq 21$: [5]

$$\theta_g = 154 \cdot \sqrt[4]{t} + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Jestliže $t > 21$: [5]

$$\theta_g = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot (t - 20) + 1) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

2.1.5 Ostatní nominální teplotní křivky

Dále existují nominální teplotní křivky pro různé zkušební metody, např. tunelové teplotní křivky (HCM, RABT a RWS). Tyto křivky dosahují oproti již zmíněným křivkám vyšších teplot s rychlým nárůstem. [8]

2.2 Modely přirozeného požáru

Mezi modely přirozeného požáru patří zjednodušené a zdokonalené modely požáru. Zjednodušené modely požáru jsou založeny na specifických fyzikálních parametrech a mají omezenou oblast použití. Zjednodušené modely se následně dělí na požáry v prostoru a lokální

požáry. Do zdokonalených modelů patří zónové modely a výpočetní dynamické modely kapalin a plynů. Tyto modely berou v úvahu vlastnosti plynu, hmotnostní a energetickou výměnu. [1]

2.2.1 Zjednodušené modely požáru

2.2.1.1 Požáry v prostoru

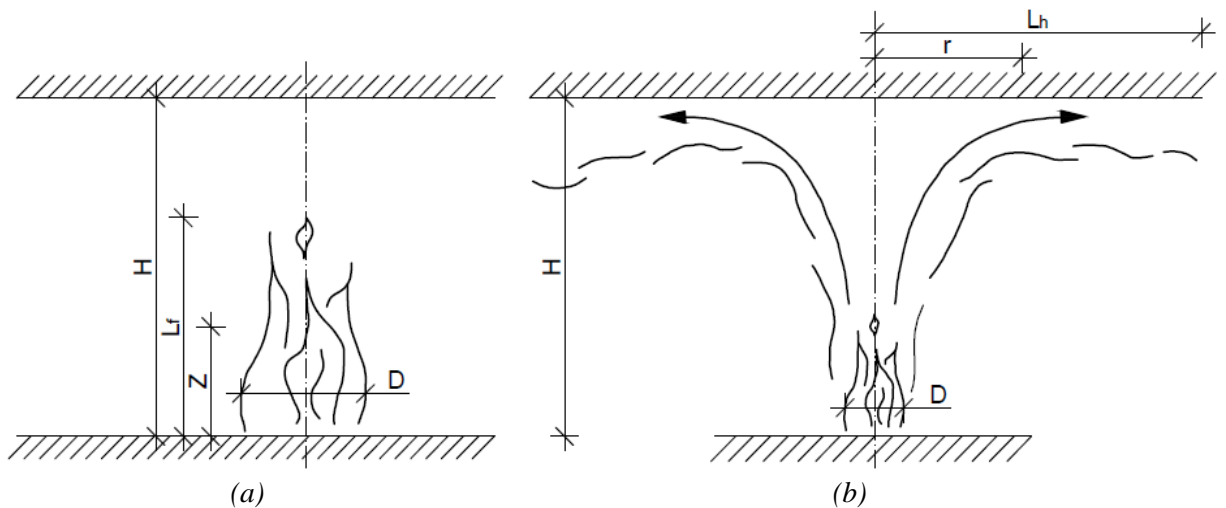
Jedná se o model požáru, kdy je teplota rovnoměrně rozložena v celém PÚ. Do těchto modelů patří parametrické teplotní křivky, v příloze A normy ČSN EN 1991-1-2 [1] je uvedena jedna z těchto křivek. Parametrické teplotní křivky jsou více popsány v kapitole 3.

2.2.1.2 Lokální požáry

Lokální požáry jsou modely, které popisují průběh požáru před flashover efektem. Tedy požáry, kde nedojde k celkovému vzplanutí. Rozlišují se dva typy těchto modelů, požár, jehož plameny nezasahují do stropu a požár, jehož plameny zasahují do stropu. Postup výpočtu obou variant je popsán v příloze C normy ČSN EN 1991-1-2. [1, 9]

Model požáru, jehož plameny nezasahují do stropu (obr. 2(a)), zohledňuje parametry jako je průměr ohně, rychlost uvolňování tepla, konvekční část rychlosti uvolňování tepla, výšku plamene a vzdálenost mezi zdrojem požáru a stropem.

Druhý model požáru (obr. 2(b)) zohledňuje tyto parametry: průměr ohně, rychlost uvolňování tepla, vodorovnou vzdálenost mezi osou ohně a bodem u stropu, pro který se počítá tepelný tok a vzdálenost mezi zdrojem požáru a stropem.



obr. 2: Lokální požár: (a) plameny nezasahují do stropu; (b) plameny zasahují do stropu.
Převzato z [5]

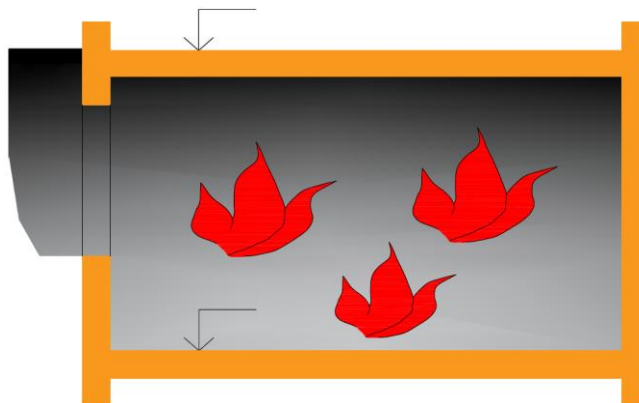
2.2.2 Zdokonalené modely požáru

2.2.2.1 Zónové modely

„Zónové modely vyjadřují ideální průběh požáru v uzavřeném prostoru.“ Pracují s parciálními diferenciálními rovnicemi pro zachování hmoty, energie a výměny chemických látek mezi jednotlivými zónami. Modely se dle počtu zón dělí na jednozónové a dvouzónové. [4, 9]

Jednozónový model

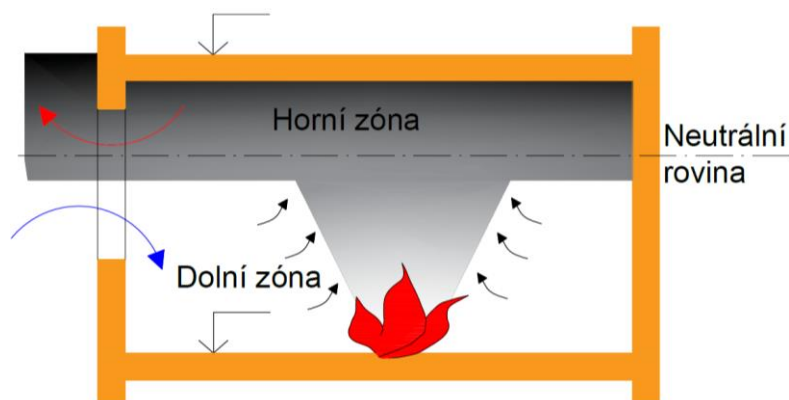
Jednozónový model popisuje průběh požáru po flashover efektu. Už podle názvu je zřejmé, že celý prostor tvoří jednu zónu, která je homogenní. To znamená, že má prostor PÚ stejnou hustotu, teplotu a koncentraci plynů. Tento model je znázorněn na obr. 3.



obr. 3: Jednozónový model. Převzato z [10]

Dvouzónový model

Dvouzónový model popisuje průběh požáru v počáteční fázi před flashover efektem. Na obr. 4 je vidět, že model při požáru rozděluje PÚ do dvou zón, přičemž každá zóna má stejnou hustotu, teplotu a koncentraci plynů. Dolní, tzv. studená zóna, je ochlazována vzduchem, který proudí do PÚ přes otvory a horní, tzv. horká zóna, je zahřívána vzestupným proudem zplodin hoření. Neutrální rovina tvoří hranici mezi horní a dolní zónou, jak by se mohlo zdát, ale hranici mezi vzniklým přetlakem a podtlakem. [4]



obr. 4: Dvouzónový model. Převzato z [10]

Norma ČSN EN 1991-1-2 [1] uvádí pro přechod z dvouzónového modelu na jednozónový model následující kritéria:

- teplota plynů v horní vrstvě je větší než 500 °C, nebo
- horní kouřová vrstva pokryje více jak 80 % výšky PÚ.

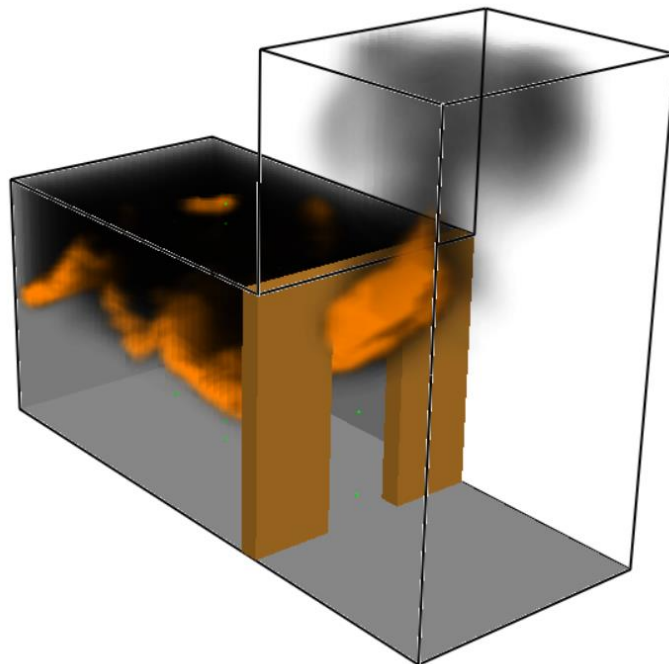
Avšak jiné zdroje uvádějí odlišná přechodová kritéria [11], např. Enclosure Fire Dynamics [12] uvádí tyto kritéria:

- teplota plynů v horní vrstvě je 500 – 600 °C, nebo
- hustota tepelného toku na podlaze je od 15 do 20 kW/m².

2.2.2.2 CFD modely

CFD modely, tzv. modely typu pole, řeší stejně jako zónové modely parciální diferenciální rovnice zachování energie, hmoty a chemických látek, ale také rovnice zachování hybnosti. Výpočetní oblast je rozdělena na velké množství trojrozměrných buněk, tzv. kontrolních objemů, které vytvářejí prostorovou síť. Pro každou buňku jsou pak řešeny rovnice, které jsou zmíněny výše. V CFD programech lze simulovat pohyb kouře a plamene (obr. 5), požární větrání, hasicí zařízení a mnoho dalšího. [4, 11, 13]

Nevýhodou CFD programů je obtížná dostupnost vstupních dat, zejména tedy materiálových charakteristik. Vstupní data značně ovlivňují výstupy z CFD modelů. Další nevýhodou je, že výpočet může trvat několik stovek hodin. O délce výpočtu rozhoduje také jemnost sítě. Čím jemnější síť, tím je výpočet delší, ale přesnější. [11, 13]



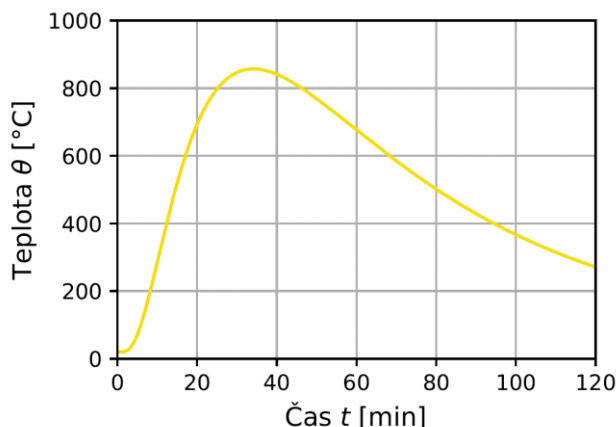
obr. 5: Šíření kouře a plamene v CFD programu. Převzato z [13]

3 Parametrické teplotní křivky

Jak už bylo zmíněno výše, parametrické teplotní křivky patří do skupiny zjednodušených modelů požáru a popisují průběh požáru po flashover efektu. Parametrické křivky na rozdíl od nominálních teplotních křivek při výpočtu zahrnují charakteristiky PÚ, kromě fáze ohřívání popisují i fázi chladnutí, a tím lépe vystihují průběh požáru.

Kromě parametrické teplotní křivky uvedené v ČSN EN 1991-1-2 [1] existuje křivka dle německé národní přílohy [2], dánské národní přílohy [3], BFD křivka [14] atd. První tři zmíněné parametrické teplotní křivky jsou popsány v kapitolách níže.

BFD křivka (obr. 6) která je popsána v [15], byla vyvinuta na základě dat z více než 142 požárních zkoušek. Daleko více se podobá výsledkům požárních zkoušek než známější evropské parametrické teplotní křivky. BFD křivka je popsána jednou základní rovnicí a pro její sestavení je zapotřebí znát pouze tři hodnoty, a to: maximální teplotu prostoru, čas, kdy nastane maximální teplota a tvarovou konstantu [16]. V dohledané literatuře nejsou uvedeny veškeré hodnoty potřebné k výpočtu BFD křivky, proto není v této práci více popsána.



obr. 6: BFD křivka. Převzato z [15]

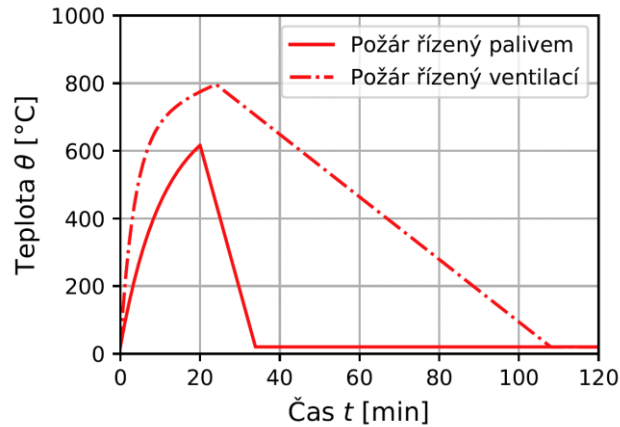
3.1 Křivka dle ČSN EN 1991-1-2

Křivka dle ČSN EN 1991-1-2 [1], dále jen evropská křivka, byla odvozena ze švédské křivky. Křivku lze použít pouze pro požární úseky, jejichž podlahová plocha není větší jak 500 m², bez otvorů ve střeše a s výškou požárního úseku maximálně 4 m. Další omezení jsou shrnuta v kapitole 3.4. Předpokládá se, že požární zatížení zcela vyhoří. [1]

Parametry vstupující do výpočtu jsou následující:

- plocha požárního úseku,
- požární zatížení,
- počet a rozměry otvorů,
- vlastnosti ohraničujících konstrukcí (ρ , c , λ).

Rozlišují se dva typy výpočtu, první pro požár řízený palivem a druhý pro požár řízený ventilací. V případě, že jsou v PÚ otvory, díky kterým je zajištěn dostatečný přísun kyslíku, je požár řízen palivem. Pokud v požárním úseku není zajištěn dostatečný přísun kyslíku, jedná se o požár řízený ventilací (obr. 7). [17]



obr. 7: Křivka dle ČSN EN 1991-1-2 [1]

V této práci jsou uvedeny pouze základní rovnice křivky, podrobný postup výpočtu je uveden v ČSN EN 1991-1-2. [1]

Postup výpočtu: [1]

Teplotní křivka ve fázi ohřevu je dána rovnicí:

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{-19 \cdot t^*}) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Teplotní křivka ve fázi chladnutí je dána rovnicí:

Jestliže $t^*_{max} \leq 0,5$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625 \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Jestliže $0,5 < t^*_{max} < 2$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (3 - t^*_{max}) \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

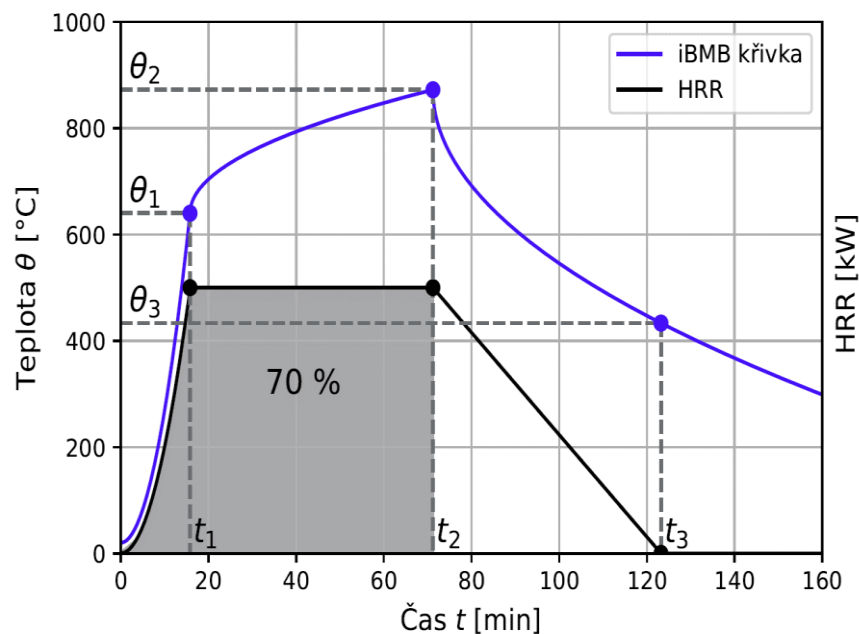
Jestliže $t^*_{max} \geq 2$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

3.2 Křivka dle DIN EN 1991-1-2/NA

Parametrická teplotní křivka dle německé národní přílohy [2], dále jen německá křivka, která se též nazývá iBMB křivka se značně liší od evropské křivky. Z parametrických teplotních křivek, které jsou v této práci uvedeny, je iBMB křivka jako jediná přímo odvozena z rychlosti uvolňování tepla. Bylo zjištěno, že jak křivku HRR, tak německou křivku lze charakterizovat třemi body v časech t_1 , t_2 a t_3 , kde se mění sklon křivek, což je znázorněno na obr. 8. [18, 19]

Na obr. 8 je vidět, že od začátku požáru do času t_1 rychlost uvolňování tepla i teplota v posuzovaném PÚ stoupá velmi rychle. V čase t_1 je dosaženo maximální rychlosti uvolňování tepla, ta zůstává konstantní až do času t_2 , teplota v PÚ se mírně zvyšuje. V čase t_2 , kdy je spotřebováno 70 % požárního zatížení začíná rychlost uvolňování tepla lineárně klesat až do doby, kdy je spotřebováno veškeré požární zatížení, tedy do času t_3 . Maximální teplota v PÚ nastane v čase t_2 , následně začne klesat na počáteční teplotu. [18]



obr. 8: Vztah mezi rychlostí uvolňování tepla a iBMB křivkou. Převzato z [18]

Německou křivku lze použít pouze pro požární úseky, jejichž podlahová plocha není větší jak 400 m^2 a s výškou maximálně 4 m. Další omezení jsou shrnuta v kapitole 3.4.

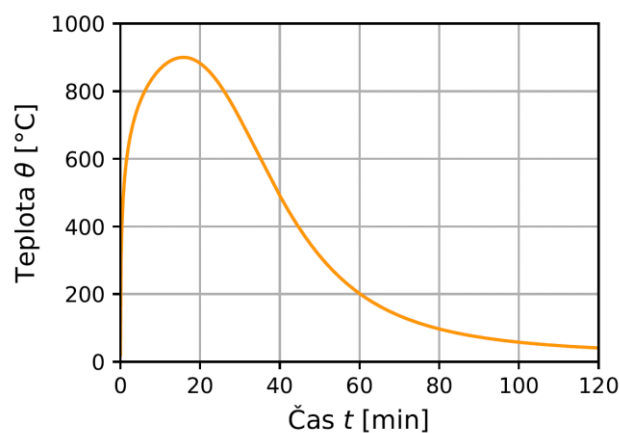
Podrobný postup výpočtu je uveden v příloze A.1.

3.3 Křivka dle DS/EN 1991-1-2 DK NA

Parametrická teplotní křivka dle dánské národní přílohy [3], dále jen dánská křivka je znázorněna na obr. 9. Přestože tato křivka vychází z evropské křivky, tak je postup výpočtu značně zjednodušen.

Křivku lze použít pouze pro požární zatížení, které je složeno z nejméně 80 % (hmotnosti) dřeva/celulózy a nejvíce 20 % (hmotnosti) plastů nebo podobných materiálů. Další omezení jsou stejná jako u evropské parametrické teplotní křivky.

Dánská křivka se liší od evropské křivky tím, že nerozlišuje, zda je požár řízený palivem nebo ventilací. Také je celá křivka popsána pouze jednou rovnicí.



obr. 9: Křivka dle DS/EN 1991-1-2 DK NA [3]

Postup výpočtu: [3]

Podrobný postup výpočtu je uveden v příloze A.2. Zde je pouze základní rovnice, kterou je popsána celá parametrická teplotní křivka:

$$\theta_g = 20 + \frac{345 \cdot \log_{10}(8 \cdot \Gamma \cdot t + 1)}{1 + 0,04 \cdot \left(\frac{t}{t_{max}}\right)^{3,5}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

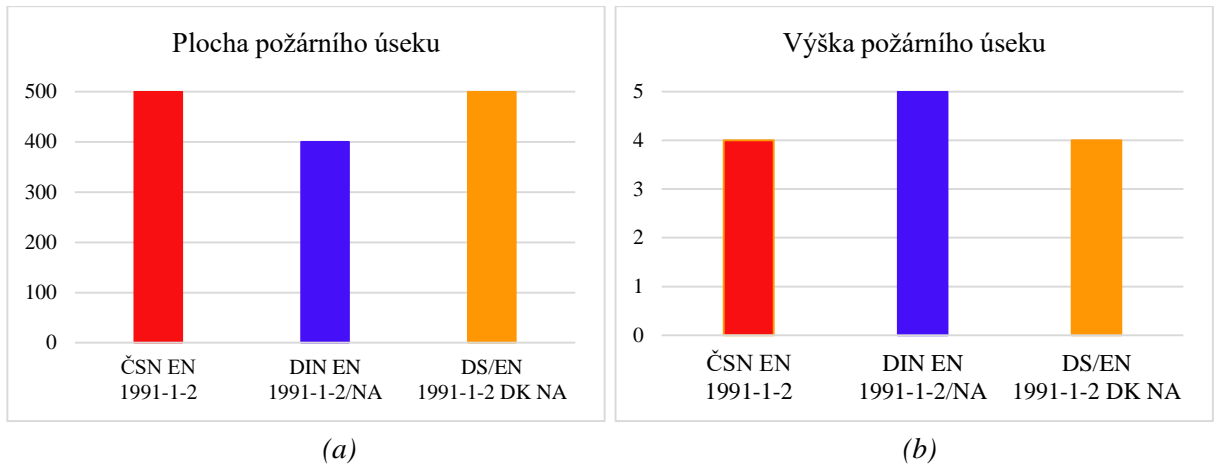
3.4 Okrajové podmínky křivek

V tab. 1 jsou shrnuty okrajové podmínky všech parametrických teplotních křivek uvedených v této práci. Na obr. 10 a obr. 11 jsou pak vidět okrajové podmínky v grafickém zpracování.

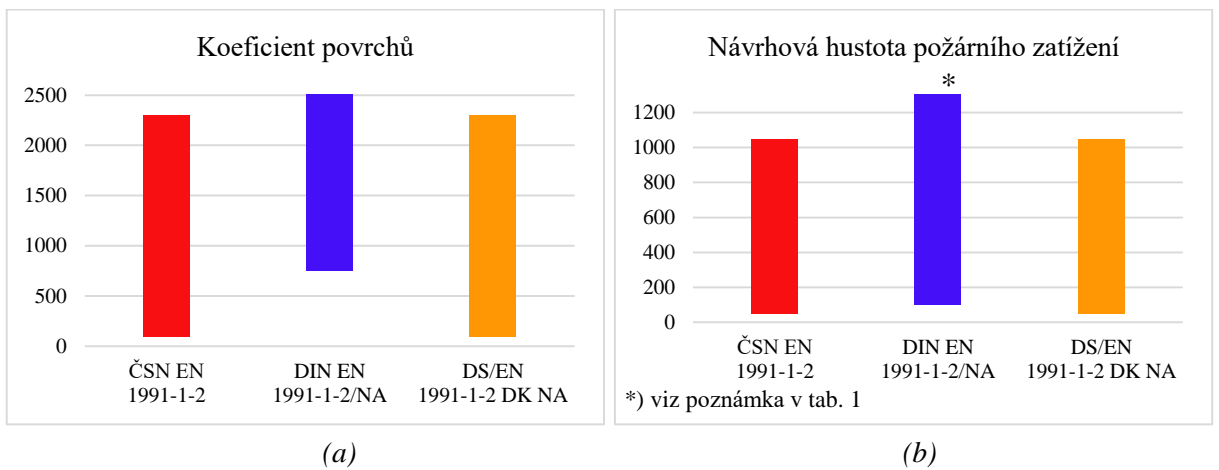
V případě evropské a dánské křivky je možné posuzovat větší plochu požárního úseku než v případě německé parametrické teplotní křivky. Ovšem v případě německé křivky lze posuzovat větší výšku požárního úseku. Koeficient povrchů u této křivky se stanovuje odlišným způsobem, a to má za následek jiné okrajové podmínky než v případě dalších dvou křivek. Rozdíly můžeme vidět i u koeficientu otvorů, kdy u německé křivky se koeficient otvorů stanovuje procentem z podlahové plochy, v případě evropské a dánské křivky se koeficient otvorů stanovuje vzorcem.

tab. 1: Okrajové podmínky parametrických teplotních křivek

	ČSN EN 1991-1-2	DIN EN 1991-1-2/NA	DS/EN 1991-1-2 DK NA
Plocha požárního úseku [m²]	do 500	do 400	do 500
Výška požárního úseku [m]	max. 4	max. 5	max. 4
Koeficient povrchů $\left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2}} \right]$	$100 \leq b \leq 2\,200$	$750 \leq b \leq 2\,500$	$100 \leq b \leq 2\,200$
Koeficient otvorů $[m^{1/2}]$	$0,02 \leq O \leq 0,20$	Otvory o velikosti 12,5 - 50 % podlahové plochy	$0,02 \leq O \leq 0,20$
Návrhová hustota požárního zatížení $\left[\frac{MJ}{m^2} \right]$	$50 \leq q_{t,d}^{1)} \leq 1\,000$	$100 \leq q_{x,d}^{2)} \leq 1\,300$	$50 \leq q_{t,d}^{1)} \leq 1\,000$
Poznámky: ¹⁾ Hodnota $q_{t,d}$ je návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztážená k ploše ohraničujících konstrukcí úseku požárního úseku ²⁾ Hodnota $q_{x,d}$ je návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztážená k ploše podlahy požárního úseku			



obr. 10: Okrajové podmínky křivek: (a) plocha PÚ; (b) výška PÚ



obr. 11: Okrajové podmínky křivek: (a) koeficient povrchů; (b) hustota požárního zatížení

4 Metody pro posouzení požární odolnosti konstrukcí

Následující kapitoly se věnují možnostem posuzování požární odolnosti konstrukcí. Posuzování požární odolnosti stavebních konstrukcí je jeden z důležitých aspektů při návrhu objektu. Požární odolností se rozumí schopnost stavebních konstrukcí odolávat požáru bez toho, aniž by došlo k narušení stability, únosnosti, celistvosti a izolační schopnosti. [20]

Požární odolnost stavebních konstrukcí se označuje mezním stavem a dobou v minutách, po kterou musí posuzovaná konstrukce odolávat požáru bez porušení funkce, danou právě mezním stavem. Dále je doplněna požadovaným druhem konstrukční části (DP1, DP2, DP3). [20]

Požadavky na požární odolnost pro stavební konstrukce, kterou každá posuzovaná konstrukce musí splnit, jsou dány normou ČSN 73 0802 [21]. Požární odolnost se dá stanovit pomocí tabulek, které jsou uvedeny v ČSN EN 1992-1-2 [7], za použití zjednodušených nebo zpřesněných výpočetních metod a požárních zkoušek. [20]

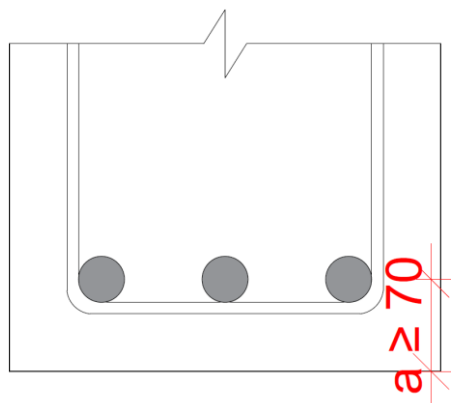
4.1 Tabulkové posouzení požární odolnosti

Tabulky, které se nacházejí v normě ČSN EN 1992-1-2 [7] byly sestaveny na základě zkoušek a výpočtů. Jsou to nejjednodušší přístupy, které se používají pro posouzení požární odolnosti železobetonových prvků. Hodnoty uvedené v tabulkách jsou ve většině případů značně konzervativní. [22]

Hodnoty v tabulkách jsou vztaženy k normovému požáru a platí pro prvky z obvyčejného betonu s objemovou hmotností 2000 až 2600 kg/m³ s křemičitým kamenivem. Pro nosníky a desky z betonu s vápencovým nebo lehkým kamenivem lze zmenšit nejmenší rozměr průřezu o 10 %. [7, 22]

Požárně dělící funkce (kritéria E a I) je splněna, pokud je dodržena minimální tloušťka stěn nebo desek podle tabulky 5.3 normy ČSN EN 1992-1-2 [7]. V případě řešení požární odolnosti u styků se postupuje podle kapitoly 4.6 v Eurokódu [7]. Nosná funkce (kritérium R) je splněna, pokud jsou dodrženy požadavky na minimální rozměr průřezu a osovou vzdálenost výztuže od povrchu průřezu, které jsou uvedeny v tabulkách. [7]

Jestliže prvek splňuje tabulkové požadavky, tak není požadováno další posouzení týkající se únosnosti ve smyku, kroucení, kotvení výztuže a odštěpování. Odštěpování betonu musí být dále posuzováno pouze, pokud je osová vzdálenost výztuže od povrchu průřezu 70 mm a více (obr. 12). [7, 22]



obr. 12: Osová vzdálenost výztuže od povrchu

4.2 Výpočetní metody pro posouzení požární odolnosti konstrukcí

Rozlišují se dvě výpočetní metody pro posouzení požární odolnosti konstrukcí, a to zjednodušené a zpřesněné výpočetní metody. Do zjednodušených výpočetních metod patří: [7]

- izoterma 500 °C,
- zónová metoda,
- metoda pro štíhlé sloupy,
- metoda pro ověření únosnosti ve smyku a kroucení,
- zjednodušená výpočetní metoda pro nosníky a desky.

V praktické části je použita metoda izotermie 500 °C, proto je více popsána v kapitole 4.2.1. Zónová metoda je popsána v příloze B normy ČSN EN 1992-1-2 [7] a je určena pouze pro prvky namáhané ohybovými momenty a normálovými silami. Tuto metodu lze použít pouze pro normovou teplotní křivku. [7]

„Metoda pro štíhlé sloupy, založená na jmenovité křivosti, je určena pro sloupy ztužených konstrukcí, jejichž únosnost při požární situaci je významně ovlivněna účinky druhého řádu.“ Metodu lze použít pro normovou teplotní křivku nebo pro parametrickou teplotní křivku. [22]

Únosnost ve smyku a kroucení je možné stanovit pomocí metod, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 1992-1-1 [23], a to pokud se berou v úvahu redukované materiálové charakteristiky a průřezy v závislosti na teplotě. [22]

Zjednodušená výpočetní metoda pro nosníky a desky platí pro převážně rovnoměrně zatížené konstrukce, kde byl návrh při běžné teplotě založen na lineární analýze, eventuálně na lineární analýze s omezenou redistribucí dle kapitoly 5 normy ČSN EN 1992-1-1 [23]. Tato metoda je určena pro nosníky vystavené požáru ze tří stran a desky, které splňují minimální rozměry průřezu při tabulkovém posouzení. [7, 22]

„Zpřesněné výpočetní metody jsou určeny k realistickému přiblížení skutečného chování konstrukcí vystavených účinkům požáru. V normě ČSN EN 1992-1-2 jsou popsány hlavní zásady, které musejí být při použití zpřesněných výpočetních metod dodrženy.“ [22]

4.2.1 Metoda izotermy 500 °C

Metoda izotermy 500 °C je popsána v příloze B normy ČSN EN 1992-1-2 [7] a je určena pouze pro prvky namáhané ohybovými momenty a normálovými silami. Metodu lze použít, pokud je splněna minimální šířka průřezu dle tab. 2. Dále ji lze použít pro normovou teplotní křivku a pro parametrickou teplotní křivku s koeficientem otvorů $O \geq 0,14 \text{ m}^{1/2}$. [7, 22]

tab. 2: Minimální šířka průřezu: (a) pro vystavení normovému požáru; (b) pro vystavení parametrickému požáru. Převzato z [7]

(a)

Požární odolnost	R 60	R 90	R 120	R 180	R 240
Minimální šířka průřezu [mm]	90	120	160	200	280

(b)

Hustota požárního zatížení $q_{t,d}$ [MJ/m ²]	200	300	400	600	800
Minimální šířka průřezu [mm]	100	140	160	200	240

Metoda spočívá v tom, že beton o teplotě $\theta > 500 \text{ °C}$ nepřispívá k únosnosti průřezu, naopak beton s teplotou $\theta \leq 500 \text{ °C}$ vykazuje stejnou pevnost a modul pružnosti jako při 20 °C. Pevnost výztuže se redukuje úměrně její teplotě a způsobu namáhání. Redukují se tedy rozměry posuzovaného prvku a pevnost výztuže, pevnost betonu zůstává stejná jako za běžné teploty [7, 22]. Postup výpočtu je uveden v příloze B normy ČSN EN 1992-1-2 [7].

5 Výpočetní program PTK

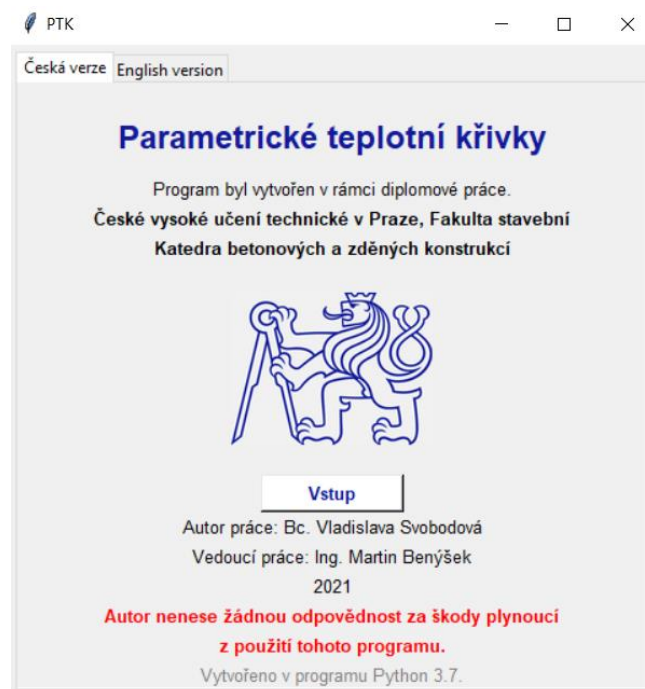
Tento program byl vytvořen pro účely sestavení vybraných parametrických teplotních křivek v jednom programu, jelikož v současné době neexistuje jiný software, který by tuto možnost poskytoval. Program PTK byl vytvořen v programovacím jazyce Python. Tento program je volně dostupný a je možné ho využívat pro komerční, nekomerční i akademické účely.

5.1 Instalace programu

Program bude volně ke stažení po dokončení této diplomové práce na katedře betonových konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze. Po stažení .exe souboru a následném otevření je možno v programu rovnou pracovat.

5.2 Popis programu

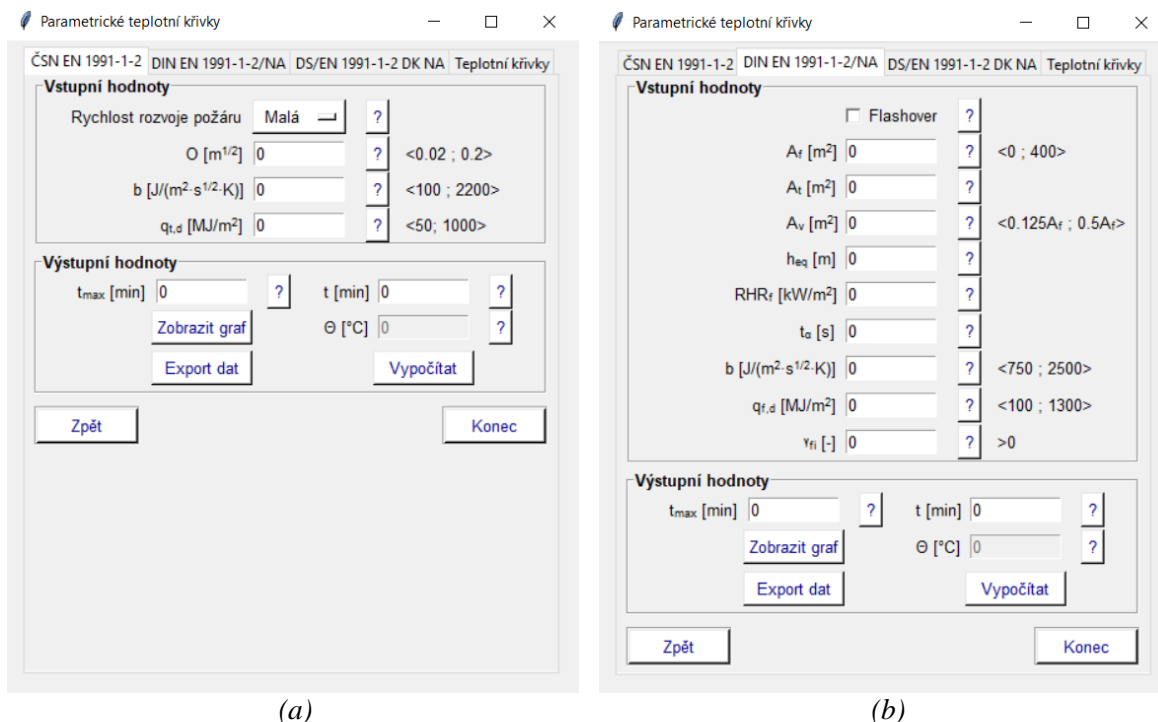
Po spuštění programu se zobrazí úvodní okno, ve kterém jsou uvedeny informace o programu a autorech. V úvodním okně si lze vybrat otevření české verze programu, a to v záložce *Česká verze* nebo anglické verze v záložce *English version*.



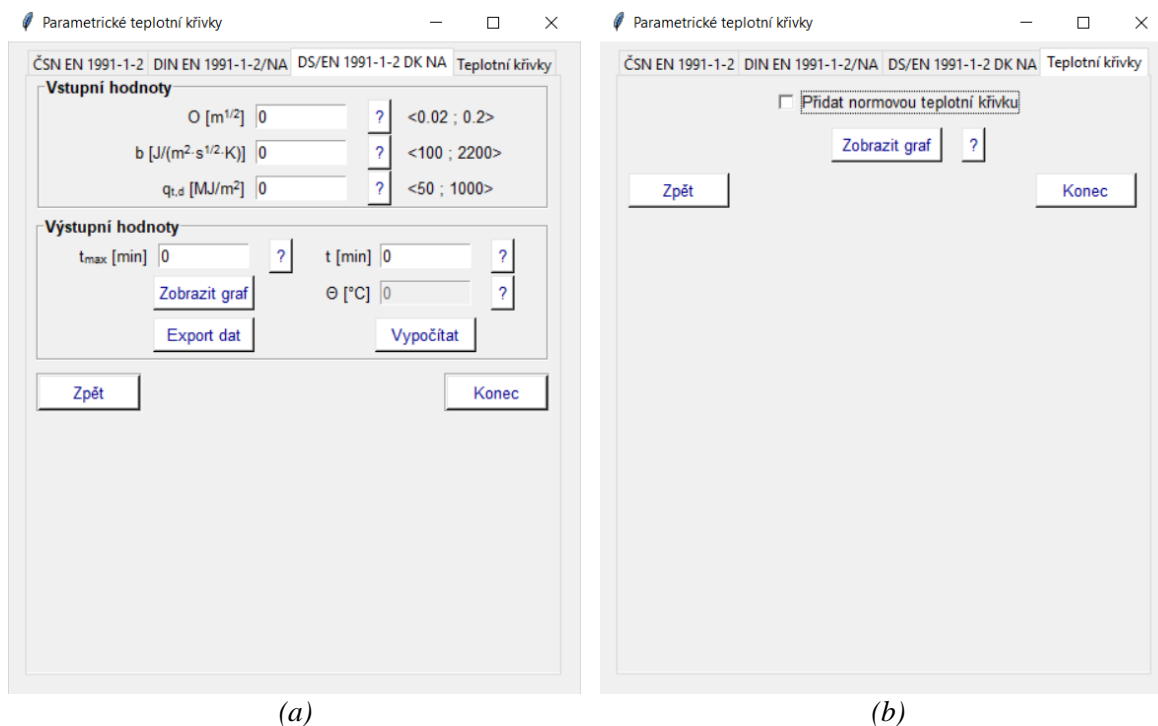
obr. 13: Úvodní okno programu

Po stisknutí tlačítka *Vstup* v české verzi, případně *Enter* v anglické verzi, v úvodním okně se zobrazí okno nové se čtyřmi záložkami. V záložkách si lze vybrat vykreslení parametrické teplotní křivky dle ČSN EN 1991-1-2 [1] (obr. 14 (a)), DIN EN 1991-1-2/NA (obr. 14 (b)), DS/EN 1991-1-2 DK NA (obr. 15 (a)) nebo vykreslení všech křivek do jednoho grafu s možností výběru *Přidat normovou teplotní křivku* (obr. 15 (b)).

První tři záložky jsou rozděleny na dvě části, na vstupní hodnoty a výstupní hodnoty. Ve výstupní části je možné v zadaném čase zobrazit graf křivky a exportovat data, nebo vypočítat teplotu prostoru v konkrétním čase. Dále je v každé záložce tlačítko *Zpět*, které po stisknutí umožní vrácení na úvodní okno a tlačítko *Konec*, po jehož stisknutí bude program ukončen.

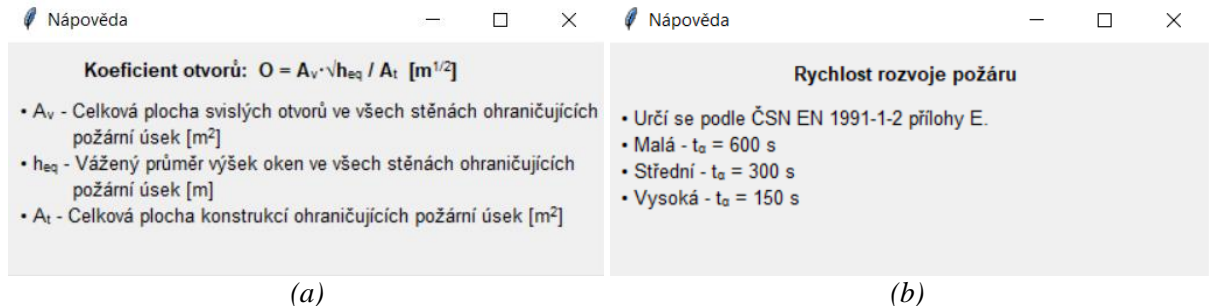


obr. 14: Okno pro vykreslení křivky dle: (a) ČSN EN 1991-1-2; (b) DIN EN 1991-1-2/NA



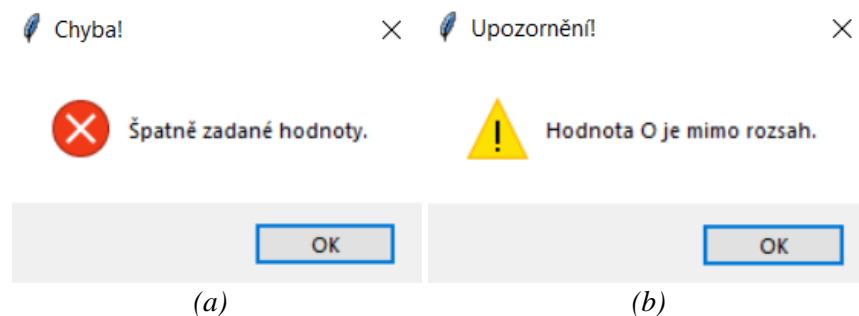
obr. 15: Okno pro vykreslení: (a) křivky dle DS/EN 1991-1-2 DK NA; (b) všech křivek

V každé záložce parametrických teplotních křivek se nachází tlačítka s otazníkem, po jejich stisknutí se zobrazí okno s nápovědou, ve které je uvedeno, jak se daná hodnota vypočítá (obr. 16 (a)) nebo, kde lze tuto hodnotu najít (obr. 16 (b)).



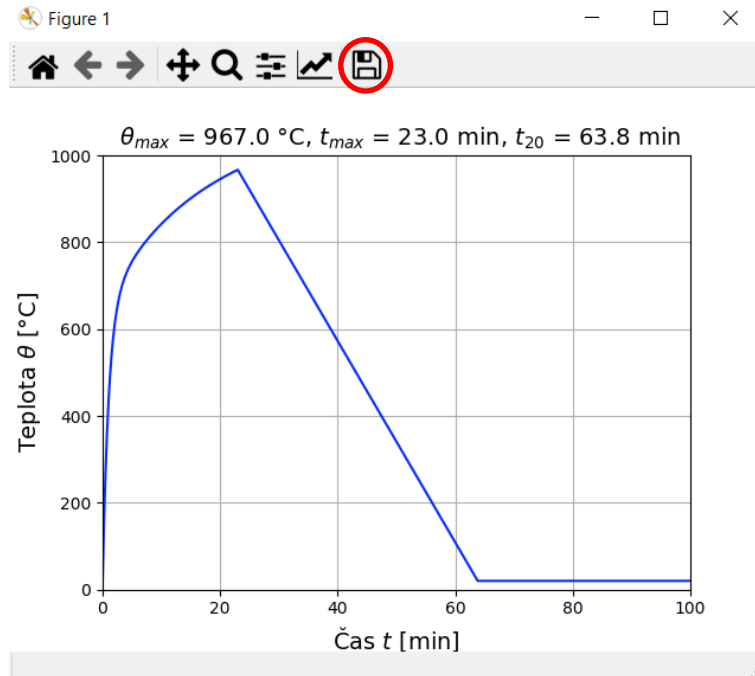
obr. 16: Ukázka nápovědy pro: (a) výpočet koeficientu otvorů; (b) určení rychlosti rozvoje požáru

Pokud jsou vstupní hodnoty chybně zadané, např. pokud se místo desetinné tečky napíše čárka, tak po stisknutí tlačítka *Zobrazit graf*, eventuálně tlačítka *Export dat* nebo *Vypočítat* se zobrazí nové okno s chybou (obr. 17 (a)). Nové okno s upozorněním se zobrazí, pokud je zadaná hodnota mimo rozsah (obr. 17 (b)), který je uveden vedle nápověd.



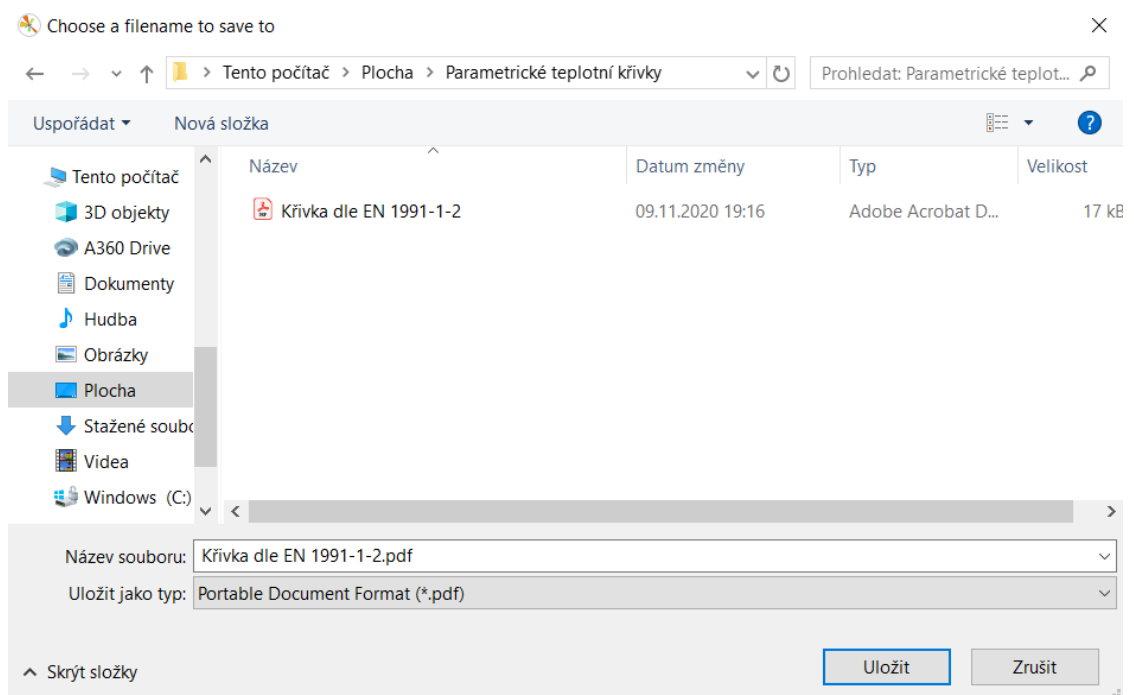
obr. 17: Chybné zadávání hodnot: (a) špatně zadané hodnoty; (b) hodnota mimo rozsah

Po zadání správných vstupních hodnot u teplotních křivek se po stisknutí tlačítka *Zobrazit graf* zobrazí v novém okně graf dané křivky (obr. 18). Na grafu je vypočtena maximální teplota, čas, ve kterém je maximální teplota dosažena a čas, kdy teplota PÚ klesne na počáteční teplotu, tedy na 20 °C.



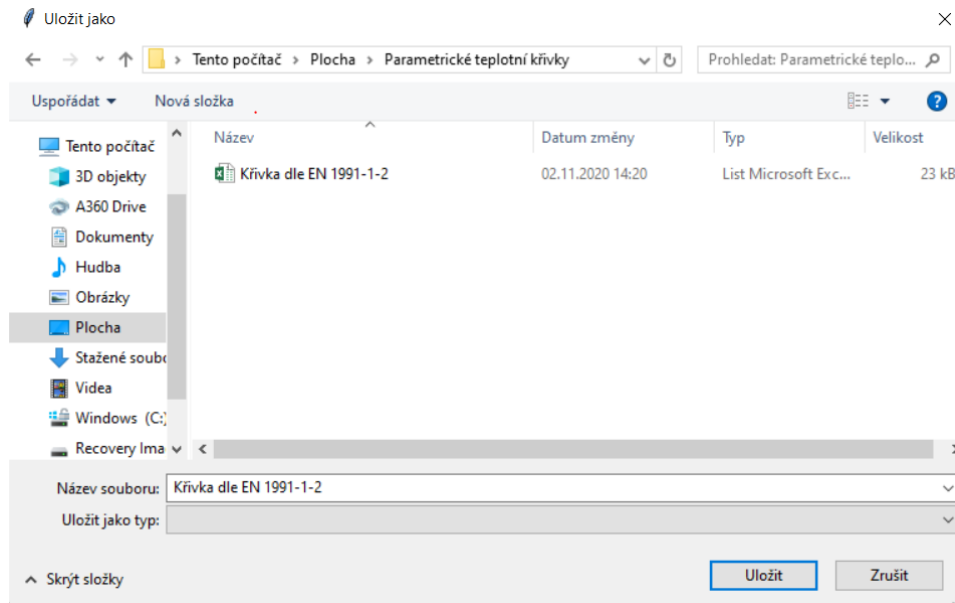
obr. 18: Vykreslení grafu

Graf lze po stisknutí tlačítka v červeném kolečku na obr. 18 uložit ve zvoleném souboru do jakékoliv složky (obr. 19).



obr. 19: Uložení grafu

Kromě grafu je možné data každé parametrické teplotní křivky po stisknutí tlačítka *Export dat* uložit v .xlsx souboru do jakékoliv složky (obr. 20).



obr. 20: Export dat v .xlsx souboru

Na obr. 21 je vidět, jak se data křivek zobrazují. V prvním sloupci se nachází čas v minutách s časovým krokem pěti vteřin a ve druhém sloupci je teplota ve stupních Celsia v daném čase.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Čas [min]	Teplota [°C]								
2		0	20							
3		0,083333333	70,3086547							
4		0,166666667	116,9158079							
5		0,25	160,1047073							
6		0,333333333	200,1368579							
7		0,416666667	237,2536912							
8		0,5	271,6781067							
9		0,583333333	303,6158949							
10		0,666666667	333,2570512							
11		0,75	360,7769879							
12		0,833333333	386,3376551							
13		0,916666667	410,0885734							
14		1	432,1677888							

obr. 21: Zobrazení dat v .xlsx souboru

Validace výpočetního programu PTK byla provedena pomocí softwarů, článků a diplomové práce [18, 24–27]. Program PTK je propojen se softwarem Vedení tepla [28], který umožňuje stanovení průběhu teploty v jednovrstvé i vícevrstvé konstrukci.

5.3 Analýza parametrických teplotních křivek

Analýza parametrických teplotních křivek byla provedena pro osm variant požárního úseku, přičemž ve variantě a - d se jednalo o prostor kanceláře a ve variantě e – h o prostor nemocničního pokoje. Pokaždé se jednalo o PÚ s výškou 3,5 m, se stropem, podlahou, třemi stěnami ze železobetonu a jednou stěnou z keramického zdiva. Varianty a – d a e – h se liší podlahovou plochou a plochou otvorů:

- $A_f = 25 \text{ m}^2$, jeden otvor s rozměry 1,6 x 2 m,
- $A_f = 25 \text{ m}^2$, čtyři otvory s rozměry 1,5 x 2 m,
- $A_f = 380 \text{ m}^2$, dvanáct otvorů o rozměrech 2 x 2 m,
- $A_f = 380 \text{ m}^2$, dvacet otvorů o rozměrech 2,5 x 2,5 m.

Vstupní hodnoty pro výpočet parametrických teplotních křivek jsou shrnuty v následujících tabulkách (tab. 3, tab. 4 a tab. 5).

tab. 3: Vstupní hodnoty pro křivku dle ČSN EN 1991-1-2

	Rychlost rozvoje požáru	$O \text{ [m}^{1/2}\text{]}$	$b \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}} \right]$	Kancelář	Nemocnice
				$q_{t,d} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \right]$	$q_{t,d} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \right]$
var. a, e	střední	0,038	1864,766	102,2	56
var. b, f	střední	0,141	1845,076	102,2	56
var. c, g	střední	0,066	1997,53	180,5	99
var. d, h	střední	0,191	1988,296	180,5	99

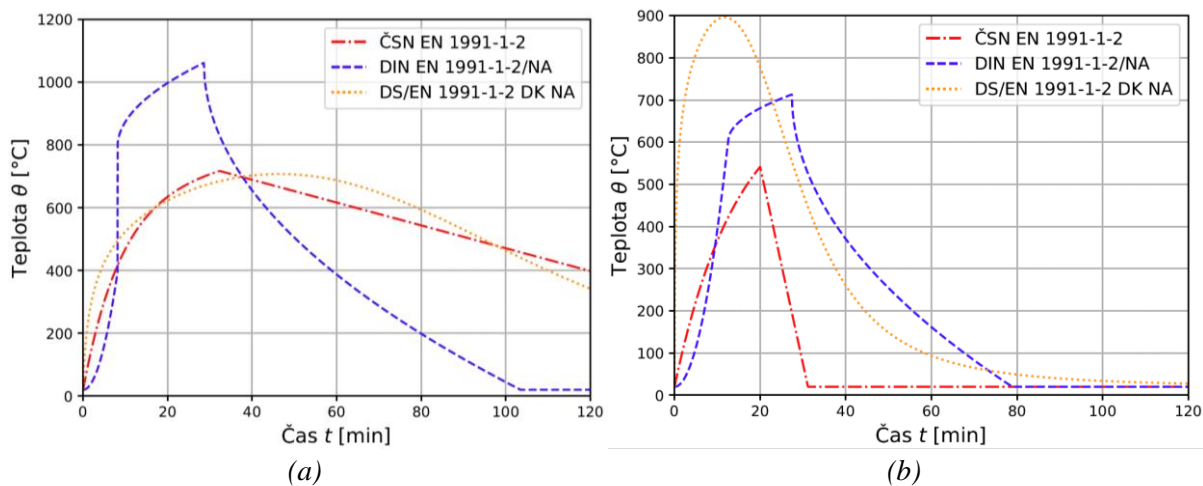
tab. 4: Vstupní hodnoty pro křivku dle DIN EN 1991-1-2/NA

	$A_f \text{ [m}^2\text{]}$	$A_t \text{ [m}^2\text{]}$	$A_v \text{ [m}^2\text{]}$	$h_{eq} \text{ [m]}$	$RHR_f \text{ [kW/m}^2\text{]}$	$t_a \text{ [s]}$	$b \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}} \right]$	Kancelář	Nemocnice
								$q_{x,d} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \right]$	$q_{x,d} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \right]$
var. a, e	25	120	3,2	2	250	300	1500	408,8	224
var. b, f	25	120	12	2	250	300	1500	408,8	224
var. c, g	380	1033	48	2	250	300	1500	408,8	224
var. d, h	380	1033	125	2,5	250	300	1500	408,8	224

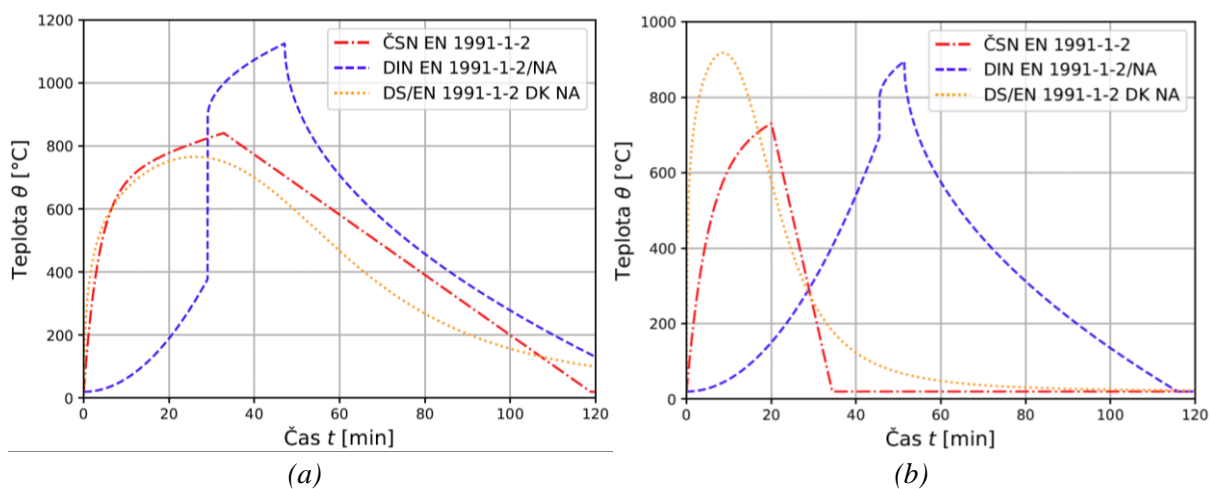
tab. 5: Vstupní hodnoty pro dle DS/EN 1991-1-2 DK NA

	$O \text{ [m}^{1/2}\text{]}$	$b \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}} \right]$	Kancelář	Nemocnice
			$q_{t,d} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \right]$	$q_{t,d} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \right]$
var. a, e	0,038	1864,766	200	150
var. b, f	0,141	1845,076	200	150
var. c, g	0,066	1997,53	200	150
var. d, h	0,191	1988,296	200	150

Na obr. 22 a obr. 23 jsou vykresleny průběhy teplot v prostoru pro var. a - var. d. Na grafech můžeme vidět, že pokud je v prostoru méně oken, tak evropská křivka a dánská křivka mají průběh velmi podobný. Naopak pokud je v prostoru oken více, tak dánská křivka dosahuje vyšších teplot než křivka evropská. V případě německé křivky je průběh teplot daleko odlišnější.

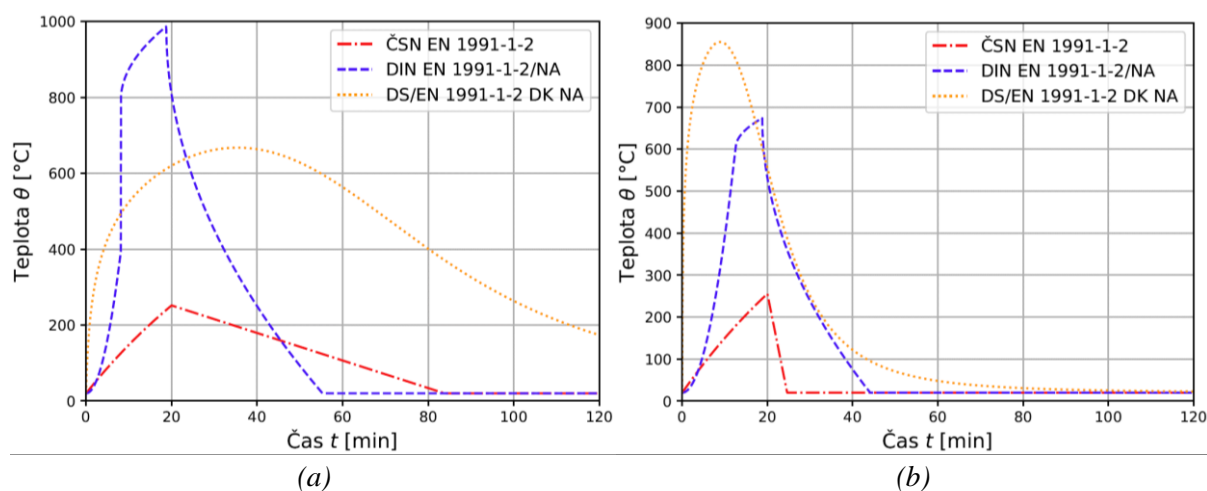


obr. 22: Průběh teploty v prostoru: (a) var. a; (b) var. b

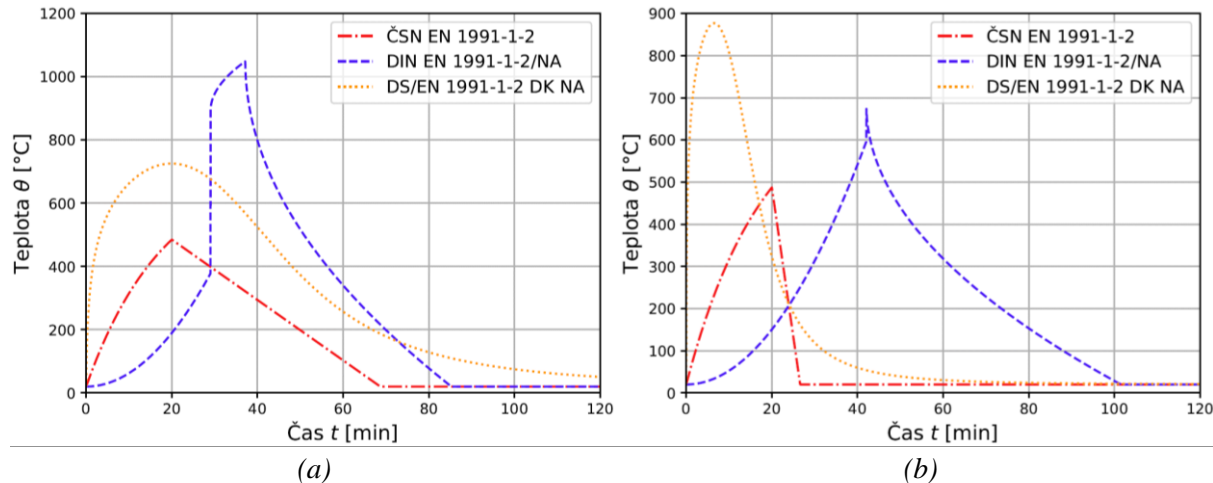


obr. 23: Průběh teploty v prostoru: (a) var. c; (b) var. d

Na obr. 24 a obr. 25 jsou vykresleny průběhy teplot v prostoru pro var. e - var. h. V případě hodnocení prostoru nemocničního pokoje můžeme z grafů usoudit, že jednotlivé parametrické teplotní křivky jsou velmi odlišné. Tyto rozdílné průběhy křivek jsou způsobeny hustotou požárního zatížení, která je v prostoru nemocnice nižší než v případě kanceláře viz výše. Na obr 28 můžeme vidět, že německá křivka nezahrnuje fázi ustáleného hoření. To je způsobeno tím, že se ve fázi rozhořívání uvolní více jak 70 % veškerého paliva.



obr. 24: Průběh teploty v prostoru: (a) var. e; (b) var. f



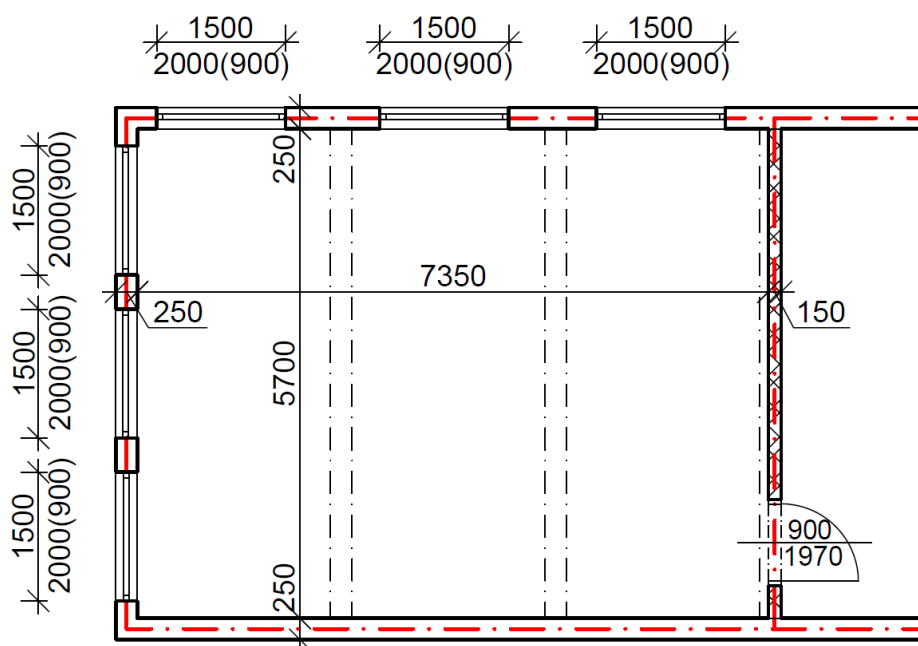
obr. 25: Průběh teploty v prostoru: (a) var. g; (b) var. h

6 Řešený příklad

V rámci řešeného příkladu byla provedena především analýza vlivu parametrických teplotních křivek na výslednou požární odolnost. Pro normovou teplotní křivku, parametrické teplotní křivky, které jsou popsány v této práci a pro dvouzónový model požáru byla stanovena požární odolnost železobetonové stropní desky a trámu zjednodušenou výpočetní metodou izotermie 500 °C. Příklad je řešen celkově ve dvou variantách provozů. V prvním případě je požární odolnost stanovena pro provoz hotelu a ve druhém případě pro provoz knihovny.

Vybrán byl požární úsek o rozměrech 7,35 x 5,7 m s výškou 3,2 m. V prostoru se nachází šest oken o rozměrech 1,5 x 2,0 m. Strop, podlaha a tři stěny jsou z železobetonu. Jedna stěna je z keramického zdiva (obr. 26).

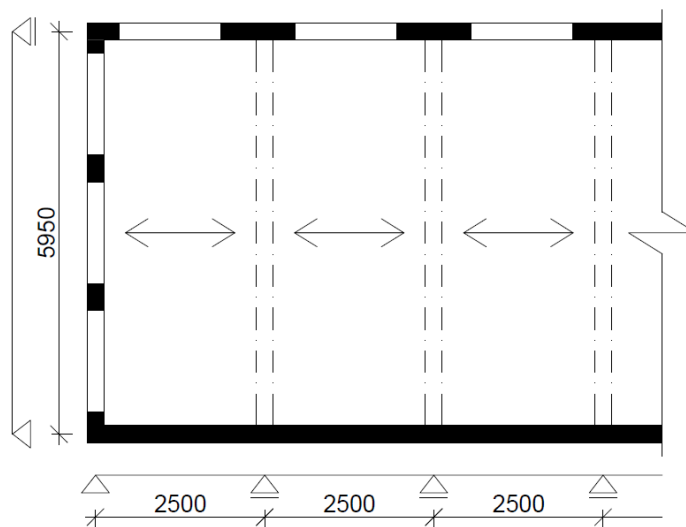
Nejprve byl proveden návrh a posouzení hlavní nosné výztuže železobetonové desky a trámu. Poté byl prostor PŮ namodelován pro vybrané modely požáru a zjednodušenou metodou izotermie 500 °C byla stanovena PO vybraných prvků.



obr. 26: Půdorys řešeného požárního úseku

6.1 Návrh a posouzení konstrukcí za běžné teploty

Pro návrh konstrukčních prvků bylo využito empirických vzorců pro daný typ posuzovaného prvku a ohybové štíhlosti. Následně byla navržena a posouzena hlavní nosná ohybová výztuž pro každý prvek. Smyková výztuž trámu nebyla navrhována, jelikož pro stanovení požární odolnosti není potřeba. Na obr. 27 je znázorněno schéma pnutí spojitě stropní desky včetně statického schématu. Stropní deska je uložena na nosnících, které jsou prostě uloženy na svislých stěnách. Návrhy a posouzení konstrukčních prvků jsou uvedeny níže. [23, 29–32]



obr. 27: Konstrukční a statické schéma řešené části

Materiálové charakteristiky:

Beton C30/37

Charakteristická pevnost betonu v tlaku: $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

Součinitel spolehlivosti: $\gamma = 1,5$

Návrhová pevnost betonu v tlaku: $f_{cd} = 20 \text{ MPa}$

Charakteristická pevnost betonu v tahu: $f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$

Modul pružnosti: $E_{cm} = 32 \text{ GPa}$

Ocel B500B

Charakteristická pevnost výztuže v tahu: $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

Součinitel spolehlivosti: $\gamma = 1,15$

Návrhová pevnost výztuže v tahu: $f_{yd} = 434,78 \text{ MPa}$

Modul pružnosti: $E_s = 200 \text{ GPa}$

6.1.1 Návrh a posouzení stropní desky

6.1.1.1 Návrh tloušťky desky

Krycí vrstva výztuže:

Výztuž $\varnothing 8$ mm

$$c_{min} = \max[c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}]$$

$$c_{min} = \max[8; 10; 10 \text{ mm}]$$

$$c_{min} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{nom} = 10 + 5$$

$$c_{nom} = 15 \text{ mm} \Rightarrow c = 15 \text{ mm}$$

Návrh dle empirického vztahu:

Jednosměrně pnutá, spojitě uložená deska

$$L = 2,5 \text{ m}$$

$$h_d = \left(\frac{1}{35} \div \frac{1}{30}\right) \cdot L = \left(\frac{1}{35} \div \frac{1}{30}\right) \cdot 2500 = 72 \div 84 \text{ mm}$$

Návrh dle ohybové štíhlosti:

$$\lambda = \frac{L}{d} \leq \lambda_d = \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} \cdot \kappa_{c3} \cdot \lambda_{d,tab}$$

$$\kappa_{c1} = 1; \kappa_{c2} = 1; \kappa_{c3} = 1,2; \lambda_{d,tab} = 26$$

$$\lambda_d = 1 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 26$$

$$\lambda_d = 31,2$$

$$d \geq \frac{l_d}{\lambda_d}$$

$$d \geq \frac{2500}{31,2}$$

$$d \geq 81 \text{ mm} \Rightarrow 101 \text{ mm}$$

$$h_d = d + \frac{\varnothing}{2} + c = 101 + \frac{8}{2} + 15 = 120 \text{ mm} \Rightarrow$$

120 mm

6.1.1.2 Návrh a posouzení ohybové výztuže desky

Zatížení stropní konstrukce:

tab. 6: Výpočet zatížení stropní desky

Zatížení	Charakteristické [kN/m ²]	γ_F [-]	Návrhové [kN/m ²]
Stálé			
skladba podlahy + příčky	2	1,35	2,7
vlastní tíha desky	$25 \cdot 0,12 = 3$	1,35	4,05
Celkem stálé	$g_k = 5$		$g_d = 6,75$
Proměnné			
kategorie B	2,5	1,5	3,75
Celkem proměnné	$q_k = 2,5$		$q_d = 3,75$
Celkem	$g_k + q_k = 7,5$		$g_d + q_d = 10,5$

Moment od zatížení:

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 10,5 \cdot 2,5^2 = 8,2 \text{ kNm}$$

Návrh ohybové výztuže:

$$d = h_d - c - \frac{\emptyset}{2} = 120 - 15 - \frac{8}{2} = 101 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{b_d \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}} = \frac{8,2 \cdot 10^6}{1000 \cdot 101^2 \cdot 1 \cdot 20} = 0,04 \rightarrow \xi = 0,0651 \rightarrow \zeta = 0,98$$

$$A_{s,req} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{8,2 \cdot 10^6}{0,98 \cdot 101 \cdot 434,78} = 191 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Návrh výztuže: $\emptyset 8$ á 200 mm ($A_{s,prov} = 251 \text{ mm}^2/\text{m}$)

Posouzení ohybové výztuže:

Konstrukční zásady

Minimální plocha výztuže:

$$A_{s,prov} \geq A_{s,min} = \max\left(\frac{0,26 \cdot f_{ctm} \cdot b_d \cdot d}{f_{yk}}; 0,0013 \cdot b_d \cdot d\right)$$

$$251 \text{ mm}^2/\text{m} \geq \max\left(\frac{0,26 \cdot 2,9 \cdot 1000 \cdot 101}{500}; 0,0013 \cdot 1000 \cdot 101\right)$$

$$251 \text{ mm}^2/m \geq \max(153; 132)$$

$$251 \text{ mm}^2/m > 153 \text{ mm}^2/m \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Maximální plocha výztuže:

$$A_{s,prov} \leq A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c$$

$$251 \text{ mm}^2/m \leq 0,04 \cdot 1000 \cdot 120$$

$$251 \text{ mm}^2/m < 4800 \text{ mm}^2/m \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Maximální rozteč prutů:

$$s \leq s_{max} = \min(2 \cdot h_d; 250 \text{ mm})$$

$$200 \text{ mm} \leq \min(2 \cdot 120; 250 \text{ mm})$$

$$200 \text{ mm} \leq \min(240; 250 \text{ mm})$$

$$200 \text{ mm} = 250 \text{ mm} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Minimální světlá vzdálenost mezi pruty:

$$s_c \geq s_{min} = \max(1,2 \cdot \phi; D_{max} + 5; 20 \text{ mm})$$

$$200 \text{ mm} \geq \max(1,2 \cdot 8; 16 + 5; 20 \text{ mm})$$

$$200 \text{ mm} \geq \max(9,6; 21; 20 \text{ mm})$$

$$200 \text{ mm} > 21 \text{ mm} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Posouzení návrhu:Výška tlačené oblasti:

$$x = \frac{A_{s,prov} \cdot f_{yd}}{b_d \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cd}} = \frac{251 \cdot 434,78}{1000 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 20} = 6,8 \text{ mm}$$

Posouzení únosnosti:

$$M_{Rd} = A_{s,prov} \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,5 \cdot \lambda \cdot x) = 251 \cdot 434,78 \cdot (101 - 0,5 \cdot 0,8 \cdot 6,8) \cdot 10^{-6}$$

$$M_{Rd} = 10,8 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 8,2 \text{ kNm} < M_{Rd} = 10,8 \text{ kNm} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Ověření poměrné výšky tlačené oblasti:

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{6,8}{101} = 0,07$$

$$\xi = 0,07 < \xi_{max} = 0,45 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Ověření protažení výztuže:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E} = \frac{434,78}{200000} = 2,175 \text{ ‰}$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x}$$

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu} \cdot (d - x)}{x} = \frac{3,5 \cdot (101 - 6,8)}{6,8} = 48,5 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 48,5 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,175 \text{ ‰} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

6.1.2 Návrh a posouzení trámu

6.1.2.1 Návrh rozměrů trámu

Krycí vrstva výztuže:

Výztuž $\varnothing 14 \text{ mm}$

$$c_{min} = \max[c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}]$$

$$c_{min} = \max[14; 15; 10 \text{ mm}]$$

$$c_{min} = 15 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{nom} = 15 + 5$$

$$c_{nom} = 20 \text{ mm} \Rightarrow c = 20 \text{ mm}$$

Návrh dle empirického vztahu:

$$h_t = \left(\frac{1}{17} \div \frac{1}{12} \right) \cdot L = \left(\frac{1}{17} \div \frac{1}{12} \right) \cdot 5950 = 353 \div 500 \Rightarrow \boxed{420 \text{ mm}}$$

$$b_t = \left(\frac{h_t}{3} \div \frac{2 \cdot h_t}{3} \right) = \left(\frac{420}{3} \div \frac{2 \cdot 420}{3} \right) = 140 \div 280 \Rightarrow \boxed{250 \text{ mm}}$$

6.1.2.2 Návrh a posouzení ohybové výztuže trámu

Zatížení stropní konstrukce:

tab. 7: Výpočet zatížení na trám

Zatížení	Charakteristické [kN/m ²]	Zatěžovací šířka [m]	γ_F [-]	Návrhové [kN/m ²]
Stálé				
skladba podlahy + příčky	2	2,5	1,35	6,75
tíha desky	3	2,5	1,35	10,125
vlastní tíha trámu	$25 \cdot (0,42 - 0,12) = 7,5$	0,25	1,35	2,5
Celkem stálé	$g_k = 14,375$			$g_d = 19,4$
Proměnné				
kategorie B	2,5	2,5	1,5	9,4
Celkem proměnné	$q_k = 6,25$			$q_d = 9,4$
Celkem	$g_k + q_k = 20,625$			$g_d + q_d = 28,8$

Moment od zatížení:

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 28,8 \cdot 5,95^2 = 128 \text{ kNm}$$

Účinná výška průřezu:

$$d = h_t - c - \frac{\emptyset}{2} - \emptyset_{tř} = 420 - 20 - \frac{14}{2} - 8 = 385 \text{ mm}$$

Stanovení spolupůsobící šířky:

$$b_{eff} = b_{eff1} + b_{eff2} + b_t$$

$$l_0 = 5950 \text{ mm}$$

$$b_{eff1} = \min(0,2 \cdot b_1 + 0,1 \cdot l_0; 0,2 \cdot l_0; b_1)$$

$$b_{eff1} = \min(0,2 \cdot 1125 + 0,1 \cdot 5950; 0,2 \cdot 5950; 1125)$$

$$b_{eff1} = \min(820; 1190; 1125)$$

$$b_{eff1} = b_{eff2} = 820 \text{ mm}$$

$$b_{eff} = 820 + 820 + 250 = 1890 \text{ mm}$$

Návrh ohybové výztuže:

$$\mu = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} \cdot d^2 \cdot \eta \cdot f_{cd}} = \frac{128 \cdot 10^6}{1890 \cdot 385^2 \cdot 1 \cdot 20} = 0,023 \rightarrow \xi = 0,029 \rightarrow \zeta = 0,988$$

$$A_{s,req} = \frac{M_{Ed}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{128 \cdot 10^6}{0,988 \cdot 385 \cdot 434,78} = 774 \text{ mm}^2$$

Návrh výztuže: 6x Ø 14 ($A_{s,prov} = 924 \text{ mm}^2$)

Posouzení ohybové výztuže:**Konstrukční zásady**Minimální plocha výztuže:

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

$$924 \text{ mm}^2 \geq \max \left(\frac{0,26 \cdot 2,9 \cdot 250 \cdot 385}{500}; 0,0013 \cdot 250 \cdot 385 \right)$$

$$924 \text{ mm}^2 \geq \max (145; 125)$$

$$924 \text{ mm}^2 > 145 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Maximální plocha výztuže:

$$A_{s,prov} \leq A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c$$

$$924 \text{ mm}^2 \leq 0,04 \cdot 250 \cdot 420$$

$$924 \text{ mm}^2 < 4200 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Minimální světlá vzdálenost mezi pruty:

$$s_c \geq s_{min} = \max (1,2 \cdot \phi; D_{max} + 5; 20 \text{ mm})$$

$$22 \text{ mm} \geq \max (1,2 \cdot 14; 16 + 5; 20 \text{ mm})$$

$$22 \text{ mm} \geq \max (16,8; 21; 20 \text{ mm})$$

$$22 \text{ mm} > 21 \text{ mm} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Posouzení návrhu:Výška tlačené oblasti:

$$x = \frac{A_{s,prov} \cdot f_{yd}}{b_t \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cd}} = \frac{924 \cdot 434,78}{1890 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 20} = 13,3 \text{ mm}$$

Posouzení únosnosti:

$$M_{Rd} = A_{s,prov} \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,5 \cdot \lambda \cdot x) = 924 \cdot 434,78 \cdot (385 - 0,5 \cdot 0,8 \cdot 13,3) \cdot 10^{-6}$$

$$M_{Rd} = 152,5 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 128 \text{ kNm} < M_{Rd} = 152,5 \text{ kNm} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Ověření poměrné výšky tlačené oblasti:

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{13,3}{385} = 0,04$$

$$\xi = 0,04 < \xi_{max} = 0,45 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Ověření protažení výztuže:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E} = \frac{434,78}{200000} = 2,175 \text{ ‰}$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x}$$

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu} \cdot (d - x)}{x} = \frac{3,5 \cdot (385 - 13,3)}{13,3} = 98 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 98 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = 2,175 \text{ ‰} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

6.2 Průběh teploty v požárním úseku

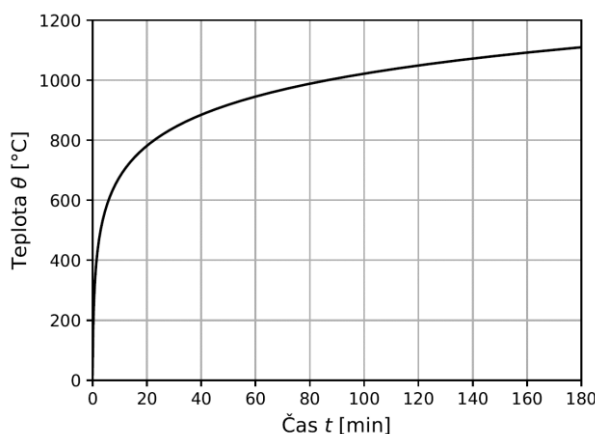
Pro sestavení průběhu teploty v požárním úseku byly vybrány dva provozy. V prvním případě se jednalo o provoz hotelu, ve druhém případě o provoz knihovny. Pro oba posuzované provozy byly stanoveny průběhy teplot dle normové teplotní křivky, parametrické teplotní křivky dle ČSN EN 1991-1-2 [1], DIN EN 1991-1-2/NA [2], DS/EN 1991-1-2 DK NA [3] a také podle dvouzónového modelu.

K sestavení parametrických teplotních křivek byl použit software PTK [33] vytvořený v rámci této práce. V případě stanovení průběhu teplot pomocí dvouzónového modelu bylo využito softwaru CFAST [34].

6.2.1 Parametry vstupující do výpočtu křivek

6.2.1.1 Normová teplotní křivka

Průběh teploty v požárním úseku podle normové teplotní křivky (obr. 28) je pro oba provozy stejný.



obr. 28: Normová teplotní křivka

6.2.1.2 Křivka dle ČSN EN 1991-1-2

Rychlost rozvoje požáru:

- hotel - střední
- knihovna - vysoká

Faktor otvorů:

$$O = 0,152 \text{ m}^{1/2}$$

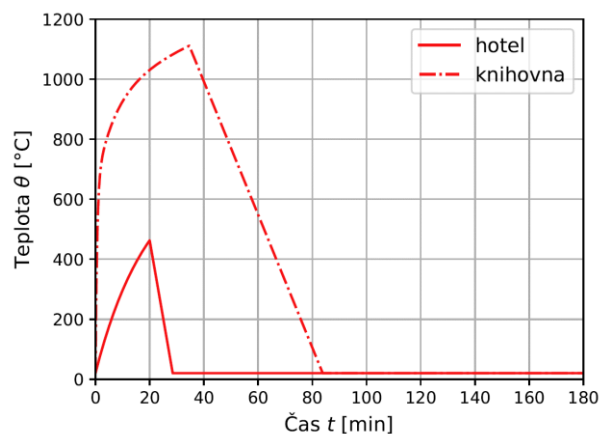
Koeficient povrchů:

- Železobeton:
 - $\rho = 2500 \frac{kg}{m^3}$
 - $c = 1020 \frac{J}{kg \cdot K}$
 - $\lambda = 1,74 \frac{W}{m \cdot K}$
- Keramické zdivo:
 - $\rho = 870 \frac{kg}{m^3}$
 - $c = 1000 \frac{J}{kg \cdot K}$
 - $\lambda = 0,28 \frac{W}{m \cdot K}$

$$b = 1909,389 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}$$

Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení:

- hotel - $q_{t,d} = 90,63 \frac{MJ}{m^2}$
- knihovna - $q_{t,d} = 438,47 \frac{MJ}{m^2}$



obr. 29: Křivka dle ČSN EN 1991-1-2 pro vybrané provozy

6.2.1.3 Křivka dle DIN EN 1991-1-2/NAPlocha PÚ:

$$A_f = 41,895 m^2$$

Plocha konstrukcí ohraničujících PÚ:

$$A_t = 167,31 \text{ m}^2$$

Plocha otvorů:

$$A_v = 18 \text{ m}^2$$

Výška otvorů:

$$h_{eq} = 2 \text{ m}$$

Maximální rychlost uvolňování tepla:

- hotel - $RHR_f = 250 \frac{kW}{m^2}$
- knihovna - $RHR_f = 500 \frac{kW}{m^2}$

Rychlost rozvoje požáru:

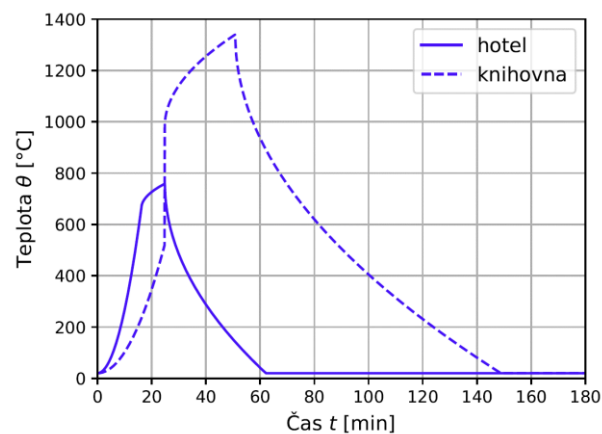
- hotel - $t_\alpha = 300 \text{ s}$
- knihovna - $t_\alpha = 450 \text{ s}$

Koeficient povrchů:

$$b = 1500 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}$$

Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení:

- hotel - $q_{x,d} = 301,7 \frac{MJ}{m^2}$
- knihovna - $q_{x,d} = 1300 \frac{MJ}{m^2}$



obr. 30: Křivka dle DIN EN 1991-1-2/NA pro vybrané provozny

6.2.1.4 Křivka dle DS/EN 1991-1-2 DK NA

Faktor otvorů:

$$O = 0,152 \text{ m}^{1/2}$$

Koeficient povrchů:

▪ Železobeton:

$$- \rho = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$- c = 1020 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$- \lambda = 1,74 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

▪ Keramické zdivo:

$$- \rho = 870 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$- c = 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

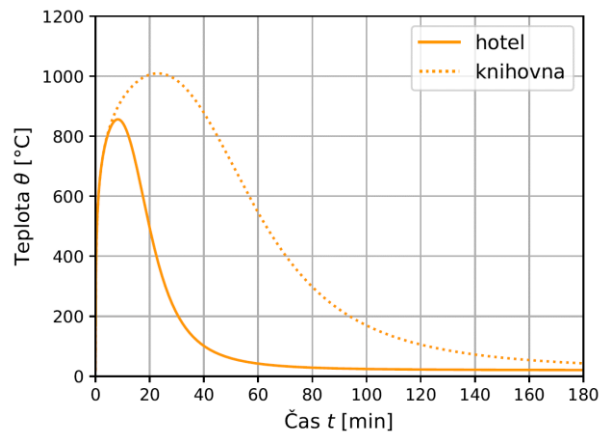
$$- \lambda = 0,28 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$b = 1909,389 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}}$$

Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení:

▪ hotel - $q_{t,d} = 150 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$

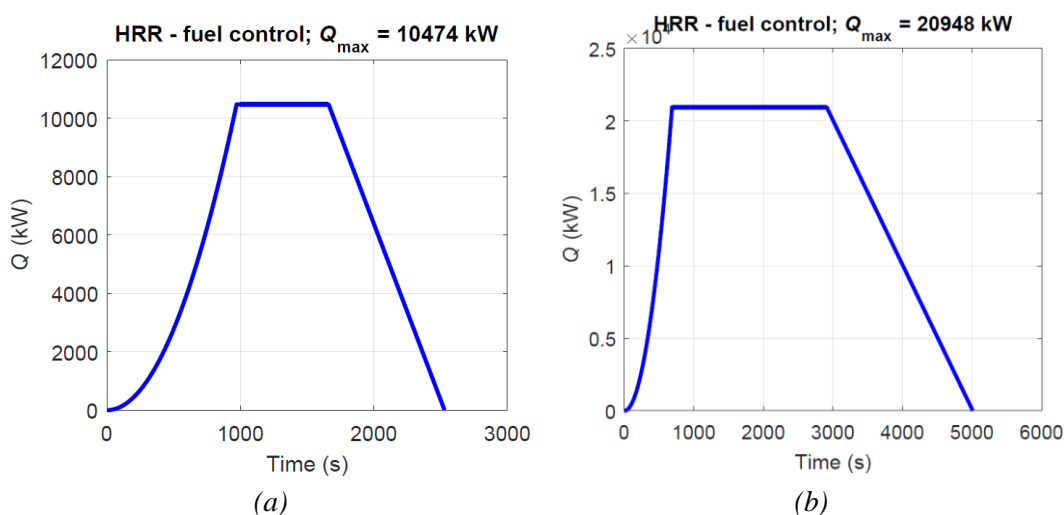
▪ knihovna - $q_{t,d} = 438,47 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$



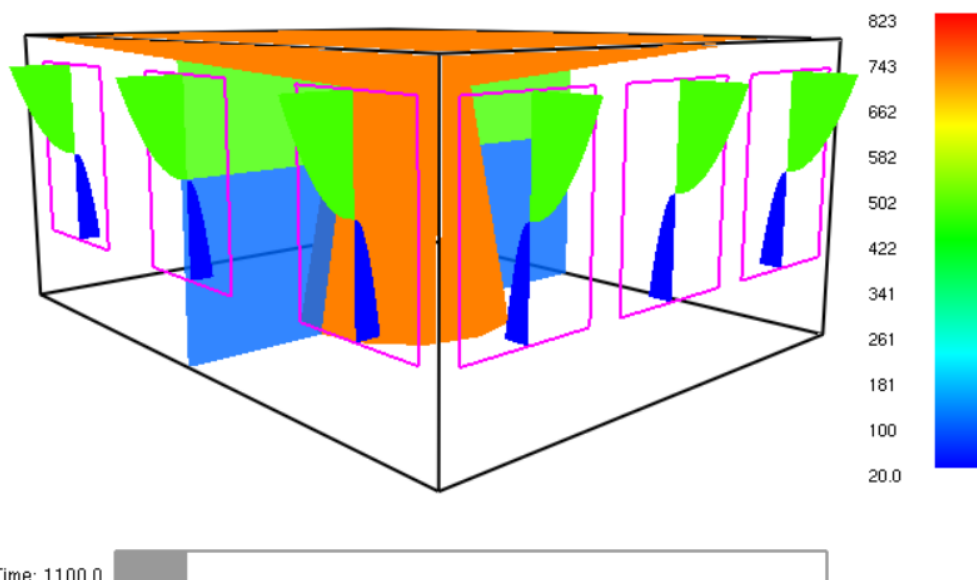
obr. 31: Křivka dle DS/EN 1991-1-2 DK NA pro vybrané provozy

6.2.1.5 Dvouzónový model

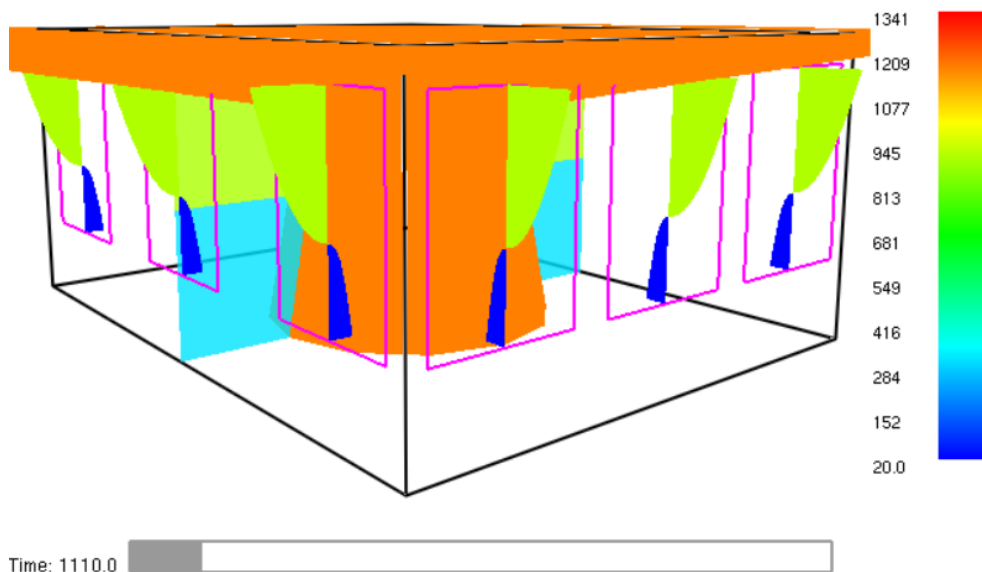
Pro sestavení průběhu teplot pomocí dvouzónového modelu byl zvolen software CFAST [34], ve kterém byl nejprve vytvořen prostor požárního úseku. Následně byl v programu vymodelován požár pro oba uvažované provozy pomocí t-kvadratické křivky HRR (obr. 32), která byla vypočtena v programu FMC [25]. Na obr. 35 můžeme vidět porovnání vstupní a výstupní křivky HRR pro oba provozy.



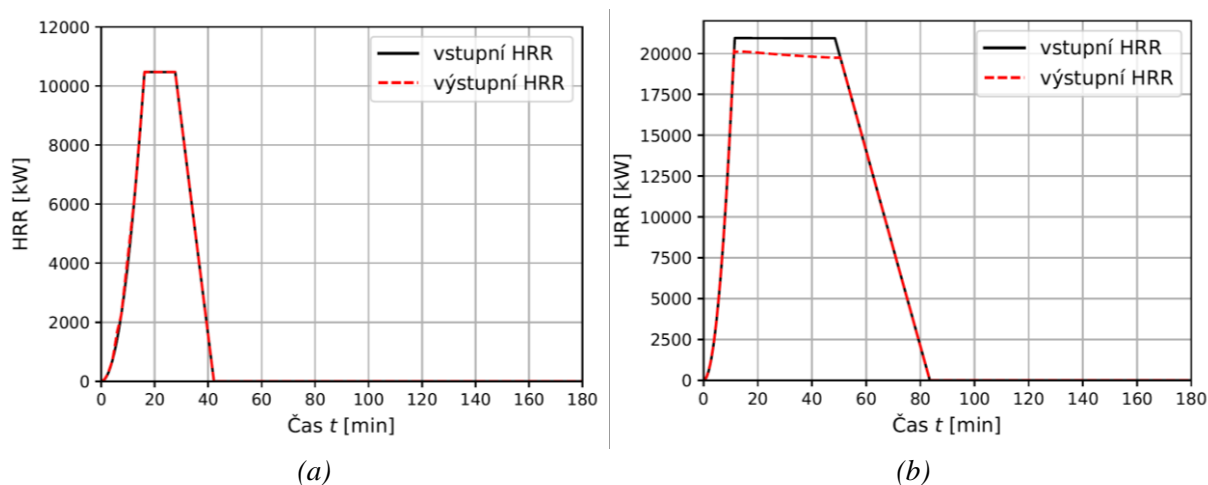
obr. 32: Křivka HRR pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny. Převzato z [25]



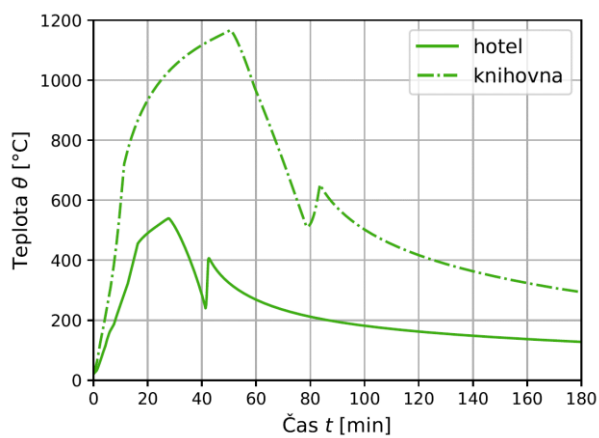
obr. 33: Průběh teploty ve vymodelovaném prostoru hotelu v programu CFAST [34]



obr. 34: Průběh teploty ve vymodelovaném prostoru knihovny v programu CFAST [34]



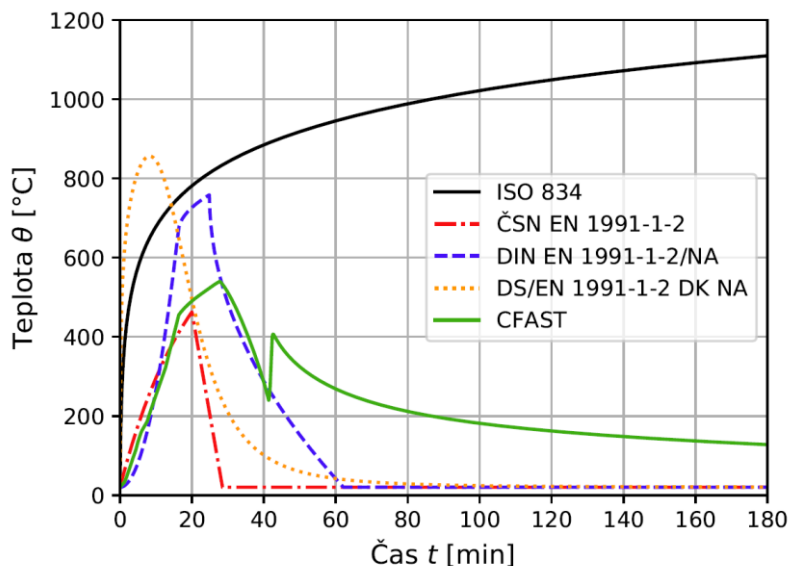
obr. 35: Vstupní a výstupní HRR v programu CFAST pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny



obr. 36: Průběh teploty horní kouřové vrstvy PÚ dle CFASTU pro vybrané provoz

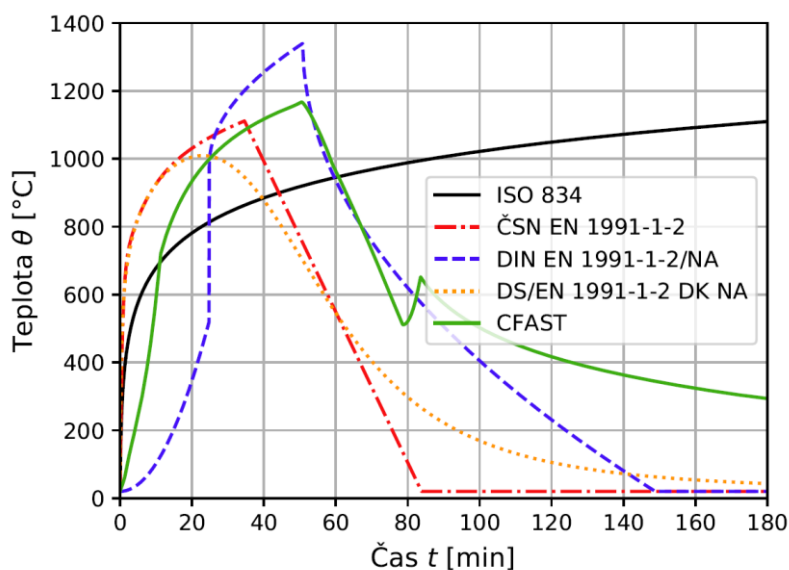
6.2.2 Vykreslení teplotních křivek

Na obr. 37 můžeme vidět průběh teploty v požárním úseku hotelu dle různých modelů požáru. Z grafu lze vyčíst, že teplota PÚ stanovená pomocí německé křivky a křivky z dvouzónového modelu, mají docela podobný průběh. Naopak velmi rozdílný průběh od ostatních křivek je vidět u dánské křivky. Zde pozorujeme velmi vysoký nárůst teploty během krátké doby.



obr. 37: Průběh teploty v PÚ hotelu dle různých modelů požáru

Na obr. 38 je vykreslen průběh teplot v požárním úseku knihovny dle různých modelů požáru. Pro tento provoz má velice podobný průběh teplot evropská a dánská křivka. Křivka z dvouzónového modelu se opět nejvíce podobá německé křivce.



obr. 38: Průběh teploty v PÚ knihovny dle různých modelů požáru

V následující tabulce (tab. 8) jsou uvedeny maximální teploty požárního úseku. Dále pak čas, kdy byla dosažena maximální teplota a také čas, kdy teplota klesne na 20 °C. Tyto hodnoty jsou uvedeny pro různé modely požáru.

tab. 8: Maximální teplota v PÚ, čas, ve kterém byla dosažena maximální teplota a čas, kdy teplota klesne na 20 °C dle různých modelů požáru

	<i>Hotel</i>			<i>Knihovna</i>		
	θ_{max} [°C]	t_{max} [min]	t_{20} [min]	θ_{max} [°C]	t_{max} [min]	t_{20} [min]
ČSN EN 1991-1-2	462,8	20	28,5	1 111,3	34,6	83,8
DIN EN 1991-1-2/NA	758,5	24,8	62,2	1 339,6	50,8	148,8
DS/EN 1991-1-2 DK NA	856,2	8,3	∞	1 009,5	23	∞
CFAST	540,2	27,7	> 180	1 167,4	50,5	> 180

6.3 Stanovení požární odolnosti konstrukcí

Požární odolnost železobetonové stropní desky a trámu byla stanovena zjednodušenou výpočetní metodou izotermy 500 °C. Tato metoda je více popsána v kapitole 4.2.1.

6.3.1 Stanovení požární odolnosti stropní desky

Postup výpočtu:

Moment od zatížení při požární situaci:

$$M_{Ed,fi} = \eta_{fi} \cdot M_{Ed} = 0,7 \cdot 8,2 = 5,74 \text{ kNm}$$

Redukované rozměry:

$$d_{fi} = d = 101 \text{ mm}$$

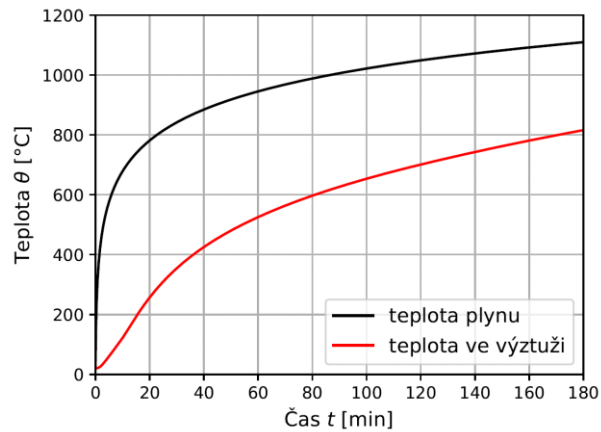
$$b_{fi} = 1000 \text{ mm}$$

Návrhová hodnota pevnosti betonu:

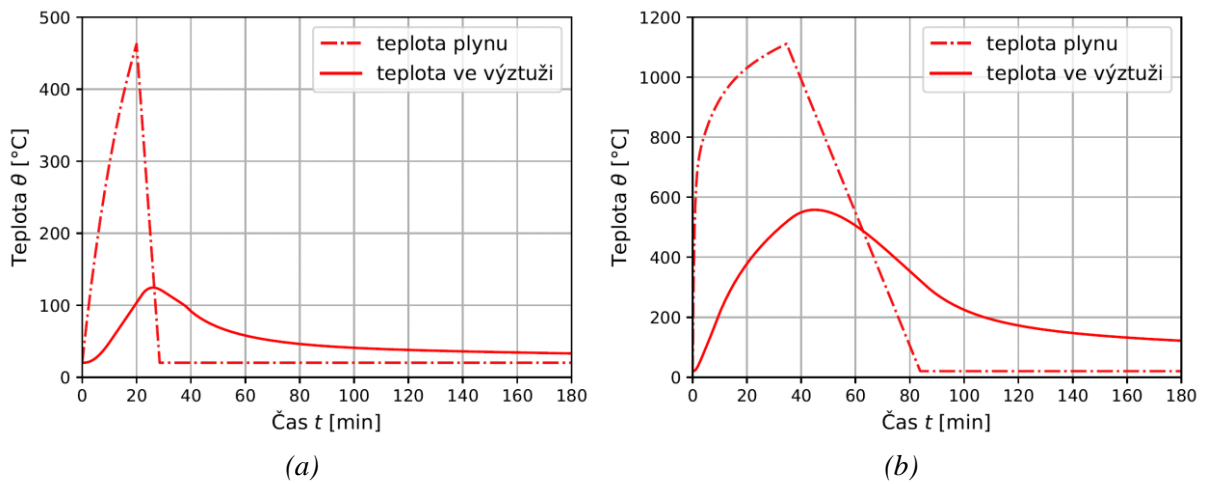
$$f_{cd,fi,20^\circ\text{C}} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{c,fi}} = \frac{30}{1} = 30 \text{ MPa}$$

Návrhová hodnota pevnosti výztuže:

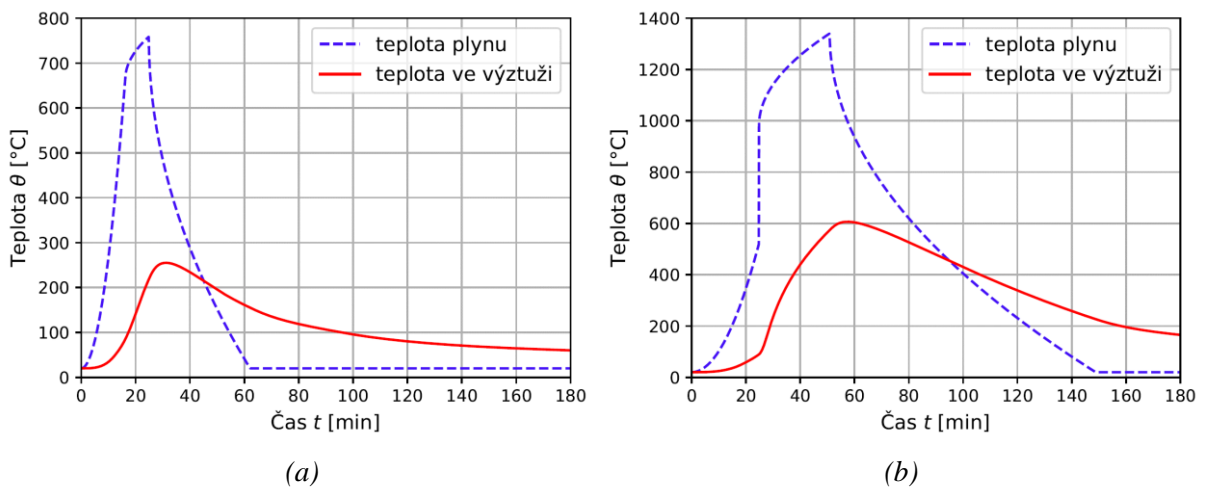
Pro stanovení pevnosti výztuže při požáru je zapotřebí znát teplotu v její ose, ta byla stanovena pomocí programu TempAnalysis [35]. Na obr. 39 - obr. 43 jsou znázorněny teploty ve výztuži stropní desky v závislosti na teplotě požárního úseku pro vybrané modely požáru.



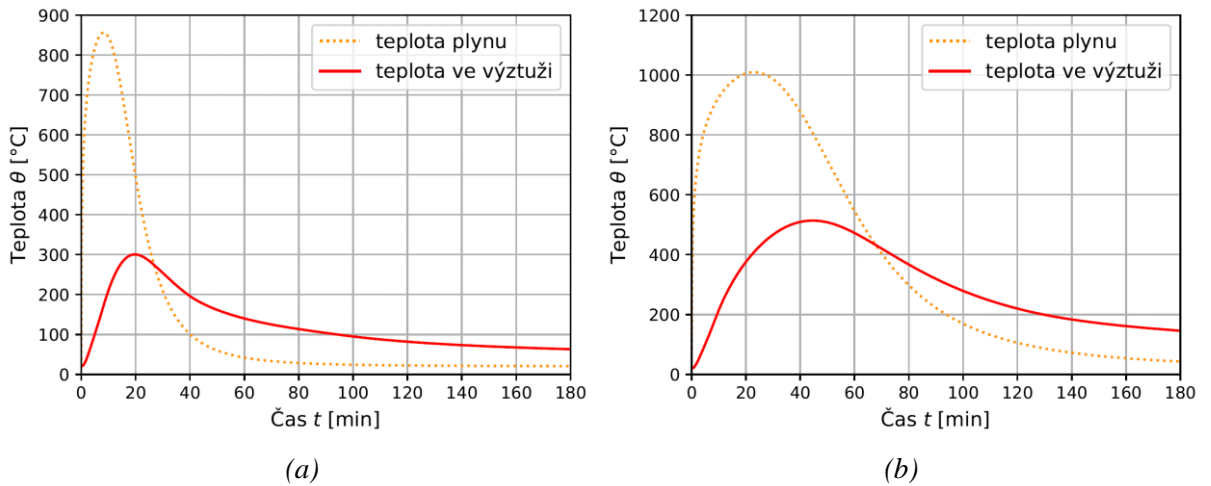
obr. 39: Teplota ve výztuži desky v závislosti na teplotě plynu dle ISO 834 pro oba provozu



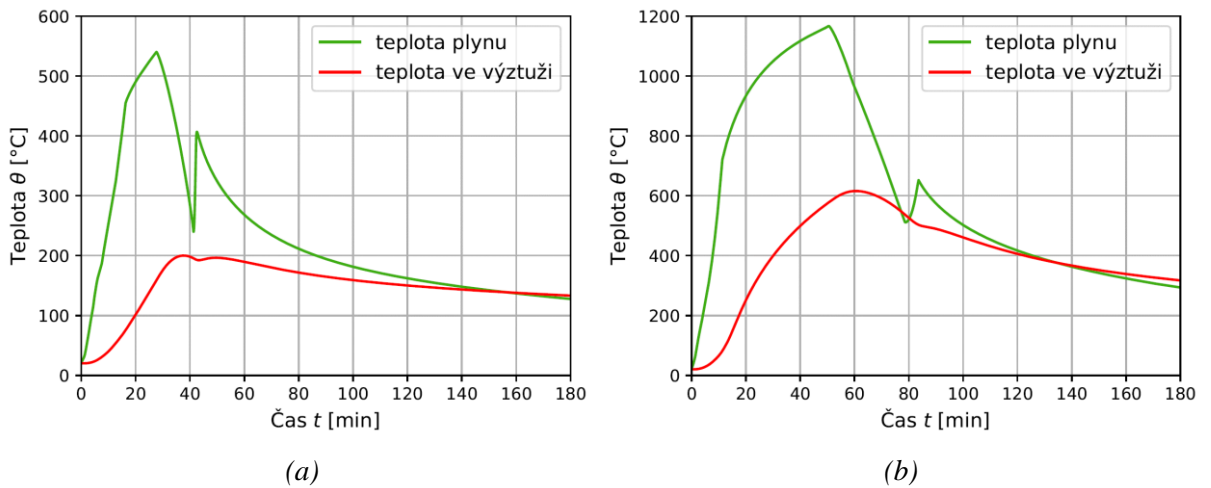
obr. 40: Teplota ve výztuži desky v závislosti na teplotě plynu dle ČSN EN 1991-1-2 pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny



obr. 41: Teplota ve výztuži desky v závislosti na teplotě plynu dle DIN EN 1991-1-2/NA pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny



obr. 42: Teplota ve výztuži desky v závislosti na teplotě plynu dle DS/EN 1991-1-2 DK NA pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny

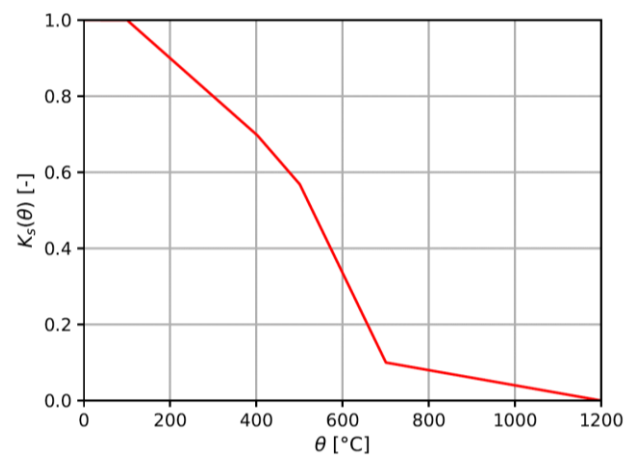


obr. 43: Teplota ve výztuži desky v závislosti na teplotě plynu dle dvouzónového modelu pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny

Součinitel $k_{s,\theta}$ je stanoven z obr. 44 v závislosti na teplotě v ose výztuže.

$$\theta = x \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow k_{s,\theta} = y$$

$$f_{syd,fi} = k_{s,\theta} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{S,fi}} \text{ [MPa]}$$



obr. 44: Součinitel $k_{s,\theta}$ pro redukci charakteristické meze kluzu výztuže. Převzato z [7]

Výška tlačené oblasti:

$$x_{fi} = \frac{A_s \cdot f_{syd,fi}}{b_{fi} \cdot \lambda \cdot \eta \cdot f_{cd,fi,20^\circ C}} \text{ [mm]}$$

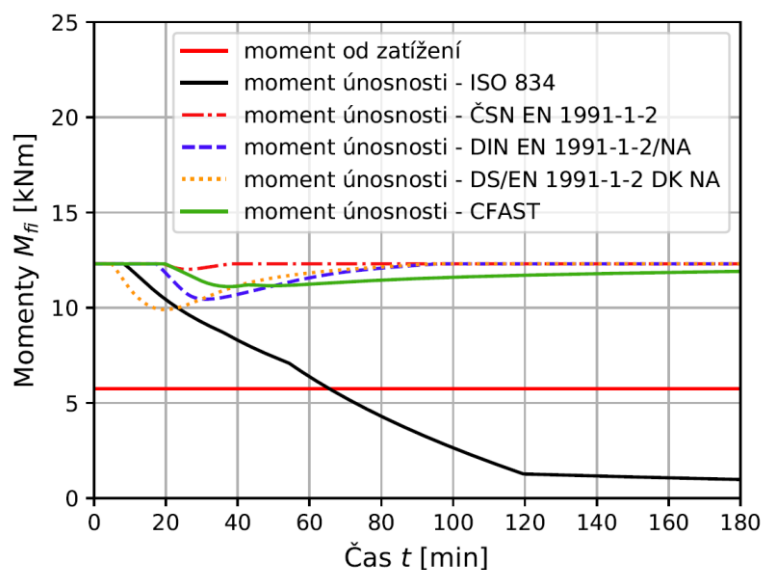
Moment únosnosti:

$$M_{Rd,fi} = A_s \cdot f_{syd,fi} \cdot z_{fi} = A_s \cdot f_{syd,fi} \cdot (d_{fi} - 0,5 \cdot \lambda \cdot x_{fi}) \text{ [kNm]}$$

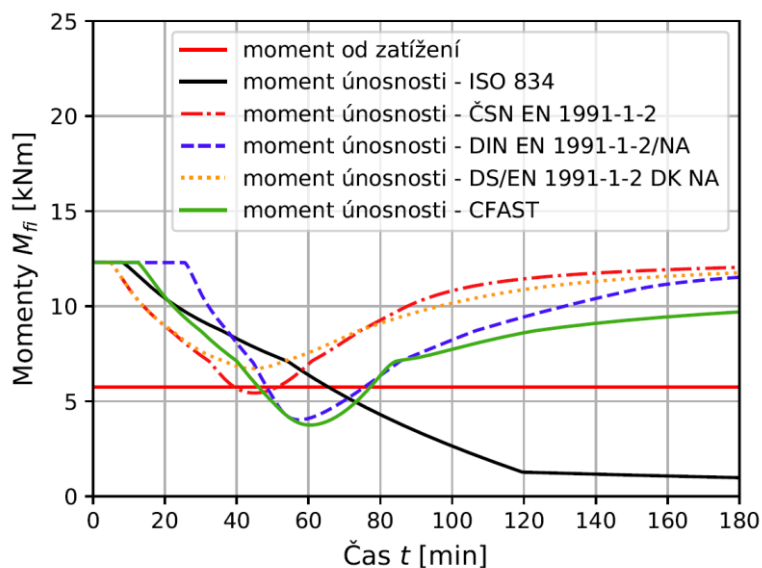
Posouzení:

$$M_{Ed,fi} \leq M_{Rd,fi} \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Na obr. 45 a obr. 46 je znázorněn moment od zatížení při požární situaci $M_{Ed,fi}$ a výsledné průběhy momentů únosnosti stropní desky při požární situaci $M_{Rd,fi}$. Pokud se jedná o prostor hotelu, je vidět, že stropní deska má podle nominální teplotní křivky PO 65 minut, zatímco podle ostatních modelů požáru nebyla dosažena mezní únosnost. V případě prostoru knihovny má deska PO podle nominální teplotní křivky vyšší než podle zbylých modelů požáru. Výsledné požární odolnosti jsou shrnuty v tab. 9. Pro porovnání je určena i tabulková PO.



obr. 45: Průběh momentů únosnosti desky pro hotel dle různých modelů požáru



obr. 46: Průběh momentů únosnosti desky pro knihovnu dle různých modelů požáru

tab. 9: Požární odolnost ŽB stropní desky pro různé modely požáru

		PO [min]	
		Hotel	Knihovna
Tabulková PO	<i>dle ČSN EN 1992-1-2 tab. 5.8</i>	30	30
Izoterma 500 °C	<i>dle ISO 834</i>	65	65
	<i>dle ČSN EN 1991-1-2</i>	-	39
	<i>dle DIN EN 1991-1-2/NA</i>	-	48
	<i>dle DS/EN 1991-1-2 DK NA</i>	-	-
	<i>dle CFASTU</i>	-	46

6.3.2 Stanovení požární odolnosti trámu

Postup výpočtu:

Moment od zatížení při požární situaci:

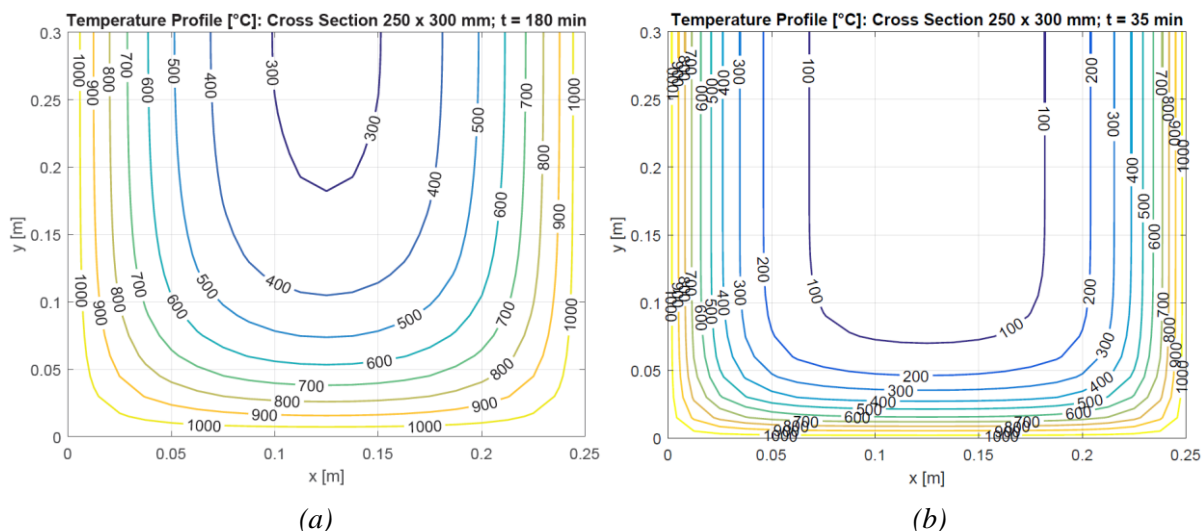
$$M_{Ed,fi} = \eta_{fi} \cdot M_{Ed} = 0,7 \cdot 128 = 89,6 \text{ kNm}$$

Redukované rozměry:

$$d_{fi} = d = 377 \text{ mm}$$

$$b_{fi} = b - 2 \cdot a_{500,b} = 250 - 2 \cdot a_{500,b}$$

Hodnota $a_{500,b}$ (tab. 10) byla stanovena v čase, kdy byla dosažena maximální teplota prostoru dle jednotlivých modelů. Na obr. 47 je ukázka teplotních profilů pro prostor knihovny.



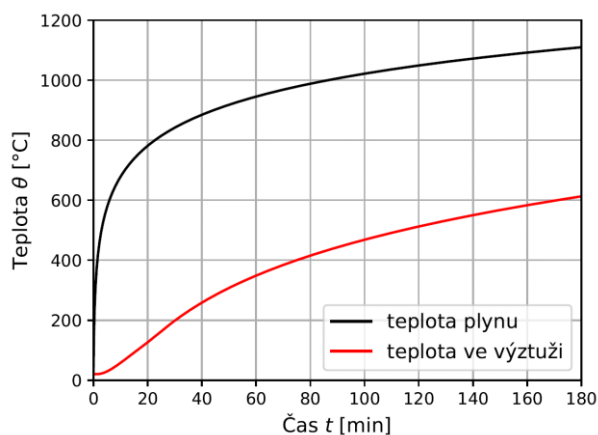
obr. 47: Teplotní profil trámu pro prostor knihovny dle: (a) ISO 834; (b) ČSN EN 1991-1-2.
Převzato z [36]

tab. 10: Poloha izotermy 500 °C pro různé modely požáru

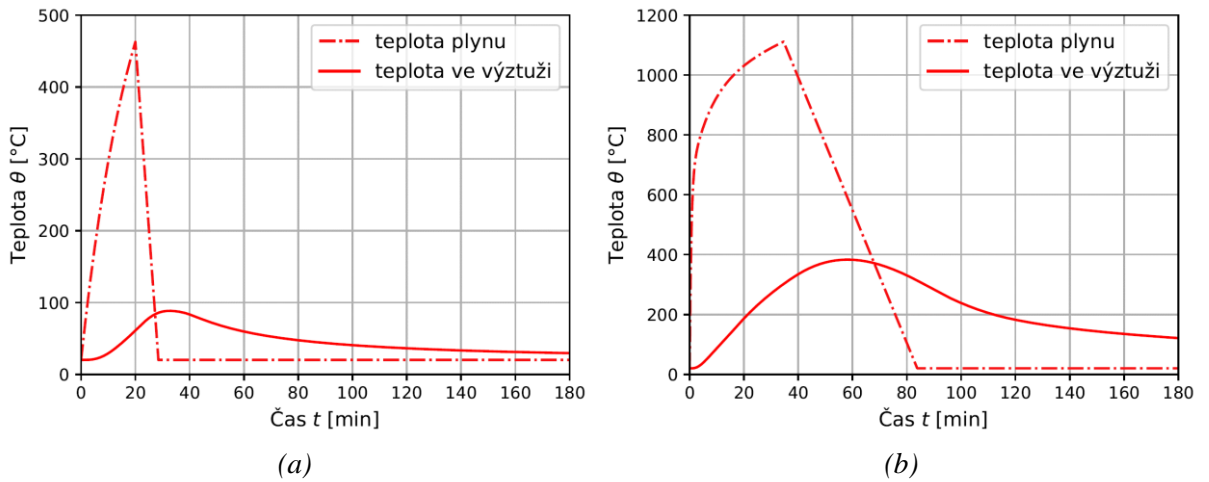
	$a_{500,b}$ [mm]	
	Hotel	Knihovna
ISO 834	70	70
ČSN EN 1991-1-2	0	30
DIN EN 1991-1-2/NA	14	43
DS/EN 1991-1-2 DK NA	9	22
CFAST	0	37

Dále je postup výpočtu stejný jako u stanovení požární odolnosti stropní desky.

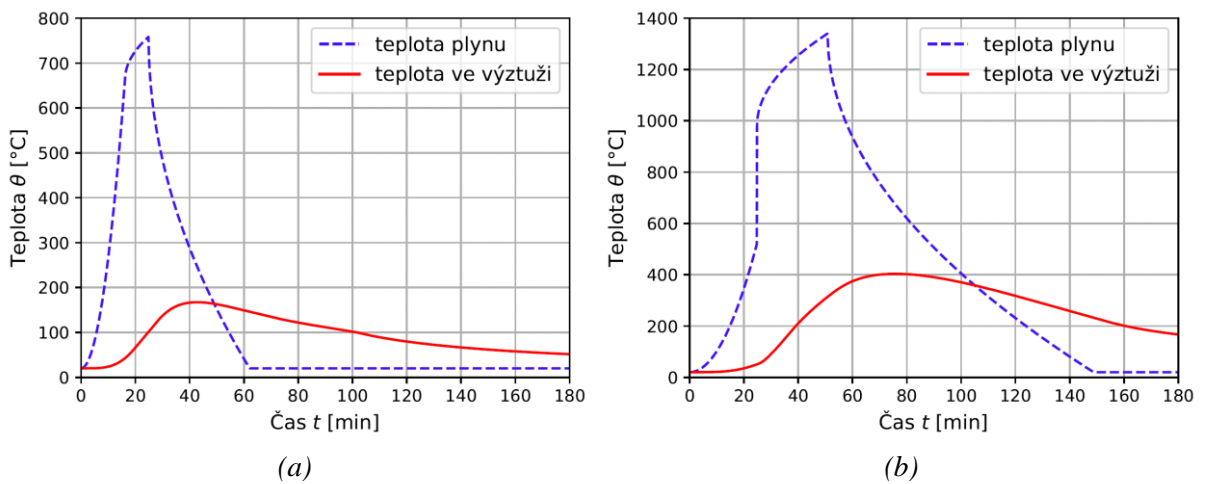
Na obr. 48 - obr. 52 jsou znázorněny teploty ve výztuži trámu v závislosti na teplotě požárního úseku pro vybrané modely požáru.



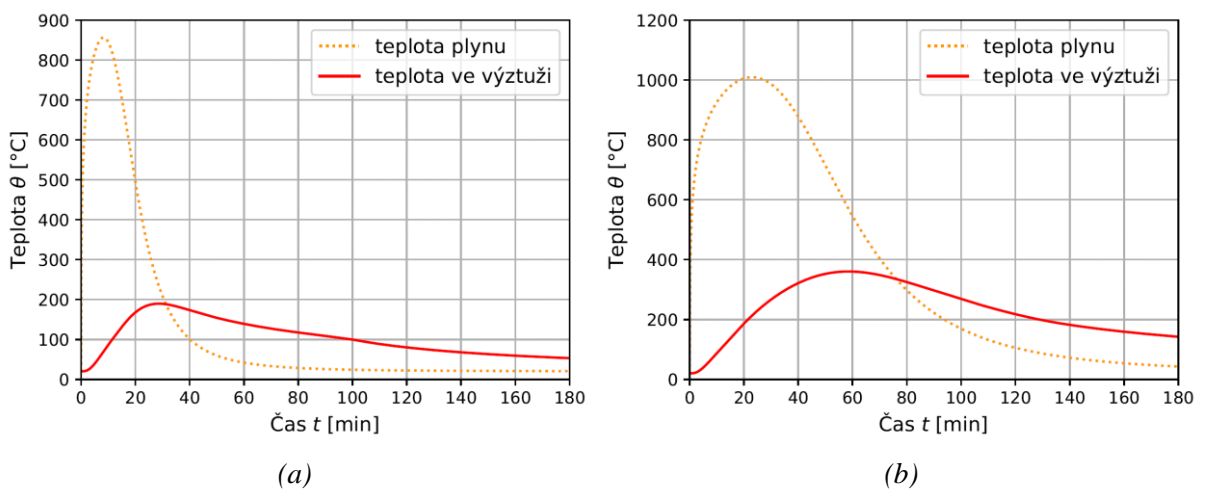
obr. 48: Teplota ve výztuži trámu v závislosti na teplotě plynu dle ISO 834 pro oba provoz



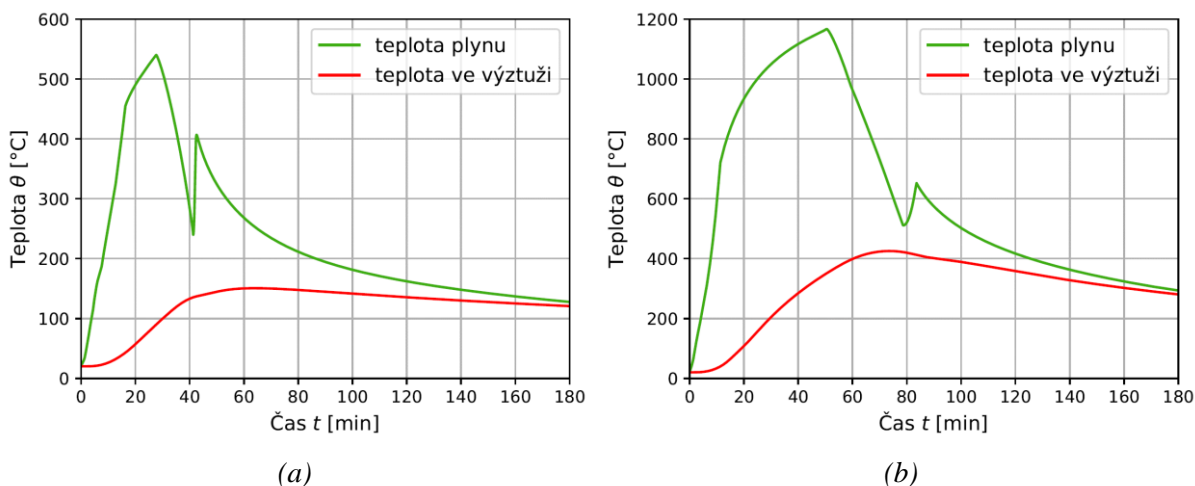
obr. 49: Teplota ve výztuži trámu v závislosti na teplotě plynu dle ČSN EN 1991-1-2 pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny



obr. 50: Teplota ve výztuži trámu v závislosti na teplotě plynu dle DIN EN 1991-1-2/NA pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny

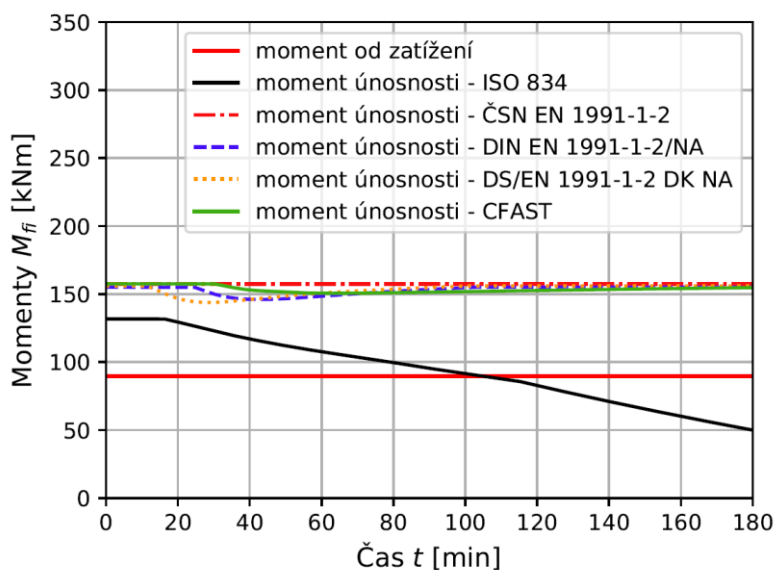


obr. 51: Teplota ve výztuži trámu v závislosti na teplotě plynu dle DS/EN 1991-1-2 DK NA pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny

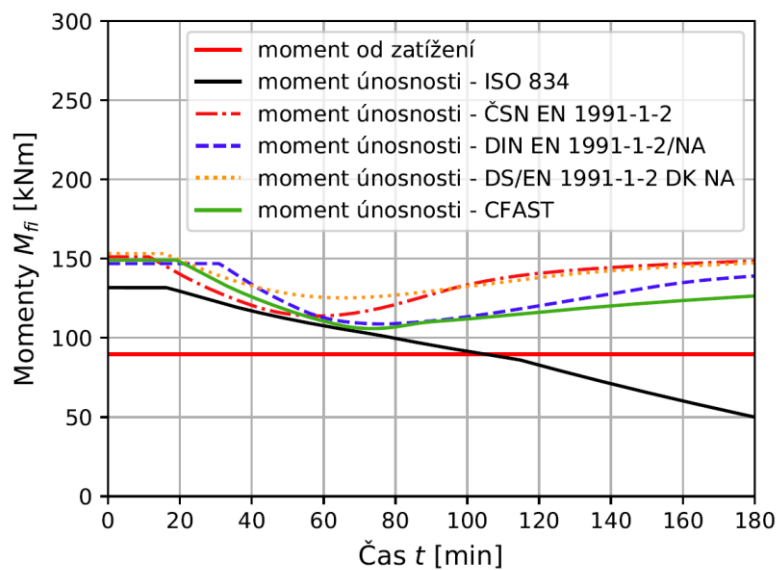


obr. 52: Teplota ve výztuži trámu v závislosti na teplotě plynu dle dvouzónového modelu pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny

Na obr. 53 a obr. 54 je znázorněn moment od zatížení při požární situaci $M_{\text{Ed,fi}}$ a výsledné průběhy momentů únosnosti trámu při požární situaci $M_{\text{Rd,fi}}$. V prostoru hotelu i knihovny má průvlak podle nominální teplotní křivka PO 104 minut, zatímco podle ostatních modelů požáru nebyla dosažena mezní únosnost. Výsledná požární odolnost průvlaku je shrnuta v tab. 11.



obr. 53: Průběh momentů únosnosti trámu pro hotel dle různých modelů požáru



obr. 54: Průběh momentů únosnosti trámu pro knihovnu dle různých modelů požáru

tab. 11: Požární odolnost ŽB průvlaku pro různé modely požáru

		<i>PO [min]</i>	
		<i>Hotel</i>	<i>Knihovna</i>
Tabulková PO	<i>dle ČSN EN 1992-1-2 tab. 5.5</i>	60	60
Izoterma 500 °C	<i>dle ISO 834</i>	104	104
	<i>dle ČSN EN 1991-1-2</i>	-	-
	<i>dle DIN EN 1991-1-2/NA</i>	-	-
	<i>dle DS/EN 1991-1-2 DK NA</i>	-	-
	<i>dle CFASTU</i>	-	-

7 Vyhodnocení

Z výsledků řešeného příkladu je patrné, že v případě stanovení požární odolnosti stropní desky pomocí zjednodušené výpočetní metody Izoterm 500 °C pro provoz hotelu, je dle normové teplotní křivky požární odolnost 65 minut. V případě posouzení podle ostatních modelů požáru nebyla mezní únosnost dosažena. Pokud by požadovaná požární odolnost byla maximálně 60 minut, je pak vhodné využít právě normovou teplotní křivku. Pokud by byl požadavek na požární odolnost vyšší, bylo by vhodné využít zjednodušené výpočetní metody Izoterm 500 °C s využitím kterékoliv parametrické teplotní křivky.

Pokud však byla požární odolnost stanovována pro prostor knihovny, vychází nejlépe stanovení požární odolnosti podle dánské křivky, kdy mez únosnosti nebyla dosažena. PO stropní desky stanovena pomocí normové teplotní křivky vyšla vyšší než podle zbylých přesnějších modelů požáru. U tohoto příkladu je tedy vidět, že ne vždy je hodnocení pomocí normové teplotní křivky konzervativní.

V případě stanovení požární odolnosti trámu, je u vyšších požadavků na požární odolnost vhodné využít zjednodušenou výpočetní metodu pomocí kterékoli parametrické teplotní křivky. Oproti tabulkovým hodnotám požární odolnosti můžeme navrhnout menší šířku trámu a také menší osovou vzdálenost výztuže od povrchu prvku.

8 Závěr

Práce se zabývá dostupnými matematickými modely požáru a tím, jak výběr modelu požáru ovlivňuje výslednou požární odolnost konstrukcí. Podrobně jsou popsány vybrané nominální teplotní křivky, konkrétně normová teplotní křivka, křivka vnějšího požáru, uhlovodíková teplotní křivka a křivka pomalého zahřívání. Dále jsou pak popsány modely přirozeného požáru, které se dělí na zjednodušené a zdokonalené modely.

Další část byla věnována podrobnějšímu zaměření na vybrané parametrické teplotní křivky, které patří do zjednodušených modelů požáru. Práce je věnována parametrickým teplotním křivkám dle ČSN EN 1991-1-2, DIN EN 1991-1-2/NA a DS/NA 1991-1-2 DK NA. V této kapitole byly podrobně popsány jednotlivé křivky včetně okrajových podmínek. U každé parametrické teplotní křivky byl pak uveden postup výpočtu.

Část práce byla věnována také metodám pro posuzování požární odolnosti konstrukcí. V této kapitole je popsáno stanovení požární odolnosti dle tabulkové a výpočetní metody. Podrobněji byla popsána metoda Izotermy 500 °C, která byla dále použita v řešeném příkladu.

V rámci diplomové práce byl vytvořen program PTK, který byl prakticky využit pro analýzu vstupních parametrů vybraných parametrických teplotních křivek. Program byl vytvořen v programovacím jazyce Python v české i anglické verzi. Program je volně dostupný na katedře betonových konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze.

V praktické části byl řešen příklad, ve kterém byla stanovena požární odolnost železobetonové stropní desky a trámu. Nejprve byla navržena a posouzena hlavní nosná výztuž vybraných konstrukčních prvků. Následně byly stanoveny průběhy teplot v požárním úseku dle normové teplotní křivky, parametrických teplotních křivek a dvouzónového modelu pro provoz hotelu a knihovny. Z výsledků je patrné, že v případě hodnocení prostoru hotelu jsou jednotlivé křivky průběhu teplot velmi rozdílné. Naopak v prostoru knihovny mají tyto křivky daleko podobnější průběh. Tento jev může být způsoben vyšší hodnotou hustoty požárního zatížení. Toto zjištění je velice zajímavé, protože parametrické teplotní křivky jsou počítány odlišným způsobem. Zajímavostí také je, že se tvarem podobají přesnějšímu dvouzónovému modelu. Nakonec byla stanovena požární odolnost vybraných konstrukcí zjednodušenou výpočetní metodou Izotermy 500 °C.

Dle provedených výpočtů lze usoudit, že použití výpočetních metod pro stanovení požární odolnosti je výhodnější z hlediska návrhu jednotlivých prvků. V tomto případě je možné navrhovat např. menší krytí výztuže, průřezovou plochu atd. než u stanovení požárních odolností podle tabulkových hodnot.

Seznam obrázků

obr. 1: Nominální teplotní křivky. Převzato z [5]	13
obr. 2: Lokální požár: (a) plameny nezasahují do stropu; (b) plameny zasahují do stropu. Převzato z [5]	15
obr. 3: Jednozónový model. Převzato z [10].....	16
obr. 4: Dvouzónový model. Převzato z [10]	16
obr. 5: Šíření kouře a plamene v CFD programu. Převzato z [13].....	17
obr. 6: BFD křivka. Převzato z [15].....	18
obr. 7: Křivka dle ČSN EN 1991-1-2 [1].....	19
obr. 8: Vztah mezi rychlostí uvolňování tepla a iBMB křivkou. Převzato z [18].....	20
obr. 9: Křivka dle DS/EN 1991-1-2 DK NA [3].....	21
obr. 10: Okrajové podmínky křivek: (a) plocha PÚ; (b) výška PÚ	23
obr. 11: Okrajové podmínky křivek: (a) koeficient povrchů; (b) hustota požárního zatížení	23
obr. 12: Osová vzdálenost výztuže od povrchu	25
obr. 13: Úvodní okno programu.....	27
obr. 14: Okno pro vykreslení křivky dle: (a) ČSN EN 1991-1-2; (b) DIN EN 1991-1-2/NA	28
obr. 15: Okno pro vykreslení: (a) křivky dle DS/EN 1991-1-2 DK NA; (b) všech křivek..	28
obr. 16: Ukázka nápovědy pro: (a) výpočet koeficientu otvorů; (b) určení rychlosti rozvoje požáru.....	29
obr. 17: Chybné zadávání hodnot: (a) špatně zadané hodnoty; (b) hodnota mimo rozsah ..	29
obr. 18: Vykreslení grafu	30
obr. 19: Uložení grafu	30
obr. 20: Export dat v .xlsx souboru	31
obr. 21: Zobrazení dat v .xlsx souboru.....	31
obr. 22: Průběh teploty v prostoru: (a) var. a; (b) var. b	33
obr. 23: Průběh teploty v prostoru: (a) var. c; (b) var. d	33
obr. 24: Průběh teploty v prostoru: (a) var. e; (b) var. f.....	34
obr. 25: Průběh teploty v prostoru: (a) var. g; (b) var. h.....	34
obr. 26: Půdorys řešeného požárního úseku.....	35
obr. 27: Konstrukční a statické schéma řešené části.....	36
obr. 28: Normová teplotní křivka.....	44

obr. 29: Křivka dle ČSN EN 1991-1-2 pro vybrané provozny	45
obr. 30: Křivka dle DIN EN 1991-1-2/NA pro vybrané provozny	46
obr. 31: Křivka dle DS/EN 1991-1-2 DK NA pro vybrané provozny	47
obr. 32: Křivka HRR pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny. Převzato z [25].....	48
obr. 33: Průběh teploty ve vymodelovaném prostoru hotelu v programu CFAST [34]	48
obr. 34: Průběh teploty ve vymodelovaném prostoru knihovny v programu CFAST [34]	49
obr. 35: Vstupní a výstupní HRR v programu CFAST pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny	49
obr. 36: Průběh teploty horní kouřové vrstvy PÚ dle CFASTU pro vybrané provozny.....	49
obr. 37: Průběh teploty v PÚ hotelu dle různých modelů požáru	50
obr. 38: Průběh teploty v PÚ knihovny dle různých modelů požáru	50
obr. 39: Teplota ve výztuži desky v závislosti na teplotě plynu dle ISO 834 pro oba provozny	52
obr. 40: Teplota ve výztuži desky v závislosti na teplotě plynu dle ČSN EN 1991-1-2 pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny	52
obr. 41: Teplota ve výztuži desky v závislosti na teplotě plynu dle DIN EN 1991-1-2/NA pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny	52
obr. 42: Teplota ve výztuži desky v závislosti na teplotě plynu dle DS/EN 1991-1-2 DK NA pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny	53
obr. 43: Teplota ve výztuži desky v závislosti na teplotě plynu dle dvouzónového modelu pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny	53
obr. 44: Součinitel $k_{s,0}$ pro redukci charakteristické meze kluzu výztuže. Převzato z [7].....	53
obr. 45: Průběh momentů únosnosti desky pro hotel dle různých modelů požáru	54
obr. 46: Průběh momentů únosnosti desky pro knihovnu dle různých modelů požáru	55
obr. 47: Teplotní profil trámu pro prostor knihovny dle: (a) ISO 834; (b) ČSN EN 1991-1-2. Převzato z [36]	56
obr. 48: Teplota ve výztuži trámu v závislosti na teplotě plynu dle ISO 834 pro oba provozny	56
obr. 49: Teplota ve výztuži trámu v závislosti na teplotě plynu dle ČSN EN 1991-1-2 pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny	57
obr. 50: Teplota ve výztuži trámu v závislosti na teplotě plynu dle DIN EN 1991-1-2/NA pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny	57
obr. 51: Teplota ve výztuži trámu v závislosti na teplotě plynu dle DS/EN 1991-1-2 DK NA pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny	57
obr. 52: Teplota ve výztuži trámu v závislosti na teplotě plynu dle dvouzónového modelu pro provoz: (a) hotelu; (b) knihovny	58

obr. 53: Průběh momentů únosnosti trámu pro hotel dle různých modelů požáru	58
obr. 54: Průběh momentů únosnosti trámu pro knihovnu dle různých modelů požáru	59
obr. 55: Matematický popis německé křivky pro referenční hustotu požárního zatížení. Převzato z [18]	73
obr. 56: Německá křivka: (a) se třemi fázemi; (b) se dvěma fázemi	74
obr. 57: Matematický popis německé křivky. Převzato z [18]	76

Seznam tabulek

tab. 1: Okrajové podmínky parametrických teplotních křivek	22
tab. 2: Minimální šířka průřezu: (a) pro vystavení normovému požáru; (b) pro vystavení parametrickému požáru. Převzato z [7]	26
tab. 3: Vstupní hodnoty pro křivku dle ČSN EN 1991-1-2	32
tab. 4: Vstupní hodnoty pro křivku dle DIN EN 1991-1-2/NA	32
tab. 5: Vstupní hodnoty pro dle DS/EN 1991-1-2 DK NA	32
tab. 6: Výpočet zatížení stropní desky	38
tab. 7: Výpočet zatížení na trám.....	41
tab. 8: Maximální teplota v PÚ, čas, ve kterém byla dosažena maximální teplota a čas, kdy teplota klesne na 20 °C dle různých modelů požáru	51
tab. 9: Požární odolnost ŽB stropní desky pro různé modely požáru	55
tab. 10: Poloha izotermy 500 °C pro různé modely požáru	56
tab. 11: Požární odolnost ŽB průvlaku pro různé modely požáru	59
tab. 12: Rychlost rozvoje požáru a RHR_f pro různé provoz. Převzato z [2]	69
tab. 13: Koeficient povrchů b. Převzato z [2]	69
tab. 14: Charakteristická hodnota hustoty požárního zatížení pro různé provoz. Převzato z [2]	74
tab. 15: Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení pro dánskou křivku. Převzato z [3]78	

Literatura

- [1] ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [2] DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12: National Annex - Nationally determined parameters - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. 2014
- [3] DS/EN 1991-1-2 DK NA:2014 National Annex to Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. 2014
- [4] KUČERA, Petr a Zdeňka PEZDOVÁ. *Základy matematického modelování požáru*. Ostrava. 2010. ISBN 978-80-7385-095-1.
- [5] KUČERA, Petr, Rudolf KAISER, Tomáš PAVLÍK a Jiří POKORNÝ. *Požární inženýrství dynamika požáru*. Ostrava. 2009. ISBN 978-80-7385-074-6.
- [6] WALD, František. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03157-8.
- [7] ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [8] *Fire curves - Tunnel* [online]. Dostupné z: <https://www.promat-tunnel.com/en/advices/fire-protection/fire-curves>
- [9] FRANSSEN, Jean-Marc, Raul ZAHARIA a Venkatesh KODUR. *Designing steel structures for fire safety*. Boca Raton: CRC Press/Balkema, 2009. ISBN 978-0-415-54828-1.
- [10] *Šíření požáru instalačními šachtami – část 2.* | *iMaterialy* [online]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/tzb/sireni-pozaru-instalacnimi-sachtami-cast-2-_102233.html
- [11] POKORNÝ, Marek. *Instalační šachty z požárního hlediska*. Praha, 2012. Disertační práce. ČVUT.
- [12] KARLSSON, Björn a James G. QUINTIERE. *Enclosure fire dynamics*. B.m.: CRC Press, 2000. Environmental and energy engineering series. ISBN 978-0-8493-1300-4.
- [13] WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila HOROVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Hana NAJMANOVÁ, Martin BENÝŠEK, Marta KUREJKOVÁ a Ivo SCHWARZ. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. Praha. 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [14] *Parametrické modely požáru pro EN 1991-1-2:2021* [online]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/parametricke-modely-pozaru-pro-en-1991-1-2-2021/>

-
- [15] BARNETT, C. R. BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures. *Fire Safety Journal* [online]. 2002, 37(5), 437–463. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/S0379-7112(02)00006-1
- [16] BARNETT, C. R. Replacing international temperature–time curves with BFD curve. *Fire Safety Journal* [online]. 2007, 42(4), 321–327. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2006.11.001
- [17] KOŠŤÁLOVÁ, Šárka. *Analysis of Input Parameters for Numerical Simulations of Fire*. Praha, 2020. Diplomová práce. ČVUT.
- [18] ZEHFUSS, J. a D. HOSSER. A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. *Fire Safety Journal* [online]. 2007, 42(2), 115–126. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2006.08.004
- [19] LOLI, Arian. *Mechanical Behaviour of structures subjected to travelling fire*. Praha, 2015. Masters' thesis. ČVUT.
- [20] *Požární odolnost stavebních konstrukcí - TZB-info* [online]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/13655-pozarni-odolnost-stavebnich-konstrukci>
- [21] *ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [22] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. V Praze: České vysoké učení technické. 2010. ISBN 978-80-01-04613-5.
- [23] *ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2019.
- [24] *FIN EC* [online]. B.m.: Fine spol. s r.o., 2020. Dostupné z: <https://www.fine.cz/vypocty-statiky/parametricka-krivka/>
- [25] BENÝŠEK, Martin a Radek ŠTEFAN. *FMC - Fire Models Calculator* [online]. 2018. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/fmc/fmc.cz.html>
- [26] ZEHFUSS, Jochen. Bedeutung der Brandszenarien nach Eurocode im Rahmen von Brandschutzkonzepten und deren Prüfung. In: [online]. B.m. Dostupné z: <https://de.slideshare.net/hhpberlin/bedeutung-der-brandszenarien-nach-eurocode-im-rahmen-von-brandschutzkonzepten-und-deren-prfung>
- [27] KUČERA, Jaroslav. *Parametrické modely požáru pro EN 1991-1-2:2021*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT.
- [28] PETERKA, Jiří. *Vedení tepla - Vedení tepla vícevrstvými konstrukcemi* [online]. 2021. Dostupné z: [v přípravě]
- [29] *ČSN 73 1201 Navrhování betonových konstrukcí pozemních staveb*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
-

-
- [30] ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [31] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [32] KOHOUTKOVÁ, Alena, Jaroslav PROCHÁZKA a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování železobetonových konstrukcí*. Praha: ČVUT v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05587-8.
- [33] SVOBODOVÁ, Vladislava. *PTK - Parametrické teplotní křivky* [online]. 2021. Dostupné z: [v přípravě]
- [34] *CFAST - Consolidated Fire and Smoke Transport* [online]. 2020. Dostupné z: <https://pages.nist.gov/cfast/downloads.html>
- [35] ŠTEFAN, Radek a Jaroslav PROCHÁZKA. *TempAnalysis - Computer Program Based on Finite Element Method for Temperature Analysis of a Cross Section Exposed to Fire* [online]. 2009. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/ta/ta.cz.html>
- [36] ŠTEFAN, Radek. *FiDeS - Soubor výpočetních programů pro navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru podle Eurokódů* [online]. 2016. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/fides/fides.html>

Příloha A

A.1 Postup výpočtu křivky dle DIN EN 1991-1-2/NA

Maximální uvolněné teplo se vypočte:

$$Q_{max} = \min\{Q_{max,v}; Q_{max,f}\}$$

$$Q_{max,v} = 1,21 \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} \quad [MW]$$

$$Q_{max,f} = RHR_f \cdot A_f \quad [MW]$$

$Q_{max,v}$ – požár řízený ventilací

$Q_{max,f}$ – požár řízený palivem

tab. 12: Rychlost rozvoje požáru a RHR_f pro různé provozy. Převzato z [2]

Provoz	Rychlost rozvoje požáru	t_a [s]	RHR_f [MW/m ²]
Bytové domy	Střední	300	0,25
Kanceláře	Střední	300	0,25
Nemocnice (pokoje)	Střední	300	0,25
Hotely (pokoje)	Střední	300	0,25
Knihovny	Střední	450	0,25 až 0,50
Školy (učebny)	Střední	300	0,15
Obchodní centra	Velká	150	0,25
Divadla, kina	Velká	150	0,50
Doprava (veřejný prostor)	Malá	600	0,25

Dále do výpočtu vstupuje koeficient povrchů b , který se určí z následující tabulky (tab. 13).

tab. 13: Koeficient povrchů b . Převzato z [2]

	Skupina	b $\left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}\right]$
1.	1	2 500
2.	2	1 500
3.	3	750

- Skupina 1: Prvky, nebo stavební materiály s velkou tepelnou vodivostí jako je zasklení, hliník, sklo, ocel.
- Skupina 2: Prvky, nebo stavební materiály se střední tepelnou vodivostí jako je beton s objemovou hmotností $> 1\,000 \text{ kg/m}^3$, vápenopískové a keramické zdivo.

- Skupina 3: Prvky, nebo stavební materiály s nízkou tepelnou vodivostí jako jsou stavební materiály s objemovou hmotností $\leq 1\,000\text{ kg/m}^3$, izolace z vláken, pórobeton, dřevo, desky z dřevité vlny, lehčený beton, izolační omítky, sendvičové konstrukce.

Při různých součinitelích b pro stěny, strop a podlahu, se b vypočte:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \cdot A_i}{A_t - A_v} \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}} \right]$$

kde b_i je tepelná charakteristika povrchu i -té ohraničující konstrukce $\left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}} \right]$

A_i je plocha povrchu i -té ohraničující konstrukce bez otvorů $[\text{m}^2]$

Koeficient otvorů se vypočte:

$$O = \frac{A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \left[\text{m}^{\frac{1}{2}} \right]$$

Nejprve se vypočte křivka pro referenční hustotu požárního zatížení $q = 1300 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \right]$, kdy se celkové uvolněné teplo vypočte:

$$Q_d = 1300 \cdot A_f \quad [\text{MJ}]$$

Stejně jako u parametrické teplotní křivky dle Eurokódu [1] se i u této křivky rozlišuje výpočet pro požár řízený ventilací a požár řízený palivem.

Pokud je požár řízený ventilací ($Q_{\max,v} < Q_{\max,f}$) pokračuje se podle těchto rovnic:

Čas t_1 na obr. 55:

$$t_1 = t_\alpha \cdot \sqrt{Q_{\max}} \quad [\text{s}]$$

kdy t_α se určí z tab. 12

Uvolněné teplo v čase t_1 :

$$Q_1 = \frac{t_1^3}{3 \cdot t_\alpha^2} \quad [\text{MJ}]$$

Teplota v čase t_1 :

$$\theta_1 = -\frac{8,75}{O} - 0,1 \cdot b + 1\,175 \quad [^\circ\text{C}]$$

Uvolněné teplo v čase t_2 :

$$Q_2 = 0,7 \cdot Q_d - Q_1 \quad [\text{MJ}]$$

Čas t_2 na obr. 8:

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_2}{Q_{max}} \quad [s]$$

Teplota v čase t_2 :

$$\theta_2 = \frac{0,004 \cdot b - 17}{0} - 0,4 \cdot b + 2\,175 \leq 1\,340 \quad [^{\circ}C]$$

Uvolněné teplo v čase t_3 :

$$Q_3 = 0,3 \cdot Q_d \quad [MJ]$$

Čas t_3 na obr. 55:

$$t_3 = t_2 + \frac{2 \cdot Q_3}{Q_{max}} \quad [s]$$

Teplota v čase t_3 :

$$\theta_3 = -\frac{5}{0} - 0,16 \cdot b + 1\,060 \quad [^{\circ}C]$$

V případě, že je požár řízený palivem ($Q_{max,f} < Q_{max,v}$) se pokračuje podle těchto rovnic:

$$k = \sqrt[3]{\frac{Q_{max}^2}{A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} \cdot (A_t - A_v) \cdot b}} \quad [-]$$

Čas t_1 na obr. 55:

$$t_1 = t_{\alpha} \cdot \sqrt{Q_{max}} \quad [s]$$

Uvolněné teplo v čase t_1 :

$$Q_1 = \frac{t_1^3}{3 \cdot t_{\alpha}^2} \quad [MJ]$$

Uvolněné teplo v čase t_2 :

$$Q_2 = 0,7 \cdot Q_d - Q_1 \quad [MJ]$$

Čas t_2 na obr. 55:

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_2}{Q_{max}} \quad [s]$$

Uvolněné teplo v čase t_3 :

$$Q_3 = 0,3 \cdot Q_d \quad [MJ]$$

Čas t_3 na obr. 55:

$$t_3 = t_2 + \frac{2 \cdot Q_3}{Q_{max}} \quad [s]$$

Jestliže $k \leq 0,04$, tak teploty zobrazené na obr. 55 se vypočtou následovně:

$$\theta_1 = 24\,000 \cdot k + 20 \quad [^\circ C]$$

$$\theta_2 = 33\,000 \cdot k + 20 \quad [^\circ C]$$

$$\theta_3 = 16\,000 \cdot k + 20 \quad [^\circ C]$$

Jestliže $k > 0,04$, tak teploty zobrazené na obr. 55 jsou dány těmito hodnotami:

$$\theta_1 = 980 \quad [^\circ C]$$

$$\theta_2 = 1\,340 \quad [^\circ C]$$

$$\theta_3 = 660 \quad [^\circ C]$$

Celá křivka pro referenční hodnotu hustoty požárního zatížení je popsána rovnicemi níže:

Jestliže $0 \leq t \leq t_1$:

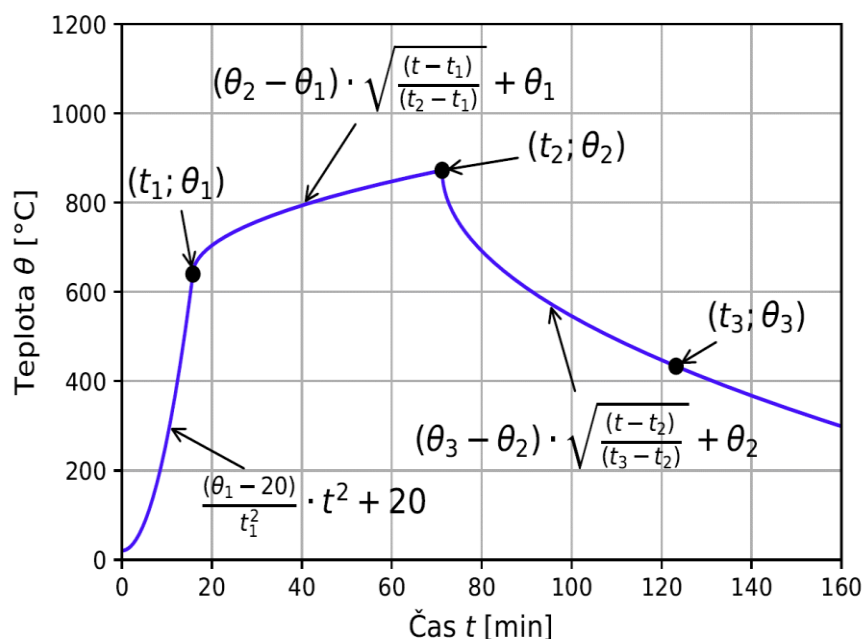
$$\theta_g = \frac{\theta_1 - 20}{t_1^2} \cdot t^2 + 20 \quad [^\circ C]$$

Jestliže $t_1 < t \leq t_2$:

$$\theta_g = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \sqrt{\frac{t - t_1}{t_2 - t_1}} + \theta_1 \quad [^\circ C]$$

Jestliže $t > t_2$:

$$\theta_g = (\theta_3 - \theta_2) \cdot \sqrt{\frac{t - t_2}{t_3 - t_2}} + \theta_2 \quad [^\circ C]$$



obr. 55: Matematický popis německé křivky pro referenční hustotu požárního zatížení.
Převzato z [18]

Z křivky pro referenční hustotu požárního zatížení lze určit parametrickou teplotní křivku pro jinou hustotu požárního zatížení. Hodnoty pro výpočet této křivky se označují s dolním indexem x , ty značí stejné parametry jako u křivky pro referenční hustotu požárního zatížení a jsou znázorněny na obr. 57.

Celkové uvolněné teplo se pak vypočte podle rovnice:

$$Q_{x,d} = q_{f,d} \cdot A_f \quad [MJ]$$

kde $q_{f,d}$ je návrhová hodnota hustoty požárního zatížení $\left[\frac{MJ}{m^2}\right]$

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot \chi \cdot \gamma_{fi,q}$$

kde $q_{f,k}$ je charakteristická hodnota hustoty požárního zatížení $\left[\frac{MJ}{m^2}\right]$, která se určí z tab. 14

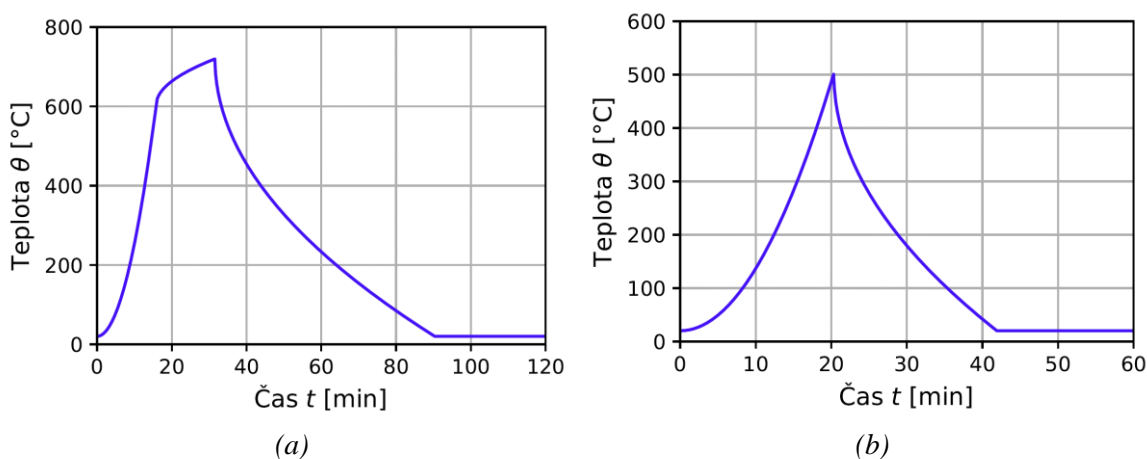
χ je součinitel hoření, u převážně celulosových materiálů lze uvažovat $\chi = 0,7$

$\gamma_{fi,q}$ je dílčí součinitel spolehlivosti, určí se podle kapitoly BB.5 německé národní přílohy [2]

tab. 14: Charakteristická hodnota hustoty požárního zatížení pro různé provozy. Převzato z [2]

Provoz	Průměr	Standardní odchylka	90 % kvantil
Bytové domy	780	234	1085
Kanceláře	420	126	584
Nemocnice (pokoje)	230	69	320
Hotely (pokoje)	310	93	431
Knihovny	1500	450	2087
Školy (učebny)	285	85,5	397
Obchodní centra	600	180	835
Divadla, kina	300	90	417
Doprava (veřejný prostor)	100	30	139

Dále je zapotřebí zjistit zda bude mít křivka tři fáze (obr. 56 (a)). Nebo pouze dvě fáze (obr. 56 (b)) tato situace nastane, pokud se už do času t_1 spotřebuje více jak 70 % z celkového požárního zatížení.



obr. 56: Německá křivka: (a) se třemi fázemi; (b) se dvěma fázemi

Jestliže $Q_1 < 0,7 \cdot Q_{x,d}$:

$$t_{2,x} = t_1 + \frac{(0,7 \cdot Q_{x,d}) - Q_1}{Q_{max}} \quad [s]$$

$$\theta_{2,x} = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \sqrt{\frac{t_{2,x} - t_1}{t_2 - t_1}} + \theta_1 \quad [°C]$$

$$t_{3,x} = t_{2,x} + \frac{0,6 \cdot Q_{x,d}}{Q_{max}} \quad [s]$$

$$\theta_{3,x} = \theta_3 \cdot \frac{\log_{10} \left(\frac{t_{3,x}}{60} + 1 \right)}{\log_{10} \left(\frac{t_3}{60} + 1 \right)} \quad [°C]$$

Jestliže $Q_1 \geq 0,7 \cdot Q_{x,d}$:

$$t_{1,x} = t_{2,x} = \sqrt[3]{0,7 \cdot Q_{x,d} \cdot 3 \cdot t_a^2} \quad [s]$$

$$\theta_{2,x} = \frac{(\theta_1 - 20)}{t_1^2} \cdot t_{1,x}^2 + 20 \quad [^\circ C]$$

$$t_{3,x} = t_{2,x} + \frac{0,6 \cdot Q_{x,d}}{Q_{max}} \quad [s]$$

$$\theta_{3,x} = \theta_3 \cdot \frac{\log_{10} \left(\frac{t_{3,x}}{60} + 1 \right)}{\log_{10} \left(\frac{t_3}{60} + 1 \right)} \quad [^\circ C]$$

Celá křivka je popsána rovnicemi níže:

Jestliže $0 \leq t \leq t_1$:

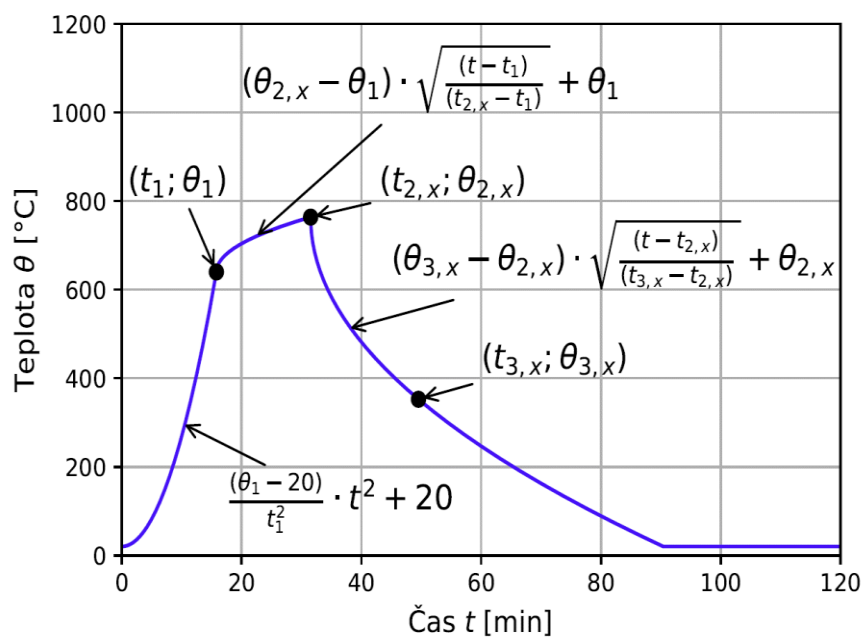
$$\theta_g = \frac{\theta_1 - 20}{t_1^2} \cdot t^2 + 20 \quad [^\circ C]$$

Jestliže $t_1 < t \leq t_{2,x}$:

$$\theta_g = (\theta_{2,x} - \theta_1) \cdot \sqrt{\frac{t - t_1}{t_{2,x} - t_1}} + \theta_1 \quad [^\circ C]$$

Jestliže $t > t_{2,x}$:

$$\theta_g = (\theta_{3,x} - \theta_{2,x}) \cdot \sqrt{\frac{t - t_{2,x}}{t_{3,x} - t_{2,x}}} + \theta_{2,x} \quad [^\circ C]$$



obr. 57: Matematický popis německé křivky. Převzato z [18]

Stejně jako u křivky HRR tak i u německé křivky může dojít k flashover efektu. K tomuto efektu dochází v momentě, kdy je překročena mezní rychlost uvolňování tepla. Tato rychlost je dána rovnicí:

$$Q_{fo} = 0,0078 \cdot A_t + 0,378 \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} \quad [MW]$$

Čas, při kterém dochází k flashover efektu, tedy čas, ve kterém rychlost uvolňování tepla náhle stoupne na maximum lze určit pomocí rovnice:

$$t_{fo} = \sqrt{t_{\alpha}^2 \cdot Q_{fo}} < t_1 \quad [s]$$

A.2 Postup výpočtu křivky dle DS/EN 1991-1-2 DK NA

Koeficient povrchů se vypočte:

$$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K} \right]$$

Pro povrch ohraničujících konstrukcí s různými vrstvami materiálů se b vypočte:

Jestliže $b_1 < b_2 \rightarrow b = b_1$

Jestliže $b_1 > b_2 \rightarrow$ vypočte se mezní tloušťka s_{lim}

$$s_{lim} = \sqrt{\frac{60 \cdot t_{max} \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}} \quad [m]$$

Jestliže $s_1 > s_{lim} \rightarrow b = b_1$

Jestliže $s_1 < s_{lim} \rightarrow b = \frac{s_1}{s_{lim}} \cdot b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{lim}}\right) \cdot b_2$

s_i je tloušťka i -té vrstvy

Při různých součinitelích b pro stěny, strop a podlahu, se b vypočte:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \cdot A_i}{A_t - A_v} \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K} \right]$$

kde b_i je tepelná charakteristika povrchu i -té ohraničující konstrukce $\left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K} \right]$

A_i je plocha povrchu i -té ohraničující konstrukce bez otvorů $[m^2]$

Koeficient otvorů se vypočte:

$$O = \frac{A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad \left[m^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} \quad [-]$$

Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení je dána tab. 15 nebo jinou doloženou hodnotou:

tab. 15: Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení pro dánskou křivku. Převzato z [3]

Provoz	$q_{t,d}$ $\left[\frac{MJ}{m^2}\right]$
Byty a kanceláře	200
Nemocnice, školní třídy, kina a hotely	150

Teplotní křivka je popsána rovnicí:

$$\theta_g = 20 + \frac{345 \cdot \log_{10}(8 \cdot \Gamma \cdot t + 1)}{1 + 0,04 \cdot \left(\frac{t}{t_{max}}\right)^{3,5}} \quad [^{\circ}C]$$

Čas, kdy nastává maximální teplota:

$$t_{max} = \frac{7,8 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}}{0} \quad [min]$$

Maximální teplota se vypočte:

$$\theta_{g,max} = 20 + \frac{345 \cdot \log_{10}(8 \cdot \Gamma \cdot t_{max} + 1)}{1 + 0,04} \quad [^{\circ}C]$$