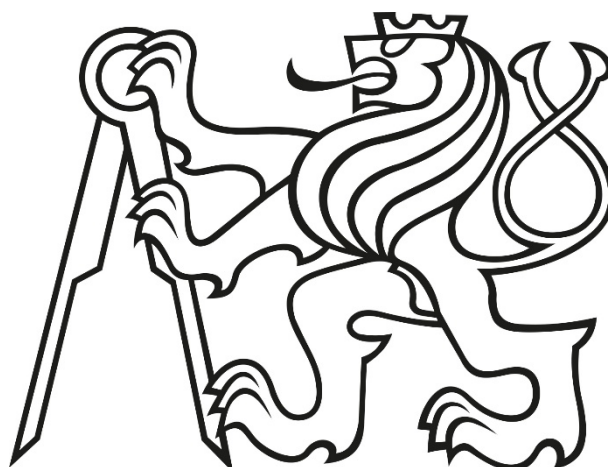


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

K134 – KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Rok vypracování: 2019

Vypracoval: Bc. Jaroslav Kučera

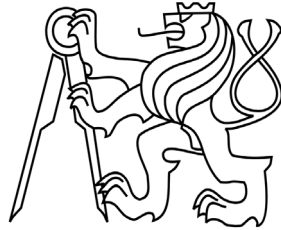
Vedoucí práce: Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

Druhý vedoucí práce: prof. Ing. František Wald, CSc.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí (K134)



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

PARAMETRICKÉ MODELY POŽÁRU

PRO EN 1991-1-2:2021

PARAMETRIC MODELS OF FIRE FOR EN 1991-1-2: 2021

Bc. Jaroslav Kučera

vedoucí práce: Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

druhý vedoucí práce: prof. Ing. František Wald, CSc.

2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kučera Jméno: Jaroslav Osobní číslo: 423016
Zadávající katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb (Q)

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Parametrické modely požáru pro EN 1991-1-2:2021
Název diplomové práce anglicky: Parametric models of fire for EN 1991-1-2:2021

Pokyny pro vypracování:

1. Shrnutí problematiky - popis vybraných parametrických modelů
2. Aplikace parametrických modelů na požární zkoušky
3. Porovnání výsledků teploty plynu
4. Vliv požárních modelů na chování konstrukce
5. Vyhodnocení a shrnutí

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. 2004

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

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

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Kamila Cábová, Ph.D. od 1.12.2018 prof. Ing. František Uald, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018 Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

8.10.18

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Parametrické modely požáru pro EN 1991-1-2:2021“ vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonu (autorský zákon).

V dne

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svým vedoucím diplomové práce Ing. Kamile Cábové, Ph.D. a prof. Ing. Františku Waldovi, CSc., za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování práce věnovali.

Další poděkování patří prof. Dr. Jochenu Zehfussovi a Lise Sander, M. Sc. z Technické univerzity v Braunschweigu (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) TU Braunschweig), díky kterým byla vytvořena databáze požárních zkoušek.

Anotace

Práce se zaměřuje na problematiku současného Eurokódu EN 1991-1-2, konkrétně na Přílohu A, která má být v následujících letech novelizována. V této příloze je ukázán postup výpočtu pro parametrickou teplotní křivku. Tento model požáru nebyl v některých členských státech evropského normalizačního výboru (CENu) přijat. Námitky jsou vznášeny k tvaru požární křivky, která v některých případech popisuje průběh požáru nepřesně. Jde především o nereálné zvýšení, respektive snížení teploty v požárním úseku a nepřímou souvislost s rychlostí uvolňování tepla. Pozornost je věnována dalším alternativám k současné parametrické teplotní křivce v Příloze A (iBMB křivky, BFD křivky, ...). Detailně jsou popsány postupy v dánské a německé národní příloze, kde jsou obsaženy další parametrické modely požáru. Pro tyto modely byla zpracována databáze k porovnání průběhu požáru vůči uskutečněným požárním zkouškám. Kromě těchto národních příloh je do porovnání zahrnuta také parametrická teplotní křivka obsažená v současné příloze A Eurokódu. Ze zpracovaných dat je provedena analýza, která ověřuje, zda některá z křivek popisuje průběh požáru přesněji.

Klíčová slova

Parametrické modely požáru; EN 1991-1-2; iBMB křivky; BFD křivky; modely přirozeného požáru

Annotation

This thesis is focus on Eurocode EN 1991-1-2, specifically on Annex A. This annex should be amended in the next years. In this annex there is shown calculation procedure for parametric temperature curve. In some countries of the European Committee for Standardization (CEN) this annex is not used because it was not proved there. This model may provide unrealistic increase and decrease of gas temperature and it has no temporal connection with the rate of heat release. Attention is paid to the alternative procedures of calculating of the parametric temperature curves (iBMB curves, BFD curves, ...). Denmark national annex and German national annex provide the calculation procedure of other parametric models. In this thesis these models are described in detail. For these models database with data of fire tests was processed. The database helps to compare these three curves with results from real fires. An analysis of all data is performed in the database. The analysis verifies an accuracy of given models.

Keywords

Parametric models of fire; EN 1991-1-2; iBMB curves; BFD curves; natural fire models

Obsah

| | |
|--|------------|
| Seznam použitých symbolů a zkratk..... | III |
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Parametrická teplotní křivka podle EN 1991-1-2..... | 2 |
| 2.1 Postup výpočtu..... | 3 |
| 2.2 Problematika současné Přílohy A | 8 |
| 3 Další parametrické teplotní křivky | 9 |
| 3.1 Křivka dle dánské národní přílohy..... | 10 |
| 3.1.1 Postup výpočtu..... | 11 |
| 3.1.2 Odlišnosti od EN 1991-1-2 Přílohy A | 14 |
| 3.2 Křivka dle německé národní přílohy | 15 |
| 3.2.1 Postup výpočtu..... | 16 |
| 3.2.2 Odlišnosti od EN 1991-1-2 Přílohy A | 23 |
| 4 Porovnání průběhu parametrického požáru..... | 24 |
| 4.1 Obecné odlišnosti..... | 24 |
| 4.2 Aplikace na požární zkoušky | 25 |
| 4.2.1 Požární zkouška BRE1 | 26 |
| 4.2.2 Požární zkouška CAR1 | 27 |
| 4.2.3 Požární zkouška LEH8 | 28 |
| 4.2.4 Požární zkouška METZ4 | 29 |
| 4.2.5 Požární zkouška VTT2 | 30 |
| 4.2.6 Další požární zkoušky..... | 31 |
| 4.3 Shrnutí analýzy | 32 |
| 5 Ohlasy členských zemí CENu | 34 |
| 5.1 Námitky proti „novým“ parametrickým modelům..... | 34 |
| 5.2 Postoj ke křivkám v České Republice | 35 |
| 5.3 Další postup | 36 |
| 6 Rozšíření databáze - požární zkoušky z ČR..... | 36 |
| 6.1 Požární zkouška v Mokrsku..... | 37 |
| 6.1.1 Požární úsek..... | 37 |
| 6.1.2 Požární zatížení..... | 39 |
| 6.1.3 Teplota plynu naměřená během experimentu | 39 |
| 6.1.4 Výpočet teploty plynu podle parametrických křivek..... | 40 |
| 6.1.5 Porovnání teplotních křivek..... | 43 |
| 6.2 Požární zkouška ve Veselí nad Lužnicí | 44 |
| 6.2.1 Požární úsek..... | 44 |
| 6.2.2 Požární zatížení..... | 47 |
| 6.2.3 Teplota plynu naměřená během experimentu | 48 |
| 6.2.4 Výpočet teploty plynu podle parametrických křivek..... | 49 |
| 6.2.5 Porovnání teplotních křivek..... | 51 |
| 6.3 Další požární zkoušky..... | 51 |
| 7 Aplikace modelů na chování konstrukce | 52 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 7.1 | Software Vulcan Solutions | 52 |
| 7.2 | Požární zkouška ve Veselí nad Lužnicí | 52 |
| 7.3 | Aplikace na požární zkoušku | 54 |
| 7.3.1 | Ověření funkčnosti softwarového modelu | 56 |
| 7.3.2 | Model s využitím ČSN EN 1991-1-2 Příloha A | 57 |
| 7.3.3 | Model s využitím dánské národní přílohy | 57 |
| 7.3.4 | Model s využitím německé národní přílohy | 58 |
| 7.4 | Shrnutí analýzy | 58 |
| | Příloha 1 – Průběhy teplot požáru | 60 |
| | Seznam obrázků..... | 69 |
| | Seznam tabulek..... | 71 |
| | Literatura | 72 |

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

| | | |
|--------------------|---|-------------------|
| O | Faktor otvorů | $m^{1/2}$ |
| $q_{t,d}$ | Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená k celé ploše ohraničujících konstrukcí požárního úseku | MJ/m^2 |
| $q_{f,d}; q_{x,d}$ | Návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená k podlahové ploše A_f požárního úseku | MJ/m^2 |
| s_{lim} | Limitní tloušťka | m |
| b | koeficient povrchů, který je závislý na tepelné pohltivosti konstrukcí ohraničujících požární úsek | $J/(m^2s^{1/2}K)$ |
| c | Měrná tepelná kapacita | $J/(kg \cdot K)$ |
| A_f | Podlahová plocha | m^2 |
| A_t | Celková plocha obalových konstrukcí | m^2 |
| A_v | Celková plocha svislých otvorů | m^2 |
| v_s | Světlá výška | M |
| h_{eq} | Vážený průměr výšek oken ve všech stěnách ohraničujících požární úsek | m |
| t_{max} | Maximální teplota | h |
| $t_{max,v}$ | Maximální teplota v případě požáru řízeného ventilací | h |
| $t_{max,f}$ | Maximální teplota v případě požáru řízeného palivem | h |
| t_α | Rychlost rozvoje požáru | s |
| HRR | Rychlost uvolňování tepla | kW/m^2 |
| RHR_f | Maximální rychlost uvolňování tepla | kW/m^2 |
| $Q_{x,d}$ | Celkové uvolněné teplo v průběhu požáru | MJ |
| H_u | Výhřevnost | MJ/kg |

Řecké symboly

| | | |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------|
| θ_g | Teplota plynu | $^{\circ}C$ |
| $\theta_{max}; \theta_{max,g}$ | Maximální teplota plynu | $^{\circ}C$ |
| λ | Součinitel tepelné vodivosti | $W/(m \cdot K)$ |
| ρ | Objemová hmotnost | kg/m^3 |

Zkratky

| | |
|--------|---|
| CEN | Evropský výbor pro normalizaci (Comité Européen de Normalisation) |
| PÚ | Požární úsek |
| BFD | Parametrické teplotní křivky, které vznikly v Austrálii |
| iBMB | Parametrické teplotní křivky vycházející z rychlosti uvolňování tepla |
| PO | Požární odolnost |
| COWI | Mezinárodní poradenská skupina se zaměřením na inženýrství, environmentální vědu a ekonomiku (Dánsko) |
| TU | Technická univerzita (Technische Universität) |
| PU | Polytechnická univerzita (Universitatea Politehnica) |
| TG | Termočlánek měřící teplotu (gas thermocouple) |
| HZS ČR | Hasičský záchranný sbor České Republiky |
| MW | Minerální vlna (mineral wool) |

1 Úvod

Parametrické teplotní křivky představují zjednodušený model zobrazující změnu teploty v čase při požáru. Na rozdíl od nominálních teplotních křivek zohledňují prostor požárního úseku, jeho požární zatížení a zobrazují i klesající fázi reprezentující průběh požáru. Tyto křivky se snaží více přiblížit skutečnému průběhu teploty ve zkoumaném požárním úseku. Díky těmto křivkám je možné dosáhnout přesnějších a efektivnějších výsledků u posuzované konstrukce.

Současnou podobu Přílohy A, uvádějící výpočet parametrické teplotní křivky, kterou norma pro navrhování stavebních konstrukcí [1] (dále jen Eurokód) nabízí, některé země CENU¹ neuznávají. Státy si tedy ve svých národních přílohách upravují, nebo dokonce zcela nahrazují podobu výpočtu, ze kterého lze křivku získat.

V současné době jsou připravovány změny, které by měly být do Eurokódu zavedeny. Vzhledem k tomu, že v některých zemích nebyla metoda Přílohy A schválena, nabízí se otázka, jaké nedostatky současná parametrická teplotní křivka má a zda některá z národních příloh evropských států nepopisuje parametrický požár přesněji.

Tato práce je zaměřena na porovnání parametrické teplotní křivky uvedené v současné příloze A [1] s parametrickými modely podle německé národní přílohy [2] a podle dánské národní přílohy [3].

¹ Evropský výbor pro normalizaci (francouzsky Comité Européen de Normalisation)

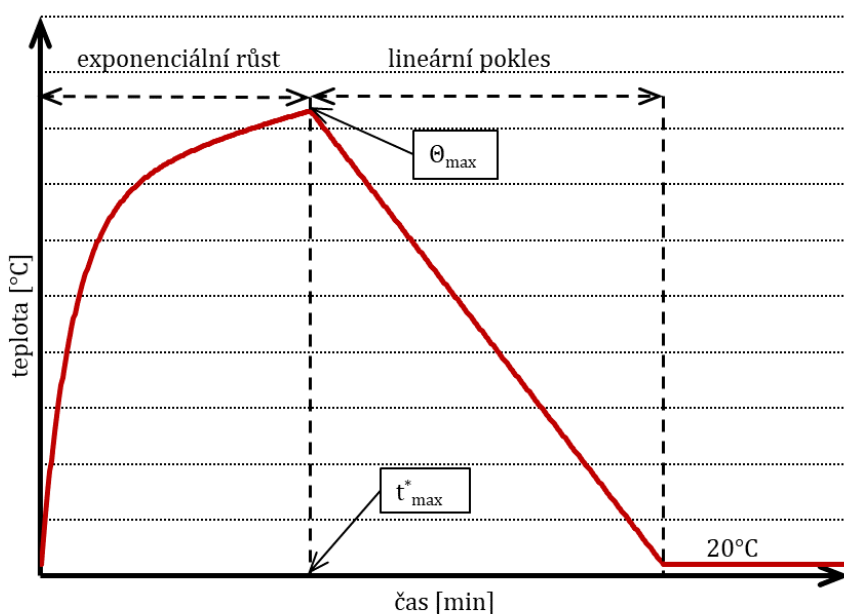
2 Parametrická teplotní křivka podle EN 1991-1-2

Současný parametrický model požáru v Eurokódu vychází ze švédské křivky. Tato křivka byla poprvé publikována v roce 1970 (Magnusson a Thelandersson) [4, 5]. Výhodou je poměrně rychlá a efektivní předpověď teploty, bez nutnosti sofistikovaných počítačových nástrojů.

Parametrická teplotní křivka využívá na rozdíl od nominálních teplotních křivek pro popis okrajové podmínky zkoumaného požárního úseku. Konzervativním předpokladem je, že teplota má rovnoměrné rozložení v celém zkoumaném úseku. Omezuje se na použití do 500 m² podlahové plochy s maximální výškou požárního úseku 4 m, bez otvorů ve střeše. Další omezení, týkající se obvodových konstrukcí (b), otvorů v nich (O) a hustoty požárního zatížení ($q_{t,d}$) jsou popsány níže. Pokud je hustota požárního zatížení stanovena bez zvláštních úvah o chování při hoření, pak se má postup omezit na požární úseky s požárním zatížením převážně typu celulózy [1].

Obecný tvar parametrické křivky dle Přílohy A zobrazuje obr. 1. Část křivky reprezentující ohřev se vyznačuje exponenciálním nárůstem, který končí v hodnotě maximální teploty označené jako θ_{max} (v čase t^*_{max}).

Po dosažení maximální teploty začíná fáze s lineárním poklesem, která končí v okamžiku, kdy se teplota ve zkoumaném úseku dostane na 20 °C (tedy na předpokládanou teplotu okolního prostředí).



obr. 1 Schematický tvar parametrické křivky dle Přílohy A

Ve výpočtu pro parametrickou teplotní křivku rozlišujeme, zda se jedná o požár řízený palivem, nebo požár řízený ventilací. O požáru řízeným palivem mluvíme v případě, že otvory zajišťují dostatečně velký přísun kyslíku pro průběh hoření. V opačném případě se jedná o požár řízený ventilací. Tento typ požáru nemá dostatečný přísun kyslíku pro plné hoření.

2.1 Postup výpočtu

Prvním parametrem, který je nutné definovat, je velikost PÚ, s čímž přímo souvisí podlahová plocha A_f , světlá výška v_s a celková plocha obalových konstrukcí A_t . Další hodnotu, kterou musíme znát je koeficient povrchů b , který je závislý na tepelné pohltivosti konstrukcí ohraničujících PÚ (λ , ρ , c). Hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ , měrné tepelné kapacity c a objemové hmotnosti (hustoty) ρ mohou být uvažovány při teplotě okolí. Jakmile hodnota tohoto koeficientu neleží v intervalu $<100; 2200>$ [$J/(m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K)$], nelze křivku použít.

Koeficient povrchů b je vypočten pomocí vzorce:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K} \right] < 100; 2200 > \quad (1.1)$$

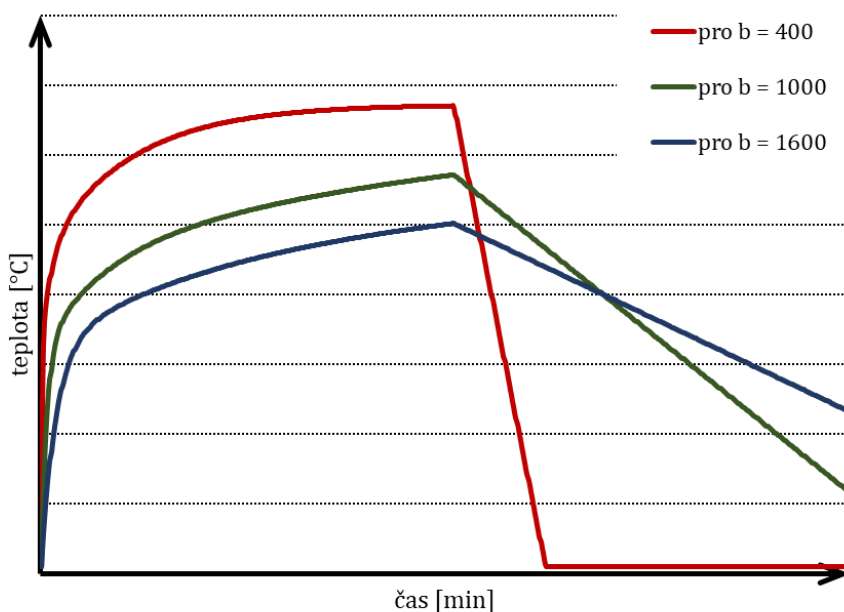
V případě, že jsou stěny, strop a podlaha z jiných materiálů (různá tepelná pohltivost), zavádí se součinitel b jako vážený průměr a to podle vzorce:

$$b = \frac{\sum b_j \cdot A_j}{A_t - A_v} \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K} \right] < 100; 2200 > \quad (1.2)$$

kde: b_j - tepelná charakteristika povrchu j -té ohraničující konstrukce

A_j - plocha povrchu j -té ohraničující konstrukce bez otvorů v m^2

Na obr. 2 je vidět, jak se mění tvar křivky pouze při změně koeficientu b . Obecně se dá říci, že hodnota maximální dosažené teploty zůstává ve stejném čase a mění se pouze její velikost. Čím menší je hodnota koeficientu b , tím rychlejší je změna teploty a to jak v rostoucí fázi, tak ve fázi poklesu.



obr. 2 Závislost tvaru křivky na koeficientu b (dle Přílohy A)

Pokud jsou ohraničující konstrukce tvořeny vícevrstevnými konstrukcemi s rozdílným koeficientem b (b_1, b_2, \dots), Eurokód doporučuje konečný koeficient odvodit výpočtem²:

$$\text{Jestliže } b_1 < b_2 \rightarrow b = b_1 \quad (1.3)$$

Jestliže $b_1 > b_2 \rightarrow$ vypočítá se mezní tloušťka materiálu vystaveného požáru s_{lim} :

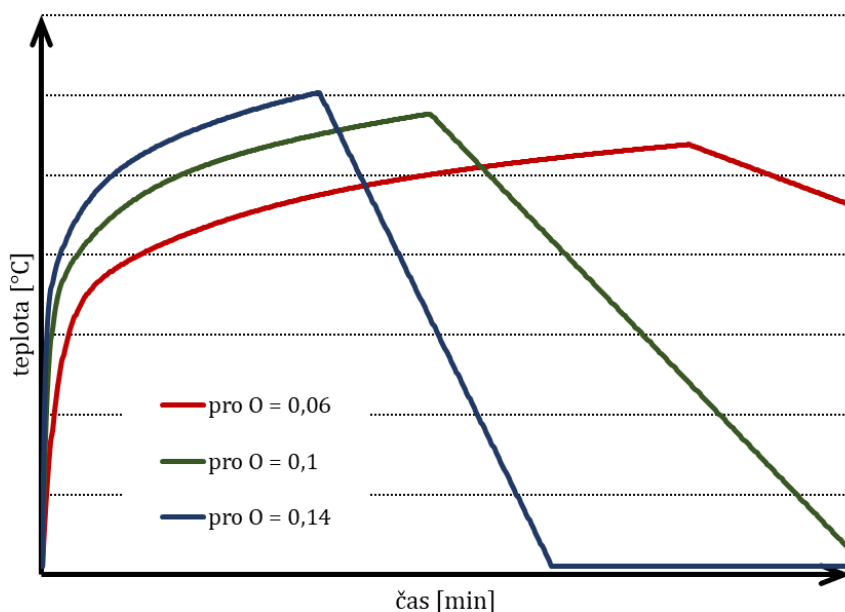
$$s_{lim} = \sqrt{\frac{3600 \cdot t_{max} \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}} \quad [m] \quad (1.4)$$

$$\text{Jestliže } s_1 > s_{lim} \rightarrow b = b_1 \quad (1.5)$$

$$\text{Jestliže } s_1 < s_{lim} \rightarrow b = \frac{s_1}{s_{lim}} \cdot b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{lim}}\right) \cdot b_2 \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}\right] \quad (1.6)$$

Tvar křivky je dále závislý na velikosti otvorů v obvodových konstrukcích. Nejde jen o celkovou plochu svislých otvorů A_v , ale také o vážený průměr jejich výšek h_{eq} . Z těchto dat, doplněných o již vypočtenou celkovou plochu povrchu obalových konstrukcí A_t , je možné vypočítat faktor otvorů O . Pro tento koeficient platí také omezení, že musí ležet v intervalu $<0,02; 0,2>$ [$m^{1/2}$], jinak křivku nelze použít.

Na obr. 3 je vidět, jak se mění tvar křivky pouze při změně koeficientu O . Hodnota maximální teploty se s vyšší hodnotou faktoru otvorů zvětšuje a zároveň dosahuje svého maxima za kratší časový interval. Parametrická teplotní křivka tedy reaguje na zvětšení otvorů ve zkoumaném úseku zvýšením intenzity (teploty) požáru a zkrácením doby trvání požáru.



obr. 3 Závislost tvaru křivky na koeficientu O (dle Přílohy A)

² Index 1 představuje vrstvu přímo vystavenou požáru. Index 2 a více označuje (postupně) vrstvy další.

Faktor otvorů O je vypočten podle vzorce:

$$O = \frac{A_v}{A_t} \cdot \sqrt{h_{eq}} \quad [m^{\frac{1}{2}}] \quad < 0,02; 0,2 > \quad (1.7)$$

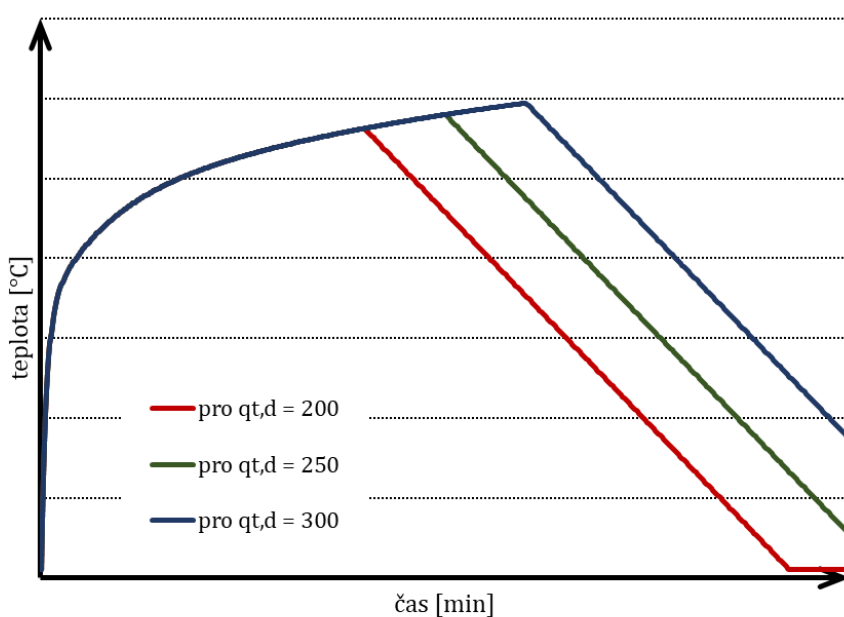
Posledním důležitým faktorem, který určuje tvar křivky je požární zatížení. Požární zatížení je zohledněno v křivce pomocí návrhové hodnoty hustoty požárního zatížení. Eurokód rozlišuje tyto hustoty dvě. První hodnota hustoty $q_{f,d}$ se vztahuje k podlahové ploše. Jednoduchým přepočtem získáme druhou hustotu $q_{t,d}$, která se vztahuje k celé ploše povrchu A_t ohraničujících konstrukcí. Pro hustotu vztaženou k celé ploše ohraničujících konstrukcí PÚ platí omezení, že musí ležet v intervalu $<50; 1000>$ $[MJ/m^2]$, jinak křivku nelze použít.

Hodnota hustoty vztažená k celé ploše povrchu ohraničujících konstrukcí PÚ je vypočtena podle vzorce:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot \frac{A_f}{A_t} \quad \left[\frac{MJ}{m^2} \right] \quad < 50; 1000 > \quad (1.8)$$

Hodnoty hustoty požárního zatížení vztaženého k ploše PÚ, jsou pro různé provozy uvedeny v [1] Příloha E tab. E.4 a lze je při splnění podmínek použít. Ve specifických případech je možné spočítat tuto hodnotu dle postupu v této příloze (Hustota požárního zatížení).

Na obr. 4 je vidět, jak se mění tvar křivky pouze se změnou hodnoty hustoty požárního zatížení vztažené k celé ploše ohraničujících konstrukcí PÚ $q_{t,d}$. Se zvyšující hustotou požárního zatížení, se doba trvání požáru prodlužuje a maximální teplota zvyšuje.



obr. 4 Závislost tvaru křivky na hustotě požárního zatížení $q_{t,d}$ (dle Přílohy A)

Pro správný postup výpočtu je nutné zjistit, zda se jedná o požár řízený palivem, nebo požár řízený ventilací. O této skutečnosti rozhoduje delší z časů $t_{max,v}$ (pro řízení ventilací) a $t_{max,f}$ (pro řízení palivem), jejichž výpočet je popsán níže.

$$t_{max} = \max(t_{max,v}; t_{max,f}) \quad [h] \quad (1.9)$$

$$t_{max,v} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O} \quad [h] \quad (1.10)$$

$$t_{max,f} = t_{lim} \quad [h] \quad (1.11)$$

kde: $t_{lim} = 15 \text{ min}$ - velká rychlost rozvoje požáru³

$t_{lim} = 20 \text{ min}$ - střední rychlost rozvoje požáru⁴

$t_{lim} = 25 \text{ min}$ - malá rychlost rozvoje požáru⁵

Postup pro výpočet náhradního času t^* je lehce odlišný, v závislosti na typu požáru.

Pokud je požár řízen ventilací, pokračuje výpočet podle rovnic:

$$\Gamma = \left(\frac{O}{b}\right)^2 / \left(\frac{O_{ref}}{b_{ref}}\right)^2 = \left(\frac{O}{b}\right)^2 / \left(\frac{0,04}{1160}\right)^2 \quad [-] \quad (1.12)$$

kde: $O_{ref} = 0,04 \quad [m^2]$ - referenční hodnota faktoru otvorů

$b_{ref} = 1160 \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}\right]$ - ref. hodnota součinitele obvodových konstrukcí

Náhradní čas t^* je v případě požáru řízeným ventilací vypočten podle rovnice:

$$t^* = t \cdot \Gamma \quad [h] \quad (1.13)$$

$$t_{max}^* = t_{max,v} \cdot \Gamma \quad [h] \quad (1.14)$$

Pokud je požár řízen palivem, pokračuje výpočet podle rovnic:

$$O_{lim} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{t_{lim}} \quad [m^2] \quad (1.15)$$

$$\Gamma_{lim} = \left(\frac{O_{lim}}{b}\right)^2 / \left(\frac{O_{ref}}{b_{ref}}\right)^2 = \left(\frac{O_{lim}}{b}\right)^2 / \left(\frac{0,04}{1160}\right)^2 \quad [-] \quad (1.16)$$

Dle ČSN EN 1991-1-2 Příloha E tab. E.5:

³ knihovny, nákupní centra, divadla, kina

⁴ byty, nemocniční pokoje, hotelové pokoje, kanceláře, školní třídy

⁵ doprava - prostory pro veřejnost

Náhradní čas t^* je v případě požáru řízeným palivem vypočten podle rovnice:

$$t^* = k \cdot t \cdot \Gamma_{lim} \quad [h] \quad (1.17)$$

$$t_{max}^* = k \cdot t_{max,f} \cdot \Gamma_{lim} \quad [h] \quad (1.18)$$

$$\text{Jestliže } O \leq 0,04 \text{ nebo } q_{t,d} \geq 75 \text{ nebo } b \geq 1160 \rightarrow k = 1,0 \quad (1.19)$$

Jestliže $O > 0,04$ a $q_{t,d} < 75$ a $b < 1160 \rightarrow$ vypočítá se součinitel k :

$$\begin{aligned} k &= 1 + \left(\frac{O - O_{ref}}{O_{ref}} \right) \cdot \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \cdot \left(\frac{b_{ref} - b}{b_{ref}} \right) = \\ &= 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \cdot \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \cdot \left(\frac{1160 - b}{1160} \right) \quad [-] \end{aligned} \quad (1.20)$$

Fáze ohřevu, která končí v hodnotě maximální teploty θ_{max} , je definována exponenciální křivkou podle rovnice (čas je dosazován vždy v hodinách):

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{-19 \cdot t^*}) \quad [^\circ C] \quad (1.21)$$

Pro zjištění hodnoty maximální teploty, stačí dosadit do rovnice: $t^* = t_{max}^*$.

Teplotní křivky ve fázi lineárního poklesu, jsou definovány podle rovnic:

Jestliže $t_{max}^* \leq 0,5$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625 \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad [^\circ C] \quad (1.22)$$

Jestliže $0,5 < t_{max}^* < 2,0$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (3 - t_{max}^*) \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad [^\circ C] \quad (1.23)$$

Jestliže $t_{max}^* \geq 2,0$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad [^\circ C] \quad (1.24)$$

kde: $x = 1,0$ - pro požár řízený ventilací

$$x = t_{lim} \cdot \frac{\Gamma_{lim}}{t_{max}^*} \quad \text{- pro požár řízený palivem} \quad (1.25)$$

Fáze poklesu (ochlazování) končí ve chvíli, kdy se teplota v posuzovaném požárním úseku dostane na hodnotu teploty okolního prostředí ($20 \text{ }^\circ C$).

2.2 Problematika současné Přílohy A

Příloha A Eurokódu 1-1-2 nebyla v mnoha zemích schválena. Země poukazují na různé problémy spojené s parametrickou teplotní křivkou, která v některých případech poskytuje nereálné zvýšení a snížení teploty v požárním úseku. Například pro obytné a administrativní prostory je stanovena hodnota maximální teploty v čase 20 minut. Pro požární prostory s velkými otvory a obalovými konstrukcemi s nízkou tepelnou vodivostí poskytuje Eurokód extrémně rychlý nárůst a následný pokles teploty. Naproti tomu je ovšem pro požární prostory s malými otvory a vysokou tepelnou vodivostí obalových konstrukcí předpokládán extrémně pomalý pokles teploty [6].

Parametrická teplotní křivka v současném Eurokódu popisuje pouze plně rozvinutou fázi požáru, bez zohlednění růstové fáze. Provedenými požárními zkouškami s obyčejným nábytkem ovšem bylo dokázáno, že i v malých prostorech může trvat několik minut, než se od počáteční fáze dosáhne plně rozvinutého požáru [7].

Některé země považují za kritický bod to, že parametrická teplotní křivka nemá přímou souvislost s rychlostí uvolňování tepla – příloha E Eurokódu 1991-1-2. Touto problematikou se zabývají například články Jochena Zehfusse, kde je jasný nesoulad mezi časovým průběhem parametrické teplotní křivky a rychlostí uvolněného tepla ukázán [6, 7].

Většina návrhů parametrických teplotních křivek vychází z experimentálních výsledků, a proto je jejich rozsah použití omezen na rozměry⁶, požární zatížení⁷ a další faktory podobné těm v příslušných požárních zkouškách. Pro použití v moderní architektuře, je důležité pro současnou Přílohu A omezení koeficientu povrchů, který je závislý na tepelné pohltivosti konstrukcí ohraničujících požární úsek $b < 100; 2200 > [J/(m^2s^{1/2}K)]$. Tímto omezením totiž zaniká možnost využití parametrické teplotní křivky například pro výpočet PÚ se skleněnou fasádou [8].

S nejvyšší pravděpodobností nebude ani do budoucna možné předepsat parametrickou teplotní křivku tak, aby byla použitelná pro všechny požární úseky. S ohledem na vývoj materiálů a konstrukcí, by bylo alespoň potřeba oblast použití parametrické teplotní křivky uvedené v Eurokódu rozšířit. Je to důležité jak pro současnost, tak pro budoucí požární navrhování.

V případě ČSN EN 1991-1-2 Přílohy A:

⁶ Maximálně 500 m² podlahové plochy a 4 m světlé výšky PÚ, bez otvorů ve střeše/stropě

⁷ Hodnota hustoty vztažená k celé ploše povrchu ohraničujících konstrukcí PÚ $q_{t,d} < 50; 1000 > [MJ/m^2]$

3 Další parametrické teplotní křivky

O parametrických teplotních křivkách se dá říct, že tvoří jakousi střední úroveň pro navrhování a hodnocení konstrukcí – inženýrský přístup. Obecně platí, že pro většinu konstrukcí postačuje pouze úroveň první⁸ a druhá⁹. U inovativních, nebo složitých konstrukcí lze použitím třetí úrovně dokázat, že pro ochránění konstrukce stačí menší potřeba požární ochrany [9]. Mnoho kódů a norem používá parametrické požární křivky spolu s nominálními požárními křivkami. Jejich výhoda je, že berou v úvahu velikost prostoru, otvory, požární zatížení a ohraničující konstrukce.

Parametrické teplotní křivky se vyvíjely empiricky, na základě výsledků získaných při požárních zkouškách. Kromě křivky, která je uvedena v současném Eurokódu, existuje řada dalších parametrických teplotních křivek. V 70. letech 20. století publikovali Magnusson a Thelendersson křivky, založené na konvenčních rovnicích rovnováhy hmotnosti a energie. Tyto křivky, které jsou začleněny do švédských norem, poskytly základ parametrické teplotní křivce v současném Eurokódu [10].

Určité zjednodušení výpočtu nabízejí křivky nazvané BFD. Jak vyplývá z kap. 2, pro popsání teplotní křivky dle Přílohy A je třeba rozdílných rovnic pro fázi růstovou a fázi poklesu. U BFD křivek popisuje celý průběh (ohřevu i ochlazování) pouze jedna rovnice. Část křivky s ochlazováním je popsána nelineárně a tedy realističtěji. Tyto křivky, které jsou používány v Austrálii, vznikaly za pomoci dat získaných z více než 142 zkoušek přirozeného požáru [11], za přispění práce C. R. Barnetta z Nového Zélandu. Jeho motivací bylo představit alternativu k parametrické teplotní křivce v současné příloze A [12].

V dánské národní příloze k Eurokódu [3], která je podrobněji popsána níže, lze najít úpravu pro výpočet parametrické teplotní křivky (dále jen dánské křivky). Pomocí této úpravy lze získat křivku podobnou právě BFD křivkám. Průběh také nepopisují různé rovnice pro fázi růstu a poklesu, ale právě jen jedna rovnice pro celý průběh požáru. Omezení, kdy lze křivku použít, zůstává ovšem obdobné jako v současné příloze A.

Poslední křivkou, kterou se tato práce podrobněji zabývá je takzvaná parametrická požární křivka iBMB. Stejně jako BFD křivky i iBMB křivky (dále jen německé křivky) mají nabídnout alternativu za křivku uvedenou v současné příloze A. Tuto křivku předložili v roce 2003 němečtí výzkumní pracovníci (Jochen Zehfuss a Dietmar Hosser) a v současné době je postup výpočtu obsažen v německé národní příloze k Eurokódu [2]. Německé křivky se vyznačují hlavně tím, že jsou přímo odvozeny z rychlosti uvolňování tepla, obsažené v příloze E Eurokódu EN 1991-1-2. Německé křivky jsou charakterizovány třemi body, ve kterých se mění sklon křivek [12]. Tyto křivky také dokáží zohlednit účinek flashover efektu, kdy v růstové fázi dojde k prudkému nárůstu teploty ve zkoumaném úseku.

⁸ deterministický výpočet s použitím ISO-834

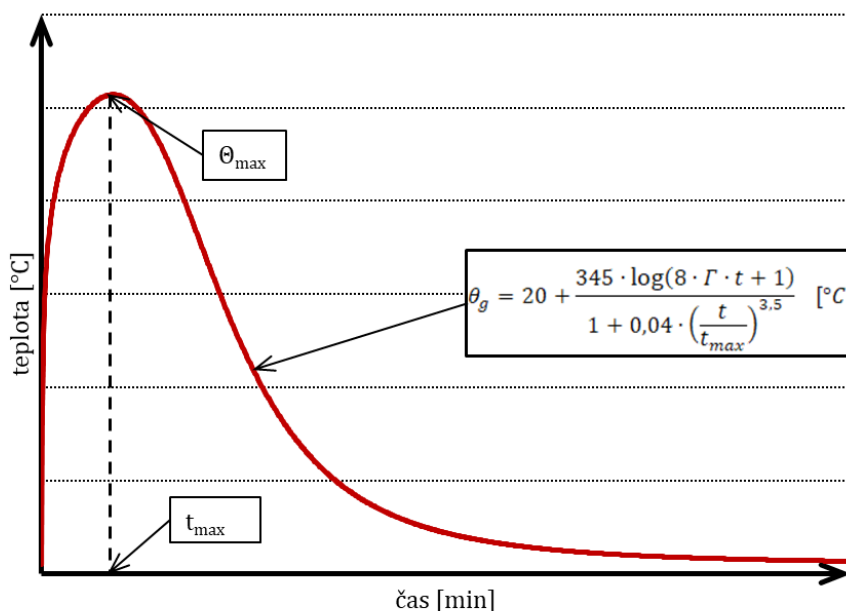
⁹ pravděpodobnostní výpočet s použitím ISO-834

3.1 Křivka dle dánské národní přílohy

Parametrická teplotní křivka podle dánské národní přílohy [3] (dále jen dánská křivka) vychází z velké části ze současného Eurokódu [1]. Postup výpočtu je pouze částečně upraven, respektive zjednodušen. Konzervativní předpoklad, že teplota je rovnoměrně rozložena v celém zkoumaném úseku, zůstává zachován. Omezuje se také na použití do 500 m² podlahové plochy s maximální výškou požárního úseku 4 m, bez otvorů ve střeše.

Pokud není k dispozici speciální dokumentace, nesmí se v posuzovaném požárním úseku nacházet mezilehlé podlaží. V případě, že je hustota požárního zatížení stanovena bez zvláštních úvah o chování při hoření, pak se má postup omezit na požární úseky s požárním zatížením převážně typu celulózy. Model parametrické teplotní křivky nemůže být použit v případě, že je požární zatížení složeno z méně než 80 % (hmotnosti) dřeva/celulózy a více jak 20 % (hmotnosti) tvoří plasty a podobné materiály. Další omezení, týkající se obvodových konstrukcí (b), otvorů v nich (O) a hustoty požárního zatížení ($q_{t,d}$) jsou popsány níže.

Obecný tvar parametrické teplotní křivky dle dánské národní přílohy zobrazuje obr. 5. Celá křivka je popsána pouze jednou rovnicí, shodnou pro fázi růstu i poklesu teploty. Přelom fáze růstu teploty ve fázi ochlazování nastává v čase maximální hodnoty teploty označené jako θ_{max} (v čase t_{max}). S ohledem na předpis rovnice se dá konstatovat, že se teplota ve zkoumaném požárním úseku dostane zpět na teplotu okolního prostředí (20 °C) až v čase t_{∞} (nekonečno).



obr. 5 Schematický tvar parametrické křivky dle dánské národní přílohy

3.1.1 Postup výpočtu

Pro samotný výpočet je nutné určit okrajové podmínky obdobně, jako u křivky v současném Eurokódu. Zaprvé je nutné definovat velikost PÚ - podlahovou plochu A_f , světlou výšku v_s a celkovou plochu obalových konstrukcí A_t . Dalším krokem je určení velikosti koeficientu povrchů b , který je závislý na tepelné pohltivosti konstrukcí ohraničujících PÚ (λ , ρ , c). Aby bylo možné křivku použít, musí hodnota tohoto koeficientu ležet v intervalu $<100; 2200>$ [$J/(m^2s^{1/2}K)$]. Jednotlivé součinitele (λ , ρ , c) mohou být uvažovány při teplotě okolí.

Koeficient povrchů b je vypočten pomocí vzorce:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K} \right] < 100; 2200 > \quad (2.1)$$

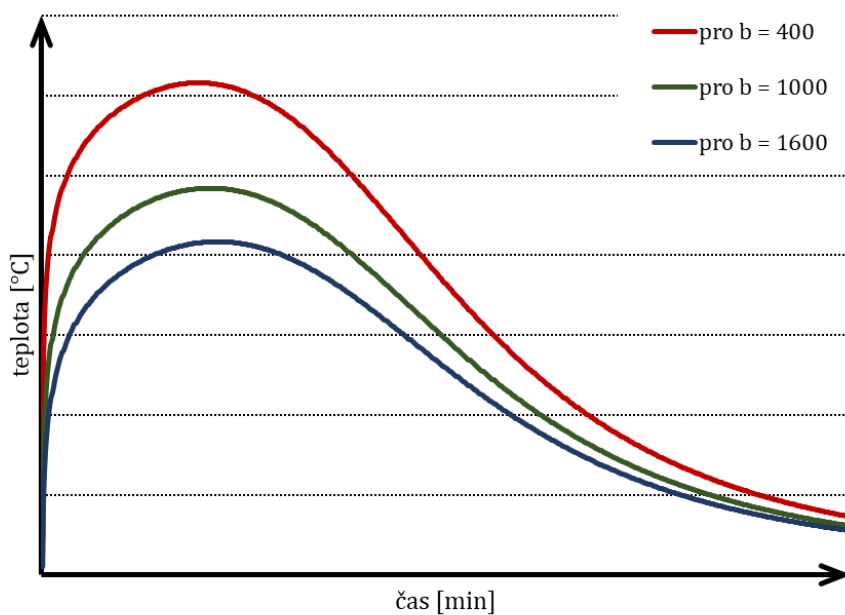
V případě, že jsou stěny, strop a podlaha z jiných materiálů (různá tepelná pohltivost), zavádí se součinitel b jako vážený průměr a to podle vzorce:

$$b = \frac{\sum b_j \cdot A_j}{A_t - A_v} \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K} \right] < 100; 2200 > \quad (2.2)$$

kde: b_j - tepelná charakteristika povrchu j -té ohraničující konstrukce

A_j - plocha povrchu j -té ohraničující konstrukce bez otvorů v m^2

Na obr. 6 je vidět, jak se mění tvar křivky pouze při změně koeficientu b . Hodnota maximální dosažené teploty zůstává ve stejném čase a mění se pouze její velikost. Čím menší je hodnota koeficientu b , tím jsou teploty ve zkoumaném úseku vyšší.



obr. 6 Závislost tvaru dánské křivky na koeficientu b

Pokud jsou ohraničující konstrukce tvořeny vícevrstevnými konstrukcemi s rozdílným koeficientem b (b_1, b_2, \dots), doporučuje i dánská příloha konečný koeficient odvodit výpočtem¹⁰:

$$\text{Jestliže } b_1 < b_2 \rightarrow b = b_1 \quad (2.3)$$

Jestliže $b_1 > b_2 \rightarrow$ vypočítá se mezní tloušťka materiálu vystaveného požáru s_{lim} :

$$s_{lim} = \sqrt{\frac{60 \cdot t_{max} \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}} \quad [m] \quad (2.4)$$

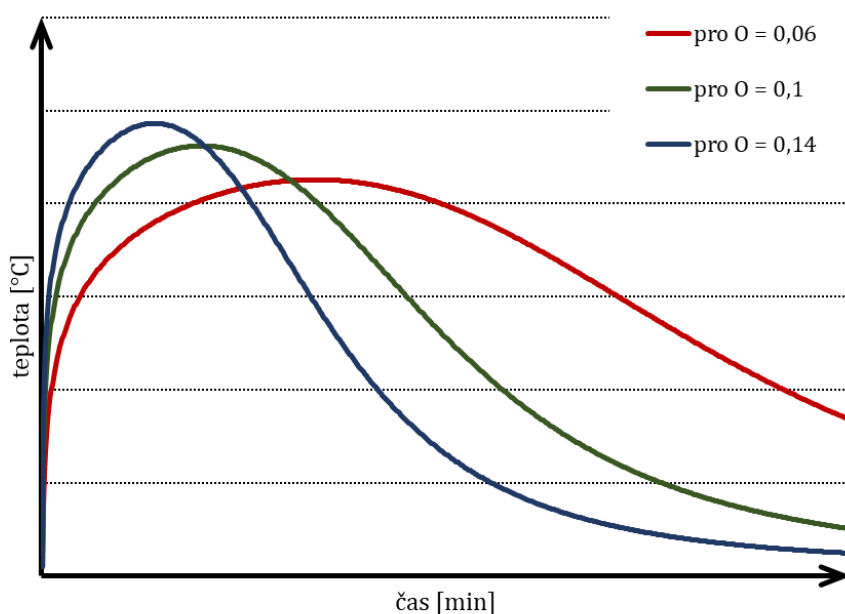
kde: t_{max} - čas maximální teploty, udán v sekundách

$$\text{Jestliže } s_1 > s_{lim} \rightarrow b = b_1 \quad (2.5)$$

$$\text{Jestliže } s_1 < s_{lim} \rightarrow b = \frac{s_1}{s_{lim}} \cdot b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{lim}}\right) \cdot b_2 \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}\right] \quad (2.6)$$

Tvar křivky je dále závislý na velikosti otvorů v obvodových konstrukcích – celková plocha svislých otvorů A_v a vážený průměr jejich výšek h_{eq} . Z těchto dat, doplněných o již vypočtenou celkovou plochu povrchu obalových konstrukcí A_t , se vypočítá faktor otvorů O , který musí ležet v intervalu $<0,02; 0,2> [m^{1/2}]$, jinak křivku nelze použít.

Na obr. 7 je vidět změna tvaru křivky pouze při změně koeficientu O . Vlna křivky se s vyšší hodnotou faktoru otvorů zkracuje a zároveň dosahuje svého maxima za kratší časový interval.



obr. 7 Závislost tvaru dánské křivky na koeficientu O

¹⁰ Index 1 představuje vrstvu přímo vystavenou požáru. Index 2 a více označuje (postupně) vrstvy další. Obdobně jako ve stávající Příloze A EN 1991-1-2.

Faktor otvorů O je vypočten podle vzorce:

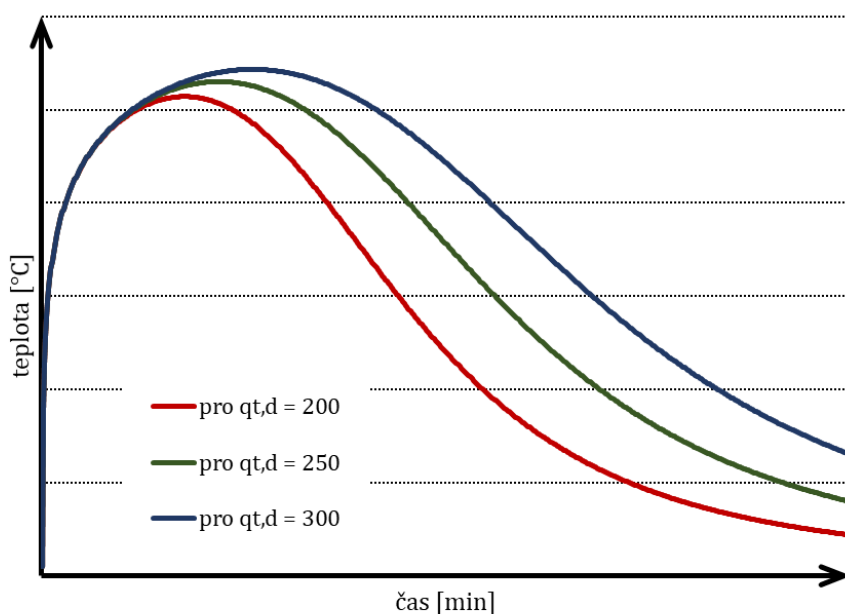
$$O = \frac{A_v}{A_t} \cdot \sqrt{h_{eq}} \quad [m^{\frac{1}{2}}] \quad < 0,02; 0,2 > \quad (2.7)$$

Stejně, jako v současné příloze A Eurokódu, se požární zatížení zohledňuje v křivce pomocí návrhové hodnoty hustoty požárního zatížení, které jsou rozlišovány dvě¹¹. Hodnota hustoty vztažená k celé ploše povrchu ohraničujících konstrukcí PÚ musí ležet v intervalu $<50; 1000>$ $[MJ/m^2]$, jinak křivku nelze použít.

Hodnota hustoty $q_{t,d}$ je vypočtena podle vzorce:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot \frac{A_f}{A_t} \quad \left[\frac{MJ}{m^2} \right] \quad < 50; 1000 > \quad (2.8)$$

Na obr. 8 je vidět, jak se mění tvar křivky pouze se změnou hodnoty hustoty požárního zatížení vztažené k celé ploše ohraničujících konstrukcí PÚ $q_{t,d}$. Se zvyšující hustotou požárního zatížení, se velikost vlny křivky zvětšuje a fáze poklesu tedy začíná později. S tím zároveň souvisí i zvětšení hodnoty maximální teploty.



obr. 8 Závislost tvaru dánské křivky na hustotě požárního zatížení $q_{t,d}$

V Dánsku nebyla odsouhlasena Příloha E Eurokódu EN 1991-1-2 a je zde nahrazena národní přílohou. Výpočet hustoty požárního zatížení přesto v této práci vychází ze stávající Přílohy E, jelikož se momentálně neuvažuje se změnou jejího znění.

¹¹ Hustota $q_{f,d}$ se vztahuje k podlahové ploše zkoumaného úseku, hustota $q_{t,d}$ se vztahuje k celé ploše povrchu A_t ohraničujících konstrukcí PÚ.

Parametrická teplotní křivka podle dánské národní přílohy nerozlišuje, zda je požár řízený palivem, nebo ventilací a další postup výpočtu je již relativně jednoduchý.

Pokračuje se podle rovnic:

$$\Gamma = \left(\frac{O}{b}\right)^2 / \left(\frac{O_{ref}}{b_{ref}}\right)^2 = \left(\frac{O}{b}\right)^2 / \left(\frac{0,04}{1160}\right)^2 \quad [-] \quad (2.9)$$

kde: $O_{ref} = 0,04 \quad [m^2]$ - referenční hodnota faktoru otvorů

$b_{ref} = 1160 \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}\right]$ - ref. hodnota součinitele obvodových konstrukcí

Dále se vypočte čas, kdy požár dosáhne maximální teploty:

$$t_{max} = 7,8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O} \quad [min] \quad (2.10)$$

Průběh celé křivky je popsán pomocí rovnice:

$$\theta_g = 20 + \frac{345 \cdot \log(8 \cdot \Gamma \cdot t + 1)}{1 + 0,04 \cdot \left(\frac{t}{t_{max}}\right)^{3,5}} \quad [^{\circ}C] \quad (2.11)$$

Pro výpočet hodnoty maximální teploty stačí v rovnici využít substituce $t = t_{max}$, díky čemuž se dostane rovnice:

$$\theta_{g,max} = 20 + \frac{345 \cdot \log(8 \cdot \Gamma \cdot t_{max} + 1)}{1 + 0,04} \quad [^{\circ}C] \quad (2.12)$$

Křivka se ve fázi poklesu (ochlazování) postupně přibližuje k hodnotě teploty okolního prostředí (20 °C), ale teoreticky nelze přesně určit konec požáru.

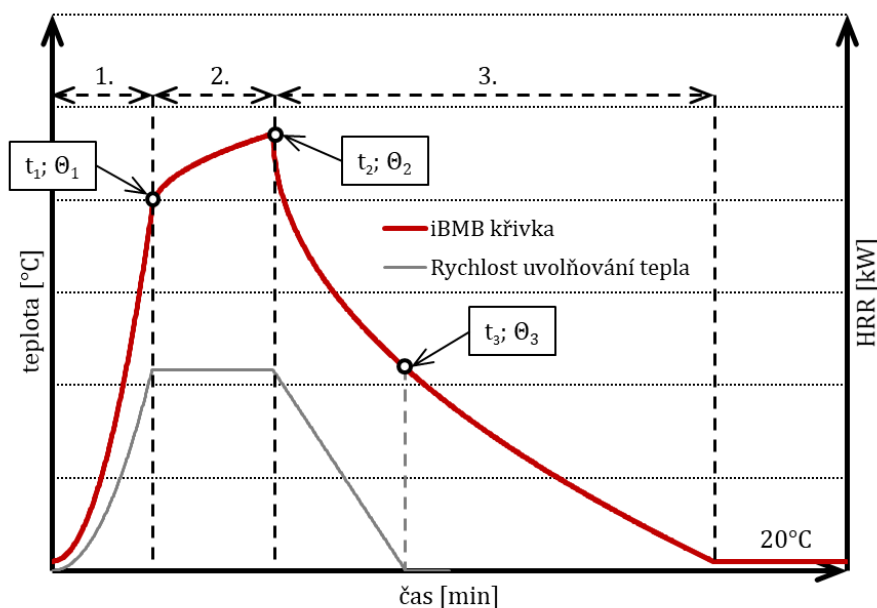
3.1.2 Odlišnosti od EN 1991-1-2 Přílohy A

Vzhledem k tomu, že dánská národní příloha pouze upravuje postup výpočtu pro parametrickou teplotní křivku uvedenou v Příloze A Eurokódu, není rozšířena oblast případů, kdy lze tuto křivku použít. Pro křivku platí stejná omezení, týkající se velikosti PÚ, ventilačních otvorů, materiálu povrchů ohraničujících konstrukcí a požárního zatížení. Křivka navíc nemůže být použita v případech, že se požární zatížení skládá z méně než 80 % (hmotnosti) dřeva/celulózy a více jak 20 % (hmotnosti) plastů a podobných materiálů.

Úpravou podle dánské národní přílohy se získá jednodušší postup samotného výpočtu. Dánská křivka nerozlišuje, zda je požár řízený palivem nebo ventilací. Nejzásadnější odlišností, je popsání fáze ohřevu i fáze ochlazování pouze jednou jedinou rovnicí. Pokles teploty ve zkoumaném PÚ tedy není lineární a více se tak podobá reálnému průběhu požáru.

3.2 Křivka dle německé národní přílohy

Parametrická teplotní křivka podle německé národní přílohy [2], neboli iBMB křivka, vychází z odlišných základů a poznatků. Její zásadní odlišností je, oproti parametrické teplotní křivce v současné Příloze A, přímá souvislost s rychlostí uvolňování tepla (HRR). Křivku s rychlostí uvolňování tepla lze získat z Eurokódu EN 1991-1-2 [1] Přílohy E. Vědci dospěli k závěru, že obě křivky jsou charakterizovány významnými body v časech t_1 , t_2 a t_3 , ve kterých se mění sklon obou křivek (lze vidět na obr. 9) [11].



obr. 9 Schematický tvar závislosti německé křivky a HRR křivky

Ve fázi rozhořívání (1. fáze na obr. 9) se jedná o lokální požár popsaný exponenciální rovnicí, který končí v čase t_1 , kdy křivka rychlosti uvolňování tepla dosáhne svého maxima. V tomto čase začíná 2. fáze, kdy je požár již plně rozvinutý a rychlost uvolňování tepla konstantní. Teplota v PÚ se v této fázi stále zvyšuje, ale již pomaleji, než ve fázi rozhořívání.

Jakmile v křivce rychlosti uvolňování tepla dojde k vyhoření 70 % požárního zatížení, nastává fáze lineárního poklesu. Tato fáze začíná v čase t_2 a končí v čase t_3 , kdy vyhoří veškeré zbylé palivo. V okamžiku, kdy se rychlost uvolňování tepla začíná zmenšovat (zlom v čase t_2), začíná zároveň i klesat teplota v PÚ (3. fáze na obr. 9). Maximální teploty je v PÚ dosaženo po skončení 2. fáze, tedy v čase t_2 . Požár končí v okamžiku, kdy se teplota ve zkoumaném úseku dostane na 20 °C (tedy na předpokládanou teplotu okolního prostředí).

Výše uvedený tvar křivky ovšem neplatí, pokud by více než 70 % požárního zatížení vyhořelo již v průběhu rozhořívání. V takovém případě 2. fáze vůbec nenastane a rovnou obě křivky přecházejí do 3. fáze a to v okamžiku, kdy odhoří právě 70 % paliva.

Jelikož se ve fázi ohřevu předpokládá pouze lokální požár a plně rozvinutého požáru je dosaženo až ve 2. fázi, nabízí se možnost zohlednění vzniku flashover efektu a to jak pro křivku

HRR, tak následně pro německou křivku. Pokud dojde v 1. fázi k flashover efektu, nastává v křivce HRR rovnou 2. fáze a rychlost uvolňování tepla dosáhne okamžitě v tento čas t_{fo} svého maxima ($t_{fo} = t_2$). Zohlednění ve výpočtu je popsáno níže.

Německá křivka se omezuje na použití do 400 m² podlahové plochy s maximální výškou požárního úseku 5 m. Další omezení, týkající se obvodových konstrukcí (b), otvorů v nich (O) a hustoty požárního zatížení ($q_{t,d}$) jsou popsány níže. Pokud je hustota požárního zatížení stanovena bez zvláštních úvah o chování při hoření, pak se má postup omezit na požární úseky s požárním zatížením převážně typu celulózy [1].

3.2.1 Postup výpočtu

Parametry, které je nutné pro křivku definovat, se moc neliší od předchozích výpočtů. V první řadě je nutné určit velikost PÚ - podlahovou plochu A_f , světlou výšku v_s a celkovou plochu obalových konstrukcí A_t .

Dalším krokem je určení velikosti koeficientu povrchů b , který je závislý na tepelné pohltivosti konstrukcí ohraničujících PÚ (λ , ρ , c). Zde je třeba zmínit odlišnost, kterou německá národní příloha oproti současné parametrické teplotní křivce v Příloze A nabízí. Výpočet tohoto koeficientu není vůbec v této příloze uveden. Naproti tomu jsou zde rozlišeny tři skupiny vlivu materiálů, pro které jsou součinitele b určeny přímo [2] (viz tab. 1).

tab. 1 Hodnoty koeficientu povrchů b dle skupiny vlivu materiálu

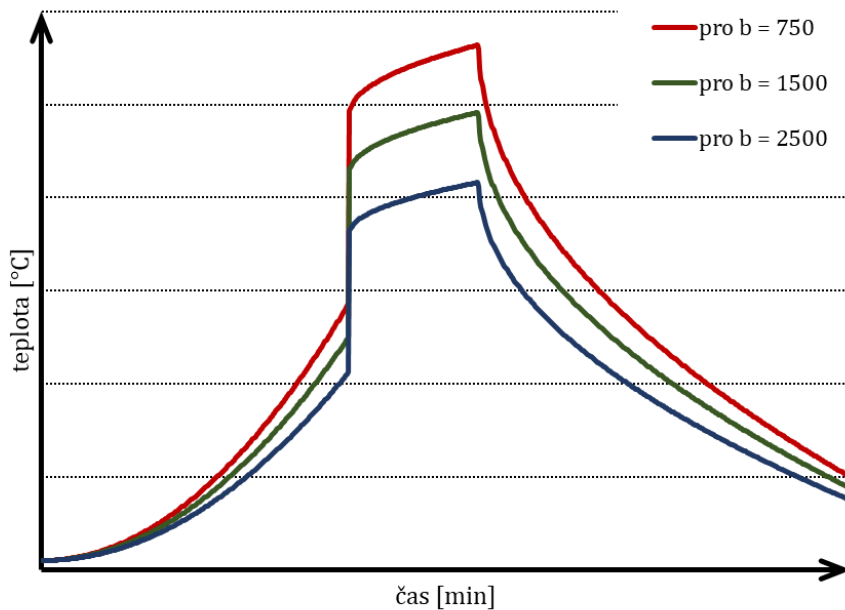
| Skupina | Popis | b [$J/(m^2s^{1/2}K)$] |
|---------|--|---------------------------|
| 1 | Prvky, nebo materiály s velkou tepelnou vodivostí, podobné zasklení (hliník, sklo, ocel). | 2 500 |
| 2 | Prvky, nebo materiály se střední tepelnou vodivostí, podobné betonu (lehčené betony s objemovou hmotností vyšší než 1000 kg/m ³ , vápenopískové zdivo, keramické zdivo). | 1 500 |
| 3 | Prvky, nebo materiály s nízkou tepelnou vodivostí, podobné materiálům s objemovou hmotností nižší než 1000 kg/m ³ (vláknité izolační materiály, pórobeton, dřevo, desky z dřevité vlny, lehčený beton, izolační omítky, sendvičové konstrukce). | 750 |

V případě, že jsou stěny, strop a podlaha z jiných materiálů (různá tepelná pohltivost), zavádí se i u této křivky součinitel b jako vážený průměr a to podle vzorce:

$$b = \frac{\sum b_j \cdot A_j}{A_t - A_v} \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K} \right] < 750; 2500 > \quad (3.1)$$

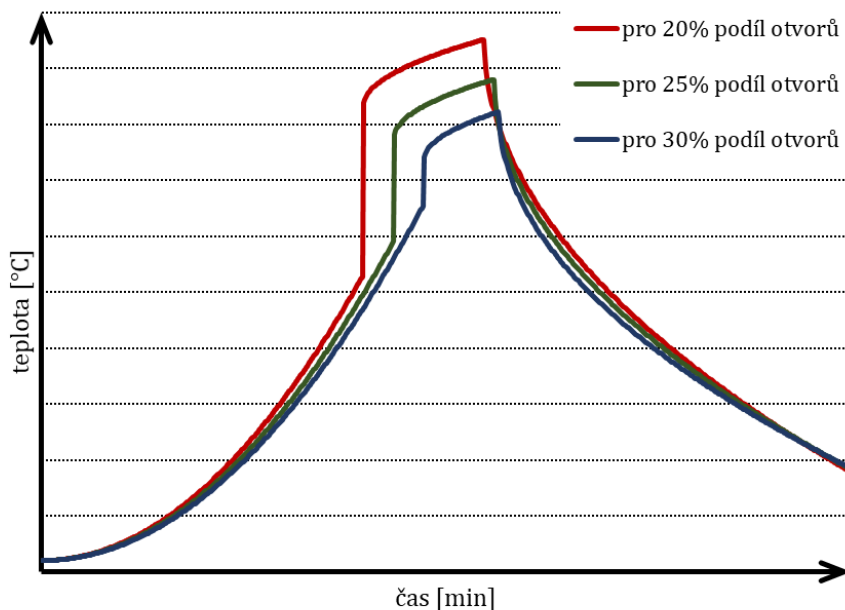
kde: b_j - tepelná charakteristika povrchu j -té ohraničující konstrukce
 A_j - plocha povrchu j -té ohraničující konstrukce bez otvorů v m²

Na obr. 10 je vidět, jak se mění tvar křivky pouze při změně koeficientu b . Protože křivka rychlosti uvolňování tepla zůstává nezměněna, jednotlivé fáze nastávají ve stejném čase, hodnoty teploty se ale liší. Čím menší je hodnota koeficientu b , tím jsou teploty ve zkoumaném úseku vyšší.



obr. 10 Závislost tvaru křivky na koeficientu b (dle německé národní přílohy)

Tvar křivky je dále závislý na velikosti otvorů v obvodových konstrukcích. Na obr. 11 je vidět změna tvaru křivky pouze při změně procentuálního podílu otvorů. Při menším podílu otvorů nastane flashover efekt za kratší časový interval a požár má intenzivnější průběh. Podíl otvorů musí být minimálně 12,5 % a maximálně 50 % podlahové plochy A_f , jinak křivku nelze použít.



obr. 11 Závislost tvaru německé křivky na procentuálním podílu otvorů

Tvar křivky nezohledňuje pouze celkovou plochu svislých otvorů A_v , ale také vážený průměr jejich výšek h_{eq} . Pomocí těchto dat lze zjistit, zda bude požár řízen ventilací a případným doplněním o další hodnoty, je možné vypočítat faktor otvorů O (pro požár řízený ventilací) nebo koeficient k (pro požár řízený palivem). Postup pro výpočet je uveden níže.

Jelikož německá křivka vychází z křivky rychlosti uvolňování tepla, je potřeba definovat rychlost rozvoje požáru t_α a maximální rychlost uvolňování tepla RHR_f . Tyto parametry lze najít i v současné Příloze E dle EN 1991-1-2, avšak v Německu jsou upraveny národní přílohou BB, (viz tab. 2). Pro velmi rychlý rozvoj požáru lze uvažovat $t_\alpha = 75$ s [2].

tab. 2 Hodnoty rychlosti rozvoje požáru a RHR_f pro různé provozy

| Provoz | Rychlost rozvoje požáru | t_α [s] | RHR_f [kW/m ²] |
|---|-------------------------|----------------|------------------------------|
| Bytové budovy | Střední | 300 | 250 |
| Kancelářské budovy | Střední | 300 | 250 |
| Nemocnice (pokoje) | Střední | 300 | 250 |
| Hotely (pokoje) | Střední | 300 | 250 |
| Knihovny | Střední | 450 | 250–500 |
| Školy (školní třídy) | Střední | 300 | 150 |
| Obchody, nákupní centra | Velká | 150 | 250 |
| Místa veřejného shromáždění (divadla, kina) | Velká | 150 | 500 |
| Prostory veřejné dopravy | Malá | 600 | 250 |

Obdobně jako u parametrické teplotní křivky uvedené v současné Příloze A Eurokódu, tak i u německé křivky je pro správný postup výpočtu nutné zjistit, zda se jedná o požár řízený palivem, nebo požár řízený ventilací. Postup výpočtu je s ohledem na typ požáru odlišný. O typu požáru rozhoduje menší z tepelných výkonů $Q_{max,v}$ (pro řízení ventilací) a $Q_{max,f}$ (pro řízení palivem).

$$Q_{max} = \min(Q_{max,v}; Q_{max,f}) \text{ [MW]} \quad (3.2)$$

$$Q_{max,v} = 1,21 \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} \text{ [MW]} \quad (3.3)$$

$$Q_{max,f} = RHR_f \cdot A_f \text{ [MW]} \quad (3.4)$$

kde: A_v - celková plocha svislých otvorů v m²

h_{eq} - vážený průměr výšek otvorů v m

A_f - celková podlahová plocha PÚ v m²

RHR_f - maximální rychlost uvolňování tepla v kW/m²

Jakmile je známo maximální uvolňované teplo Q_{max} , je potřeba ověřit, zda ve fázi rozhořívání dojde ke vzniku flashover efektu, který je v křivce zohledněn dosažením určité

hodnoty rychlosti uvolňování tepla Q_{fo} . Pokud je tato hodnota překročena, nastane v čase t_{fo} rovnou 2. fáze. Výpočet je popsán pomocí rovnic uvedených níže.

$$Q_{fo} = 0,0078 \cdot A_t + 0,378 \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} \quad [MW] \quad (3.5)$$

$$t_{fo} = \sqrt{t_\alpha^2 \cdot Q_{fo}} \quad [s] \quad (3.6)$$

Dále je nutné pokračovat výpočtem křivky pro referenční požární zatížení, ze které vychází křivky pro jakékoli jiné požární zatížení. Hodnota hustoty referenčního zatížení je $1\,300\text{ MJ/m}^2$.

Celkové uvolněné teplo je vypočítáno podle:

$$Q_d = 1\,300 \cdot A_f \quad [MJ] \quad (3.7)$$

Faktor otvorů O je vypočten podle vzorce:

$$O = \frac{A_v}{A_t} \cdot \sqrt{h_{eq}} \quad [m^{\frac{1}{2}}] \quad (3.8)$$

Pokud je požár řízen ventilací, pokračuje výpočet podle rovnic:

$$Q_1 = \frac{t_1^3}{3 \cdot t_\alpha^2} \quad [MJ] \quad (3.9)$$

$$t_1 = \min(t_{fo}; t_\alpha \cdot \sqrt{Q_{max,v}}) \quad [s] \quad (3.10)$$

$$\theta_{1,v} = -\frac{8,75}{O} - 0,1 \cdot b + 1\,175 \quad [^\circ C] \quad (3.11)$$

$$Q_2 = 0,7 \cdot Q_d - Q_1 \quad [MJ] \quad (3.12)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_2}{Q_{max,v}} \quad [s] \quad (3.13)$$

$$\theta_{2,v} = \min\left(1\,134; \frac{(0,004 \cdot b - 17)}{O} - 0,4 \cdot b + 2\,175\right) \quad [^\circ C] \quad (3.14)$$

$$Q_3 = 0,3 \cdot Q_d \quad [MJ] \quad (3.15)$$

$$t_3 = t_2 + \frac{2 \cdot Q_3}{Q_{max,v}} \quad [s] \quad (3.16)$$

$$\theta_{3,v} = -\frac{5,0}{O} - 0,16 \cdot b + 1\,060 \quad [^\circ C] \quad (3.17)$$

Pokud je požár řízen palivem, pokračuje výpočet podle rovnic:

$$k = \sqrt[3]{\frac{Q_{max,f}^2}{A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} \cdot (A_t - A_v) \cdot b}} \quad (3.18)$$

$$Q_1 = \frac{t_1^3}{3 \cdot t_\alpha^2} \quad [MJ] \quad (3.19)$$

$$t_1 = t_\alpha \cdot \sqrt{Q_{max,f}} \quad [s] \quad (3.20)$$

$$\text{Jestliže } k > 0,04 \rightarrow \theta_{1,f} = 980 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.21)$$

$$\text{Jestliže } k \leq 0,04 \rightarrow \theta_{1,f} = 24\,000 \cdot k + 20 \text{ } [^\circ\text{C}] \quad (3.22)$$

$$Q_2 = 0,7 \cdot Q_d - Q_1 \quad [MJ] \quad (3.23)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_2}{Q_{max,f}} \quad [s] \quad (3.24)$$

$$\text{Jestliže } k > 0,04 \rightarrow \theta_{1,f} = 1\,340 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.25)$$

$$\text{Jestliže } k \leq 0,04 \rightarrow \theta_{1,f} = 33\,000 \cdot k + 20 \text{ } [^\circ\text{C}] \quad (3.26)$$

$$Q_3 = 0,3 \cdot Q_d \quad [MJ] \quad (3.27)$$

$$t_3 = t_2 + \frac{2 \cdot Q_3}{Q_{max,f}} \quad [s] \quad (3.28)$$

$$\text{Jestliže } k > 0,04 \rightarrow \theta_{1,f} = 660 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.29)$$

$$\text{Jestliže } k \leq 0,04 \rightarrow \theta_{1,f} = 16\,000 \cdot k + 20 \text{ } [^\circ\text{C}] \quad (3.30)$$

Pokud je potřeba vypočítat parametrickou teplotní křivku pro jiné požární zatížení než je referenční hodnota, vypočte se celkové uvolněné teplo $Q_{x,d}$ dle rovnice:

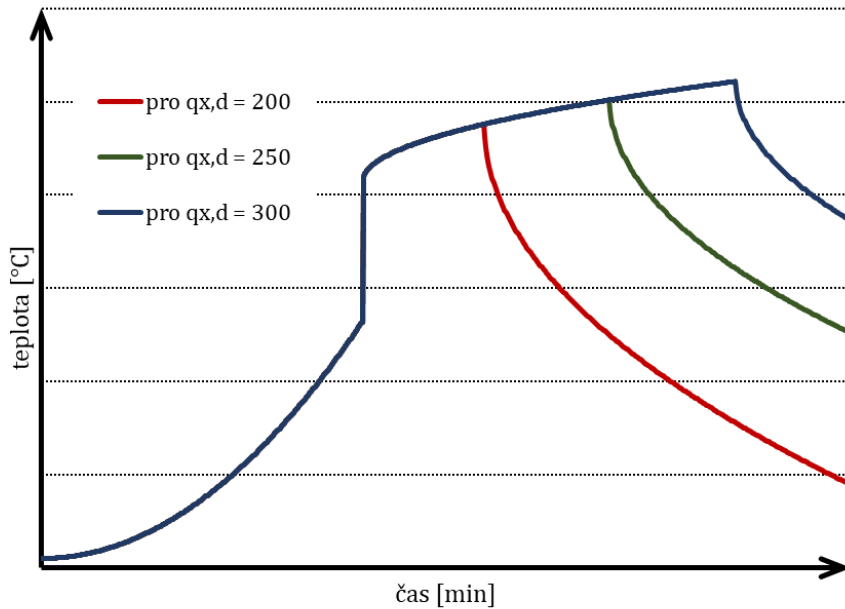
$$Q_{x,d} = q_{x,d} \cdot A_f \quad [MJ] \quad (3.31)$$

kde: $q_{x,d} \text{ } [MJ/m^2] < 100; 1\,300 >$ - návrhová hodnota hustoty požárního zatížení

Pokud hustota požárního zatížení $q_{x,d}$ neleží v intervalu $<100; 1\,300> \text{ } [MJ/m^2]$, potom nelze křivku použít. Tato hodnota je v práci uvažována shodná s hodnotou $q_{f,d}$ v příloze A (Eurokód 1).

Dále je třeba rozhodnout, zda bude mít křivka rychlosti uvolňování tepla tři fáze nebo pouze dvě. Počet fází závisí na velikosti uvolněného tepla v 1. fázi - pokud se ho již zde uvolní více jak 70 % z celkového uvolněného tepla, potom nebude mít křivka fázi ustáleného hoření.

Na obr. 12 je vidět, jak se mění tvar německé křivky pouze se změnou hustoty požárního zatížení $q_{x,d}$, vztažené k podlahové ploše PÚ. Se zvyšující se hustotou požárního zatížení, se interval ustáleného hoření prodlužuje a fáze poklesu začíná později. S tím zároveň souvisí i zvýšení hodnoty maximální teploty.



obr. 12 Závislost tvaru německé křivky na hustotě požárního zatížení $q_{x,d}$

Pokud platí $Q_1 < 0,7 \cdot Q_{x,d}$ potom se pokračuje podle rovnic:

$$t_{2,x} = t_1 + \frac{(0,7 \cdot Q_{x,d}) - Q_1}{Q_{max}} \quad [s] \quad (3.32)$$

$$\theta_{2,x} = (\theta_2 - \theta_1) \cdot \sqrt{\frac{t_{2,x} - t_1}{t_2 - t_1}} + \theta_1 \quad [^\circ C] \quad (3.33)$$

$$t_{3,x} = t_{2,x} + \frac{0,6 \cdot Q_{x,d}}{Q_{max}} \quad [s] \quad (3.34)$$

$$\theta_{3,x} = \theta_3 \cdot \left(\frac{\log_{10} \left(\frac{t_{3,x}}{60} + 1 \right)}{\log_{10} \left(\frac{t_3}{60} + 1 \right)} \right) \quad [^\circ C] \quad (3.35)$$

Pokud platí $Q_1 \geq 0,7 \cdot Q_{x,d}$ potom se pokračuje podle rovnic:

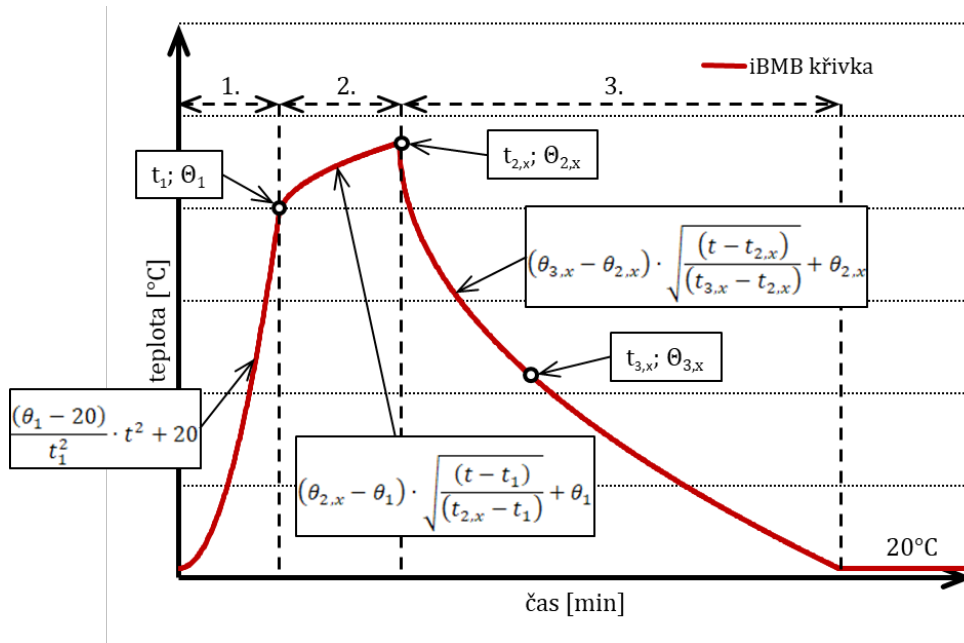
$$t_{1,x} = t_{2,x} = \sqrt[3]{0,7 \cdot Q_{x,d} \cdot 3 \cdot t_{\alpha}^2} \quad [s] \quad (3.36)$$

$$\theta_{2,x} = \frac{(\theta_1 - 20)}{t_1^2} \cdot t_{1,x}^2 + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.37)$$

$$t_{3,x} = t_{2,x} + \frac{0,6 \cdot Q_{x,d}}{Q_{max}} \text{ [s]} \quad (3.38)$$

$$\theta_{3,x} = \theta_3 \cdot \left(\frac{\log_{10} \left(\frac{t_{3,x}}{60} + 1 \right)}{\log_{10} \left(\frac{t_3}{60} + 1 \right)} \right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.39)$$

Na obr. 13 jsou vidět jednotlivé fáze německé křivky.



obr. 13 Schéma pro výpočet jednotlivých fází německé křivky

Průběh 1. fáze křivky $< 0; t_1 >$ je popsán pomocí rovnice:

$$\theta_g = \frac{(\theta_1 - 20)}{t_1^2} \cdot t^2 + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.40)$$

Průběh 2. fáze křivky $< t_1; t_2 >$ je popsán pomocí rovnice:

$$\theta_g = (\theta_{2,x} - \theta_1) \cdot \sqrt{\frac{(t - t_1)}{(t_{2,x} - t_1)}} + \theta_1 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.41)$$

Průběh 3. fáze křivky $< t_2; t_3 >$ je popsán pomocí rovnice:

$$\theta_g = (\theta_{3,x} - \theta_{2,x}) \cdot \sqrt{\frac{(t - t_{2,x})}{(t_{3,x} - t_{2,x})}} + \theta_{2,x} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.42)$$

3.2.2 Odlišnosti od EN 1991-1-2 Přílohy A

Německá národní příloha vychází z naprosto odlišných postupů, oproti stávající parametrické křivce uvedené v Příloze A. Z tohoto důvodu je oblast případů, kdy lze tuto křivku použít, odlišná. Pro křivku platí rozdílná omezení týkající se velikosti PÚ, ventilačních otvorů, materiálu povrchů ohraničujících konstrukcí a požárního zatížení.

První odlišností z hlediska omezení je, že německá křivka může být použita pouze do 400 m² podlahové plochy, což je o 100 m² méně, než v případě Přílohy A. Obecně lze ale konstatovat, že toto omezení se nebude týkat velkého počtu PÚ, protože pro většinu případných posouzení bude tato podlahová plocha dostačující. Naproti tomu lze křivku využít i v případech s vyšší světlou výškou, konkrétně až do 5 m (v případě Přílohy A je to pouze do 4 m), což je v případě aplikace do moderní architektury přínosné.

Pokud jde o omezení z hlediska ventilačních otvorů, je německá křivka validována na procentuální podíl plochy otvorů od 12,5 % do 50,0 %, vůči podlahové ploše PÚ. Zde je třeba zmínit, že zde vůbec nezáleží na výšce otvorů, ale pouze na jejich ploše. V současné příloze A je omezení závislé na součiniteli otvorů O , který vychází jak z plochy otvorů, tak i z jejich průměrné výšky. Nelze tedy přesně konstatovat, zda je omezení vůči ventilačním otvorům v německé národní příloze přísnější nebo zda nabízí větší škálu případů, kdy ji lze aplikovat.

Německá národní křivka neudává přímo omezení pro koeficient povrchů b , který je závislý na tepelné pohltivosti konstrukcí ohraničujících PÚ. Na rozdíl od současné Přílohy A nabízí výpočet pro německou křivku přímo tři skupiny vlivu materiálu, ve kterých lze uvažovat například i prosklené fasády. S ohledem na tyto skupiny se dá říct, že křivku lze použít v intervalu pro koeficient $b < 750; 2\ 500 > [\text{J}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K})]$.

Zásadním rozdílem je přímá souvislost s křivkou rychlosti uvolňování tepla. Nemůže se tedy u této křivky stát, že by dle křivky HRR bylo stále uvolňováno teplo, ale teplota v PÚ již byla na hodnotě teploty okolního prostředí, jako například u křivky v Příloze A.

Německá křivka uvažuje, ve fázi rozhořívání, s lokálním požárem, který se může rozvinout do prostorového požáru, při kterém může vzniknout flashover efekt. Parametrická křivka v současné Příloze A vůbec nezohledňuje, že by v počáteční fázi neměl být požár plně rozvinutý.

Pro výpočet dle přesné hodnoty požárního zatížení, je nutné nejdříve vypočítat parametrickou teplotní křivku pro referenční hodnotu požárního zatížení. Požární zatížení, které je vztažené k podlahové ploše PÚ, je limitováno intervalem $< 100; 1300 > [\text{MJ}/\text{m}^2]$.

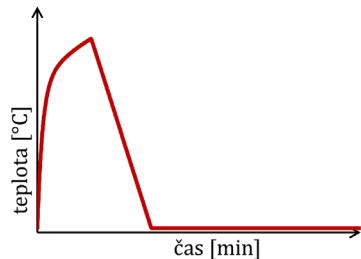
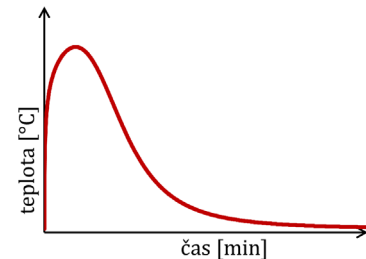
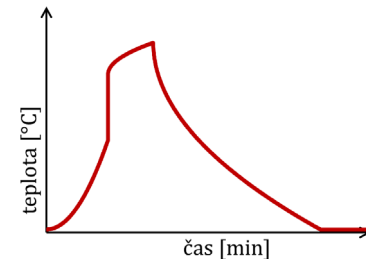
4 Porovnání průběhu parametrického požáru

Pro porovnání jednotlivých průběhů parametrických teplotních křivek vůči průběhům teplot pozorovaných při požárních zkouškách, byla vytvořena databáze obsahující data z uskutečněných testů. Tato databáze obsahuje data shromážděná z 25 požárních zkoušek z ČR a ze zahraničí. Vzhledem k omezením, které jednotlivé parametrické křivky mají, nelze aplikovat všechny výpočty na všechny požární zkoušky. Průběh porovnávání je detailně popsán v kapitole 4.2, stejně tak jsou v této kapitole detailněji porovnány vybrané křivky.

4.1 Obecné odlišnosti

Následující tab. 3 shrnuje odlišnosti mezi parametrickými teplotními křivkami uvedenými v kapitolách výše (kap. 2, kap. 3.1, kap. 3.2).

tab. 3 Obecné porovnání parametrických teplotních křivek

| EN 1991-1-2 Příloha A | Dánská národní příloha | Německá národní příloha |
|--|--|---|
|  |  |  |
| Exponenciální nárůst, lineární pokles | Celý průběh popstán jednou křivkou | Celkem 3 části křivky |
| Nemá časovou souvislost s rychlostí uvolňování tepla | Nemá časovou souvislost s rychlostí uvolňování tepla | Části křivky souvisí s rychlostí uvolňování tepla |
| Fáze rozhořivání uvažována jako plně rozvinutý požár | Fáze rozhořivání uvažována jako plně rozvinutý požár | Fáze rozhořivání uvažována jako lokální požár |
| Rovnoměrné rozložení teploty v celém PÚ, popis teploty po flashover efektu | Rovnoměrné rozložení teploty v celém PÚ, popis teploty po flashover efektu | Rovnoměrné rozložení teploty v celém PÚ, zobrazuje kdy dojde k flashover efektu |
| Do 500 m² podlahové plochy | Do 500 m² podlahové plochy | Do 400 m ² podlahové plochy |
| Maximální výška PÚ je 4 m | Maximální výška PÚ je 4 m | Maximální výška PÚ je 5 m |
| Hustota požárního zatížení: $50 \leq Q_{t,d} \leq 1\,000$ [MJ/m ²] Vztažená k celé ploše ohraničujících konstrukcí | Hustota požárního zatížení: $50 \leq Q_{t,d} \leq 1\,000$ [MJ/m ²] Vztažená k celé ploše ohraničujících konstrukcí | Hustota požárního zatížení: $100 \leq Q_{x,d} \leq 1\,300$ [MJ/m ²] Vztažená k podlahové ploše zkoumaného úseku |
| Součinitel otvorů: $0,02 \leq O \leq 0,2$ [m ^{1/2}] | Součinitel otvorů: $0,02 \leq O \leq 0,2$ [m ^{1/2}] | Otvory ve velikosti 12,5–50 % podlahové plochy |
| Koeficient povrchů: $100 \leq b \leq 2\,200$ [J/(m ² s ^{1/2} K)] | Koeficient povrchů: $100 \leq b \leq 2\,200$ [J/(m ² s ^{1/2} K)] | 3 skupiny vlivu povrchů: b = 750/1 500/2 500 J/(m ² s ^{1/2} K) |

4.2 Aplikace na požární zkoušky

Aby bylo možné aplikovat parametrické teplotní křivky na reálnou situaci, je vytvořena databáze v programu MS Excel, obsahující data z 25 uskutečněných požárních zkoušek. Každý jednotlivý list souboru se zabývá právě jednou požární zkouškou. U každého testu jsou zaznamenány teploty plynu v časovém průběhu požární zkoušky. Dále databáze obsahuje všechny potřebné informace o jednotlivých zkouškách – rozměry PÚ, ventilační otvory, materiál obvodových konstrukcí a použité požární zatížení. Příklady listů popisující zkoušky jsou uvedeny v kapitolách dále.

V tabulkovém procesoru (MS Excel) jsou na samostatných listech vytvořeny tři zautomatizované výpočetní postupy (pro parametrickou teplotní křivku dle Přílohy A, křivku dle dánské národní Přílohy A křivku dle německé národní přílohy). Aby bylo možné efektivně křivky porovnat, tak je tento výpočetní soubor nakopírován pro každou požární zkoušku obsaženou v databázi. Soubory s postupem výpočtu jsou vždy propojeny s okrajovými podmínkami obsaženými v databázi.

Ve výpočetních souborech je sledován průběh teploty v čase pro jednotlivé požární křivky. Z těchto dat jsou pro každou jednotlivou křivku vykresleny přehledné grafy. Dále je databáze zpětně propojena s jednotlivými soubory s výpočty a teplotní křivky jsou vykresleny do jednoho grafu v souboru se vstupními daty (v databázi). Pomocí těchto grafů pak lze jednotlivé parametrické křivky mezi sebou porovnat a zároveň je lze i porovnat s průběhem teploty pozorované při požární zkoušce.

Ve výpočtu pro německou teplotní křivku je provedena jedna úprava, která se týká koeficientu povrchů b , který je závislý na tepelné pohltivosti konstrukcí ohraničujících PÚ. V německé národní příloze se uvažuje se třemi kategoriemi vlivu materiálů. Ve výpočetních souborech je tento koeficient vypočítán přímo, obdobně jako například v současné Příloze A.

Koeficient povrchů b je vypočten pomocí vzorce:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \left[\frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K} \right] < 100; 2200 > \quad (1.1)$$

Jednotlivé součinitele (λ , ρ , c) jsou uvažovány při teplotě okolí.

Kromě samotných parametrických křivek jsou v grafech zobrazeny i křivky rychlosti uvolňování tepla, upravené podle německé národní přílohy.

Každý graf tedy obsahuje tyto křivky (pouze v případě, že lze všechny křivky aplikovat):

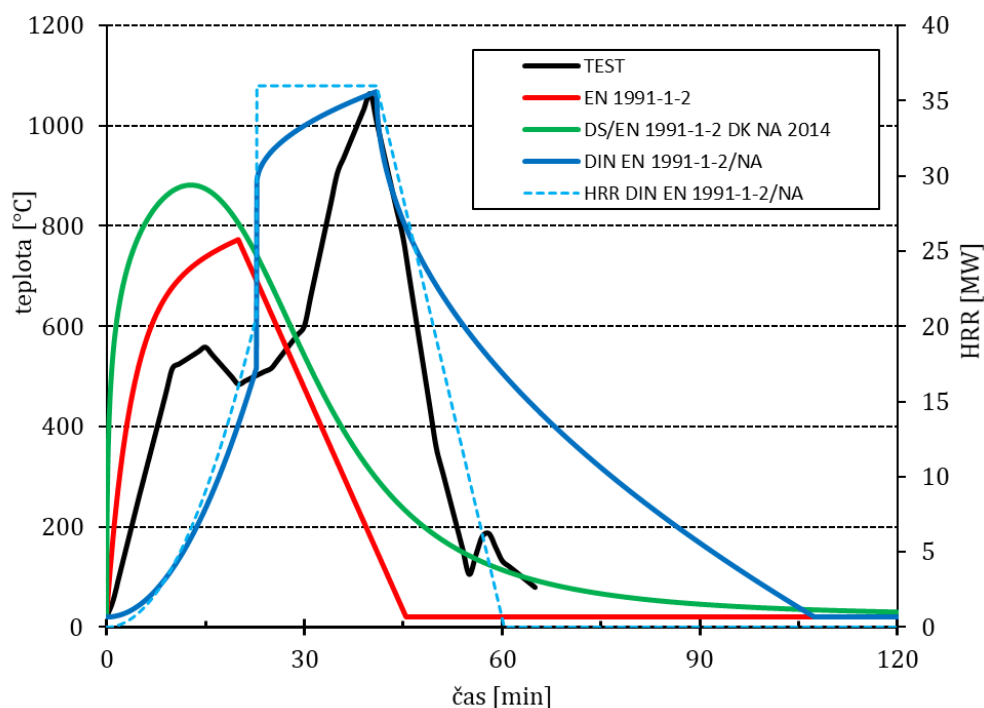
- TEST (skutečně naměřený průběh teplot plynu v PÚ)
- EN 1991-1-2 (parametrická teplotní křivka dle současné Přílohy A)
- DS/EN 1991-1-2 DK NA 2014 (parametrická teplotní křivka z dánské národní přílohy)
- DIN EN 1991-1-2/NA (parametrická teplotní křivka z německé národní přílohy)
- HRR DIN EN 1991-1-2/NA (křivka rychlosti uvolňování tepla pro německou křivku)

4.2.1 Požární zkouška BRE1

Informace o zkoušce [13]:

- Požární zkouška proběhla ve Velké Británii (1. z celkem 8 zkoušek)
- Rozměry PÚ: 12,0 m x 12,0 m x 4,0 m (šířka x délka x výška)
- Otvory: 7,2 m x 3,4 m (šířka x výška)
- Stěny – betonové bloky, podlaha – písek na betonu, strop – předpjatý beton
- Požární zatížení – dřevěné hranice 40 kg/m² ($H_u = 12,1$ MJ/kg)

Na obr. 14 jsou křivky, převzaté z experimentu a vypočtené dle postupů uvedených výše.



obr. 14 Aplikace požárních křivek na test BRE1

Na první pohled je patrné, že křivka podle německé národní přílohy téměř přesně vystihuje maximální teplotu, která byla naměřena při požární zkoušce a to jak velikostí, tak i časem, kdy byla tato teplota dosažena. Naproti tomu teploty v počáteční fázi se u německé křivky velmi odlišují od skutečnosti. Rozvoj požáru je v této fázi u parametrické křivky velice pozvolný.

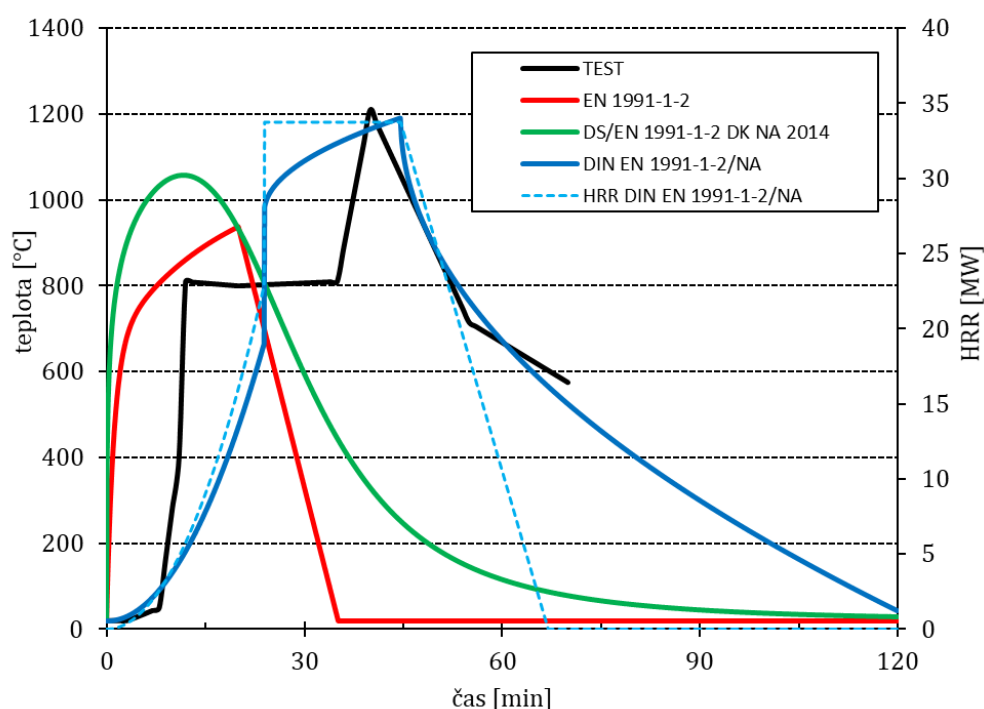
V případě parametrické teplotní křivky dle současné Přílohy A je vidět, že lépe kopíruje počáteční fázi rozvoje požáru. Hodnota maximální teploty je v tomto případě přibližně o 300 °C nižší, než ve skutečnosti a nastává o cca 20 min dříve. V době, kdy se skutečně naměřené hodnoty blíží svému maximu, je požár podle této křivky skoro u svého konce (blíží se teplotě okolí 20 °C). K této křivce se dá připodobnit i průběh křivky dle dánské národní přílohy, jejíž počáteční nárůst je ještě strmější. Maximální teplota u dánské křivky nastává ještě o několik minut dříve, ačkoli její velikost se od skutečnosti liší přibližně jen o 200 °C. Při aplikaci těchto dvou křivek na ověření požadované PO 30 min a více mohl být požární návrh na straně nebezpečné.

4.2.2 Požární zkouška CAR1

Informace o zkoušce [14]:

- Požární zkouška proběhla ve Velké Británii – Cardington (simulace kanceláře)
- Osmipodlažní ocelový skelet, nechráněné nosníky, spřažené ocelobetonové stropy
- Rozměry PÚ: 7,5 m x 18,0 m x 4,0 m (šířka x délka x výška)
- Otvory: 18,0 m x 2,0 m (šířka x výška)
- Stěny – pórobeton, podlaha – beton, strop – beton
- Požární zatížení – nábytek, kancelářské potřeby, dřevo 46,26 kg/m² ($H_u = 12,1$ MJ/kg)

Na obr. 15 jsou křivky, převzaté z experimentu a vypočtené dle postupů uvedených výše.



obr. 15 Aplikace požárních křivek na test CAR1

U tohoto grafu je opět patrné, že křivka podle německé národní přílohy zase téměř přesně vystihuje maximální teplotu, naměřenou při požární zkoušce. Teploty v počáteční fázi se i v tomto případě velice odlišují od reality (jsou velice nízké). Skutečně naměřené hodnoty ukazují velice strmý nárůst teploty v přibližně 10. min. Těchto teplot je v křivce dosaženo až při vzniku flashover efektu, cca o 10 min později (20. min).

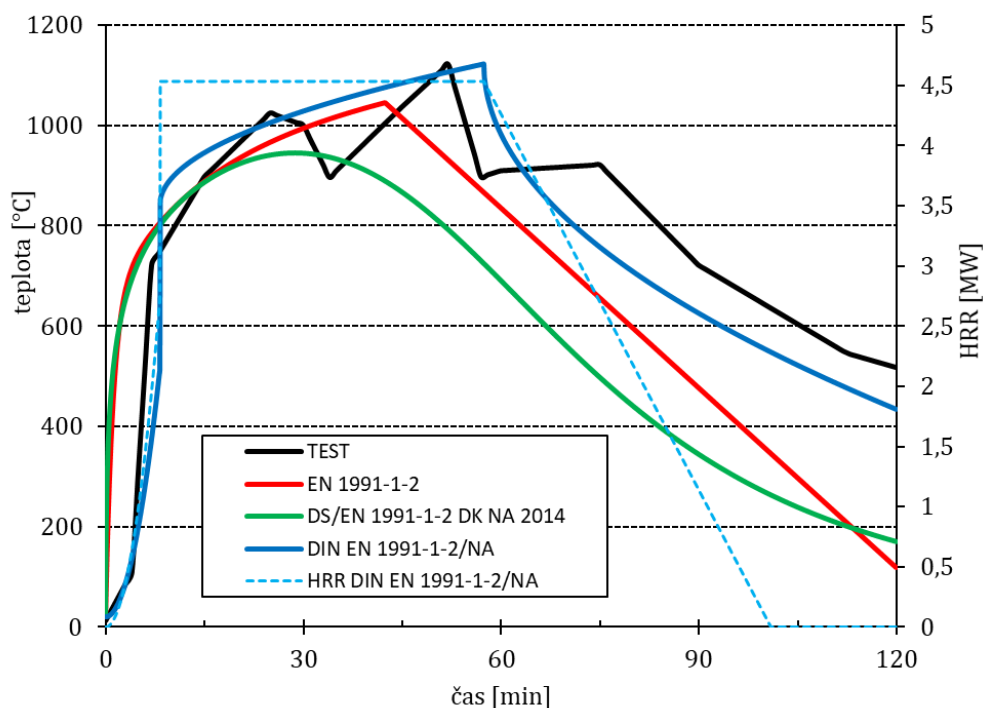
V případě parametrické teplotní křivky dle současné Přílohy A a zároveň i křivky podle dánské národní přílohy je opět vidět, že v době, kdy se skutečně naměřené hodnoty pohybují okolo svého maxima, jsou teploty v těchto křivkách velice nízké, nebo dokonce již na hodnotě teploty okolo (20 °C). Většina požárního zatížení vyhoří v obou případech již v průběhu prvních 30-ti min, což je oproti realitě velice odlišné.

4.2.3 Požární zkouška LEH8

Informace o zkoušce [15]:

- Požární zkouška proběhla v Německu - Lehrte (test 8)
- Rozměry PÚ: 3,59 m x 5,05 m x 2,5 m (šířka x délka x výška)
- Otvory: 2,61 m x 1,66 m (šířka x výška)
- Stěny – beton, podlaha – izolační žáruvzdorné cihly, strop – beton
- Požární zatížení – dřevo 90,0 kg/m² ($H_u = 12,1$ MJ/kg)

Na obr. 16 jsou křivky, převzaté z experimentu a vypočtené dle postupů uvedených výše.



obr. 16 Aplikace požárních křivek na test LEH8

Aplikace křivky dle německé národní křivky na požární zkoušku v Lehrte je téměř ideální. Německá křivka kopíruje průběh skutečné naměřených teplot hlavně ve fázi ohřevu. Fáze poklesu začíná dle této křivky a pár minut dříve a hodnoty teplot jsou v této fázi přibližně o 100 °C nižší. Hodnota maximální teploty německé křivky je prakticky stejná jako naměřená hodnota.

V případě parametrické teplotní křivky z Přílohy A je požár v počáteční fázi také velice přesně prezentován. Fáze poklesu ovšem začíná opět brzy a teploty jsou o více než 200 °C nižší, než naměřené při požární zkoušce.

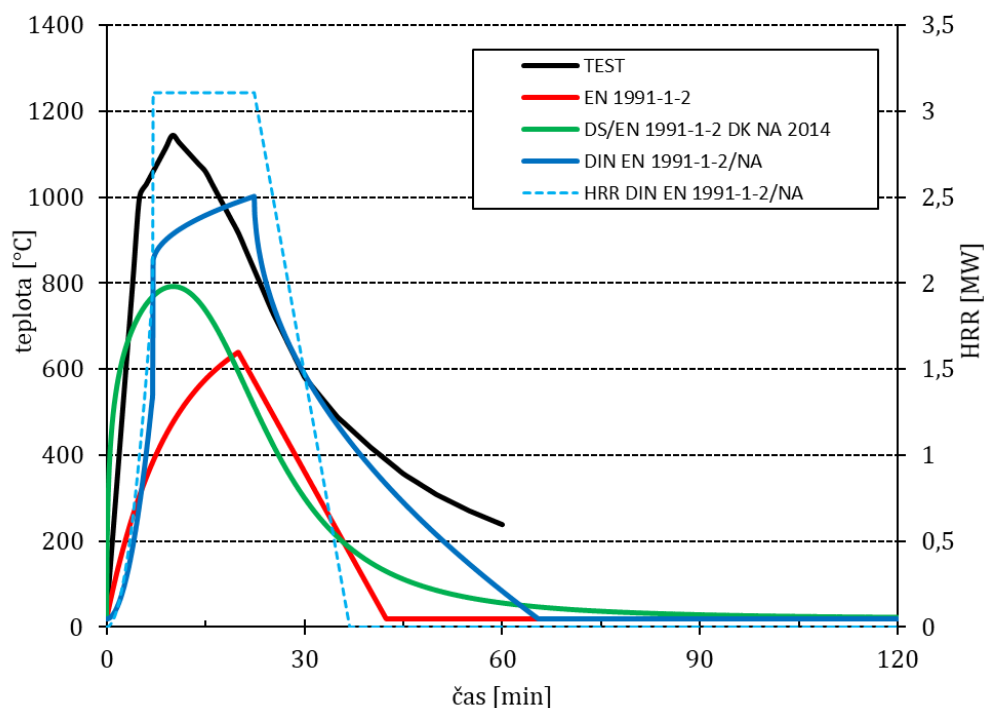
Nejhůře zobrazuje požár parametrická teplotní křivka dle dánské národní přílohy. Teploty začínají v požárním úseku klesat o přibližně 30 min dříve, než je tomu ve skutečnosti. Po půl hodině se dánská křivka začíná velice vzdalovat realitě a hodnoty teplot v klesající fázi jsou přibližně až o 400 °C nižší, což by mohlo být při ověření požadované PO velice nebezpečné.

4.2.4 Požární zkouška METZ4

Informace o zkoušce [16]:

- Požární zkouška proběhla ve Francii - Metz
- Rozměry PÚ: 3,38 m x 3,68 m x 3,13 m (šířka x délka x výška)
- Otvory: 1,18 m x 2,18 m (šířka x výška)
- Stěny – beton, podlaha – žáruvzdorné tvárnice, strop – beton
- Požární zatížení – dřevěné hranice 60,0 kg/m² ($H_u = 12,1$ MJ/kg)

Na obr. 17 jsou křivky, převzaté z experimentu a vypočtené dle postupů uvedených výše.



obr. 17 Aplikace požárních křivek na test METZ4

Růstová fáze křivky je podle německé národní přílohy přibližně o méně než 5 min opožděna oproti skutečně získanému průběhu teplot. Hodnota maximální teploty je dle německé křivky o více než 150 °C nižší.

V grafu je patrné, že aplikace parametrické teplotní křivky dle Přílohy A není pro tento případ ideální. Rozdíl v maximálních hodnotách teplot je až 500 °C, což by pro jakékoli další využití této křivky mohlo znamenat fatální nepřesnost a ohrožení na straně bezpečnosti.

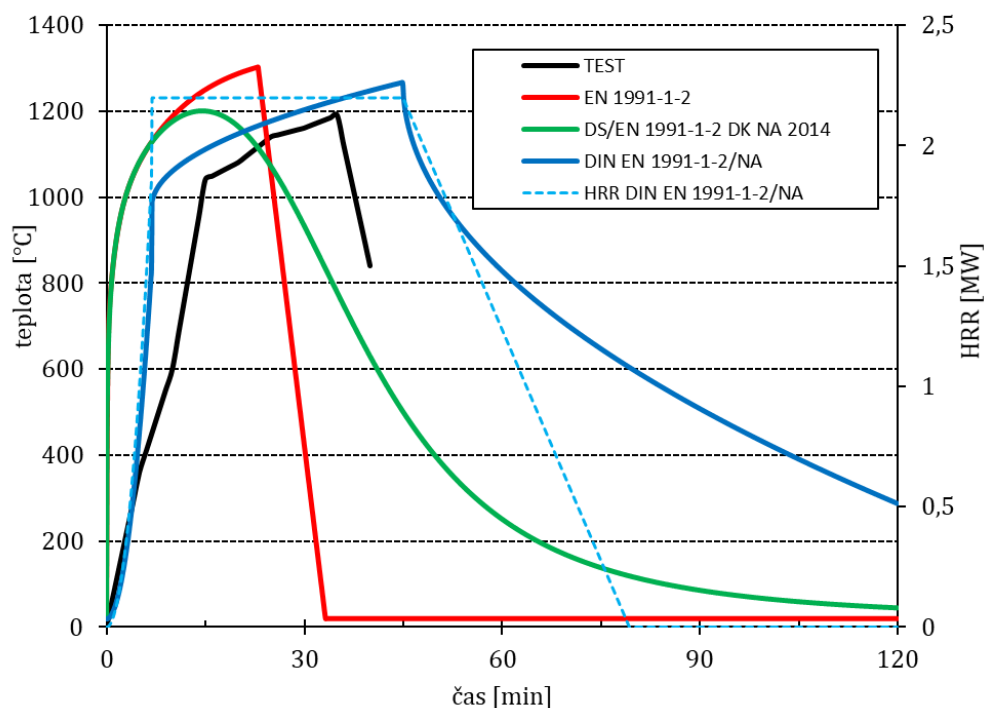
Parametrická teplotní křivka dle dánské národní přílohy je na tom jen o trochu lépe, než křivka v současné Příloze A. Nárůst teplot je podobný realitě, ovšem velikost maximální teploty je o více než 300 °C nižší. Podobné nereálné snížení teplot je vidět i ve fázi, kdy teplota začíná klesat. Možnost dalšího použití je tedy i pro tuto křivku velice nevhodné.

4.2.5 Požární zkouška VTT2

Informace o zkoušce [17]:

- Požární zkouška proběhla ve Finsku – Centrum technického výzkumu (VTT)
- Rozměry PÚ: 2,2 m x 4,0 m x 2,6 m (šířka x délka x výška)
- Otvory: 3,0 m x 1,2 m (šířka x výška)
- Stěny – beton, podlaha – žáruvzdorné tvárnice, strop – beton
- Požární zatížení – dřevo 71,0 kg/m² ($H_u = 12,1$ MJ/kg)

Na obr. 18 jsou křivky, převzaté z experimentu a vypočtené dle postupů uvedených výše.



obr. 18 Aplikace požárních křivek na test VTT2

Velikosti maximálních teplot se u všech parametrických modelů velice podobají skutečně získaným hodnotám (do rozdílu 100 °C). Parametrická teplotní křivka dle německé národní přílohy v tomto případě obaluje křivku se skutečně naměřeným průběhem teploty plynu v požárním úseku a to jak ve fázi růstu, tak i ve fázi chladnutí. Fáze poklesu začíná přibližně o 10 min později než je tomu ve skutečnosti. Při aplikaci této křivky na ověření požadované požární odolnosti by byl požární návrh na straně bezpečné.

Průběhy parametrické teplotní křivky dle Přílohy A a dle dánské národní přílohy jsou v počáteční růstové fázi téměř totožné. U parametrické teplotní křivky dle Přílohy A začíná fáze poklesu skoro o 15 min dříve, než je tomu ve skutečnosti. Požár tedy skončí ještě dříve, než je ve skutečně naměřených hodnotách dosaženo maximální teploty. Obdobně je tomu i u dánské křivky, která začíná klesat ještě dříve, ale pozvolněji.

4.2.6 Další požární zkoušky

Aplikace na další požární zkoušky jsou uvedeny v příloze 1, kde se nachází grafy s průběhem teplot. Nebylo možné využít celý obsah databáze pro porovnání, jelikož pro některé požární zkoušky nelze parametrické teplotní křivky využít (kvůli okrajovým podmínkám).

Požární zkoušky obsažené v databázi:

- BRE2 [13]
- BRE3 [13]
- BRE4 [13]
- Dalmarnock [18]
- HOT1 [19] (nelze aplikovat německou křivku – malé ventilační otvory)
- HOT2 [19] (nelze aplikovat ani jednu z uvedených parametrických křivek – malé ventilační otvory pro německou křivku, malé požární zatížení pro dánskou křivku a křivku uvedenou v Příloze A)
- HOT3 [19] (nelze aplikovat ani jednu z uvedených parametrických křivek – malé ventilační otvory pro německou křivku a křivku uvedenou v Příloze A, malé požární zatížení pro dánskou křivku a křivku uvedenou v Příloze A)
- LAT1 [20] (nelze aplikovat dánskou křivku – malé požární zatížení)
- LAT2 [20] (nelze aplikovat dánskou křivku – malé požární zatížení)
- LAT3 [20] (nelze aplikovat dánskou křivku – malé požární zatížení)
- LAT4 [20]
- LAT5 [20] (nelze aplikovat ani jednu z uvedených parametrických křivek – malé ventilační otvory pro německou křivku, malé požární zatížení pro dánskou křivku a křivku uvedenou v Příloze A)
- LEHB [15]
- LEHW [15]
- METZ1 [16]
- METZ2 [16]
- METZ3 [16]
- MFPA [21] (nelze aplikovat německou křivku – malé ventilační otvory)
- SFB [22] (nelze aplikovat německou křivku – malé ventilační otvory)
- VTT1 [17]
- ZEH [23] (nelze aplikovat německou křivku – malé ventilační otvory)

4.3 Shrnutí analýzy

V tab. 4 jsou uvedena všechna vstupní data nutná pro výpočet parametrických teplotních křivek.

tab. 4 Shrnutí požárních zkoušek a možnost aplikace na křivky

| Požární zkouška (zkratka) | Rozměry PÚ [m] | | | Otvor [m] | | Hustota požárního zatížení $q_{t,d}$ [MJ/m ²] | Součinitel ohraničujících konstrukcí b [J/(m ² s ^{1/2} K)] | Lze použít? | | |
|------------------------------|----------------|-------|-------|-----------|-------|---|---|-------------------------|------------------|-------------------|
| | délka | šířka | výška | šířka | výška | | | Křivka dle Přílohy A | Dánská křivka | Německá křivka |
| BRE1 | 12,00 | 12,00 | 4,00 | 7,20 | 3,40 | 145,2 | 1351,2 | ano | ano | ano |
| BRE2 | 12,00 | 12,00 | 4,00 | 7,20 | 3,40 | 145,2 | 907,7 | ano | ano | ano |
| BRE3 | 12,00 | 12,00 | 4,00 | 7,20 | 3,40 | 135,9 | 907,7 | ano | ano | ano |
| BRE4 | 12,00 | 12,00 | 4,00 | 14,40 | 1,70 | 145,2 | 907,7 | ano | ano | ano |
| CAR6 | 18,00 | 7,50 | 4,00 | 18,0 | 2,00 | 159,4 | 817,2 | ano | ano | ano |
| Dalma. | 4,75 | 3,50 | 2,45 | 2,35 | 1,18 | 87,4 | 1060,7 | ano | ano | ano |
| HOT1 | 14,40 | 7,20 | 3,50 | 2,13 | 2,97 | 67,1 | 251,0 | ano | ano | ne ¹² |
| HOT2 | 20,40 | 7,20 | 3,60 | 2,60 | 3,00 | 45,0 | 251,0 | ne ¹³ | ne ¹³ | ne ¹² |
| HOT3 | 7,40 | 7,40 | 3,60 | 3,00 | 1,24 | 38,0 | 251,0 | ne ¹⁴ | ne ¹⁴ | ne ¹² |
| LAT1 | 8,66 | 5,87 | 3,90 | 7,31 | 2,31 | 43,0 | 889,5 | ne ¹³ | ne ¹³ | ano |
| LAT2 | 8,66 | 5,87 | 3,90 | 2,65 | 2,31 | 29,0 | 867,8 | ne ¹³ | ne ¹³ | ano |
| LAT3 | 8,66 | 5,87 | 3,90 | 3,65 | 2,31 | 43,0 | 867,8 | ne ¹³ | ne ¹³ | ano |
| LAT4 | 8,66 | 5,87 | 3,90 | 3,65 | 2,31 | 57,2 | 867,8 | ano | ano | ano |
| LAT5 | 8,66 | 5,87 | 3,90 | 1,83 | 2,31 | 43,0 | 857,6 | ne ¹³ | ne ¹³ | ne ¹² |
| LEH8 | 5,05 | 3,59 | 2,50 | 2,61 | 1,66 | 248,5 | 1221,2 | ano | ano | ano |
| LEHB | 5,05 | 3,59 | 2,50 | 2,61 | 1,66 | 107,7 | 1221,2 | ano | ano | ano |
| LEHW | 5,05 | 3,59 | 2,50 | 2,61 | 1,66 | 88,3 | 1221,2 | ano | ano | ano |
| METZ1 | 3,68 | 3,38 | 3,13 | 1,18 | 2,18 | 65,4 | 1396,4 | ano | ano | ano |
| METZ2 | 3,68 | 3,38 | 3,13 | 1,18 | 2,18 | 130,7 | 1396,4 | ano | ano | ano |
| METZ3 | 3,68 | 3,38 | 3,13 | 1,95 | 2,18 | 65,4 | 1396,4 | ano | ano | ano |
| METZ4 | 3,68 | 3,38 | 3,13 | 1,18 | 2,18 | 65,2 | 944,4 | ano | ano | ano |
| MFPA | 5,20 | 3,90 | 2,90 | 1,10 | 2,20 | 87,9 | 1158,0 | ano | ano | ne ¹² |
| SFB | 7,40 | 7,20 | 3,60 | 1,20 | 3,00 | 57,3 | 395,3 | ano | ano | ne ¹² |
| VTT1 | 4,00 | 2,20 | 2,60 | 3,00 | 1,20 | 71,4 | 418,3 | ano | ano | ano |
| VTT2 | 4,00 | 2,20 | 2,60 | 3,00 | 1,20 | 151,7 | 418,3 | ano | ano | ano |
| ZEH | 3,60 | 3,60 | 2,60 | 0,70 | 1,80 | 95,6 | 1458,6 | ano | ano | ne ¹² |

Křivku nelze použít:

¹² Velikosti, nebo geometrie ventilačních otvorů není dostatečná

¹³ Hodnota hustoty požárního zatížení je příliš malá

¹⁴ Oba výše uvedené důvody (¹², ¹³)

Porovnání průběhu skutečně naměřených teplot s průběhy parametrických teplotních křivek je provedeno na 25 požárních zkouškách. K těmto zkouškám jsou získána veškerá potřebná vstupní data (velikosti PÚ, velikosti ventilačních otvorů, požární zatížení,...) a zároveň výstupy naměřených teplot plynu v PÚ. Vstupní data byla pro jednotlivé požární zkoušky vložena do vytvořeného výpočetního postupu v tabulkovém procesoru (MS Excel), ze kterého byly získány průběhy parametrických teplotních křivek. Pro snadnější porovnání jsou získané hodnoty vždy zobrazeny do jednoho grafu pro právě jednu požární zkoušku.

Celkem je zpracováno 25 grafů, kde je možné sledovat průběhy křivek z jednotlivých výpočetních modelů a skutečně naměřených teplot plynu. V některých případech není možné některý z výpočetních modelů použít, z důvodu omezení okrajovými podmínkami (omezení velikosti a geometrie ventilačních otvorů, malé požární zatížení). Případy, kdy nelze aplikovat parametrické teplotní křivky jsou uvedeny v tab. 4, kde jsou i vysvětleny důvody.

S ohledem na velikost hustoty požárního zatížení může být křivka podle německé národní přílohy aplikována ve všech uvedených požárních zkouškách. Důvody, proč ji nelze využít se týkají pouze velikosti ventilačních otvorů, které jsou příliš malé (< 12,5% podíl podlahové plochy). V případě křivky v současné Příloze A a křivky podle dánské národní přílohy je to jak omezení vyplývající z velikosti a geometrie ventilačních otvorů, tak příliš malá hustota požárního zatížení.

Z provedeného porovnání vyplývá, že křivka podle německé národní přílohy ve většině případů velice přesně popisuje průběh požáru, ale až po uplynutí přibližně 15 min. Do této doby požáru nemá stoupající fáze německé křivky tak intenzivní růst, jako je tomu při skutečně naměřených teplotách. Maximální teplota v PÚ je převážně přesně vystižena a to jak svoji hodnotou, tak časem, kdy je dosažena. Stejně tak se fáze poklesu ve většině případů velice podobá skutečnému průběhu.

V případě křivky podle současné Přílohy A, respektive křivky podle dánské národní přílohy je popisován lépe průběh mezi začátkem požáru a cca 15 min. V této počáteční fázi vykazují křivky strmější nárůst oproti německé křivce a ve většině případů se tak více podobají skutečnému průběhu teplot. Obě tyto křivky ale vykazují nereálné zvýšení, případně snížení teploty v PÚ v průběhu požáru.

V mnoha případech aplikace křivky dle současné Přílohy A dochází k tomu, že požár podle křivky skončí (teplota se dostane na teplotu okolí 20 °C) ještě dříve, než je ve skutečně naměřených hodnotách dosaženo maximální teploty. Obdobně je tomu i u dánské křivky, která začíná mnohdy klesat ještě dříve, avšak pozvolněji.

V případě, že by byla křivka dle současné Přílohy A, nebo dánská křivka použita například na ověření požadované požární odolnosti R15, je vše v pořádku – na straně bezpečnosti. Při ověření požadované PO R30 a delší jsou hodnoty teploty plynu již převážně nepoužitelné (zejména pro křivku dle současné Přílohy A). U německé křivky je tomu ve většině případů naopak. Předběžně tak lze konstatovat, že při aplikování této křivky na ověření požadované požární odolnosti bude návrh na straně bezpečnosti.

5 Ohlasy členských zemí CENU

Výsledky porovnání byly prezentovány členským zemím CENU. Tyto země původně požadovaly srovnávací analýzu.

Motivace studie byla založena na třech výše zmíněných hlavních postřezích:

- Parametrický model obsažený v současné příloze A může vést k nebezpečným výsledkům.
- V modelu není obsažena fáze před vznikem flashover efektu.
- Fáze ochlazování je mnohem rychlejší, než je tomu u experimentů, nebo u pokročilejších výpočtů.

Kromě prezentace na evropské úrovni je snaha o představení alternativních křivek odborníkům v České Republice. S tím souvisí i prezentování dosavadních výsledků dosažených provedenou analýzou.

5.1 Námitky proti „novým“ parametrickým modelům

Jochen Zehfuss (TU Braunschweig, Německo) zmínil, že německá metoda vede k lepším předpovědím a je bezpečnější než ostatní dvě metody. Parametrická teplotní křivka reprezentuje přirozený požár, což znamená, že základem této metody je křivka HRR. Při přístupu založeném na výkonnosti se křivka HRR vztahuje jak na část rostoucí, tak i na sestupnou část křivky. Dle německého profesora z toho vyplývá, že fázi před vznikem flashover efektu nelze v příloze A zanedbat.

Lene Ulriksen (COWI, Dánsko) zdůraznila, že dánská metoda je založena na fyzických koncepcích a je velmi jednoduchá při užívání, jelikož je prezentována pouze jednou rovnicí. François Hanus (ArcelorMittal Global R&D) a Raul Zaharia (PU Timisoara, Rumunsko) tvrdí, že současný parametrický model je ovšem rovněž jednoduchý, protože se skládá pouze ze dvou rovnic pro fázi ohřevu/ochlazení.

Britský podvýbor se domnívá, že německá metoda představuje složitější model, než je nutné. Luke Bisby (University of Edinburgh, Velká Británie) trvá na skutečnosti, že fáze před celkovým vzplanutím nemá vliv na požární odolnost a proto by neměla být obsažena v příloze A. Zahrnutí fáze před celkovým vzplanutím by mohlo vést k nejasnostem mezi projektanty a to zejména v zemích, kde používají přesnější metody.

Jean-François Cadorin (Bureau Delta, Belgie) tvrdí, že mnoho projektantů nerozumí tomu, jak používat pokročilé modely požáru. Eurokód uvádí, že model přirozeného požáru by se měl používat po celou dobu jeho trvání, avšak častou chybou je, že se požár zastaví při požadované době požární odolnosti. Dále se snaží ukázat, že pro metodu obsaženou v příloze A byla provedena velmi silná validační analýza. Základem byl postup vycházející z výsledků společnosti Pettersson.

Tato metoda byla vylepšena, aby získala aktuální podobu EC. Více než 60 požárních zkoušek bylo porovnáno s výsledky softwaru Ozone, a postupem v příloze A.

Cadorin také ukazuje, že některé z testů, které byly použity pro validaci německé křivky, prokázaly velké rozdíly v naměřených teplotách plynu v různých částech zkoumaného úseku. Z tohoto důvodu proto nejsou zkoušky vhodné pro předpoklad rovnoměrně rozložené teploty v požárním úseku, která je uvažována při parametrickém požáru. [24]

5.2 Postoj ke křivkám v České Republice

Stejně jako se liší názory v Evropě, liší se i názory v České Republice. V současné době se požární projektanti o budoucnost přílohy Eurokódu 1, respektive budoucí normy ČSN EN 1991-1-2, téměř nezajímají a tak není možné zmiňovat nějaké všeobecně známé názory. Důvodem nezájmu může být hlavně to, že požární specialisté nechtějí měnit naučené postupy, nemají čas na prostudování přínosů a nevýhod jednotlivých modelů a nemají tedy ani svůj vlastní postoj k řešené problematice.

I přes většinový nezájem odborné veřejnosti je dále uveden názor kpt. Ing. Tomáše Pavlíka, který působí na oddělení Stavebně technické prevence na Generálním ředitelství HZS ČR.

Prvním problémem, na který kapitán Pavlík naráží, je snaha zemí, které mají ve své národní příloze současné normy EN 1991-1-2 vlastní křivky, o úplné nahrazení současné Přílohy A. Křivky můžeme teoreticky rozdělit do dvou skupin. V jedné skupině bude křivka ze současné Přílohy A a dánská křivka, ve druhé pak bude křivka dle německé národní přílohy. První skupina se dá s ohledem na postup výpočtu označit za jednodušší. Projektanti jsou na současnou přílohu zvyklí a dánská křivka se od ní tolik neliší. Na druhé straně leží křivka německá. Postup výpočtu je u ní naprosto rozdílný a pro toho, kdo ho vidí poprvé, není moc přehledný a vyžaduje trpělivost při prvotním výpočtu.

Důležitým faktorem je možný rozsah použití křivek. Dánská křivka vychází z křivky v současné příloze A a modely mají tedy stejné podmínky pro omezení použití. U německé národní přílohy jsou podmínky odlišné. To lze prezentovat i v tab. 4, kde je vidět, že v určitých případech, kdy nelze použít německou křivku můžeme využít například postup podle dánské křivky a naopak. Otázkou tedy je, zda je snaha o nahrazení jedné křivky jiným modelem správná. V současné době se nedá říct, že je některá z křivek lepší, nebo třeba přesnější. Podle kapitána Pavlíka by bylo do budoucna vhodné zabývat se tím, zda by křivky nemohly existovat v Eurokódu současně „vedle sebe“. Tím by se i rozšířilo procento případů, kdy lze parametrický model použít.

Dalším problémem jsou připomínky k validaci německého modelu. Dle některých nejsou určité požární zkoušky vhodně použity, případně je namítáno, že se některé porovnané experimenty velice podobají, což zpochybňuje rozsah škály provedeného porovnání. S tím souvisí i napadání celkového počtu a rozsahu požárních zkoušek, o kterém mnozí tvrdí, že je nedostatečný.

Pokud tomu tedy tak je, bylo by třeba určit a odůvodnit počet a rozsah zkoušek, které je potřeba s nově navrhovanými modely porovnat (validovat).

Poslední problém je zmíněn z pozice autora této práce. Určité parametry (konkrétně výpočet součinitele ohraničujících konstrukcí b a skutečná velikost hustoty požárního zatížení) u německé křivky nejsou v této práci převzaty z německé národní přílohy, ale vychází ze současné normy EN (uvedeno v kap. 3.2.1 a kap. 4.2). Bylo by potřeba detailně ověřit, zda je vhodné tyto parametry nahradit a případně zjistit, jaký mají vliv na tvar a průběh vypočtené konečné křivky.

Součinitel ohraničujících konstrukcí b je sice určený v této práci podrobněji, otázkou ale je, zda je tato podrobnost při použití u německé křivky žádoucí. Nelze vyloučit, že určité zjednodušení vstupních hodnot může naopak v tomto případě vést k nepřesnějším výsledkům.

V případě hustoty požárního zatížení se jedná o úpravu výpočtu skutečné hodnoty. V německé národní příloze je tato hodnota vypočtena pomocí složitých pravděpodobnostních rovnic, které jsou uvedeny v jiné příloze (příloha BB DIN EN 1991-1-2). Tato příloha nahrazuje současnou Přílohu E obsaženou v Eurokódu ČSN EN 1991-1-2, která ovšem v současné době nemá být změněna.

5.3 Další postup

Vzhledem k tomu, že nebylo dosaženo úplné shody, padl návrh členských zemí CENU, aby zůstala současná Příloha A i nadále informativní. I přes tento závěr na změnu Eurokódu pro rok 2021 je vhodné myslet i na další změny a zabývat se touto problematikou i nadále. Důležitá a možná zásadní by mohla být analýza chování konstrukce při aplikaci parametrických modelů a rozšíření celé databáze s porovnáním požárních zkoušek. Tím se tato práce zabývá dále.

6 Rozšíření databáze - požární zkoušky z ČR

Porovnání parametrických modelů s uskutečněnými požárními zkouškami je dále provedeno na experimentech, které byly organizovány pracovníky Fakulty stavební, ČVUT v Praze, a které byly provedeny na území České Republiky.

Přestože členské země CENU mají vůči parametrickým modelům určité námitky, pro další analýzu jsou postupy uvažovány beze změny. Výpočet průběhu parametrických křivek tedy probíhá dle postupů uvedených v kapitolách výše (kap. 2, kap. 3.1, kap. 3.2).

6.1 Požární zkouška v Mokrsku

Požární zkouška byla provedena 18. září 2008 v menší vesnici Mokrsko ve středních Čechách (okres Příbram), která se nachází přibližně 50 km jižně od Prahy. Experimentální objekt představoval jedno patro administrativní budovy o půdorysných rozměrech 12,0 m x 18,0 m a výšce objektu 4,0 m.

Hlavním cílem požární zkoušky v Mokrsku bylo studium celkového chování konstrukce, které nemusí být pozorováno při samostatných zkouškách jednotlivých prvků. Bylo zkoušeno šest stěnových konstrukcí s minerální vlnou a tři typy stropních systémů. Na obr. 19 je vidět zkušební objekt v době provádění analyzované zkoušky [25].



obr. 19 Požární zkouška v Mokrsku

6.1.1 Požární úsek

Stropní konstrukce požárního úseku je rozdělena do několika částí. První úsek je tvořen kompozitní deskou, která se skládá z jednoduchých trapézových plechů CF60 (tloušťka 0,75 mm, ocel S350) a železobetonové desky s výškou žebra 60 mm. Tloušťka celé stropní konstrukce byla 120 mm. Trapézový plech byl podporován prolamovanými nosníky Angelina (sinusoidní otvory). Nosníky byly vytvořeny z profilu IPE 270 (ocel S235) s výškou 395 mm.

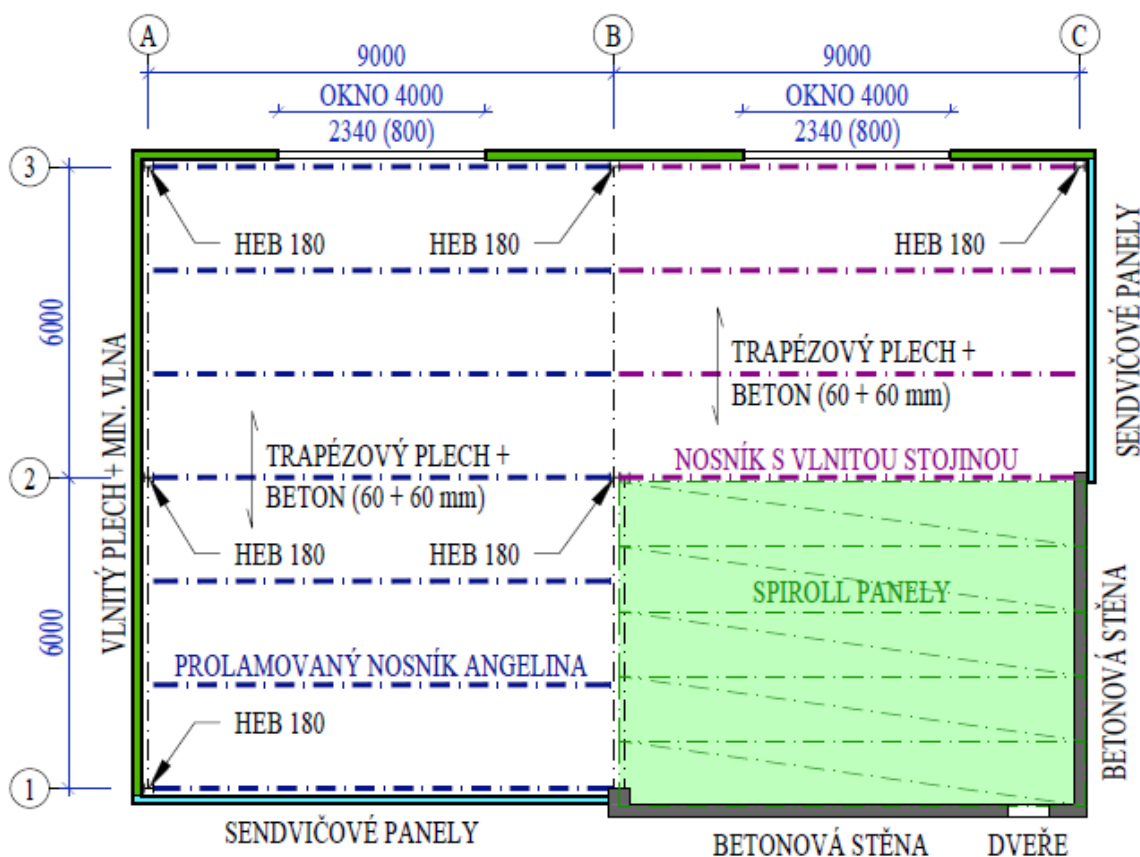
Další část stropu je podporována pomocí nosníku s vlnitou stojinou (WTB 500). Tloušťka pásnice byla navržena 2,0 mm, rozměry příruby 220 mm x 15 mm (ocel S320).

Poslední část stropu byla tvořena prefabrikovanými panely Spiroll s dutým jádrem o výšce 320 mm. Panely byly podepřeny betonovou stěnou a primárním prolamovaným nosníkem vytvořeným z částí profilu IPE 400.

Okrajové nosníky byly z profilů IPE 400 (ocel S235). Vodorovné prvky byly podporovány pomocí ocelových sloupů profilu HEB 180. Dvě výplňové obvodové stěny byly tvořeny vlnitými plechy s minerální vlnou. Dvě další stěny byly vyrobeny ze sendvičových panelů o tloušťce 150 mm, naplněné taktéž minerální vlnou. Horizontální tuhost objektu byla zajištěna pomocí betonových stěn o tloušťce 250 mm a dvěma ztužujícími prvky profilu L 80 mm x 80 mm x 8 mm.

Přípoje nosníku a sloupu byly navrženy jako přípoje čelních desek o tloušťce 10 mm se čtyřmi šrouby M20 třídy 8.8. Zlepšení požární odolnosti bylo dosaženo umístěním dvou horních šroubů do betonové desky. Protipožární ochrana sloupů, primárních a okrajových nosníků i ztužidel byla navržena pro odolnost R60 pomocí ochrany desky Promatect-H 2 x 15 mm.

V přední stěně byly dva okenní otvory (bez výplně) o rozměrech 2,34 m x 4,00 m a výškou parapetu 0,8 m. Dveře o šířce 800 mm s protipožární ochranou byly umístěny v zadní části požárního úseku. Tyto dveře se nacházejí ve stěně požárního úseku a během celého požárního testu byly dveře uzavřeny. Půdorysné schéma požární zkoušky je vidět na obr. 20.

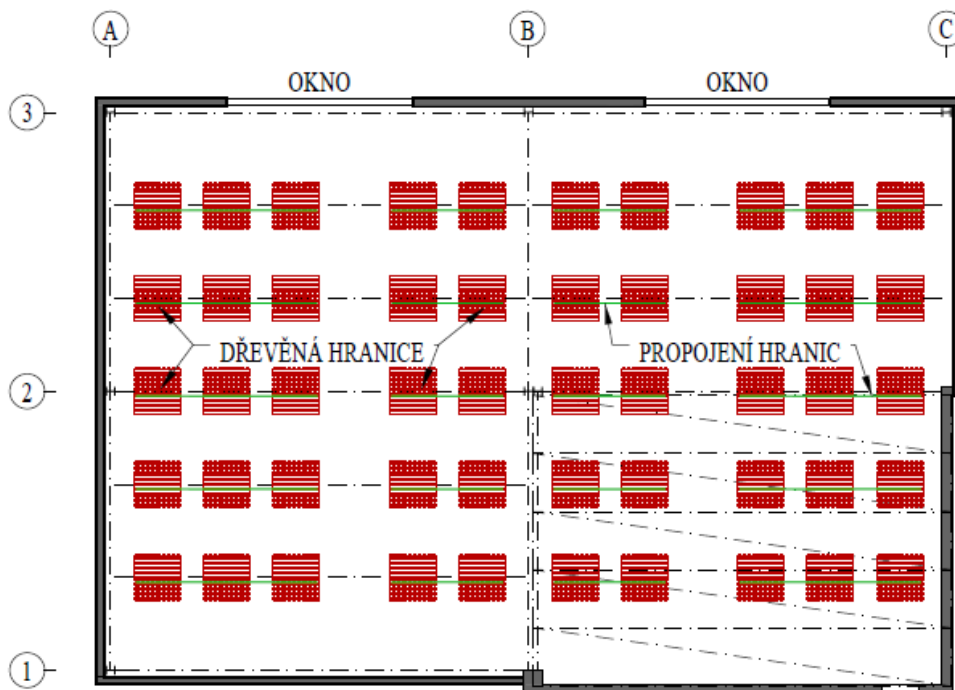


obr. 20 Schematický půdorys analyzovaného úseku

6.1.2 Požární zatížení

Požární zatížení bylo vytvořeno pomocí dřevěných latí (s využitím měkkého dřeva) o rozměrech 50 mm × 50 mm (délky 1 m). Celkový objem dřevěné hmoty použité v požárním prostoru byl 15,0 m³.

Na půdorysné ploše bylo umístěno celkem 50 dřevěných hranic. Každá hranice se skládala z 12-ti vrstev o 10-ti latích, což znamená 35,5 kg/m² dřeva, respektive 620 MJ/m² požárního zatížení. Aby bylo zajištěno současné zapálení, byly hranice ve třetí vrstvě propojeny kanálky s minerální vatou napuštěnou petrolejem. Dřevo bylo vysušeno až na 12 % vlhkosti. Schéma požárního zatížení lze vidět na obr. 21.



obr. 21 Schéma požárního zatížení

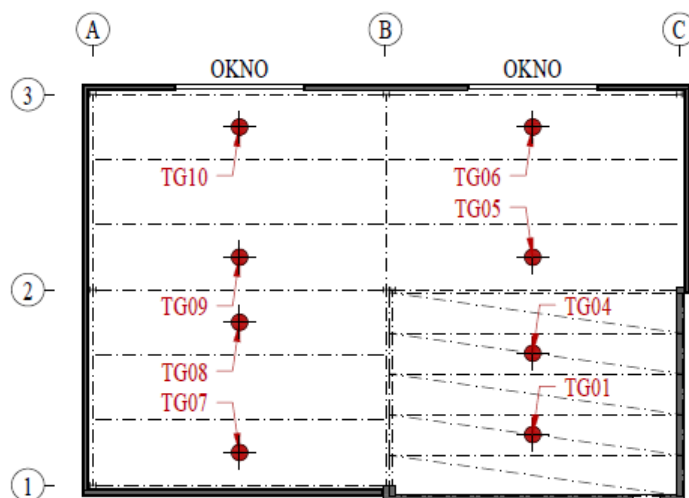
6.1.3 Teplota plynu naměřená během experimentu

Pro další postup byly získány skutečně naměřené hodnoty teploty plynu při požární zkoušce a dále také vypočteny průběhy teploty podle parametrických modelů.

Teplota plynu v požárním úseku byla měřena pomocí celkem 23 plášťových termočlánků o průměru 3 mm. 12 termočlánků bylo umístěno 0,5 m pod úroveň spodních přírub nosníků. Pomocí 5-ti termočlánků mezi okenními otvory a v zadní části pod Spiroll panelem byl měřen teplotní profil podél výšky prostoru. Zbývajících 6 termočlánků bylo umístěno ve dvou okenních otvorech. Obecně byly nejvyšší teploty plynu dosaženy v přední části požárního úseku na začátku požáru a v zadní části požárního úseku během úplného rozvinutí požáru.

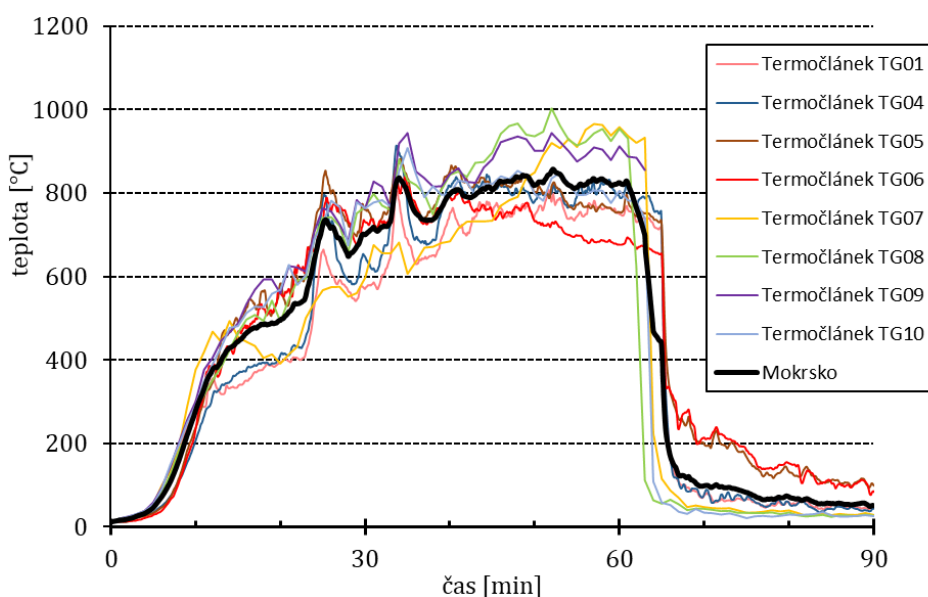
Pro další porovnání byly vybrány hodnoty získané z termočlánků TG01, TG04-TG10, které byly umístěny 0,5 m pod spodní přírubou nosníků (rovnoměrně rozmístěny v PÚ).

Schématická pozice osmi termočlánků měřících teplotu plynu je vidět na obr. 22.



obr. 22 Schéma umístění termočlánků TG07-TG10

Hodnoty teploty plynů z těchto osmi termočlánků byly vloženy do grafu (viz obr. 23). Křivka Mokrsko v grafu označuje průměr vypočtený z hodnot naměřených na termočláncích TG01, TG04-TG10. Tato zprůměrovaná křivka je použita pro následné porovnání.



obr. 23 Průběhy naměřených teplot plynů

6.1.4 Výpočet teploty plynů podle parametrických křivek

Dále je potřeba vypočítat průběhy parametrických teplotních křivek. Aby bylo možné průběhy modelů vypočítat, je potřeba určit vstupní data, která požární zkoušku detailně popisují.

Vstupní data použitá pro výpočet:

- Půdorysné rozměry PÚ: 18,0 m x 12,0 m ($A_f = 216,00 \text{ m}^2$)
- Světlná výška PÚ: 4,00 m ($A_t = 672,00 \text{ m}^2$)

- Ventilační otvory (okna): $2 \times 4,00 \text{ m} \times 2,34 \text{ m}$ ($A_v = 18,72 \text{ m}^2$; $h_{eq} = 2,34 \text{ m}$)
- Požární zatížení: $q_{f,d} = 620,0 \text{ MJ/m}^2$ (na podlahovou plochu)
 $q_{t,d} = 199,3 \text{ MJ/m}^2$ (na plochu ohraničujících konstrukcí)
- Provoz – kanceláře: rychlost rozvoje požáru – střední
 $t_\alpha = 300 \text{ s}$; $RHR_f = 250 \text{ kW/m}^2$

Vlastnosti ohraničujících konstrukcí jsou uvedeny v tab. 5.

tab. 5 Vlastnosti ohraničujících konstrukcí

| Konstrukce | Materiál | A_i [m^2] | s [mm] | λ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] | c [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] | ρ [kg/m^3] |
|-------------------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|---|--|--------------------------------------|
| StěnaA (výplň - minerální vlna) | Plášť – ocel (pozink) | 180,0 | 0,88 | 58,0 | 440 | 7850 |
| | Výplň - minerální vlna | | 150,0 | 0,035 | 840 | 112 |
| StěnaB (betonové) | Železobeton | 60,0 | 250,0 | 1,740 | 1020 | 2500 |
| Podlaha | Štěrka | 216,0 | – | 0,650 | 750 | 1650 |
| StropA (trapézový plech + beton) | Beton (vyztužený) | 162,0 | 60,0 | 1,580 | 1020 | 2400 |
| | Trapézový plech - ocel | | 0,77 | 58,0 | 440 | 7850 |
| StropB (Spiroll) | Železobeton | 54,0 | 320,0 | 1,740 | 1020 | 2500 |

Vzhledem k tomu, že jsou části ohraničujících konstrukcí tvořeny vícevrstevnými konstrukcemi s rozdílným koeficientem b (stěny a strop), je potřeba (doporučeno) konečný koeficient pro křivku v současné příloze A a pro dánskou křivku odvodit výpočtem (viz rovnice v kap. 2.1 a kap. 3.1.1).

Pro výpočet koeficientu $b_{stěnyA}$ (stěna s výplní minerální vlnou) je uvažován plech tloušťky 0,88 mm ($s_{1,stěnyA}$) + minerální vlna tloušťky 150 mm ($s_{2,stěnyA}$); směrem nejbližší k požáru ven.

$$b_{1,stěnyA}(\text{ocel}) = \sqrt{58,0 \cdot 440 \cdot 7850} = 14\,153 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})$$

$$b_{2,stěnyA}(\text{minerální vlna}) = \sqrt{0,035 \cdot 840 \cdot 112} = 57,4 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})$$

$$b_{1,stěnyA} \gg b_{2,stěnyA} \quad (14\,153 \gg 57,4) \quad [\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})]$$

a) Parametrická křivka v současné příloze A

$$s_{lim,stěnyA} = \sqrt{\frac{3600 \cdot 0,94 \cdot 58,0}{440 \cdot 7850}} = 0,238 \text{ m}$$

$$s_{1,stěnyA} \ll s_{lim,stěnyA} \quad (0,00088 \ll 0,238) \quad [\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})]$$

$$\rightarrow b_{stěnyA} = \frac{0,00088}{0,238} \cdot 14\,153 + \left(1 - \frac{0,00088}{0,238}\right) \cdot 57,4 = 109,5 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}}$$

b) Parametrická křivka v dánské národní příloze

$$s_{lim,stěnyA} = \sqrt{\frac{60 \cdot 36,5 \cdot 58,0}{440 \cdot 7850}} = 0,192 \text{ m}$$

$$s_{1,stěnyA} \ll s_{lim,stěnyA} (0,00088 \ll 0,192) [J/(m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K)]$$

$$\rightarrow b_{stěnyA} = \frac{0,00088}{0,192} \cdot 14\,153 + \left(1 - \frac{0,00088}{0,192}\right) \cdot 57,4 = 122,0 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}$$

Pro výpočet koeficientu b_{stropA} (strop s trapézovým plechem) je uvažován trapézový plech tloušťky 0,77 mm ($s_{1,stropA}$) + vyztužený beton 60 mm ($s_{2,stropA}$); směrem nejbližší k požáru nahoru.

$$b_{1,stropA} (ocel) = \sqrt{58,0 \cdot 440 \cdot 7850} = 14\,153$$

$$b_{2,stropA} (minerální vlna) = \sqrt{1,580 \cdot 1020 \cdot 2400} = 1\,967$$

$$b_{1,stropA} > b_{2,stropA} (14\,153 > 1\,967) [J/(m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K)]$$

a) Parametrická křivka v současné příloze A

$$s_{lim,stropA} = \sqrt{\frac{3600 \cdot 0,94 \cdot 58,0}{440 \cdot 7850}} = 0,238 \text{ m}$$

$$s_{1,stropA} \ll s_{lim,stropA} (0,00077 \ll 0,238) [J/(m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K)]$$

$$\rightarrow b_{stropA} = \frac{0,00077}{0,238} \cdot 14\,153 + \left(1 - \frac{0,00077}{0,238}\right) \cdot 1\,967 = 2\,006,4 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}$$

b) Parametrická křivka v dánské národní příloze

$$s_{lim,stropA} = \sqrt{\frac{60 \cdot 36,5 \cdot 58,0}{440 \cdot 7850}} = 0,192 \text{ m}$$

$$s_{1,stropA} \ll s_{lim,stropA} (0,00077 \ll 0,192) [J/(m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K)]$$

$$\rightarrow b_{stropA} = \frac{0,00077}{0,192} \cdot 14\,153 + \left(1 - \frac{0,00077}{0,192}\right) \cdot 1\,967 = 2\,015,9 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}$$

Pro německou křivku je ve výpočtu uvažován koeficient ohraničujících konstrukcí b vypočtený podle rovnic v současné příloze A. Vzhledem k tomu, že jsou stěny a strop tvořeny různou konstrukcí, je zapotřebí vypočítat vážený průměr dílčích součinitelů b , vztažený k velikosti ploch jednotlivých částí (viz rovnice níže). Přehled použitých koeficientů b je uveden v tab. 6.

$$b_{stěny} = \frac{b_{stěnyA} \cdot A_{stěnyA} + b_{stěnyB} \cdot A_{stěnyB}}{A_{stěnyA} + A_{stěnyB}}$$

$$b_{strop} = \frac{b_{stropA} \cdot A_{stropA} + b_{stropB} \cdot A_{stropB}}{A_{stropA} + A_{stropB}}$$

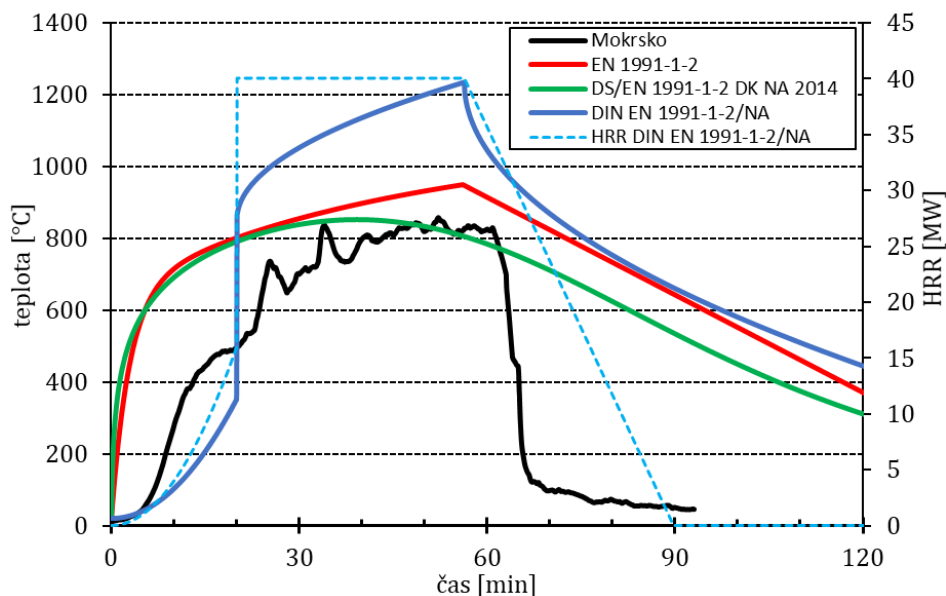
tab. 6 Koeficienty ohraničujících konstrukcí b pro jednotlivé křivky

| Křivka | $b_{stěny} [J/(m^2 s^{1/2} K)]$ | $b_{podlaha} [J/(m^2 s^{1/2} K)]$ | $b_{strop} [J/(m^2 s^{1/2} K)]$ |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Současná Příloha A | 608,9 | 896,9 | 2031,6 |
| Dánská křivka | 618,3 | 896,9 | 2038,7 |
| Německá křivka | 608,9 | 896,9 | 2031,6 |

6.1.5 Porovnání teplotních křivek.

Výpočet průběhu křivek teploty plynu byl proveden pomocí zautomatizovaných výpočetních postupů v tabulkovém procesoru MS Excel (zmiňené v kap. 4.2).

Podíl ventilačních otvorů je pouze 8,7 % podlahové plochy A_f . V takovém případě by se **německá křivka neměla používat** (omezení $A_f > 12,5 \%$)! Na obr. 24 jsou i přes toto omezení vidět průběhy teplot plynu dle parametrických modelů včetně německé křivky, v porovnání se skutečně naměřenou teplotou (průměr z termočlánků TG07-TG10).



obr. 24 Porovnání průběhů teploty plynu

Při prvním pohledu na graf (obr. 24) je vidět, že po uplynutí jedné hodiny požární zkoušky začalo docházet k prudkému ochlazení teploty plynu. Tento fakt žádná z parametrických křivek nedokázala predikovat a důležité tedy bude porovnání průběhů teplot v prvních 60-ti minutách.

Ačkoli německá křivka by se v tomto případě neměla vůbec použít (neodpovídá validaci minimální velikosti otvorů), je vidět, že má mezi 20-60-ti min obdobný průběh jako skutečně naměřené hodnoty. Problém je v tom, že teploty jsou dle této křivky o více než 300 °C vyšší a ve svém maximu dosahuje teploty přes 1200 °C, což je pro výpočty za účelem posouzení požární odolnosti konstrukce při požáru krajně nepříznivé..

Parametrická teplotní křivka ze současné Přílohy A předpovídá v tomto případě požár nejpřesněji. Vzestupná fáze končí v přibližně stejném čase a dosahuje obdobných teplot, jako je tomu ve skutečnosti. Pouze fáze poklesu je jako u ostatních křivek o mnoho pozvolnější.

Křivka podle dánské národní přílohy v tomto případě dosahuje své maximální teploty (o 50 °C nižší, než naměřené) již okolo 30 min a začíná tedy klesat příliš brzy. I přes to je rozdíl teplot v 60 min, kdy začalo skutečně docházet k ochlazení, pouze okolo 100 °C.

6.2 Požární zkouška ve Veselí nad Lužnicí

Experimentální objekt byl umístěn v areálu požární zkušebny firmy PAVUS, a.s. ve Veselí nad Lužnicí (okres Tábor). Budovu o půdorysných rozměrech 10,4 m x 13,4 m a výšce objektu 9 m tvořily dvě podlaží. V každém podlaží byl proveden jiný požární experiment. Pro další analýzu je vybrána požární zkouška číslo 2, která proběhla v 1. podlaží objektu. Na obr. 25 je vidět zkušební objekt v době provádění analyzované zkoušky [26].



obr. 25 Požární zkouška číslo 2 ve Veselí nad Lužnicí

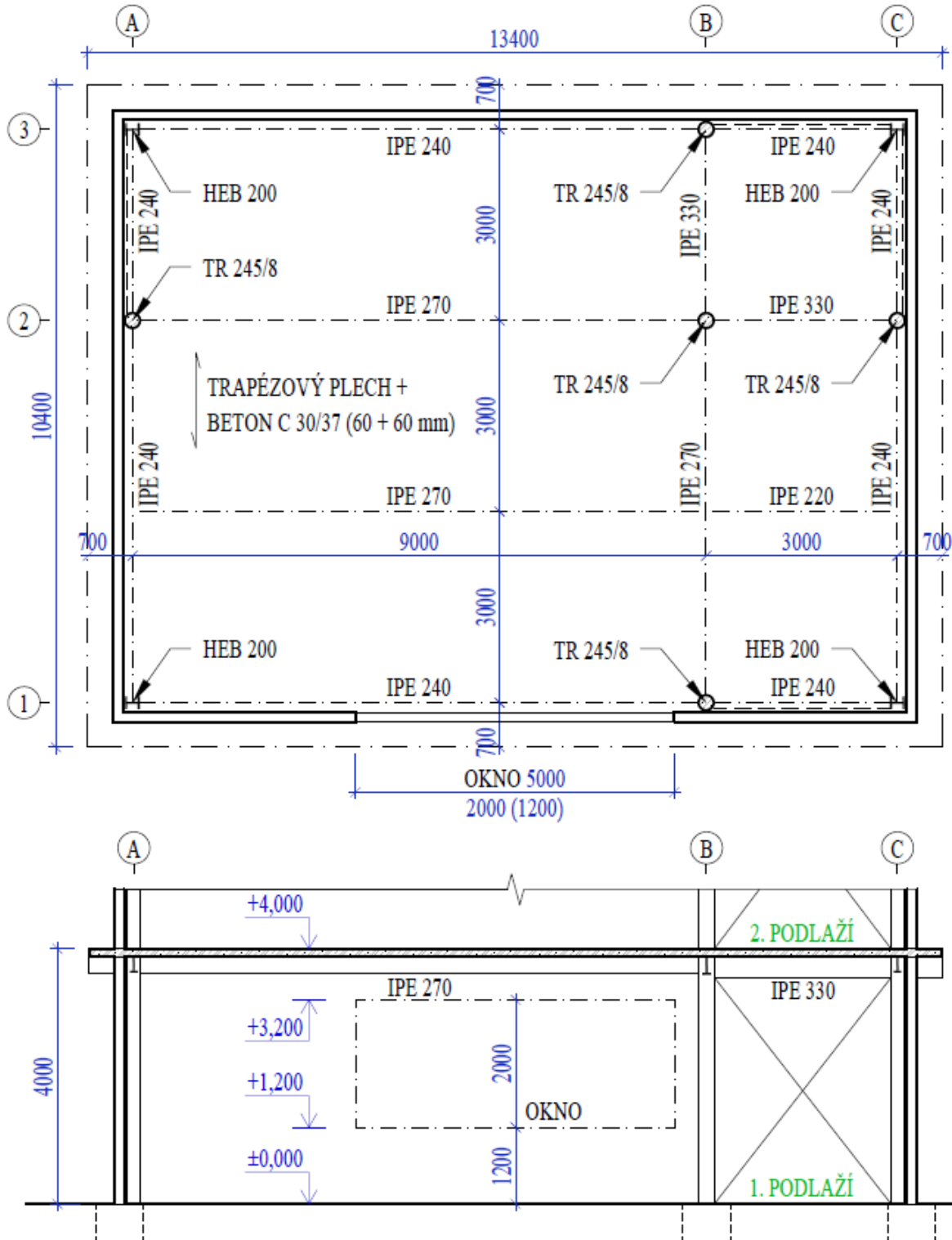
6.2.1 Požární úsek

Stropní konstrukce úseku je tvořena kompozitní deskou, která se skládá z jednoduchých trapézových plechů Cofraplus 60 (tloušťka 0,75 mm, ocel S350) a betonové vyztužené desky tloušťky 60 mm. Středové nosníky jsou tvořeny ocelovými nosíky profilu IPE 270 a IPE 330 a obvodové nosníky tvoří ocelové profily IPE 240 (vše ocel S355). Nosníky jsou spřaženy s betonovou deskou pomocí smykových trnů. Použité nosníky jsou vidět na obr. 26.



obr. 26 Použité ocelové nosníky se spřahovacími trny

Vodorovné prvky jsou podporovány v rozích čtyřmi ocelovými sloupy profilu HEB 200 (ocel S355) a dále pěti kruhovými sloupy TR 245/8 (ocel S355), které jsou vyplněny betonem (C30/37). Ztužení celého objektu je zajištěno pomocí křížem pnutých kruhových trubek TR 60,3/4 v obou směrech (viz obr. 27).



obr. 27 Schematický půdorys a řez analyzovaného úseku

Opláštění okolo 1. podlaží je provedeno za pomoci kazetového systému s tepelnou izolací z minerální vlny a profilu pro omezení tepelných mostů (lze vidět na obr. 28). Povrch pláště je proveden z různých typů plechů, které jsou ke konstrukci připojeny speciálními šrouby.



obr. 28 Zkušební objekt během výstavby

Ocelová konstrukce je částečně chráněna protipožárním nástřikem. Použitá ochrana je směs minerálních vláken a cementového pojiva. V řešeném podlaží jsou chráněny přípoje třímetrových nosníků, ztužidla, obkladové sloupy, rohové sloupy profilu HEB 200 a všechny okrajové nosníky. Tloušťka nástřiku je 60 mm. Na obr. 29 je vidět aplikace nástřiku.

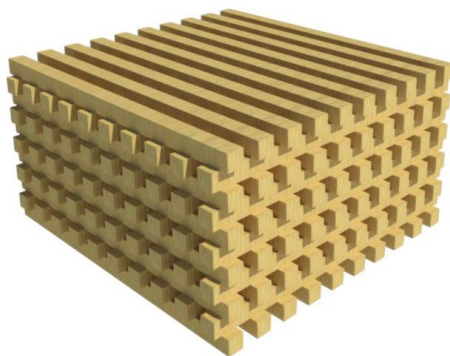


obr. 29 Aplikace protipožárního nástřiku

6.2.2 Požární zatížení

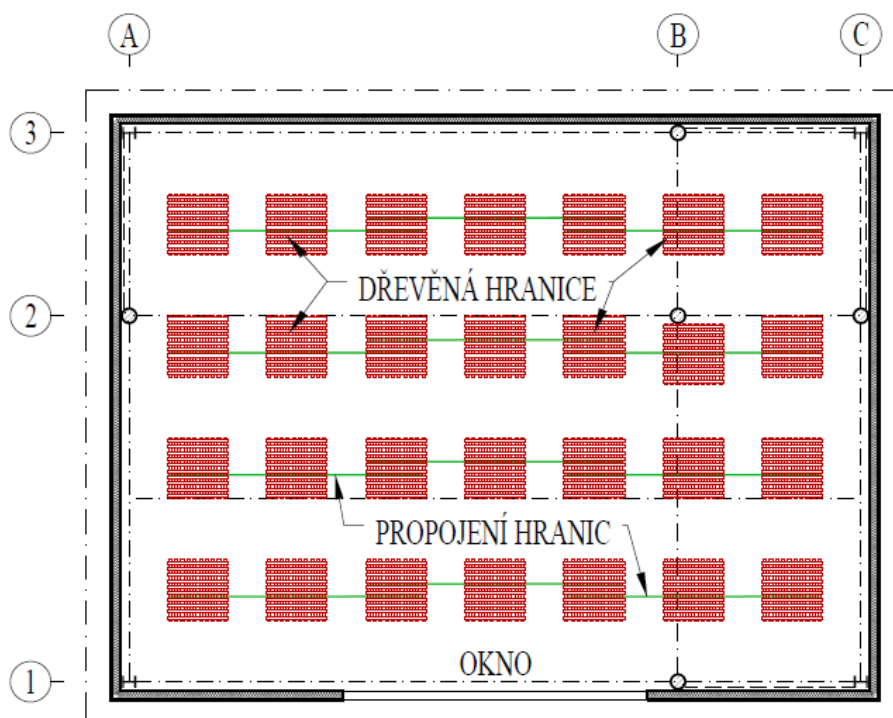
Vývoj požáru odpovídá požárnímu scénáři v typické administrativní budově. Aby byl zajištěn plynulý rozvoj požáru, nebyla v otvoru, o rozměrech 5,0 m x 2,0 m, instalována žádná skleněná výplň.

Požární zatížení je tvořeno hranicemi z dřevěných trámků o velikosti 50 mm x 50 mm (délky 1 m). Dřevo je vysušeno až na 12 % vlhkosti. Každou hranici tvoří 11 vrstev o 10-ti trámčích (pro představu lze vidět na obr. 30).



obr. 30 Hranice tvořící požární zatížení

Celkem je v požárním úseku použito 7,653 m³ dřeva (7 x 4 hranice). Celkové požární zatížení je 30,1 kg/m², respektive 525,0 MJ/m². Kvůli současnému zapálení hranic jsou hranice propojeny ve třetí vrstvě tenkostěnným kanálkem naplněným minerální vlnou s petrolejem (viz schéma na obr. 31).

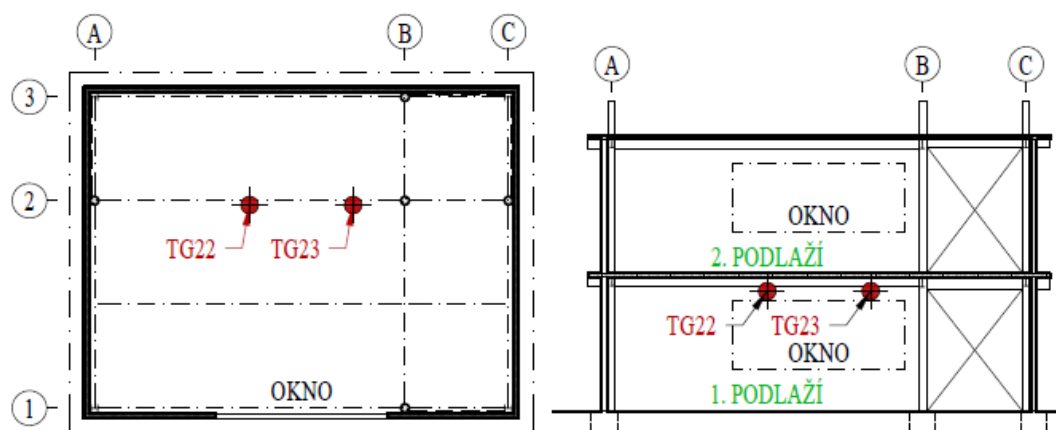


obr. 31 Schéma požárního zatížení

6.2.3 Teplota plynu naměřená během experimentu

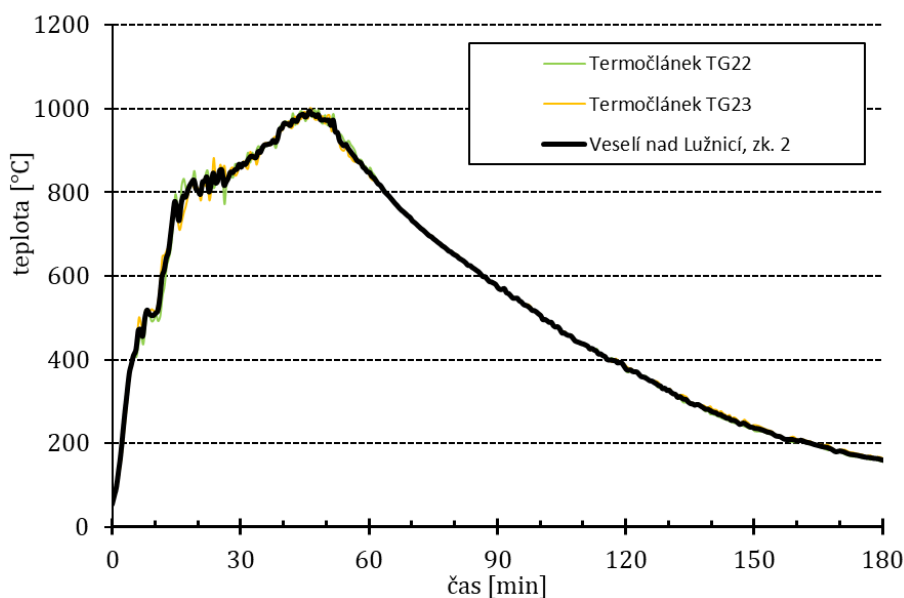
Pro další postup byly získány skutečně naměřené hodnoty teploty plynu při požární zkoušce a dále také vypočteny průběhy teploty podle parametrických modelů.

Teplota plynu v požárním úseku byla měřena pomocí celkem 20 plášťových termočlánků o průměru 3 mm. Na úrovni horní pásnice nosníku bylo umístěno 11 termočlánků a na úrovni dolní pásnice nosníku 2 termočlánky. Zbývajících 7 termočlánků v jihovýchodním rohu měřilo teplotu plynu podél výšky požárního úseku. Během plně rozvinutého požáru byla nejvyšší teplota naměřena na termočláncích TG22 a TG23, jejich umístění je vidět na obr. 32.



obr. 32 Schéma umístění termočlánků TG22 a TG23

Hodnoty naměřených teplot na těchto dvou termočláncích (TG22 a TG 23) byly pro další postup zprůměrovány a vloženy do grafu (viz obr. 33). Křivka Veselí nad Lužnicí, zk. 2 v grafu označuje právě tuto průměrnou teplotu.



obr. 33 Průběhy naměřených teplot plynu

6.2.4 Výpočet teploty plynu podle parametrických křivek

Aby bylo možné vypočítat průběhy parametrických modelů požáru, je potřeba určit vstupní data, která požární zkoušku detailně popisují.

Vstupní data použitá pro výpočet:

- Půdorysné rozměry PÚ: 12,0 m x 9,0 m ($A_f = 108,00 \text{ m}^2$)
- Světlá výška PÚ: 3,88 m ($A_t = 378,96 \text{ m}^2$)
- Ventilační otvor (okno): 5,0 m x 2,0 m ($A_v = 10,00 \text{ m}^2$; $h_{eq} = 2,00 \text{ m}$)
- Požární zatížení: $q_{f,d} = 525,0 \text{ MJ/m}^2$ (na podlahovou plochu)
 $q_{t,d} = 149,6 \text{ MJ/m}^2$ (na plochu ohraničujících konstrukcí)
- Provoz – kanceláře: rychlost rozvoje požáru – střední
 $t_\alpha = 300 \text{ s}$; $RHR_f = 250 \text{ kW/m}^2$

Vlastnosti ohraničujících konstrukcí jsou uvedeny v tab. 7.

tab. 7 Vlastnosti ohraničujících konstrukcí

| Konstrukce | Materiál | s [mm] | λ [W/(m·K)] | c [J/(kg·K)] | ρ [kg/m ³] |
|------------|------------------------|-----------|---------------------|--------------|-----------------------------|
| Stěny | Plášť – ocel (pozink) | 0,88/0,75 | 58,0 | 440 | 7850 |
| | Výplň - minerální vlna | 165,0 | 0,035 | 840 | 112 |
| Podlaha | Štěrka | – | 0,650 | 750 | 1650 |
| Strop | Beton (vyztužený) | 60,0 | 1,580 | 1020 | 2400 |
| | Trapézový plech - ocel | 0,77 | 58,0 | 440 | 7850 |

Vzhledem k tomu, že jsou ohraničující konstrukce (stěny a strop) tvořeny vícevrstevnými konstrukcemi s rozdílným koeficientem b , je potřeba (doporučeno) konečný koeficient pro křivku v současné příloze A a pro dánskou křivku odvodit výpočtem (obdobně jako u zkoušky Mokrsko).

Pro výpočet koeficientu $b_{stěny}$ je uvažován plech tloušťky 0,88 mm ($s_{1,stěny}$) + minerální vlna tloušťky 165 mm ($s_{2,stěny}$); směrem nejbližší k požáru ven.

$$b_{1,stěny} (ocel) = \sqrt{58,0 \cdot 440 \cdot 7850} = 14\,153 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})$$

$$b_{2,stěny} (minerální vlna) = \sqrt{0,035 \cdot 840 \cdot 112} = 57,4 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})$$

$$b_{1,stěny} \gg b_{2,stěny} (14\,153 \gg 57,4) \text{ [J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})]$$

c) Parametrická křivka v současné příloze A

$$s_{lim,stěny} = \sqrt{\frac{3600 \cdot 0,8 \cdot 58,0}{440 \cdot 7850}} = 0,220 \text{ m}$$

$$s_{1,stěny} \ll s_{lim,stěny} (0,00088 \ll 0,220) \text{ [J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})]$$

$$\rightarrow b_{stěny} = \frac{0,00088}{0,220} \cdot 14\,153 + \left(1 - \frac{0,00088}{0,220}\right) \cdot 57,4 = 113,8 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K}}$$

d) Parametrická křivka v dánské národní příloze

$$s_{lim, stěny} = \sqrt{\frac{60 \cdot 31,3 \cdot 58,0}{440 \cdot 7850}} = 0,176 \text{ m}$$

$$s_{1, stěny} \ll s_{lim, stěny} (0,00088 \ll 0,176) \text{ [J/(m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K)]}$$

$$\rightarrow b_{stěny} = \frac{0,00088}{0,176} \cdot 14\,153 + \left(1 - \frac{0,00088}{0,176}\right) \cdot 57,4 = 127,9 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}$$

Pro výpočet koeficientu b_{strop} je uvažován trapézový plech tloušťky 0,77 mm ($s_{1, strop}$) + vyztužený beton 60 mm ($s_{2, strop}$) (směrem nejbližší k požáru nahoru).

$$b_{1, strop} (ocel) = \sqrt{58,0 \cdot 440 \cdot 7850} = 14\,153$$

$$b_{2, strop} (minerální vlna) = \sqrt{1,580 \cdot 1020 \cdot 2400} = 1\,967$$

$$b_{1, strop} > b_{2, strop} (14\,153 > 1\,967) \text{ [J/(m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K)]}$$

c) Parametrická křivka v současné příloze A

$$s_{lim, strop} = \sqrt{\frac{3600 \cdot 0,8 \cdot 58,0}{440 \cdot 7850}} = 0,220 \text{ m}$$

$$s_{1, strop} \ll s_{lim, strop} (0,00077 \ll 0,220) \text{ [J/(m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K)]}$$

$$\rightarrow b_{strop} = \frac{0,00077}{0,220} \cdot 14\,153 + \left(1 - \frac{0,00077}{0,220}\right) \cdot 1\,967 = 2\,009,6 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}$$

d) Parametrická křivka v dánské národní příloze

$$s_{lim, strop} = \sqrt{\frac{60 \cdot 31,3 \cdot 58,0}{440 \cdot 7850}} = 0,176 \text{ m}$$

$$s_{1, strop} \ll s_{lim, strop} (0,00077 \ll 0,176) \text{ [J/(m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K)]}$$

$$\rightarrow b_{strop} = \frac{0,00077}{0,176} \cdot 14\,153 + \left(1 - \frac{0,00077}{0,176}\right) \cdot 1\,967 = 2\,020,3 \frac{J}{m^2 \cdot s^{1/2} \cdot K}$$

Pro německou křivku je ve výpočtu opět uvažován koeficient ohraničujících konstrukcí b vypočtený podle rovnic v současné příloze A. Přehled použitých koeficientů ohraničujících konstrukcí b je uveden v tab. 8.

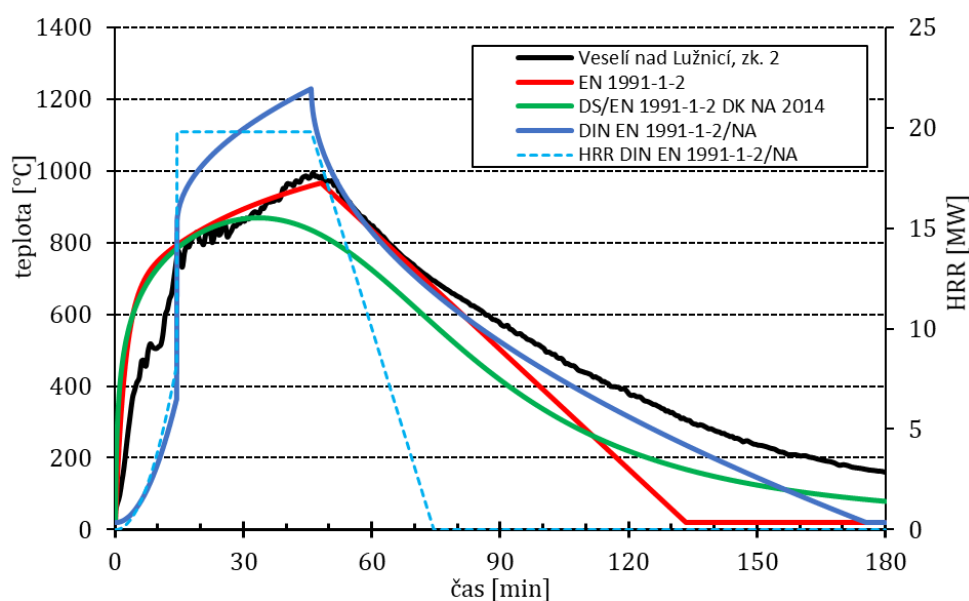
tab. 8 Koeficienty ohraničujících konstrukcí b pro jednotlivé křivky

| Křivka | $b_{stěny}$ [J/(m ² s ^{1/2} K)] | $b_{podlaha}$ [J/(m ² s ^{1/2} K)] | b_{strop} [J/(m ² s ^{1/2} K)] |
|--------------------|---|---|---|
| Současná Příloha A | 113,8 | 896,9 | 2009,6 |
| Dánská křivka | 127,9 | 896,9 | 2020,3 |
| Německá křivka | 113,8 | 896,9 | 2009,6 |

6.2.5 Porovnání teplotních křivek

Použití parametrické teplotní křivky podle německé národní přílohy je omezeno z hlediska velikosti ventilačních otvorů. Podíl ventilačních otvorů musí být minimálně 12,5 % z podlahové plochy A_f , jinak by se **německá křivka neměla používat** (model nebyl validován na menší procentní podíl otvorů). V případě požární zkoušky ve Veselí nad Lužnicí je tento poměr pouze 9,3 %. Další porovnání je i přes toto omezení provedeno včetně německé parametrické křivky.

Na obr. 34 jsou vidět průběhy teplot plynu dle parametrických modelů, v porovnání se skutečně naměřenou teplotou (průměr z termočlánků TG22 a TG23), i včetně německé křivky.



obr. 34 Porovnání průběhů teploty plynu

Graf na obr. 34 ukazuje, že křivka podle německé národní přílohy sice téměř přesně vystihuje dobu, kdy došlo k maximální teplotě, ovšem o více než 200 °C vyšší (pro konstrukci kritická, převyšuje 1200 °C). Dále se však zdá, že při poklesu teploty prezentuje německá křivka požár nejlépe. Je nutno znovu podotknout, že aplikace německé křivky neodpovídá validaci minimální velikosti otvorů, ačkoli v tomto případě by pravděpodobně bylo její využití na straně bezpečné.

V případě parametrické teplotní křivky dle současné Přílohy A je vidět, že lépe kopíruje fázi rozhořívání požáru. Hodnota maximální teploty je v tomto případě přibližně stejná a dokonce dosažena i v podobném čase jako při experimentu. Požár v tomto případě končí v době, kdy je skutečně naměřená teplota už pod 300 °C a celá konstrukce již není teplotou tolik ohrožena.

Dánská teplotní křivka kopíruje průběh skutečného požáru také velice přesně a predikuje, že další využití křivky může vykazovat velice přesné hodnoty, podobně jako u ostatních dvou křivek.

6.3 Další požární zkoušky

Další porovnání teplot plynu se zkouškami již nejsou obsahem této práce.

7 Aplikace modelů na chování konstrukce

Porovnání parametrických modelů proběhlo zatím pouze na průběhu získaných teplot plynu při požáru ve zkoumaném úseku. Aby bylo možné provést detailnější analýzu, je potřeba získat další naměřená data z průběhů požárních zkoušek. Bohužel u většiny zkoušek nejsou k dispozici žádná data měření teploty ocelových a betonových prvků. Tato práce se dále zabývá aplikací parametrických modelů na požární zkoušku ve Veselí nad Lužnicí z roku 2011, ke které se potřebná data podařilo získat.

7.1 Software Vulcan Solutions

Vzhledem k tomu, že je důležité ověřit vliv teplotní křivky na chování konstrukce, byl proveden detailnější rozbor požární zkoušky ve Veselí nad Lužnicí. Mechanické chování konstrukce při požární zkoušce bylo analyzováno v programu Vulcan Solutions. Porovnání je v tomto softwaru provedeno za pomoci sledování průhybů na konstrukci během požáru.

Počítačový program Vulcan Solutions je 3D program, který byl vyvinut na univerzitě v Sheffieldu za účelem modelování chování konstrukce v podmínkách při požáru.

V tomto programu jsou ocelové konstrukce a kompozitní budovy modelovány jako sestavy konečného počtu nosníků a sloupů, přípojů a vrstvených deskových prvků (podlahy/stropy). U kompozitních deskových systémů se předpokládá, že jsou uzly těchto různých typů prvků definovány ve společné a pevné referenční rovině. U této roviny se uvažuje, že se shoduje se středním povrchem betonového deskového prvku. Nosníky a sloupy jsou reprezentovány uzly ve třech směrech, mající dva gaussovy integrační body podél jejich délky.

Matrice nelineárních sloupových a nosníkových prvků jsou odvozeny z obecných rovnic kontinua mechaniky pro nelineární analýzy s velkým posunem a rotací. Každý ze tří uzlů prvků má šest stupňů volnosti. Průřezy zůstávají rovinné a nezakřivené i při deformaci a mezi segmenty nedochází k prokluzu. Průřezy nosníků a sloupy jsou rozděleny na matici segmentů, přičemž každý segment může mít v každém stupni vlastní materiálové, tepelné a mechanické vlastnosti a svou vlastní teplotu. To umožňuje modelování odlišných teplotních rozdělení napříč průřezem, a proto mohou být sledovány také různé teplotní deformace a změny vlastností materiálu, které doprovázejí různé teploty v celé sekci [8].

7.2 Požární zkouška ve Veselí nad Lužnicí

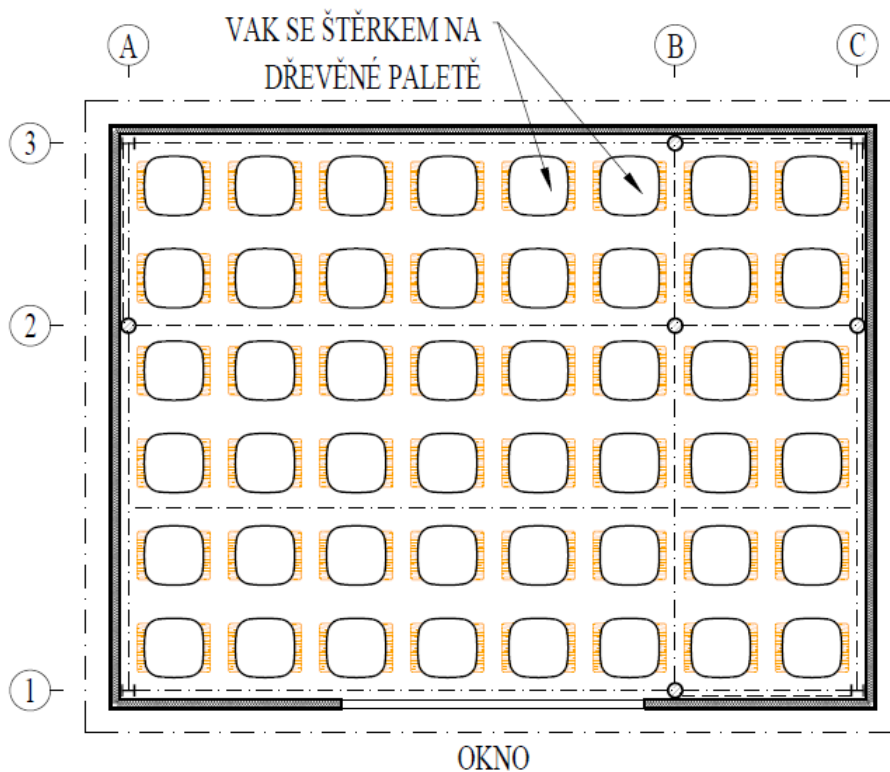
Pro simulování provedené požární zkoušky je potřeba stanovit další hodnoty, které je nutné v analýze zohlednit. Při požární zkoušce byl strop nad prvním nadzemní mechanicky zatížen. Toto zatížení bylo v průběhu požární zkoušky simulováno pomocí vaků naplněných štěrkem. Aby bylo možné vaky rozmístit na stropní konstrukci pomocí paletového vozíku, byly vaky uloženy na dřevěných paletách. Aplikované zatížení představovalo charakteristickou hodnotu proměnného

zatížení při požáru $1,5 \text{ kN/m}^2$, charakteristickou hodnotu zatížení od podlahy $0,5 \text{ kN/m}^2$ a charakteristickou hodnotu zatížení od příček $0,5 \text{ kN/m}^2$. Mechanické zatížení je vidět na obr. 35.



obr. 35 Plastové vaky naplněné štěrkem

Vaky jsou na ocelobetonové desce nad prvním podlažím uspořádány do matice 8×6 (lze vidět na obr. 36). Hmotnost každého vaku je přibližně 550 kg (bez palety).



obr. 36 Schéma mechanického zatížení

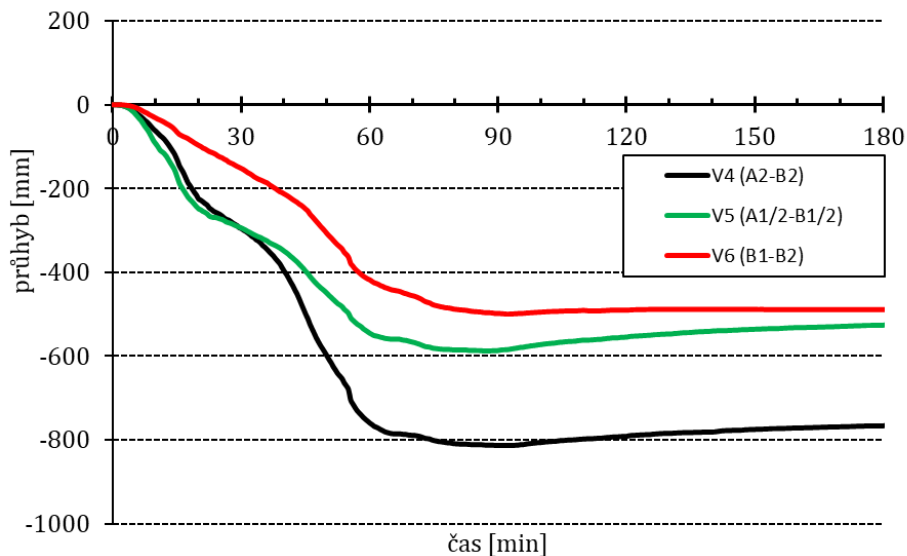
Vertikální průhyby byly během požární zkoušky měřeny pomocí deflektometrů. Při kratších stranách požárního objektu bylo postaveno lešení, mezi kterým byla, skrz nově vytvořené otvory v druhém podlaží, protažena ocelová lávka. K této lávce, která je staticky nezávislá na konstrukci požárního objektu byly upevněny celkem 3 deflektometry, měřící svislý průhyb kompozitní desky. První průhyb byl měřen v polovině nosníku A2-B2 (výstup V4), druhý v polovině nosníku

A1/2-B1/2 (výstup V5) a poslední v polovině nosníku B1-B2 (výstup V6). Schéma rozmístění všech tří deflektometrů, společně s realizovanou příhradovou lávkou a je vidět na obr. 37.



obr. 37 schéma rozmístění deflektometrů

Maximální průhyb byl naměřen ve středu nosníku A2-B2 (výstup V4). Jeho hodnota byla 814 mm v 93 min. požáru. Pro další porovnání jsou vybrána data z deflektometru, který vykazuje největší průhyby, tedy právě ve středu nosníku A2-B2 (výstup V4). Veškeré svislé deformace, naměřené při požární zkoušce jsou zobrazeny na obr. 38.



obr. 38 Svislé deformace naměřené při požární zkoušce

7.3 Aplikace na požární zkoušku

Aby bylo možné sledovat chování konstrukce v programu Vulcan Solutions, je potřeba v softwaru vymodelovat část objektu z požární zkoušky. V případě požární zkoušky ve Veselí nad Lužnicí je touto částí konstrukce prvního podlaží se stropem. Okrajové podmínky jsou zvoleny tak, aby respektovali skutečné vazby mezi jednotlivými prvky, uložení svislých nosných konstrukcí a

skutečnosti, že se nad požárním úsekem, ve kterém proběhla požární zkouška, nacházelo další podlaží. Použité vstupní hodnoty uvažované v softwaru jsou popsány dále.

Pro veškeré ocelové prvky byla použita ocel S355, která je definována s mezí kluzu rovnou 355 MPa , modulem pružnosti 210 GPa a poissonovo číslem $0,3$. Uložení ocelových sloupů je uvažováno jako vetknutí. K ocelovým sloupům jsou kloubově připojeny jednotlivé nosníky, případně je využito dalších kloubových připojení nosník-nosník.

Veškeré použité ocelové průřezy jsou uvedeny v tab. 9.

tab. 9 Definované ocelové průřezy v programu Vulcan Solutions

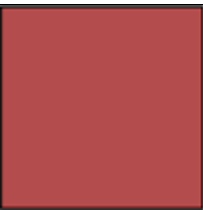
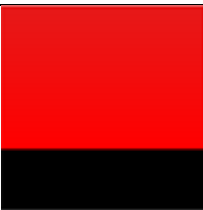
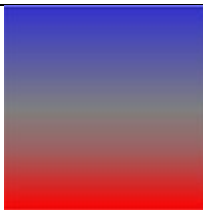
| označení | profil | šířka b [mm] | výška h [mm] | tloušťka stojiny s [mm] | tloušťka příruby t [mm] |
|----------|----------|----------------|----------------|-------------------------------|---------------------------|
| 1 | IPE 240 | 120 | 240 | 6,2 | 9,8 |
| 2 | IPE 270 | 135 | 270 | 6,6 | 10,2 |
| 3 | IPE 330 | 160 | 330 | 7,5 | 11,5 |
| 4 | HEB 200 | 200 | 200 | 9,0 | 15,0 |
| 5 | TR 245/8 | 245 | 245 | $A_p/V = 12,9 \text{ m}^{-1}$ | |

Ocelové prvky jsou uvažovány buď bez požární ochrany, nebo s požárním nástřikem tloušťky 60 mm , o objemové hmotnosti 264 kg/m^3 , s tepelnou vodivostí $0,043 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (při $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Použití požární ochrany koresponduje se skutečností uvedené v kap. 6.2.1.

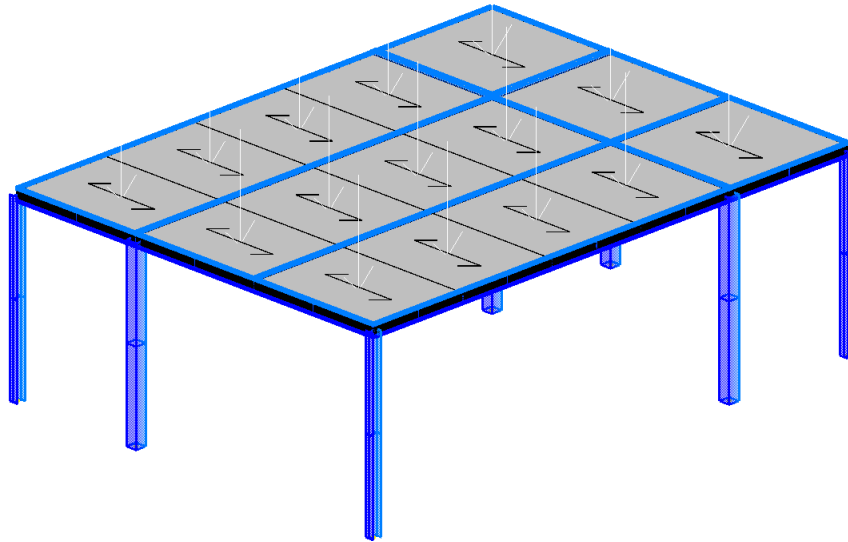
Ocelobetonové stropy jsou definovány betonem třídy C30/37, o objemové hmotnosti 2500 kg/m^3 , měrné tepelné kapacitě $1020 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, s tepelnou vodivostí $1,74 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (při $20 \text{ }^\circ\text{C}$) a poissonovo číslem $0,2$. Trapézový plech je uvažován o skutečných rozměrech výrobku Cofraplus 60 (celková délka vlny je 207 mm , horní 106 mm , dolní 62 mm), pnutý jedním směrem. Interakce mezi betonovou vrstvou a trapézovým plechem je zajištěna za pomoci smykových trnů a průměru 19 mm , s maximální pevností ve smyku 450 MPa umístěných po 5 ks/m .

Teplota v průřezu hlavních prvků vytváří nerovnoměrný vzorec, v němž každý hlavní prvek teploty průřezu je podíl teplotní křivky. Tyto poměry se liší podle času a podle konkrétní použité teplotní křivky plynu. V tab. 10 je znázorněno rozložení teploty v průřezích chráněných nosníků, nechráněných nosníků a stropní desky. Teplotní vzorce použité v analýze vycházejí z doporučení v benchmarkových studiích softwaru.

tab. 10 Rozložení teploty v průřezech

| | | | |
|----------------------------|---|---|---|
| grafické rozložení teploty |  |  |  |
| vlastnosti | jednotně 0,7 | bilineární (T. 0,9; M. 1,0; B. 1,0; M.P. 1,0) | bilineární (T. 0,2; M. 0,62; B. 1,0; M.P. 0,3) |
| použití | sloupy, obvodové nosníky | středové nosníky | stropní deska |

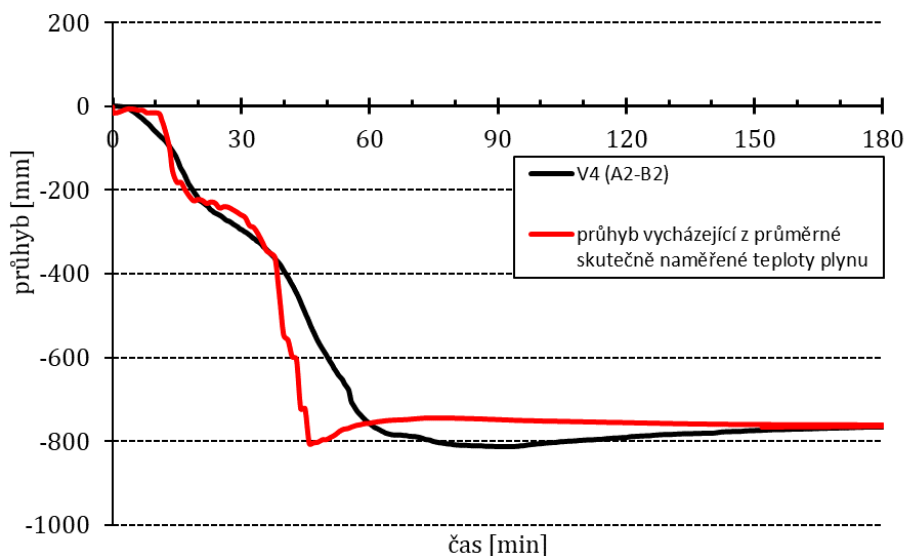
Na obr. 39 je vidět tvar konstrukce vymodelované v programu Vulcan Solutions. Na spřaženou ocelobetonovou stropní konstrukci působí plošně zatížení o velikosti $2,5 \text{ kN/m}^2$ (viz kap. 7.2).



obr. 39 Vymodelovaná konstrukce v programu Vulcan Solutions

7.3.1 Ověření funkčnosti softwarového modelu

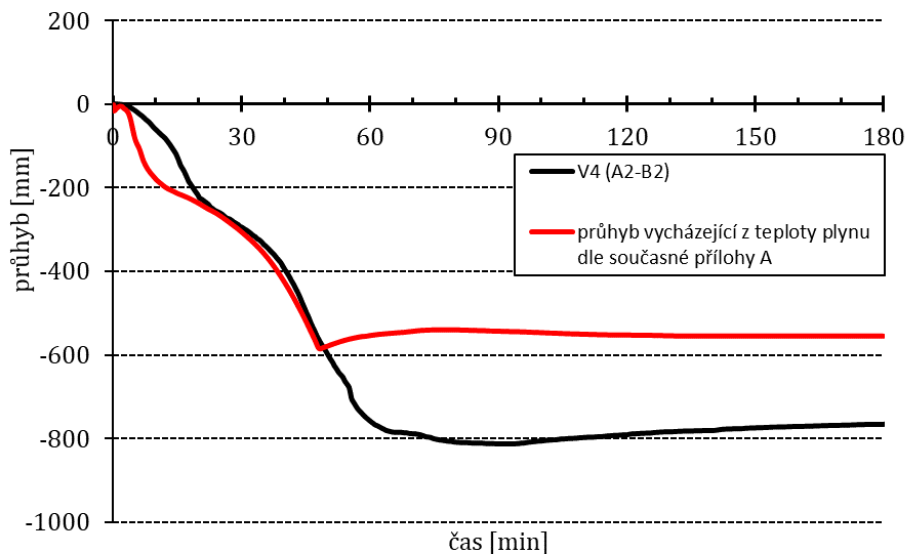
Pro ověření vhodnosti zadaných vstupních parametrů do programu, byla jako první teplotní křivka zvolena křivka vycházející ze skutečně naměřených hodnot (viz obr. 34). Pro tento průběh teploty plynu byl proveden výpočet, ze kterého je sledován průhyb v polovině nosníku A2-B2 a následně porovnán s výstupem z deflektometru V4. Z grafu na obr. 40 je patrné, že maximální průhyb v modelu je téměř totožný se skutečností, pouze nastává dříve. Průhyb vypočtený softwarem má celkově od přibližně třicáté minuty o něco strmější pokles. Po třech hodinách od začátku požáru je průhyb ustálený na totožné hodnotě. Pro další analýzu se model jeví jako dostačující/**vhodný**.



obr. 40 Průhyb s využitím skutečně naměřené teploty plynu

7.3.2 Model s využitím ČSN EN 1991-1-2 Příloha A

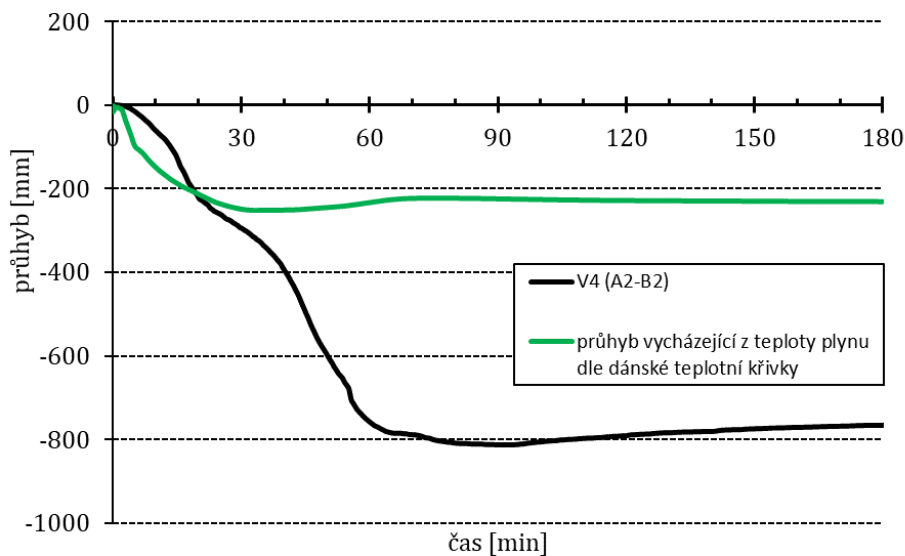
První dosazenou parametrickou křivkou do softwaru je průběh teploty plynu dle současné Přílohy A (viz křivka EN 1991-1-2, obr. 34). Po provedení výpočtu je průběh průhybu v čase, v polovině nosníku A2-B2, zobrazen na grafu obr. 41. Je vidět, že vypočtená křivka průhybu velice přesně kopíruje hodnoty odečtené z deflektometru až do přibližně 50 min, kdy se průhyb přestává zvětšovat. Dále už je svislý průhyb přibližně o 200 mm menší, než ve skutečnosti.



obr. 41 Průhyb s využitím teploty plynu dle současné Přílohy A

7.3.3 Model s využitím dánské národní přílohy

Druhou použitou teplotní křivkou je teplota plynu dle dánské národní přílohy (viz křivka DS/EN 1991-1-2 DK NA 2014, obr. 34). Svislý průhyb v čase, v polovině nosníku A2-B2, je zobrazen na grafu obr. 42. Vypočtené velikosti svislého průhybu jsou zde oproti skutečnosti násobně menší!

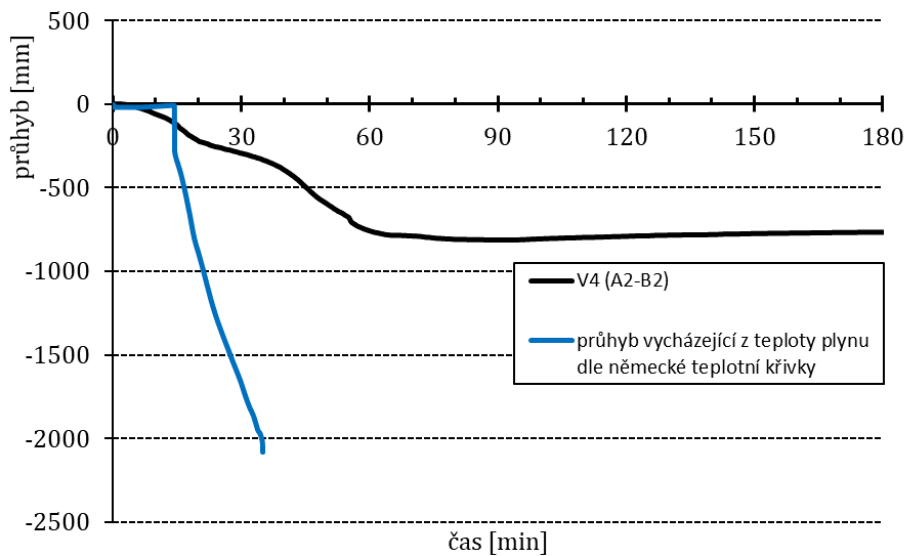


obr. 42 Průhyb s využitím teploty plynu dle dánské teplotní křivky

7.3.4 Model s využitím německé národní přílohy

Posledním použitým parametrickým modelem je průběh teploty plynu podle německé národní přílohy (viz křivka DIN EN 1991-1-2/NA, obr. 34). V tomto případě je potřeba znovu podotknout, že aplikace německé křivky neodpovídá validaci minimální velikosti otvorů a nelze ji tedy plnohodnotně zahrnout do porovnání.

Průběh teploty plynu je dle této křivky velmi nepříznivý a predikuje tak výsledné průhyby na straně bezpečné. Již přibližně při 20 min překračuje teplota plynu hranici 1000 °C a ve svém maximu je dokonce vyšší jak 1200 °C. Svislý průhyb, v polovině nosníku A2-B2, je po provedeném výpočtu znázorněn na obr. 43.



obr. 43 Průhyb s využitím teploty plynu dle německé teplotní křivky

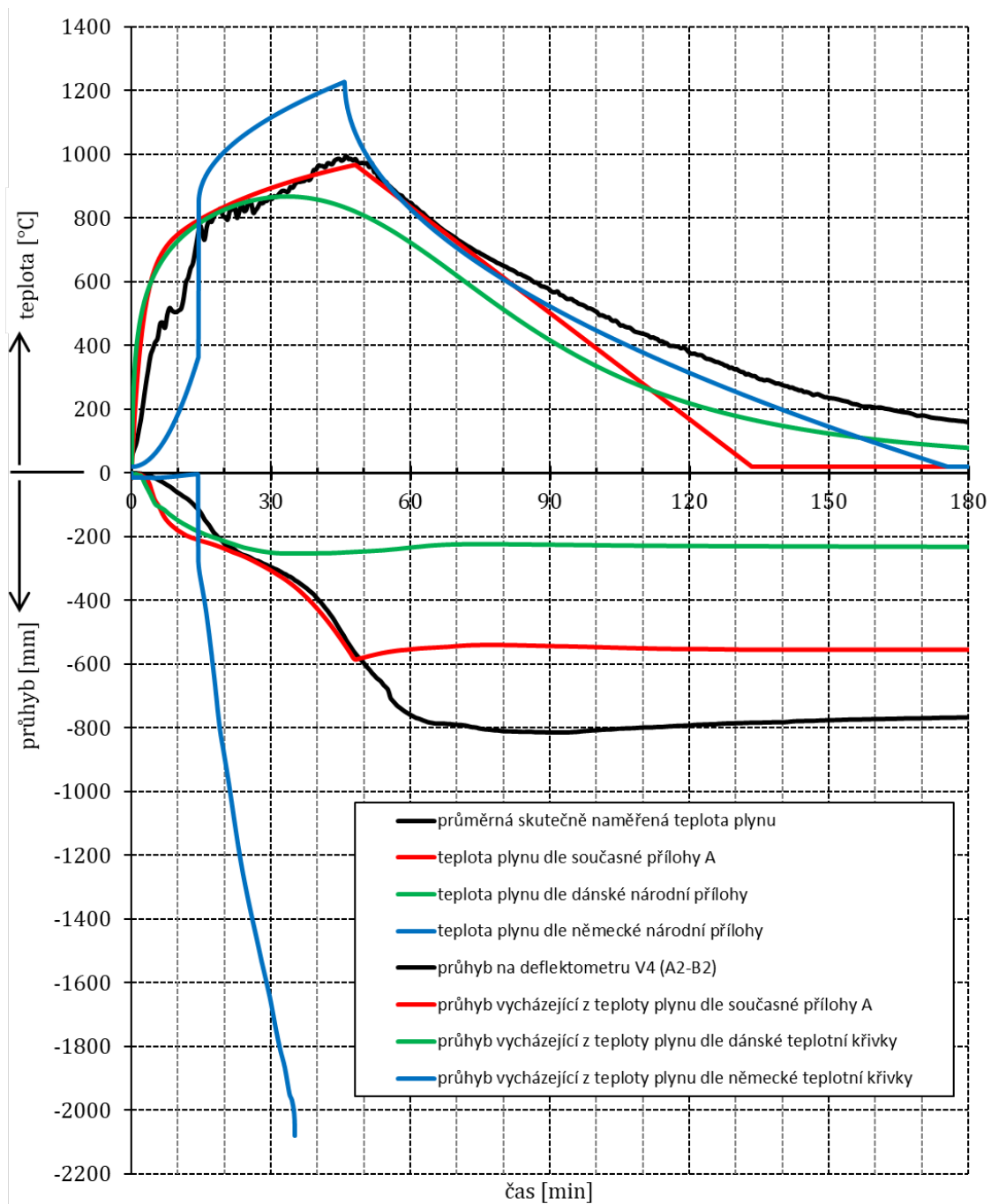
Ačkoli byl výpočetní čas nastaven na 180 min, došlo bohužel ve 36. min k předčasnému ukončení výpočtu, z důvodu přerušení vazeb – konstrukce se zhroutila. Na obr. 43 je vidět, že před zhroutením dosahovala svislá deformace, v polovině nosníku A2-B2, hodnoty více než 2000 mm.

7.4 Shrnutí analýzy

Celkové zhodnocení provedené analýzy je již provedeno bez aplikování parametrického modelu německé teplotní křivky (nebyla validována na velikost otvorů použitých při požární zkoušce ve Veselí nad Lužnicí). Přestože byla pro zajímavost v kapitolách výše uvedena (a také zobrazena dále na obr. 44), vedla ke krajně nepříznivým výsledkům, které jistě mohli být zapříčiněny nesplněním okrajových podmínek pro parametrický model požáru.

V případě použití dánské křivky pro průběh teploty plynu ve zkoumaném požárním úseku jsou získány svislé průhyby, které jsou zásadně na straně nebezpečné! Na zkoumaném nosníku jsou ve skutečnosti tyto průhyby až čtyřnásobně větší. Parametrická teplotní křivka ze současné Přílohy A vykazuje při této požární zkoušce o mnoho přesnější hodnoty (již při průběhu teploty plynu). Hodnota svislého průhybu je do 50 min téměř přesná, v maximu ale o cca 200 mm menší.

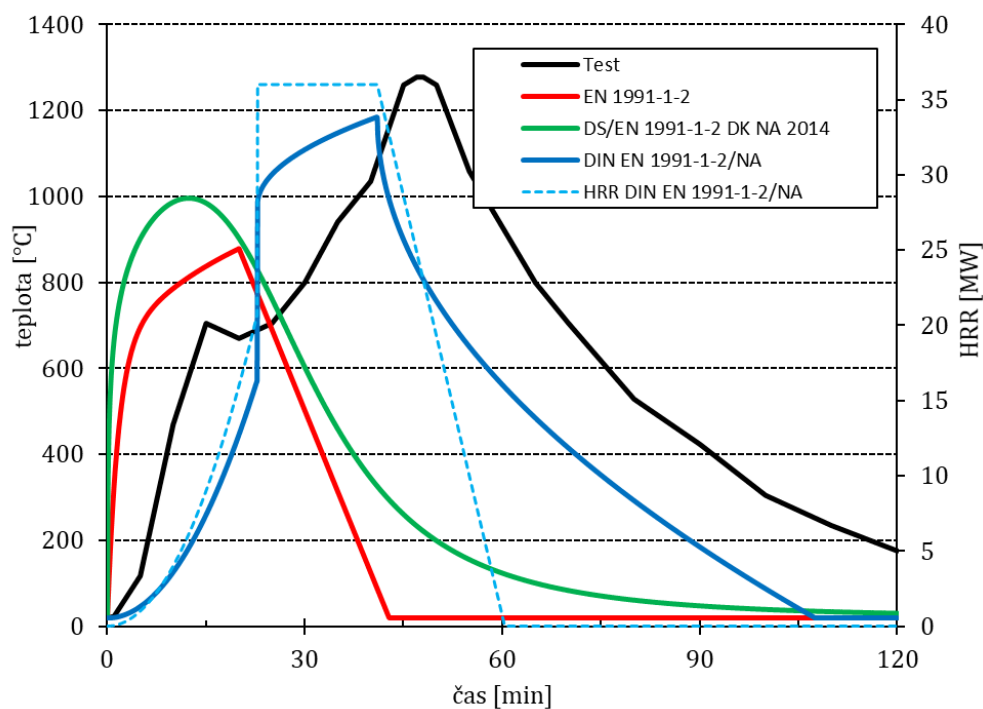
Na obr. 44 je vidět závislost svislých průhybů, ve středu nosníku A2-B2, na teplotě plynu pro jednotlivé parametrické modely (pro požární zkoušku číslo 2, ve Veselí nad Lužnicí).



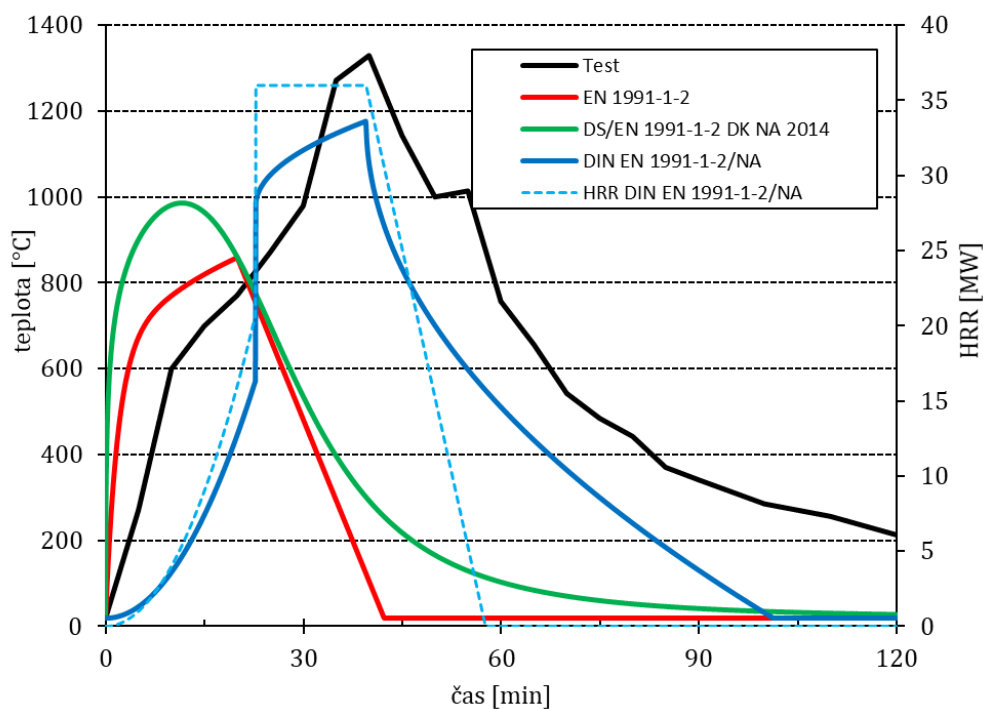
obr. 44 Porovnání svislých průhybů v závislosti na teplotě plynu

Vzhledem k časové náročnosti analýzy chování konstrukce během požární zkoušky, nejsou další porovnání obsahem této práce. Pokud by bylo možné sehnat potřebná data k jiným, například výše uvedeným, požárním zkouškám, bylo by jistě přínosné provést podobnou analýzu i pro tyto případy a to zejména tam, kde je možné použít všechny zmíněné parametrické modely (křivku ze současné Přílohy A, dánskou křivku a zároveň i křivku německou).

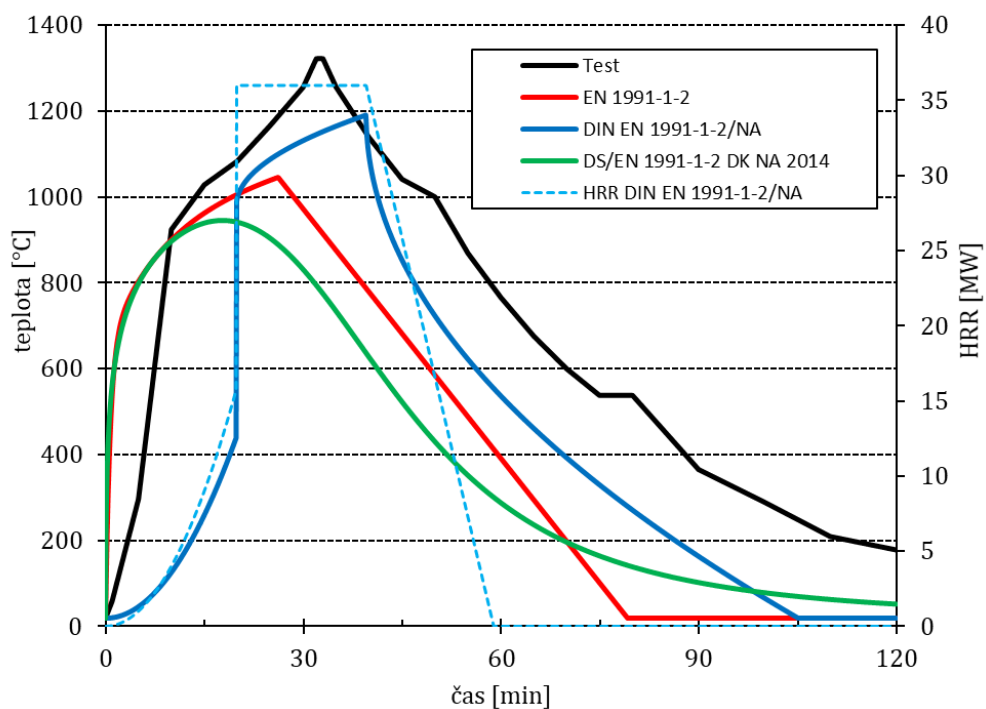
Příloha 1 – Průběhy teplot požáru



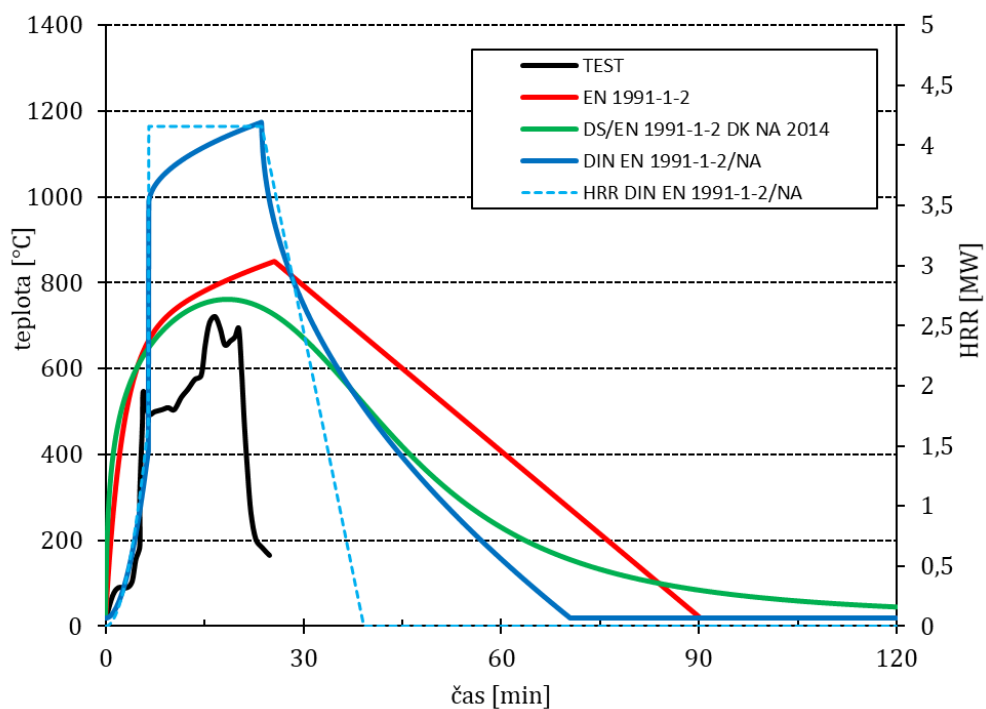
obr. 45 Aplikace požárních křivek na test BRE2



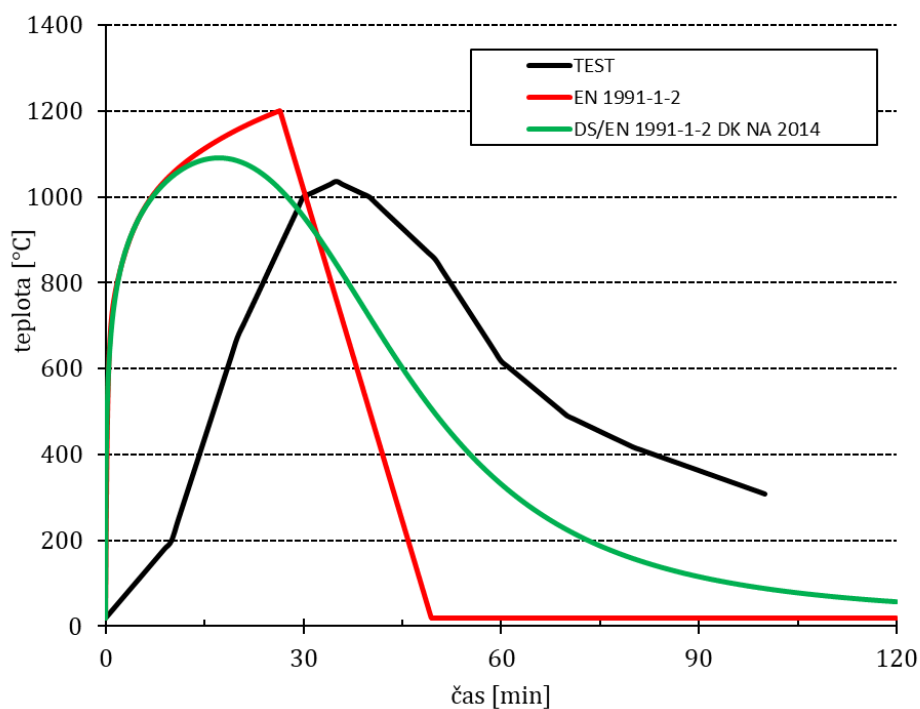
obr. 46 Aplikace požárních křivek na test BRE3



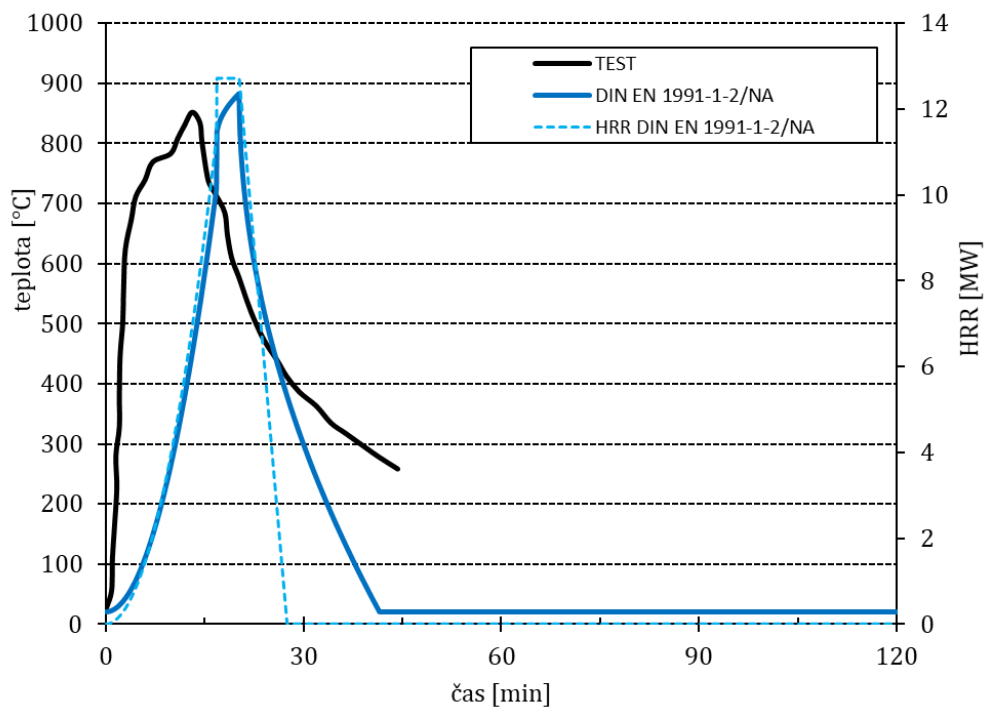
obr. 47 Aplikace požárních křivek na test BRE4



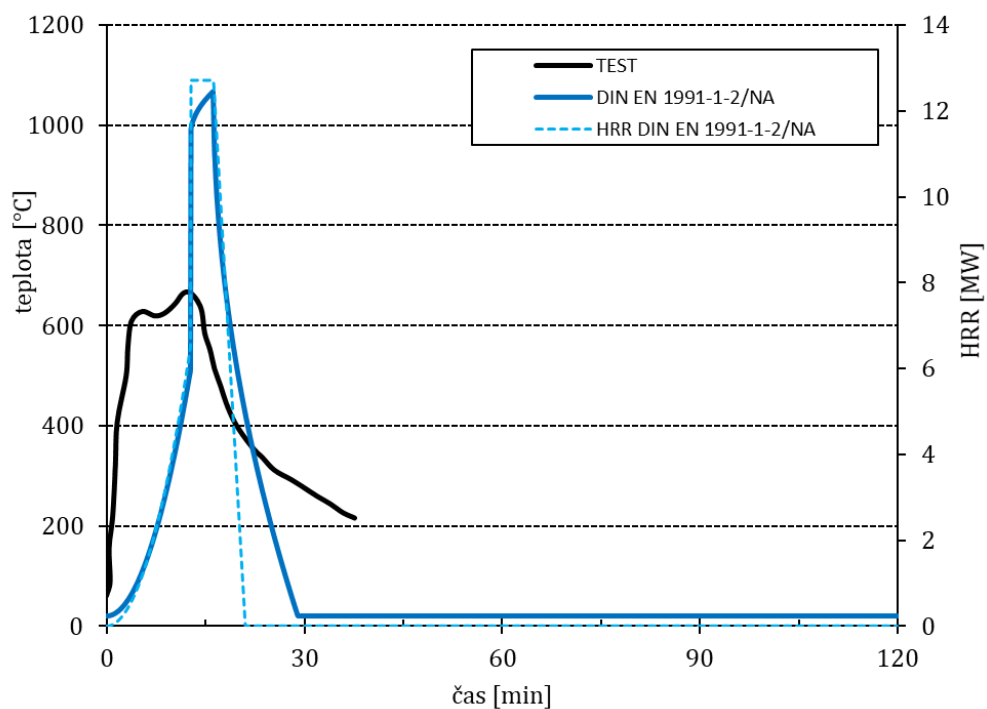
obr. 48 Aplikace požárních křivek na test Dalmarnock



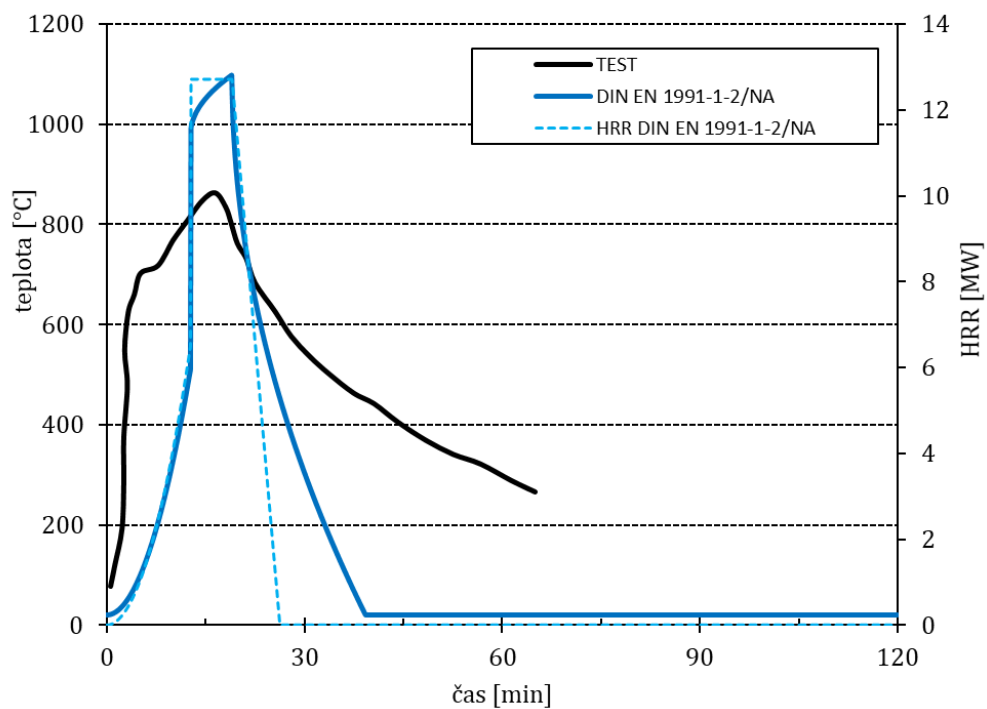
obr. 49 Aplikace požárních křivek na test HOT1



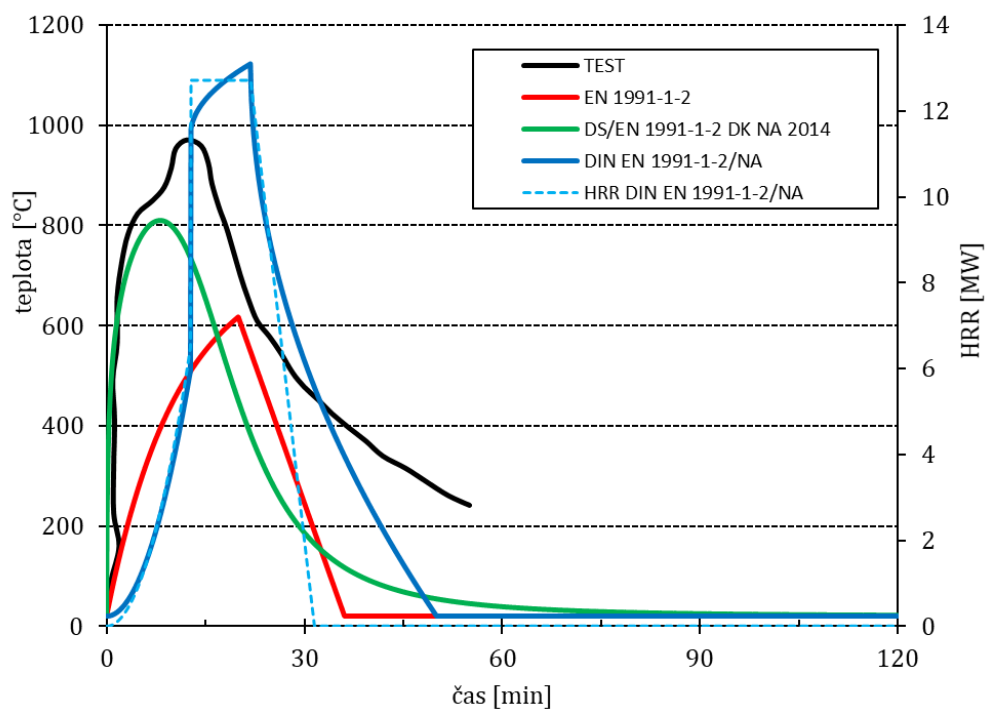
obr. 50 Aplikace požárních křivek na test LAT1



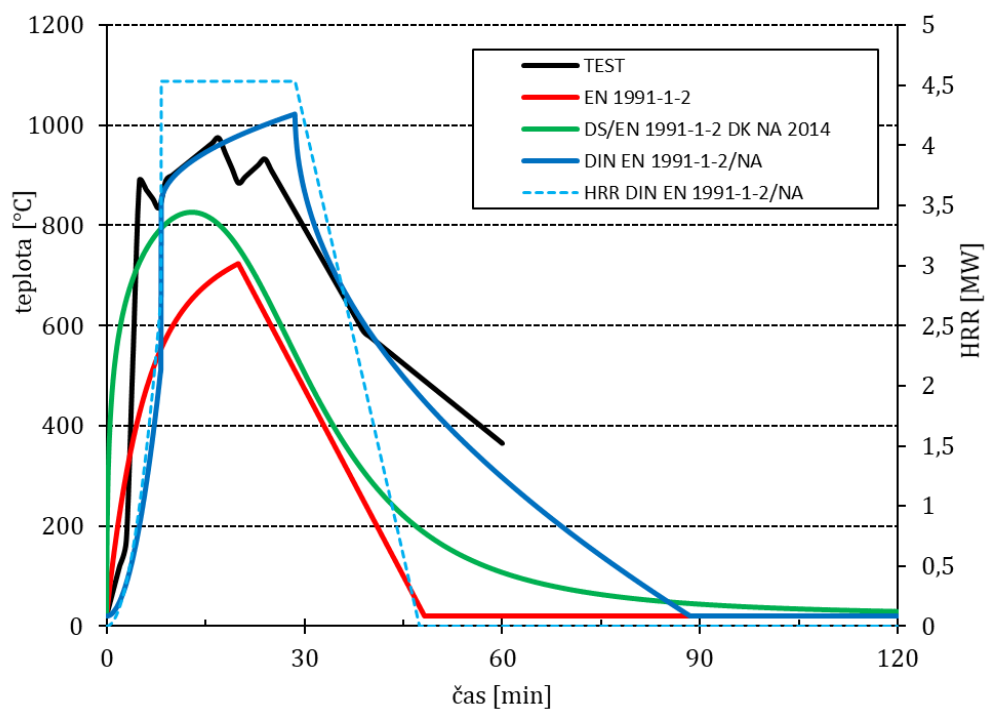
obr. 51 Aplikace požárních křivek na test LAT2



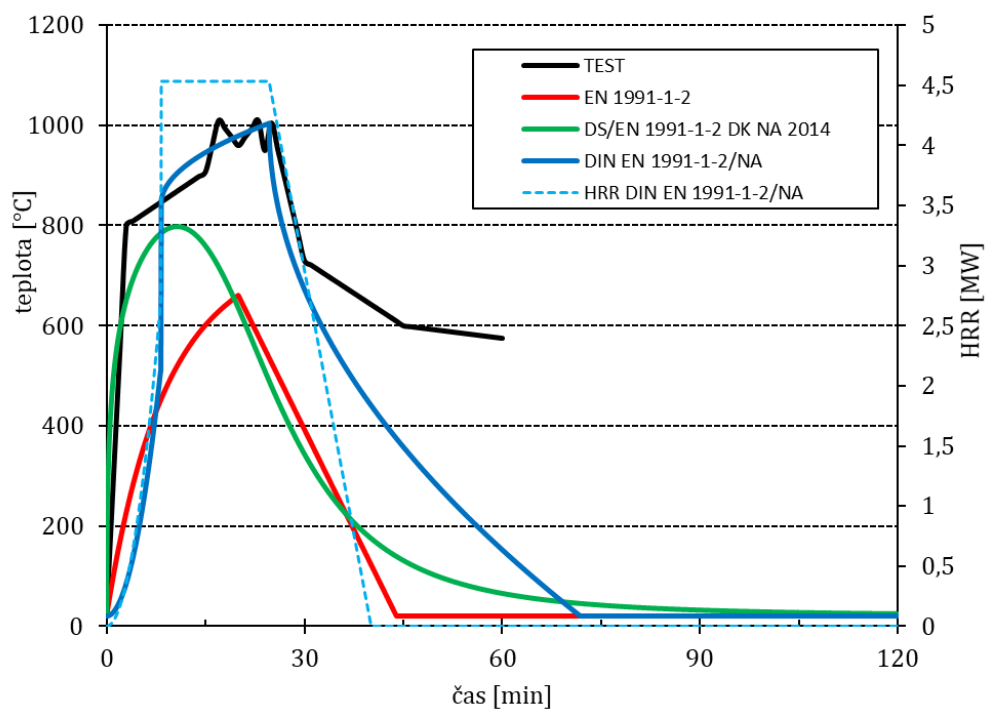
obr. 52 Aplikace požárních křivek na test LAT3



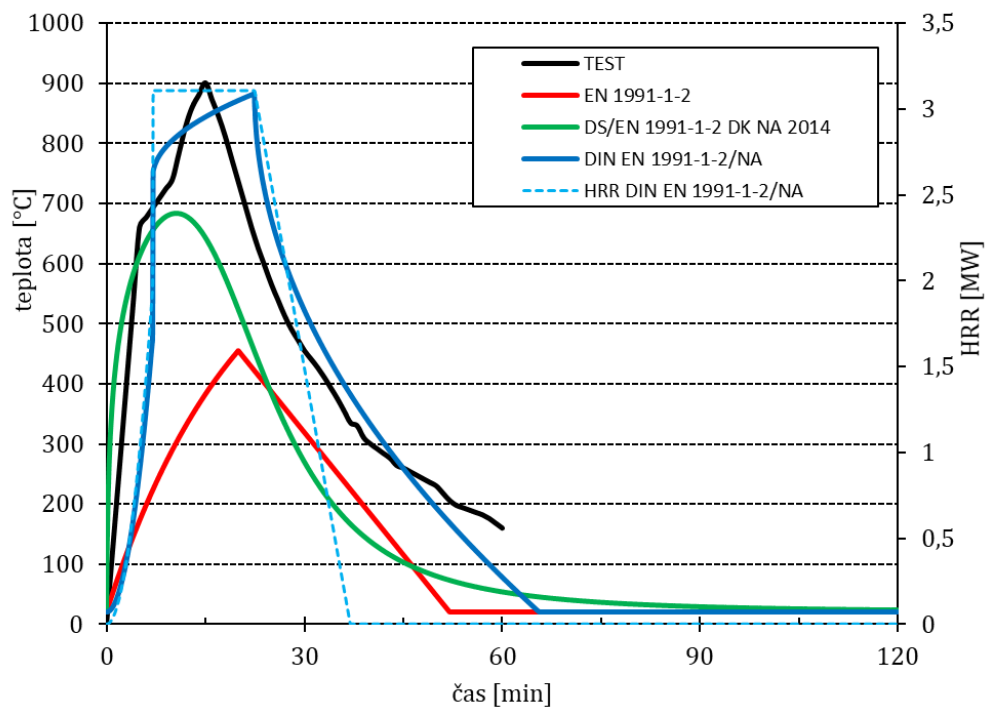
obr. 53 Aplikace požárních křivek na test LAT4



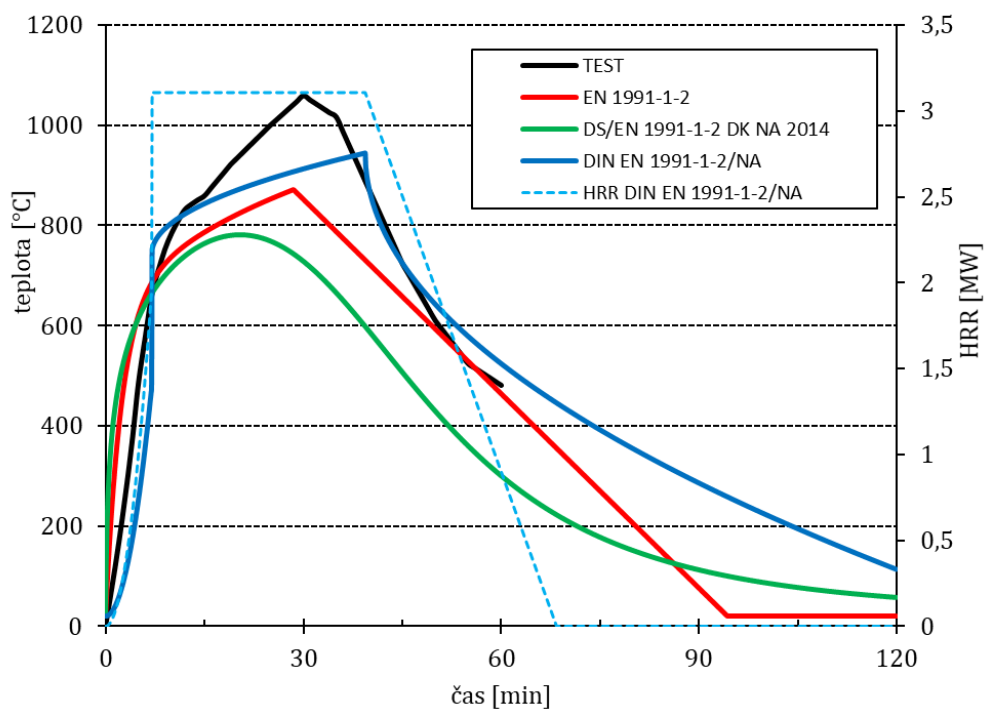
obr. 54 Aplikace požárních křivek na test LEHB



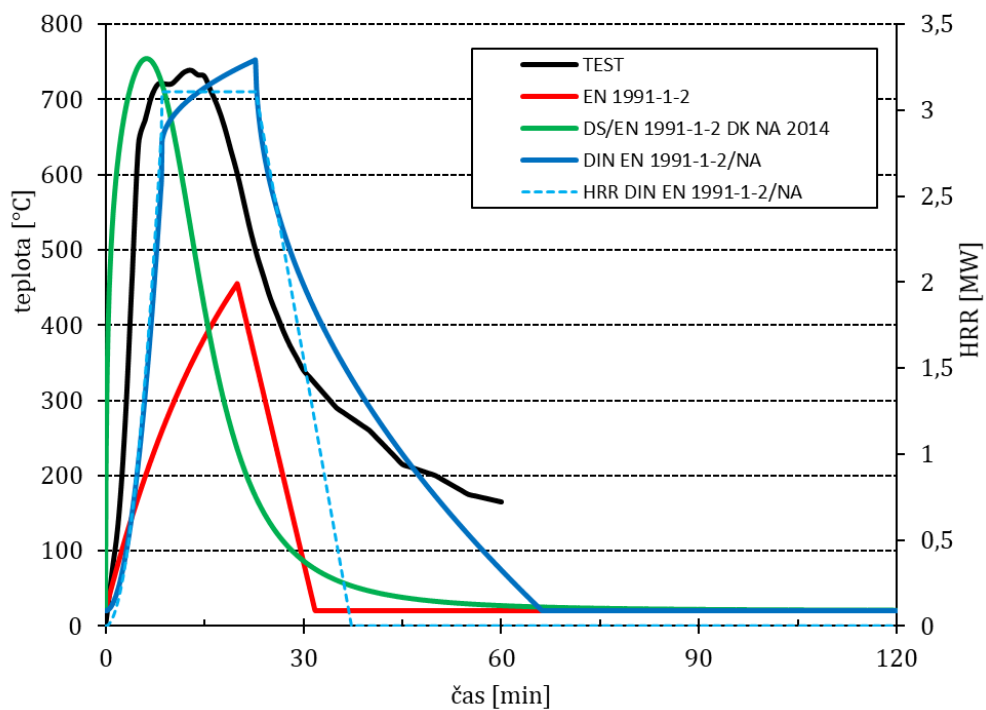
obr. 55 Aplikace požárních křivek na test LEHW



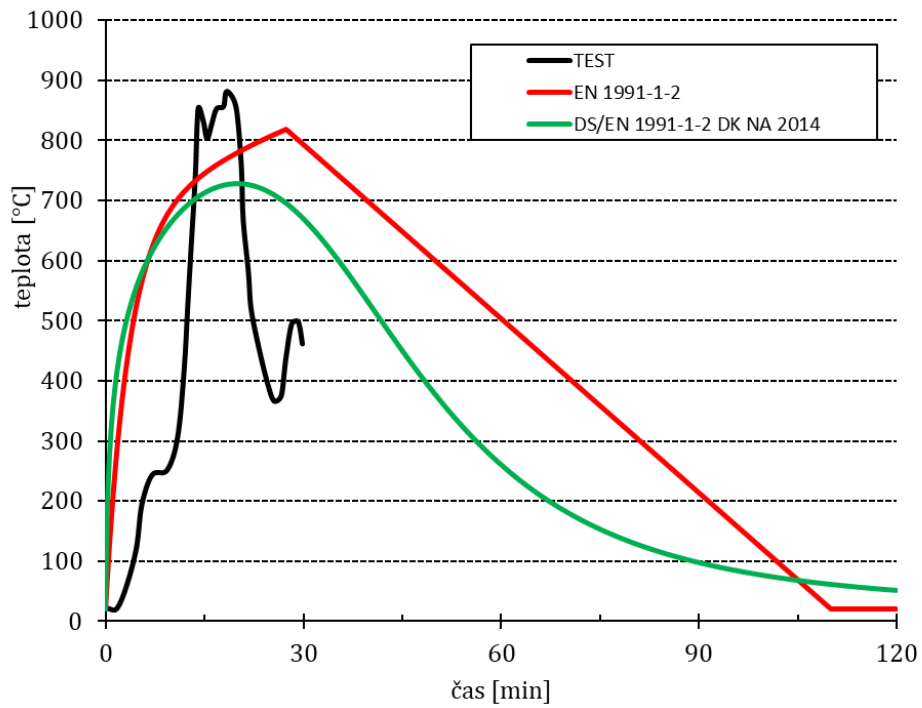
obr. 56 Aplikace požárních křivek na test METZI



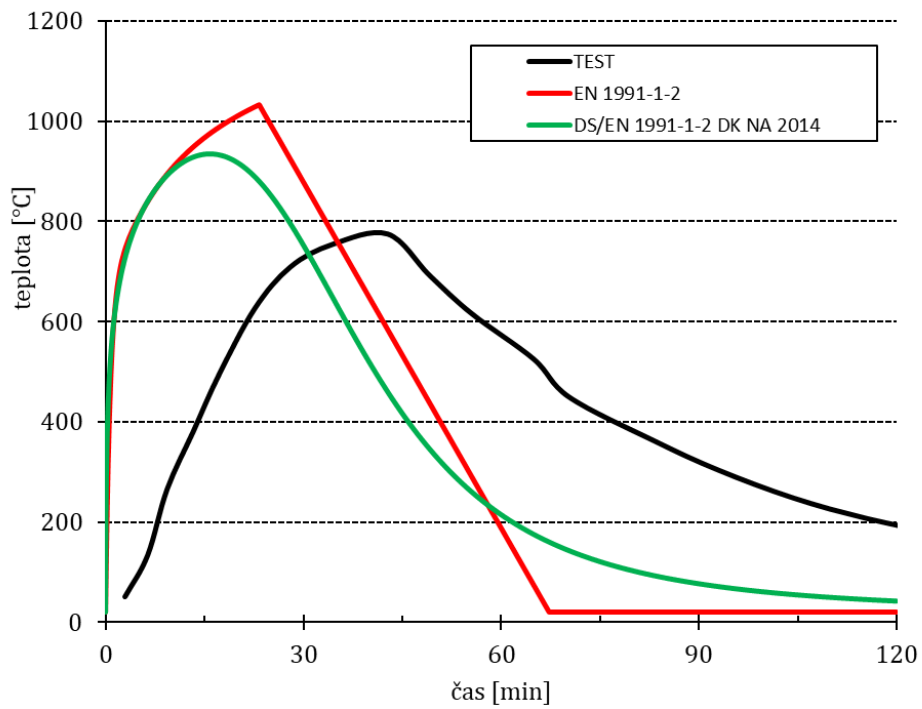
obr. 57 Aplikace požárních křivek na test METZ2



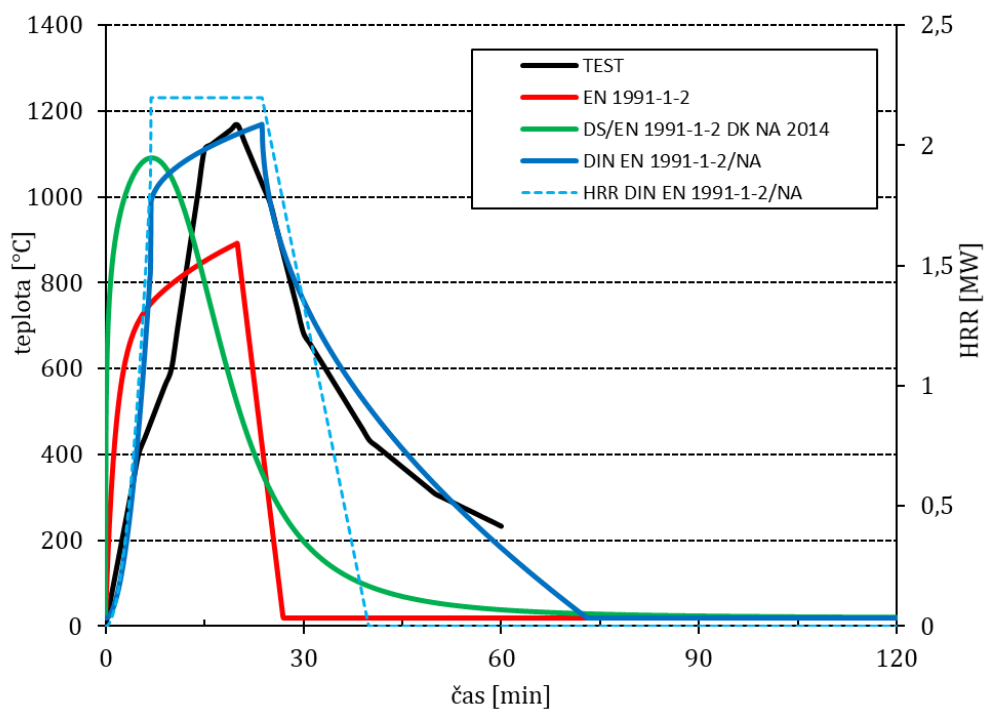
obr. 58 Aplikace požárních křivek na test METZ3



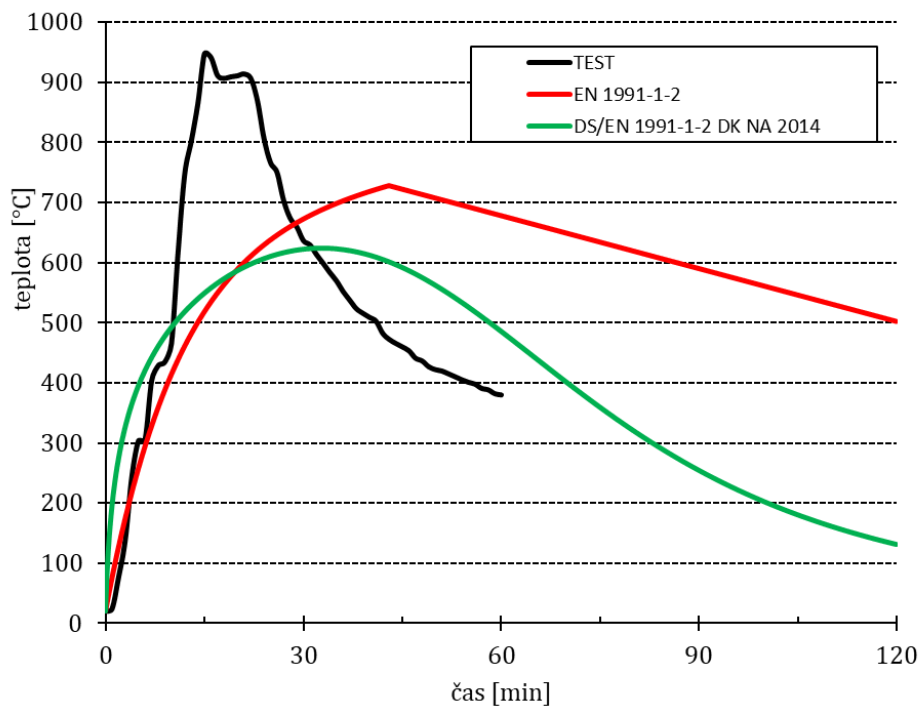
obr. 59 Aplikace požárních křivek na test MFPA



obr. 60 Aplikace požárních křivek na test SFB



obr. 61 Aplikace požárních křivek na test VTI



obr. 62 Aplikace požárních křivek na test ZEH

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| obr. 1 Schematický tvar parametrické křivky dle Přílohy A | 2 |
| obr. 2 Závislost tvaru křivky na koeficientu b (dle Přílohy A)..... | 3 |
| obr. 3 Závislost tvaru křivky na koeficientu O (dle Přílohy A)..... | 4 |
| obr. 4 Závislost tvaru křivky na hustotě požárního zatížení $q_{t,d}$ (dle Přílohy A) | 5 |
| obr. 5 Schematický tvar parametrické křivky dle dánské národní přílohy | 10 |
| obr. 6 Závislost tvaru dánské křivky na koeficientu b | 11 |
| obr. 7 Závislost tvaru dánské křivky na koeficientu O | 12 |
| obr. 8 Závislost tvaru dánské křivky na hustotě požárního zatížení $q_{t,d}$ | 13 |
| obr. 9 Schematický tvar závislosti německé křivky a HRR křivky | 15 |
| obr. 10 Závislost tvaru křivky na koeficientu b (dle německé národní přílohy)..... | 17 |
| obr. 11 Závislost tvaru německé křivky na procentuálním podílu otvorů | 17 |
| obr. 12 Závislost tvaru německé křivky na hustotě požárního zatížení $q_{x,d}$ | 21 |
| obr. 13 Schéma pro výpočet jednotlivých fází německé křivky | 22 |
| obr. 14 Aplikace požárních křivek na test BRE1 | 26 |
| obr. 15 Aplikace požárních křivek na test CAR1 | 27 |
| obr. 16 Aplikace požárních křivek na test LEH8..... | 28 |
| obr. 17 Aplikace požárních křivek na test METZ4..... | 29 |
| obr. 18 Aplikace požárních křivek na test VTT2..... | 30 |
| obr. 19 Požární zkouška v Mokrsku | 37 |
| obr. 20 Schematický půdorys analyzovaného úseku | 38 |
| obr. 21 Schéma požárního zatížení | 39 |
| obr. 22 Schéma umístění termočlánků TG07-TG10..... | 40 |
| obr. 23 Průběhy naměřených teplot plynu | 40 |
| obr. 24 Porovnání průběhů teploty plynu | 43 |
| obr. 25 Požární zkouška číslo 2 ve Veselí nad Lužnicí | 44 |
| obr. 26 Použité ocelové nosníky se spřahovacími trny..... | 44 |
| obr. 27 Schematický půdorys a řez analyzovaného úseku..... | 45 |
| obr. 28 Zkušební objekt během výstavby | 46 |
| obr. 29 Aplikace protipožárního nástřiku | 46 |
| obr. 30 Hranice tvořící požární zatížení..... | 47 |

| | |
|--|----|
| obr. 31 Schéma požárního zatížení | 47 |
| obr. 32 Schéma umístění termočlánků TG22 a TG23 | 48 |
| obr. 33 Průběhy naměřených teplot plynu | 48 |
| obr. 34 Porovnání průběhů teploty plynu | 51 |
| obr. 35 Plastové vaky naplněné šterkem..... | 53 |
| obr. 36 Schéma mechanického zatížení | 53 |
| obr. 37 schéma rozmístění deflektometrů..... | 54 |
| obr. 38 Svislé deformace naměřené při požární zkoušce..... | 54 |
| obr. 39 Vymodelovaná konstrukce v programu Vulcan Solutions..... | 56 |
| obr. 40 Průhyb s využitím skutečně naměřené teploty plynu | 56 |
| obr. 41 Průhyb s využitím teploty plynu dle současné Přílohy A..... | 57 |
| obr. 42 Průhyb s využitím teploty plynu dle dánské teplotní křivky..... | 57 |
| obr. 43 Průhyb s využitím teploty plynu dle německé teplotní křivky..... | 58 |
| obr. 44 Porovnání svislých průhybů v závislosti na teplotě plynu | 59 |
| obr. 45 Aplikace požárních křivek na test BRE2..... | 60 |
| obr. 46 Aplikace požárních křivek na test BRE3..... | 60 |
| obr. 47 Aplikace požárních křivek na test BRE4..... | 61 |
| obr. 48 Aplikace požárních křivek na test Dalmarnock..... | 61 |
| obr. 49 Aplikace požárních křivek na test HOT1 | 62 |
| obr. 50 Aplikace požárních křivek na test LAT1..... | 62 |
| obr. 51 Aplikace požárních křivek na test LAT2..... | 63 |
| obr. 52 Aplikace požárních křivek na test LAT3..... | 63 |
| obr. 53 Aplikace požárních křivek na test LAT4..... | 64 |
| obr. 54 Aplikace požárních křivek na test LEHB | 64 |
| obr. 55 Aplikace požárních křivek na test LEHW | 65 |
| obr. 56 Aplikace požárních křivek na test METZ1..... | 65 |
| obr. 57 Aplikace požárních křivek na test METZ2..... | 66 |
| obr. 58 Aplikace požárních křivek na test METZ3..... | 66 |
| obr. 59 Aplikace požárních křivek na test MFPA..... | 67 |
| obr. 60 Aplikace požárních křivek na test SFB | 67 |
| obr. 61 Aplikace požárních křivek na test VTT1 | 68 |
| obr. 62 Aplikace požárních křivek na test ZEH..... | 68 |

Seznam tabulek

| | | |
|---------|---|----|
| tab. 1 | Hodnoty koeficientu povrchů b dle skupiny vlivu materiálu..... | 16 |
| tab. 2 | Hodnoty rychlosti rozvoje požáru a RHR_f pro různé provozy..... | 18 |
| tab. 3 | Obecné porovnání parametrických teplotních křivek | 24 |
| tab. 4 | Shrnutí požárních zkoušek a možnost aplikace na křivky | 32 |
| tab. 5 | Vlastnosti ohraničujících konstrukcí..... | 41 |
| tab. 6 | Koeficienty ohraničujících konstrukcí b pro jednotlivé křivky | 42 |
| tab. 7 | Vlastnosti ohraničujících konstrukcí..... | 49 |
| tab. 8 | Koeficienty ohraničujících konstrukcí b pro jednotlivé křivky | 50 |
| tab. 9 | Definované ocelové průřezy v programu Vulcan Solutions | 55 |
| tab. 10 | Rozložení teploty v průřezech..... | 55 |

Literatura

- [1] ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. 2004
- [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] HOROVÁ, Kamila. Součást projektu COST CZ: Šíření požáru ve vícepodlažních budovách. 2011
- [5] PETTERSSON, Ove, Sven-Erik MAGNUSSON a Jörgen THOR. Fire Engineering Design of Steel structures. 1976
- [6] ZEHFUSS, Jochen. Case studies of a new simplified natural fire model and safety concept for structural fire safety design. 2011
- [7] 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 03797112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2006.08.004
- [8] HOROVÁ, Kamila. Modelling of fire spread in structural fire engineering: doctoral thesis = Modelování šíření požáru při navrhování konstrukcí. 2015
- [9] PURKISS, J. A. Fire safety engineering design of structures. 2nd ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-0-7506-6443-1.
- [10] HOSSER, Daniela a Jochen ZEHFUSS. Fire Safety Design of Multi-Storey Buildings for Natural Fires. B.m.: Technical University of Braunschweig, Germany
- [11] LOLI, Arian. Mechanical behaviour of structures subjected to travelling fire. 2014
- [12] ŠTĚPNIČKA, J. Diploma thesis = Analysis of a steel-concrete floor exposed to travelling fire. 2014
- [13] SCHLEICH, J.-B., ed. Natural fire safety concept - full-scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool: final report. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003. EUR Technical steel research Steel structures, 20580. ISBN 978-92-894-4767-6.
- [14] O'CONNOR, M.A a D.M MARTIN. Behaviour of a multi-storey steel framed building subjected to fire attack. Journal of Constructional Steel Research [online]. 1998, **46**(1–3), 295. ISSN 0143974X. Dostupné z: doi:10.1016/S0143-974X(98)00122-9

-
- [15] BECHTOLD, Rolf. Schriftenreihe Bau- und Wohnforschung ;, 037, Schriftenreihe „Bau- und Wohnforschung" des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau ;, 04.037. 1978
- [16] EHM, H. a P. ARNAULT. Versuchsbericht über Untersuchungen mit natürlichen Bränden (Metz). Europäische Konvention der Stahlbauverbände, Doc. CE-CM 3.1-69/29. 1969
- [17] RANBY, A., T. INHA a J. MYLLYMÄKI. Structural Steel Fire Design. SBI Publication 134. Finish Constructional Steelwork Association, Norwegian Steel Association, Swedish Institute of Steel Construction. 2000
- [18] REIN, Guillermo, Cecilia ABECASSIS EMPIS a Richard CARVEL, ed. The Dalmarnock fire tests: experiments and modelling. Edinburgh: School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh, 2007. ISBN 978-0-9557497-0-4.
- [19] HOSTIKKA, S. a O. KESKI-RAHKONEN. Results of CIB W14 Round Robin for Code Assessment, Scenario B. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland. 1998
- [20] LATHAM, D. J., B. R. KIRBY a G. THOMSON. The temperatures attained by unprotected structural steelwork in experimental natural fires. In: Fire Safety Journal 12. Kidlington, Oxford: Elsevier. 1987
- [21] DEUBEL, J. BAM Innovationsoffensive Projekt Brandspurenanalytik Projekt Brandspurenanalytik, Teil 1: Versuchsaufbau und brandtechnologische Untersuchungen. Forschungsbericht Raumbrände BAM Bundesamt für Materialforschung und -prüfung. Fachbereich 7.5 Technische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen. 2013. ISBN 978-3-9815944-2-3.
- [22] HAGEN, E. Der natürliche Brand – Brandversuche in großen Brandabschnitten. Sonderforschungsbereich 148 Brandverhalten von Bauteilen, Teilprojekt C3, Arbeitsbericht 1984-1986. Teil II. Braunschweig: Technische Universität. 1987
- [23] ZEHFUSS, J. Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung. Technische Universität Braunschweig, Dissertation. 2004
- [24] Meeting of CEN/TC 250/SC 1/WG 4 „Actions on structures exposed to fire" in Brussels on 2018-06-15. 2018.
- [25] WALD, František. Fire test on an administrative building in Mokrsko: [summary of the results from the fire experiment. Prague: Czech Technical University in Prague, 2010. ISBN 978-80-01-04571-8.
- [26] WALD, František, Tomáš JÁNA a Kamila HOROVÁ. Design of joints to composite columns for improved fire robustness: to demonstration fire test. Prague: Czech Technical University, 2011. ISBN 978-80-01-04871-9.