

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta stavební**



**OVĚŘOVÁNÍ MODELŮ V POŽÁRNÍ BEZPEČNOSTI  
KONSTRUKCÍ**

**Habilitační práce**

**Praha, 2022**

**Ing. Kamila Cábová, Ph.D.**



**Název práce**

Ověřování modelů v požární bezpečnosti konstrukcí

**Obor**

Teorie stavebních konstrukcí a materiálů

**Pracoviště**

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze

**Autor**

Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

**Anotace**

Habilitační práce se věnuje návrhovým modelům v požární bezpečnosti konstrukcí a jejich ověřování. V dílčích oblastech požární bezpečnosti staveb se již řadu let konstrukce navrhují pomocí tabulek, analytických a pokročilých modelů. S rozvojem výpočetní techniky má využití pokročilého modelování v požární praxi zvyšující tendenci. Je doloženo, že využití pokročilého modelování v oblasti požární bezpečnosti je jediná cesta k zajištění spolehlivosti budov, které využívají možnosti současných materiálů a moderních konstrukčních řešení.

Cílem práce je podpořit zavedení pokročilých výpočetních postupů v hodnocení požární bezpečnosti konstrukcí. Konkrétně zavést systém pro aplikaci a ověřování pokročilých metod v oblasti modelování požáru a posuzování konstrukcí při požáru. V rámci tohoto systému jsou doporučeny podmínky pro využití jednotlivých typů modelů v analýzách dílčích problémů požární bezpečnosti konstrukcí a možnosti ověření jejich správné aplikace, relevantních vstupních a výstupních dat. Konkrétně habilitační práce shrnuje teoretické znalosti z oblasti bezpečného návrhu konstrukcí při požáru, modelování požáru, modelování odezvy konstrukce při požáru a z oblasti ověřování modelů. Dále práce uvádí verifikační příklady, které je možno použít jak pro ověření, tak pro kontrolu správnosti řešení, vstupních dat a relevantních výsledků při pokročilém modelování požáru a odezvy konstrukce při požáru. Ke kontrole správného postupu a relevantnosti vstupů a výstupů jednotlivých modelů jsou rovněž zpracovány kontrolní seznamy, tzv. „check-listy“.

**Klíčová slova**

požární bezpečnost konstrukcí; požární odolnost; modely požáru; ověřování pokročilých modelů; verifikační příklady

**Title**

Verification of models in fire safety of structures

**Workplace**

Department of Steel and Timber Structures

Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague

**Author**

Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

**Annotation**

The habilitation thesis deals with design models in fire safety of structures and their verification. In the sub-areas of fire safety of buildings, structures have been designed using tables, analytical and advanced models. With the development of computer technology, the use of advanced modelling in fire practice has an increasing tendency. It is proven that the use of advanced modelling in the field of fire safety is the only way to ensure the reliability of buildings that use the capabilities of current materials and modern design solutions.

The aim of the work is to support the introduction of advanced computational procedures in the evaluation of fire safety of structures. Specifically, introduce a system for the application and verification of advanced methods in the field of fire modelling and assessment of structures exposed to fire. Within this system, the conditions for the use of individual types of models in the analysis of partial problems of fire safety of structures and the possibility of verifying their correct application, relevant input and output data are recommended. Specifically, the habilitation thesis summarizes theoretical knowledge in the field of safe design of structures in case of fire, fire modelling, modelling of the response of the structure exposed to fire, and in the field of model verification. Furthermore, the work presents verification examples that can be used both to verify and to check the accuracy of the solution, input data and relevant results in advanced fire modelling and structural response to fire. To check the correct procedure and relevance of the inputs and outputs of individual models, checklists are also prepared.

**Keywords**

fire safety of structures; fire resistance; fire models; verification of advanced models; benchmark studies

## Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala své rodině, zejména manželovi, dceři, svým rodičům, a všem blízkým, za veškerou podporu, kterou mi projevíli při tvorbě této habilitační práce.

Dále bych chtěla poděkovat svým spolupracovníkům a dřívějším učitelům, prof. Ing. Františku Waldovi, CSc., doc. Ing. Michalovi Janderovi, Ph.D. a Ing. Anně Kuklíkové, Ph.D., za cenné rady a zkušenosti, které mi poskytli během řešení výzkumných prací i mimo ně.

Velký dík patří i mým studentům, kteří mi pomáhali s realizací výzkumných prací, jejichž části jsou zahrnuty v mých publikaích i v této habilitační práci: Ing. Filip Zeman, Ing. Jaroslav Kučera, Ing. Kristýna Vopatová, Ing. Jaroslav Zeman a Ing. Jan Vesecký.

Další dík patří kolegům, kteří se se mnou podíleli na řešení výzkumného grantu MV ČR VI20162019034 - Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb: doc. Ing. Petru Kučerovi, Ph.D., Ing. Lucii Hasalové, Ph.D. a doc. Mgr. Tomášovi Apeltauerovi, Ph.D., díky kterým jsem neztrácela motivaci, a těšila mne práce spojená s tématem této habilitační práce.

V neposlední řadě bych chtěla poděkovat všem ostatním spolupracovníkům a kolegům, kteří mi pomáhali, jmenovitě bych chtěla poděkovat: Ing. Martě Kuříkové, Ph.D., Ing. Břetislavovi Židlickému a Ing. Nině Feber, a dalším členům katedry.

Na závěr bych ráda poděkovala technikům laboratoří FSv ČVUT v Praze a UCEEB, kteří mi pomáhali s přípravou zkušebních vzorků a samotným zkoušením během jednotlivých výzkumných pracích.



## Obsah

Symboly .....	9
Úvod .....	15
1 Modely v požární bezpečnosti konstrukcí.....	16
2 Ověřování modelů .....	17
2.1 Verifikace a validace .....	17
2.2 Validace .....	19
2.3 Kalibrace .....	20
2.4 Studie citlivosti.....	20
2.5 Verifikační příklad .....	21
3 Bezpečnost konstrukcí .....	23
3.1 Zajištění bezpečnosti .....	23
3.2 Metoda dílčích součinitelů spolehlivosti .....	23
3.2.1 Mezní stavy únosnosti .....	24
3.2.2 Návrhové hodnoty geometrických údajů .....	24
3.2.3 Návrhové hodnoty vlastností materiálu .....	25
3.2.4 Klasifikace zatížení.....	25
3.2.5 Návrhové hodnoty účinků zatížení .....	26
3.3 Požární odolnost.....	27
3.3.1 Ověření požární odolnosti .....	28
3.3.2 Mechanické zatížení při požáru.....	29
3.3.3 Požární zatížení.....	31
4 Modely požáru.....	38
4.1 Dělení modelů požáru .....	38
4.2 Volba modelu požáru.....	39
4.3 Zjednodušené modely požáru.....	41
4.3.1 Analytické modely prostorového požáru .....	41
4.3.2 Modely lokálního požáru.....	53
4.3.3 Modely putujícího požáru .....	58
4.4 Pokročilé modely požáru .....	62
4.4.1 Zónové modely požáru.....	62
4.4.2 Modely dynamiky tekutin .....	62
4.4.3 Vstupní hodnoty.....	63
4.4.4 Softwarové nástroje.....	67
4.4.5 Kontrolní seznam .....	68

4.5	Verifikační příklady .....	70
4.5.1	Teploty vazníku průmyslové haly .....	70
4.5.2	Teplota při požáru v otevřeném parkovacím domě .....	73
4.5.3	CFD model požáru v malém požárním úseku .....	77
4.5.4	Studie citlivosti sítě v CFD modelu požáru .....	82
4.5.5	Další verifikační příklady CFD modelů .....	87
5	Odezva konstrukce .....	88
5.1	Modelování konstrukcí při požáru .....	88
5.1.1	Úvod .....	88
5.1.2	Typy modelů .....	89
5.1.3	Volba modelu a softwarového nástroje .....	90
5.1.4	Vstupní hodnoty .....	91
5.1.5	Kontrolní seznam .....	95
5.2	Ověřování modelů konstrukcí .....	96
5.2.1	Způsoby ověření .....	96
5.3	Verifikační příklady .....	97
5.3.1	Chování ocelového nosníku při požáru .....	97
5.3.2	Ocelový sloup vystavený účinkům požáru .....	105
5.3.3	Rozvoj teplot v průřezu dřevěného prvku .....	109
5.3.4	Mechanické chování ocelobetonové stropní desky při požáru .....	114
5.3.5	Dřevobetonová stropní deska vystavená účinkům požáru .....	118
5.3.6	Stabilita ocelového nosníku s průřezem 4. třídy při požáru .....	123
6	Závěr .....	130
7	Literatura .....	131



## Symbols

V textu je použito značení podle evropských norem, které se v podrobnostech v jednotlivých požárních normách liší. Symboly jsou objasněny v textu u vzorců a častěji použité jsou shrnuty dále.

$a$	vzdálenost
$b$	tepelná pohltivost ohraničující konstrukce, šířka
$b_{\text{eff}}$	účinná šířka
$b_i$	tepelná pohltivost $i$ -té vrstvy povrchové plochy jedné ohraničující konstrukce
$b_j$	tepelná pohltivost povrchové plochy $j$ -té ohraničující konstrukce
$c_a$	měrné teplo oceli
$c_c$	měrné teplo betonu
$c_p$	měrné teplo požárně ochranného materiálu
$d$	hloubka, výška, průměr spřaženého sloupu z dutého průřezu vyplněného betonem, tloušťka, průměr sprinklerové trysky, průměr kapky
$d_i$	rozměr $i$ -té povrchové plochy prvku
$d_p$	tloušťka požárně ochranného materiálu
$d_v$	střední průměr kapky
$f_{a,\text{max},\theta}$	charakteristická hodnota nejvyšší hladiny napětí pracovního diagramu konstrukční oceli při zvýšené teplotě
$f_{a,\text{max},\theta_{\text{cr}}}$	pevnost oceli při kritické teplotě $\theta_{\text{cr}}$
$f_{c,\theta}$	charakteristická hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku při teplotě $\theta$
$f_{\text{fi},d}$	návrhová pevnost za požáru
$f_y$	mez kluzu oceli při pokojové teplotě
$f_{y,\theta}$	mez kluzu oceli při teplotě $\theta$
$h$	výška průřezu
$h_{\text{eff}}$	účinná tloušťka spřažené desky
$h_{\text{eq}}$	vážený průměr výšek oken ve všech stěnách
$h_{\text{fi}}$	výšková redukce betonu mezi pásnicemi
$h_i$	výška $i$ -tého okna
$h_{\text{net}}$	návrhová hodnota tepelného toku na jednotku plochy
$h_{\text{net},c}$	návrhová hodnota složky tepelného toku na jednotku plochy vlivem proudění
$h_{\text{net},d}$	návrhová hodnota tepelného toku na jednotku plochy prouděním a sáláním
$h_{\text{net},r}$	návrhová hodnota složky tepelného toku na jednotku plochy vlivem sálání
$h_s$	výška parapetu svislých otvorů
$h_w$	výška svislých otvorů, výška stojiny ocelového profilu
$\dot{h}$	tepelný tok na jednotku plochy povrchu
$\dot{h}_i$	tepelný tok na jednotku plochy povrchu vlivem $i$ -tého požáru
$\dot{h}_{\text{net}}$	čistý tepelný tok na jednotku plochy povrchu
$\dot{h}_{\text{net},c}$	čistý tepelný tok na jednotku plochy povrchu vlivem proudění
$\dot{h}_{\text{ne},r}$	čistý tepelný tok na jednotku plochy povrchu vlivem sálání
$\dot{h}_{\text{tot}}$	celkový tepelný tok na jednotku plochy povrchu
$k$	součinitel (většinou s indexem), opravný součinitel
$k_{\theta}$	redukční součinitel pevnostních nebo deformačních vlastnosti v závislosti na teplotě materiálu $\theta$ ; $k_{\theta} = X_{k\theta} / X_k$
$k_b$	převodní součinitel materiálů ohraničujících požární úseky
$k_{c,\theta}$	redukční součinitel pro výpočet pevnosti betonu v tlaku $f_{c,\theta}$ při zvýšené teplotě
$k_{E,\theta}$	redukční součinitel modulu pružnosti při teplotě oceli $\theta_a$
$l, \ell$	délka
$m$	hmotnost; součinitel hoření
$\dot{m}$	rychlost pohybu plynů
$\dot{m}_{fi}$	rychlost vytváření produktů pyrolýzy
$\dot{m}_{\text{in}}$	rychlost plynu vstupujícího otvory

$\dot{m}_{out}$	rychlost plynu odcházejícího otvory
$q_{f,d}$	návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená na jednotku plochy
$q_{f,k}$	charakteristická hodnota hustoty požárního zatížení vztažená na jednotku plochy
$q_{t,d}$	návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená na jednotku plochy
$q_{t,k}$	charakteristická hodnota hustoty požárního zatížení vztažená na jednotku plochy
$r$	vodorovná vzdálenost mezi svislou osou požáru a bodem u stropu, pro který se počítá tepelný tok
$t$	čas v minutách, doba vystavení požáru, tloušťka
$t^*$	náhradní čas v hodinách zohledňující vliv otvorů a kvalitu povrchů, čas po iniciaci
$t_{fi,d}$	návrhová hodnota doby požární odolnosti
$t_{fi,req}$	požadovaná doba požární odolnosti
$t_i$	požární odolnost z hlediska tepelné izolace
$t_{lim}$	doba dosažení nejvyšší teploty plynů v případě požáru řízeného palivem
$t_{max}$	doba dosažení nejvyšší teploty plynů
$t_\alpha$	doba potřebná k dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW
$u$	obsah vlhkosti v ochranném materiálu v %, rychlost větru, rychlost proudění plynů ( $m \cdot s^{-1}$ )
$w_f$	šířka plamene; součinitel odvětrání
$w_i$	šířka $i$ -tého okna
$w_t$	součet šířek oken ve všech stěnách ( $w_t = \sum w_i$ ); součinitel odvětrání vztažený k celkové ploše ohraničujících konstrukcí $A_t$
$y$	součinitel
$z$	výška
$z'$	poloha virtuálního zdroje tepla ve svislém směru
$z_0$	virtuální počátek výšky $z$
$A$	plocha, plocha průřezu
$A_d$	návrhové hodnota mimořádného zatížení
$A_f$	plocha požárního úseku
$A_{fi}$	plocha požáru
$A_h$	plocha vodorovných otvorů ve střeše požárního úseku
$A_{h,v}$	celková plocha otvorů v konstrukcích ohraničujících požární úsek ( $A_{hv} = A_h + A_v$ )
$A_i / V_i$	součinitel průřezu $i$ -té části ocelového průřezu pro nechráněný prvek
$A_j$	plocha povrchu $j$ -té konstrukce ohraničující požární úsek, bez otvorů
$A_m$	plocha přímo ohřivaného povrchu prvku na jednotku délky
$A_m / V$	součinitel průřezu konstrukčního prvku
$A_{p,i} / V_i$	součinitel průřezu $i$ -té části ocelového průřezu (s obkladem po obvodě)
$CFD$	dynamika proudění tekutin (z angl. Computational Fluid Dynamics)
$C_i$	součinitel ochrany $i$ -té povrchové plochy prvku
$D$	hloubka požárního úseku; průměr ohně
$E$	modul pružnosti; účinek zatížení
$E_d$	návrhová hodnota účinku zatížení pro pokojovou teplotu
$E_{fi,d}$	návrhová hodnota účinku zatížení za požáru nezávislý na čase
$E_{fi,d,t}$	časově nezávislá návrhová hodnota účinku zatížení za požáru
$E_{fi,d,t}$	návrhový účinek zatížení, včetně nepřímých požárních zatížení, za požáru v čase $t$
$G_k$	charakteristická hodnota stálého zatížení
$H$	vzdálenost mezi zdrojem požáru a stropem, výška požárního úseku
$H_u$	čistá výhřevnost včetně vlhkosti
$H_{u0}$	čistá výhřevnost suchého materiálu
$H_{ui}$	čistá výhřevnost $i$ -tého materiálu
$HRR$	rychlost uvolňování tepla
$HRRPUA$	rychlost uvolňování tepla na metr čvereční
$K$	Kelvin, odporový součinitel průtoku hlavice sprinkleru ( $l \cdot \min^{-1} \cdot \text{bar}^{-1/2}$ )
$L$	délka, rozpětí, systémová délka

$L_f$	délka plamene podél osy
$L_H$	vodorovný průmět
$L_h$	vodorovná délka plamene
$M$	ohybový moment
$MKP$	metoda konečných prvků
$M_{k,i}$	množství $i$ -tého hořlavého materiálu
$M_{Rd}$	návrhová hodnota momentové únosnosti při pokojové teplotě
$M_{Sd}$	návrhová hodnota působícího momentu při pokojové teplotě
$N_{b,fi,t,Rd}$	návrhová hodnota vzpěrné únosnosti za požáru v čase $t$
$N_{Ed}$	návrhová hodnota působící síly při pokojové teplotě
$N_{fi,\theta,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti taženého prvku při rovnoměrném rozdělení teploty v průřezu
$N_{fi,cr}$	pružná kritická síla (= Eulerova síla) za požáru
$N_{fi,Ed}$	návrhová hodnota osově síly za požáru
$N_{fi,pl,Rd}$	návrhová hodnota plastické únosnosti v tlaku celého spřaženého průřezu za požáru
$N_{fi,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti prvku v tlaku (= vzpěrná únosnost) za požáru
$N_{fi,Sd}$	návrhová hodnota osově síly za požáru
$N_{fi,t,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti taženého prvku při nerovnoměrném rozložení teploty v čase $t$
$N_{pl,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti taženého prvku při pokojové teplotě
$Q$	rychlost uvolňování tepla za požáru
$\dot{Q}$	rychlost uvolňování tepla, kW
$\dot{Q}_0$	referenční rychlost uvolňování tepla (1 000 kW)
$\dot{Q}_{act}$	rychlost uvolňování tepla v čase aktivace sprinkleru (kW)
$\dot{Q}(\Delta t)$	snížení rychlosti uvolňování tepla (kW) v čase $\Delta t$
$O_{lim}$	redukovaný koeficient otvorů vlivem odvětrání
$Q^*_D$	součinitel uvolňování tepla vztažený na průměr $D$ lokálního požáru
$Q^*_H$	součinitel uvolňování tepla vztažený na výšku $H$ požárního úseku
$Q_c$	část rychlosti uvolňování tepla $Q$ prouděním
$Q_{fi,k}$	charakteristická hodnota požárního zatížení
$Q_{fi,k,i}$	charakteristická hodnota požárního zatížení $i$ -tým materiálem
$Q_k$	charakteristická hodnota proměnného zatížení
$Q_{k,1}$	charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení
$Q_{max}$	největší rychlost uvolňování tepla
$R$	únosnost, konstanta ideálního plynu (= 287 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$R_{XX}$	kritérium únosnosti pro $XX$ minut při zatížení podle nominální normové teplotní křivky
$R_d$	návrhová hodnota únosnosti prvku při pokojové teplotě
$R_{fi,d,t}$	návrhová hodnota únosnosti za požáru v čase $t$
$RHR$	rychlost uvolňování tepla
$RHR_f$	největší rychlost uvolňování tepla na metr čtvereční
$RTI$	součinitel času odezvy (Response Time Index) (m·s) <sup>1/2</sup>
$T$	teplota v K; tahová síla
$T_0$	počáteční teplota v K (= 293 K)
$T_w$	teplota plamene u okna v K
$T_z$	teplota plamene podél jeho osy v K
$V$	objem prvku na jednotku délky
$V_{fi,t,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti ve smyku při nerovnoměrném rozložení teploty v čase $t$
$V_i$	objem $i$ -té části ocelového průřezu na jednotku délky v m <sup>3</sup> /m
$V_{pl,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti ve smyku neoslabeného průřezu při pokojové teplotě
$W$	šířka stěny s okny, průřezový modul
$W_1$	šířka stěny 1, u které se předpokládá největší plocha oken
$W_2$	šířka stěny požárního úseku, kolmé ke stěně 1
$W_c$	šířka jádra plamene
$X_{d,fi}$	návrhová hodnota pevnostních nebo deformačních vlastností materiálu za požáru

$X_k$	charakteristická hodnota pevnostních nebo deformačních vlastností materiálu při pokojové teplotě
$X_{k,\theta}$	charakteristická hodnota pevnostních nebo deformačních vlastností materiálu při teplotě $\theta$
$\alpha$	úhel, koeficient rozvoje požáru ( $\text{kW}\cdot\text{s}^{-2}$ )
$\alpha_c$	součinitel přestupu tepla prouděním
$\alpha_h$	poměr vodorovných ploch otvorů ku podlahové ploše požárního úseku
$\alpha_{\text{slab}}$	součinitel zohledňující předpoklad pravouhlého rozdělení napětí při návrhu desky
$\alpha_v$	poměr svislých ploch otvorů ku podlahové ploše požárního úseku
$\delta$	excentricita
$\delta_{ni}$	součinitel aktivní požární ochrany
$\delta_{q1}$	součinitel nebezpečí vzniku požáru vzhledem k velikosti úseku
$\delta_{q2}$	součinitel nebezpečí vzniku požáru vzhledem k druhu provozu
$\beta$	rychlost zuhelnatění
$\gamma$	součinitel
$\gamma_G$	dílčí součinitel stálého zatížení
$\gamma_{GA}$	dílčí součinitel stálého zatížení pro mimořádnou návrhovou situaci
$\gamma_{Q,1}$	dílčí součinitel proměnného zatížení
$\gamma_{M,fi}$	dílčí součinitel materiálu za požáru
$\gamma_{M,fi,a}$	dílčí součinitel pro konstrukční ocel za požáru
$\gamma_{M,fi,c}$	dílčí součinitel pro beton za požáru
$\gamma_{M,fi,s}$	dílčí součinitel pro výztuž za požáru
$\gamma_{M,fi,v}$	dílčí součinitel pro spřahovací trny za požáru
$\gamma_Q$	dílčí součinitel nahodilého zatížení
$\gamma_v$	dílčí součinitel pro spřahovací trn pro návrh při pokojové teplotě
$\gamma_{M1}$	dílčí součinitel materiálu pro únosnost při vzpěru
$\varepsilon$	poměrné protažení, součinitel
$\varepsilon_a$	poměrné protažení ocelového profilu sloupu
$\varepsilon_{a,\theta}$	poměrné protažení ocelového profilu sloupu za požáru
$\varepsilon_{ae,\theta}$	mezní poměrné protažení za požáru
$\varepsilon_{amax,\theta}$	poměrné protažení na mezi kluzu za požáru
$\varepsilon_{ap,\theta}$	poměrné protažení na mezi úměrnosti za požáru
$\varepsilon_{au,\theta}$	mezní poměrné protažení pro mez kluzu
$\varepsilon_c$	poměrné protažení betonu sloupu
$\varepsilon_{ce,\theta}$	poměrné protažení betonu při zvýšené teplotě
$\varepsilon_f$	fiktivní emisivita plamenů
$\varepsilon_m$	emisivita povrchu
$\varepsilon_{p,\theta}$	poměrné teplotní přetvoření předpínací oceli
$\varepsilon_s$	poměrné protažení výztuže sloupu
$\varepsilon_{s,\theta}$	poměrné teplotní přetvoření betonářské oceli
$\varepsilon_{s,fi}$	poměrné přetvoření betonářské nebo předpínací oceli při teplotě $\theta$
$\varphi_{a,\theta}$	redukční součinitel pro ocelový profil, závisející na vlivu namáhání od teploty
$\varphi_{c,\theta}$	redukční součinitel pro beton, závisející na vlivu namáhání od teploty
$\varphi_{s,\theta}$	redukční součinitel výztuž, závisející na vlivu namáhání od teploty
$\kappa_1$	součinitel podmínek působení pro nerovnoměrné rozdělení teploty po průřezu
$\kappa_2$	součinitel podmínek působení pro nerovnoměrné rozdělení teploty po délce nosníku
$\lambda$	tepelná vodivost
$\lambda_a$	tepelná vodivost oceli
$\lambda_c$	tepelná vodivost betonu
$\lambda_p$	tepelná vodivost požárně ochranného materiálu
$\lambda_{0,fi}$	šťíhlost sloupu za požáru
$\bar{\lambda}_{\theta,\max}$	poměrná šťíhlost pro teplotu $\theta_{a,\max}$

$\eta$	součinitel, výtokový součinitel
$\eta_{fi}$	redukční součinitel účinku zatížení $\eta_{fi} = E_{d,fi} / E_d$
$\eta_{fi,t}$	redukční součinitel únosnosti $\eta_{fi,t} = R_{d,fi,t} / R_d$
$\theta$	teplota ve °C
$\theta_a$	teplota konstrukční oceli, teplota prvku dosažená v čase $t$
$\theta_{a,t}$	teplota oceli v čase $t$ , předpokládá se rovnoměrně rozdělená po všech částech průřezu
$\theta_{a,cr}$	kritická teplota ocelového prvku
$\theta_{a,max}$	maximální teplota prvku dosažená v čase $t$
$\theta_{a,com}$	teplota v tláčené pásnici prvku dosažená v čase $t$
$\theta_c$	teplota betonu
$\theta_{cr}$	kritická teplota konstrukčního prvku, kritická teplota betonářské výztuže
$\theta_d$	teplota teplotní pojistky (°C)
$\theta_g$	teplota plynů v příslušném požárním úseku ve °C (dříve značeno $T_N$ )
$\theta_m$	povrchová teplota prvku
$\theta_i$	teplota v části plochy $A_i$
$\theta_{im}$	mezní teplota
$\theta_{max}$	nejvyšší teplota
$\theta_r$	sálavá teplota okolí prvku
$\theta_s$	teplota výztuže
$\theta_v$	teplota spřahovacích trnů
$\theta_w$	teplota stojiny
$\theta_0$	počáteční teplota plynů před požárem ve °C (v soustavě českých norem se značilo $T_0$ )
$\mu_{fi}$	stupeň využití za požáru; $\mu_{fi} = N_{Ed,fi} / N_{Rd}$
$\mu_0$	stupeň využití v čase $t = 0$
$\zeta$	součinitel
$\rho$	hustota, hustota vody ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$\rho_a$	hustota oceli
$\rho_c$	hustota betonu
$\rho_p$	hustota požárně ochranného materiálu
$\sigma$	napětí, Stephan-Boltzmannova konstanta ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ )
$\sigma_{a,\theta}$	napětí oceli při zvýšené teplotě
$\sigma_{c,\theta}$	tlakové napětí betonu při zvýšené teplotě
$\sigma_{c,fi}$	tlakové napětí betonu za požáru
$\sigma_{s,fi}$	napětí ve výztuži za požáru
$\tau_F$	doba volného hoření ohně (předpokládá se 1 200 s)
$\tau$	časová konstanta
$\chi$	součinitel vzpěrnosti při pokojové teplotě
$\chi_i$	součinitel vzpěrnosti za požáru
$\chi_{LT,fi}$	součinitel příčné a torzní stability za požáru
$\chi_z$	součinitel vzpěrnosti při vybočení kolmo k ose z
$\psi_{0,1}$	součinitel kombinace charakteristické hodnoty proměnného zatížení
$\psi_{1,1}$	součinitel kombinace časté hodnoty proměnného zatížení
$\psi_{2,1}$	součinitel kombinace kvazistálé hodnoty proměnného zatížení
$\psi_{fi}$	součinitel kombinace za požáru, buď $\psi_{1,1}$ nebo $\psi_{2,1}$
$\phi$	součinitel jímavosti tepelné izolace
$\Delta l$	prodloužení
$\Delta l/l$	poměrné prodloužení (od teploty)
$\Delta t$	časový interval, rozdíl mezi časem po aktivaci sprinkleru a časem jeho aktivace, $\Delta t = t - t_{act}$ (s)
$\Delta\theta_{a,t}$	zvýšení teploty ocelového nosníku během časového intervalu $\Delta t$
$\Delta\theta$	zvýšení teploty během časového intervalu $\Delta t$
$\Delta\theta_{ea}$	rozdíl mezi otevírací teplotou a teplotou okolního prostředí

$\Phi$	polohový faktor
$\Gamma$	součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů
$\Gamma_{\text{lim}}$	součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů pro požár řízený palivem

## Indexy

a	konstrukční ocel
b	šířka
c	proudění, beton, tlak
cr, crit	kritický
d	návrhový
D	pro průměr
ef, eff	účinný
f	pásnice, při požáru, požární úsek
fi	požár, návrh na účinky požáru
g	plynu
h	vodorovný
H	pro výšku
char	zuhelnatění
ins	izolace
k	charakteristický
lim	mezní
max	největší
mean	průměrná hodnota
min	nejmenší
mod	modifikační
n	návrh pro pokojovou teplotu
net	čistý
p	deska, ochranný
pr	ochranný
r	zbytkový, sálání
req	požadovaný
s	výztuž
sh, shadow	zastínění
t	v čase $t$
ten	v tahu
tot	celkový
w	svar
0	základní hodnota
05	pěti procentní
20°C	při pokojové teplotě
$\theta$	při teplotě $\theta$ , při zvýšené teplotě

### Poznámka:

Teplota ve °C se v evropských normách většinou značí  $\theta$  a teplota v K se značí  $T$ .

## Úvod

V požární bezpečnosti se již řadu let konstrukce navrhují pomocí tabulek, analytických a diskrétních modelů. V úzkém rozsahu použití přináší tabulky přesné řešení, které zohledňuje konkrétní experimentální poznání, rizika jsou v použití mimo meze dané experimenty. Analytické modely se v praxi osvědčily v řadě oblastí. Jejich princip spočívá v převedení řešení na jednoduchý analyticky uchopitelný vztah. V požární bezpečnosti budov je použití omezeno složitostí problematiky jen na některé případy, např. předpověď teploty lokálními požáry nebo přestup tepla do prvku ocelové konstrukce. Rozvoj výpočetní techniky umožnil diskretizaci výpočtů pokročilými modely ve všech inženýrských disciplínách. Ve stavební praxi především při řešení požární problematiky, která je jednou z nejsložitějších.

Velké katastrofické požáry přinesly společnosti poučení, zájem o poznání a jeho implementaci. Příkladem dobré praxe je zpráva a poučení z tragédie zřícení budov WTC v New Yorku (FEMA, 2005), která je významným dokladem možností pokročilých modelů a impulzem k jejich širší aplikaci. Výzvy pro USA jsou rozpracovány v 29. a 30. bodě poučení z katastrofy. Je doloženo, že využití pokročilého modelování v oblasti požární bezpečnosti je jediná cesta k zajištění spolehlivosti budov, které využívají možností současných materiálů a konstrukčních řešení.

Nedílnou součástí modelů je ověření jejich správnosti. U modelů, které matematickými vztahy rozšiřují oblast platnosti experimentů, je ověření zřejmé z vlastního řešení. Analytické modely je třeba validovat a určit oblast jejich platnosti. Na základě dobré praxe inženýři intuitivně extrapolovali rozsah jednoduchých modelů. Numerické diskrétní modely jsou k dispozici již od sedmdesátých let minulého století. Ve všech oblastech použití pro ně byly vypracovány metodiky, které zajišťují jejich správnou aplikaci. Metodiky jsou připraveny i pro modely v požární bezpečnosti. Vzhledem k tomu, že v Evropské unii je bezpečnost řešena jednotlivými státy samostatně, vznikla a stále se rozvíjí podpora ověřování kvality modelů na národních úrovních.

V České republice se na problematiku implementace pokročilých modelů zaměřil projekt VI20162019034: Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb. Předložená práce přispěla k řešení projektu přípravou dvou kapitol do monografie projektu Cábová K., Hasalová L., Apeltauer T., Kučera P. a Wald F. Ověřování modelů v požární bezpečnosti, ISBN 978-80-01-06616-4, on line ISBN 978-80-01-06620-1 a přípravou certifikované metodiky Cábová K., Kožich M. a Apeltauer T. Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů, 2019.

## 1 Modely v požární bezpečnosti konstrukcí

V dílčích oblastech požární bezpečnosti staveb lze použít zjednodušené a pokročilé metody posuzování. Zjednodušené postupy (empirické výrazy) využívají jednoduché výpočty pomocí matematických rovnic, které lze řešit ručně nebo např. v tabulkových procesorech, a přímé hodnocení pomocí tabulkových hodnot. Tyto postupy jsou často uvedeny v normách. V oblasti modelování požáru se jedná např. o nominální teplotní křivky, a jednoduché modely přirozeného požáru jako jsou parametrické teplotní křivky a modely lokálního požáru. V oblasti posuzování konstrukcí lze zahrnout výpočet přestupu tepla do konstrukce pomocí přírůstkové metody, hodnocení požární odolnosti konstrukce pomocí kritické teploty a pomocí únosnosti se zohledněním redukce materiálových vlastností a redukce mechanického zatížení či hodnocení pomocí tabulek. V oblasti evakuace pak posouzení evakuační doby dle jednoduchých empirických vztahů. Pokročilé postupy zahrnují deterministické modely, které jsou založeny na fyzikální a chemické podstatě řešeného děje či principech teoretické mechaniky. Matematické řešení dějů popsaných formou parciálních diferenciálních rovnic vyžaduje využití specializovaných softwarových nástrojů. V oblasti modelování požáru se jedná o zónové modely a dynamické modely tekutin (CFD modely – z angl. Computational Fluid Dynamics, modely typu pole). V oblasti posuzování konstrukcí o modelování přestupu tepla do konstrukce a modelování chování konstrukce metodou konečných prvků (MKP modely). Tento postup si vyžaduje zavedení pokročilých materiálových modelů. V oblasti evakuace osob se jedná o behaviorální agentní modely, které popisují každou osobu jako samostatnou entitu (agenta). Chování skupiny osob je pak určeno vzájemnými interakcemi jednotlivých agentů mezi sebou. V některých situacích je žádoucí aplikovat agentní modely s behaviorálními vlastnostmi, které jsou schopny reprodukovat psychologické a sociologické aspekty evakuačního procesu.

V současné době neexistuje v českém legislativním prostředí žádný dokument, který by doporučoval, jak v dílčích oblastech požární bezpečnosti staveb postupovat. Zpracovatel dokumentace je zodpovědný za volbu vhodného postupu, správné aplikace a správnosti výsledků. Posuzovatel pak hodnotí přijatelnost této volby, aplikace na daný problém, způsob řešení a výsledky.

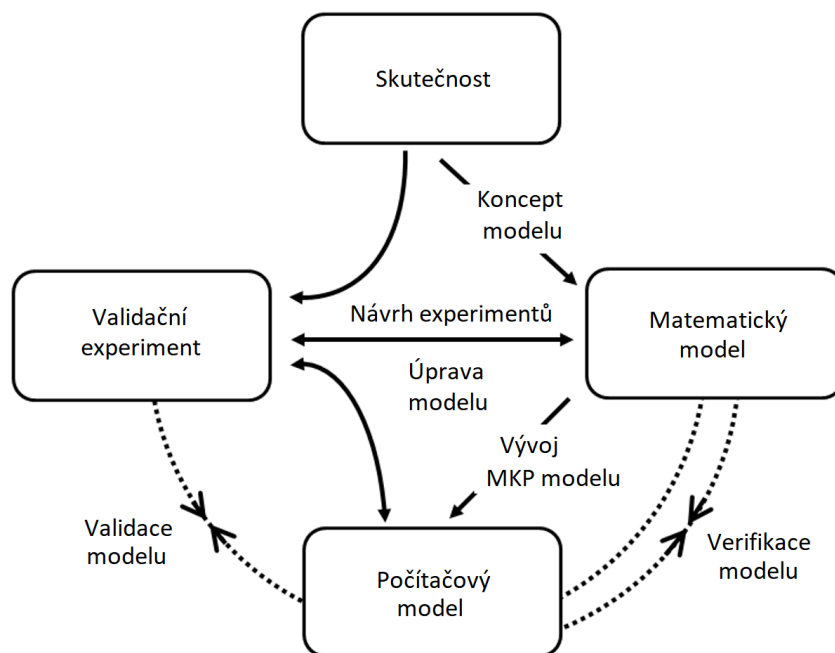


## 2 Ověřování modelů

### 2.1 Verifikace a validace

Základem spolehlivých výsledků při hodnocení požární bezpečnosti staveb je správné použití principů verifikace a validace (ASME, 2012). V oblasti evakuačních modelů se využívá rovněž kalibrace.

V pracích o konečných prvcích a dynamické analýze plynů autoři přikládají velkou váhu verifikačním příkladům pro ověření správného použití modelů i ověření správnosti popisu jevů. Existuje více názorů, jak by měly být studie rozvíjeny, jak složité by měly být teoretické či praktické otázky, a zda by příklady určené pro ověřování měly odkazovat pouze na analytická a numerická řešení nebo i experimentální data. Některé z těchto otázek souvisí s rozdíly mezi verifikací a validací. Pomocí verifikace se výpočetní řešení porovnává s přesnými analytickými nebo numerickými referenčními řešeními a mezi sebou. Procesem verifikace má být poskytnut důkaz, že matematické modely jsou správně implementovány a že numerické řešení je správné vzhledem k matematickému modelu (NFPA, 2015), zatímco validací se porovnává numerické řešení s údaji fyzicky naměřenými v kontrolovaných podmínkách (experimentálními daty). Proces validace je kontrola, která odhalí možné chyby a odhaduje přesnost simulace (ISO 16730-1: 2015). Validace může být rozdělena do tří kroků: detekce významných nesrovnalostí modelu, odstranění a snížení odstranitelných a nevyhnutelných chyb, vyhodnocení nejistot výsledků. Proces verifikace a validace je znázorněn na obr. 1.



Obr. 1 Proces verifikace a validace (Kwasniewski, 2009)

Podle (AIAA, 1998) lze příklad ověřit porovnáním shody mezi numerickým řešením a čtyřmi verifikačními postupy analytickými, přesným numerickým, algebraickým nebo diferenciálním postupem a experimentem (Oberkampf a Trucano, 2002). Na rozdíl od numerických řešení připravených pro fázi validace představují numerická řešení pro verifikaci matematické modely s malým fyzickým významem (AIAA, 1998). Numerickým modelům pro srovnání mezi analytickými a numerickými modely předchází jejich validace (ASME, 2012).

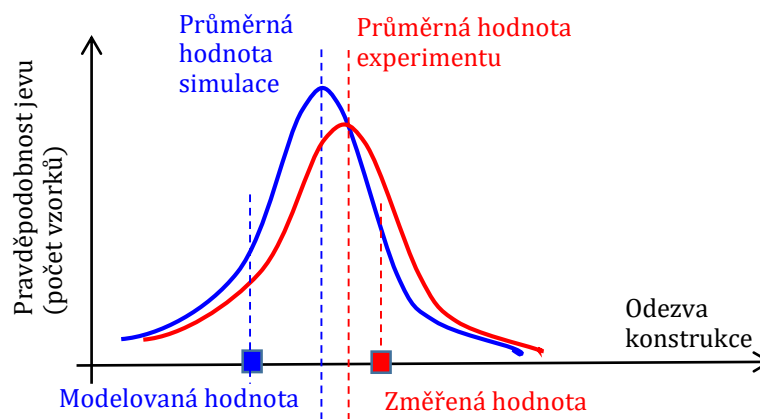
S rostoucím využitím matematických modelů roste i počet odborných článků, technických publikací či norem popisující možnosti využití, metodiku, verifikační a validační postupy těchto modelů. Např. vybrané kapitoly z (NFPA, 2008) a SFPE Handbook (Hurley, 2016) popisují využití matematických modelů požáru. Metodiku aplikace matematických modelů požáru lze nalézt v několika normách řady ASTM. Mezinárodní technické normy ISO 16730-1:2015, ISO 16730-2:2013, ISO 16730-3:2013, ISO 16730-4:2013 stanovují rámec pro verifikaci a validaci všech typů výpočetních metod použitých jako nástroj požární bezpečnosti staveb určením specifických postupů a požadavků pro tento účel. Postupy jsou uvedeny pro zónový požární model (část 2 normy ISO 16730), pro výpočetní dynamiku tekutin (část 3 normy ISO 16730) a pro model požární odolnosti konstrukce (část 4 normy ISO 16730). Z významných odborných publikací, které se věnují aplikaci matematických modelů, verifikačním a validačním postupům lze uvést (Hostika, 2008), (Mok a Chow, 2004), (McGrattan a Myers, 2011), (Van Hees a kol., 2009), (Rein a kol., 2009), (Chow a kol., 2009), (Byström a kol., 2012) a další. Velký přínos k ověřování matematických modelů požáru měly i události související s tragickými požáry, např. požár World Trade Centre (Shyam-Sudner a kol., 2005) and (Lu a Jianjing, 2002) nebo požár v Station Nightclub (Grosshander a kol., 2005), či méně známé události publikované v (Liu a kol., 2014), (Overholt a kol., 2014), (Yuen a kol., 2014) a (Molkens a Rossi, 2020). V případě dobře zdokumentovaných událostí a postupů simulace je možné tyto publikace využít i jako validační příklady. K validaci modelů lze použít také studie zabývající se problematikou zjišťování příčin požáru (Folic et al, 2002), (Shen a kol., 2008), (Horová a kol., 2015), (Osman a kol., 2017), (Suvar a kol., 2020), (Kodur a kol., 2020).

V českém prostředí se aplikaci, metodice a ověřování matematických modelů věnují převážně certifikované metodiky a výzkumné zprávy. Např. Metodika pro specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství (Kučera a Pokorný, 2014) zpracovaná v rámci výzkumného projektu VG20122014074: Specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství, Metodika využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb (Apeltauer a kol., 2019) a Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů (Cábová a kol., 2019) zpracované v rámci výzkumného projektu VI20162019034: Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb, nebo výzkumná zpráva Počítačové

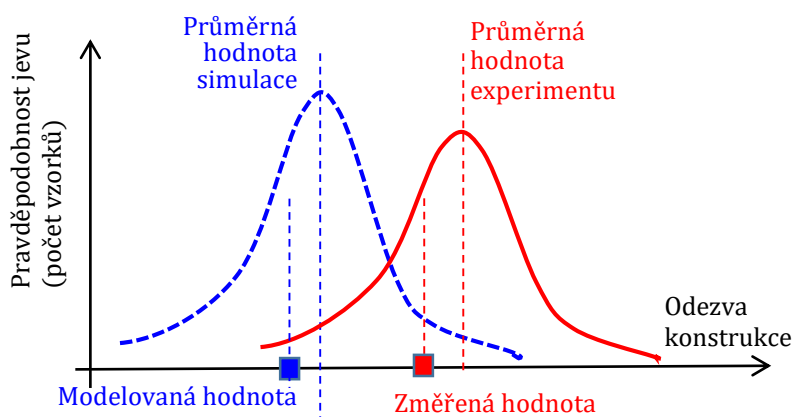
modelování vybraných požárů a scénářů hašení požárů (GŘ HZS ČR TÚPO, 2015). Z odborných publikací se matematickými modely a jejich aplikaci a ověřování zabývají (Kučera a kol., 2009), (Kučera a Kaiser, 2007), (Kučera a kol., 2013) a monografie (Cábová a kol., 2019).

## 2.2 Validace

Pravděpodobnostní rozdělení výsledků experimentů výrazně ovlivňuje validaci každého modelu. Obr. 2 a obr. 3 popisují případ, ve kterém se při deterministickém řešení vybere dvojice hodnot představující odezvu. Experimentální data mají stochastickou povahu a popisují se pravděpodobnostní distribuční křivkou. Pro úplné porovnání je třeba výsledky prezentovat pravděpodobnostním způsobem s využitím pravděpodobnostní distribuční křivky. Počítá se opakovaně s proměnou vybraných vstupních dat, která se mění podle simulace pravděpodobnosti. Takové rozsáhlé výpočty lze provádět automaticky pomocí specializovaných optimalizačních balíčků (např. LS-OPT®, HyperStudy® nebo ModeFrontier®), které jsou zahrnuty v dnešních komerčních výpočetních systémech. Obr. 2 ukazuje případ, kdy číselný model velmi dobře předpovídá experiment s rozložením pravděpodobnosti v blízkosti zvoleného experimentu. Obr. 3 představuje opačnou situaci pro stejnou dvojici hodnot odezvy. Oba obrázky ukazují, že deterministické srovnání pouze dvou veličin může být problematické. Nemusí vypovídat o prediktivních schopnostech numerického modelu (Wang a kol., 2012).



Obr. 2 Příklad pravděpodobnostního porovnání numerického řešení a experimentu, které ukazuje dobré prediktivní schopnosti modelu



Obr. 3 Příklad pravděpodobnostního porovnání numerického řešení a experimentu, které dokládá špatné prediktivní schopnosti numerického modelu

### 2.3 Kalibrace

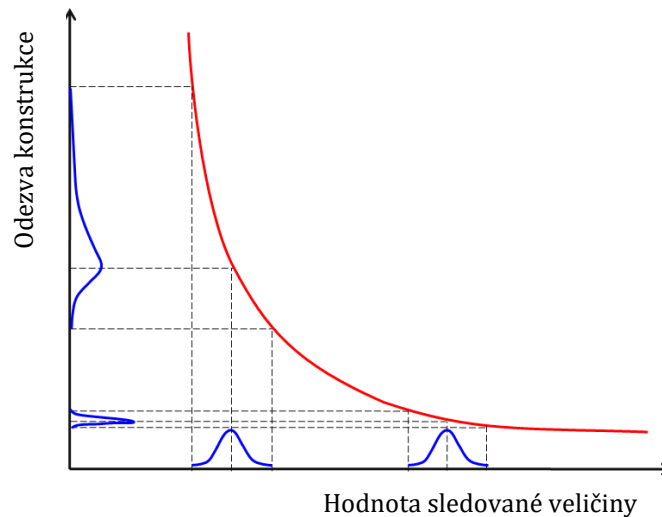
Chování materiálu se do výpočtu zavádí materiálovým modelem, který popisuje mechanické a teplotní charakteristiky. Materiálový model je třeba kalibrovat tak, aby data ve vědecky orientovaném modelu odpovídala skutečně změřeným materiálovým hodnotám při experimentu a v návrhovém modelu odpovídala požadovaným charakteristickým hodnotám. V literatuře o verifikaci a validaci (Oberkampff a Trucano, 2002) je kalibrace modelu nepřijatelné řešení, kterého se je třeba při numerickém modelování vyvarovat. Kalibrace ve výpočtu znamená neodůvodněnou úpravu vstupních dat numerického modelu tak, aby se numerické výsledky posunuly blíže k experimentálním datům. Nesrovnalosti mezi experimentem a numerickou simulací mohou být způsobeny neidentifikovanými vstupními parametry. Manipulací se vstupními daty se generuje chybné řešení (Kwaśniewski a Bojanowski, 2015).

Zlepšit model kalibrací lze pouze v případě úplného stochastického popisu experimentálních dat při pravděpodobnostní analýze simulace úpravou fyzikálního modelu pomocí několika různých simulovaných událostí. Proto je kalibrace integrálně důležitým prvkem modelů evakuace, které mají z podstaty vždy stochastickou povahu. Jednotlivé parametry modelu se kalibrují tak, aby se jeho chování shodovalo s reálným chováním předlohy modelu. Vzhledem ke stochastické povaze modelu pohybu osob se upravují pouze parametry, které nejsou známy či změřeny.

### 2.4 Studie citlivosti

Studie citlivosti je nepostradatelnou částí ověřování modelu. Proměnné ve studii ověří citlivost na vstupy tak, aby bylo jasné, které jsou podstatné a jak, které mají přibližně lineární odezvu a které jsou zanedbatelné. Stejně jako u analytické studie vychází studie citlivosti numerických modelů z vícedimenzionální matice vstupních dat. Volí se jedna vstupní hodnota a pro ostatní se uvažuje hodnota střední.

Rozlišení odezvy systému závisí na rozdílu vstupních parametrů a jejich rozsahu. Při návrhu verifikačních příkladů je třeba brát v úvahu i nelinearitu reakce. Numerické experimenty se volí, aby přiměřená změna vstupních dat přinesla přiměřenou změnu odezvy systému. Obr. 4 přináší dva případy, kdy stejná odchylka ve vstupních datech způsobuje díky rozdílného rozložení odezvy rozdílné výsledky.



Obr. 4 Citlivost odezvy na změnu parametru (Kwaśniewski, 2009)

## 2.5 Verifikační příklad

V rámci verifikace se využívají tzv. ověřovací/verifikační příklady (angl. Benchmark Cases). Správný verifikační příklad má být jednoduchý a snadno pochopitelný (Gillie, 2009). Složitější příklad přináší méně spolehlivé ověření. Odpovědi na složité otázky, například pro pokročilé modely materiálu oceli nebo betonu, lze získat pouze numerickým řešením. Srovnání numerických řešení různých softwarových nástrojů ukazuje často neočekávaný nesoulad mezi výsledky. Podobné výsledky se nepovažují za silný důkaz spolehlivosti řešení. Dvě různá numerická řešení lze porovnat pouze na základě analýzy citlivosti řešení na změnu hlavních vstupů při ověření citlivosti na velikost zvolené sítě (Wald a kol., 2014).

Pro zachování jednoduchosti nemusí verifikační příklad nutně vycházet z praktických otázek. Slouží k ověření výpočetních modelů, které řeší určitý jev. Kritická je volba modelu materiálu. Modely skutečných konstrukčních materiálů se všemi požadovanými nelinearitami umožňují pouze přibližná řešení. Najít vhodnou rovnováhu mezi jednoduchostí a praktickým uplatněním řešeného příkladu je obtížné. Vhodným řešením je hierarchický přístup. Připraví se soubor verifikačních příkladů, od jednoduchých příkladů s analytickým řešením po složitější příklady, které jsou již bližší praxi. Součástí verifikačního příkladu jsou úplná vstupní data, která jsou přehledně doložena. Všechny předpoklady jako jsou vlastnosti materiálu, okrajové podmínky, rozložení teploty, zatížení, velké/malé deformace a posunutí musí být jasně identifikovány. Pro validační příklady by měla být

pro srovnání s experimentem uvedena všechna měření a podrobný popis zkušebního postupu (Wald a kol., 2014).

Numerické verifikační příklady vždy obsahují studii citlivosti volby sítě, která prokáže asymptotickou konvergenci sledované veličiny. Na nejméně třech řešeních se dokládá vhodná přesnost zvoleného dělení na prvky. Pro výpočty metodou konečných prvků se doporučuje ověřit Grid Convergence Index (GCI), která využívá Richardsonovu extrapolaci (Roache, 1998). Při ověření lze využít i jiných prvků, např. prvků 3D pro ověření prvků 2D nebo prvků s integrací ve více bodech. U výpočtů metodou konečných objemů je studie citlivosti sítě rovněž neopomenutelnou částí ověření modelu.

Význam databází, které shromažďují dobře zdokumentované verifikační příklady pro zlepšení spolehlivosti numerických řešení, je doložen například v (Oberkampff a Trucano, 2008). Nejznámějším klasickým zdrojem je National Agency for Finite Element Methods and Standards (NAFEMS) s přibližně 280 verifikačními příklady (NAFEMS, 2013). Některé komerční programy jako jsou ANSYS a ABAQUS přináší sady dobře zdokumentovaných testů. Například ABAQUS poskytuje ve třech příručkách širokou škálu příkladů (včetně 93 z NAFEMS) od jednoduchých jednoprvkových testů až po složité inženýrské problémy validovaných experimenty (SIMULIA, 2011).

## 3 Bezpečnost konstrukcí

### 3.1 Zajištění bezpečnosti

Otázky týkající se bezpečnosti, včetně požární bezpečnosti, jsou v Evropské unii řešeny na národní úrovni a právní požadavky jsou určeny předpisy jednotlivých zemí. V kontextu Evropské unie jako celku jsou požadavky na požární bezpečnost založeny na nařízení EU č. 305/2011. Dokument Evropského parlamentu a Rady stanoví harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh jako základní požadavek na stavební práce. V příloze I této směrnice jsou shrnuty základní požadavky na konstrukční odolnost a stabilitu a požární bezpečnost. Stavební práce musí být navrženy a zhotoveny tak, aby v případě výskytu požáru byla zajištěna nosnost konstrukce po požadovanou dobu, bylo zabráněno rozvoji a šíření požáru a kouře uvnitř budovy, bylo zabráněno šíření požáru do sousedních nemovitostí, aby mohly osoby opustit budovu nebo se zachránit jinými možnostmi, a aby byla zajištěna bezpečnost při práci záchranných týmů.

Zatímco požadavky jsou národní, pro jejich zajištění se využívá mezinárodních znalostí v evropských/celosvětových experimentálních a návrhových normách. Požáry se považují za první mimořádné zatížení a požadavky na jejich modelování i obecné zásady pro použití pokročilých modelů jsou shrnuty v ČSN EN 1991-1-2: 2002. Přestup tepla do konstrukce a návrh konstrukce je předmětem jednotlivých materiálově orientovaných norem ČSN EN 199x-1-2: 200x. K problematice validace a verifikace v požárním navrhování se v Evropě i v zámoří připravují a do praxe zavádí národní normy, které vychází z mezinárodních norem ISO/TR 15656: 2003 a ISO 16730-1: 2015.

Současné návrhové normy využívají koncepcí mezních stavů ČSN EN 1990: 2015. Koncepcí umožňuje probabilisticky zajistit společensky tolerované riziko selhání navrhované konstrukce. Přednostně se využívají dílčí součinitele spolehlivosti, které pro levou stranu rovnice spolehlivosti, pro odezvu konstrukce od zatížení, zavádí dílčí součinitele spolehlivosti zatížení a pro pravou stranu, pro únosnost konstrukce, zavádí dílčí součinitele spolehlivosti materiálu a konstrukčních prvků. Lze využít i návrh úplným pravděpodobnostním výpočtem. Ten se obecně považuje za nejpresnější, ale také za nejpracnější i méně bezpečný. Pravděpodobnostní charakteristiky vstupů a jejich citlivost na návrh není známa a u složitých modelů může vést k nepřijatelným pochybením. Dílčí součinitele spolehlivosti zahrnují stoleté inženýrské poznatky praxe při rozvoji modelování.

### 3.2 Metoda dílčích součinitelů spolehlivosti

Většina národních i mezinárodních norem pro navrhování konstrukcí včetně evropských norem Eurokódu využívá metodu dílčích součinitelů v návaznosti na koncepci mezních stavů. Podstatou metody dílčích součinitelů je ověření, že konstrukce splňuje požadovanou podmínku spolehlivosti, např. podmínku, že odolnost konstrukce je větší než příslušný účinek zatížení. V podmínce pro zatížení  $F$  to jsou materiálové vlastnosti  $X$  a geometrické údaje a jejich příslušné návrhové hodnoty

$F_d$ ,  $X_d$  a  $a_d$ . Stanovené podmínky spolehlivosti musí být splněny ve všech návrhových situacích a vzhledem ke všem mezním stavům, tj. žádný mezní stav nesmí být překročen.

Návrhové hodnoty základních veličin  $F_d$ ,  $X_d$  a  $a_d$  jsou odvozeny na základě charakteristik těchto veličin, například charakteristických nebo reprezentativních hodnot, dílčích součinitelů  $\gamma$  a kombinačních součinitelů  $\psi$ , popřípadě dalších součinitelů. Součinitele  $\gamma$ ,  $\psi$  se nazývají prvky spolehlivosti (reliability elements). Pro prvky spolehlivosti jsou v Eurokódech uvedeny doporučené hodnoty i obecné vztahy vycházející z předchozích zkušeností, kalibračních studií a pravděpodobnostních metod teorie spolehlivosti. Ve skriptech (Studnička a kol., 2011) jsou uvedeny hodnoty doporučené technickou komisí TC 250 Evropské komise pro standardizaci CEN v normě ČSN EN 1990: 2015.

Metoda dílčích součinitelů přihlíží k vlivům různých nejistot základních veličin i k nejistotám chování konstrukcí právě prostřednictvím různých prvků spolehlivosti a charakteristik základních veličin. Pravděpodobnostní základy metody dílčích součinitelů umožňují efektivní kalibraci prvků spolehlivosti vzhledem k předchozím předpisům a zkušenostem, zobecnění praktických postupů pro ověřování spolehlivosti konstrukcí z nových materiálů i pro neobvyklé mezní stavy. V těchto případech, pro které nejsou zatím stanovena příslušná pravidla pro ověřování spolehlivosti, lze vycházet z obecných pokynů uvedených v ČSN EN 1990: 2015 nebo v mezinárodní normě ČSN ISO 2394: 2016. Oba dokumenty uvádí podklady postupů podle teorie spolehlivosti v metodě dílčích součinitelů a postupy kalibrace prvků spolehlivosti s využitím pravděpodobnostních metod.

### 3.2.1 Mezní stavy únosnosti

Zatížení působící v jednotlivých návrhových situacích, např. sněhem, větrem a seizmická zatížení, je třeba stanovit v závislosti na lokálních podmínkách. V souladu s koncepcí mezních stavů přijatou v Eurokódech i v mezinárodních normách ISO se při praktickém navrhování konstrukcí rozlišují dva základní druhy mezních stavů:

- mezní stavy únosnosti,
- mezní stavy použitelnosti.

Pro vybrané návrhové situace se stanoví kritické zatěžovací případy, při požárním navrhování požární scénáře. Zatěžovací případ určuje slučitelné uspořádání zatížení, souboru deformací a imperfekcí, které se mají uvažovat současně. Pro každý kritický zatěžovací případ musí být stanoveny návrhové hodnoty účinků.

### 3.2.2 Návrhové hodnoty geometrických údajů

Geometrické údaje jsou popsány charakteristickými hodnotami geometrických veličin, u imperfekcí přímo návrhovými hodnotami těchto odchylek. Charakteristické hodnoty geometrických veličin



obvykle odpovídají rozměrům uvedeným v projektu. Pokud je to třeba, mohou hodnoty geometrických veličin odpovídat předepsaným kvantilům příslušného statistického rozdělení.

### 3.2.3 Návrhové hodnoty vlastností materiálu

Vlastnosti materiálu jsou popsány charakteristickými hodnotami, které s předepsanou pravděpodobností nebudou podkročeny. Charakteristická hodnota určité vlastnosti odpovídá stanovenému kvantilu, obvykle s pravděpodobností 0,05, předpokládaného statistického rozdělení této vlastnosti v konstrukci. Materiálové vlastnosti se stanovují z normalizovaných zkoušek za stanovených podmínek. Někdy je nezbytné transformovat výsledky zkoušek na hodnotu, o které se předpokládá, že vystihuje skutečné chování materiálu v konstrukci. Pevnost materiálu může mít dvě charakteristické hodnoty, dolní a horní. Jestliže není dostatek informací o statistickém rozdělení určité vlastnosti, použije se nominální hodnota. Pokud překročení mezního stavu není významně citlivé na proměnlivost uvažované vlastnosti, lze za charakteristickou hodnotu považovat průměr. Charakteristické hodnoty materiálových vlastností  $X_k$  jsou uvedeny v přeslušných normách pro jednotlivé konstrukční materiály, tj. v ČSN EN 1992 až 1999. Návrhová hodnota vlastnosti materiálu nebo výrobku  $X_d$  se určí ze vztahu:

$$X_d \geq X_{rep} / \gamma_m \quad (1.1)$$

kde  $\gamma_m$  je dílčí součinitel materiálu podle příslušné normy, tj. ČSN EN 1992 až 1999, kterým se zohlední nepříznivé odchylky vlastnosti materiálu od její charakteristické hodnoty a náhodná část převodního součinitele,  $\eta$  je převodní součinitel vystihující účinek doby trvání zatížení, vliv objemu a rozměru, účinky vlhkosti, teploty atd.

### 3.2.4 Klasifikace zatížení

Zatížení, vlivy prostředí a v mnoha případech rovněž očekávané užitné vlastnosti konstrukce jsou obecně závislé na čase, umístění stavby a konkrétních podmínkách, ve kterých konstrukce působí. Tyto okolnosti se uvažují prostřednictvím vybraných návrhových situací charakterizujících určitý časový úsek, očekávaná nebezpečí, podmínky působení a odpovídající mezní stavy konstrukce. Při návrhu se berou v úvahu všechny okolnosti, při kterých se žádá, aby konstrukce plnila svou funkci, a podle toho je nutné stanovit příslušné návrhové situace. Vybrané návrhové situace musí být dostatečně přísné a obsahovat varianty zahrnující všechny předvídatelné podmínky, ve kterých se konstrukce během své výstavby a provozu může vyskytnout. V ČSN EN 1990: 2015 se rozlišují čtyři základní návrhové situace:

- trvalé návrhové situace, které se vztahují k podmínkám normálního používání konstrukce,
- dočasné návrhové situace, které se vztahují k dočasným podmínkám, např. během výstavby konstrukce nebo její opravy,

- mimořádné návrhové situace, které se vztahují k výjimečným podmínkám pro konstrukci a její provoz, např. při požáru, výbuchu, nárazu,
- seizmické návrhové situace, které se vztahují k výjimečným podmínkám pro konstrukci při seizmických jevech.

### 3.2.5 Návrhové hodnoty účinků zatížení

Návrhová hodnota zatížení  $F_d$  se vyjadřuje na základě reprezentativních hodnot zatížení  $F_{rep}$ , které jsou u stálých a mimořádných zatížení totožné s charakteristickými hodnotami, u proměnných zatížení rozeznávají tři reprezentativní hodnoty:

- kombinační hodnota daná součinem  $\psi_0 Q_k$  se používá při ověřování mezních stavů únosnosti a u nevratných mezních stavů použitelnosti,
- častá hodnota daná součinem  $\psi_1 Q_k$  se používá při ověřování mezních stavů únosnosti, u kterých se uplatňuje mimořádné zatížení, a při ověřování vratných mezních stavů použitelnosti, a
- kvazistálá hodnota daná součinem  $\psi_2 Q_k$  se používá při ověřování mezních stavů únosnosti, u kterých se uplatňuje mimořádné zatížení, a při ověřování vratných mezních stavů použitelnosti a dlouhodobých účinků.

Kombinační hodnoty souvisejí s použitím kombinací zatížení, ve kterých je snížena pravděpodobnost současného výskytu nepříznivých hodnot několika nezávislých zatížení. Častá hodnota je stanovena tak, že celková doba, ve které je tato hodnota přestoupena po dobu určitého časového intervalu, je pouze malou část tohoto intervalu (0,01). Kvazistálá hodnota je určena tak, že celková doba, ve které je tato hodnota během uvažovaného časového intervalu přestoupena, je významnou částí uvažovaného intervalu. V běžných případech se volí hodnota 0,5. Kvazistálá hodnota může být rovněž stanovena jako průměrná hodnota v uvažovaném časovém intervalu. U zatížení větrem a zatížení dopravou se kvazistálá hodnota zpravidla uvažuje nulová. Návrhová hodnota zatížení  $F_d$  se popisuje vztahem:

$$F_d \geq \gamma_f \cdot F_{rep} \quad (1.2)$$

kde  $\gamma_f$  je dílčí součinitel zatížení, kterým se přihlíží k možným nepříznivým odchylkám zatížení od reprezentativních hodnot.

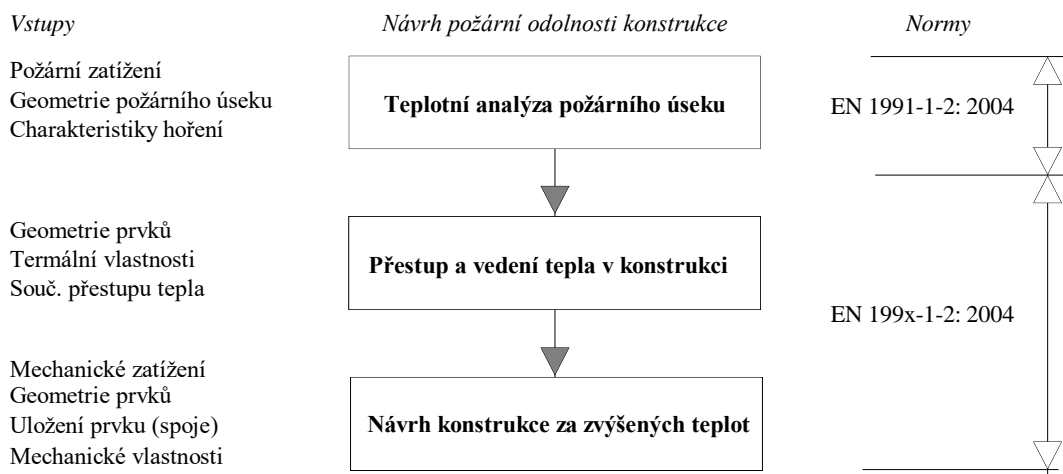
Zhodnocením požárního rizika se podle ČSN EN 1993-1-2: 2005 určí příslušné požární scénáře a pro ně návrhové požáry. Chování konstrukce závislé na čase a zatížení před mimořádnou situací se neuvažuje. Chování konstrukce po mimořádné situaci se uvažuje u staveb s velkými společenskými náklady na rekonstrukci, např. u tunelů. Pro každý návrhový požární scénář se stanoví návrhový požár v požárním úseku. Návrhový požár se současně uplatní pouze v jednom požárním úseku v budově, pokud není v návrhovém požárním scénáři stanoveno jinak. U konstrukcí, kde se

národními předpisy stanoví požadavky na požární odolnost konstrukcí, lze předpokládat, že příslušný návrhový požár je, pokud se nepočítá přesněji, dán normovým požárem.

### 3.3 Požární odolnost

Evropské normy ČSN EN 199x-1-2: 2004 umožňují návrh požární odolnosti konstrukcí. Postupně se řeší teplotní analýza požárního úseku, přestup tepla do konstrukce a vedení tepla v konstrukci a návrh konstrukce za vysokých teplot, viz obr. 5. Teplotní analýza je založena na popisu požárního zatížení, geometrii požárního úseku, vlastnostech ohraničujících konstrukcí a možnosti odvětrání. Návrh konstrukce za vysokých teplot řeší odezvu konstrukce na teplotní a mechanická zatížení (Schleich a kol, 1999).

Podle normy ČSN EN 1991-1-2: 2004 se teplotní analýza požárního úseku řeší dynamickou analýzou kapalin a plynů, zónovými modely podle přílohy D, které jsou založeny na energetické bilanci při hoření v požárním úseku, modely pro lokální požáry uvedenými v příloze C a parametrickými teplotními křivkami v příloze A. Zjednodušeně se teplota v požárním úseku odhaduje na nominální teplotní křivce pomocí ekvivalentní doby vystavení účinkům požáru dle přílohy F. Teplotní pole v blízkosti prvku lze uvažovat z maximálního účinku daného těmito modely požáru (Węgrzyński a Sulik, 2016).



Obr. 5 Hlavní části návrhu konstrukce za požární situace, vstupy do výpočtu a související evropské normy

Přestup tepla do konstrukce a rozvoj tepla v konstrukci závisí na materiálu. Řeší se zjednodušeně pomocí grafů a tabulek, přírůstkovými metodami a metodou konečných prvků. Pro ocelové konstrukce je přestup tepla do konstrukce shrnut v normě ČSN EN 1993-1-2: 2004 kap. 4.2.3 a pro hliníkové konstrukce dokumentu ČSN EN 1999-1-2: 2004 kap. 4.2.3. Kovy mají vysokou tepelnou vodivost a vliv šíření tepla v průřezu je možno zanedbat. Pro ocelobetonové konstrukce je v normě ČSN EN 1994-1-2: 2004 přestup tepla do konstrukce a šíření tepla uvažováno podle

jednotlivých průřezů, např. pro nosníky v kap. 4.3.4.2.2 a pro sloupy v příloze F2. Pro železobetonové konstrukce je rozložení teplot po průřezu řešeno na více úrovních přesnosti v Příloze A normy ČSN EN 1992-1-2: 2004. Hlavní výhodou dřevěných konstrukcí je nízká tepelná vodivost dřeva, součinitel tepelné vodivosti měkkého dřeva  $\lambda = 0,17 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Problematika rozložení teploty po průřezu je nahrazena modely zuhelnatění dřeva.

Výpočetní model konstrukčního systému pro návrh konstrukce za vysokých teplot má vystihovat očekávané chování konstrukce při požáru. Je možno uvažovat s modelem celé konstrukce, kde lze vhodně zohlednit namáhání od teploty. Při výpočtu celé konstrukce je třeba uvážit odpovídající způsob porušení pro zatížení požárem, tepelně závislé vlastnosti materiálů a tuhosti prvků, účinky teplotních roztažení a deformací, nepřímých teplotních zatížení. Místo návrhu celé konstrukce lze pro některé požární situace navrhnout konstrukci po přiměřených částech. K ověření požadavků požární odolnosti postačuje i návrh prvků. Model části konstrukce se sestaví s ohledem na očekávanou teplotní roztažnost a deformace tak, aby interakce s okolní konstrukcí mohla být aproximována časově nezávislými okrajovými podmínkami. Dále je třeba uvážit odpovídající způsob porušení při zatížení požárem, teplotně závislé vlastnosti materiálů, teplotní roztažnost a deformace, tj. uvažuje se s rozdílem teplot po průřezu. Okrajové podmínky, podpory a reakce části konstrukce lze pokládat za neměnné po dobu trvání požáru. Vnitřní síly a reakce pro čas  $t = 0$  je možné stanovit z výpočtu pro pokojovou teplotu. Zjednodušení modelů se liší podle jednotlivých materiálů.

### 3.3.1 Ověření požární odolnosti

Požární odolnost lze ověřit z hlediska času

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (1.3a)$$

kde  $t_{fi,d}$  je návrhová doba požární odolnosti,  $t_{fi,requ}$  požadovaná doba požární odolnosti; nebo z hlediska únosnosti

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (1.3b)$$

kde  $R_{fi,d,t}$  je návrhová hodnota únosnosti prvku při požáru v čase  $t$ ,  $E_{fi,d,t}$  návrhová hodnota příslušných účinků zatížení při požární situaci v čase  $t$ ; nebo z hlediska teploty

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d} \quad (1.3c)$$

kde  $\theta_d$  je návrhová hodnota teploty materiálu;  $\theta_{cr,d}$  návrhová hodnota kritické teploty materiálu.

Požadavky na konstrukci jsou vyjádřeny pomocí  $t_{fi,requ}$ ;  $E_{fi,d,t}$ ;  $\theta_{cr,d}$ . Předpovězená odolnost se značí jako  $t_{fi,d}$ ;  $R_{fi,d,t}$ ;  $\theta_d$ . Volba hlediska ověřování nemá na spolehlivost návrhu vliv. Požární specialisté upřednostňují posuzování konstrukcí z hlediska času, protože přímo ukazuje rezervy spolehlivosti konstrukce při požáru.

### 3.3.2 Mechanické zatížení při požáru

Mechanické zatížení při požáru  $E_d$  se stanoví podle obecného pravidla pro mimořádné návrhové situace, které je v normě ČSN EN 1990:2015 zachyceno symbolickým vztahem

$$E_d = E \{G_{k,j}; P; A_d; (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}) Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i}\} j \geq 1; i > 1 \quad (1.4)$$

kde symbol  $G_{k,j}$  označuje stálá zatížení,  $P$  předpětí,  $A_d$  mimořádné zatížení  $Q_{k,1}$  hlavní proměnné zatížení a  $Q_{k,i}$  označuje vedlejší proměnná zatížení. Součinitele  $\psi_{1,i}$  a  $\psi_{2,i}$  převzaté z normy ČSN EN 1990: 2015 pro častou a kvazistálou hodnotu proměnných zatížení jsou uvedeny v tab. 1. Kombinace zatížení v závorkách { } vztahu (1.4) lze vyjádřit výrazem

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \psi_{2,i} G_{k,j} \quad (1.5)$$

Podle obecných vztahů (1.4) a (1.5) platných pro všechny mimořádné situace se u hlavního proměnného zatížení  $Q_1$  umožňuje volba mezi častou hodnotou  $\psi_{1,1} Q_{k,1}$  a kvazistálou hodnotou  $\psi_{2,1} Q_{k,1}$  v závislosti na konkrétních podmínkách daného objektu. Pro mimořádnou situaci při požáru se v ČSN EN 1991-1-2: 2004 navrhuje kvazistálá hodnota  $\psi_{2,1} Q_{k,1}$ . V národní příloze ČSN EN 1991-1-2: 2004 se tato hodnota zpřesňuje a u některých objektů, zejména u halových konstrukcí, u nichž je zatížení sněhem nebo větrem hlavním proměnným zatížením, se doporučuje uvažovat častou hodnotu  $\psi_{1,1} Q_1$  místo kvazistálé hodnoty  $\psi_{2,1} Q_{k,1}$ . Uvedené zpřesnění bylo přijato z toho důvodu, že kvazistálé hodnoty těchto zatížení jsou nulové (podle tab. 1 pro zatížení sněhem a větrem je  $\psi_{2,1} = 0$ ) a byla obava, že by halové konstrukce při požáru nemusely být dostatečně spolehlivé.

Teplotní změny konstrukce při požáru se v závislosti na konstrukčním materiálu projeví účinky teploty na vlastnosti materiálu a jako nepřímá zatížení od teplotních změn. Změny teploty při požáru významně ovlivňují vlastnosti konstrukčních materiálů a zpravidla jsou hlavním součinitelem určujícím nosnou způsobilost konstrukcí. Účinky teploty redukují především pevnost popřípadě mez kluzu materiálu a přímo se uplatní při stanovení odolnosti konstrukce  $R$ . Nevstupují do obecných vztahů (1.4) a (1.5) pro výpočet účinků mechanických zatížení  $E$ . Vlivy teploty na vlastnosti konstrukčních materiálů jsou popsány v samostatných kapitolách x.2 pro jednotlivé materiály.

Tab. 1 Doporučené hodnoty součinitelů  $\psi$  pro pozemní stavby (ČSN EN 1990: 2015)

Zatížení	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Kategorie užitných zatížení pro pozemní stavby, viz (ČSN EN 1991-1-1: 2004)			
Kategorie A: obytné plochy	0,7	0,5	0,3
Kategorie B: kancelářské plochy	0,7	0,5	0,3
Kategorie C: shromažďovací plochy	0,7	0,7	0,6
Kategorie D: obchodní plochy	0,7	0,7	0,6
Kategorie E: skladovací plochy	1,0	0,9	0,8

Kategorie F: dopravní plochy, tíha vozidla $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6
Kategorie G: dopravní plochy, $30 \text{ kN} < \text{tíha vozidla} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Kategorie H: střechy	0	0	0
Zatížení sněhem, viz norma (ČSN EN 1991-1-3: 2004)*			
Finsko, Island, Norsko, Švédsko	0,7	0,5	0,2
Ostatní členové CEN, pro stavby umístěné ve výšce $H > 1000$ m n.m.	0,7	0,5	0,2
Ostatní členové CEN, pro stavby umístěné ve výšce $H \leq 1000$ m n.m.	0,5	0,2	0
Zatížení větrem, viz norma (ČSN EN 1991-1-4: 2004)	0,6	0,2	0
Teplota (ne od požáru) pro pozemní stavby, viz norma (ČSN EN 1991-1-5: 2004)	0,6	0,5	0

Poznámka: \*) Pro země, které zde nejsou uvedené, se součinitele  $\psi$  stanoví podle místních podmínek.

Nepřímá zatížení konstrukce v důsledku roztažení a přetvoření, způsobená teplotními změnami od požáru, vyvolávají síly a momenty, které se při výpočtu účinků zatížení podle obecných vztahů (1.4) a (1.5) berou v úvahu. Nepřímá zatížení od požáru se při výpočtu konstrukce neuvažují, pokud jsou zanedbatelná nebo příznivá, přihlíží se k nim konzervativními předpoklady výpočtu konstrukce a/nebo konzervativními požadavky na požární bezpečnost. Při rozboru vlivu nepřímých zatížení od požáru na nosnou způsobilost konstrukce se mají brát v úvahu vyvolaná teplotní roztažení prvků (např. sloupů ve vícepodlažních rámových konstrukcích s tuhými stěnami), rozdílná přetvoření staticky neurčitých prvků od teploty (např. spojitéch stropních desek), teplotní gradienty v průřezu vyvolávající vnitřní napětí, přetvoření přilehlých prvků od teploty (např. posun hlavic sloupů způsobený roztažením stropní desky nebo roztažením zavěšených kabelů) a teplotní roztažení prvků působících na prvky mimo požární úsek. Ostatní zatížení uvedená v kombinačních pravidlech (1.4) a (1.5) se uvažují podobně jako při návrhu pro pokojovou teplotu. Základním vodítkem je obecné pravidlo v ČSN EN 1990: 2015, že v kombinacích se uvažují pouze ta zatížení, která se mohou během požáru fyzicky vyskytnout. Reprezentativní hodnoty (redukované charakteristické hodnoty) proměnných zatížení se stanoví podle zásad uvedených v ČSN EN 1990: 2015. Případy, kdy vzhledem k tání není nutno uvažovat zatížení sněhem, se posuzují individuálně. Zatížení vznikající při výrobním procesu, např. brzdné síly jeřábu a snížení užitečného zatížení vlivem hoření se podle normy ČSN EN1991-1-2: 2004 neuvažují.

Současné působení požáru s dalším nezávislým mimořádným zatížením se obvykle neuvažuje. V závislosti na konkrétních podmínkách daného objektu se během požáru mohou uplatnit druhotná zatížení vyvolaná požárem, např. ráz vyvolaný zřícením nosného prvku nebo těžkých strojních vybavení. Při návrhu konstrukce se k těmto nepříznivým jevům přihlíží například tím, že se navrhnu požární stěny, které odolávají vodorovným rázům.

Postup návrhu zatížení lze ukázat na příkladu halového objektu s obchodními plochami, který je poněkud složitější. Necht' u nosného prvku je vítr  $Q_1$  hlavním zatížením a užitečné zatížení  $Q_2$  je vedlejší. Podle obecného vztahu (1.5) pro účinek zatížení při požáru platí:

$$E_{\bar{n},d} = G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \psi_{2,2} \cdot Q_{k,2} = G_k + 0,2 \cdot Q_{k,1} + 0,6 \cdot Q_{k,2} \quad (1.6)$$

Uvažování součinitele  $\psi$  plyne z tab. 1. Pro vítr se uvažuje častá hodnota,  $\psi_{1,1} = 0,2$ , pro užité zatížení kvazistálá hodnota, které u obchodních ploch odpovídá součinitel  $\psi_{2,2} = 0,6$ . Účinek zatížení při pokojové teplotě podle vztahu (6.10) v normě ČSN EN 1990: 2015 je:

$$E_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,2} \cdot Q_{k,2} = 1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q_{k,2} \quad (1.7)$$

Součinitel kombinační hodnoty  $\psi_{0,2}$  pro užité zatížení obchodních ploch je podle tab. 1 uvažován hodnotou  $\psi_{0,2} = 0,7$ .

### 3.3.3 Požární zatížení

#### Tepelný tok

Energie předávaná částicemi teplejšího tělesa částicím chladnějšího tělesa se nazývá tepelný tok. U pevných a kapalných látek se teplo přenáší vedením (kondukcí). V plynném prostředí se teplo sdílí prouděním (konvekci) a sáláním (radiací). Tepelné zatížení se udává čistým tepelným tokem  $\dot{h}_{\text{net}}$  dopadajícím na povrch prvku. Při přenosu tepla na plochu vystavenou účinkům požáru lze čistý tepelný tok  $\dot{h}_{\text{net}}$  rozdělit na části přenášené prouděním a sáláním:

$$\dot{h}_{\text{net}} = \dot{h}_{\text{net},c} + \dot{h}_{\text{net},r} \quad \text{ve W/m}^2 \quad (1.8)$$

Podle normy EN 1991-1-2: 2004 se návrhová hodnota tepelné pohltivosti povrchu prvku  $\dot{h}_{\text{net},d}$  stanovuje ze vztahu:

$$\dot{h}_{\text{net},d} = \gamma_{n,c} \cdot \dot{h}_{\text{net},c} + \gamma_{n,r} \cdot \dot{h}_{\text{net},r} \quad \text{ve W/m}^2 \quad (1.9)$$

kde  $\gamma_{n,c}$ ,  $\gamma_{n,r}$  jsou součinitele pro přepočítání národních zkoušek. V ČR se používá  $\gamma_{n,c} = 1,0$  a  $\gamma_{n,r} = 1,0$ . Složka tepelného toku sdílená prouděním se stanoví ze vztahu:

$$\dot{h}_{\text{net},c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad \text{ve W/m}^2 \quad (1.10)$$

kde  $\alpha_c$  je součinitel přestupu tepla prouděním ve  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ;  $\theta_g$  teplota plynů v blízkosti prvku vystaveného účinkům požáru ve  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta_m$  povrchová teplota prvku ve  $^{\circ}\text{C}$ . Na straně vystavení požáru se součinitel přestupu tepla prouděním  $\alpha_c$  uvažuje pro nominální teplotní křivku a křivku venkovního požáru  $\alpha_c = 25 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ; pro parametrické teplotní křivky, zónové modely a dynamickou analýzu plynů  $35 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ; pro uhlovodíkovou křivku  $50 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ . Na straně odvrácené od požáru se koeficient přestupu tepla prouděním  $\alpha_c$  uvažuje při sálání počítaném samostatně hodnotou  $4 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$  a při zahrnutí vlivu sálání hodnotou  $9 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ . Složka čistého sálavého tepelného toku na jednotku plochy se počítá jako:

$$\dot{h}_{\text{net},r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad \text{ve W/m}^2 \quad (1.11)$$

kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ . Emisivita požáru se uvažuje obecně jako  $\varepsilon_f = 1,0$ . Emisivita povrchu prvku se navrhuje konzervativně  $\varepsilon_m = 0,8$ . Pro uhlíkovou ocel lze počítat  $\varepsilon_m = 0,7$ , pro nerezové oceli  $\varepsilon_m = 0,4$ ; pro čistý povrch slitin hliníku  $\varepsilon_m = 0,3$  a pro hliníkové povrchy opatřené nátěry  $\varepsilon_m = 0,8$ . V případě prvků vystavených požáru ze všech stran lze dle zjednodušeného přístupu teplotu sálání  $\theta_r$  přibližně nahradit teplotou plynů  $\theta_g$  kolem tohoto prvku. Ve skutečnosti mohou být ale teplota sálání a teplota okolního plynu velice rozdílné. Vyšší radiační teplota vzniká na straně přivrácené požáru, nižší naopak na straně odvrácené nebo odstíněné konstrukčním prvkem. Problematika radiační teploty, teploty proudění a zavedení nového pojmu adiabatická teplota povrchu (ATP, ang. Adiabatic Surface Temperature, AST) je publikována Wickströmem v (Wickström, 2008) a (Wickström, 2011).

### Hustota požárního zatížení

Požární zatížení lze charakterizovat návrhovou hustotou  $q_{f,d}$ , která je definována jako:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad \text{v MJ/m}^2 \quad (1.12)$$

$q_{f,k}$  je hustota charakteristického požárního zatížení vztažená na podlahovou plochu  $A_f$  v MJ/m<sup>2</sup>,  $m$  součinitel hoření (u celulózových materiálů se předpokládá  $m = 0,8$ );  $\delta_{q1}$  součinitel, vyjadřující nebezpečí vzniku požáru v závislosti na velikosti požárního úseku, viz tab. 2, a  $\delta_{q2}$  součinitel, který zohledňuje nebezpečí vzniku požáru vlivem druhu provozu, viz tab. 3.

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni} \quad (1.13)$$

je součinitel, kterým se do výpočtu zavádí aktivní požární ochrana, tj. aktivní požárně bezpečnostní opatření a zařízení jako jsou samočinná hasicí zařízení, elektronická požární signalizace, detektory, hasičské jednotky aj., viz tab. 4. Pro běžnou požární ochranu, jako jsou bezpečné přístupové cesty, technické prostředky požární ochrany, zařízení pro odvod kouře ze schodišť, které mají být vždy k dispozici, se hodnoty  $\delta_{ni}$  v tabulce uvažují rovny 1,0. Pokud však běžná požární ochrana není předpokládána, uvažuje se hodnota  $\delta_{ni}$  rovna 1,5. Pokud jsou schodiště v případě požárního poplachu přetlakově větrána, lze součinitel  $\delta_{n8}$  z tabulky uvažovat roven 0,9. Vychází se z předpokladu, že jsou splněny požadavky příslušných evropských norem na výše uvedená zařízení.

Vliv součinitele aktivní požární ochrany  $\delta_n$  na průběh teploty při požáru v kanceláři o rozměrech 7 x 11 m s oknem o velikosti 1,3 x 9 m pro návrhovou hustotu požárního zatížení  $q_{f,k} = 511 \text{ MJ/m}^2$  je znázorněn na obr. 6. Křivky jsou vypočteny zónovým modelem v programu OZone V.2.2.



Tab. 2 Součinitel nebezpečí vzniku požáru velikostí požárního úseku  $\delta_{q1}$ 

Podlahová plocha úseku $A_f$ v $m^2$	25	250	2 500	5 000	10 000
Nebezpečí vzniku požáru $\delta_{q1}$	1,10	1,50	1,90	2,00	2,13

Poznámka: V tabulce lze mezilehlé hodnoty lineárně interpolovat.

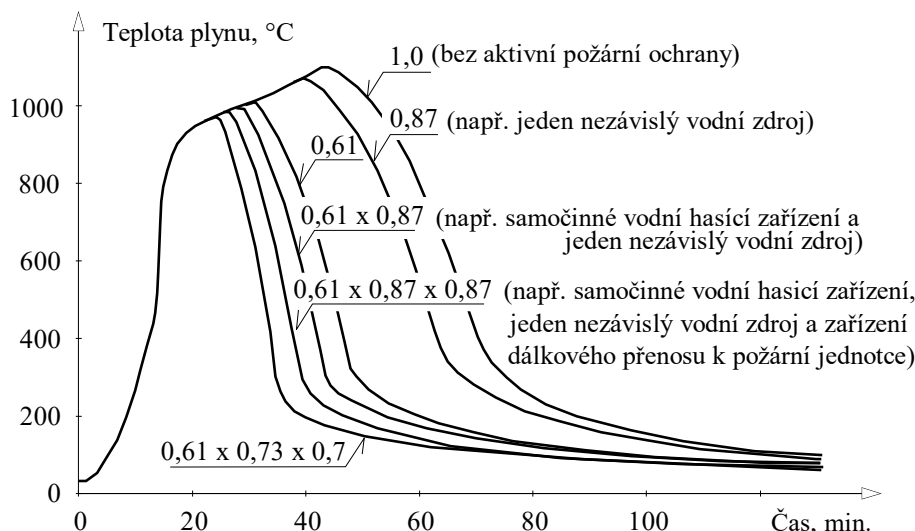
Tab. 3 Součinitel nebezpečí vzniku požáru vlivem druhu provozu  $\delta_{q2}$ 

Příklady provozu	Nebezpečí vzniku požáru $\delta_{q2}$
Umělecké galerie, muzea, bazény	0,78
Kanceláře, byty, hotely, papírenský průmysl	1,00
Výroba strojů a motorů	1,22
Chemické laboratoře, lakovny	1,44
Výroba zábavné pyrotechniky nebo barev	1,66

Tab. 4 Součinitel aktivní požární ochrany  $\delta_{ni}$ 

Aktivní požárně bezpečnostní opatření			$\delta_{ni}$
Samočinné hasicí zařízení	Samočinné vodní hasicí zařízení		$\delta_{n1}$ 0,61
	Nezávislé vodní zdroje	žádný	$\delta_{n2}$ 1,00
		jeden	$\delta_{n2}$ 0,87
		dva	$\delta_{n2}$ 0,70
Samočinné požární hlásiče	Elektrická požární signalizace	tepelné	$\delta_{n3}$ 0,87
		kouřové	$\delta_{n4}$ nebo 0,73
	Zařízení dálkového přenosu k požární jednotce		$\delta_{n5}$ 0,87
Manuální hašení požáru	Závodní požární jednotka		$\delta_{n6}$ 0,61
	Externí (veřejná) požární jednotka		$\delta_{n7}$ nebo 0,78
	Bezpečné přístupové cesty		$\delta_{n8}$ 0,9 nebo 1,0 nebo 1,5
	Technické prostředky požární ochrany		$\delta_{n9}$ 1,0 nebo 1,5
	Zařízení pro odvod kouře		$\delta_{n10}$ 1,0 nebo 1,5

Poznámka: V ČR se nezapočítává veřejná požární jednotka.



Obr. 6 Vliv aktivní požární ochrany na průběh teploty při požáru v kanceláři ( $q_{f,k} = 511 \text{ MJ/m}^2$ ) 7 x 11 m s oknem 1,3 x 9 m, řešeno programem OZone V.2.2

### Charakteristické požární zatížení

Požární zatížení lze stanovit z výhřevnosti hořlavých materiálů v požárním úseku nebo z hustoty požárního zatížení pro daný provoz. Charakteristické požární zatížení  $Q_{fi,k}$  se stanoví z hodnoty čisté výhřevnosti  $H_{ui}$  v MJ/kg pomocí vztahu:

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \psi_i = \sum Q_{fi,k,i} \text{ v MJ} \quad (1.14)$$

kde  $M_{k,i}$  je množství hořlavého materiálu v kg a  $\psi_i$  součinitel pro stanovení chráněného požárního zatížení. Pro materiál v nehořlavých požárně odolných obalech lze uvažovat  $\psi_i = 0$ . Hustota charakteristického požárního zatížení  $q_{f,k}$  na jednotku plochy je definována:

$$q_{f,k} = Q_{fi,k} / A \text{ v MJ/m}^2 \quad (1.15)$$

kde  $A$  je podlahová plocha,  $A_f$  plocha požárního úseku nebo referenčního prostoru, nebo vnitřní povrchová plocha a  $A_t$  plocha požárního úseku pro stanovení  $q_{f,k}$  nebo  $q_{t,k}$ . Stálá požární zatížení, u kterých se nepředpokládá změna během životnosti objektu, se mohou uvažovat hodnotami, které jsou výsledkem odborného rozboru. Proměnná požární zatížení, která se mohou během životnosti objektu měnit, se doporučují vyjádřit hodnotami, u nichž se očekává, že nebudou v 80 % doby překročeny (80 % kvantil).

Hodnoty čisté výhřevnosti se stanovují podle normy ČSN EN ISO 1716: 2003. Vliv vlhkosti materiálu lze uvažovat takto:

$$H_u = H_{u0} \cdot (1 - 0,01 \cdot u) - 0,025 \cdot u \text{ v MJ/kg} \quad (1.16)$$

kde  $u$  je vlhkost, vyjádřená jako procentní podíl hmotnosti v suchém stavu;  $H_{u0}$  hodnota čisté výhřevnosti suchého materiálu. Hodnoty čisté výhřevnosti některých pevných látek, kapalin a plynů jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Hodnoty čisté výhřevnosti  $H_u$  v MJ/kg hořlavých materiálů pro výpočet požárního zatížení

Hodnoty čisté výhřevnosti $H_u$ v MJ/kg pro hořlavé materiály			
Pevné látky	Dřevo		17,5
	Jiné celulóznové materiály	oděvy, korek, bavlna, papír, lepenka, hedvábí, sláma, vlna	20
	Uhlíkaté látky	antracit, dřevěné uhlí, uhlí	30
Chemické látky	Parafínová řada	methan, ethan, propan, butan	50
	Olefinová řada	ethylen, propylen, butylen	45
	Aromatická řada	benzen, toluen	40
	Alkohol	methanol, ethanol, ethylalkohol	30
	Paliva	benzin, petrolej, nafta	45
	Čisté uhlovodíkové plasty	polyethylen, polystyren, polypropylen	40
Ostatní výrobky	ABS (plast)		35
	Polyester (plast)		30
	Polyizokyanát a polyuretan (plast)		25
	Polyvinylchlorid, PVC (plast)		20
	Živice, asfalt		40
	Kůže		20
	Linoleum		20
	Gumové pneumatiky		30

Poznámka: Hodnoty uvedené v této tabulce neplatí pro výpočet energetického obsahu paliv.

Provozy lze klasifikovat podle hustoty požárního zatížení, vztahující se k podlahové ploše, a pro návrh využít její charakteristické hodnoty  $q_{i,k}$  v MJ/m<sup>2</sup>, jak uvádí tab. 6. Hodnoty hustoty požárního zatížení uvedené v tab. 6 jsou platné, je-li součinitel nebezpečí vzniku požáru vlivem druhu provozu  $\delta_{q2}$  roven jedné, viz tab. 3. Pravděpodobnost dosažení hustoty požárního zatížení lze ve výpočtech zohlednit pomocí 80% kvantilu Gumbelova rozdělení, viz normu ČSN EN 1993-1-2: 2004. Tímto rozdělením se popisuje pravděpodobnost nejvyšších hodnot, viz (Čermák, 1993). Distribuční funkci Gumbelova rozdělení:

$$F_X(x) = \exp[-\exp(-x)] \quad (1.17)$$

lze pro výpočet hodnoty v požadovaném kvantilu vyjádřit parametry  $\alpha$  a  $\mu$  ve tvaru:

$$F_X(x) = \exp[-\exp(-\alpha(x - \mu))]. \quad (1.18)$$

Pro kvantil, zde 80 %, lze funkci vyjádřit jako:

$$x_{0,8} = [-\ln(-\ln 0,8)]/\alpha + \mu. \quad (1.19)$$

Parametry funkce se určí ze vztahu:

$$\alpha = [-\ln(-\ln 0,8)] - 0,57722/(x_{0,8} - E_x), \quad (1.20)$$

respektive:

$$\mu = E_x - 0,57722/\alpha, \quad (1.21)$$

pro průměrnou hodnotu, která se vypočte jako:

$$E_x = \frac{0,57722}{\alpha} + \mu \quad (1.22)$$

Tab. 6 Hustota požárního zatížení  $q_{f,k}$  v MJ/m<sup>2</sup> pro různé provozy (ECCS, 2001)

Provoz	80% kvantil	Průměr	Odchylka	90% kvantil	95% kvantil	Parametry $\alpha/\mu$ Gumbelova roz.
Byty	948	780	234	1085	1217	0,0054782/674,9
Nemocnice (pokoje)	280	230	69	320	359	0,018578/198,7
Hotely (pokoje)	377	310	93	431	484	0,013784/288,1
Knihovny	1 824	1 500	450	2087	2340	0,002849/1297,3
Kanceláře	511	420	126	584	655	0,010174/369,1
Školní třídy	347	285	85,5	397	445	0,014993/246,2
Nákupní centrum	730	600	180	835	936	0,007122/518,7
Divadla (kina)	365	300	90	417	468	0,014243/259,3
Doprava (prostory pro veřejnost)	122	100	30	139	156	0,04273/86,2

Poznámka: % hodnoty jsou stanoveny za předpokladu Gumbelova rozdělení.

### Rychlost uvolňování tepla

Rozvoj a útlum požáru je výrazně ovlivněn uvolňováním tepla v čase. Ve fázi rozvoje požáru lze rychlost uvolňování tepla popsat vztahem:

$$Q = 10^6 \cdot (t/t_\alpha)^2 \quad (1.23)$$

kde  $Q$  je rychlost uvolňování tepla ve W;  $t$  čas v s;  $t_\alpha$  doba potřebná pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW. Rychlost rozvoje požáru, doba  $t_\alpha$  a nejvyšší rychlost uvolňování tepla  $RHR_f$  jsou uvedeny v tab. 7 pro jednotlivé provozy.

Tab. 7 Rychlost rozvoje požáru a  $RHR_f$  pro jednotlivé provozy

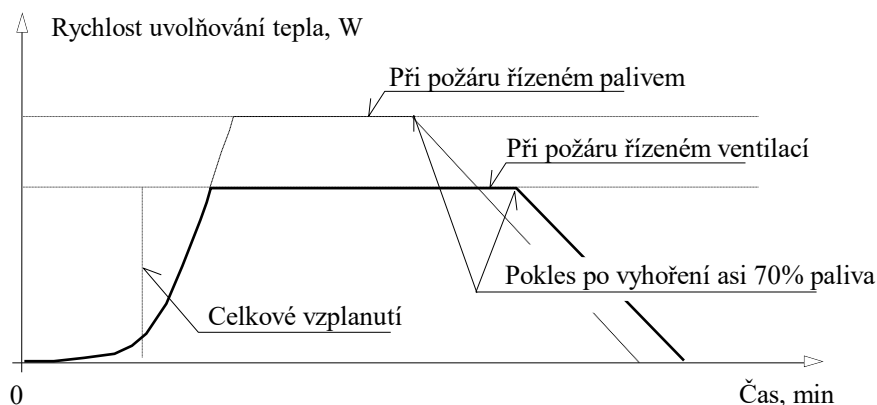
Provoz	Rychlost rozvoje požáru	$t_\alpha$ v s	$RHR_f$ v kW/m <sup>2</sup>
Byty	Střední	300	250
Nemocnice (pokoje)	Střední	300	250
Hotely (pokoje)	Střední	300	250
Knihovny	Velká	150	500
Kanceláře	Střední	300	250
Školní třídy	Střední	300	250
Nákupní centrum	Velká	150	250

Divadla, kina	Velká	150	500
Doprava (prostory pro veřejnost)	Malá	600	250

Hodnoty rychlosti rozvoje požáru a  $RHR_f$  podle tab. 7 lze použít, pokud je součinitel  $\delta_{q2}$  roven 1,0. Při velmi rychlém šíření požáru odpovídá  $t_\alpha = 75$  s. Fáze rozvoje končí vodorovnou částí křivky, která odpovídá ustálenému stavu a rychlosti uvolňování tepla  $Q$  dané  $(RHR_f A_{fi})$ , kde  $A_{fi}$  je největší plocha požáru v  $m^2$ , kterou je požární úsek v případě rovnoměrně rozděleného požárního zatížení. V případě lokálního požáru je tato plocha dána skutečnou plochou paliva.  $RHR_f$  je největší rychlost uvolňování tepla, produkovaná 1  $m^2$  požáru řízeného palivem v  $kW/m^2$ . Vodorovná část křivky končí při útlumu hoření, při dohořívání, viz obr. 7. Útlum hoření se vyjadřuje lineárním poklesem teplot, který začíná po vyhoření 70 % požárního zatížení a končí po jeho úplném vyhoření. Při požáru řízeném ventilací se podle obsahu dostupného kyslíku úroveň vodorovné části křivky snižuje. Snižování lze stanovit výpočtním programem, vycházejícím zjednozónového modelu, nebo pomocí zjednodušeného vztahu:

$$Q_{max} = 0,10 \cdot m \cdot H_u \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} \quad \text{v MW} \quad (1.24)$$

kde  $A_v$  je plocha otvorů v  $m^2$ ;  $h_{eq}$  střední výška otvorů v m;  $H_u$  hodnota čisté výhřevnosti dřeva  $H_u = 17,5$  MJ/kg;  $m$  součinitel hoření  $m = 0,8$ . Podle českých dokumentů (ČSN 73 0802: 2000) se hořlavé látky v posuzovaném prostoru určovaly nahodilým a stálým požárním zatížením, které se vztahovalo na jednotku půdorysné plochy a vyjadřovalo ekvivalentním množstvím dřeva o výhřevnosti 16,5 MJ/kg. V případě, že je při požáru řízeném ventilací největší hodnota rychlosti uvolňování tepla snížena, protahuje se křivka rychlosti uvolňování tepla podle energie uvolněné z požárního zatížení.



Obr. 7 Rychlost uvolňování tepla během požáru

## 4 Modely požáru

### 4.1 Dělení modelů požáru

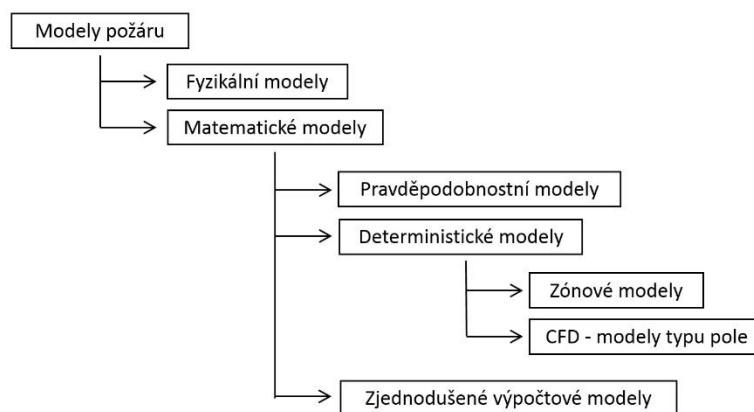
Matematické modely požáru lze chápat jako zjednodušené či zpřesněné matematické popisy návrhového požáru sloužící zejména pro předpověď teplotního pole během požáru. Jsou děleny na:

- pravděpodobnostní modely
  - síťové,
  - statistické,
  - simulační,
- deterministické modely
  - zónové (např. CFAST, ARGOS, OZONE),
  - modely typu pole (např. Fire Dynamics Simulator, SmartFire).

Pro úplnost je nutné předcházející modely doplnit zjednodušenými výpočtovými modely, které řeší analytické výpočty (rovnice):

- ručně,
- tabulkovými procesory,
- triviálními programy.

Schéma dělení modelů požáru včetně fyzikálních modelů je uvedeno na obr. 8.



Obr. 8 Schématické rozdělení modelů požáru

Pravděpodobnostní modely přímo nepopisují konkrétní fyzikální ani chemické děje, ale rozvoj požáru definují řadou „náhodných pokusů“ uživatele, pro které je charakteristická nedostatečná znalost počátečních podmínek. Rozhodování je často založené na dostupných statistických datech a inženýrském úsudku. Při opakování náhodných pokusů a při zachování okrajových podmínek pak uživatel mnohdy získá rozdílné výsledky (Kučera a Pezdová, 2010).

Deterministické modely vycházejí z počátečních podmínek a jejich výsledek lze jednoznačně určit. Jsou řešeny matematickými rovnicemi, které popisují vykonané fyzikální a chemické děje.

Deterministické modely řeší konkrétní podmínky rozvoje požáru, tzv. požární scénář. Deterministické matematické modely predikující rozvoj požáru se dělí na dvě základní následující podskupiny, a to zónové modely a modely dynamiky proudění tekutin (CFD modely, z angl. Computational Fluid Dynamics) označované českým ekvivalentem jako modely typu pole (Wald, 2017a).

## 4.2 Volba modelu požáru

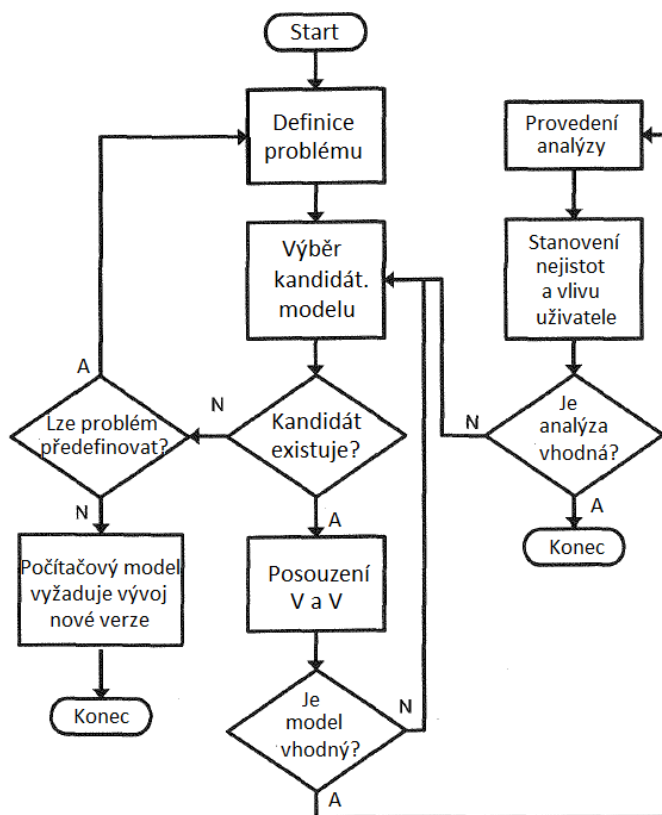
Pro modelování požáru existuje množství různých metod a přístupů s různým stupněm komplexnosti (viz obr. 8). Od zjednodušených analytických, přes zónové až po CFD modely roste složitost, úroveň detailu, časová náročnost, množství výstupů a nároky na znalosti uživatelů. Zvýšení sofistikovanosti však vždy nevede k lepšímu výsledku. V mnoha případech postačí jednoduchý model, neboť nebudou k dispozici dostačující vstupní údaje pro použití sofistikovanějšího modelu. Pro danou aplikaci může být k dispozici jeden, více nebo žádný model požáru. Volba modelu vychází z hlavního fyzikálního jevu. Vždy se vychází od nejjednoduššího modelu, který dokáže zhodnotit studovanou otázku (Wegrzynski, 2016).

K určení vhodného modelu požáru je vhodné použít pětistupňový proces, který je uveden na obr. 9 (Hofmeister a kol., 2011). Před provedením analýzy pomocí modelu se použijí první tři kroky a poslední dva kroky se objeví po provedení analýzy. Některé z těchto kroků mohou vyžadovat opakování. Pokud je po nějakém kroku kandidátský model určen jako nevhodný, může být k vyhodnocení vybrán jiný model. Pokud pro danou aplikaci neexistují žádné vhodné kandidátské modely, pak existují tři možnosti: (1) přehodnotit aplikaci, aby se zjistilo, zda může být problém řešen, aby bylo možné použít existující model; (2) vyvíjet a ověřovat upravenou verzi stávajícího modelu; a (3) použít alternativní metodu, která nepoužívá modelování požáru (požární zkouška).

Analytické modely jsou obecně vhodné pro požáry, které lze považovat za časově ustálené. Dále jsou vhodné pro řešení lokálních požárů a pro verifikaci složitějších modelů požáru. Naopak nejsou vhodné pro neustálený děj či rostoucí požár, pro geometrie nebo velikost prostoru, které výrazně ovlivňují výsledky, nebo pro požáry, u kterých dochází k intenzivnímu proudění plynů, např. silný vliv odvětrávání prostor.

Zónové modely je vhodné použít v případech, kdy stačí informace o průměrné hodnotě veličin v horké vrstvě plynů, pro geometricky pravidelné a vzájemně propojené požární úseky. Díky rychlosti výpočtu je možné tyto modely využít pro pravděpodobnostní studie. Dále pro studie toku plynu mezi jednotlivými místnostmi. Výše uvedené však platí pro jevy, které se pohybují v hranicích platnosti submodelů zónového modelu. Naopak nevhodné je používat zónové modely tam, kde jsou důležité lokální hodnoty fyzikálních veličin, ve velkých místnostech či prostorách, kde nelze předpokládat rychlé vytvoření vrstvy horkých plynů, v geometricky složitých požárních úsecích, jejichž zjednodušení pro potřeby zónového modelu by vedlo k chybě vzhledem ke změně proudění plynů

atd. Nelze studovat proudění a promíchávání plynů na lokálním měřítku, pouze globální výměnu plynů mezi teplou a studenou vrstvou a mezi místnostmi.



Obr. 9 Proces výběru vhodného modelu požáru (Hofmeister a kol., 2011)

Modely proudění tekutin je možné použít ke studiu ustálených i neustálených jevů s vysokou úrovní detailu probíhajících procesů. Modely jsou schopny komplexní simulace lokálního chování při toku tepla a hmoty v téměř neomezeném geometrickém uspořádání. Geometrická komplexita je omezena jen časem na přípravu a časem výpočtu, respektive dostupnou výpočetní technikou. Základní CFD model lze spojit s dalšími modely či submodely. Jako nevhodné oblasti použití CFD modelů lze považovat hoření s nedostatečným přísunem vzduchu, modelování rozvoje požáru, šíření plamene a procesu tepelného rozkladu látek ve větším prostorovém měřítku. Z časových důvodů pro analýzu není vhodné tyto modely používat k řešení velkého množství scénářů nebo pravděpodobnostní studie.



### 4.3 Zjednodušené modely požáru

#### 4.3.1 Analytické modely prostorového požáru

Teplotu v požárním úseku lze předpovědět analytickými modely pro lokální požár, pro požár v celém prostoru (prostorový požár), pro ohřev prvků vně požárního úseku při požáru nebo pro putující požár (Horová, 2015).

Analytické modely využívají pro popis požáru v celém prostoru hlavních fyzikálních závislostí popisujících hoření. Parametrické modely pro popis rozvoje teploty v požárním úseku berou v úvahu požární zatížení, tepelně technické vlastnosti ohraničujících konstrukcí, otvory v požárním úseku případně i rychlost rozvoje požáru. Modely předpokládají rovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku, což je určuje k popisu rozvoje teploty v požárních úsecích omezené velikosti po celkovém vzplanutí v prostoru. Vstupem do výpočtu jsou hustota požárního zatížení, největší rychlost uvolňování tepla a tepelné ztráty ohraničujících konstrukcí. Vztahy pro ohřev prvků vně požárního úseku při prostorovém požáru jsou obecně shrnuty v příloze ČSN EN 1991-1-2: 2004 a pro ocelové konstrukce rozvedeny v ČSN EN 1993-1-2: 2004.

#### Prostorové vzplanutí

Pro vyšetřování rozvoje požáru lze analyticky přibližně odhadnout podmínky pro prostorové vzplanutí (flashover) (Drysdale, 1996). Předpokladem vzplanutí je dostatek paliva a odpovídající ventilace. Horké plyny se drží u stropu a geometrie místnosti umožňuje záření tepla do prostoru paliva, jehož teplota stoupne a nastane prostorové vznícení. Na problematiku byla zaměřena řada experimentů (Walson a Thomas, 1995) a předpoklady, že teplota horní vrstvy překročí 400 až 600 °C a rychlost uvolňování tepla na úrovni podlahy 20 kW/m<sup>2</sup>, byly zpřesněny. Pro místnost s jedním oknem lze stanovit kritickou hodnotu tepla pro odhad prostorového vzplanutí jako:

$$Q_{fo} = 0,0078 \cdot A_t + 0,378 \cdot A_v \cdot \sqrt{h_v} \quad (1.25)$$

Dobu, za kterou požár dosáhne vzplanutí, lze odhadnout, viz (Buchanan, 2017), jako:

$$t_{fo} = t_\alpha \cdot \sqrt{Q_{fo}} \quad (1.26)$$

kde  $t_\alpha$  je doba potřebná pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW, která je pro jednotlivé druhy provozu definována v normě ČSN EN 1991-1-2: 2004 tab. E5.

#### Analytické modely

Analytické modely prostorového požáru nazývané jako parametrické teplotní křivky jsou založeny na pracích Kawagoe (Kawagoe 1958), který k závislosti teploty v požárním úseku na čase přidal rovnováhu tepla v požárním úseku, kterou lze vyjádřit ve tvaru:

$$\dot{q}_C = \dot{q}_L + \dot{q}_W + \dot{q}_R + \dot{q}_B \quad (1.27)$$

kde  $\dot{q}_C$  je teplo uvolněné při hoření,  $\dot{q}_L$  ztráta tepla sáláním a odvodem plynů otvory,  $\dot{q}_W$  ztráta tepla v ohraničujících konstrukcích,  $\dot{q}_R$  ztráta tepla sáláním ohraničujících konstrukcí a  $\dot{q}_B$  teplo akumulované v plynu v požárním úseku. Předpokládá se, že palivo plně vyhoří uvnitř požárního úseku, teplota plynů bude rovnoměrná a prostup tepla ohraničujícími konstrukcemi je rovnoměrný v čase i prostoru a konstantní.

Teplo uvolněné při hoření se popisuje hustotou požárního zatížení, tj. energií, která se uvolňuje při hoření, na jednotku plochy. Požární zatížení sestává z částí konstrukce, např. stěny a podlaha (stálé zatížení) a z vybavení, např. nábytek (proměnné zatížení). Rychlost uvolňování tepla  $RHR$  se liší u požáru řízeného ventilací a u požáru řízeného palivem. Pokud je dostatečný přívod kyslíku, požár je řízen palivem. Omezený přívod vzduchu otvory v ohraničujících konstrukcích snižuje rychlost uvolňování tepelné energie. Kawagoe popsal rychlost hoření u požáru řízeného ventilací s jedním okenním otvorem v místnosti jako:

$$\dot{m} = 0,092 \cdot A_v \cdot \sqrt{h_v} \text{ v kg/s} \quad (1.28)$$

kde  $A_v$  je plocha otvoru v  $m^2$  a  $h_v$  jeho výška v m. Přestože rychlost závisí na tvaru místnosti a poměru plochy okenních otvorů a plochy stěn, stala se tato závislost základem pro analytický popis požáru po celkovém vzplanutí. Odpovídající rychlost uvolňování tepla při rovnoměrném hoření lze vypočítat jako:

$$Q_{vent} = \dot{m} \cdot H_{u,i} \text{ v MW} \quad (1.29)$$

kde  $H_{u,i}$  je čistá výhřevnost. Délku požáru lze vyjádřit jako:

$$t_b = E/Q_{vent} \quad (1.30)$$

kde  $E$  je energie v palivu, kterou lze hořením uvolnit v MJ. Ventilace v požárním úseku se zohledňuje koeficientem otvorů  $O = A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t \text{ v } m^{1/2}$ , kde  $h_{eq}$  je vážený průměr výšky okenních otvorů ve všech stěnách v m a  $A_t$  celková plocha ohraničujících konstrukcí (podlahy, stěn a stropu) včetně otvorů v  $m^2$ . Jestliže se tento výraz násobí tíhovým zrychlením  $g$ , získá se rychlost plynů procházejících otvory. Experimenty potvrdily, že se při zvětšování otvorů dosáhne hodnoty, při níž je již rychlost hoření na ventilaci nezávislá. Rychlost hoření je pak podmíněna charakterem a povrchem paliva. Požáry řízené palivem se dělí na pomalé, přibližně  $t_{lim} = 25$  min, průměrné, 20 min a krátké, 15 min. Rychlost uvolňování tepla lze určit jako:

$$Q_{fuel} = E / t_{lim} \quad (1.31)$$

Není-li délka požáru známa, odhaduje se rychlost uvolňování tepla  $RHR$  z množství paliva a teploty plynů v požárním úseku. Rozvoj teploty v požárním úseku závisí též na ztrátách tepla plynů. Ke ztrátám dochází na hranicích úseku vlivem sdílení tepla prouděním (konvekci), sáláním (zářením, radiací) a vedením (kondukcí). Ztráty se vyjadřují pomocí koeficientu povrchů

$b = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot \lambda)}$  v  $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-0,5} \text{K}^{-1}$ , kde  $\rho$  je hustota v  $\text{kg m}^{-3}$ ,  $c$  měrné teplo v  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$  a  $\lambda$  tepelná vodivost ve  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ .

Analytický popis jednotlivých členů vztahu (1.27) byl řadou autorů zpřesňován. V 70. letech 20. století publikovali (O'Connor a Martin, 1998) analytické modely prostorových požárů, založené na konvenčních rovnicích rovnováhy hmotnosti a energie. Zjednodušení výpočtu nabízejí křivky nazvané BFD (Barnett, 2002), ve kterých popisuje celý průběh, ohřev i ochlazování, pouze jedna rovnice. Část křivky s ochlazováním je popsána nelineárně. Křivky, které jsou používány v Austrálii, vznikaly za pomoci dat získaných z 142 zkoušek požáru. Pettersson (Pettersson a kol., 1973) upravil rovnici podle výsledků vlastních experimentů a matematicky vyjádřil ve formě vhodné pro praktické použití. Jím navržené řešení vyžaduje numerickou integraci, při ručním výpočtu se v praxi pomocné parametry odečítají z grafů. V české praxi se parametrické předpovědi využívalo od roku 1986 v normě Požární bezpečnost staveb, Výrobní objekty. Její poslední verze ČSN 73 0804: 2010 ji již neobsahuje.

#### Parametrická teplotní křivka v ČSN EN 1991-1-2: 2004

ČSN EN 1991-1-2: 2004 uvádí v příloze A parametrickou teplotní křivku, která zohledňuje výsledky experimentů a hořlavost materiálů. Předpovědi lze využít pro požární úseky do podlahové plochy  $500 \text{ m}^2$ , bez otvorů ve střeše a s největší výškou požárního úseku  $4 \text{ m}$ . Křivka vychází z nominální normové křivky. Popisuje se výrazem:

$$\theta_g = 1325 \cdot (1 - 0,324 e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 e^{-19 \cdot t^*}) + 20 \quad (1.32)$$

kde  $\theta_g$  je teplota plynů v požárním úseku ve  $^{\circ}\text{C}$ . Náhradní čas  $t^*$  v hod zohledňující vliv otvorů a kvality povrchů se stanoví takto:

$$t^* = t \cdot \Gamma \quad (1.33)$$

kde vliv otvorů a kvality povrchů se uvažuje součinitelem:

$$\Gamma = \frac{(O/O_{\text{ref}})^2}{(b/b_{\text{ref}})^2} \quad (1.34)$$

Koeficient otvorů  $O$  se počítá jako:

$$O = A_v \cdot \sqrt{h_{\text{eq}}} / A_t \quad \text{v } \text{m}^{1/2} \quad (1.35)$$

kde  $A_v$  je celková plocha svislých otvorů,  $h_{\text{eq}}$  vážený průměr výšek oken,  $A_t$  celková plocha konstrukcí (podlahy, stěn a stropu, včetně otvorů). Koeficient otvorů lze uvažovat v rozsahu  $0,02 \leq O \leq 0,20$ . Referenční koeficient otvorů se uvažuje  $O_{\text{ref}} = 0,04$ . Koeficient povrchů:

$$b = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot \lambda)} \quad \text{v } \text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1} \quad (1.36)$$

je možno měnit v rozsahu  $100 \leq b \leq 2\,200$ . Referenční koeficient povrchů byl stanoven pro požární úsek z lehkého betonu jako  $b_{\text{ref}} = 1160 \text{ m}^{1/2}$ .

Referenční koeficient povrchů je možné dle (Buchanan, 2001) a (Wald, a kol., 2014) uvažovat jako  $b_{\text{ref}} = 1900 \text{ m}^{1/2}$ . Tato hodnota vede v mnoha případech k lepší shodě s experimentálními měřeními, viz (Horová, 2015).

Součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů se upravuje v normě ČSN EN 1991-1-2: 2004 jako:

$$\Gamma = \frac{(O/O_{\text{ref}})^2}{(b/b_{\text{ref}})^2} = \frac{(O/0,04)^2}{(b/1160)^2} = \frac{(O/b)^2}{(0,04/1160)^2} \quad (1.37)$$

Pro  $\Gamma = 1,0$  se křivka do teploty  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  blíží nominální normové teplotní křivce.

### Nejvyšší teplota

Součástí modelu je předpověď času, při němž je dosaženo nejvyšší teploty požáru  $\theta_{\text{max}}$ . Předpokládá se, že je požár řízen ventilací nebo palivem. V případě, že je požár řízen ventilací, se počítá čas k dosažení nejvyšší teploty jako

$$t_{\text{max,fuel}} = 0,2 \cdot 10^{-3} q_{\text{t,d}} / O \quad (1.38)$$

kde  $q_{\text{t,d}}$  je návrhová hodnota hustoty požárního zatížení. V případě, že je požár řízen palivem, dosáhne se nejvyšší teploty v čase  $t_{\text{lim}}$ . Při malé rychlosti rozvoje požáru, viz tabulku 1.7, se předpokládá čas k dosažení nejvyšší teploty při požáru řízeném palivem  $t_{\text{lim}} = 25 \text{ min}$ , při střední rychlosti  $t_{\text{lim}} = 20 \text{ min}$  a při velké rychlosti  $t_{\text{lim}} = 15 \text{ min}$ . Modelování řízení požáru palivem nebo ventilací je umožněno zápisem času k dosažení nejvyšší teploty ve tvaru:

$$t_{\text{max}} = \max [t_{\text{lim}}; (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{\text{t,d}} / O)] \quad (1.39)$$

Ve výpočtu se uvažuje náhradní čas plného rozvinutí požáru  $t_{\text{max}}^*$ , který se stanoví jako:

$$t_{\text{max}}^* = t_{\text{max}} \cdot \Gamma \quad (1.40)$$

V případě, že je požár řízen palivem  $t_{\text{max}} = t_{\text{lim}}$ , počítá se náhradní čas ze vztahu:

$$t^* = t \cdot \Gamma_{\text{lim}}$$

kde se součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů pro požár řízený palivem  $\Gamma_{\text{lim}}$  uvažuje, obdobně vztahu (1.33), jako:

$$\Gamma_{\text{lim}} \leq \frac{(O_{\text{lim}}/b)^2}{(0,04/1160)^2} \quad (1.41)$$

Nejvyšší účinný koeficient otvorů se vypočítá pro danou hustotu požárního zatížení  $q_{\text{t,d}}$  z výrazu:

$$O_{\text{lim}} = 0,1 \cdot 10^{-3} / t_{\text{lim}} \quad (1.42)$$

Hustota požárního zatížení vztažená k celé ploše povrchu požárního úseku se stanoví jako:

$$q_{\text{t,d}} = q_{\text{f,d}} \cdot A_{\text{f}} / A_{\text{t}} \quad (1.43)$$

kde  $q_{\text{f,d}}$  je hustota požárního zatížení,  $A_{\text{t}}$  plocha ohraničujících konstrukcí úseku a  $A_{\text{f}}$  plocha podlahy.

V případech malých požárních zatížení vzhledem k ventilaci požárního úseku při palivem řízeném požáru se součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů modifikuje, aby lépe vystihoval okrajové podmínky při hoření. V normě ČSN EN 1991-1-2: 2004 se pro

$$O > 0,04 \text{ a } q_{t,d} < 75 \text{ a } b < 1160 \quad (1.44)$$

upravuje součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů  $\Gamma_{lim}$  součinitelem:

$$k = 1 + \left( \frac{O - 0,04}{0,04} \right) \cdot \left( \frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \cdot \left( \frac{1160 - b}{1160} \right) \quad (1.45)$$

### Fáze chladnutí

V první části chladnutí požárního úseku ještě dohořívá zbylé palivo. Po jeho vyhoření závisí pokles teploty jen na akumulované tepelné energii, na ventilaci a teplotní charakteristice požárního úseku. K dispozici jsou analytické modely chladnutí, viz (Reichel, 1977). Na základě dokumentace skutečných požárů byl do normy ČSN EN 1991-1-2: 2004 převzat zjednodušený lineární popis poklesu teploty. Pro krátké požáry se chladnutí charakterizuje klesáním teploty 625 °C za hod

$$\text{pro } t^*_{max} \leq 0,5 \quad \text{jako } \theta_g = \theta_{max} - 625 \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad (1.46)$$

Pro delší požáry se předpokládá klesání 250 °C za hod

$$\text{pro } 0,5 < t^*_{max} < 2 \quad \text{jako } \theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (3 - t^*_{max}) (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad (1.47)$$

$$\text{pro } t^*_{max} \geq 2 \quad \text{jako } \theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x) \quad (1.48)$$

kde  $t^*$  je dáno v (1.33) a

$$t^*_{max} = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma \quad (1.49)$$

Jestliže  $t_{max} > t_{lim}$ , počítá se pro požár řízený ventilací s náhradním časem  $t^*_{max}$ , tj. dosazuje se

$$x = 1,0 \quad (1.50)$$

jestliže  $t_{max} = t_{lim}$ , uvažuje se pro požár řízený palivem s časem  $t_{lim}$   $\Gamma$ . Do výrazu se dosazuje

$$x = t_{lim} \Gamma / t^*_{max} \quad (1.51)$$

### Vliv ohraničujících konstrukcí

Ve výpočtu se odlišné vlastnosti stropu a stěn, popřípadě podlahy a vícevrstvé ohraničující konstrukce zohledňují váženými průměry. Při výpočtu tepelné pohltivosti ohraničujících konstrukcí  $b = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot \lambda)}$  lze hustotu  $\rho$ , měrné teplo  $c$  a tepelnou vodivost  $\lambda$  konstrukcí ohraničujících požární úsek uvažovat při teplotě okolí, viz tab. 8. Pro povrch ohraničujících konstrukcí s různými vrstvami materiálů lze  $b$  uvažovat pro  $b_1 < b_2$  jako  $b = b_1$ . Pro  $b_1 > b_2$  se vypočítá mezní tloušťka  $s_{lim}$  materiálu vystaveného požáru podle vztahu:

$$s_{lim} = \sqrt{\frac{3600 \cdot t_{max} \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}} \quad (1.52)$$

kde  $\rho_1$  je hustota první vrstvy vystavené požáru,  $c_1$  její měrné teplo a  $\lambda_1$  tepelná vodivost. Pro  $s_1 > s_{lim}$  se uvažuje  $b = b_1$  a pro  $s_1 < s_{lim}$  se uvažuje:

$$b = \frac{s_1}{s_{lim}} b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{lim}}\right) \cdot b_2 \quad (1.53)$$

Index 1 představuje vrstvu přímo vystavenou požáru, index 2 další vrstvu atd.  $s_i$  je tloušťka  $i$ -té vrstvy  $b_i = \sqrt{(\rho_i c_i \lambda_i)}$ ;  $\rho_i$  hustota  $i$ -té vrstvy;  $c_i$  měrné teplo  $i$ -té vrstvy a  $\lambda_i$  tepelná vodivost  $i$ -té vrstvy. Při různých součinitelích  $b$  pro stěny, strop a podlahu lze zavést  $b_j = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot \lambda)}$  jako:

$$b = \sum (b_j \cdot A_j) / (A_t - A_v) \quad (1.54)$$

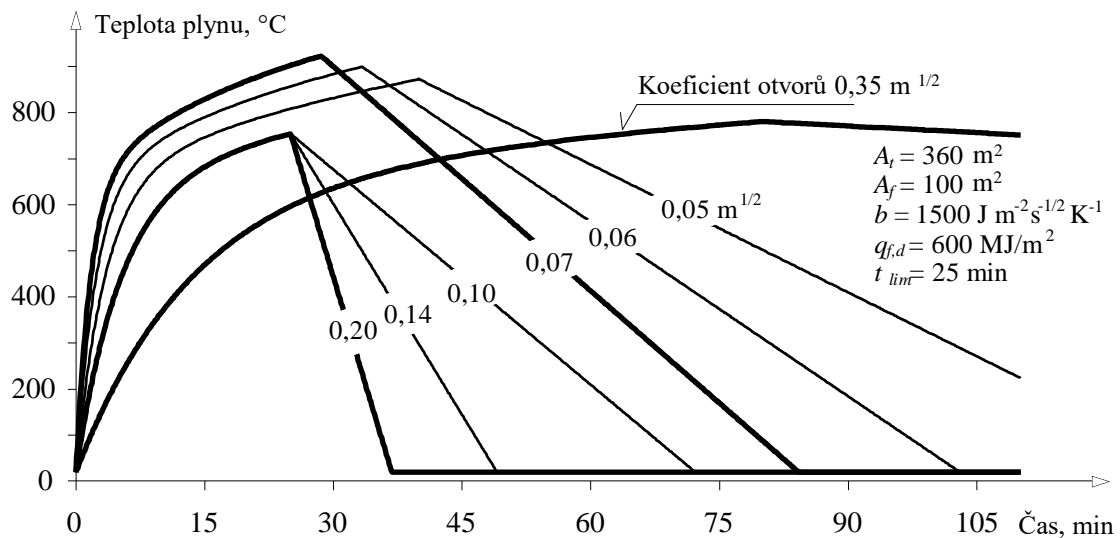
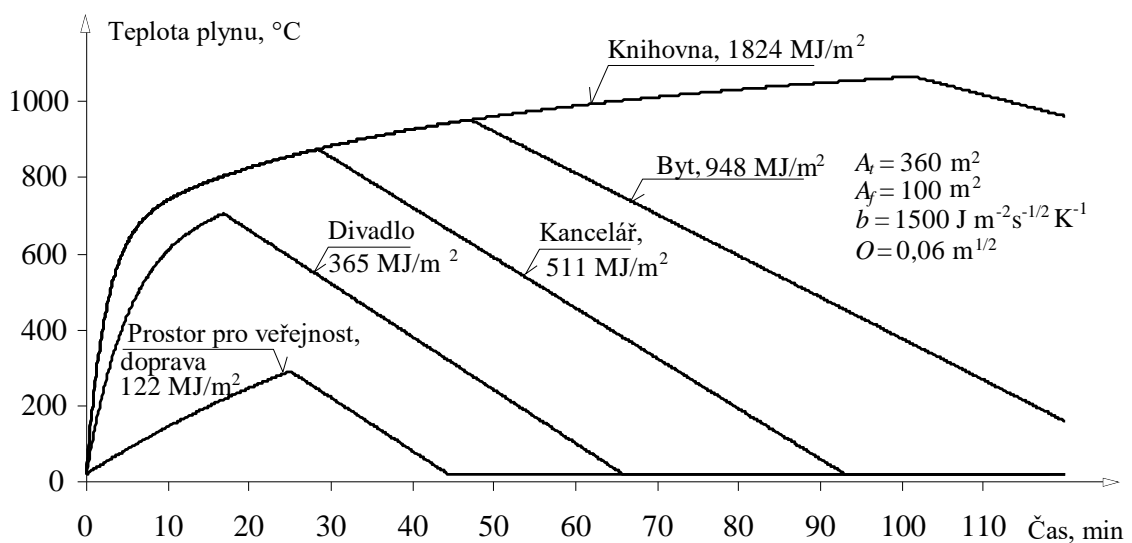
kde  $A_j$  je plocha povrchu  $j$ -té ohraničující konstrukce bez otvorů a  $b_j$  tepelná charakteristika povrchu  $j$ -té ohraničující konstrukce.

Tab. 8 Vlastnosti povrchových vrstev ohraničujících konstrukcí při 20 °C, podle (Reichel, 1987) a (Buchanan, 2003)

Materiál	Hustota $\rho$ (kg / m <sup>2</sup> )	Tepelná pohltivost $\lambda_i$ teplá / studená strana (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Měrné teplo $c$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Koeficient $b = \sqrt{\rho c \lambda}$ (J m <sup>-2</sup> s <sup>-1/2</sup> K <sup>-1</sup> )
Beton	2 300	2,0	900	2 034
Čedičová, skelná vlna	120	0,070/0,039	920	88
Dřevo měkké	600	0,17/0,14	2 510	506
Dřevotřískové desky	600	0,11	2 510	407
Lehký beton	1 200	0,48/0,44	960	744
Lehký beton	500	0,22/0,19	840	304
Ocel	7 850	58,00	440	14 154
Omítka vápenná	1 600	0,87/0,70	840	1 081
Pěnový polyuretan	80	0,030	1 010	49
Pěnový polystyrén	30	0,041	1 550	44
Rohože ze skelné vlny	260	0,070/0,048	880	127
Rohože z křem. vláken	128	0,35/0,40	800	60
Sádrokartonová deska	750	0,15	1 380	394
Sklo	2 600	0,76	840	1 288
Vláknocement. nástřik	118	0,035	800	57
Vzduch	1,1	0,026	1 040	5
Zdivo	1 800	0,86/0,77	920	1 193
Zdivo	1 300	0,40/0,58	960	707
Zdivo	800	0,58/0,55	960	667
Železobeton	2 400	1,57/1,34	840	1 779
Žula	2 500	3,10	840	2 551

Citlivost křivky

Tvar teplotních křivek závisí nejvíce na ventilaci a energii v palivu v požárním úseku. Parametrické teplotní křivky stanovené podle (1.32) až (1.54) jsou na obr. 10 a 11 zobrazeny pro požární úsek s  $A_t = 360 \text{ m}^2$ ;  $A_f = 100 \text{ m}^2$ ,  $b = 1500 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$ . Vliv otvorů je znázorněn na obr. 10 pro konstantní požární zatížení  $q_{f,d} = 600 \text{ MJ/m}^2$  a  $t_{lim} = 25 \text{ min}$  při změně koeficientu otvorů  $O$  od hodnoty  $0,20 \text{ m}^{1/2}$  do hodnoty  $0,035 \text{ m}^{1/2}$ . Na obr. 11 je vliv požárního zatížení zobrazen při koeficientu otvorů  $O = 0,06 \text{ m}^{1/2}$  pro typy provozů podle tab. 6 při 80 % kvantitu hustoty požárního zatížení (Vila Real, 2003). Vliv součinitelů vyjadřujících nebezpečí vzniku a rozvoje požáru  $\delta_{qi}$  a  $\delta_{ni}$  není zohledněn.

Obr. 10 Vliv otvorů při konstantním požárním zatížení  $q_{f,d} = 600 \text{ MJ/m}^2$ Obr. 11 Vliv požárního zatížení při konstantním koeficientu otvorů  $O = 0,06 \text{ m}^{1/2}$

## Další analytické modely prostorového požáru

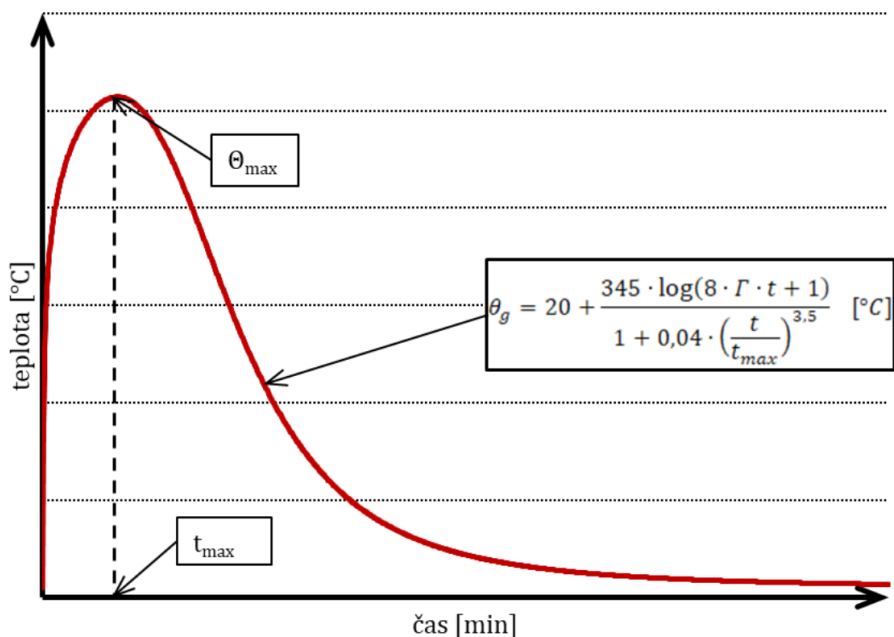
Příloha A normy EN 1991-1-2: 2004 byla v některých zemích CEN nahrazena národními křivkami. Dle posledních výzkumů navržená křivka Přílohy A evropské normy poskytuje v některých případech nevhodné zvýšení/snížení teploty v požárním úseku. Například pro obytné a administrativní prostory je stanovena hodnota maximální teploty v čase 20 min. Pro požární prostory s velkými otvory a obalovými konstrukcemi s nízkou tepelnou vodivostí vytváří rychlý nárůst a následný pokles teploty. Pro požární prostory s malými otvory a vysokou tepelnou vodivostí obalových konstrukcí se naopak předpokládá příliš pomalý pokles teploty (Zehfuss, 2011). Parametrická teplotní křivka v Příloze A popisuje pouze plně rozvinutou fázi požáru, bez zohlednění růstové fáze. Provedenými požárními zkouškami s nábytkem bylo dokázáno, že i v malých prostorech může trvat několik minut, než se od počáteční fáze dosáhne plně rozvinutého požáru (Zehfuss a Hosser, 2007). Hlavním nedostatkem dle (Zehfuss, 2011) je, že parametrická teplotní křivka v příloze A v EN 1991-1-2: 2004 nemá přímou souvislost s rychlostí uvolňováním tepla. Pro použití v moderních budovách je v Příloze A omezení součinitele povrchů, který závisí na tepelné pohltivosti konstrukcí ohraničujících požární úsek  $b < 100; 2200 > [J/(m^2s^{1/2}K)]$ . Díky němu nelze parametrické teplotní křivky využít např. pro výpočet teploty plynu v úseku se skleněnou fasádou (Horová, 2015).

V dánské národní příloze k EN 1991-1-2: 2004 lze najít úpravu pro výpočet parametrické teplotní křivky (DS/EN 1991-1-2 DK NA: 2014), kde je teplota v požárním úseku popsána jednou rovnicí pro celý průběh požáru. Omezení, kdy lze křivku použít, zůstává obdobné jako v současné příloze A. Obecný tvar parametrické teplotní křivky dle dánské národní přílohy je zobrazen na obr. 12. Parametrická teplotní křivka podle dánské národní přílohy nerozlišuje, zda je požár řízený palivem, nebo ventilací a postup výpočtu je tak relativně jednoduchý. Přelom fáze růstu teploty ve fázi ochlazování nastává v čase maximální hodnoty teploty označené jako  $\theta_{max}$  (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  $t_{\infty}$ .

Další alternativou ke křivce v příloze A je parametrická teplotní křivka iBMB (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz TU Braunschweig). Tuto křivku předložili v roce 2003 němečtí výzkumní pracovníci Jochen Zehfuss a Daniela Hosser a postup výpočtu je obsažen v německé národní příloze (DIN EN 1991-1-2/NA: 2010). Křivka je přímo odvozena z rychlosti uvolňování tepla a je charakterizována třemi body, ve kterých se mění její sklon (Zehfuss, 2011), viz obr. 13. Zohledňuje účinek prostorového vzplanutí, kdy v růstové fázi dojde v požárním úseku k prudkému nárůstu teploty.

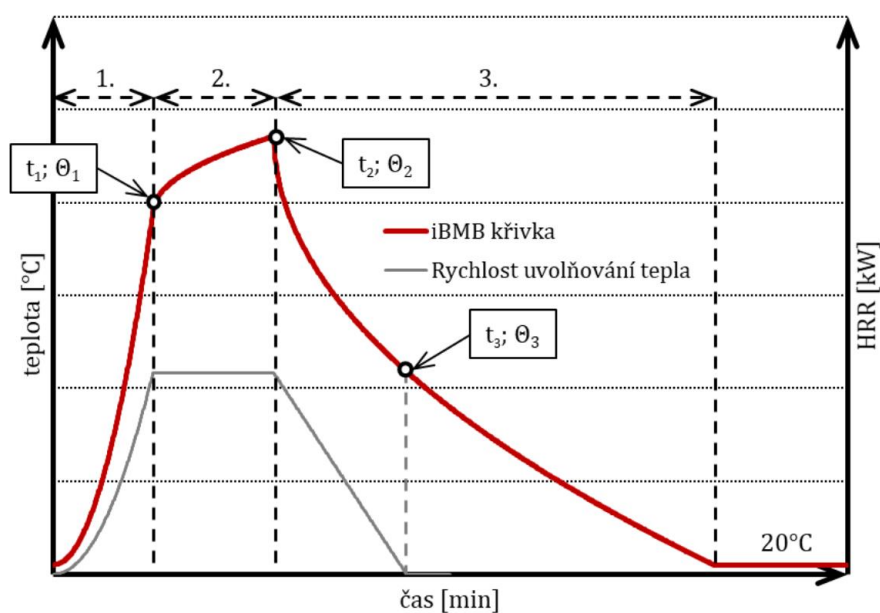
Ve fázi rozhořívání (1. fáze na obr. 13) se jedná o lokální požár popsaný exponenciální rovnicí, který končí v čase  $t_1$ , kdy křivka rychlosti uvolňování tepla dosáhne svého maxima. V tomto čase začíná 2. fáze, kdy je požár již plně rozvinutý a rychlost uvolňování tepla konstantní.





Obr. 12 Schématický tvar parametrické teplotní křivky podle dánské národní přílohy

Teplota v požárním úseku 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 požárním úseku (3. fáze na obr. 13). 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).

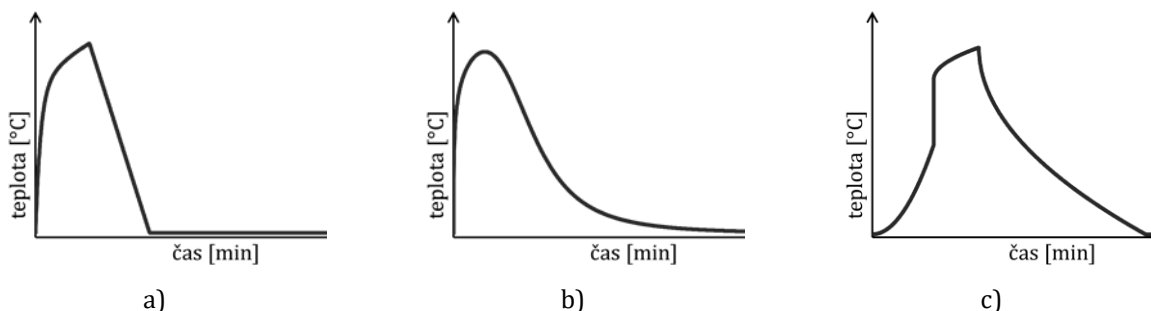


Obr. 13 Schématický tvar závislosti německé teplotní křivky a rychlosti uvolňování tepla

Výše uvedený tvar křivky neplatí, pokud by více než 70% požárního zatížení vyhořelo již v průběhu rozhořívání. V takovém případě 2. fáze 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 rychlosti uvolňování tepla, tak následně pro německou křivku. Pokud dojde v 1. fázi k flashover efektu, nastává v křivce rychlosti uvolňování tepla rovnou 2. fáze a rychlost uvolňování tepla dosáhne okamžitě v tento čas  $t_{fo}$  svého maxima ( $t_{fo} = t_2$ ).

Německá křivka je omezena na použití do 400 m<sup>2</sup> 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 v normě DIN EN 1991-1-2/NA:2010:12. 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.

Na obr. 14 je zobrazen schematický tvar všech parametrických teplotních křivek - křivka podle přílohy A, dánské národní křivky podle DS/EN 1991-1-2 DK NA: 2014, a německé národní křivky podle DIN EN 1991-1-2/NA: 2010-12.

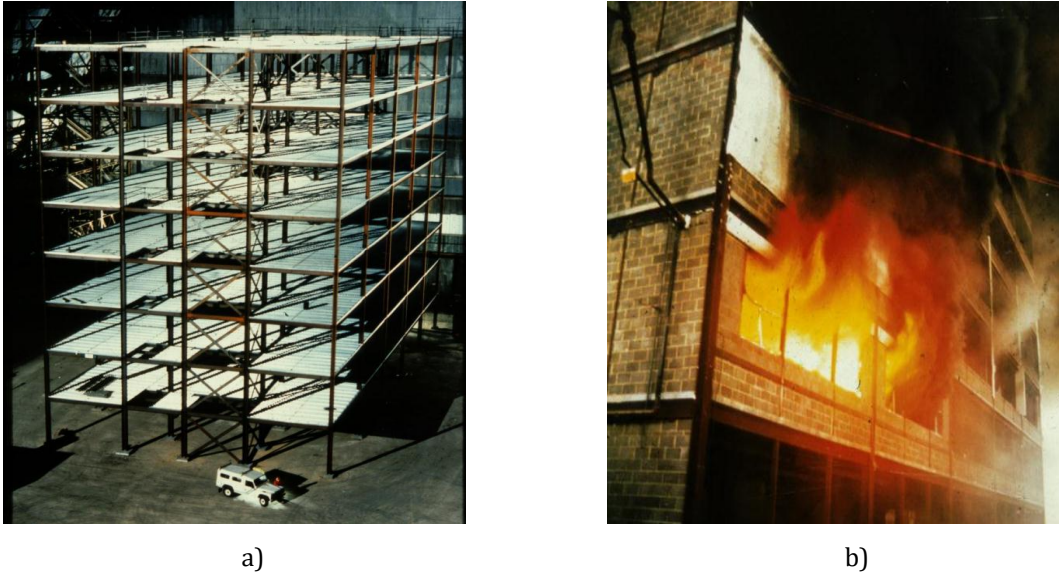


Obr. 14 Schematické tvary parametrických křivek:

a) křivka podle přílohy A; b) DS/EN 1991-1-2 DK NA: 2014; c) DIN EN 1991-1-2/NA: 2010-12

### Validace analytických teplotních křivek

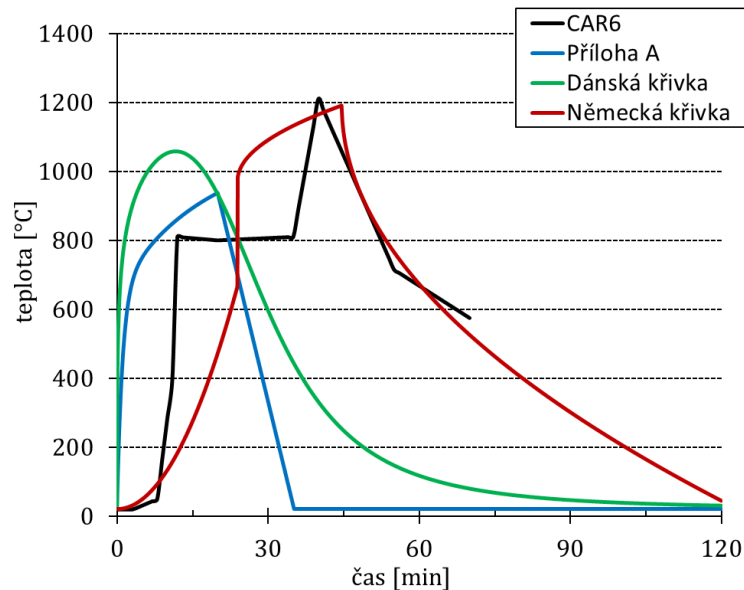
Schopnost předpovědi teploty plynu výše uvedených národních křivek byla ověřena na základě experimentálních dat v (Cábová a Kučera, 2018). Křivky byly validovány např. na zkoušce v Cardingtonu č. 6 (Barnett, 2002), při které hořel kancelářský nábytek. Budovu tvořil osmipodlažní ocelový skelet se spřaženými ocelobetonovými stropy, viz obr. 15. Požární úsek, 7,5 m x 18,0 m x 4,0 m (šířka x délka x výška), byl vyzděn pórobetonovými tvárnicemi. Podlaha byla betonová. V úseku se nacházel jeden ventilační otvor o rozměrech 18,0 m x 2,0 m (šířka x výška). Požární zatížení  $q_{t,d} = 159$  MJ/m<sup>2</sup> se skládalo z nábytku, dřeva a kancelářských potřeb (O'Connor a Martin, 1998).



Obr. 15 Požární zkouška č. 6 v Cardingtonu,

a) konstrukce experimentálního osmipodlažního objektu; b) průběh požární zkoušky

Na obr. 16 jsou uvedeny výsledky aplikace všech tří parametrických teplotních křivek, křivka podle přílohy A, křivka podle dánské národní přílohy a křivka podle německé národní přílohy, společně s teplotou plynu, která byla naměřena během experimentu, viz (Cábová a Kučera, 2018).



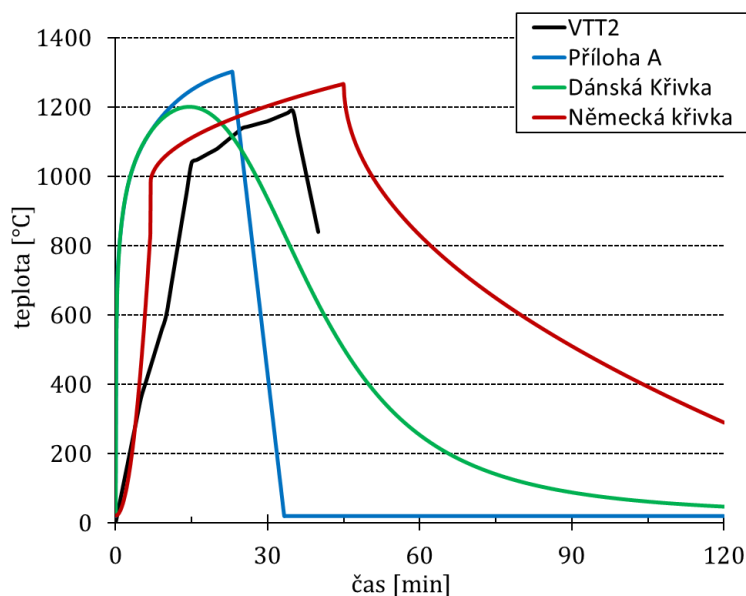
Obr. 16 Validace parametrických modelů pro 6. požární zkoušku v Cardingtonu

Z porovnání na obr. 16 je patrné, že křivka podle německé národní přílohy téměř přesně vystihuje maximální teplotu, naměřenou při požární zkoušce, v grafu označeno CAR6. Teploty se v počáteční fázi německé křivky velice odlišují od výsledků zkoušky (jsou velice nízké). Skutečně naměřené hodnoty ukazují velice strmý nárůst teploty v přibližně 10. minutě. Těchto teplot je v křivce

dosaženo až při prostorovém vzplanutí, přibližně o 10 minut později, asi 20. minuta. V případě parametrické teplotní křivky podle současné přílohy A a zároveň i křivky podle dánské národní přílohy je opět na obr. 16 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 okolí, 20 °C. Většina požárního zatížení vyhoří v obou případech, již v průběhu prvních 30 minut, což je ale oproti zkoušce velice odlišné.

Další validační zkouškou je požární zkouška Centra technického výzkumu ve Finsku, VTT. Zkouška se uskutečnila v místnosti s betonovými obvodovými konstrukcemi. Podlaha byla tvořena žáruvzdornými tvárnicemi. Rozměry požárního úseku byly 2,2 m x 4,0 m x 2,6 m (šířka x délka x výška). V úseku se nacházel jeden malý ventilační otvor o rozměrech 3,0 m x 1,2 m (šířka x výška). Požární zatížení  $q_{t,d} = 152 \text{ MJ/m}^2$  se skládalo z dřeva (Ranby, 2000).

Na obr. 17 je zobrazena validace tří parametrických teplotních křivek, křivka podle přílohy A v EN 1991-1-2:2004, křivka podle dánské národní přílohy A v DS/EN 1991-1-2 DK NA:2014 a křivka podle německé národní přílohy A v DIN EN 1991-1-2/NA:2010, společně s teplotou plynu, která byla naměřena během experimentu.



Obr. 17 Validace parametrických modelů pro požární zkoušku VTT

Na obr. 17 je vidět, že parametrická teplotní křivka podle německé národní přílohy je zde na straně bezpečnosti, a to jak ve fázi růstu, tak i ve fázi poklesu teplot. Hodnoty maximálních teplot se velice podobají skutečně získaným hodnotám, s rozdílem do 100 °C. Fáze poklesu začíná přibližně o 10 minut později než ve skutečnosti. Na obr. 17 lze pozorovat, že průběhy parametrické teplotní křivky podle Přílohy A v EN 1991-1-2: 2004 a podle dánské národní přílohy jsou v počáteční růstové fázi téměř totožné. U parametrické teplotní křivky podle Přílohy A začíná fáze poklesu skoro o 15 minut 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.

### 4.3.2 Modely lokálního požáru

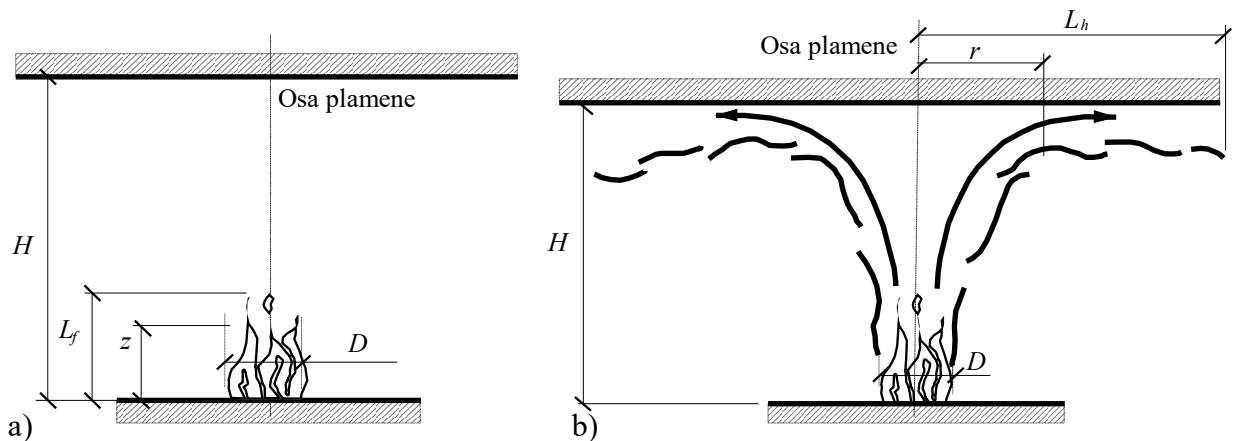
Lokální požár nastane v případě, že nedojde k rozšíření požáru po celé ploše požárního úseku, ale jeho průběh je pouze místní. Rozlišují se případy, kdy plamen nezasahuje strop, viz obr. 18a, a když plamen strop zasahuje, viz obr. 18b. Délka plamene  $L_f$  lokálního požáru závisí na rychlosti uvolňování tepla  $Q$  a na průměru požáru  $D$ . Tepelný tok z lokálního požáru na konstrukční prvek se vypočítá ze vztahu (1.65) a vychází z polohového součinitele stanoveného dle popisu dále v této kapitole. Délku plamene  $L_f$  lokálního požáru lze stanovit jako:

$$L_f = -1,02 \cdot D + 0,0148 \cdot Q^{2/5} \quad \text{v m} \quad (1.55)$$

kde  $D$  je průměr ohně v m;  $Q$  rychlost uvolňování tepla ve W z požáru. Pokud plamen nezasahuje strop úseku,  $L_f < H$ ; viz obr. 18a, nebo jde-li o požár ve volném prostoru, je teplota  $\theta_z$  v oblaku hořících plynů po výšce svislé osy symetrie plamene dána vztahem:

$$\theta_z = 20 + 0,25 \cdot Q_c^{2/3} \cdot (z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad \text{ve } ^\circ\text{C} \quad (1.56)$$

kde  $z$  je proměnná výška v m podél osy plamene. Část rychlosti uvolňování tepla sdílená prouděním ve  $W$  lze uvažovat  $Q_c = 0,8 Q$ .



Obr. 18 Model lokálního požáru: a) plameny nezasahují strop, b) plameny zasahují strop

Virtuální počátek osy  $z_0$  lze stanovit jako:

$$z_0 = -1,02 \cdot D + 0,00524 \cdot Q^{2/5} \quad \text{v m} \quad (1.57)$$

Pokud plamen zasahuje strop, tj. pro  $L_f \geq H$ , kde  $H$  je vzdálenost mezi zdrojem požáru a stropem v m, viz obr. 18b. Tepelný tok  $\dot{h}$  ve  $W/m^2$ , dopadající na jednotku povrchové plochy v úrovni stropu vystavené účinkům požáru, lze vypočítat takto:

$$\text{jestliže } y \leq 0,3 \text{ jako } \dot{h} = 100\,000 \quad (1.58a)$$

$$\text{jestliže } 0,30 < y < 1,0 \text{ jako } \dot{h} = 136\,300 - 121\,000 \cdot y \quad (1.58b)$$

$$\text{jestliže } y \geq 1,0 \text{ jako } \dot{h} = 15\,000 \cdot y^{-3,7} \quad (1.58c)$$

kde součinitel  $y$  je dán vztahem:

$$y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'} \quad (1.59)$$

a kde  $r$  je vodorovná vzdálenost mezi svislou osou ohně a bodem u stropu v m, pro kterou se počítá tepelný tok a  $H$  vzdálenost mezi zdrojem požáru a stropem v m. Vodorovnou délku plamene lze stanovit z výrazu:

$$L_h = 2,9 \cdot H \cdot (Q \cdot H^*)^{0,33} - H \text{ v m} \quad (1.60)$$

$Q_H^*$  je součinitel rychlosti uvolňování tepla, daný vztahem:

$$Q_H^* = Q / (1,11 \cdot 10^6 \cdot H^{2,5}) \quad (1.61)$$

$z'$  je poloha virtuálního zdroje tepla ve svislém směru v m, může nabývat záporné hodnoty, která se vypočte pro

$$Q_D^* < 1,0 \text{ jako } z' = 2,4 \cdot D \cdot (Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}) \quad (1.62)$$

$$Q_D^* \geq 1,0 \text{ jako } z' = 2,4 \cdot D \cdot (1,00 - Q_D^{*2/5}) \quad (1.63)$$

$$\text{kde } Q_D^* = Q / (1,11 \cdot 10^6 \cdot H^{2,5}) \quad (1.64)$$

### Přestup tepla z lokálního požáru do stropní konstrukce

Čistý tepelný tok  $\dot{h}_{net}$ , dopadající na jednotku povrchové plochy v úrovni stropu vystavené účinkům požáru, je dán vztahem:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c \cdot (\theta_m - 20) - \Phi \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_m + 273)^4 - 293^4] \quad (1.65)$$

kde  $\dot{h}$  je tepelný tok ve  $W\,m^{-2}$ ;  $\alpha_c$  součinitel přestupu tepla prouděním ve  $W\,m^{-2}\,K^{-1}$ ;  $\theta_m$  povrchová teplota prvku ve  $^{\circ}C$ ;  $\Phi$  polohový součinitel;  $\varepsilon_m$  emisivita požáru;  $\varepsilon_f$  emisivita povrchu a  $\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta ve  $W\,m^{-2}\,K^{-4}$ . Výpočet lze použít, jestliže je průměr požáru omezen  $D \leq 10$  m a rychlost uvolňování tepla z požáru  $Q \leq 50$  MW.

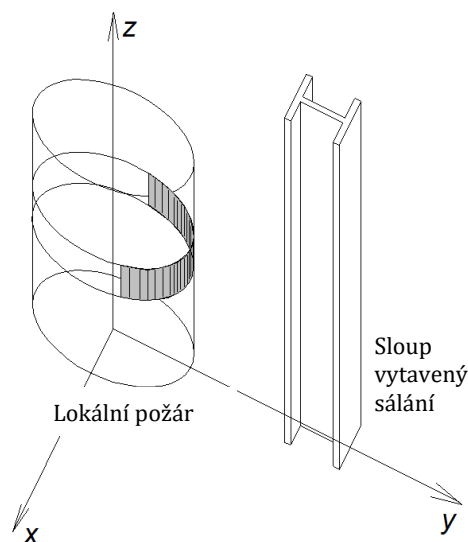
V případě několika oddělených lokálních požárů lze ze vztahu (1.65) stanovit jednotlivé tepelné toky  $\dot{h}_1, \dot{h}_2 \dots$  dopadající na jednotku povrchové plochy v úrovni stropu vystavené účinkům požáru. Celkový tepelný tok lze vypočítat jako:

$$\dot{h}_{tot} = \dot{h}_1 + \dot{h}_2 + \dots \leq 100\,000 \text{ ve } W/m^2 \quad (1.66)$$

### Přestup tepla z lokálního požáru do sloupu

Výpočet teploty sloupu s plamenem ve tvaru válce, viz (Sokol a kol, 2008), vychází z modelu lokálního požáru v ČSN EN 1991-1-2: 2004. Uplatní se v těch případech, kdy se posuzují účinky lokálního požáru na sloup ve volném prostoru nebo v požárním úseku o velkých rozměrech a relativně velké výšce, například průmyslové, sportovní haly. Pod stropem se vytvoří nízká vrstva horkých plynů o nízké teplotě. Horní část sloupu pod stropem bude chladná. Sloup se ohřívá vlivem sálání z plamenů lokálního požáru ve své spodní části. Sloup blízko lokálního požáru se nejvíce ohřívá, pokud je mimo půdorys požáru. Pro numerickou stabilitu výpočtu se vzdálenost povrchu sloupu od povrchu plamenů volí asi 300 mm.

V případě nízkého požárního úseku malých rozměrů a sloupu ve větší vzdálenosti od požáru se projeví vliv horké vrstvy plynů akumulovaných pod stropem. Sálání z plamenů se neuplatní nijak výrazně. Sloup dosáhne vysokých teplot v horní části a použije se model podle Hasemiho shrnutý v příloze C normy ČSN EN 1991-1-2: 2004. Pokud sloup není v kontaktu s oblakem horkých plynů ani s plameny, ale je obklopen chladným vzduchem o běžné teplotě 20 °C, uskutečňuje se přenos tepla do sloupu sáláním. Lokální požár lze nahradit válcovou plochou, viz obr. 19, jejíž teplota se určuje podle vztahu C.2 normy. Teplota válcové plochy se mění jednak v čase  $t$  a také po výšce  $z$ , což výpočet přenosu tepla sáláním komplikuje.



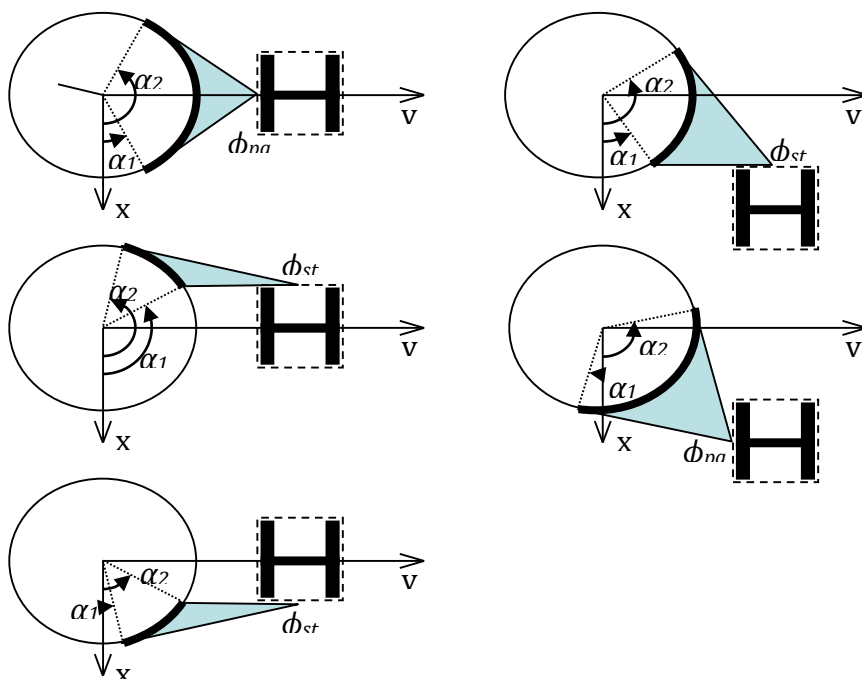
Obr. 19 Lokální požár modelovaný jako prstenec dělený po výšce pro určení polohového součinitele

Vzhledem k tomu, že výpočet lze použít pouze pro rovinné plochy, je prstenec na sálající válcové ploše rozdělen na dílčí plošky, jak je patrné z obr. 19. Polohový součinitel a následně sálavý tepelný tok se určí pro každou tuto dílčí plošku na prstenci válcové plochy. Zohlední se, že na posuzovaný bod na sloupu nedopadá tepelný tok z celého prstence, ale jen z jeho části, která je z bodu přímo viditelná, viz obr. 20 (Sokol a kol, 2008).

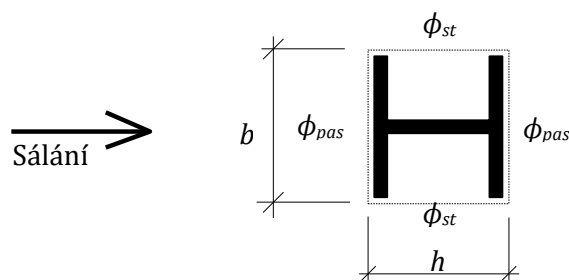
Podobný přístup lze uplatnit i pro přijímající plochu na povrchu sloupu. Pro průřezy tvaru I nebo H je tvar průřezu sloupu zjednodušen na obdélníkový obrys, na který dopadá sálavý tepelný tok, viz obr. 21. Zjednodušení zanedbává sálání plochy na plochu v dutých částech sloupu, které je významné při trvání požáru nad 30 minut. V pokročilých modelech se sálání na plochy dutých částí sloupu uvažuje. Takto lze postupovat i pro jiné tvary průřezu sloupu, například pro duté průřezy sloupů.

Výsledný tepelný tok od účinků sálání z jednoho prstence s konstantní teplotou na sledovaný bod sloupu se určí jako součet tepelných toků z jednotlivých dílčích plošek prstence (rovnice 1.67). Působí na všechny povrchy sloupu, na které sálavý tepelný tok dopadá.

$$h_{net,zisk} = \sum_{\text{povrchy plošky}} \sum \varphi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \left( (\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right) \quad (1.67)$$



Obr. 20 Části prstence pro výpočet sálavého tepelného toku dopadajícího na povrch sloupu vzhledem k vzájemné poloze sloupu a požáru (Sokol a kol, 2008)



Obr. 21 Obálka průřezu a polohové součinitele na povrchu sloupu na plochách vystavených sálání (Sokol a kol, 2008)



Emisivita, teplota sálajícího povrchu prstence i teplota sloupu se předpokládá konstantní. Ve vztahu lze součet dílčích tepelných toků nahradit jediným výpočtem tepelného toku s celkovým polohovým součinitelem, který vyjadřuje účinek sálání z prstence na posuzovaný bod sloupu. Tepelný tok se tedy určí jako:

$$h_{\text{net,zisk}} = \varphi_{\text{celk}} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \left( (\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right) \quad (1.68)$$

kde celkový polohový součinitel je

$$\varphi_{\text{celk}} = \frac{b \cdot (\varphi_{\text{pas1}} + \varphi_{\text{pas2}}) + h \cdot (\varphi_{\text{st1}} + \varphi_{\text{st2}})}{2 \cdot b + 2 \cdot h} \quad (1.69)$$

Na straně nevystavené sálání odevzdává sloup teplo svému okolí. Přestup tepla prouděním a sáláním pro teplotu prostředí 20 °C se určí z:

$$h_{\text{net,ztraty}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot ((\theta_m + 273)^4 - (20 + 273)^4) + \alpha_c \cdot (\theta_m - 20) \quad (1.70)$$

kde součinitel přestupu tepla lze uvažovat  $\alpha_c = 35 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ .

Celkový tepelný tok, který přispívá k zahřívání sloupu, se určí jako součet dílčích tepelných toků z jednotlivých prstenců podle vztahu (1.68) zmenšený o ztráty tepla do okolního prostředí (1.70), jako:

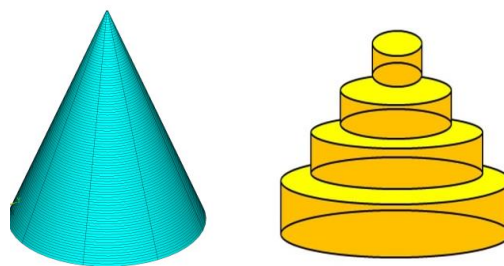
$$h_{\text{net}} = \sum_{\text{prstence}} h_{\text{net,zisk}} - h_{\text{net,ztraty}} \quad (1.71)$$

Teplota sloupu se stanoví přírůstkovou metodou podle ČSN EN 1993-1-2: 2004 jako:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot h_{\text{net}} \cdot \Delta t \quad (1.72)$$

kde se uvažuje součinitel zastínění  $k_{sh} = 1,0$  protože vliv stínění je zahrnut v určení polohového součinitele  $\varphi_{\text{celk}}$ ,  $A_m/V$  je součinitel průřezu,  $c_a$  je měrné teplo oceli,  $\rho_a$  je hustota oceli a  $\Delta t$  je časový přírůstek roven nebo menší než 5 s.

Výše popsaný koncepčně jednoduchý model vede k numericky náročnému výpočtu polohového součinitele. Jeho vyčíslení tabulkovým procesorem je pro několik do sebe vložených cyklů obtížné. Řeší se programem. Pro velkou plochu požáru s malou výškou plamene je výše popsané řešení nepřesné. V práci (Francis a kol., 2019) je výpočet validován, verifikován a zpřesněn převedením na soustavu válců, viz obr. 22, které tvoří kužel plamenů. Je zde rozveden i výpočet teploty pro sloup uvnitř požáru.

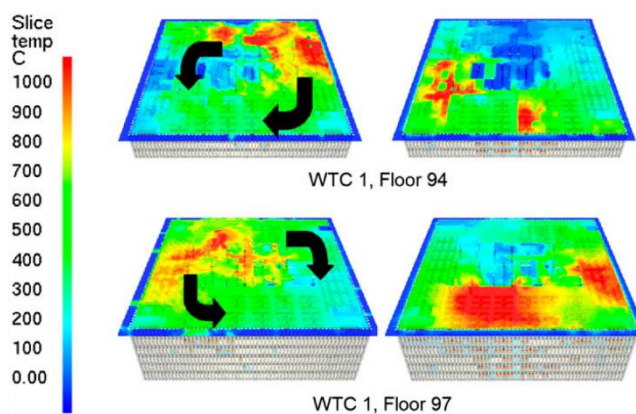


Obr. 22 Nahrazení plamene ve tvaru kužele válci (Francis a kol., 2019)

### 4.3.3 Modely putujícího požáru

Pozorováním skutečných požárů v moderních budovách, ve kterých se často vyskytují velké požárně nedělené prostory a které jsou vybaveny skutečnými hořlavými materiály a výrobky, se ukázalo, že požár nesetrvává na jednom místě, ale má tendenci šířit se či putovat. Situace, kdy všechny hořlavé materiály hoří v celém prostoru současně, se stává pouze zřídka. Obvykle je požárem zasažena pouze část podlahové plochy. Dokud nevyhoří všechny hořlavé látky, nevyčerpá se zásoba kyslíku nebo není zahájeno hašení, plameny přechází od zdroje hoření na další nevyhořelé palivo. V důsledku putování požáru se objevují oblasti s vyššími a nižšími teplotami. Podobné chování požáru závisí na rozložení paliva v objektu a na dostatku vzdušného kyslíku potřebného pro dlouhý rozvoj požáru. V moderních administrativních budovách je obou dostatek.

Tento způsob chování požáru dokumentuje i požár WTC v roce 2001. Numerické simulace požáru pomocí softwaru FDS (Fire Dynamics Simulator) ukázaly, že teploty plynu při požáru byly v rámci podlahové plochy požárního úseku velice rozdílné (obr. 23). Kromě požáru WTC byla vysoce nehomogenní teplota při požárech ve velkých nedělených úsecích pozorována i při požáru budovy First Interstate Bank Building v Los Angeles v roce 1988 (Nelson, 1989), v budově Windsor Tower v Madridu v roce 2005 (Fletcher a kol., 2006), a později také v budově Plasco Building v Tehranu v roce 2017 (Behnam, 2018) a (Yarlagadda a kol., 2018).



Obr. 23 Simulace putujícího požáru v 94. a 97. podlaží WTC 1 (Gann a kol., 2013)

Kromě skutečných požárů je podobné chování požáru popisováno i během požárních zkoušek. Požární zkoušky, při kterých bylo zaznamenáno chování putujícího požáru jsou shrnuty v (Horová, 2015), (Stern-Gottfried a Rein, 2012) a (Dai a kol., 2017).

#### Cliftonův model

Clifton v roce 1996 popsal model požáru velkého požárního úseku, pro který nelze použít předpoklad rovnoměrného hoření, viz (Clifton, 2006). V takových případech může být podle Cliftona požár

popsán pomocí malých ploch, do kterých se požární úsek rozdělí. Plně rozvinutý požár se bude vyskytovat vždy jen na tomto malém úseku a to do té doby, než se přesune do úseku vedlejšího. Závislost teploty na čase v každé malé ploše je popsána pomocí parametrické teplotní křivky. Maximální velikost plochy jednotlivých úseků by neměla překročit 100 m<sup>2</sup>. V případě takového rozdělení, zajištění dostatečné ventilace z vnějšího prostředí a daného požárního zatížení, vykazoval Cliftonův model šíření požáru z úseku na úsek v horizontu 20 min.

Kvůli nedostatku experimentů, které by podložily tento model, stejně tak skromné dokumentaci popisu metody není Cliftonův model v požárním inženýrství hojně využíván.

### TFM model

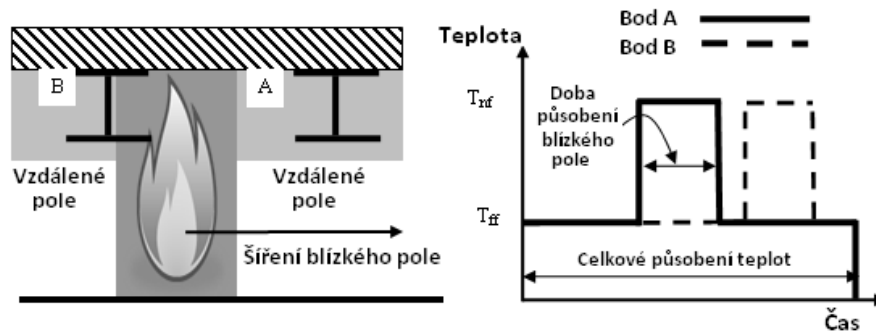
Další metoda modelování šíření požáru ve velkých požárních úsecích s názvem TFM model (z angl. Travelling Fire Methodology) byla vyvinuta vědci Reinem a Stern-Gottfriedem v roce 2007, viz (Rein, 2007) a (Stern-Gottfried a kol., 2009). Studie je založena na předpokladu, že teploty ovlivňující konstrukci v úseku jsou díky šíření lokálního požáru rozděleny na teploty tzv. blízkých polí a vzdálených polí. Teploty blízkého pole je dosaženo přímým vlivem plamenů na konstrukci, zatímco teploty vzdálených polí vznikají díky zvýšené teplotě okolních plynů, viz obr. 24.

I když teplota blízkého pole ovlivňuje pouze část konstrukce, šíří se po ploše úseku tak dlouho, dokud nevyhoří veškeré palivo. Rozměry tohoto pole jsou dány stupněm ventilace. Teplotu blízkého pole  $T_{nf}$  lze odvodit od teploty plamenů, lze tedy říci od druhu paliva, které bude plameny pohlceno. Podle (Drysdale, 1998), se tato teplota např. pro provoz kanceláří pohybuje kolem 1200 – 1300 °C. Doba působení teploty blízkého pole v jednom místě závisí na způsobu rozložení požárního zatížení a na rychlosti uvolňování tepla během hoření. Za předpokladu rovnoměrného rozložení paliva je doba podle (Stern-Gottfried a kol., 2009) rovna 19 min, což odpovídá i výsledkům Cliftonova modelu (20 min).

Teplota horkých plynů nashromážděných pod stropem klesá s rostoucí vzdáleností od plamene, od pole blízkého. Tato teplota udávající teplotu vzdáleného pole, je ovlivněna charakterem požárního úseku. Podle Alpertova vztahu z roku 1972 udávajícího závislost mezi maximální teplotou a teplotou vzdálenou Rein a Stern-Gottfried navrhli zjednodušení pro výpočet teploty vzdáleného pole  $T_{ff}$ :

$$T_{ff} = \frac{\left[ \int_{r_{nf}}^{r_{ff}} T^4 dr \right]^{0,25}}{\left( r_{ff} - r_{nf} \right)^{0,25}} \quad (1.73)$$

kde  $r_{ff}$  je poloměr vzdálených polí [m],  $r_{nf}$  je poloměr blízkých polí [m] a  $T$  je teplota blízkého pole.



Obr. 24 TFM model putujícího požáru: rozložení teplotních polí (vlevo), předpověď teplot v bodech A a B (vpravo) (Gann a kol., 2013)

Výpočet je založen na předpokladu hodnoty rychlosti uvolňování tepla produkované 1 m<sup>2</sup> požáru o velikosti 500 kW/m<sup>2</sup>. Podle Reina lze uvažovat provoz kanceláří. Způsob šíření blízkého pole v rámci požárního úseku není v Reinově modelu zatím popsán. Je závislý na ventilačních podmínkách, způsobu zapálení a rozložení paliva v prostoru. Podle dřívějších studií je zřejmé, že se požár bude šířit směrem od větracích otvorů dále do hloubky objektu, viz (Cooke, 1994).

### HRRP model

V roce 2015 byl autorkou této práce publikován další model putujícího požáru. Model je založen na opakujících se teplotních křivkách působící na konstrukci v sousedních částech požárního úseku s určitým časovým posunem (Horová, 2015). Požární úsek je rozdělen do polí, ve kterých je teplota plynu popsána pomocí parametrických křivek zohledňující rychlost uvolňování tepla (označených jako HRRP křivky) v každém z těchto polí. Použité křivky odpovídají parametrickým křivkám dle německé národní přílohy DIN EN 1991-1-2/NA: 2010 popsané v kap. 4.3.1 této práce. Rozdělením požárního úseku do různého počtu teplotních polí, ve kterých je teplota plynu popsána vždy jednou HRRP křivkou, je možné předpovědět nejzávažnějšího požární scénář. Časový posun HRRP křivek působících v každém poli je dán časem k dosažení maximální teploty předchozí HRRP křivky. Předehřívání plynu a konstrukce v sousedních polích hořením v počátečních polích je popsáno pomocí teploty vzdáleného pole  $T_{ff}$  jako

$$T_{ff} = \left[ \frac{5}{3} \cdot \left( 5.38 \frac{Q^{\frac{2}{3}}}{H} \right)^4 \cdot \frac{x_{nf}^{-\frac{5}{3}} - x_{ff}^{-\frac{5}{3}}}{x_{ff} - x_{nf}} + 4T_{\infty} \cdot \left( 5.38 \frac{Q^{\frac{2}{3}}}{H} \right)^3 \cdot \frac{x_{nf}^{-1} - x_{ff}^{-1}}{x_{ff} - x_{nf}} + 18T_{\infty}^2 \cdot \left( 5.38 \frac{Q^{\frac{2}{3}}}{H} \right)^2 \cdot \frac{x_{nf}^{-\frac{1}{3}} - x_{ff}^{-\frac{1}{3}}}{x_{ff} - x_{nf}} + 12T_{\infty}^3 \cdot \left( 5.38 \frac{Q^{\frac{2}{3}}}{H} \right) \cdot \frac{x_{nf}^{\frac{1}{3}} - x_{ff}^{\frac{1}{3}}}{x_{ff} - x_{nf}} + T_{\infty}^4 \right]^{1/4} \quad (1.74)$$

kde  $Q$  [kW] je rychlost uvolňování tepla požárního zatížení na dané podlahové ploše,  $H$  [m] je výška požárního úseku,  $x_{nf}$  [m] je vzdálenost mezi středem a okrajem daného pole s uvažovaným požárním

zatížením,  $x_{ff}$  [m] je vzdálenost mezi středem pole, kde se vyskytuje požár a středem vzdáleného pole, které je předeříváno, a  $T_{\infty}$  [°C] je teplota okolního plynu.

HRRP model putujícího požáru byl ověřen pomocí výsledků požární zkoušky provedené v horním patře experimentálního objektu ve Veselí n. L. a CFD numerické simulace požárního scénáře této zkoušky. S přihlédnutím k určitým omezením v použití modelu, viz (Horová, 2015), je možné HRRP model použít jako jednoduchý inženýrský nástroj k popisu teploty plynu vyvolané putujícím požárem v prostoru budovy. Aplikací modelu na konstrukční prvky nebo jejich části umístěné v určitém poli požárního úseku lze pomocí MKP modelu ověřit mechanické chování konstrukce.

### **iTFM model**

V roce 2015 byl Stern-Gottfriedův a Reinův TFM model zpřesněn zavedením několika upravenými rovnicemi (Rackauskaite a kol. 2015). Nový model s názvem iTFM model (z angl. Improved Travelling Fire Methodology) nově uvádí rovnice, pomocí kterých je možné snížit rozsah možných velikostí požáru s přihlédnutím k rychlosti šíření požáru ze skutečných požárů. Analytické rovnice používané k výpočtu teplot vzdáleného pole jsou zpřesněny. Pro zohlednění výkyvů teplot v oblasti blízkého pole v důsledku přirozených oscilací plamene je do modelu zavedena teorie šlehání plamene. Zpřesněné teploty blízkého pole jsou v rozsahu mezi 800 a 1200 °C, v závislosti na velikosti požáru a charakteristikách požárního úseku.

### **ETFM model**

ETFM model (z angl. Extended Travelling Fire Methodology) vychází z TFM modelu, je však doplněn o výpočet teploty plynu blízkého pole (v blízkosti posuzované části konstrukce) pomocí Hasemiho modelu pro lokální požár a jednoduchým výpočtem teploty kouřové podstropní vrstvy s využitím zónového modelu FIRM (Janssens, 2000) pro oblasti vzdálené od požáru (vzdálené pole). ETFM model umožňuje předpovědět teplotní pole jak ve fázi ohřevu, tak fázi chladnutí požáru pro každý konstrukční prvek ve velkých požárních úsecích (Dai a kol. 2020).

ETFM model předpovídá prostorové i časové změny teplotního pole. Na rozdíl od TFM modelu, ve kterém jsou teploty blízkého pole dány jednotným předpokladem 800 °C - 1200 °C, v ETFM modelu jsou teploty plynu pro pole blízké požáru proměnlivé. Využití zónového modelu FIRM v ETFM modelu umožňuje splnění podmínek zachování energie a zachování hmoty.

### **TRAFIR model**

V současné době je vyvíjen analytický model putujícího požáru v rámci evropského projektu TRAFIR (Charlier a kol., 2022). Předpověď požáru a teploty plynu, která ovlivňuje okolní konstrukce, je založena na teorii virtuálního plamene vyvinutého v rámci projektu LOCAFI (Francis a kol., 2019). Požár je v modelu uvažován jako pravoúhlý objem nacházející se nad daným hořícím pásem, které se

vyvíjejí s časem. Na rozdíl od modelu LOCAFI, kde má virtuální plamen kónický tvar, je zde virtuální plamen uvažován jako obdélník. Model využívá, kromě jiných parametrů, polohové součinitele, které určují podíl celkového sálavého toku vycházejícího z daného sálavého povrchu, a přichází na daný přijímací povrch. Model postupně vyhodnocuje několik kroků: stanovuje geometrie požáru a jeho umístění v úseku, stanovuje teplotu plamene, předpovídá tepelné toky v požárním úseku a nakonec předpovídá teploty ocelového konstrukčního prvku umístěného v úseku. Pro vyhodnocení tepelných toků jsou definovány různé zóny v závislosti na umístění konstrukce a na tom, zda plamen dopadá na strop či nikoli. Teploty ocelového prvku jsou v modelu počítány podle přírůstkové metody dle Eurokódu 3. Vliv ventilace je v modelu posuzován na základě přístupu navrženým Kawagiem (1958).

## 4.4 Pokročilé modely požáru

### 4.4.1 Zónové modely požáru

Zónové modely se využívají k předpovědi požáru v místnosti či komplexu místností, ve kterých se požární zatížení nachází pouze lokálně. Zónové modely rozdělují daný prostor do jedné nebo dvou homogenních zón, které mají v daném časovém kroku rovnoměrnou teplotu, hustotu a koncentraci plynů. Výpočet je řešen v jednom nebo více objemech pomocí rovnic zachování hmoty a energie. V počáteční fázi požáru (tj. před flashover efektem) model předpokládá vznik dvou zón v místnosti, tj. dvouzónový model. Dolní „studená“ zóna se ochlazuje přívodem vzduchu z exteriéru přes otvory a horní „horká“ zóna (kouřová vrstva) se postupně nahřívá vzestupným proudem zplodin od požáru prostřednictvím požárního kužele (tzv. fire plume). Jednozónový model vyjadřuje stav hořícího prostoru jako jednu homogenní zónu po dosažení flashover efektu, tj. po dosažení předem definovaných přechodových kritérií, která tomuto stavu odpovídají. Zónové modely lze doplnit simulací spuštění detekčních systémů a sprinklerových hlav. Předpověď zónového modelu není z důvodu uvažování homogenní teploty v celé zóně prostorově detailní, ale pro řadu aplikací je zjednodušení dostačující. Výhodou je zejména jednoduchost jejich řešení a s tím spojená nenáročnost na hardware a čas potřebný k výpočtům. Na rozdíl od CFD modelů zónové modely neumožňují sledovat dynamiku požáru (zanedbávají rovnice zachování hybnosti). Zónové modely nejsou způsobilé k výpočtům v prostorech s jedním převládajícím rozměrem – např. šachty, chodby, tunely.

### 4.4.2 Modely dynamiky tekutin

Modely dynamiky tekutin (z angl. Computational Fluid Dynamics, tzv. CFD modely, modely typu pole či dynamické modely kapalin a plynů) jsou postavené na algoritmech počítačové dynamiky tekutin. V těchto modelech je oblast řešeného prostoru rozdělena do velkého, avšak konečného počtu

trojrozměrných kontrolních objemů (buněk), ve kterých je řešena soustava parciálních diferenciálních rovnic vyjadřující zákon zachování hmoty, energie a hybnosti v prostoru požáru a jeho okolí, v tzv. výpočetní doméně. CFD modely umožňují získat prostorově a časově detailní informace. Přesnost získaných informací z modelu se odvíjí od zvoleného počtu kontrolních objemů. Je možné rozlišovat obecné CFD modely a požární CFD modely, které jsou doplněny o specifické submodely. Výhodou CFD modelů je zejména schopnost řešit sofistikovanější případy, při kterých již zjednodušení zónových modelů nelze aplikovat. Lze simulovat celou řadu jevů, jako například teplotní, rychlostní či tlaková pole, pohyb kouře a další jevy. Nevýhodou CFD modelů je uživatelská náročnost, obtížná dostupnost vstupních dat, zejména materiálových a požárních charakteristik, které mohou výstupní data zatížit výraznou chybou. Výsledky počítačových simulací v podobě grafů, barevných kontur, vektorových polí či videozáznamů mohou působit velice sofistikovaným dojmem, ale zároveň je nezbytné mít stále na zřeteli, že výsledky mohou být v případě neodborné či nedbalé aplikace zatíženy výraznou chybou (pohybující se i vysoko nad hranicí 100 %) ve srovnání s realitou. Dalšími nevýhodami jsou časová náročnost přípravy modelů a jejich výpočtů a požadavky na hardware (Wald, 2017a). Kompletní zhotovení CFD simulace se pohybuje v řádu měsíců, viz (SFPE 2016), (Novozhilov, 2001), (Yeoh a Yuen, 2009) a (Yan, 2008).

#### 4.4.3 Vstupní hodnoty

Relevantnost a úplnost vstupních dat udává přesnost získaných výsledků (výstupů) z požárních modelů. Je možné rozlišovat vstupní hodnoty materiálové (vlastnosti materiálů) a vstupní hodnoty modelové (výpočetní síť, model turbulence, radiace, atd.). Hodnoty potřebné pro výpočet se mohou lišit dle vybraného modelu požáru. Pro méně sofistikovanější modely obecně postačí méně vstupních dat než pro komplexní modely typu CFD.

Pro stanovení průběhu požáru je nutné zvolit návrhové scénáře požáru, které budou modelovány. Je nutné stanovit několik scénářů, které pokrývají veškeré možné případy požáru. Problematice požárních scénářů se věnují (Hurley a Rosenbaum, 2015) a Metodika využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb (Apeltauer a kol., 2019). Požární scénář zahrnuje konkrétní podmínky řešeného prostoru. Tyto podmínky musí být detailně popsány dle úrovně modelu/softwarevého nástroje, který je na řešení aplikován.

Vstupní údaje by měly zahrnovat informace o:

- nastavení výpočtu:
  - velikost výpočetního kroku,
  - čas výpočtu,
- geometrii a numerické síti:
  - rozměry budovy/požárního úseku,

- velikost výpočetní oblasti,
- numerická síť (velikost buňky sítě),
- vlastnosti materiálů:
  - stavební materiály úseku a jejich tloušťky,
  - vlastnosti materiálů - tepelně technické vlastnosti (TTCH) ohraničujících konstrukcí jako např. tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, hustota, a další vlastnosti při hoření,
  - definice kinetiky hoření (reakce hoření),
  - ostatní hořlavé předměty - druh, geometrie a povrchová úprava hořlavých předmětů, jejich fyzikální a chemické vlastnosti a jejich rozmístění, rychlost uvolňování tepla, rychlost úbytku hmotnosti, případně požární zatížení aj.,
- ventilační podmínky:
  - rozměry a pozice horizontálních a vertikálních otvorů jako jsou okna a dveře, popř. odvětrání,
  - specifikace nucené ventilace,
- zdroj hoření:
  - vlastnosti požáru/zdroje hoření – druh, velikost, tvar a umístění vůči požárnímu úseku, skladba, způsob jeho vznícení/vzplanutí, velikost požárního zatížení jako např. hustota požárního zatížení nebo rychlost uvolňování tepla, apod.,
- aktivní prvky požární bezpečnosti:
  - samočinné hašení (druh, dostupnost dodávky hasiva a intenzita hašení),
  - detekce (typ detektorů, rozmístění, citlivost a rychlost reakce hlásiče na požár),
  - odvod kouře (způsob a intenzita odvodu zplodin hoření) aj.,
- okrajové podmínky jako např. počáteční teplota, vlhkost či proudění plynu v úseku,
- nastavení výpočetních modelů (model turbulence, radiační model – doporučuje se pouze u zkušených uživatelů),
- charakteristika požadovaných výstupů (pozice, velikost, množství, atd.),
- a další nutné vstupy požadované konkrétním softwarovým nástrojem.

Stručný popis spolu s doporučením k vybraným vstupním parametrům je popsán níže.

### **Vlastnosti materiálů**

Mezi nejdůležitější a pro uživatele obvykle i obtížně dostupná vstupní data patří zejména požární technické charakteristiky (PTCH) materiálů definující předpokládané chování materiálu (např. výhřevnost, teplota vzplanutí nebo rychlost uvolňování tepla). Při požadavku přesných výstupů je možné zadat vlastnosti materiálů v závislosti na jejich teplotě.



PTCH některých materiálů i celých výrobků je možné najít v publikacích (Särdqist, 1993), (McGrattan a Bareham, 2015), (Wald a kol., 2017), dále pak v databázích výzkumných organizací a zkušebních ústavů (National Institute of Standard and Technology, USA a Department of Fire Protection Engineering, University of Maryland, USA). V ČR je možné využít data z Materiálové databáze MV ČR, ČVUT, TÚPO, VŠB TU Ostrava, VUT v Brně zpracované v rámci výzkumného projektu VI20162019034: Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb (<https://ptch.fce.vutbr.cz/>). PTCH a problematika hoření jsou rovněž komentovány v monografii (Cábová a kol., 2019) a v metodice Vstupní data do modelů požáru (Hasalová a Hejtmánek, 2019).

### **Geometrie a numerická síť**

Všechny objekty v modelovém prostoru musí odpovídat výpočetní síti. Obecně platí, že všechny geometrické charakteristiky modelového prostoru musí být zachyceny buňkou sítě. Objekty, které jsou menší než buňka sítě, musí být buď aproximovány, nebo zanedbány. To obvykle vede k zjednodušení modelu. Před zanedbáním konkrétního objektu je však třeba pečlivě zvážit, zda objekt může ovlivnit chování požáru (např. tepelný tok, proudění, aj.) v modelovaném úseku. Úroveň detailů geometrie je provázána s velikostí buňky sítě. Často musí být proveden kompromis mezi velikostí sítě a zjednodušením geometrie objektu. Velikost buňky výpočetní sítě je jednou z proměnných, které ovlivňují přesnost výsledků. Při použití příliš hrubé sítě může dojít k zanedbání určitých detailů v proudění či teplotním poli. V uživatelských příručkách softwarových nástrojů jsou uvedena doporučení pro výběr velikosti buněk sítě. Při rozhodování o velikosti buňky sítě je třeba vzít v úvahu rozměry celé výpočetní oblasti a dobu potřebnou pro výpočet.

### **Ventilační podmínky**

Vývoj horkých plynů a jejich teplota je ovlivněna ventilačními podmínkami. Popis otvorů umožňujících přirozené proudění plynů nebo nucené větrání je proto klíčovým vstupem při modelování. K nalezení nejnepříznivějšího požárního scénáře se doporučuje simulovat několik případů s různými ventilačními podmínkami - různé velikosti otvorů, různé umístění (ve stěnách, ve střeše) a jejich kombinace (přirozené s nuceným, větrání s aktivními prvky požární ochrany, apod.).

### **Zdroj hoření**

Důležitým vstupem pro simulaci požáru metodou CFD je definice hoření, což je jednou z nejnáročnějších a nejcitlivějších úloh a často se nelze obejít bez určité míry zjednodušení. Při výběru způsobu popisu hoření je nutné ověřit, zda je konkrétní softwarový nástroj pro daný způsob popisu hoření validován.

Hoření v CFD modelech lze simulovat pomocí různých přístupů. Od zjednodušeného modelu hoření na základě předepsané rychlosti uvolňování tepla (konkrétně na základě rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy, z angl. Heat Release Rate per Unit Area, HRRPUA), přes popis pyrolýzy pomocí jedнокrokové reakce, až po komplexní popis pyrolýzy (Šálek, 2021). Běžně používaný zjednodušený přístup není dostatečný pro předpověď šíření požáru. Komplexní modely pyrolýzy založené na fyzikálních a chemických procesech probíhajících při hoření pevných materiálů mohou teoreticky šíření požáru popsat. Publikace o komplexním pyrolýzním přístupu a jeho aplikacích pro scénáře, kde dochází k šíření požáru, však téměř chybí. Problém spočívá ve vstupních parametrech, které jsou pro komplexní modely hoření potřebné.

V komplexním pyrolýzním modelu je potřeba matematicky popsat fyzikální a chemické procesy probíhající při pyrolýze. To zahrnuje např. rozklad tuhého materiálu podle zjednodušeného reakčního schématu tepelného rozkladu, kinetiku tepelného rozkladu, transport tepla a hmoty, tvorbu zuhelnatělého materiálu, spalování atd. Podrobný popis všech těchto procesů vede k rozsáhlým sadám vstupních dat. Některé vstupní parametry, zejména kinetické parametry, je v literatuře velmi obtížné najít a některé z nich je nutné získat experimentálně.

Doporučení k výběru definice kinetiky hoření jsou uvedeny v autorky publikaci (Šálek, 2021) a metodice Vstupní data do modelů požáru (Hasalová a Hejtmánek, 2019).

### **Aktivní prvky požární bezpečnosti**

Výpočty s různým stupněm součinnosti aktivních prvků požární ochrany jsou jednou z nejsložitějších disciplín. Při modelování aktivních prvků požární ochrany obecně nebývá dosaženo dobré shody s experimentálními daty. I zde platí, že je nutné ověřit, zda je konkrétní softwarový nástroj pro daný způsob účel validován. Problematiku modelování samočinného hašení pomocí sprinklerů je možné najít v metodice Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany (Kučera a kol., 2019).

### **Definice výsledků**

Softwarové nástroje nabízejí výpočet velkého množství výstupních hodnot. U některých z nich ale nemusí být dostatečně ověřená jejich přesnost. Informace o validovaných výstupech jsou vždy uvedeny v dokumentaci konkrétního softwarového nástroje.

Základními výstupy z pokročilých modelů požáru jsou:

- rychlost uvolňování tepla,
- teploty plynů v prostoru požáru,
- teplotu na povrchu a vnitřní teplotu pevných látek,
- plocha zasažená požárem,

- koncentrace kouře a odhad viditelnosti,
- rychlost proudění plynů větracími otvory,
- rozdělení tlaku v místnosti,
- tvorba, pohyb a koncentrace toxických zplodin (vodní páry, CO<sub>2</sub>, CO),
- doba do rozhodujících událostí (např. do celkového vzplanutí – flashoveru),
- aktivace požárně bezpečnostních zařízení (sprinklerů a detektorů),

Dále lze u pokročilých modelů určit:

- celkový tepelný tok a jeho složky (konvekce, kondukce a radiace),
- optická hustota kouře,
- rychlost hoření,
- hmota kapky vody na jednotku plochy,
- vývoj tepla na jednotku objemu,
- poměr vzduch/palivo,
- výšku plamene.

#### 4.4.4 Softwarové nástroje

Na trhu je v současné době velké množství komerčního i volně dostupného softwaru. Každý má svou specifickou oblast využití, a velice důležitý se tak stává správný výběr. Před aplikací softwaru na řešený problém je nutné ověřit, zda je software na daný problém validován.

Základní výčet deterministických matematických modelů, které jsou vhodné k modelování požáru, je uveden v tab. 9. Výběr softwarových nástrojů je proveden na základě četnosti používání, jejich aktuálnosti, vývoji a technické podpory. Nejedná se o úplný výčet nástrojů (Wald, 2017b).

Tab. 9 Výčet vhodných softwarových nástrojů k modelování požáru

<b>Zónové modely, aktivně podporované</b>	
<b>Název</b>	<b>Stručný popis, odkaz</b>
ARGOS	Zónový model umí počítat pohyb kouře a tepla až v 10-ti propojených místnostech, <a href="https://brandogsikring.dk/en/argos/">https://brandogsikring.dk/en/argos/</a>
B-RISK	Zónový model s pravděpodobnostní funkcí Monte Carlo k předpovědi pož. prostředí v uzavřeném prostoru. Nahradil BRANZFIRE model, <a href="https://www.branz.co.nz/cms_display.php?sn=75&amp;st=1&amp;pg=20770">https://www.branz.co.nz/cms_display.php?sn=75&amp;st=1&amp;pg=20770</a>
CFAST	Dvouzónový pož. model umožňující předpovědět prostředí při požáru v budově o více místnostech. Počítá dobu distribuce kouře a plyných produktů, <a href="https://pages.nist.gov/cfast/index.html">https://pages.nist.gov/cfast/index.html</a>
OZone	Dvouzónový, jednozónový či kombinovaný pož. model umožňující předpovědět teplotu plynu při požáru v budově, <a href="http://sections.arcelormittal.com/download-center/design-software/fire-calculations.html">http://sections.arcelormittal.com/download-center/design-software/fire-calculations.html</a>
<b>Modely pole, aktivně podporované</b>	
<b>Název</b>	<b>Stručný popis, odkaz</b>
ANSYS FLUENT	Obecný CFD model s širokou aplikací, <a href="https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent">https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent</a>
FDS	Požární CFD model, simuluje proudění plynů s nízkou rychlostí a přenos kouře a tepla při požáru, <a href="https://pages.nist.gov/fds-smv/downloads.html">https://pages.nist.gov/fds-smv/downloads.html</a>
PHOENICS/FLAIR	Požární CFD model, simuluje rozvoj požáru a rozptyl kouře a polutantů za přechodných podmínek nebo ustáleného stavu, <a href="http://www.cham.co.uk/Flair.php">http://www.cham.co.uk/Flair.php</a>
SMART FIRE	Požární CFD model s automatickým generováním sítě a interaktivním grafickým interfacem. Simulace požáru, kouře, tepelného sálání a toxicity uvnitř celého objektu (budov, letišť, obchodů, a železničního prostředí), <a href="https://fseg.gre.ac.uk/smartfire/">https://fseg.gre.ac.uk/smartfire/</a>

#### 4.4.5 Kontrolní seznam

Seznam slouží ke kontrole správného postupu při modelování požáru pomocí pokročilých softwarových nástrojů. Seznam pokrývá kontrolu vstupních dat výpočtu a kontrolu kvality záznamu výpočtu. Jednotlivé body seznamu nelze plošně aplikovat na všechny druhy softwarů.

##### Zvolená metoda a výběr nástroje

- Jaká je zvolená metoda výpočtu a proč je vybrán konkrétní softwarový nástroj?
- Je definován vybraný softwarový nástroj včetně čísla verze softwaru?
- Je vybraný model požáru dostatečný vzhledem k úrovni ostatních částí posouzení?
- Lze softwarový nástroj aplikovat na danou oblast řešení/je na danou oblast validován?
- Jaké jsou okrajové podmínky použitého softwaru?
- Jaké jsou nejistoty řešení daného softwaru?

### Výpočetní oblast a geometrie modelu

- Odpovídá výpočetní oblast řešenému objektu?
- Je výpočetní oblast rozšířena v místě ventilačních otvorů?
- Je namodelována geometrie úseku včetně vnitřních objektů, které mohou mít na chování požáru vliv?
- Jsou namodelovány ventilační otvory? Jsou vhodně zvoleny vlastnosti otvorů?
- Jsou zadány veškeré materiály a tloušťky konstrukcí?
- Jsou vloženy vlastnosti materiálů v podobě dostupných TTCH?

### Výpočetní síť

- Obsahuje model výpočetní síť? Je velikost buňky výpočetní sítě vhodně zvolena?
- Navazují na sebe sousedící či překrývající se výpočetní sítě?
- Odpovídají veškeré objekty modelu velikosti buňky sítě?
- Byla provedena citlivostní studie na velikost výpočetní sítě?

### Požár

- Obsahuje model zdroj hoření?
- Je vhodně zvolena definice zdroje hoření?

### Reakce

- Je zadána reakce hoření?
- Je reakce vhodně zvolena?

### Další

- Jsou v modelu zadány veškeré aktivní prvky požární bezpečnosti?
- Jsou definovány počáteční podmínky?

### Výsledky a vyhodnocení

- Jsou zadány všechny potřebné výstupy včetně jejich pozice a vlastností?
- Je zvolen celkový čas a časový krok výpočtu?
- Jsou zaznamenány veškeré vstupní hodnoty včetně jejich zdrojů ve zprávě?
- Jsou výsledky výpočtu zpracovány přehledně v grafech, obrázcích i numericky?
- Jsou výsledky dostatečně popsány?
- Jsou výsledky výpočtu relevantní? Je zhodnocena jejich přesnost?
- Je uvedena veškerá použitá literatura?

## 4.5 Verifikační příklady

### 4.5.1 Teploty vazníku průmyslové haly

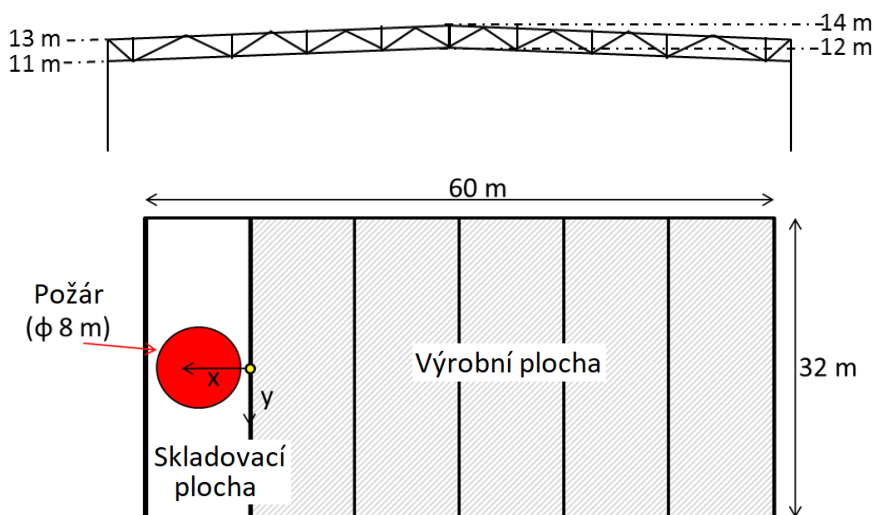
#### Obecně

Předmětem ověřovacího příkladu je výpočet teploty poblíž vazníků průmyslové haly pomocí zónového modelu OZone verze 3.0.4/2018. V hale je uvažován lokální požár na kruhové ploše o průměru 8 m. Vstupní hodnoty pro rychlost uvolňování tepla jsou použity dle normy ČSN EN 1991-1-2. Analýza je zaměřena na vazníky, jejichž prvky jsou vystaveny účinkům požáru.

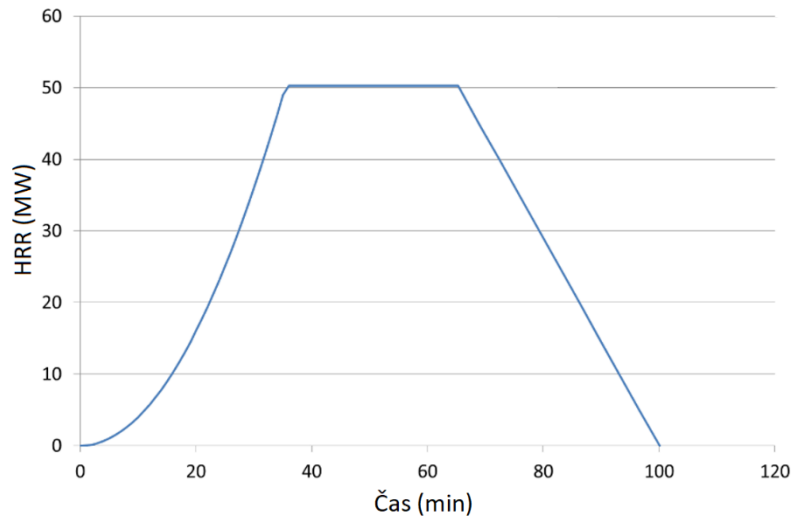
#### Popis budovy a požární scénář

Skladovací hala na obr. 25 je 60 m dlouhá a 32 m široká s vrcholem ve výšce 14 m. Vazníky s pasy průřezu HEA 220 a diagonálami L60×60×6 jsou umístěny v osových vzdálenostech 10 m. Dolní pásnice vazníku je ve výšce 12 m. Hala slouží pro výrobu. Na konci budovy je malá skladovací plocha, ve které se předpokládá lokální požár. Je uvažováno s požárem 10 t celulózo­vého materiálu, který je skladován na ploše 50 m<sup>2</sup>. Ve výpočtu je použita ekvivalentní kruhová plocha požáru o průměru 8 m. Křivka rychlosti uvolňování tepla (HRR) na obr. 26 je uvažována podle přílohy E ČSN EN 1991-1-2. Předpokládá se, že

- střední rychlost rozvoje požáru je  $t_{\alpha} = 300$  s,
- zdroj požáru je celulóza s výhřevností 17,5 MJ/kg a
- rychlost uvolňování tepla na jednotku plochy je 1000 kW/m<sup>2</sup>.



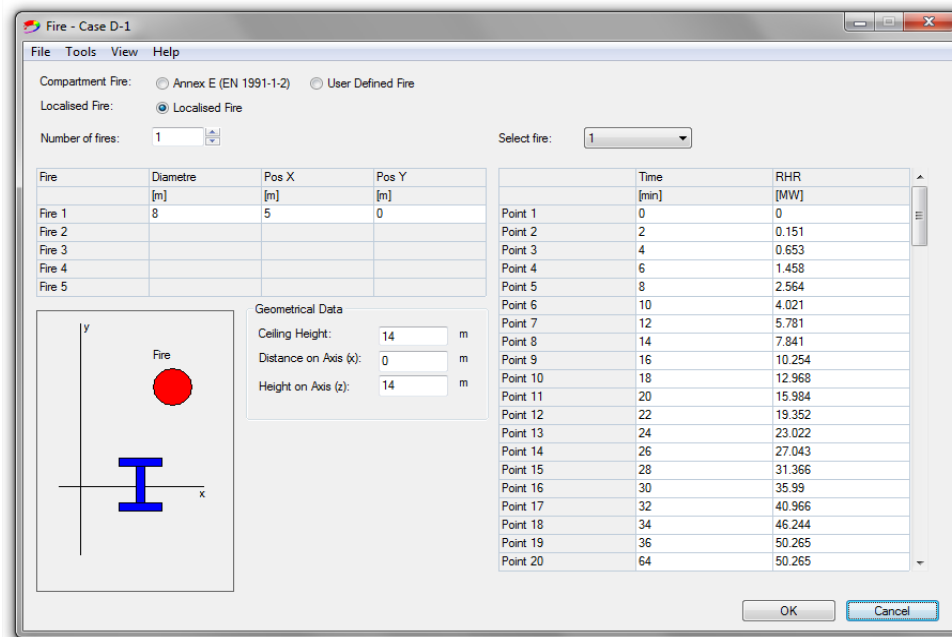
Obr. 25 Průmyslová budova – Řez a Půdorys



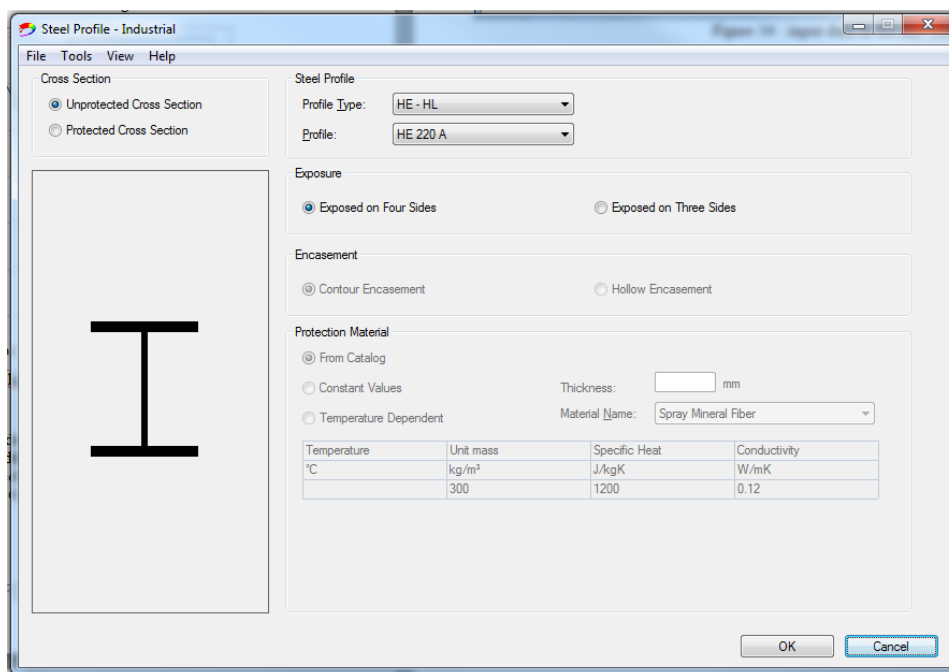
Obr. 26 Křivka HRR pro lokální požár v hale

### Vstupní data do programu OZone

Analýza je zaměřena na vazníky, jejichž prvky jsou vystaveny účinkům požáru. Vstupní data jsou zadána do softwaru OZone následovně:



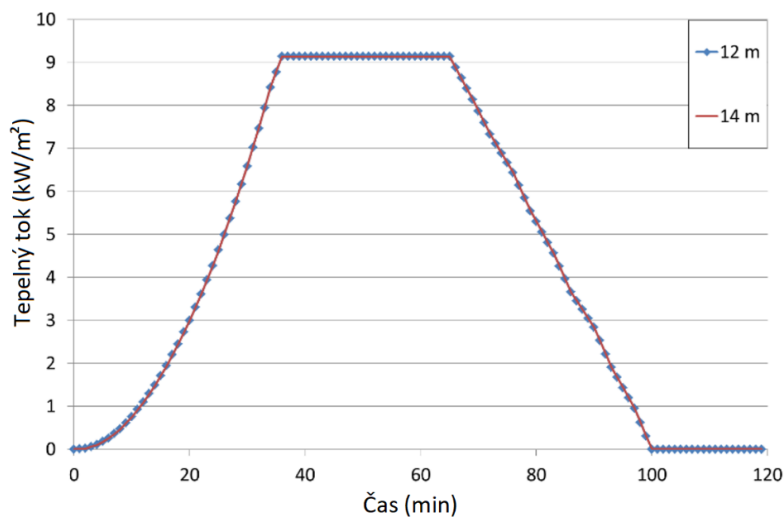
Obr. 27 Vstupní data specifikující požární scénář



Obr. 28 Vstupní data specifikující analyzovaný prvek

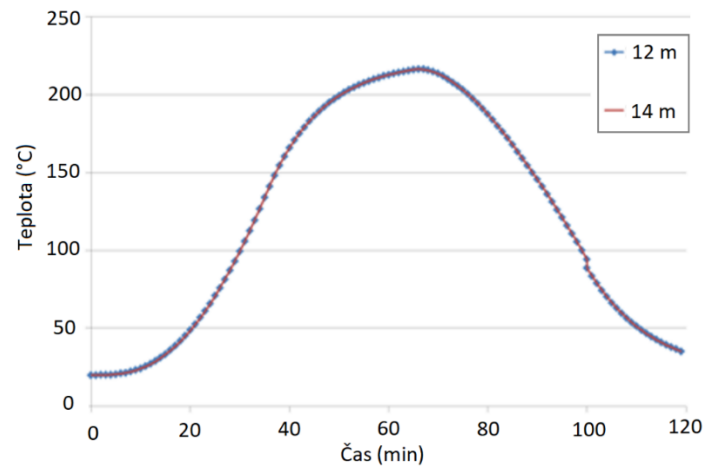
## Výsledky

Při požáru o průměru 8 m a maximální HRR 50 MW je výška plamene 9,7 m. Plameny nezasáhnou strop. Tepelný tok dopadající na horní a dolní pas vazníku (radiační) je přes 9 kW/m<sup>2</sup> (obr. 29). Teplota dolního pasu vazníku dosáhne 210 °C (obr. 30).



Obr. 29 Přijatý radiační tepelný tok spodním a horním pasem vazníku





Obr. 30 Teplota spodního a horního pasu vazníku

#### 4.5.2 Teplota při požáru v otevřeném parkovacím domě

##### Zónový model požáru

Příklad uvádí výpočet radiačního tepelného toku dopadající na prvky vazníku a jeho teplotu v zónovém modelu. Výpočet je proveden na základě metody popsané v (Francis a kol., 2018). V uvedeném případě je uvažováno pouze s radiačním tepelným tokem, tepelný tok prouděním je zanedbán. Vstupní hodnoty zvoleného požárního scénáře se opírají o normu ČSN EN 1991-1-2.

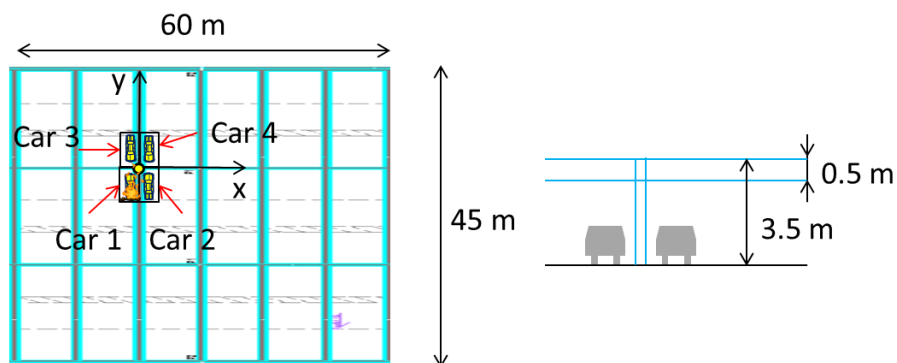
Předmětem ověřovacího příkladu je výpočet tepelného toku a teploty ocelového sloupu v budově otevřené garáže (ECCS 75, 1993). Výpočet je proveden pomocí zónového modelu OZone verze 3.0.4/2018. V budově je uvažován lokální požár, při kterém hoří čtyři automobily. Vstupní hodnoty pro rychlost uvolňování tepla vychází z experimentů naměřených ve Francii. Analýza je zaměřena na ocelový sloup, jehož teplota je počítána po segmentech dle metody uvedené v (Francis a kol., 2018).

##### Popis budovy a požární scénář

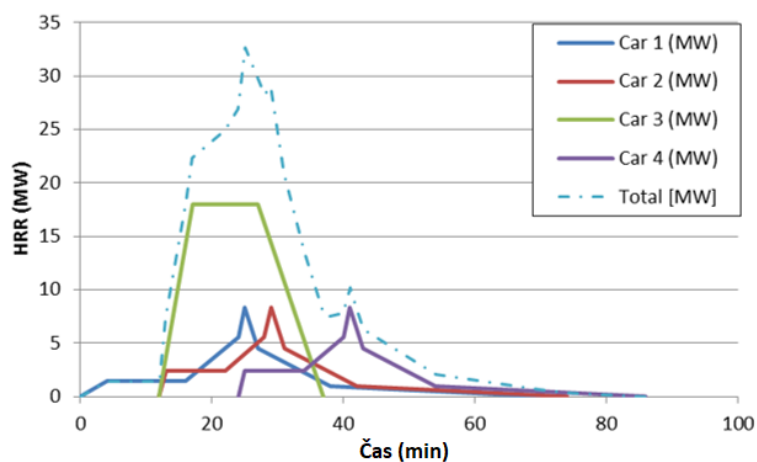
Celkové rozměry budovy otevřeného parkoviště jsou 60 m x 45 m, s pravidelným rastrem nosné konstrukce 10 m x 15 m. Výška stropu je 3,5 m, viz obr. 31. Hlavní nosníky jsou 0,50 m vysoké a ocelové sloupy podírající tyto nosníky jsou z profilu HEA 300. Parkovací místa mají standardní rozměry 2,5 m x 5 m; s plochou 12,5 m<sup>2</sup>, což je ekvivalentní lokálnímu požáru o průměru 4 m. Nosníky umístěné pod stropem ovlivňují šíření kouře pod stropem.

Uvažovaný požární scénář zahrnuje čtyři vozidla stojící kolem sloupu. Tři vozidla jsou velké automobily, zatímco poslední auto je dodávka. Tato situace je jedním z požárních scénářů, které je nutné podle francouzských předpisů ověřit. Uvažovaná hodnota rychlosti uvolňování tepla je uvedena

na obr. 32. Uvedená data pochází z experimentů provedených ve Francii v roce 1996. Požár začíná u vozu 1 a po 12 min se rozšiřuje na automobily 2 a 3. Po dalších 12 min se oheň rozšíří na vozidlo 4.



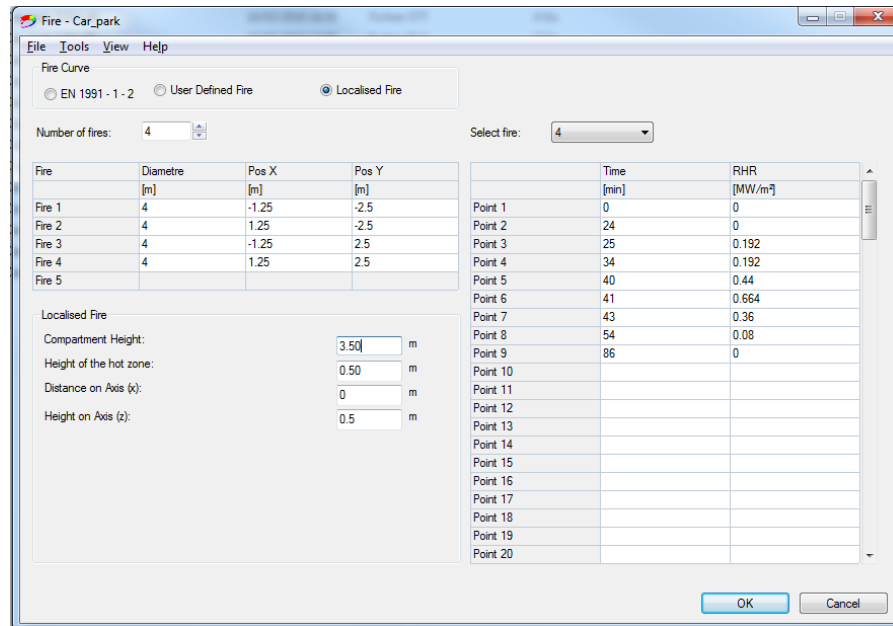
Obr. 31 Rozměry budovy otevřené garáže a umístění vozidel



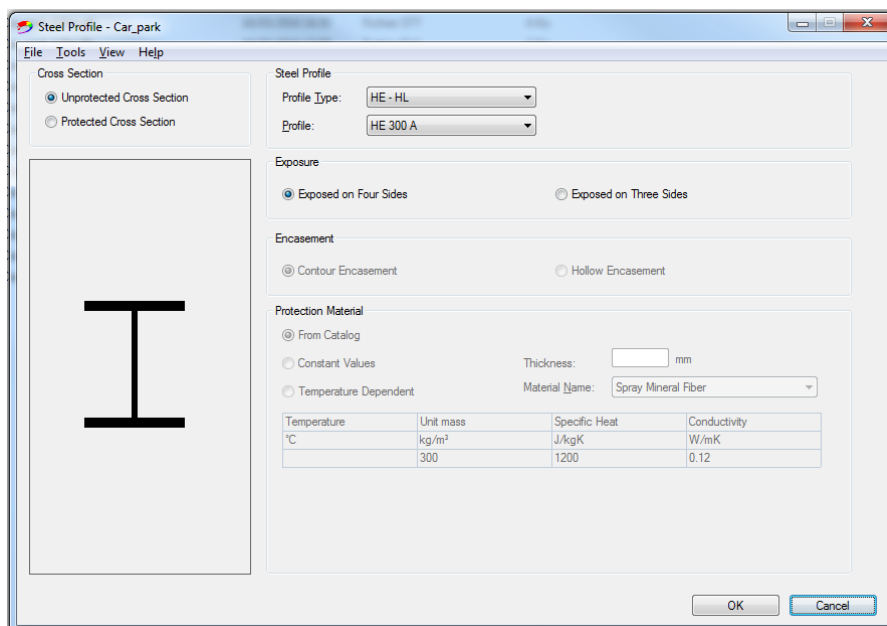
Obr. 32 Křivka HRR pro jednotlivá vozidla

### Vstupní data do programu OZone

Analýza je zaměřena na ocelový sloup, který se nachází nejbližší požáru. Pro výpočet je potřeba zadat čtyři zdroje požáru, jejich polohu vůči řešenému sloupu a křivku HRR pro každý tento zdroj. Dále pak výšku stropu, výšku, ve které může být zóna horkých plynů zadržována (ovlivněno výškou nosníků) a výšku, ve které má být na sloupu proveden výpočet. Dále musí být definován průřez sloupu v záložce Steel Profile. Vstupní data jsou zadána do softwaru OZone následovně:



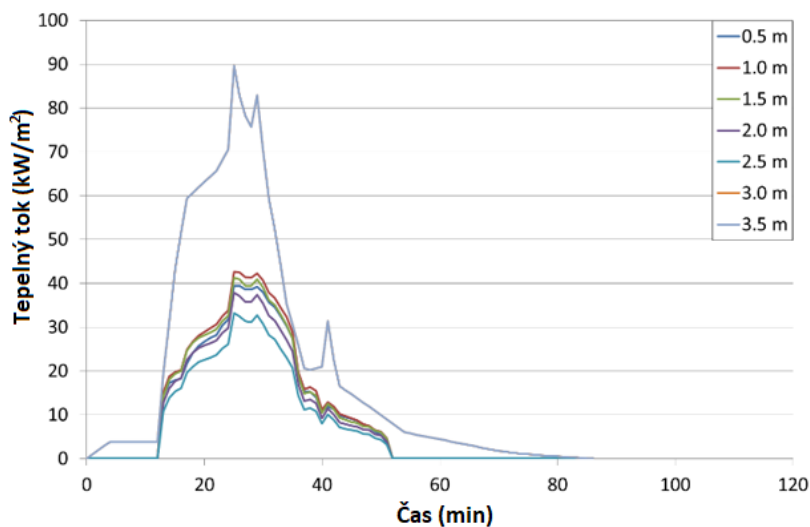
Obr. 33 Vstupní data specifikující požární scénář



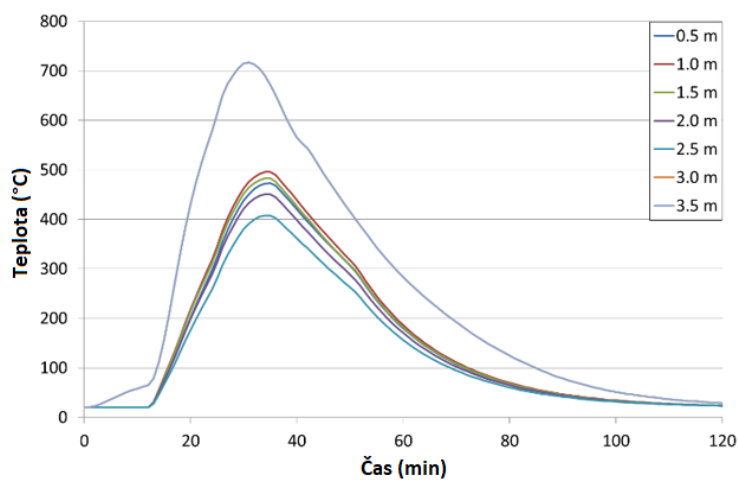
Obr. 34 Vstupní data specifikující analyzovaný prvek

## Výsledky

Software umožňuje grafické znázornění výsledků tepelného toku a teploty prvku daného segmentu. Obr. 35 a obr. 36 uvádí výsledky pro řešený sloup po segmentech o délce 0,5 m. V horké vrstvě plynů pod stropem (mezi 3,0 m a 3,5 m) dosahuje teplota sloupu 700°C. Mimo tuto vrstvu je maximální teplota sloupu 500 °C ve výšce 1 m.



Obr. 35 Přijatý radiační tepelný tok po výšce sloupu



Obr. 36 Teplota po výšce sloupu

## Shrnutí

Příklad uvádí výpočet radiačního tepelného toku dopadající na ocelový sloup a jeho teplotu v zónovém modelu. Výpočet je proveden na základě metody popsané v (Francis a kol., 2018). Vstupní hodnoty zvoleného požárního scénáře se opírají výsledky experimentů automobilů.

### 4.5.3 CFD model požáru v malém požárním úseku

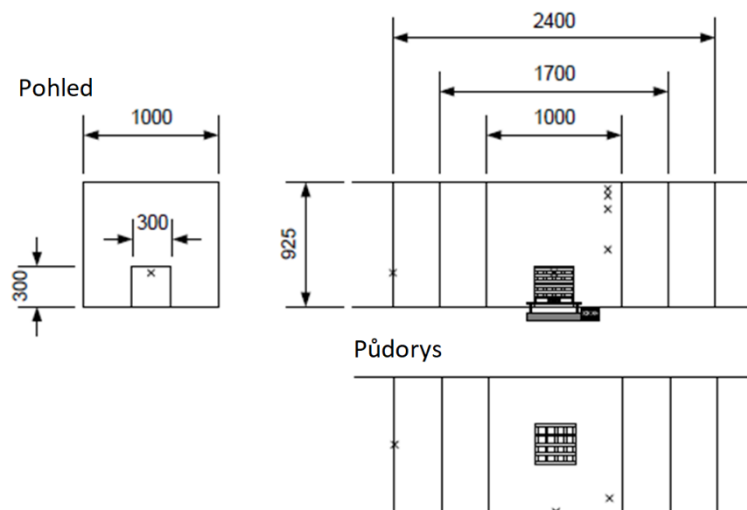
#### Obecně

Předmětem ověřovacího příkladu je výpočet teploty plynu pod stropem malého požárního úseku pomocí softwaru FDS (Lopes a Vaz, 2004). Vstupní hodnoty v modelu, tj. geometrie požárního úseku, materiálové vlastnosti a rychlost uvolňování tepla, jsou převzaty z požární zkoušky v projektu BRANFORSK (Lonnermark a Ingason, 2005).

#### Požární zkouška

Požární zkouška v malém úseku o rozměrech 1,00 m x 1,00 m x 0,925 m je součástí série požárních zkoušek provedených v rámci projektu BRANFORSK (Lonnermark a Ingason, 2005). V úseku se nachází jeden otvor o rozměrech 0,30 m x 0,30 m. Požární zatížení tvoří dřevěná hranice umístěná na půdorysné ploše 0,30 m x 0,30 m. Teplota plynu je zaznamenána pomocí pěti termočlánků. Čtyři termočlánky jsou umístěny na svislici v rohu, 10 cm od každé stěny požárního úseku, ve vzdálenosti 5 cm, 10 cm, 20 cm a 50 cm pod stropem. Jeden termočlánek je umístěn na ose větracího otvoru, 5 cm pod horním okrajem. Schéma úseku s vyznačenou polohou termočlánků (na obrázku jako „x“, rozměry v mm) je uvedeno na obr. 37. Popis materiálu ohraničujících konstrukcí požárního úseku není součástí zprávy o zkoušce.

Během požární zkoušky byla zaznamenána rychlost uvolňování tepla (HRR) z hořící hranice dřeva a průběh teploty plynu na pěti uvedených termočláncích.



Obr. 37 Uspořádání požární zkoušky (Lonnermark a Ingason, 2005)

## Numerický model

### Software

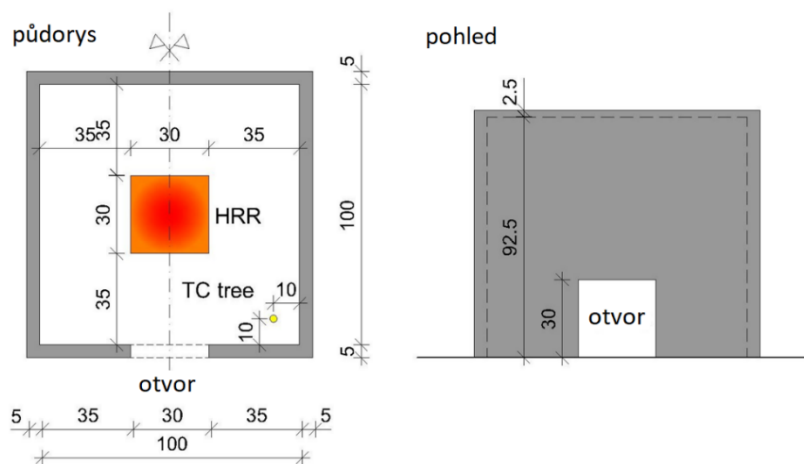
Výpočet je proveden pomocí softwaru Fire Dynamics Simulator (FDS), verze 6.5.2. Výsledky jsou zobrazeny v postprocesoru Smokeview, verze 6.3.12.

### Výpočetní čas

Obecně se doporučuje ponechat velikost výpočetního kroku v základním nastavení softwaru, tzn. nenastavovat vlastní hodnotu. V tomto případě je však časový krok výpočtu zvolen 0,1 s. Celkový čas simulace je 1800 s.

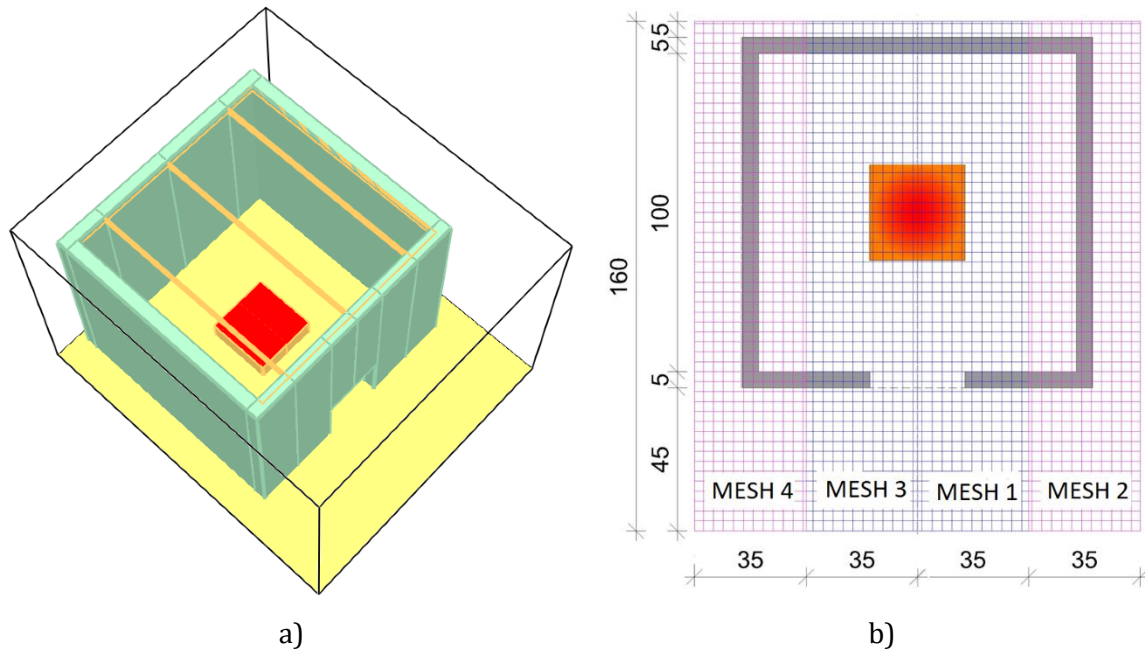
### Výpočetní oblast a síť

Rozměry modelu odpovídající rozměrům úseku z požární zkoušky jsou uvedeny na obr. 38 (rozměry v cm). Na obr. 39 je vizualizace modelu celého požárního úseku.



Obr. 38 Geometrie modelu

K výpočtu jsou použity čtyři sítě o rozměrech 0,35 m x 1,60 m x 1,20 m, viz obr. 39. Každá síť je rozdělena na buňky o rozměrech 0,03 m x 0,03 m x 0,03 m. Velikost buněk sítě je zvolena jako vhodný poměr mezi správností dosažených výsledků a potřebným časem pro výpočet. Před ventilačním otvorem je síť rozšířena o 50 cm, aby ve výpočtu nebylo narušeno přirozené proudění plynů dovnitř a ven požárního úseku.



Obr. 39 a) Vizualizace modelu s výpočetními sítěmi pro symetrickou polovinu; b) Výpočetní síť modelu (rozměry v cm)

### Materiály

Materiál ohraničujících konstrukcí je zvolen s ohledem na typ požární zkoušky a fakt, že se jedná o snadno přemístitelné příčky. V modelu je použit sádkartonu s tepelně technickými vlastnostmi uvedenými v tab. 10.

Tab. 10 Tepelně technické vlastnosti sádkartonu

Měrná tepelná kapacita [kJ/(kg·K)]	0,84
Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]	0,48
Emisivita povrchu	0,9
Absorpční součinitel [1/m]	0,0005

### Okrajové podmínky

Hranice výpočetní oblasti je kromě podlahy ponechána jako otevřená (VENT typu OPEN).

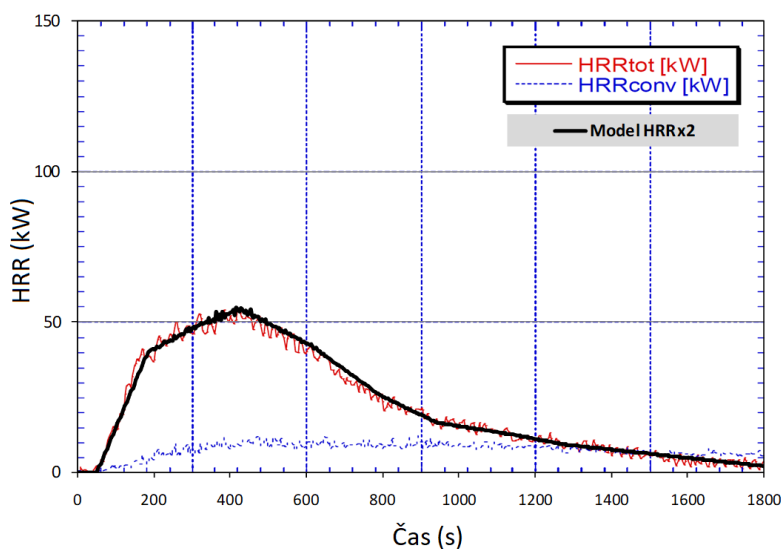
### Geometrie pevných těles

Stěny a strop požárního úseku jsou ze sádkartonu, jehož vlastnosti jsou definovány v tab. 10. Tloušťka ohraničujících konstrukcí je v modelu zvolena 0,05 m. Větrací otvor o velikosti 0,3 m x 0,3 m je vytvořen pomocí otvoru ve stěně (příkaz HOLE). V modelu rozměry otvoru nepatrně přesahují hranici stěny, aby došlo ke správnému vykreslení v grafické vizualizaci ve Smokeview. Dřevěná

hranice je v modelu simulována pomocí tělesa o rozměrech 0,3 m x 0,3 m x 0,1 m. Těleso má vlastnosti povrchu typu INERT, tzn. nereagující s okolním prostředím. Na tomto tělese je umístěn zdroj hoření.

### Zdroj a reakce hoření

Hoření dřevěné hranice není v modelu simulováno. Zdroj požáru je nahrazen plochou s definovanou závislostí HRR na čase. Na obr. 40 je vidět průběh HRR v čase zaznamenaný během požární zkoušky a zjednodušená křivka, která je použita v modelu. Jelikož je v FDS výkon požáru zadáván pomocí rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy (HRRPUA), vstupní hodnoty HRR jsou upraveny pomocí plochy 0,30 m x 0,30 m, na které se nachází zdroj požáru. Hodnota HRRPUA použitá v modelu je rovna 604,44 kW/m<sup>2</sup>. Plocha s daným výkonem požáru je umístěna 10 cm nad podlahou. Postupné uvolňování tepla je v modelu zadáno pomocí závislosti podílu HRRPUA na čase, jak je uvedeno v tab. 11.



Obr. 40 Náhrada rychlosti uvolňování tepla požáru dřevěné hranice zjednodušenou křivkou

Tab. 11 Závislost HRRPUA na čase

HRR na jednotku plochy je 604,44 kW/m <sup>2</sup>	
Čas [s]	Podíl [-]
0,0	0,000
48,0	0,000
181,0	0,736
314,0	0,906
419,0	1,000
610,0	0,774
790,0	0,472
943,0	0,302
1105,0	0,245
1276,0	0,170



1800,0	0,038
1860,0	0,000

Pro reakci hoření, která se ve vstupech definuje, je pro jednoduchost využít propan. Byly použity vlastnosti propanu z databáze programu FDS. Ve zdrojovém kódu není proto třeba blíže specifikovat počet atomů uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku atd., pouze specifikace &REAC FUEL='PROPANE'. Ve skutečnosti je látkou vstupující do reakce hoření dřevo. Definice tohoto reaktantu se doporučuje pouze zkušeným uživatelům.

### Měřící zařízení

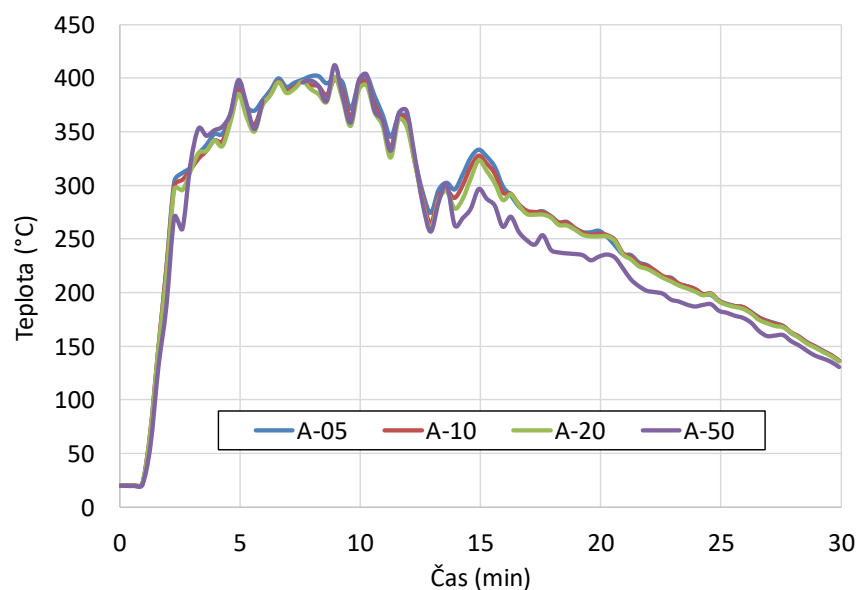
Teplota plynu je v modelu řešena pomocí příkazu TEMPERATURE. Body pro výpočet teploty jsou umístěné 5 cm, 10 cm, 20 cm a 50 cm pod stropem.

### Další parametry výpočtu

V modelu je použita výpočetní metoda velkých vírů, Large Eddy Simulation (LES), se základním nastavením hodnot. Ostatní parametry, které zde nejsou zmíněny, jsou v modelu ponechány v základním nastavení FDS. Vstupní kód modelu požáru je popsán na konci této kapitoly.

### **Výsledky**

Průběhy teploty plynu vypočítané softwarem FDS na termočláncích umístěných 5 cm, 10 cm, 20 cm a 50 cm pod stropem jsou znázorněny v grafu na obr. 41.



Obr. 41 Vypočítané teploty plynu v daných výškách pod stropní konstrukcí

## Shrnutí

Příklad uvádí výpočet teploty plynu při hoření dřevěné hranice v malém požárním úseku pomocí softwaru FDS. Pro zjednodušení výpočtu a zkrácení potřebného času řešení je dřevěná hranice nahrazena plochou vydávající shodné množství tepla. Většina parametrů výpočtu je ponechána v základním nastavení. Model si tak zachovává jednoduchost a praktičnost. Díky validaci pomocí výsledků požární zkoušky provedené v rámci projektu BRANDFORSK (Lönnermark a Ingason, 2004) je ověřená dostatečná shoda modelu s reálnou zkouškou. Příklad lze využít jako ověřovací příklad pro jednoduchou předpověď teploty plynu při požáru.

### 4.5.4 Studie citlivosti sítě v CFD modelu požáru

#### Obecně

Předmětem ověřovacího příkladu je studie citlivosti velikosti sítě a její optimalizace při výpočtu v softwaru FDS. Síť ovlivňuje zásadně kvalitu/přesnost předpovědi výsledků a délku výpočtu. Příklad řeší tři různé zdroje požáru umístěné v suterénu třípodlažního objektu. V suterénu jsou použity čtyři různé výpočetní sítě. Příklad je převzat ze studie provedené v rámci Fire Risk Management Program IRC/NRC vypracované s cílem zvýšení požární bezpečnosti Kanadských domů.

#### Numerický model

##### Software

Numerické simulace byly provedeny pomocí výpočetního nástroje Fire Dynamics Simulator (FDS), verze 6.5.2.

##### Výpočetní oblast a síť

Výpočetní oblast odpovídá geometrii třípodlažní budovy o rozměrech o rozměrech 10,77 m x 9,24 m x 8,22 m. Jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících kvalitu výsledků a délku výpočtu je hrubost výpočetní sítě, kterou zadává uživatel. V uvedeném modelu je použita pro 1.NP a 2.NP výpočetní síť o velikosti buněk 0,20 m x 0,20 m x 0,20 m. Pro suterén, kde se nachází zdroj požáru, je vytvořena samostatná síť, jejíž velikost buněk se v jednotlivých simulacích mění. Pro první simulaci je použita velikost buněk 0,20 m x 0,20 m x 0,20 m; pro druhou simulaci je velikost buněk 0,14 m x 0,14 m x 0,14 m; pro třetí simulaci je použita velikost buňky 0,10 m x 0,10 m x 0,10 m a pro čtvrtou simulaci 0,08 m x 0,08 m x 0,08 m. Velikosti buněk sítě použité v přízemí jsou uvedeny v tab. 12. Pro každý ze tří požárních scénářů jsou při simulacích postupně použity všechny čtyři hrubosti výpočetní sítě suterénu.

Tab. 12 Velikost buněk výpočetní sítě použité v přízemí

Označení sítě	Počet buněk v síti	Velikost buňky (m)
1	54 x 54 x 40	0,20
2	75 x 65 x 20	0,14
3	108 x 90 x 27	0,10
4	135 x 120 x 36	0,08

### Materiály

V modelu jsou pro zachování jednoduchosti příkladu stropy a podlahy uvažovány jako ocelové a na stěny je použit sádkarton. Měrná tepelná kapacita, hustota a tloušťka oceli jsou: 20 [KJ/K·m<sup>2</sup>], 7850 [kg/m<sup>3</sup>], 0,005 [m]. Vlastnosti sádkartonové desky v modelu jsou: součinitel tepelné vodivosti 0,48 [W/m·K], tepelná difuzivita  $4,1 \cdot 10^{-7}$  [m<sup>2</sup>/s], tloušťka 0,013 [m].

### Okrajové podmínky

Podlaha a stropy jsou považovány za tenké stěny, to znamená, že teplota se předpokládá po celé šířce stejná. Vnější stěny jsou považovány za tepelně silné stěny. Model provádí jednorozměrný výpočet přenosu tepla po celé jejich tloušťce.

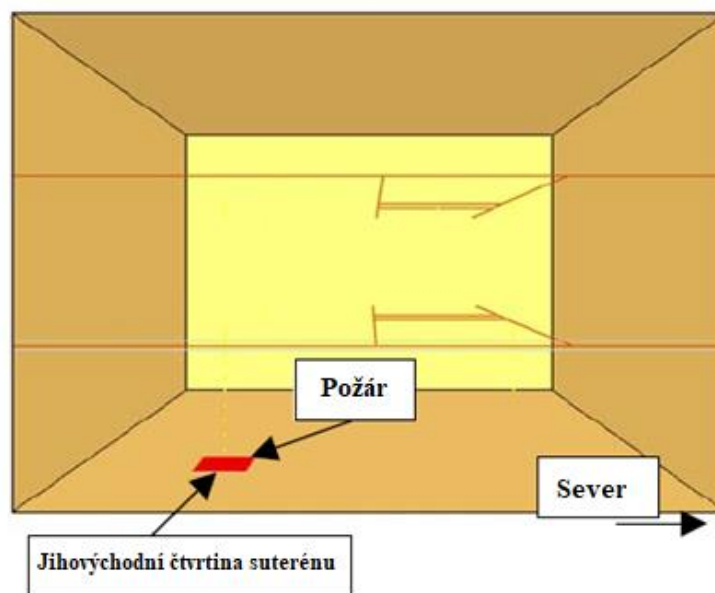
### Geometrie pevných těles

Pro výzkum optimalizace hrubosti sítě FDS modelu je simulována třípodlažní budova pomocí uzavřeného objemu o rozměrech 10,77 m x 9,24 m x 8,22 m, viz. obr. 42. Ve stěně v prvním podlaží je umístěn dveřní otvor o rozměrech 0,9 m x 2,4 m (příkaz HOLE). Objekt je rozdělen na tři podlaží (suterén, 1NP a 2NP). Stropy jsou simulovány pomocí dvou rovin ve výškách 2,7 m a 5,5 m. V těchto rovinách jsou umístěny otvory pro schodiště o rozměrech 3 m x 0,9 m (příkaz HOLE). Všechny otvory jsou během celé simulace považovány za otevřené.

Na podlaze suterénu je umístěna plocha o rozměrech 1 m x 1 m. Tato plocha simuluje zdroj požáru = propanový hořák.

### Zdroj hoření a požární scénáře

Zdroj požáru je aproximován jako obdélníkový objekt představující propanový hořák o ploše 1,0 m x 1,0 m. Zdroj má definovanou závislost HRR na čase. Pro tuto studii jsou brány v úvahu tři velikosti požáru s maximálními hodnotami HRR v rozsahu od 1500 do 3000 kW, viz tab. 13. Je počítáno s rychlou rychlostí rozvoje požáru. Požáry začínají na  $t = 0$  simulace a rostou s druhou mocninou času ( $\alpha = 0,0469$  [kW/s<sup>2</sup>]) až na maximální hodnotu, kde lze HRR ve fázi rozvoje až do maximální hodnoty popsat vztahem E.5 v ČSN EN 1991-1-2. Jelikož je v FDS výkon požáru zadáván pomocí rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy (HRRPUA), vstupní hodnoty HRR jsou upraveny pomocí plochy 1,0 m<sup>2</sup>. Čas do dosažení maximálních hodnot HRR tří simulovaných požárů je shrnut v tab. 13.



Obr. 42 FDS Model objektu – přední pohled

Tab. 13 Čas do dosažení maximálních hodnot rychlosti uvolňování tepla

$Q_{\text{peak}}$ (kW)	$t_{\text{peak}}$ (s)
1500	179
2500	231
3000	253

Ve zdrojovém kódu je nutné definovat reakci hoření, při této simulaci byl využit propanový hořák. Vlastnosti propanu jsou k dispozici v databázi programu FDS. Není proto potřeba bližší specifikace ve zdrojovém kódu pomocí definice počtu atomů uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku atd., postačí zadat specifikaci &REAC FUEL='PROPANE'.

### Měření

Teplota plynu je v modelu řešena pomocí příkazu TEMPERATURE. Body pro výpočet teploty jsou umístěny v suterénu na pozicích dle tab. 14, kde:

- SWQP jsou body v jihozápadní čtvrtině suterénu,
- NWQP body v severozápadní čtvrtině suterénu,
- NEQP body v severovýchodní čtvrtině suterénu,
- TC - N° číselné označení termočlánků.

Tab. 14 Pozice termočlánků

Označení	Pozice (m)			Umístění vůči světovým stranám
	x	y	z	
TC2	2,69	6,93	2,63	SWQP
TC12	8,07	6,93	2,63	NWQP

TC17	8,07	2,31	2,63	NEQP
------	------	------	------	------

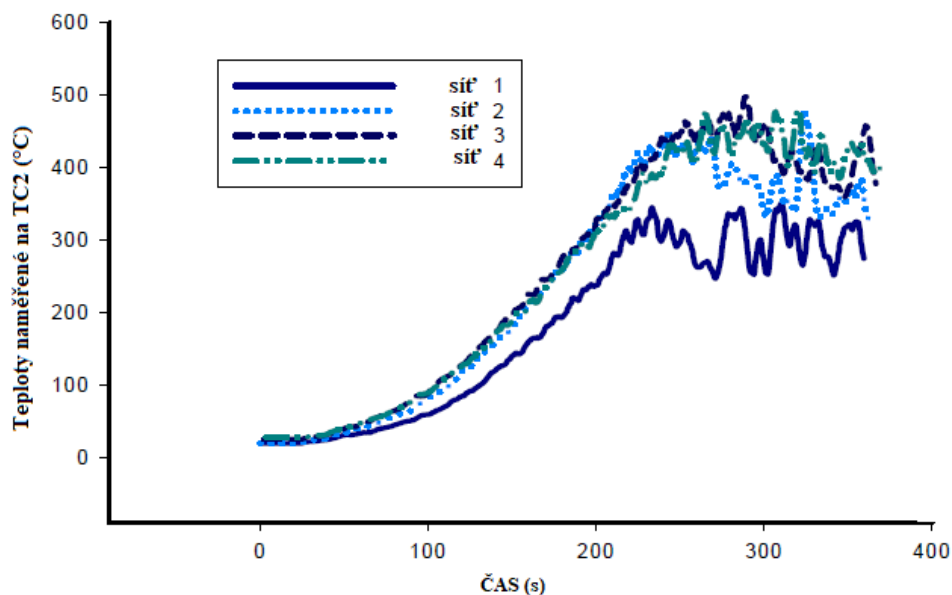
### Výsledky studie citlivosti

Měřenými parametry je teplota plynu, která byla zaznamenána v měřících bodech suterénu rozděleného na čtvrtiny dle světových stran.

#### Požár s maximálním výkonem 1 500 kW

V této simulaci je použita maximální hodnota HRR = 1500 kW dosažena za  $t = 179$  s. Na obr. 43 jsou znázorněny teploty vypočítané na TC2, který se nachází 0,1 m pod stropem suterénu v oblasti SWQP (jihozápadní čtvrtina suterénu). V grafu jsou uvedeny výsledky teplot vypočítaných při různém nastavení hrubosti výpočetních sítí pro zadaný požární scénář. Čím je síť jemnější, tím jsou výsledky přesnější a teplota naměřená na TC2 je vyšší. Zároveň výrazně roste čas potřebný k vyřešení numerického modelu.

Z porovnání křivek v grafu se jako ideální velikost buňky sítě v přízemí budovy pro tento požární scénář jeví velikost 0,08 x 0,08 x 0,08 m. V rostoucí fázi se výsledky s touto sítí shodují s předchozími, ve fázi chladnutí však neklesá tak výrazně.

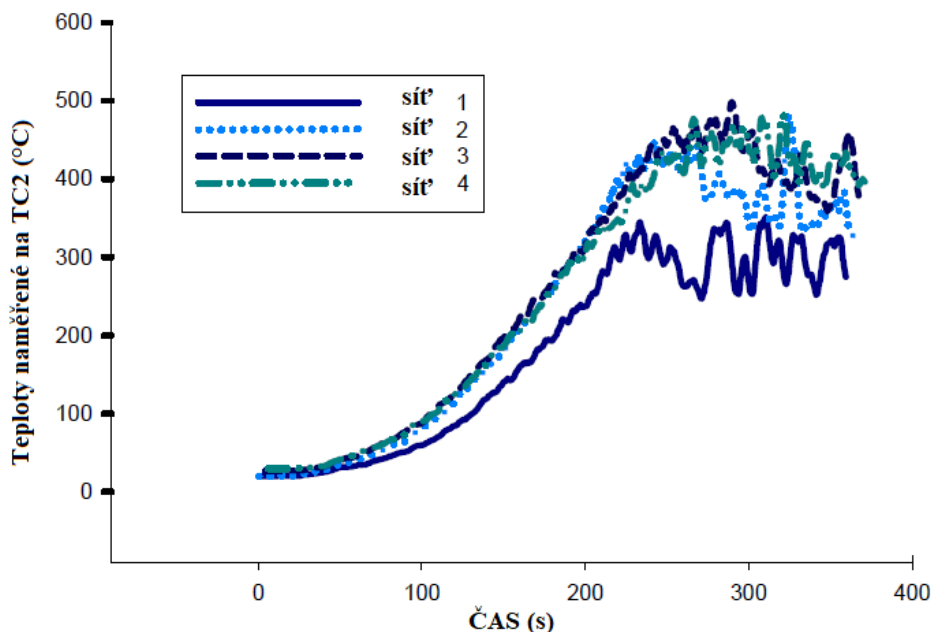


Obr. 43 Průběh teplot na TC2 pro různá nastavení hrubosti výpočetní sítě suterénu pro max HRR = 1 500 kW

#### Požár s maximálním výkonem 2 500 kW

V této simulaci je použita maximální hodnota HRR = 2500 kW dosažena za  $t = 231$  s. Na obr. 44 jsou znázorněny teploty měřené na TC2, který se nachází 0,1 m pod stropem suterénu v oblasti SWQP (jihozápadní čtvrtina suterénu). V grafu je opět vidět, že čím je síť jemnější, tím jsou výsledky přesnější a teplota naměřená na TC2 je vyšší. Zároveň opět výrazně roste čas potřebný k vyřešení

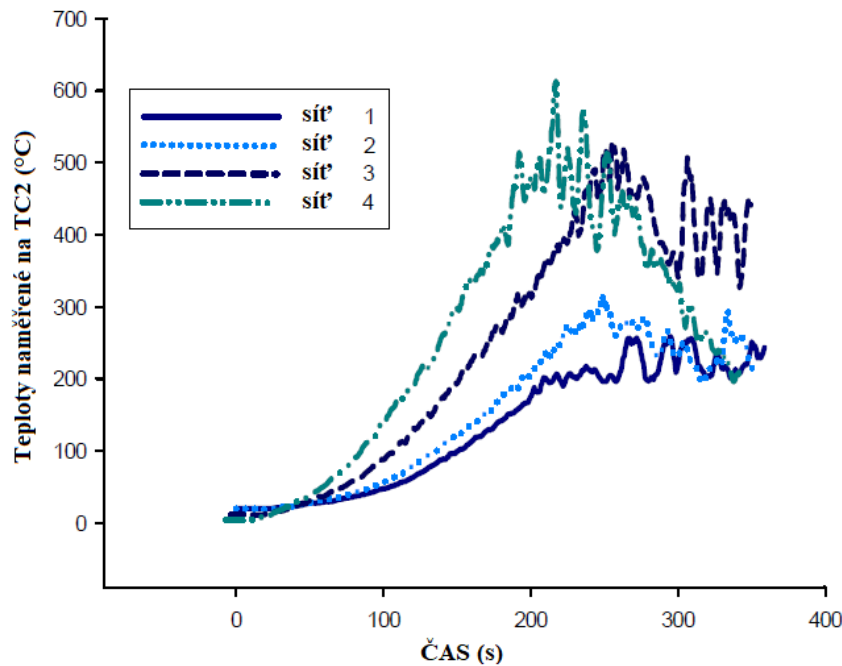
numerického modelu. U sítě 3 a 4 se výsledky téměř shodují, nicméně rozdíl v čase potřebném pro výpočet je velmi výrazný. Z toho vyplývá, že hrubost sítě 3 je pro přesnost výpočtu dostačující, ideální hrubost sítě suterénu je tedy pro tento požární scénář 0,10 x 0,10 x 0,10 m.



Obr. 44 Průběh teplot na TC2 pro různá nastavení hrubosti výpočetní sítě suterénu pro max HRR = 2 500 kW

#### Požár s maximálním výkonem 3 000 kW

V této simulaci je použita maximální hodnota HRR = 3000 kW dosažena za  $t = 253$  s. Na obr. 45 jsou znázorněny teploty měřené na TC2, který se nachází 0,1 m pod stropem suterénu v oblasti SWQP (jihozápadní čtvrtina suterénu). Pozorovaný fenomén je opět shodný. Čím je síť jemnější, tím jsou výsledky přesnější a teplota naměřená na TC2 je vyšší a zároveň výrazně roste čas potřebný k vyřešení numerického modelu. Hrubost sítě 3 se pro přesnost výpočtu jeví jako dostačující. Naměřené teploty se, ale v tomto případě neshodují, tak jako u požárního scénáře s max HRR = 2500 kW. To je z důvodu, že u požáru s max HRR = 3000 kW dochází po 280 s simulace k poklesu teploty z důvodu nedostatku kyslíku. Ideální hrubost sítě suterénu je tedy pro tento požární scénář 0,10 x 0,10 x 0,10 m.



Obr. 45 Průběh teplot na TC2 pro různá nastavení hrubosti výpočetní sítě suterénu pro max HRR = 3 000 kW

### Shrnutí

Příklad uvádí studii citlivosti sítě pro optimalizaci velikosti výpočetní sítě vzhledem k přesnosti získaných dat. Dokládá časovou náročnost výpočtu numerických modelů softwaru FDS.

Numerické simulace jsou připraveny pro tři různé velikosti požáru a čtyři různé hrubosti sítě v suterénu objektu, kde se nachází zdroj požáru. Hrubost sítě v 1.NP a 2.NP je pro všechny simulace shodná.

#### 4.5.5 Další verifikační příklady CFD modelů

Další příklady ověřující zkoumané jevy pomocí CFD modelů je možné dohledat v technických dokumentacích softwarových nástrojů. Např. FDS uvádí příklady v dokumentu Technical Reference Guide, Volume 2 – Verification (McGrattan a kol. 2019). Je zde možné najít příklady ověřující proudění plynů (kap. 3 The Basis Flow Solver), turbulenční model (kap. 4 Turbulence), model turbulentního proudění v blízkosti stěn (kap. 5 Boundary Effects), model proudění plynu potrubím (kap. 7.1.1 Flow of a Gas through a Simple Duct), zachování energie při hoření (kap. 7.2.1 The Heat from a Fire), radiační model (kap. 9 Thermal Radiation), model detektoru kouře (kap. 10.8 Smoke Detector Model), vedení tepla pevnou látkou (kap. 11 Heat Conduction), hoření kapaliny (kap. 11.3 Evaporation of a Liquid Surface), hoření pomocí definice procesu tepelné degradace (kap. 11.8 A Simple Two-Step Pyrolysis Example), atd.

Některé z uvedených příkladů jsou součástí instalačního balíčku (soubor Examples).

## 5 Odezva konstrukce

### 5.1 Modelování konstrukcí při požáru

#### 5.1.1 Úvod

Podobně jako v ostatních oblastech požární bezpečnosti staveb lze při posuzování únosnosti konstrukcí při požáru použít pokročilé metody. Na rozdíl od zjednodušených postupů (ruční výpočet pomocí analytických vzorců, resp. výpočet pomocí tabulkových procesorů nebo přímé hodnocení pomocí tabulkových dat), které jsou uvedeny v normách, pokročilé postupy vyžadují využití specializovaných softwarových nástrojů. Řešení těchto softwarových nástrojů je založeno na metodě konečných prvků (MKP). Při posuzování požární odolnosti konstrukcí jsou tyto nástroje využívány pro modelování přestupu tepla do konstrukce, modelování rozvoje tepla v konstrukci a modelování mechanického chování konstrukce.

Pokročilý postup řešení vyžaduje zavedení odpovídajících vstupních dat a metod. Při působení požáru musí být zohledněny vlastnosti materiálů závislé na teplotě. Tepelné a mechanické vlastnosti oceli, betonu, hliníku a jiných materiálů by měly být převzaty z odpovídajících norem ČSN EN 199x-1-2 nebo z experimentů. Definované mechanické okrajové podmínky, zatížení a interakce by měly odpovídat skutečným vlastnostem analyzovaného prvku nebo konstrukce. V závislosti na typu analýzy může být mechanické zatížení reprezentováno tlaky a silami nebo předepsanými posuny. V případě potřeby mohou být časové nebo teplotně závislé okrajové podmínky reprezentovány definicemi kontaktů. Stejně tak v závislosti na uvažovaném požárním scénáři mohou být teplotní podmínky modelovány použitím různých časových a teplotně závislých okrajových podmínek včetně předepsaných teplotních polí, tepelného toku, proudění a záření, adiabatické teploty povrchu atd. Kombinace mechanického zatížení je nutné uvažovat pro mimořádné zatížení požárem dle ČSN EN 1990. Model konstrukčního systému pro globální analýzu za zvýšených teplot by měl co nejlépe vystihovat očekávané chování řešeného systému.

Posouzení odolnosti konstrukce při požáru je možné provést na prvku, části konstrukce či celé konstrukci. Zjednodušené postupy se zpravidla provádějí na prvcích, celá konstrukce se naopak posuzuje pomocí komplexního numerického modelu. Velikost modelu konstrukce (prvek, část či celá konstrukce) je vybírána tak, aby co nejlépe vystihovala očekávané chování konstrukce.

Ověření požární odolnosti lze provést z hlediska času, únosnosti a teploty, viz ČSN EN 1991-1-2. Ověření z hlediska času, tj. požadovaná požární odolnost je menší než čas do porušení, nejlépe dokládá rezervy ve spolehlivosti konstrukce. Vyžaduje ale přímé řešení, které je vhodné pouze pro jednoduché výpočty. Pro složitější výpočty je nejvhodnější ověření únosnosti při požadované požární odolnosti. Při výpočtu se ověřuje, že po příslušnou dobu trvání požáru je splněna únosnost a stabilita konstrukce.



V inženýrské praxi se obvykle berou v úvahu dva scénáře zatížení. Jeden scénář uvažuje zvyšující se mechanické zatížení při konstantní teplotě. Ve druhém scénáři je konstrukce analyzována za stálého mechanického zatížení, ale při zvyšující se teplotě. V dalším možném scénáři, např. po experimentu nebo skutečném požáru, se mění jak teplota, tak zatížení.

### 5.1.2 Typy modelů

Pro posouzení chování konstrukcí při požáru jsou využívány modely teplotní, modely konstrukční a modely sdružené.

Teplotní model řeší přestup tepla z okolního prostředí do konstrukce nebo její části a vedení tepla uvnitř materiálu konstrukce. Takový model bývá zpravidla co nejjednodušší. Většinou se jedná o dvourozměrný model průřezu části konstrukce. Průřez musí mít definovaný materiál včetně jeho tepelně technických charakteristik. Na hranici průřezu je nutné předepsat teplotu plynu/tepelný tok/adiabatickou teplotu povrchu, která na konstrukci působí. Některé softwarové nástroje vyžadují zadání koeficientů přestupu tepla. K samotnému řešení je nutné model doplnit výpočetní sítí, stanovit výpočetní krok a výpočetní čas. Výsledky bývají zaznamenány v textových souborech, které je možné číst a zobrazovat pomocí post-procesorů nebo je využít do konstrukčních modelů.

Konstrukční model řeší mechanickou analýzu konstrukce nebo její části. Model zpravidla zahrnuje tak velkou část konstrukce, aby provedená analýza co nejlépe vystihovala očekávané chování konstrukce. Pokud je použit model části konstrukce, okrajové podmínky by měly odpovídat vnitřním silám a podepření vycházející z celé konstrukce. Modely mohou být tvořeny z různých typů prvků – prutových, deskových, desko-stěnových nebo objemových prvků. Volbě typu prvku a volbě sítě modelu by měla být věnována zvláštní pozornost. Ovlivňují totiž přesnost výsledků. Zvolený prvek sítě (lineární, kvadratický nebo vyšší) úzce souvisí se zvolenou hustotou sítě a metodou řešení. Použití prvků vyššího řádu umožňuje nasazení větších velikostí prvků, což může poskytnout podobnou nebo lepší aproximaci studovaného konstrukčního chování. Vybrané konečné prvky by se měly vztahovat ke zkoumanému konstrukčnímu chování (pokud jde o velikost průhybů, napětí a pootočení), zvolené metodě analýzy (lineární nebo nelineární) a materiálovým vlastnostem (lineární nebo nelineární). Sít i volba typu prvku by rovněž měly umožňovat modelování imperfekcí. Konstrukční model rovněž zahrnuje mechanické chování materiálů. Vlastnosti materiálů se uvažují podle materiálových norem ČSN EN 199X-1-2 nebo z materiálových zkoušek za zvýšené teploty. V závislosti na typu analýzy, tj. lineární nebo nelineární, a požadavcích na přesnost lze použít různé modely chování materiálu: a) lineární elastický – dokonale plastický materiál bez zpevnění, b) lineární elastický – dokonale plastický materiál se zpevněním, c) lineární elastický – nelineární model zpevnění materiálu založený na skutečné křivce napětí-deformace. Do konstrukčního modelu se zavádí veškerá zatížení, která mohou v průběhu životnosti na konstrukci působit. Aplikují se

zatěžovací stavy včetně součinitelů zatížení a volené kombinace zatížení. Zvláštní pozornost se věnuje mimořádným kombinacím zatížení konstrukce vystavené požáru. Dále model zahrnuje imperfekce, které zohledňují geometrické odchylky od dokonalého tvaru, zbytkových napětí a nedokonalostí v okrajových podmínkách, např. podepření.

Některé softwarové nástroje sdružují všechny části analýzy konstrukce vystavené účinkům požáru – model požáru, výpočet přestupu tepla do konstrukce a posouzení mechanické odezvy konstrukce. Takové modely jsou nazývány sduženými modely. Většina obecných multifyzikálních softwarových nástrojů sdružuje výpočet přestupu tepla do konstrukce a posouzení mechanické odezvy konstrukce. Výpočet teploty plynu bývá častěji řešen odděleně. V tomto případě je vhodné dbát na shodnou úroveň řešení všech částí výpočtu.

### 5.1.3 Volba modelu a softwarového nástroje

Pro modelování chování konstrukcí při požáru existují různé metody a přístupy s odlišným stupněm sofistikovanosti. Výpočet může být proveden: ručně, pomocí výpočetního programu nebo kombinací obou metod.

Pro účely pokročilého modelování je třeba vybrat vhodný softwarový nástroj. Každý nástroj má svou specifickou oblast využití. Některé softwarové nástroje řeší přestup tepla do konstrukcí odděleně od mechanické analýzy. Jiné mají obě části propojeny. Existují i softwary sdružující všechny části analýzy konstrukce vystavené účinkům požáru – model teplotního pole, výpočet přestupu tepla do konstrukce a posouzení mechanické odezvy konstrukce. Před aplikací softwaru na řešený problém musí uživatel ověřit, zda model vybraný pro analýzu konstrukce, prvku nebo globální, vypovídá o chování řešeného problému z hlediska: typu analýzy a metody řešení, geometrie, teplotně závislých vlastností materiálu, mechanických okrajových podmínek a zatížení, a teplotních okrajových podmínek. Zvláště je třeba prověřit vhodnost volené globální analýzy, tj. statického modelu. Dále je nutné ověřit, zda je software na daný problém validován. Informace o oblasti použití softwaru a jeho validaci jsou uvedeny v dokumentaci každého softwaru. Uživatel by měl vždy používat aktuální verzi softwaru, která je dostupná.

Základní výčet MKP modelů, které jsou vhodné k modelování konstrukcí vystavených požáru, je uveden v tab. 15. Výběr softwarových nástrojů je proveden na základě četnosti používání, jejich aktuálnosti, vývoji a technické podpory. Nejedná se o úplný výčet nástrojů (Wald, 2017).

Podle požadavků na výsledky je možné posouzení provést na prvku, části konstrukce či celé konstrukci. Zjednodušené postupy se zpravidla provádějí na prvcích, celá konstrukce se naopak posuzuje pomocí komplexního numerického modelu. Velikost modelu konstrukce (prvek, část či celá konstrukce) je vybírána tak, aby co nejlépe vystihovala očekávané chování konstrukce.

Volba vhodného modelu pro analýzu konstrukce je úzce propojena se způsobem výpočtu teplotního účinku na konstrukci a teplotního pole v okolí konstrukce. Pokud je pro stanovení teploty plynu v okolí konstrukce použit zjednodušený model, přesnost vysoce komplexní numerické analýzy chování konstrukce je tímto ovlivněna. Při volbě vysoce pokročilých modelů konstrukce pomocí výpočetních softwarů je proto vhodné použít ke stanovení teplotního účinku na konstrukci i pokročilý model požáru.

Tab. 15 Výčet vybraných softwarových nástrojů k modelování konstrukcí vystavených požáru

<b>Modely konstrukcí vystavené požáru, aktivně podporované</b>	
<b>Název</b>	<b>Stručný popis, odkaz</b>
ANSYS Mechanical	Obecný nelineární multifyzikální program nabízí analýzu konstrukcí a termodynamickou analýzu a řešení dalších otázek. Poskytuje úplný popis chování prvků, materiálové modely a řešení rovnic pro širokou škálu mechanických konstrukčních otázek, tepelnou analýzu a sdružené fyzikální úkoly zahrnující termo-konstrukční a termo-elektrickou analýzu. Analyzovat lze po částech nebo pomocí jedné analýzy. <a href="https://www.ansys.com/">https://www.ansys.com/</a> .
Abaqus	Obecný software pro analýzu konečných prvků. Poskytuje funkce vícefázového modelování, jako jsou sdružené modely akusticko-konstrukční, piezoelektrické a konstrukční vlastnosti. Má rozsáhlou řadu materiálových modelů, <a href="https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/">https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/</a> (ABAQUS, 2009)
SAFIR	Program modeluje chování stavebních objektů vystavených požáru. Konstrukce lze vytvořit z prutových prvků, jako jsou nosníky a sloupy, ve spojení s rovinnými prvky, jako jsou desky a stěny. Objemové prvky mohou být použity pro analýzu detailů v konstrukci jako jsou spoje. Využívá pre-procesor GiD, <a href="https://www.uee.uliege.be/cms/c_2383458/en/safir">https://www.uee.uliege.be/cms/c_2383458/en/safir</a> (Franssen, 2005)
Vulcan	Konečně prvkový program, kterým lze modelovat globální 3D chování ocelobetonových a ocelových budov za požáru. Zahrnuje geometrickou a materiálovou nelinearitu prutových, sloupových a deskových prvků s plným membránovým působením v deskách. Pracovní diagramy a tepelné vlastnosti oceli a betonu jsou zahrnuty jako funkce teploty s rovnoměrným nebo nerovnoměrným teplotním rozdělením. Program Vulcan byl vyvinut pro analýzu chování budovy při požáru. Odlišuje se od tradičních komerčních balíčků FEA jednoduchostí a rychlostí použití, <a href="http://www.vulcan-solutions.com/">http://www.vulcan-solutions.com/</a> (Huang a kol, 1999).
ATENA	Program pro analýzu konstrukcí konečnými prvky. Byl připraven přednostně pro simulaci chování betonových a drátkobetonových konstrukcí včetně praskání, drcení a vyztužování betonu, <a href="https://www.cervenka.cz/products/atena/">https://www.cervenka.cz/products/atena/</a> .

#### 5.1.4 Vstupní hodnoty

Vstupní data MKP analýzy by měla obsahovat detailní popis geometrie, veškeré předpoklady modelu, vybraný typ analýzy a všechny kroky modelování. Zpravidla by měly být obsaženy tyto údaje:

- jméno a verze vybraného programu MKP,
- nastavení výpočtu (velikost zatěžovacího kroku),

- geometrický model a numerickou síť (geometrie, typ prvku, výpočetní síť, excentricity atd.),
- materiálový model:
  - mechanické vlastnosti (lineární nebo nelineární, vlastnosti),
  - tepelně technické vlastnosti (konstantní, proměnné s teplotou),
- podepření (okrajové podmínky, předepsané posunutí),
- zatížení (mechanické zatížení s jejich kombinacemi, teplotní zatížení),
- imperfekce (geometrické, zbytková napětí),
- typ analýzy,
- kritéria selhání,
- okrajové podmínky jako např. počáteční teplota, vlhkost,
- charakteristika požadovaných výstupů (teplota konstrukce, vnitřní síly, rozložení napětí, posunutí, deformované tvary, mezní zatížení, vlastní čísla, vlastní tvary, atd.),
- kritéria mezního stavu, která mají být kontrolována (základy statické kontroly).
- a další nutné vstupy požadované konkrétním softwarovým nástrojem.

V případě, že požární návrh vychází z ověření za běžné teploty, popíše se dimenze průřezů a porovná se namáhání a únosnost prvků, tzv. jednotkové posudky. Tuto část lze řešit i odkazy na statický výpočet.

Úplnost vstupních dat udává přesnost získaných výsledků (výstupů) z MKP modelů. Hodnoty potřebné pro výpočet se mohou lišit dle vybraného modelu požáru.

Stručný popis spolu s doporučením k vybraným vstupním parametrům je popsán níže.

### **Geometrický model a numerická síť**

Zvolený model by měl reprezentovat chování zkoumané konstrukce s přesností odpovídající požadavkům zjištěné odezvy systému. Výběr modelu (prutový, deskový, desko-stěnový nebo objemové prvky) a velikost a jemnost sítě ovlivňují přesnost výsledků. Modelování může být provedeno pro celou konstrukci nebo část konstrukce. Pokud je použit model části konstrukce, okrajové podmínky by měly odpovídat vnitřním silám a podepření vycházející z celé konstrukce. Je možné provést diskretizaci modelu - zjednodušení globálního systému na numerický model s konečným počtem stupňů volnosti. Zvláštní pozornost je třeba věnovat výběru typu prvku a sítě modelu. Volba MKP modelu a vybraných typů prvků (prutový, deskový, desko-stěnový nebo objemové prvky) by se měla vztahovat na kritéria mezního stavu, která mají být kontrolována, a matematický model pro přibližné chování konstrukce s odpovídající přesností. Zvolený prvek (lineární, kvadratický nebo vyšší) by měl souviset se zvolenou hustotou sítě a metodou řešení, aby se zajistilo, že výsledky splňují požadavky kladené na řešení. Použití prvků vyššího řádu umožňuje nasazení větších velikostí prvků, což může poskytnout podobnou nebo lepší aproximaci studovaného

konstrukčního chování. Vybrané konečné prvky by se měly vztahovat ke zkoumanému konstrukčnímu chování (pokud jde o velikost průhybů, napětí a pootočení), zvolenou metodu analýzy (lineární nebo nelineární) a materiálové vlastnosti (lineární nebo nelineární).

Přechody prvků sítě, od jemného okraje do hrubšího oka, by měly být postupné a hladké. Jemná síť prvků by měla být modelována obzvláště na styku částí konstrukčních prvků. Hustota výpočetní sítě by měla úzce souviset s vyšetřovaným režimem kolapsu a s příslušnými kritérii mezního stavu. Síť i volba typu prvku by měly umožňovat přesné modelování geometrie imperfekcí a možnost, že vzpěr může být lokální. V místech s vysokými koncentracemi napětí nebo na místě, kde se očekává porušení konstrukce, se doporučuje zjemnění sítě, aby byla zaručena požadovaná přesnost. Přesnost zvolené sítě (hustota, typy vybraných prvků) by měla být prokázána konvergenčními studiemi.

### **Materiálový model**

Mechanické chování materiálů je popsáno vztahem mezi napětím a relativním protažením. V případě požáru by měly být mechanické vlastnosti materiálů převzaty z příslušných norem ČSN EN 199X-1-2 nebo z materiálových zkoušek za zvýšené teploty. V závislosti na typu analýzy a jejich požadavcích na přesnost lze použít různé modely chování materiálu: a) lineární elastický - dokonale plastický materiál bez zpevnění, b) lineární elastický - dokonale plastický materiál se zpevněním, c) lineární elastický - nelineární model zpevnění materiálu založený na skutečné křivce napětí-deformace.

### **Zatížení**

V dokumentu je nezbytné uvést veškerá zatížení, která mohou v průběhu životnosti na konstrukci působit. Popíše se zatěžovací stavy včetně součinitelů zatížení a volené kombinace zatížení. Zvláštní pozornost se věnuje mimořádným kombinacím zatížení konstrukce vystavené požáru. Zde se popíše zvolené součinitele kombinace a dílčí součinitele za požáru.

Zatížení teplotou konstrukce/její části/prvku se popíše pomocí teplotního pole/křivky rozvoje teploty plynu či adiabatické teploty povrchu, která je pro výpočet použita. Uvede se rovněž linie či plochy, na které teplota či tepelný tok působí.

Podle nedávných studií se jako nejvhodnější pro výpočet vlivu okolní teploty na posuzovaný konstrukční prvek jeví adiabatická teplota povrchu (ATP). Tato teplota oproti teplotě plynu nebo radiační teplotě vyjadřuje vážený průměr obou těchto teplot. ATP závisí na emisivitě povrchu, součiniteli proudění, není však závislá na teplotě povrchu konstrukce. Pro každý konstrukční prvek je možné dle polohy a orientaci vůči požáru určit 6 různých ATP. Pokročilé modely požáru založené na metodě konečných objemů (CFD modely) umožňují výpočet ATP každého konstrukčního prvku. Pro pokročilý výpočet přestupu tepla a mechanického chování konstrukce je tedy nejvhodnější aplikovat v softwaru přímo tuto teplotu.

## Imperfekce

Imperfekce v MKP modelu by měly zohledňovat účinky geometrických odchylek od dokonalého tvaru, zbytkových napětí a nedokonalostí v okrajových podmínkách (např. podepření). Doporučují se: a) geometrické imperfekce, úpravou dokonalého tvaru konstrukce a dodatečných zbytkových napětí v důsledku výroby, b) ekvivalentní geometrické imperfekce úpravou dokonalého tvaru konstrukce - tyto imperfekce mají pokrýt vliv jak geometrických imperfekcí, tak zbytkových napětí a mají větší velikost než pouze geometrické imperfekce. Do modelu se mohou zavést pomocí: a) změřeného tvaru imperfekce konstrukčního prvku (pouze pro geometrické imperfekce), b) tvaru imperfekcí založeného na ekvivalentních geometrických imperfekcích, nebo modifikací dokonalého tvaru předdefinovaným posunem (povoleno pro geometrické i ekvivalentní geometrické imperfekce), c) tvaru imperfekce založeného na analýze lineárního vzpěru odpovídající vlastnímu tvaru spojenému s očekávaným režimem porušení (povoleno pro geometrické i ekvivalentní geometrické imperfekce).

## Typ analýzy

V MKP modelech lze využít lineární či nelineární analýzy. Nelinearity vyplývají z více zdrojů: a) velkých posunů anebo z velkých napětí (geometrická nelinearita), b) z nelineárního vztahu mezi napětím a deformací (materiálová nelinearita), c) změnou kontaktu (kontaktní nelinearita). Lineární analýza může být použita, pokud není v modelu nutné zahrnout žádnou z výše uvedených nelinearit. U lineární analýzy platí princip superpozice. U nelineární je naopak nutné provést analýzu pro každý zatěžovací stav či kombinaci zvlášť.

## Definice výsledků

Softwarové nástroje nabízejí výpočet velkého množství výstupních hodnot. Ve zprávě by měly být zaznamenány takové výsledky, které nejlépe vypovídají o chování konstrukce.

Základními výstupy z pokročilých modelů konstrukce při požáru jsou:

- teplota posuzovaného prvku/konstrukce,
- kritická teplota,
- požární odolnost,
- vnitřní síly,
- rozložení napětí,
- posunutí,
- deformované tvary,
- mezní zatížení,
- vlastní čísla a vlastní tvary,

Dále je vhodné u pokročilých modelů doložit:

- výsledky validační či verifikační studie,
- studii citlivosti:

- vliv vybraných vstupních dat
- vliv velikosti výpočetní sítě.

### 5.1.5 Kontrolní seznam

Seznam slouží ke kontrole správného postupu při modelování chování konstrukcí pomocí pokročilých softwarových nástrojů. Seznam pokrývá kontrolu vstupních dat výpočtu a kontrolu kvality záznamu výpočtu. Jednotlivé body seznamu nelze plošně aplikovat na všechny druhy softwarů.

#### Zvolená metoda a výběr nástroje

- Jaká je zvolená metoda výpočtu (výpočet teploty okolí, přestupu tepla a mechanického chování konstrukce) a proč je vybrán konkrétní softwarový nástroj?
- Je definován vybraný softwarový nástroj včetně čísla verze softwaru?
- Odpovídá vybraný model konstrukce úrovni ostatních částí posouzení (modelu teplotního účinku)?
- Je vybraný výpočetní program vhodný pro řešený problém? Je softwarový nástroj na danou oblast validován?
- Jaké jsou okrajové podmínky použitého softwaru?

#### Předpoklady numerického modelu

- Jsou uvedeny veškeré předpoklady modelu?
- Je vybraný statický model vhodný?
- Vystihuje zvolená velikost modelu konstrukce (prvek, část či celá konstrukce) očekávané chování konstrukce?
- Zohledňuje vybraný typ analýzy očekávané chování konstrukce (lineární, nelineární)?

#### Geometrie

- Je správně zadána geometrie konstrukce?
- Jsou zadány veškeré průřezy konstrukcí?
- Jsou zadány veškeré materiály?
- Je materiálový model dostatečný pro zvolený typ analýzy (popis mechanických i tepelně technických vlastností)?
- Jsou zavedeny imperfekce konstrukce?
- Je konstrukce správně podepřena?

#### Zatížení

- Je konstrukce správně zatížena (mechanické i teplotní zatížení)?
- Jsou zavedeny vhodné kombinace zatížení?

- Je uvažováno se správnými kombinačními součiniteli?

#### Numerická síť a vlastnosti výpočtu

- Obsahuje model numerickou síť?
- Jaký typ prvku je zvolen?
- Je vhodně zvolen zatěžovací krok výpočtu?

#### Ostatní

- Jsou definovány veškeré okrajové podmínky (počáteční teplota, vlhkost)?
- Je v modelu uvažováno s aktivními prvky požární bezpečnosti ovlivňující konstrukci (chlazení konstrukce)?

#### Výsledky a vyhodnocení

- Byla provedena citlivostní studie na vstupy s velkým vlivem na výsledky?
- Jsou definována kritéria selhání konstrukce?
- Jsou posouzeny veškeré relevantní mezní stavy?
- Jsou zadány všechny potřebné výstupy?
- Jsou výsledky výpočtu zpracovány přehledně v grafech, obrázcích i numericky?
- Jsou výsledky dostatečně popsány?
- Jsou výsledky výpočtu relevantní? Je zhodnocena jejich přesnost?
- Je uvedena veškerá použitá literatura?

## **5.2 Ověřování modelů konstrukcí**

### **5.2.1 Způsoby ověření**

Základem bezchybných a spolehlivých výsledků při hodnocení požární bezpečnosti staveb pokročilými modely je správné použití principů validace a verifikace (ASME, 2012). V některých oblastech modelování se využívá rovněž kalibrace. Např. v nastavení materiálových modelů určitého softwaru pomocí experimentálních výsledků (doporučeno pouze pokročilé uživatele) nebo v modelech evakuace. Kalibrace vstupů nesmí být zneužita k úpravě výsledků.

Verifikace využívá srovnání výpočetních řešení s vysoce přesnými (analytickými nebo numerickými) referenčními řešeními a mezi sebou. Vybraná referenční řešení, tzv. verifikační příklady (benchmark cases) v oblasti modelování konstrukcí při požáru jsou uvedena v této kapitole. Verifikační příklad je zpravidla jednoduchý, detailně popsáný, obsahuje vstupy i výstupy příkladu, umožňuje opakovatelnost se shodnými výsledky. Nejvyššího stupně ověření lze dosáhnout, pokud proces verifikace zahrnuje studii citlivosti sítě, která prokáže asymptotickou konvergenci výsledků.

K rychlému ověření správného postupu při modelování chování konstrukcí pomocí pokročilých softwarových nástrojů slouží kontrolní seznam uvedený výše, tzv. check-list. Check-list



je seznam bodů, které by měl uživatel softwaru projít a zodpovědět si, zda je neopomněl, splnil či se nad nimi alespoň zamyslel. Otázkami v jednotlivých bodech check-list pokrývá kontrolu vybrané metody, resp. softwarového nástroje, kontrolu vstupních dat výpočtu a kontrolu kvality záznamu výpočtu.

### 5.3 Verifikační příklady

#### 5.3.1 Chování ocelového nosníku při požáru

Příklad uvádí výpočet mechanického chování ocelového nosníku při požáru v softwaru VULCAN. Výpočet je předveden v pěti variantách lišících se způsobem uložení nosníku a zatížením teplotou. Ve všech případech je nosník zatížen spojitým mechanickým zatížením a teplotou.

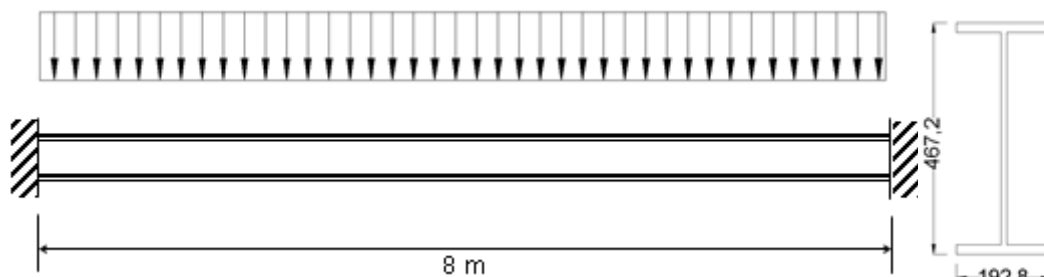
#### Popis konstrukce

Ocelový nosník průřezu UB 457x191x98, třídy oceli S355 a délky 8 m je vystaven rovnoměrně rozloženému zatížení o velikosti 20 kN/m. Nosník je po celé své délce vystaven požáru ze tří stran. Účinky požáru jsou modelovány pomocí normové teplotní křivky a pomocí parametrické teplotní křivky. Rozložení teploty po průřezu ocelového nosníku je uvažováno jako nerovnoměrné – zohledňuje uložení betonové desky na horní pásnici nosníku.

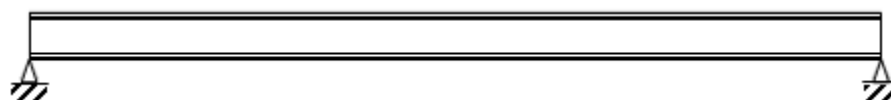
Výpočet byl proveden v 5 variantách, které se liší způsobem uložení nosníku a zatížením teplotou, viz tab. 16. Délka nosníku ( $L$ ) a mechanické zatížení ( $q$ ) se u těchto variant nemění, viz obr. 46, 47 a 48.

Tab. 16 Varianty výpočtů ocelového nosníku v programu VULCAN

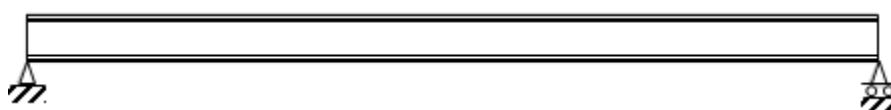
Teplota plynu	Označ.	Popis	
Nominální normová teplotní křivka	BMS_1	Vetknutý ocelový nosník	
	BMS_2	Kloubově uložený ocelový nosník	
	BMS_3	Prostě uložený ocelový nosník	
Parametrická teplotní křivka	BMS_8	BMS_8A	Prostě uložený ocelový nosník, parametrická teplotní křivka A
		BMS_8B	Prostě uložený ocelový nosník, parametrická teplotní křivka B



Obr. 46 BMS\_1 Vetknutý ocelový nosník



Obr. 47 BMS\_2 Kloubově uložený ocelový nosník



Obr. 48 BMS\_3 Prostě uložený ocelový nosník

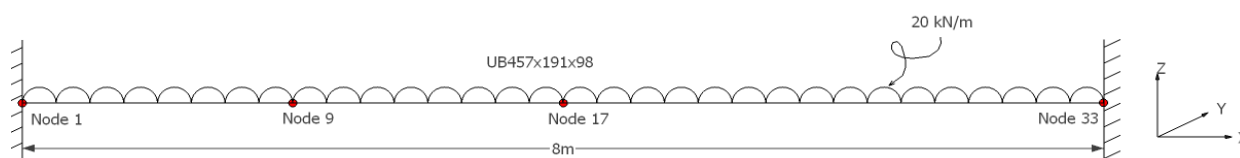
## Numerický model

### Software a parametry výpočtu

Výpočet byl proveden pomocí programu VULCAN. Celkový čas výpočtu je 90 min. Časový krok výpočtu je 1 min. Limitní počet iterací je ve výpočtu omezen na 200. Zatížení je navyšováno v deseti krocích. Tolerance vypočtené hodnoty v následujícím časovém kroku je 0,001.

### Geometrie a materiály

Nosník o délce 8 m je vytvořen z 32 elementů typu Beam. Okrajové body elementů jsou vzdáleny 0,25 m, viz obr. 49. Nosníku je přiřazen průřez o rozměrech odpovídající průřezu UB 457x191x98. Mechanické vlastnosti materiálu nosníku (ocel třídy S355) jsou v modelu zavedeny podle ČSN EN 1993-1-1. Mez kluzu je 355 MPa, modul pružnosti 210 000 MPa a Poissonovo číslo 0,3. Vliv zvýšené teploty na materiál je zaveden rovněž podle ČSN EN 1993-1-2. Vliv tečení je ve výpočtu zanedbán. Seznam výpočtů s detaily materiálů, zatížení a okrajových podmínek je uveden v tab. 17.



Obr. 49 Model nosníku s vetknutými koncovými body

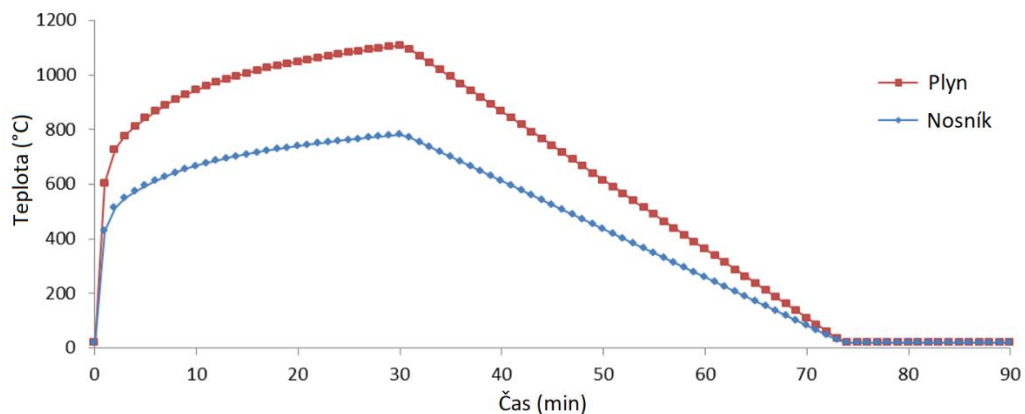
Tab. 17 Detaily provedených analýz ocelových nosníků v programu VULCAN

Název	Mechanické vlastnosti materiálu	Mechanické zatížení [kN/m]	Zatížení teplotou	Teplotní vlastnosti materiálu	Tečení	Okrajové podmínky
BMS_1	EN1993-1-3	20	Normová teplotní křivka	EN1993-1-3	NE	Vetknutý
BMS_2	EN1993-1-3	20	Normová teplotní křivka	EN1993-1-3	NE	Kloubově uložený
BMS_3	EN1993-1-3	20	Normová teplotní křivka	EN1993-1-3	NE	Prostě podepřený
BMS_8A	EN1993-1-3	20	Parametrická teplotní křivka A	EN1993-1-3	NE	Kloubově uložený
BMS_8B	EN1993-1-3	20	Parametrická teplotní křivka B	EN1993-1-3	NE	Kloubově uložený

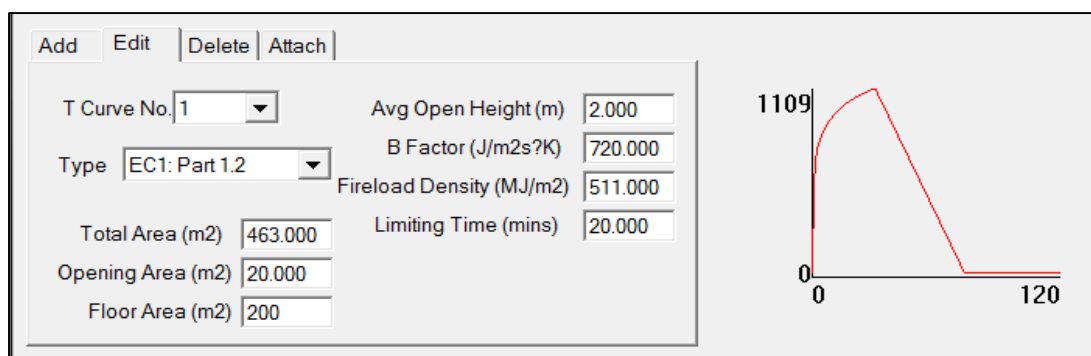
### Zatížení

Mechanické zatížení nosníku odpovídá rovnoměrně rozloženému zatížení o velikosti 20 kN/m.

Nosník je po celé své délce vystaven požáru ze 3 stran. Účinky požáru jsou modelovány pomocí normové teplotní křivky a pomocí parametrické teplotní křivky, viz ČSN EN 1991-1-2:2006. Parametrická křivka je aplikována ve dvou variantách simulující požár v úseku o podlahové ploše 200 m<sup>2</sup> (varianta A) a požár v úseku o podlahové ploše 100 m<sup>2</sup> (varianta B), viz obr. 50 a 52. Způsob zadání teplotních křivek v softwaru je vidět na obr. 51 a 53.

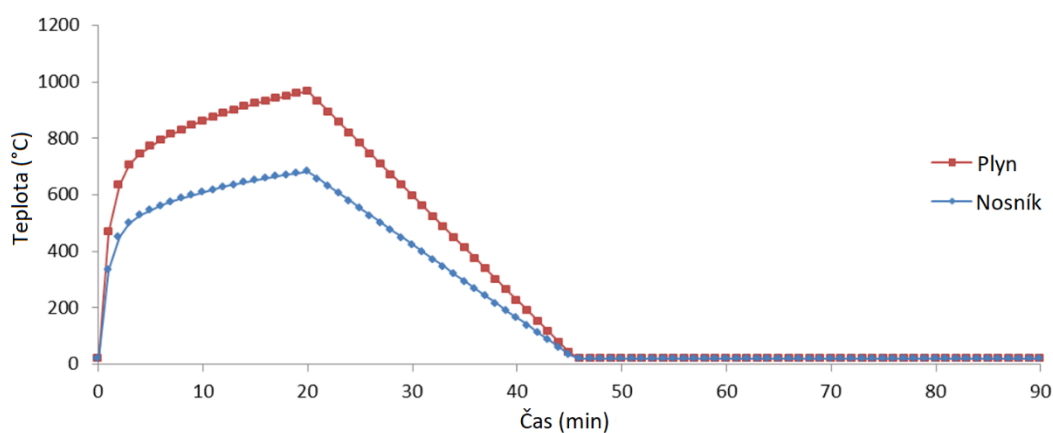


Obr. 50 Teplota plynu a nosníku (Parametrická teplotní křivka A)

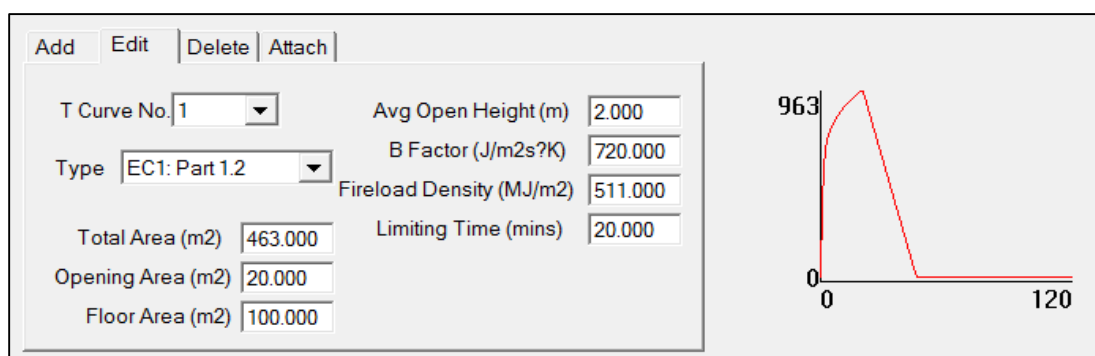


Obr. 51 Zadání parametrické teplotní křivky A v softwaru

Rozložení teploty po průřezu ocelového nosníku je uvažováno jako nerovnoměrné. V modelu není počítán přestup tepla z plynu do konstrukce. Teplota konstrukce je předepsána pomocí procentuálního podílu teploty plynu pro horní pásnici, stojinu a spodní pásnici. V případě, že horní pásnice podpírá betonovou stropní desku, je uvažováno s teplotou ocelové pásnice o max. velikosti 60 % teploty plynu. Teplota stojiny a spodní pásnice je předepsána jako 70 % teploty plynu. Na obr. 54a je znázorněna závislost teploty plynu na čase a teploty částí ocelového průřezu při aplikaci normové teplotní křivky. Na obr. 54b je znázorněno rozložení teploty po průřezu.



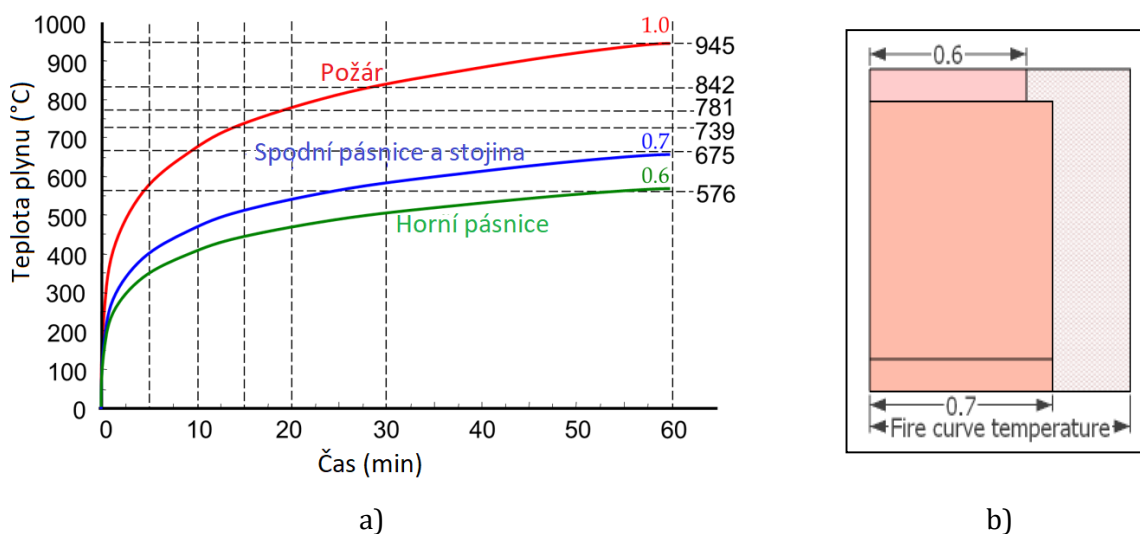
Obr. 52 Teplota plynu a nosníku (Parametrická teplotní křivka B)



Obr. 53 Zadání parametrická teplotní křivky A v softwaru

### Okrajové podmínky

Nosník je modelován v několika variantách, které se liší způsobem uložení, viz tab. 16 a 17. Vetknuté koncové body mají zabráněno posunu i pootočení ve všech směrech. Vnitřní body mají zabráněno posunu v ose Y (z roviny nosníku) a pootočení v e směrech X, Z. Koncové body kloubově uloženého nosníku mají zabráněno posunu ve směru X, Y, Z a pootočení ve směru X, Z. Koncové body prostě uloženého nosníku mají zabráněno posunu ve směru X, Y, Z (jeden bod) a Y, Z (druhý bod) a zabráněno pootočení ve směru X, Z.



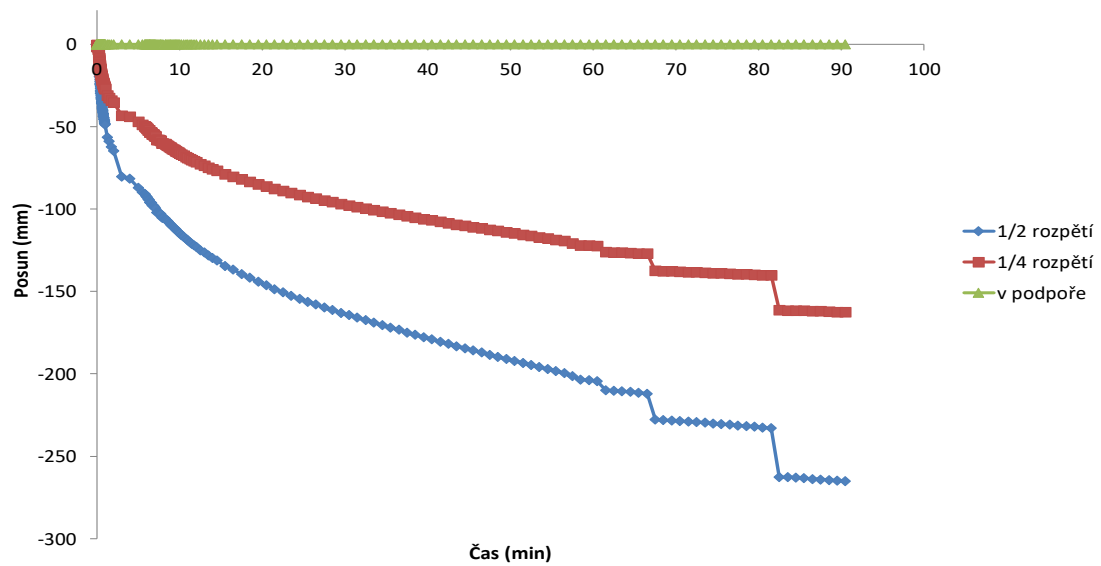
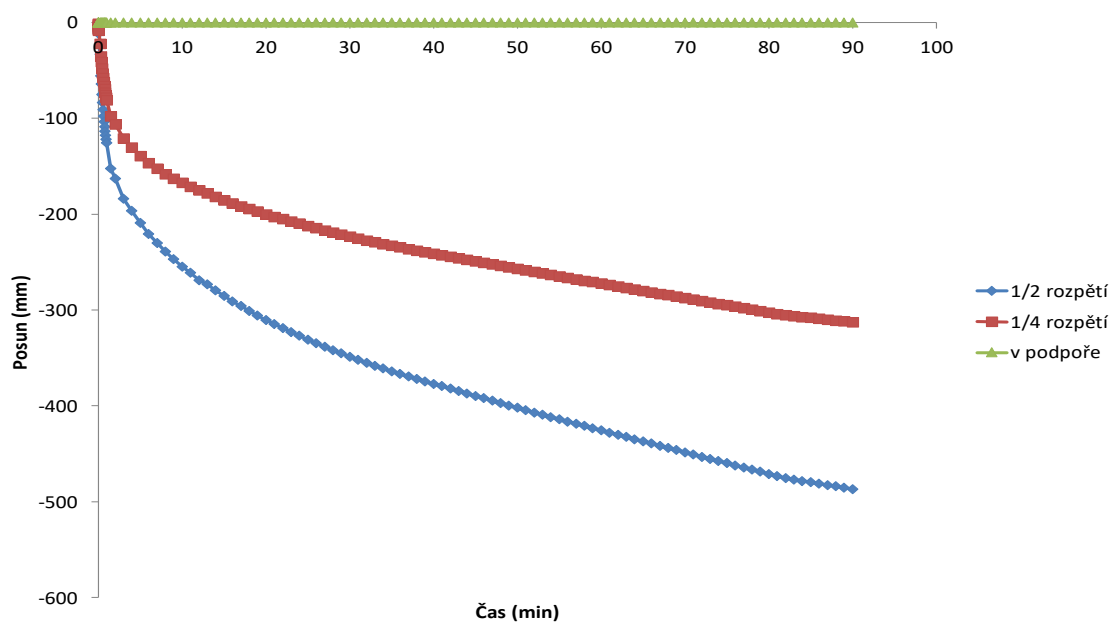
Obr. 54 a) Závislost teploty plynu a částí nosníku na čase); b) Rozložení teploty po průřezu

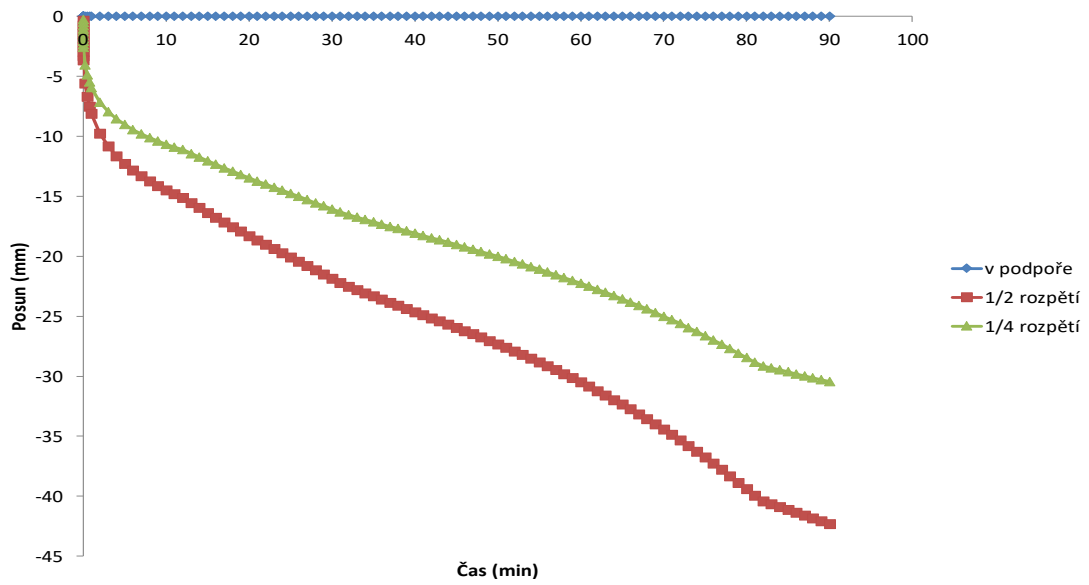
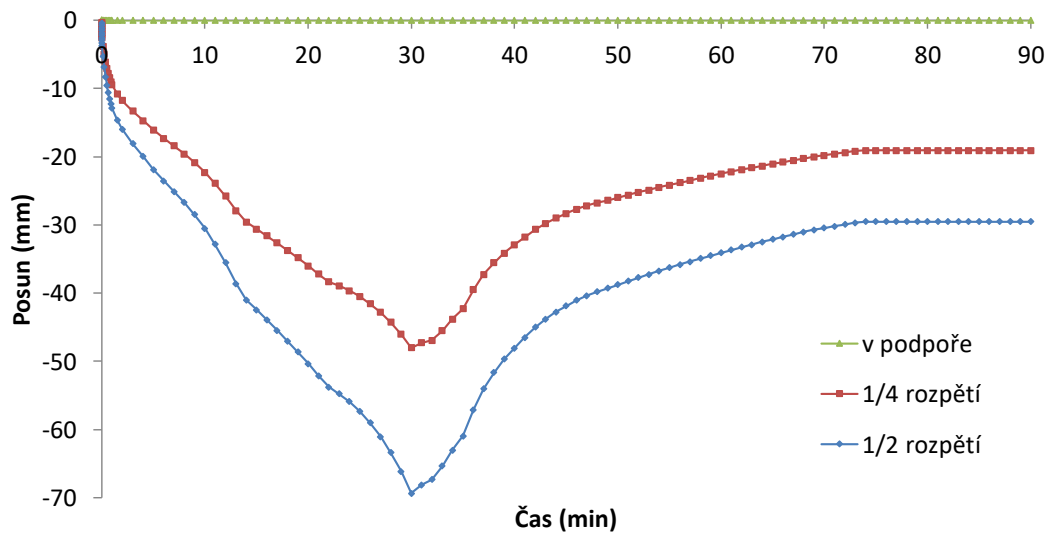
### Výstupy

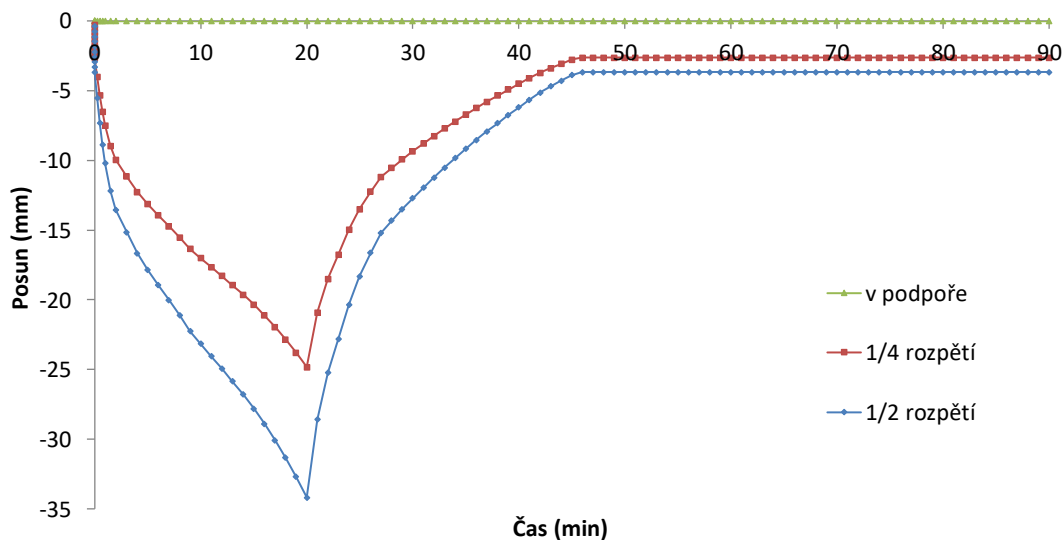
Výsledkem výpočtů je svislý průhyb (ve směru osy Z) v polovině rozpětí nosníku (bod 17), průhyb (ve směru osy Z) ve čtvrtině rozpětí nosníku (bod 9) a osová síla ve středu rozpětí nosníku (ve směru osy X).

### Výsledky

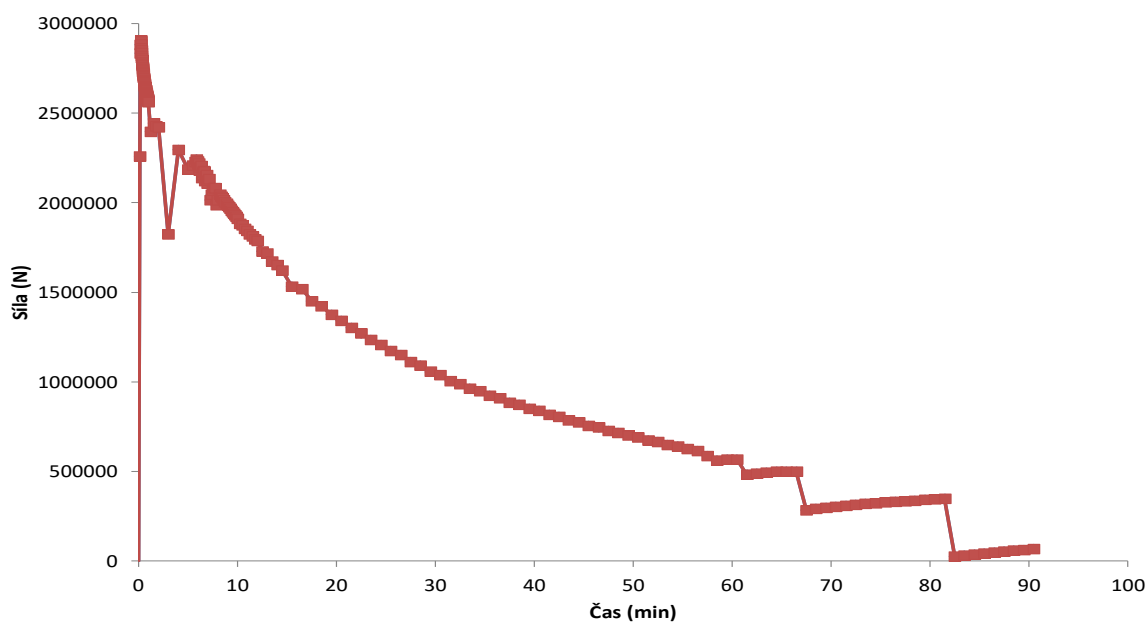
Průhyby nosníků BMS\_1, BMS\_2 a BMS\_3 v polovině rozpětí a ve čtvrtině rozpětí nosníku jsou uvedeny na obr. 55 až 57. Svislý průhyb koncového bodu je uveden pro kontrolu. Ve všech případech je koncový bod nosníku svisle podepřeno a průhyb by měl být roven 0. Průhyby nosníků BMS\_8A a BMS\_8B v polovině rozpětí a ve čtvrtině rozpětí nosníku jsou uvedeny na obr. 58 až 59.

Obr. 55 BMS\_1 Vodorovný posun v podpoře,  $\frac{1}{4}$  L a  $\frac{1}{2}$  LObr. 56 BMS\_2 Vodorovný posun v podpoře,  $\frac{1}{4}$  L a  $\frac{1}{2}$  L

Obr. 57 BMS\_3 Vodorovný posun v podpoře,  $\frac{1}{4}$  L a  $\frac{1}{2}$  LObr. 58 BMS\_8A Vodorovný posun v podpoře,  $\frac{1}{4}$  L a  $\frac{1}{2}$  L

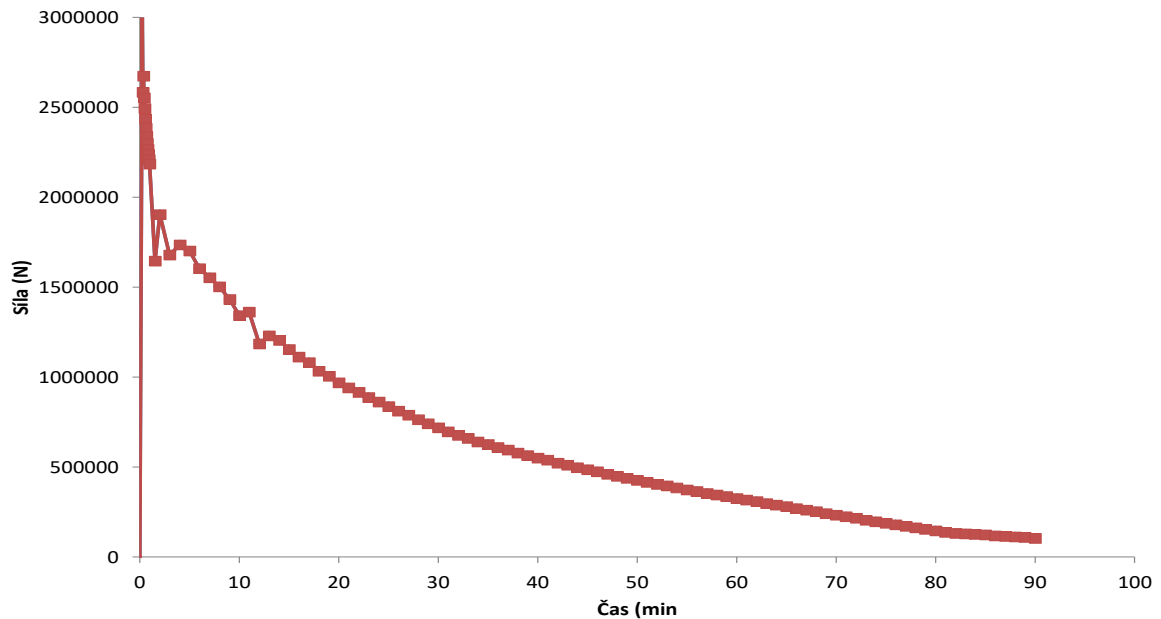
Obr. 59 BMS\_8B Vodorovný posun v podpoře,  $\frac{1}{4} L$  a  $\frac{1}{2} L$ 

Na obr. 60 a 61 jsou uvedeny vypočítané osové síly. V grafech jsou vidět lokální výkyvy hodnot, které jsou způsobeny nastavením hodnoty tolerance výpočtu. Změnou nastavení tolerance se obvykle tento jev vyřeší.



Obr. 60 BMS\_1 Průběh osové síly uprostřed rozpětí nosníku





Obr. 61 BMS\_2 Průběh osové síly uprostřed rozpětí nosníku

### Shrnutí

Příklad uvádí výpočet mechanického chování ocelového nosníku při požáru v softwaru VULCAN v pěti variantách lišících se způsobem uložení nosníku a zatížením teplotou. Z výsledků výpočtů je patrný vliv okrajových podmínek na celkové chování konstrukce. Při simulaci je proto nutné dbát na důkladné zadání všech okrajových podmínek.

### 5.3.2 Ocelový sloup vystavený účinkům požáru

Příklad uvádí výpočet mechanického chování ocelových sloupů různých průřezů vystavených účinkům požáru. Sloupy jsou zahřívány rovnoměrně po průřezu pomocí teploty, která lineárně stoupá v čase. Výpočet je proveden ve dvou programech pro modelování chování konstrukce – SAFIR a VULCAN.

#### Popis konstrukce

Analýza je provedena pro dva průřezy sloupů, viz obr. 62 a 63. První sloup je kruhového uzavřeného průřezu (CHS) o průměru  $d = 76$  mm a tloušťce stěny  $t = 2,9$  mm (CHS 76x2.9), dále značen jako Sloup 1. Druhý sloup je otevřeného průřezu (UC 152x152x23), dále značen jako Sloup 2. Oba sloupy mají délku  $L = 3,5$  m, v patě jsou vetknuty (v uzlu 1 je zabráněno posunu i pootočení ve všech třech směrech) a ve vrcholu jsou posuvně uloženy tak, aby byl umožněn pouze vertikální posun v důsledku zatížení a tepelné roztažnosti (v uzlu 21 je zabráněno posunu a pootočení ve směrech os/kolem os  $x$ ,  $y$ ).

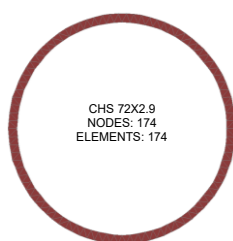
Sloupy jsou z oceli třídy S275 s Youngovým modulem pružnosti rovným 205 000 MPa a Poissonovým součinitelem 0,3. Jak tepelné, tak mechanické vlastnosti oceli jsou definovány v souladu s normou ČSN EN 1993-1-2:2005.

Oba sloupy jsou zatíženy svislým statickým zatížením ve vrcholu sloupu a vodorovným zatížením ve středu jejich rozpětí. Vodorovné zatížení je aplikováno tak, aby vznikla počáteční imperfekce, která způsobí deformaci 1/1000 délky sloupu. Tab. 18 znázorňuje zatěžovací stavy uvažované pro oba sloupy. Sloupy jsou namáhány ve vrcholu (uzel 21) a uprostřed rozpětí (uzel 11) osamělou silou působící ve směrech x, y a z (podrobněji, viz tab. 18).

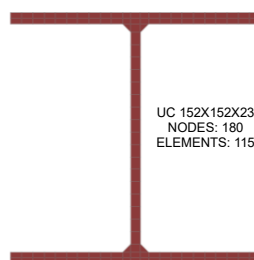
Ve výpočtu je uvažováno s rovnoměrným ohřevem sloupů po jejich průřezu. Teplota aplikovaná na sloupy se lineárně zvyšuje v čase, viz obr. 68.

### Numerický model

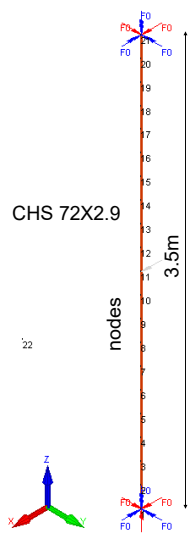
Analýza chování konstrukce je provedena s využitím programů SAFIR (vyvinutého na univerzitě v Liege) a VULCAN (vyvinutého na univerzitě v Sheffieldu). Velikost oka sítě použitá v modelu v programu SAFIR je 0,35 m, tak aby celkový počet konečných prvků byl 10, viz obr. 64 až 67. V softwaru jsou vypočítány výsledky v podobě deformací – posun v uzlu 11 ve směru x (Sloup 1), posun v uzlu 11 ve směru x a posun v uzlu 21 ve směru z, Sloup 2. Pro výpočet v softwaru VULCAN jsou nastaveny konstantní zatěžovací kroky s max. tolerancí 0,001. Analýza provedená v programu SAFIR využívá jak statický, tak dynamický řešič. Statický výpočet Sloupu 1 (teplotní i mechanická část) počítá od času 60 s do 12000 s se zatěžovacím krokem 60 s. Dynamický výpočet Sloupu 1 od času 0,0001 s do 12000 s se zatěžovacím krokem 10 s. Výpočet Sloupu 2 má zatěžovací krok 12 s, rovněž do času 12000 s.



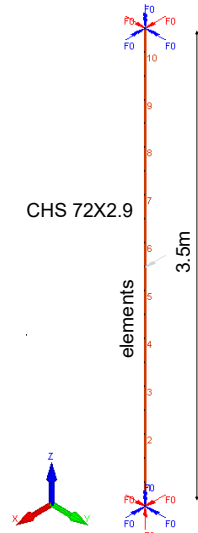
Obr. 62 Teplotní model sloupu 1 v programu SAFIR



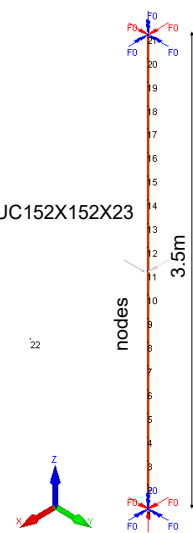
Obr. 63 Teplotní model sloupu 2 v programu SAFIR



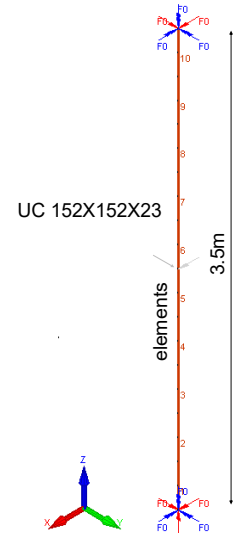
Obr. 64 Mechanický model sloupu 1 v programu SAFIR (zobrazeny uzly)



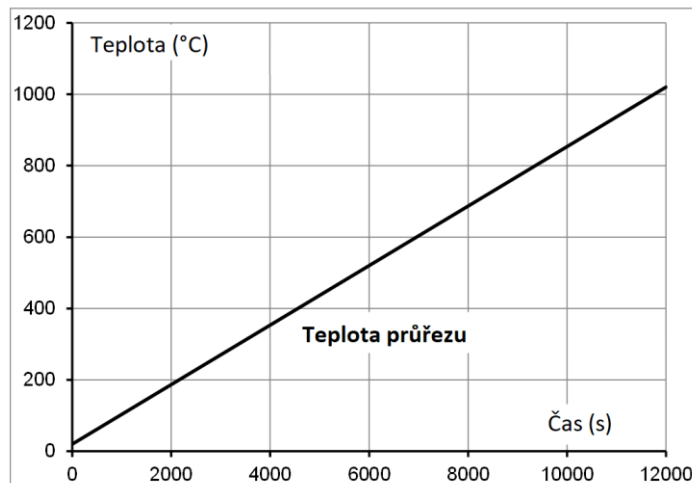
Obr. 65 Mechanický model sloupu 1 v programu SAFIR (zobrazeny prvky)



Obr. 66 Mechanický model sloupu 2 v programu SAFIR (zobrazeny uzly)



Obr. 67 Mechanický model sloupu 2 v programu SAFIR (zobrazeny prvky)



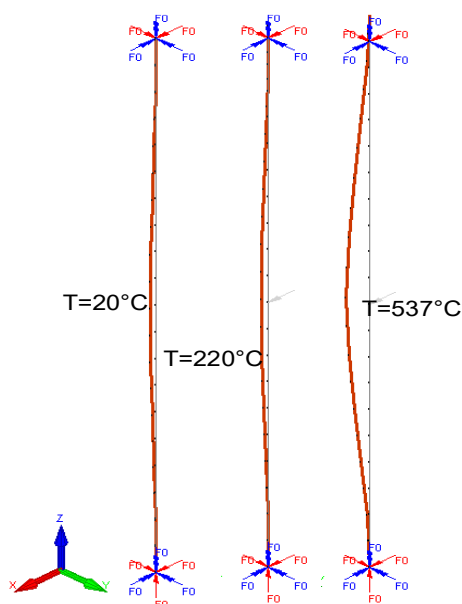
Obr. 68 Teplota v průřezu

Tab. 18 Zatěžovací stavy pro sloup 1 a sloup 2

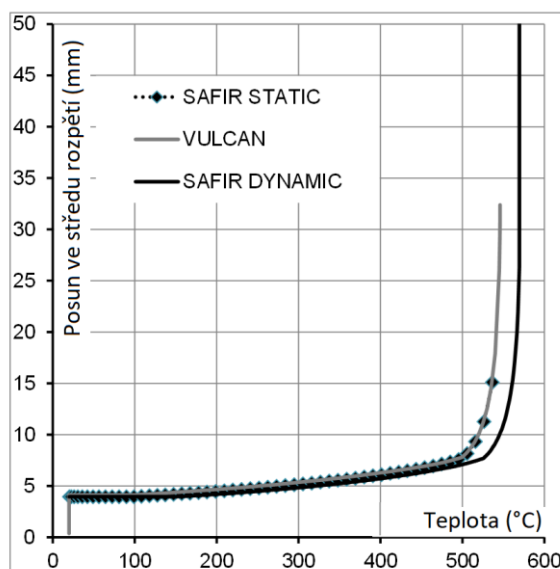
ZATÍŽENÍ			
Typ	Uzel (SAFIR)	Zatížení (N)	Směr působení
Bodové zatížení sloupu 1	21	-37800	z
Bodové zatížení sloupu 1	11	1436	x
Typ	Uzel (SAFIR)	Zatížení (N)	Směr působení
Bodové zatížení sloupu 2	21	-37800	z
Bodové zatížení sloupu 2	11	40163	x
Bodové zatížení sloupu 2	11	12852	y

## Výsledky

Na obr. 69 je znázorněn deformovaný tvar Sloupu 1 pro tři různé teploty při použití řešiče STATIC v programu SAFIR. Na obr. 70 je vidět, že Sloup 1 ztratil stabilitu při dosažení teploty 537 °C. Je zde vidět téměř dokonalá shoda mezi výsledky analýzy v programu VULCAN a SAFIR (statický řešič). Dynamický řešič v programu SAFIR dává kritickou teplotu mírně vyšší, než je dosažená teplota při použití statického řešiče, 546 °C místo 537 °C, protože dynamický řešič může překonat některé numerické problémy konvergence, které mohou nastat při použití statického řešiče.

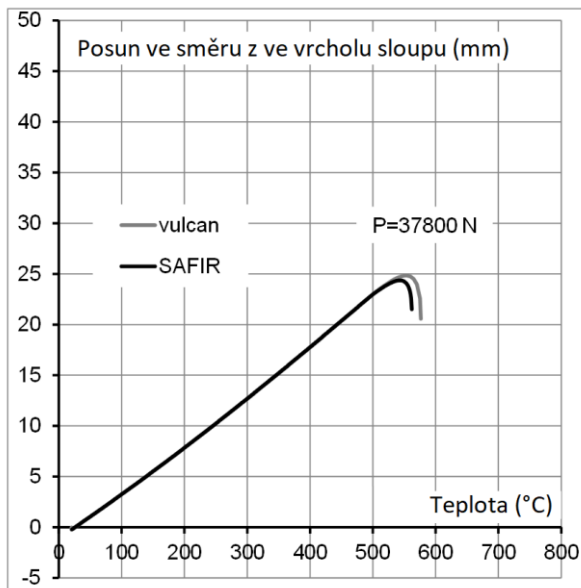


Obr. 69 Deformovaný tvar Sloupu 1 pro tři různé teploty (řešič STATIC programu SAFIR)

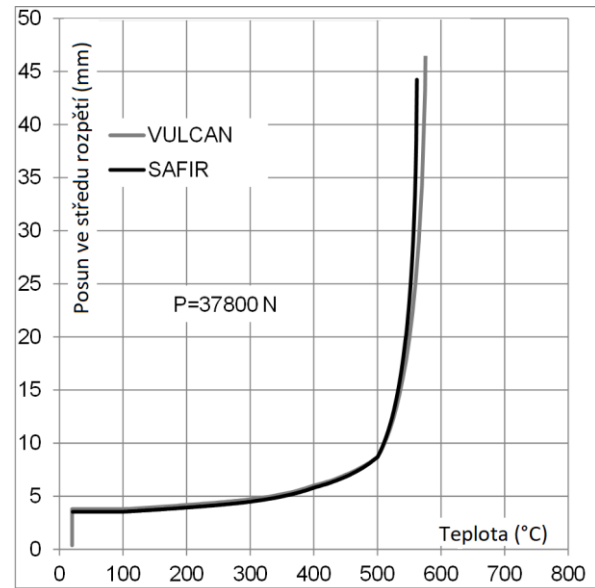


Obr. 70 Posun ve středu rozpětí Sloupu 1 (VULCAN a SAFIR, statický a dynamický řešič)

Sloup 2 ztratil stabilitu, když dosáhl teploty kolem 560-570 °C v programu SAFIR, řešič STATIC. Shodných výsledků bylo dosaženo i v programu VULCAN, obr. 71 a obr. 72.



Obr. 71 Svislý posun ve vrcholu Sloupu 1 (VULCAN a SAFIR, statický řešič)



Obr. 72 Posun ve středu rozpětí Sloupu 2 (VULCAN a SAFIR, statický řešič)

## Shrnutí

Příklad uvádí analýzu mechanického chování sady dvou ocelových sloupů vystavených statickému zatížení a rovnoměrnému lineárně se zvyšujícímu teplotnímu zatížení. Analýza je provedena v programech SAFIR, pomocí statického a dynamického řešiče, a VULCAN. Výsledky z obou softwarových nástrojů ukazují téměř dokonalou shodu mezi analýzou v programech VULCAN a SAFIR, statický řešič. Dynamický řešič programu SAFIR dává vypočítanou kritickou teplotu mírně vyšší než teplota dosažená při použití statického řešiče, protože dynamický řešič může překonat některé numerické problémy konvergence, které mohou nastat při výpočtu pomocí statického řešiče.

### 5.3.3 Rozvoj teplot v průřezu dřevěného prvku

Předmětem ověřovacího příkladu je stanovení průběhu teplot v průřezu dřevěného prvku z lepeného lamelového dřeva vystaveného účinkům normové teplotní křivky pomocí MKP softwaru. Geometrie prvku, materiálové vlastnosti a teplotní zatížení odpovídají požární zkoušce provedené v laboratoři PAVUS a.s. (Cábová, 2018). Pomocí této zkoušky je ověřena správnost modelu. V modelu je použit pokročilý materiálový model dřeva.

## Numerický model

### Software

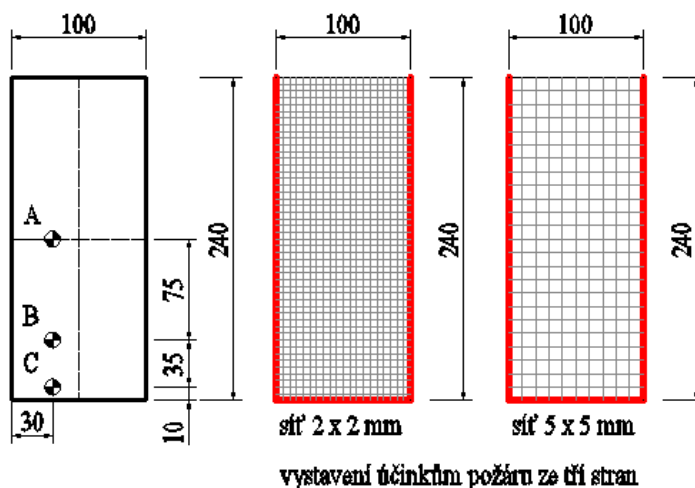
Výpočet je proveden pomocí softwaru Atena Science, verze V.513. Vstupní data jsou zadány pomocí preprocesoru GiD, verze 12.0.8., výsledky jsou zobrazeny v postprocesoru GiD, verze 12.0.8.

### Výpočetní čas

Konstrukce je vystavená účinkům normové požární křivky po dobu 30 min. Časový krok výpočtu pro teplotní analýzu je zvolen 6 s, tedy čas výpočtu 1800 s a 300 výpočetních kroků.

### Geometrie a výpočetní síť

Výpočetní model je dvourozměrný. Je modelován průřez o velikosti 100 mm x 240 mm, viz obr. 73. Výpočet je proveden pro dvě velikosti sítě se čtvercovým elementem s hranou 5 x 5 mm a 2 x 2 mm.



Obr. 73 Geometrie výpočetního modelu, výpočetní síť a monitorovací body teploty

### Materiálový model

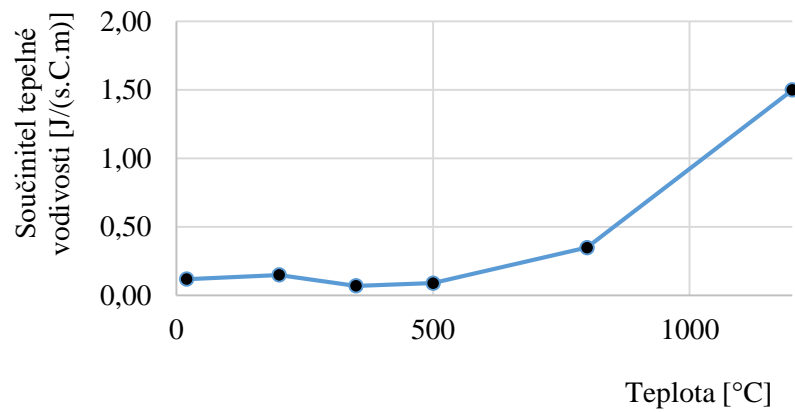
Ve výpočtu je pro smrkové lepené lamelové dřevo uvažován pokročilý materiálový model podle ČSN EN 1995-1-2, příloha B. Parametry při běžné teplotě jsou následující:

- |                                  |  |                         |
|----------------------------------|--|-------------------------|
| a) součinitel tepelné vodivosti: | $\lambda = 0,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | (podle ČSN EN 1995-1-2) |
| b) měrná tepelná kapacita:       | $c = 1,53 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$     | (podle ČSN EN 1995-1-2) |
| c) počáteční teplota materiálu:  | $\theta_{\text{init}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ | (podle ČSN EN 1995-1-2) |
| d) počáteční vlhkost materiálu:  | $w_{\text{init}} = 12 \text{ } \%$                 |                         |
| e) hustota                       | $\rho_k = 530 \text{ kg}/\text{m}^3$               | (dle experimentu)       |

Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita jsou závislé na teplotě. Materiálový model pro teplotní analýzu je „CCTransportMaterial“. Hodnota měrné tepelné kapacity je do softwaru zadávaná v jednotkách  $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{C})$ , a proto platí:

$$c_{\text{simulace}} = c \cdot \rho_k = \text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{C})$$

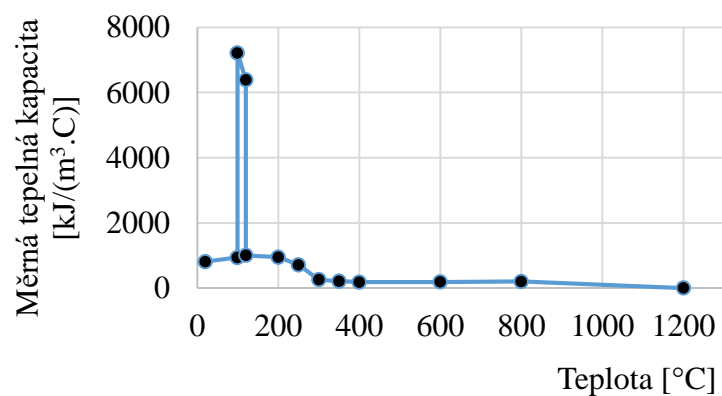
Modifikace tepelných materiálových vlastností jako funkce rostoucí teploty je definována v souladu s ČSN EN 1995-1-2, následovně:

Součinitel tepelné vodivosti

Obr. 74 Součinitel tepelné vodivosti jako funkce rostoucí teploty

Tab. 19 Součinitel tepelné vodivosti jako funkce rostoucí teploty

Teplota	Součinitel tepelné vodivosti	Součinitel tepelné vodivosti - numerická simulace
T [°C]	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\lambda$ [J/(s·C·m)] <i>pozn. W = J/s</i>
20	0,12	0,12
200	0,15	0,15
350	0,07	0,07
500	0,09	0,09
800	0,35	0,35
1200	1,50	1,50

Měrná tepelná kapacita

Obr. 75 Měrná tepelná kapacita jako funkce rostoucí teploty

Tab. 20 Měrná tepelná kapacita jako funkce rostoucí teploty

Teplota	Měrná tepelná kapacita	Hustota	Vlhkost	Měrná tepelná kapacita – numerická simulace
T [°C]	c [kJ]/(kg·K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	w [%]	c [kJ]/(m <sup>3</sup> ·C)]
20	1,53	530,00	12	810,9
99	1,77	530,00	12	938,1
99	13,60	530,00	12	7208,0
120	13,50	473,21	0	6388,4
120	2,12	473,21	0	1003,2
200	2,00	473,21	0	946,4
250	1,62	440,09	0	712,9
300	0,71	359,64	0	255,3
350	0,85	246,07	0	209,2
400	1,00	179,82	0	179,8
600	1,40	132,50	0	185,5
800	1,65	123,04	0	203,0
1200	1,65	0,00	0	0,0

Poznámka: Z uvedené tabulky je zřejmé, že v numerické simulaci je zohledněn úbytek hustoty a vlhkosti dřeva se zvyšující se teplotou – hustota materiálu je použita 530 kg/m<sup>3</sup> podle experimentu.

### Okrajové podmínky

Teplotní zatížení je zadáno pomocí funkcí „*Fire Boundary For Line*“ jako normová teplotní křivka po dobu  $\Delta t = 2700$  s. Zatížení je aplikováno na hranu elementu – červená linie na obr. 73.

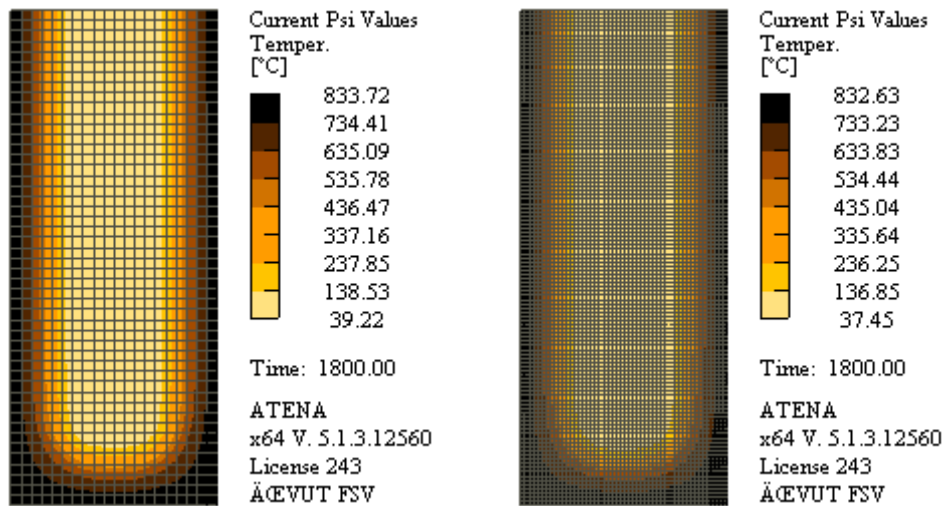
### Měřící body

Teplota materiálu byla v modelu monitorována pomocí funkcí „*Monitor for Point – Temperature*“. Monitorovací body pro měření teploty pod ohříváním povrchem jsou identické s experimentem a jejich poloha je zobrazená na obr. 73, označení A, B, C.

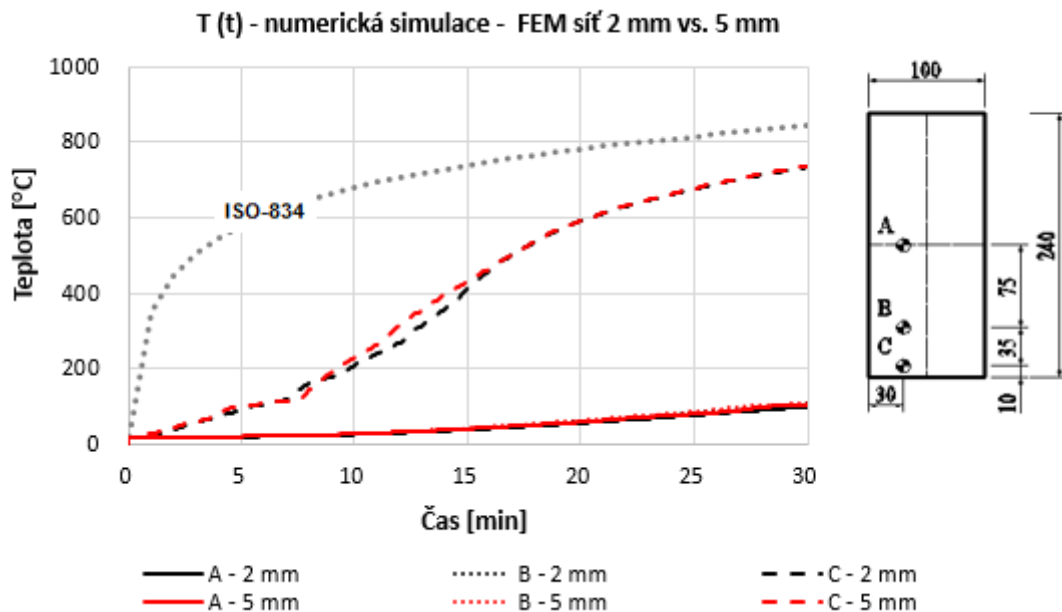
### Výsledky

Grafické zobrazení teplotních polí a teploty v monitorovacích bodech jsou uvedeny níže.





Obr. 76 Teplotní pole – 5 mm síť (vlevo), 2 mm síť (vpravo)



Obr. 77 Průběh teplot v monitorovacích bodech A, B, C v numerickém modelu se sítí konečných prvků s hranou 2 mm a 5 mm a jejich vzájemné porovnání

## Shrnutí

Příklad uvádí výpočet teplot v dřevěném elementu z lepeného lamelového dřeva vystaveného teplotním účinkům normové křivky (ISO-834) po dobu 30 minut. Pro teplotní analýzu je použit pokročilý materiálový model dřeva s ohledem na změnu tepelných materiálových charakteristik dřeva, a to součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  a měrné tepelné kapacity  $c$ .

### 5.3.4 Mechanické chování ocelobetonové stropní desky při požáru

Příklad uvádí vliv požáru na mechanické chování spřažené ocelobetonové stropní desky. Mechanické chování desky je řešeno v programu VULCAN. Výpočet je proveden pro dva různé případy tepelného zatížení. Konstrukce je zatížena křivkou přirozeného požáru vypočítanou pro uvažovaný požární úsek v softwaru FDS. Dále je uveden případ, kdy je konstrukce zatížena parametrickou teplotní křivkou rovněž vypočítanou pro shodný požární úsek. Výsledky obou případů jsou uvedeny z hlediska svislého posunu a osově síly v několika polohách desky.

#### Popis konstrukce

Ocelobetonová deska o půdorysných rozměrech 9,0 m x 9,0 m je tvořena trapézovým plechem a betonem třídy C 30/37, třemi chráněnými obvodovými nosníky profilu IPE 240, nechráněným nosníkem z profilu IPE 270 a IPE 220, rovněž tvořící obvod desky, a dvěma sekundárními nechráněnými ocelovými nosníky profilu IPE 270. Deska je podepřena 6 chráněnými ocelovými sloupy profilu HE200B. Ocelové prvky jsou třídy oceli S355. Betonová vrstva desky má tloušťkou 70 mm a je vyztužena dvěma vrstvami ocelové výztuže o ploše 196 mm<sup>2</sup>/m, která jsou umístěny 30 mm od horního povrchu desky. Částečná interakce mezi betonovou deskou a nosnými ocelovými nosníky je zajištěna spřahovacími trny o průměru 19 mm s maximální pevností ve smyku 450 N/mm<sup>2</sup> s počtem 2,11 ks/m. Údaje o stropní desce včetně geometrie, průřezů nosníků a mechanického zatížení jsou znázorněny na obr. 78.

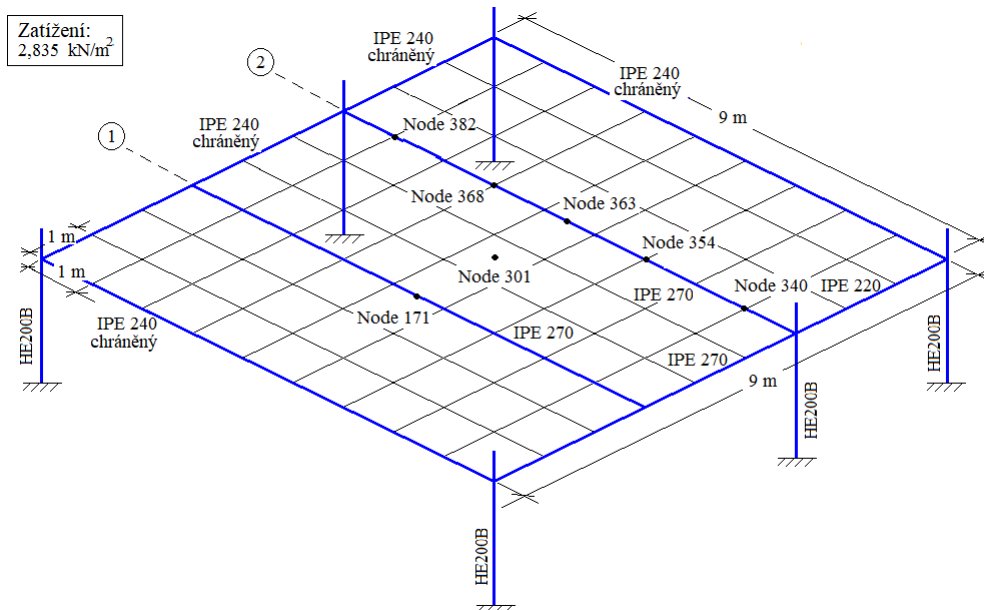
#### Numerický model

##### Software a parametry výpočtu

Výpočet byl proveden v programu VULCAN. Celkový čas výpočtu je 60 min.

##### Geometrie, materiály a výpočetní síť

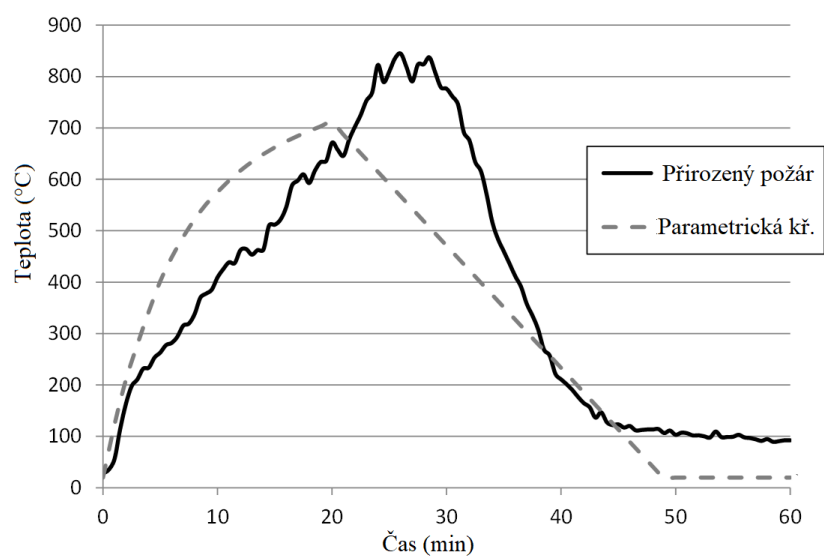
Geometrie modelu odpovídá konstrukci na obr. 78. Mechanické vlastnosti materiálu ocelových nosníků (ocel třídy S355) jsou v modelu zavedeny podle ČSN EN 1993-1-1. Mez kluzu je 355 MPa, modul pružnosti 210 000 MPa a Poissonovo číslo 0,3. Železobetonová deska je z betonu C30/37. Výztuž ŽB desky je tvořena betonářskou výztuží průměru 5 mm se vzdáleností prutů 100 mm. Materiálové modely oceli, betonu a ocelové výztuže při zvýšených teplotách jsou zavedeny podle normy ČSN EN 1992-1-2 respektive ČSN EN 1993-1-2. Model je rozdělen na výpočetní síť o velikosti 1,0 m x 1,0 m.



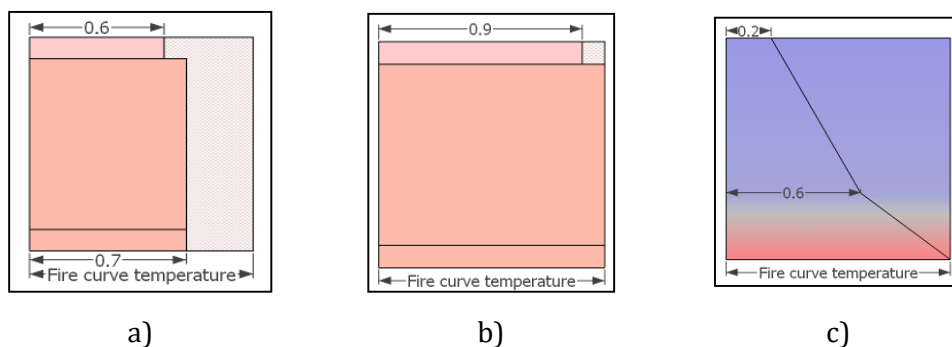
Obr. 78 Model ocelobetonové konstrukce

### Zatížení

Na stropní desku působí mechanické zatížení o velikosti  $2,835 \text{ kN/m}^2$ . Účinky požáru na konstrukci jsou modelovány pomocí parametrické teplotní křivky dle ČSN EN 1991-1-2 a pomocí křivky přirozeného požáru stanovené pomocí FDS pro zkoumaný požární úsek. Obě křivky teploty plynu jsou uvedeny na obr. 79. V modelu není počítán přestup tepla z plynu do konstrukce. Teplota konstrukce je předepsána nerovnoměrně po výšce průřezu pomocí procentuálního podílu teploty plynu. Na obr. 80 je znázorněno rozložení teploty po průřezu chráněného nosníku, nechráněného nosníku a betonové desky. Sloupy jsou zatíženy rovnoměrně po průřezu teplotou o velikosti 70% teploty plynu.



Obr. 79 Teplotní zatížení ocelobetonové stropní desky



Obr. 80 Rozložení teploty v průřezu: a) chráněný nosník; b) nechráněný nosník; c) betonová deska.

### Okrajové podmínky

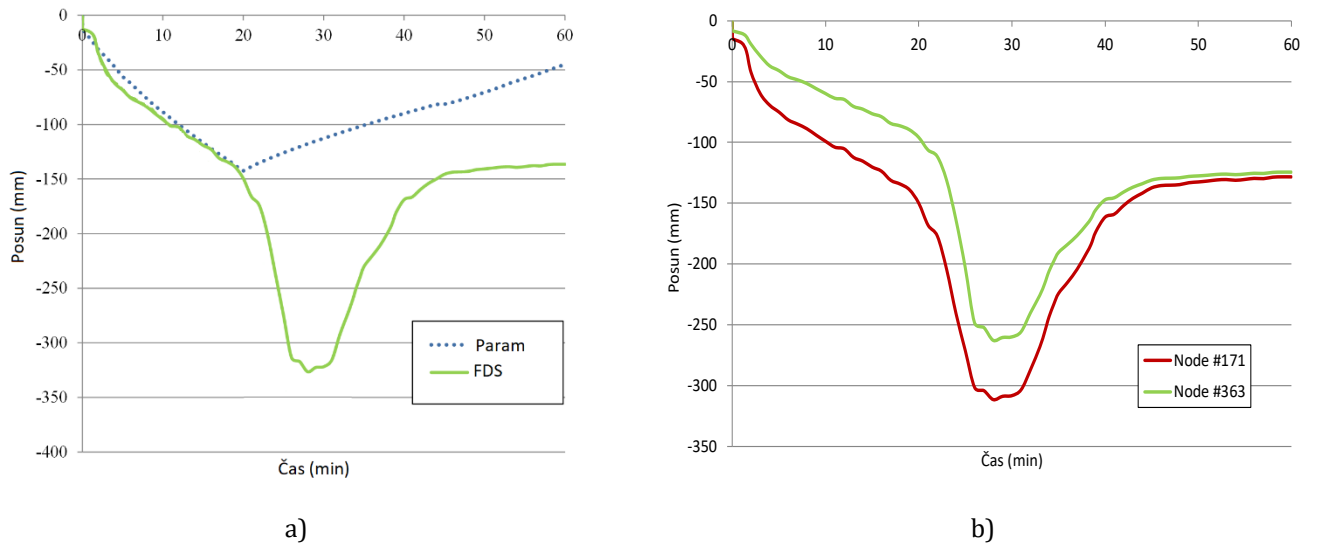
Stropní deska je uložena na sloupce. V místě styku desky a sloupů mají body zabráněný posun ve směru osy x, y a zabráněno pootočení kolem osy z. Sloupce jsou vetknuté – bodům v patě sloupů je zabráněno posunu i pootočení ve všech směrech.

### Výstupy

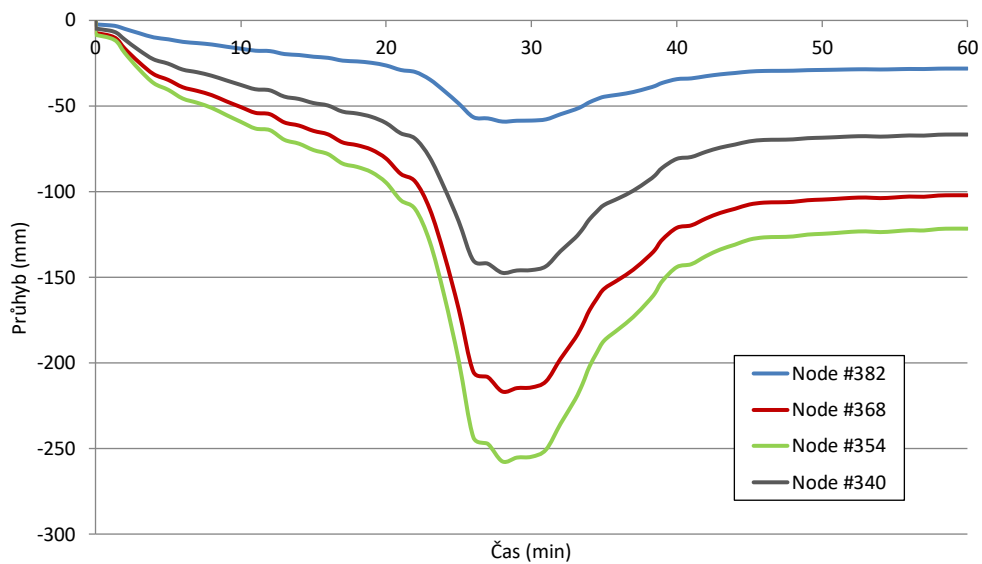
Výstupy modelu je svislý posun centrálního bodu ocelobetonové desky (bod 301), svislý posun vnitřních ocelových nosníků a osová síla vnitřních ocelových nosníků. Body, pro které jsou výsledky zobrazeny, jsou uvedeny na obr. 78.

### Výsledky

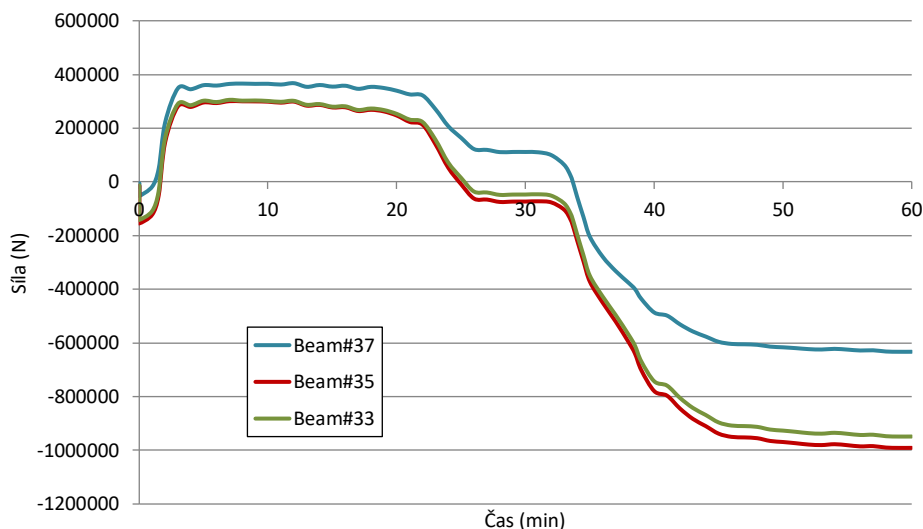
Výsledky jsou uvedeny na obr. 81 až 84. Na obr. 81a je vidět deformace středního bodu desky (bod 301) při působení mechanického zatížení a zatížení teplotou ve dvou variantách. Obr. 81b uvádí svislý posun středních bodů vnitřních nosníků (body 171 a 363) při působení přirozeného požáru. Obr. 82 ilustruje průhyb nosníku č. 2 v několika bodech po jeho délce. Na obr. 83 je vidět osová síla v nosníku č. 2. Obr. 84 uvádí posun nosníku č. 2 v časech 30 min a 60 min.



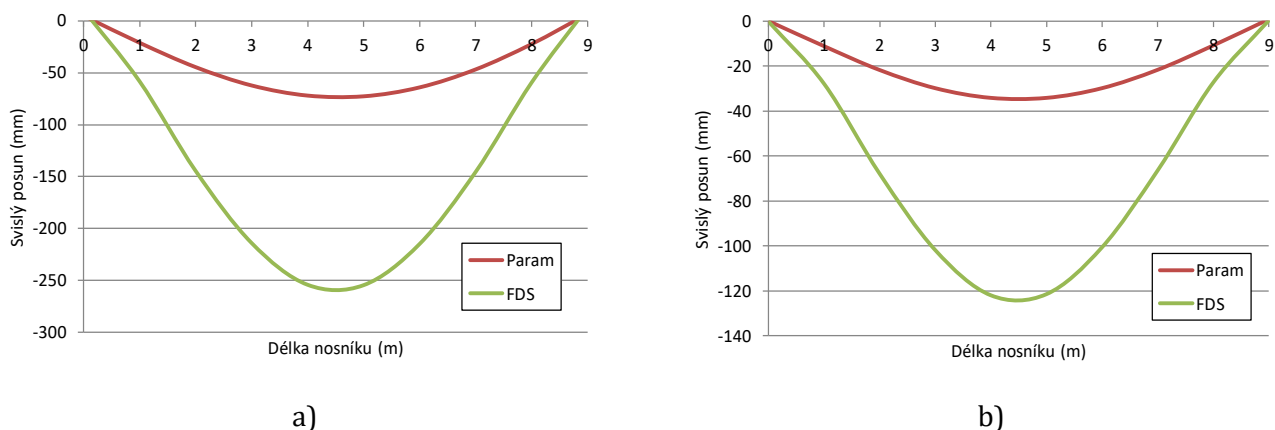
Obr. 81 Porovnání posunutí způsobeného různými případy tepelného zatížení v čase: a) v centrálním bodě desky (bod 301); b) ve středu rozpětí nosníku 1 (bod 171) a nosníku 2 (bod 363)



Obr. 82 Průhyb nosníku č. 2



Obr. 83 Osová síla v nosníku č. 2



Obr. 84 Průhyb nosníku č. 2: a) v čase 30 min; b) v čase 60 min

## Shrnutí

Příklad uvádí výpočet mechanického chování spřažené ocelobetonové stropní desky podepřené sloupy při požáru. Výpočet je proveden v softwaru VULCAN ve dvou variantách lišící se teplotním zatížením. Výsledkem jsou průhyby a osově síly jednotlivých bodů konstrukce.

### 5.3.5 Dřevobetonová stropní deska vystavená účinkům požáru

Předmětem příkladu je výpočet svislých deformací spřažené dřevo-betonové stropní desky vystavené účinkům normové teplotní křivky. Geometrie stropní desky je převzata z požární zkoušky (Blesák a kol., 2015) a vlastnosti materiálů z materiálových zkoušek a hodnot naměřených v průběhu experimentu. Správnost numerického modelu byla ověřena pomocí výsledků získaných z experimentu.

## Numerický model

### Software

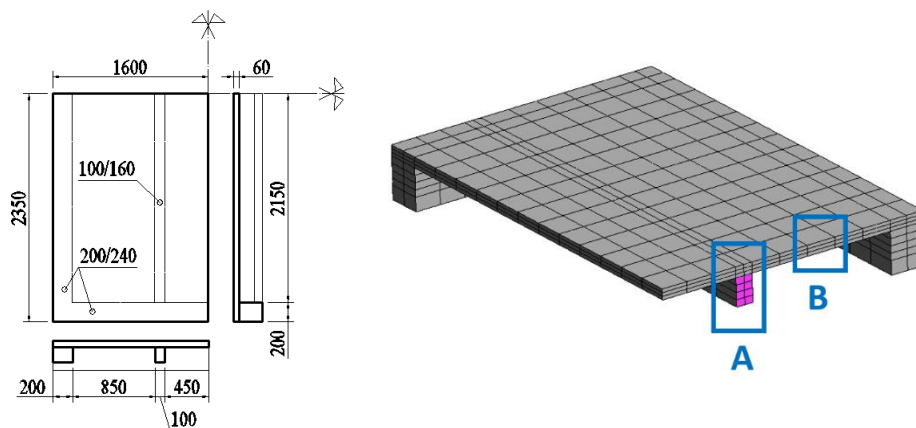
Výpočet je proveden pomocí softwaru Atena Science (FEM), verze V.513. Vstupní data jsou zadány pomocí preprocesoru GiD, verze 12.0.8., výsledky jsou zobrazeny v postprocesoru GiD, verze 12.0.8.

### Výpočetní čas

Konstrukce je vystavena účinkům normové teplotní křivky po dobu 60 min. Časový krok výpočtu pro teplotní analýzu je zvolen 12 s, čas výpočtu 1800 s a 150 výpočetních kroků (všeobecně se pro teplotní analýzu doporučuje max. 6 s, případně teplotní gradient max. 1 °C/1 krok výpočtu, pro účely této simulace je uvedený časový krok postačující). Pro analýzu odezvy konstrukce na mechanické zatížení, je zvolen počet kroků výpočtu identický s teplotní analýzou, tedy 150 výpočetních kroků.

### Geometrie a výpočetní síť

Rozměry modelu odpovídající rozměrům stropní desky z požární zkoušky (Blesák a kol., 2015), jsou uvedeny na obr. 85 vlevo (rozměry v mm), model je dvouosově symetrický – modelována je pouze ¼ stropní desky.



Obr. 85 Geometrie výpočetního modelu (vlevo), axonometrie výpočetního modelu (vpravo)

Počet prvků výpočetní sítě pro vnitřní nosník, obr. 85 vpravo – detail A, je na výšku průřezu 4 a na šířku průřezu 2 (všeobecně je doporučeno min. 6 elementů na výšku průřezu pro ohýbané prvky – v tomto případě je počet 4 vyhodnocen jako dostačující). Po celé své reálné délce je nosník rozdělen na 24 prvků (elementů). Rozměry elementů jsou 50 mm x 40 mm x 180 mm. Stejným způsobem je zhotovena síť konečných prvků pro prvky podpůrného rámu po obvodě stropní desky. Pro dřevěné nosníky a podpůrný rám jsou použity 3D SOLID elementy – hexaedry.

Pro betonovou desku jsou použity 3 vrstvy SHELL elementů (CCIsoShellBrick) po tloušťce, obr. 85 vpravo – detail B, s rozměry 20 mm x 180 mm x 170 (150) mm. Pro každý SHELL element je uváženo 8 integračních bodů po tloušťce (ve svislém směru).

Spřažení betonové desky s dřevěnými nosníky/rámem je simulováno funkcí INTERFACE, jejíž tuhost v prokluzu je dána lineární závislostí, průměrnou hodnotu v MN/m<sup>3</sup> na základě experimentálního stanovení prokluzu použitého typu spřažení. Síť konečných prvků není v konstrukci lokálně zhušťována.

## Materiály

### Lepené lamelové dřevo

Modul pružnosti lepeného lamelového dřeva GL36h (pro nosníky a rám) je roven  $E_{(25)} = 11,22$  GPa, Poissonovo číslo (součinitel příčné roztažnosti)  $\nu = 0,0$ . Změna průřezu vnitřního nosníku jako funkce času/zvyšující se teploty je dána zavedením efektivního modulu pružnosti, jehož hodnota klesá na  $E_{(300)} = 0,05$  GPa při teplotě 300 °C (nulové hodnoty materiálových veličin se v numerické simulaci všeobecně nedoporučují). Dřevěný rám po obvodě desky je chráněn tepelnou izolací. Hodnota efektivního modulu pružnosti je dána vztahem:

$$E_{\text{eff}(t)} = \frac{E_{(25)} \cdot \frac{1}{12} \cdot (b - 2 \cdot \beta_0 \cdot t) \cdot (h - \beta_0 \cdot t)^3}{\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3}$$

kde  $E_{\text{eff}(t)}$  je efektivní Youngův modul pružnosti v čase,  $E_{(25)}$  je Youngův modul pružnosti při běžné teplotě,  $t$  je čas,  $\beta_0$  je rychlost zuhelnatění pro lepené lamelové dřevo, podle ČSN EN 1995-1-2,  $b$  je šířka nosníku,  $h$  je výška nosníku.

Pro teplotní analýzu je použit součinitel tepelné vodivosti  $\lambda = 0,15$  W/(m·K), měrná tepelná kapacita  $c = 0,1 \cdot 10^6$  J/(m<sup>3</sup>·K). Součinitel tepelné roztažnosti je v čase/teplotě konstantní  $\alpha = 0^\circ\text{C}^{-1}$ . V softwaru je zvolen materiálový model pro rám *Elastic3D/prototype CC3DElastIsotropic* a pro vnitřní nosníky *Cementitious2Variable/prototype CC3NonLinCementitious2Variable*. Materiálový model pro teplotní analýzu je *CCTransportMaterial*.

### Beton

Stropní deska je zhotovena z vláknobetonu (bez prutové výztuže, pevnostní třída betonu C45/55, obsah ocelových vláken typu HE 75/50 Arcelor 70 kg/m<sup>3</sup>, polypropylénová vlákna 1,5 kg/m<sup>3</sup>), jehož základní materiálové vlastnosti při běžné teplotě jsou následovné:

- Youngův modul pružnosti:  $E = 48\,450$  GPa
- Součinitel příčné roztažnosti:  $\nu = 0,2$
- Pevnost v tahu:  $f_t = 7,4$  MPa
- Pevnost v tlaku:  $f_c = -80,9$  MPa
- Lomová energie:  $G_f = 9\,000$  N/m



Pro teplotní analýzu je použit součinitel tepelné vodivosti  $\lambda = 1,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  a měrná tepelná kapacita  $c = 4,5 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ . Hodnoty vybraných materiálových vlastností vláknobetonu jako funkce teploty jsou uvedeny v tab. 21 (jsou uvedeny násobitele hodnot při běžné teplotě, pro teplotní protažení je uvedena absolutní hodnota).

Tab. 21 Materiálové vlastnosti vláknobetonu jako funkce času

Teplota [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Youngův modul pružnosti $E$	1	0,594	0,409	0,304	0,188	0,1	0,045	0,03	0,015
Pevnost v tahu $f_t$	1	1	-	-	-	0,2	0,01	-	0,01
Pevnost v tlaku $f_c$	1	0,95	-	0,85	0,75	-	-	-	0,15
Pevnost betonu v drčení $f_{c0}$	1	0,95	-	0,85	0,75	-	-	-	0,15
Lomová energie $G_f$	1	-	1	1,3	2	-	-	-	2
Teplotní protažení $\varepsilon_T (\times 10^{-4})$	0	7,43	18,04	31,41	48,92	71,95	101,88	140	140

Materiálový model betonu je v softwaru zvolen jako *Concrete EC2/protoype CC3NonLinCementitious2WithTempDepProperties*. Materiálový model pro teplotní analýzu je *CCTransportMaterial*.

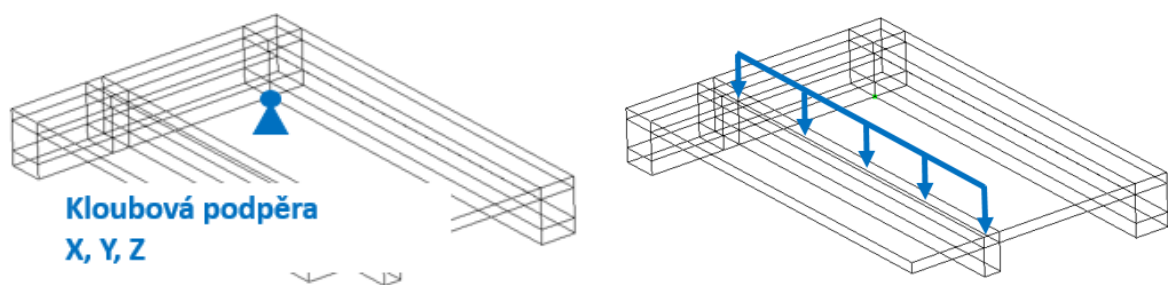
### Spřažení

Spřažení je v konstrukci provedeno pomocí šroubů TCC 7,3 x 150 mm osazených pod uhem 45° ve vzájemné vzdálenosti 100 mm ve dvou rovnoběžných radách.

### Okrajové podmínky

#### Podepření

Konstrukce je bodově podepřena ve třech směrech X, Y, Z, bez zabránění rotace, obr. 86 vlevo.



Obr. 86 Okrajové podmínky – podepření (vlevo), zatížení (vpravo)

#### Mechanické zatížení

Konstrukce je zatížena mechanickým zatížením hodnotou 2,4 kN/m v poloze nad vnitřním nosníkem, viz obr. 86 vpravo. Zatížení je v softwaru zadáno navýšením objemové tíhy betonové desky o průřezu 60 x 100 mm v oblasti nad nosníkem.

### Teplotní zatížení

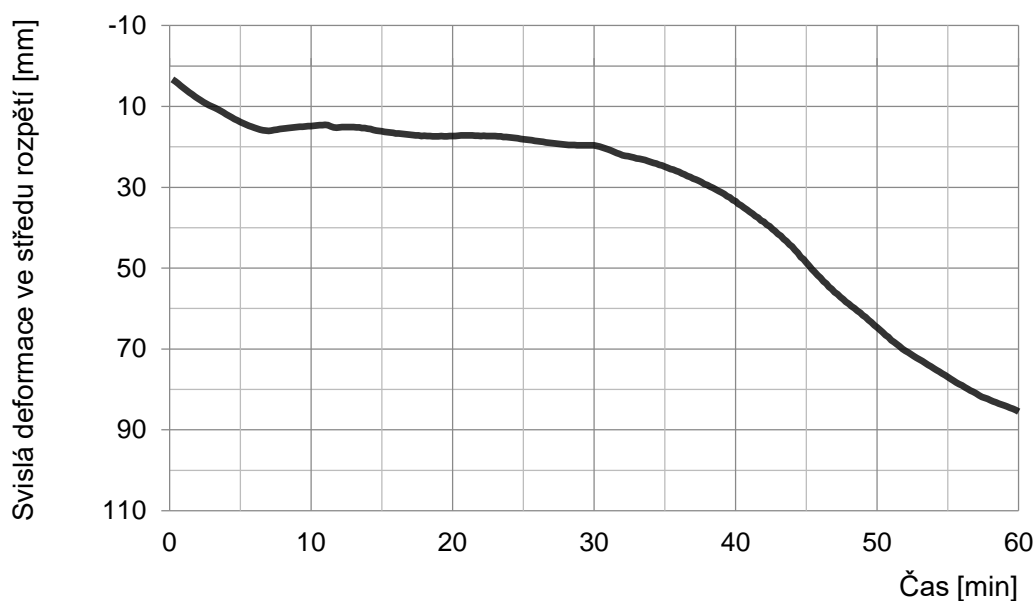
Konstrukce je zatížena teplotním zatížením pomocí funkcí *Fire Boundary for Surface*, normovou teplotní křivkou. Emisivita povrchu  $\varepsilon = 0,7$ . Zatížení je aplikováno na spodní hranu betonové desky a ze tří stran zespodu na vnitřní dřevěný nosník (mimo kontakt dřevo-beton).

### Měřicí body

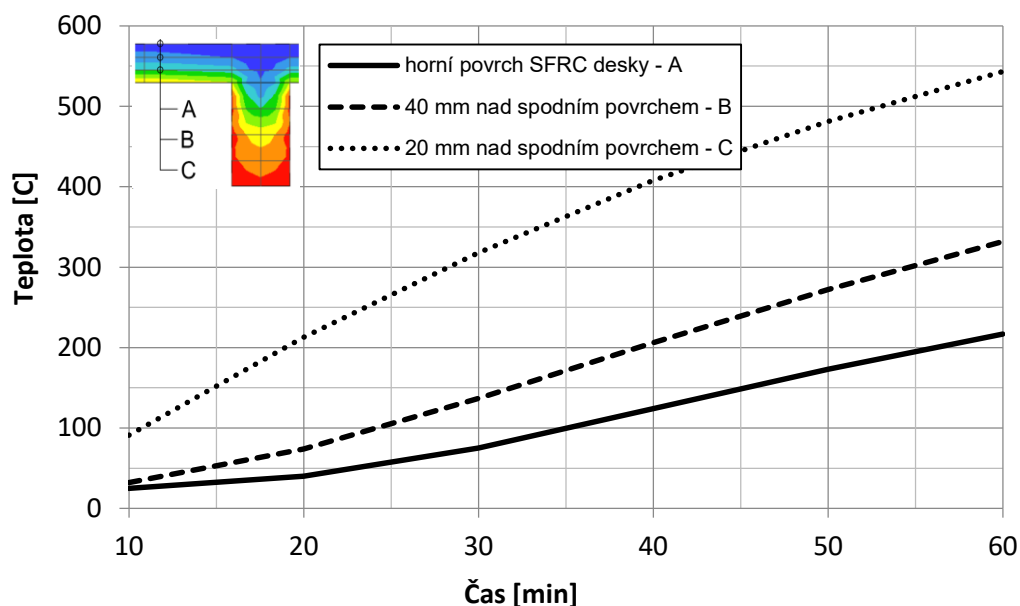
Teplota materiálů a svislé deformace byly v modelu monitorovány pomocí funkcí *Monitor for Point – temperature* a *Monitor for Point – Displacement*. Teplota v betonové desce byla monitorována 20 mm a 40 mm nad spodním povrchem a na horním povrchu (nevystavenému účinkům požáru). Teplota ve vnitřním dřevěném nosníku byla monitorována ve svislé ose průřezu 40 mm nad spodním povrchem.

### Výsledky

Průběh svislých deformací stropní desky ve středu její symetrie z numerické simulace a z experimentu jsou uvedeny v grafu na obr. 87, průběh teplot v betonové desce je zobrazen v grafu na obr. 88.



Obr. 87 Průběh svislé deformace stropní desky z numerické simulace



Obr. 88 Průběh teplot v betonové desce z numerické simulace

### Shrnutí

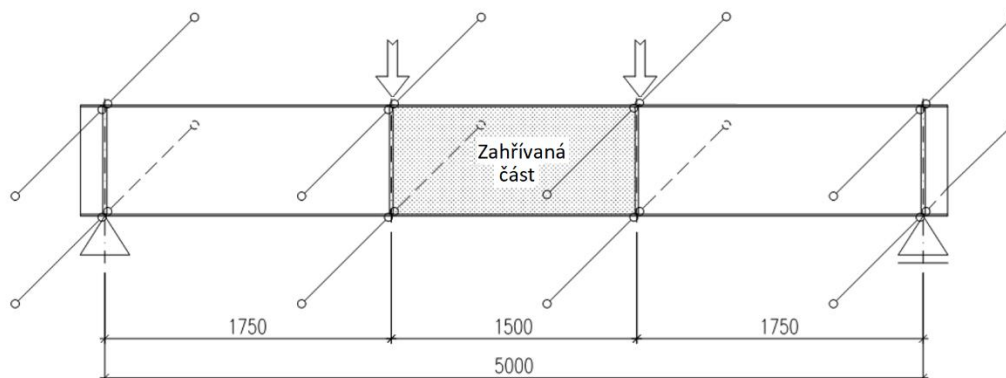
Příklad uvádí výpočet svislých deformací spřažené dřevo-betonové desky vystavené účinkům normového požáru po dobu 60 minut. Jsou definovány materiálové vlastnosti a okrajové podmínky pro nelineární analýzu tepelné a mechanické odezvy konstrukce. Vzhledem ke dvouose symetrickému problému, je modelována pouze jedna čtvrtina konstrukce. Jako zjednodušení je zuhelnatění dřeva nahrazeno zavedením efektivního modulu pružnosti (tedy bez redukce rozměrů průřezu nosníku). Materiálové parametry byly stanoveny na základě materiálových zkoušek při běžné teplotě a zvýšené teplotě. Parametry, které nebylo možné stanovit, příp. experimentálně ověřit, byly ponechány v základním nastavení softwaru. Díky validaci pomocí výsledků z požární zkoušky lze příklad využít jako ověřovací příklad pro předpověď teploty v konstrukci a hodnot její svislé deformace.

### 5.3.6 Stabilita ocelového nosníku s průřezem 4. třídy při požáru

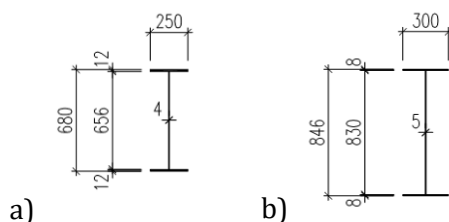
Příklad uvádí výpočet ohybové únosnosti ocelového nosníku otevřených I průřezů 4. třídy při zvýšené teplotě pomocí numerické simulace. Jsou simulovány čtyři případy se dvěma typy průřezů a dvěma různými teplotami. Vybrané nosníky a zvolené zatížení vycházejí ze skutečných testů prováděných v rámci projektu RFCS FIDESC4 (Jandera a kol., 2020).

## Popis konstrukce

Výpočet ohybové únosnosti je proveden na ocelovém nosníku délky 5 m, viz obr. 89, o dvou různých otevřených I průřezech třídy 4, viz obr. 90. Průřez A (IS 680/250/12/4) má stojinu třídy 4 a pásnice třídy 3, klasifikováno podle normy ČSN EN 1993-1-1:2005, viz obr. 90a. Průřez B (IS 846/300/8/5) má stojinu i pásnice třídy 4, viz obr. 90b. Nosník je prostě uložen.



Obr. 89 Ocelový nosník



Obr. 90 Průřezy nosníku: a) průřez A, b) průřez B

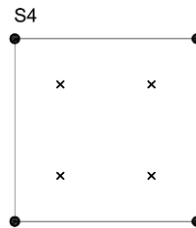
Nosník je symetricky zatížen dvěma osamělými silami. Ve střední části nosníku je tak vyvozen konstantní ohybový moment bez posouvací síly. Nosník je podélně držen, aby bylo zabráněno ztrátě příčné a torzní stability, viz obr. 89. Jsou simulovány čtyři případy se dvěma typy průřezu a dvěma různými teplotami. Pro oba typy průřezů, obr. 90, je teplota aplikována pouze na centrální část nosníku. Jsou použity konstantní teploty 450 °C a 650 °C, stejně jako byly průřezy zatíženy během experimentu. Model simuluje konstrukci v ustáleném teplotním stavu, ve kterém je teplota v čase konstantní. Mechanické zatížení se v čase zvyšuje.

## Numerický model

### Software a výpočetní síť

Model je sestaven v konečně prvkovém softwaru ABAQUS (ABAQUS, 2009). Pro modelování tenkostěnných prvků jsou použity skořepinové prvky, konkrétně prvek S4, viz obr. 91. Skořepinový prvek S4 má čtyři uzly se šesti stupni volnosti (tři posunutí a tři natočení), lineární aproximaci a plnou integraci (4 integrační body na povrchu prvku). Může být použit při výpočtu velkých deformací a

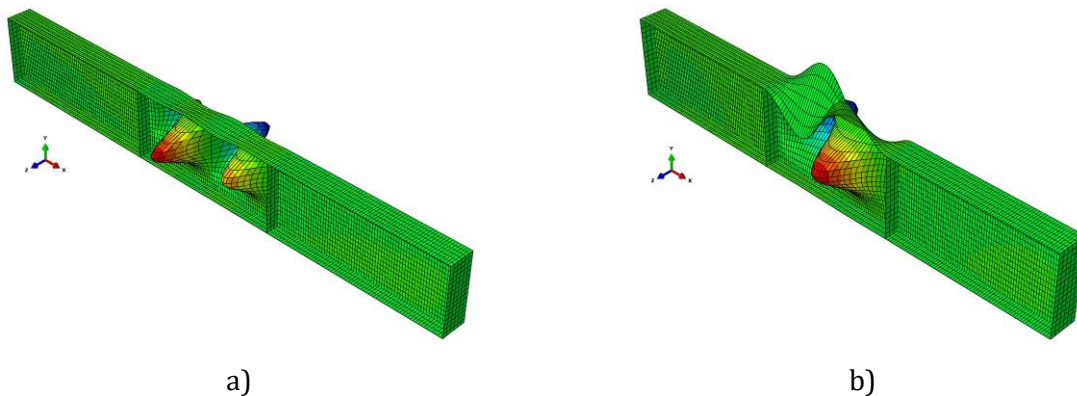
velkých natočení. Pro každý model nosníku je použito 200 uzlů ve směru jeho délky. Na stojinu je použito 16 prvků, zatímco na šířku pásnice je použito šesti prvků. Výpočetní síť je vidět na obrázku 91.



Obr. 91 Skořepinový prvek S4

### Geometrické imperfekce

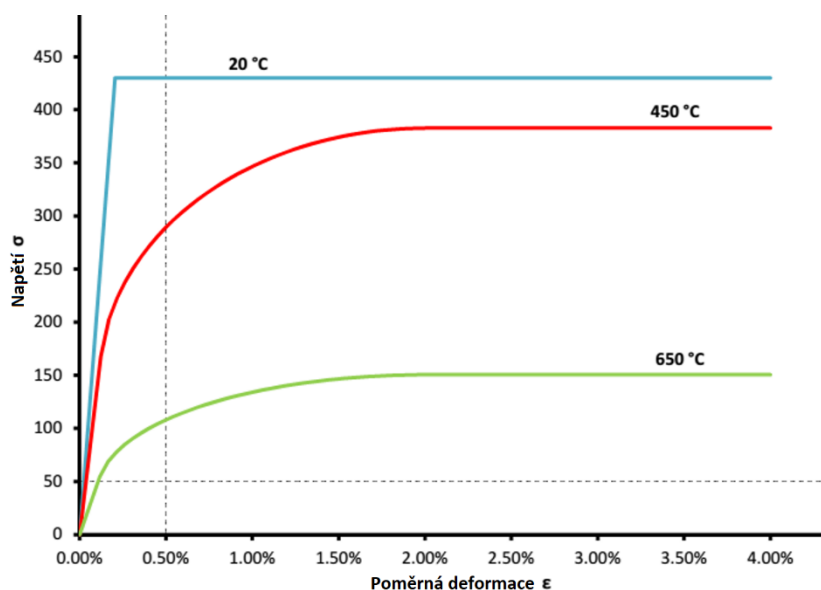
Lokální imperfekce jsou do výpočtu zavedeny prvním vlastním tvarem pružného vybočení, viz obr. 92. Amplituda imperfekce je uvažována dle normy ČSN EN 1993-1-5:2006. Imperfekce pásnice byly  $2 \times 1/200$  násobkem délky přečnávající části pásnice a amplituda pro stojinu byla  $1/200$  výšky stojiny. Reziduální pnutí v průřezu není v modelu uvažováno.



Obr. 92 Imperfekce zavedené v modulu: a) simulace 1 a 2, b) simulace 3 a 4

### Materiálový model

Mechanické vlastnosti konstrukční oceli S355 jsou definovány následovně: mez kluzu  $f_y = 355$  MPa, modul pružnosti  $E = 210$  GPa, Poissonův součinitel  $\nu = 0,3$ . Mechanické vlastnosti při vysokých teplotách jsou definovány pomocí redukčních součinitelů závislých na teplotě podle ČSN EN 1993-1-2:2006. Materiálové chování při vysoké teplotě je definováno elasticko-plastickým nelineárním pracovním diagramem oceli, viz obr. 93.

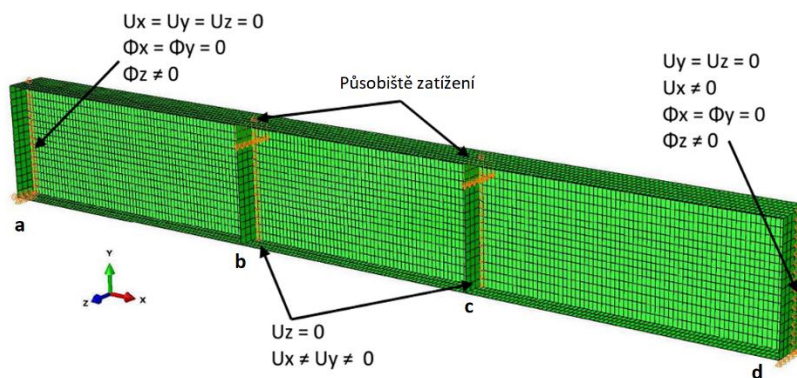


Obr. 93 Pracovní diagram oceli S355 v závislosti na teplotě

### Okrajové podmínky a mechanické zatížení

V modelu jsou okrajové podmínky definovány podle obr. 89. Kloubová podpora je uvažována na levé straně modelu (bod "a") a válcová na pravé straně (bod "d"), viz obr. 94. Na levé straně nosníku je zabráněno posunu ve směru os  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a natočení kolem osy  $x$ . Natočení kolem osy  $z$  je možné. Na pravé straně jsou okrajové podmínky stejné, s výjimkou volného vodorovného posunu ve směru osy  $x$ . Pro průřezy, kde bylo aplikováno zatížení (body "b", "c"), je bráno v úvahu podélné držení nosníku (ve směru osy  $z$ ).

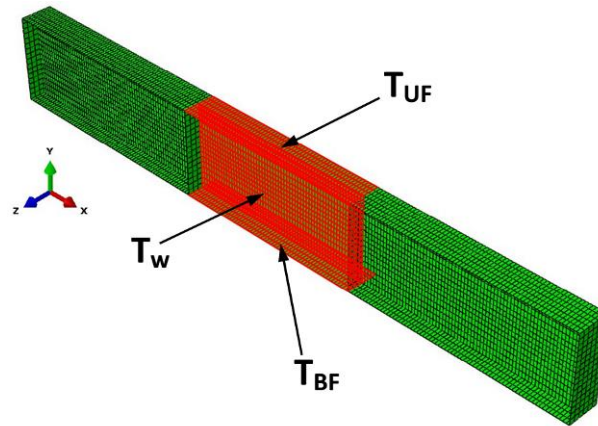
Mechanické zatížení je aplikováno pomocí dvojice osamělých sil definovaných pomocí ekvivalentně rostoucích posunů, aby mohly být shodně jako při experimentu zaznamenány i sestupné větve diagramu. Vertikální posuny simulující zatížení jsou aplikovány na horní pásnici ve dvou bodech, viz obr. 89 a 94. Přírůstky kroku zatížení jsou různé, aby se vyřešily potenciální numerické problémy.



Obr. 94 Okrajové podmínky nosníku a mechanické zatížení

## Teplotní zatížení

Každý nosník je modelován při konstantní teplotě. Krajní části mezi podporou a působištěm zatížení jsou uvažovány při pokojové teplotě, 20 °C, zatímco centrální část při zvýšené teplotě, viz obr. 95. Tab. 22 uvádí teplotní zatížení v jednotlivých simulacích. Teplotní zatížení je provedeno shodně jako při zkouškách, při kterých byla střední část ohřívána odporovými keramickými dečkami.



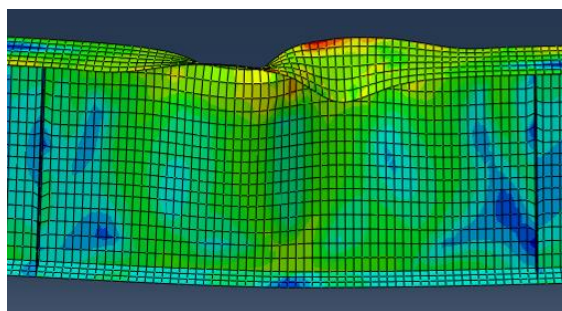
Obr. 95 Rozložení teploty

Tab. 22 Teplotní zatížení v jednotlivých simulacích

	A (IS 680/250/4/12)		B (IS 846/300/5/8)	
Simulace	1	2	3	4
Tepl. [°C]	450	650	450	650

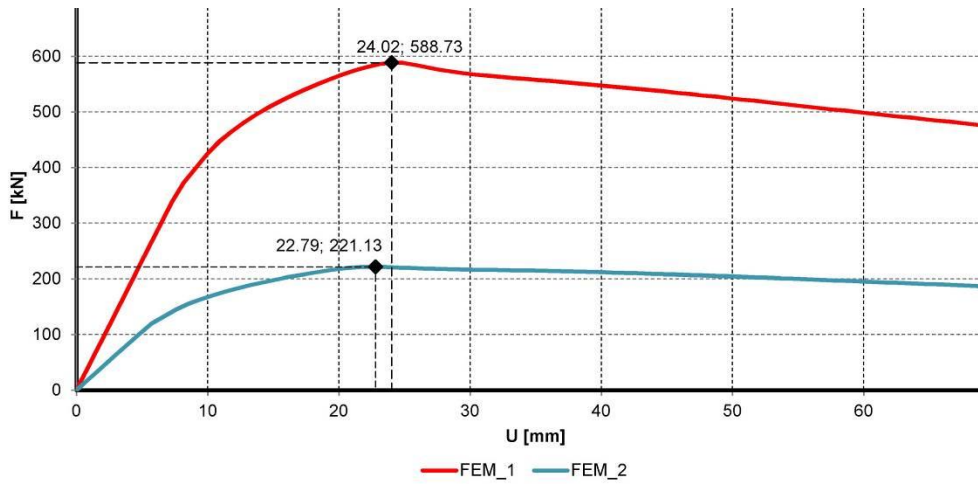
## Výsledky

Na obr. 96 a obr. 97 jsou uvedeny výsledky simulace 1 a simulace 2 (průřez A). Je zde zobrazen deformovaný tvar střední vyhřívané části nosníku a graf závislosti zatížení na deformaci nosníku průřezu A. Obr. 98 a 99 ukazují deformovaný tvar nosníku průřezu B a diagram závislosti zatížení na deformaci nosníku průřezu B získaných ze simulací 3 a 4. Maximální únosnost nosníku je uvedena v tab. 23.

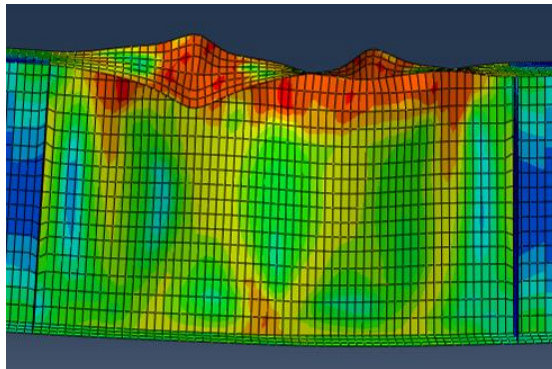


Obr. 96 Deformace střední části nosníku (simulace 1 a 2)

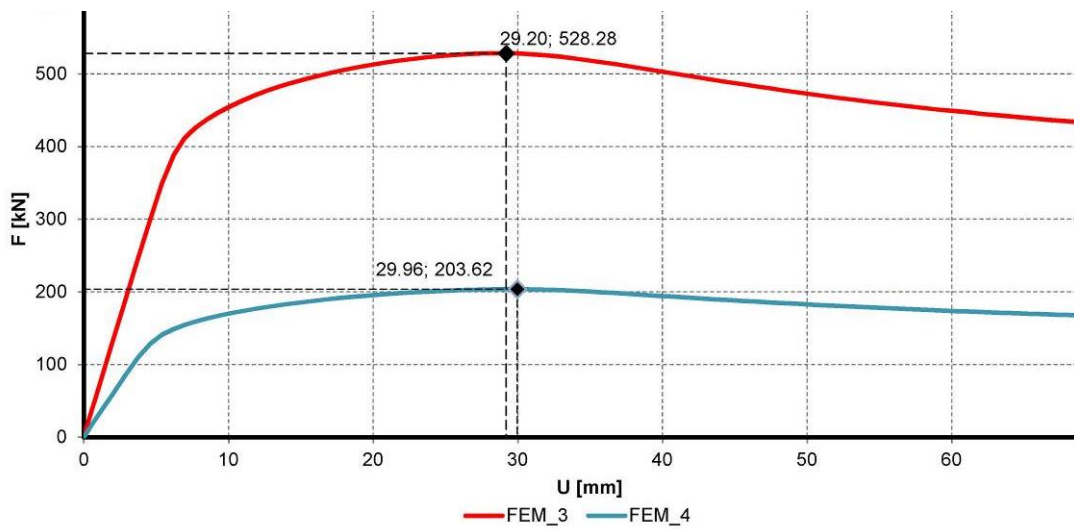




Obr. 97 Graf závislosti zatížení na deformaci (simulace 1 a 2)



Obr. 98 Deformace střední části nosníku (simulace 3 a 4)



Obr. 99 Graf závislosti zatížení na deformaci (simulace 3 a 4)



Tab. 23 Únosnost nosníků

Simulace	Průřez	Max. únosnost [kN]
1	A1 (IS 680/250/4/12)	588,73
2	A2 (IS 680/250/4/12)	221,13
3	B1 (IS 846/300/5/8)	528,28
4	B2 (IS 846/300/5/8)	203,62

### Shrnutí

Příklad uvádí výpočet ohybové únosnosti ocelového nosníku otevřených průřezů 4 třídy bez vlivu příčné a torzní ztráty stability. Výpočet je předveden celkem na čtyřech simulacích lišících se typem průřezu a teplotním zatížením. Příklad ukazuje detaily modelu včetně okrajových podmínek a zavedení imperfekcí do modelu. Kromě maximální ohybové únosnosti nosníků jsou ve výsledcích uvedeny grafy závislosti zatížení na deformaci nosníku a tvary porušení. Model byl validován na experimentu, viz (Jandera a kol., 2020).

## 6 Závěr

V dílčích oblastech požární bezpečnosti staveb se již řadu let konstrukce navrhují pomocí tabulek, analytických a pokročilých modelů. S rozvojem výpočetní techniky má využití pokročilého modelování v požární praxi zvyšující tendenci. Je doloženo, že využití pokročilého modelování v oblasti požární bezpečnosti je jediná cesta k zajištění spolehlivosti budov, které využívají možností současných materiálů a moderních konstrukčních řešení. Nedílnou součástí pokročilých modelů je ověření jejich správnosti pomocí verifikačních a validačních metod. Vzhledem k tomu, že v Evropské unii je bezpečnost řešena jednotlivými státy samostatně, vznikla a stále se rozvíjí podpora ověřování kvality modelů na národních úrovních. V České republice se problematikou implementace pokročilých modelů zabýval projekt VI20162019034: Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb. Předložená habilitační práce, která je souhrnem několikaleté výzkumné činnosti realizované na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze, významně přispěla k řešení projektu přípravou monografie projektu Cábová K., Hasalová L., Apeltauer T., Kučera P. a Wald F. *Ověřování modelů v požární bezpečnosti*, ISBN 978-80-01-06616-4, on line ISBN 978-80-01-06620-1 a přípravou certifikované metodiky Cábová K., Kožich M. a Apeltauer T. *Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů*, 2019.

Předloženou práci je možné rozdělit do několika částí. Části věnující se druhům modelů v požární bezpečnosti konstrukcí, metodám ověřování modelů a metodám zajištění bezpečnosti konstrukcí vystavené účinkům požáru jsou založeny na teoretických poznatcích. Stěžejní části založené na sběru informací z vlastní výzkumné práce jsou popsány v kapitolách *Modely požáru a Odezva konstrukce*. Kapitoly obsahují doporučení pro volbu správného typu modelu v analýzách dílčích problémů požární bezpečnosti konstrukcí a možnosti ověření jejich správné aplikace, relevantních vstupních a výstupních dat. Dále tyto kapitoly uvádí verifikační příklady, které je možné použít jak pro ověření, tak pro kontrolu správnosti řešení, vstupních dat a relevantních výsledků při pokročilém modelování požáru a odezvy konstrukce při požáru. Ke kontrole správného postupu a relevantnosti vstupů a výstupů jednotlivých modelů jsou rovněž zpracovány kontrolní seznamy, tzv. „check-listy“.

Cílem všech částí habilitační práce je podpořit zavedení správné aplikace pokročilých výpočetních postupů a jejich ověřování v hodnocení požární bezpečnosti konstrukcí.

## 7 Literatura

- ABAQUS, Analysis user's manual, Volumes I-IV, version 6.10., Providence, 2010.
- Barnett C. F. BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures, *Fire Safety Journal*, 37(5), 2002, 437-463.
- Bayer K., Rejnö, T. Evacuation Alarm, Optimizing Through Full-scale Experiment. Lund University, 1999.
- Behnam B. Fire structural response of the Plasco Building: A preliminary investigation report, *International Journal of Civil Engineering*, pp. 1–18, 2018.
- Blesák L., Caldová E., Wald F., 2015. Unprotected timber-fibre reinforced concrete slab in fire. *Wood research*, 60 (4), 2015, 605-615.
- Bounagui A., Bénichou N., McCartney C., Kashef A. Optimizing the grid size used in CFD simulations to evaluate fire safety in houses, NRCC – 46760, Institute for research in construction, 2003.
- Budnick E. Automatic Sprinkler System Reliability. *Fire Protection Engineering*, 2001, 7-9.
- Buchanan A. H., Abu A. K. *Structural Design for Fire Safety*, druhé vydání, John Wiley & Sons, Chichester 2017.
- Buchanan A. H. *Structural design for fire safety*, John Wiley & Sons, Chichester 2001.
- Byström A., Cheng, X., Wickström, U., Veljkovic, M., Full-scale experimental and numerical studies on compartment fire under low ambient temperature, *Building and Environment*, Vol. 51, p. 255-262, 2012.
- Cábová K. a kol. *Ověřování modelů v požární bezpečnosti*, Praha: Czech Technical University in Prague, 2019. ISBN 978-80-01-06616-4.
- Cábová K. a kol. Virtual test of fire-resistance of a timber beam, SIF, Ulster University, Ulster, 2018.
- Cábová K., Kučera J., Parametrické modely požáru pro EN 1991-1-2:2021, *Konstrukce*, 2018, 17 (3), 39-42.
- Cábová K., Zeman F., Wald F., Virtuální pec pro zkoušení požární odolnosti konstrukcí, *Konstrukce*, 2018, 17 (5), 35-39.
- Cepolina E. M., Phased evacuation: An optimisation model which takes into account the capacity drop phenomenon in pedestrian flows, *Fire Safety Journal*, 2009, 44, 532-544.
- Clifton C. *Fire Models for Large Firecells*, Hera Report R4-83, Heavy Engineering Research Association, Auckland New Zealand, 2006.
- Cooke G.M.E. The severity of fire in a large compartment with restricted ventilation, *Fire Safety on Ships*, Paper 5, IMAS 94, The Institute of Marine Engineers, London, 1994.
- Crocker J.P. a kol. The effect of sprinkler on fire induced doorway flows, *New tools for performance based design*, *Fire technology*, 2010, 347-362.
- Dai X., Jiang L., Maclean J., Welch S., a Usmani A. A conceptual framework for a design travelling fire for large compartments with fire resistant islands, in: *Proceedings of the 14th International Interflam Conference*. London, UK, p. 1039–1050, 2016.
- Dai X., Jiang L., Maclean J., Welch S., a Usmani A. Implementation of a new design travelling fire model for global structural analysis, in: *The 9th International Conference on Structures in Fire*. Princeton, USA, p. 959–966, 2016.
- Dai X., Welch S. a Usmani A. A critical review of “travelling fire” scenarios for performance-based structural engineering, *Fire Safety Journal*, 91, pp. 568–578, 2017.
- Dai X. a kol. An extended travelling fire method framework for performance - based structural design. *Fire and Materials*. 1(21), pp. 437-457, 2020. DOI 10.1002/fam.2810.
- Deibjerg T. a kol. *Argos User's Guide*. Copenhagen: Danish Institute of Fire and Security Technology, 2003.
- Drysdale D. The Flashover Phenomenon, *Fire Engineers Journal*, 1996, 23, 152-167.
- Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*, 2nd Edition Wiley, 1998, ISBN 0-471-97291-6.
- ECCS 75, *Fire safety in open car parks*, ECCS, Brussels, 1993.

- FEMA 2005, Final Reports from the NIST Investigation of the World Trade Center Disaster, FEMA, 2005, 2008, 2009, 2012, [www.nist.gov](http://www.nist.gov).
- Filipi B. Nauka o materiálu, SPBI, Ostrava, 2003.
- Fletcher I., Borg A., Hitchen N. a Welch S. Performance of concrete in fire: A review of the state of the art, with a case study of the Windsor Tower fire, in: 4th International Workshop in Structures in Fire. Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro, p. 779–790, 2006.
- Folic R., Radonjanin V. a M. Malesev, The assessment of the structure of Novi Sad Open University damaged in a fire. *Construction and Building Materials* [online]. 2002, 16(7), 427–440. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/S0950-0618(02)00045-4
- Francis P., Badoo N., Hanus H., Thauvoye Ch., Cábová, K., Lišková, N., Sokol, Z., Wald, F. Návrh sloupu vystaveného lokálnímu požáru, Praha: CTU. Czech Technical University Publishing House, 2018.
- Franssen J. M. OZone V2, Université Liege, URL: [www.ulg.ac.be/matstruc/download.html](http://www.ulg.ac.be/matstruc/download.html), Liege, 2004.
- Franssen J. M., SAFIR. A thermal/structural program modelling structures under fire, *Engineering Journal*, 2005, 42 (3), 143-158.
- Frantzisch H., Nilssonsson D., Eriksson O. Evaluation and validation of evacuation programs. Lund University, 2007.
- Fruin J. J. Pedestrian Planning and Design, *Elevator World*, 1971.
- Galea E, a kol. Evacuation response behaviour of occupants in a large theatre during a live performance, *Fire and Materials*, 2017.
- Galea E, Blake S. Collection and analysis of human behaviour data appearing in the mass media relating to the evacuation of the World Trade Centre towers of 11 September 2001, 2004.
- Galea E, The UK WTC9/11 Evacuation study: an overview of the methodologies employed and some preliminary analysis. V 4th Pedestrian and Evacuation Dynamics Conference, 2008.
- Galea E. Approximating the evacuation of the World Trade Center North Tower using computer simulation, *Fire Protection Engineering*. 2008, 18 (2), 85-115.
- Gann R.G., Hamins A., McGrattan K., Nelson H.E., Ohlemiller T.J., Prasad K.R., and Pitts W.M. Reconstruction of the fires and thermal environment in World Trade Center buildings 1, 2, and 7, *Fire Technology*, 49, pp. 679–707, 2013.
- Gillie M., Author's Analysis of heated structures: Nature and modelling benchmarks, *Fire Safety Journal*, 2009, 44, 673–680.
- Grosshandler W. L., Bryner N. P., Madrzykowski D. Report of the technical investigation of the station nightclub fire, (NIST NCSTAR 2), Volume 1 [online]. 2005.
- GŘ HZS ČR TÚPO, Počítačové modelování vybraných požárů a scénářů hašení požárů, Závěrečná výzkumná zpráva s výsledky řešení v letech 2012-2015, Výzkumný projekt č. VF20112015021: Výzkum efektivnosti vybraných hasiv, 2015.
- Heskestad G., Smith H. F. Investigation of a new sprinkler sensitivity approval test (the plunge test), Norwood, Factory Mutual Research Corporation, 1976.
- Hofmeister C. E., Hill S.M. a Jensen R. Guidelines for substantiating a fire model for a given application, *Engineering Guide*, SFPE G.06, Issue 54, 2011.
- Hoogendoorn S. P., Daamen W., Pedestrian behaviour at bottlenecks. *Transportation Science*, 2005, 39, 147-159.
- Horová K., Hejtmánek P., Wald F., Entler S. Inclined coal handling bridge after fire, In: Proceedings of the International Fire Safety Symposium IFireSS 2015. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2015. pp. 99-105. ISSN 2412-2629. ISBN 978-989-98435-5-4.
- Horová K., Jána T., Wald F. The effect of fire spread on steel-concrete floor, *Progress on Safety of Structures in Fire*. Shanghai: Tongji University Press, 2014, 737-744.

- Horová K. Modelling of fire spread in structural fire engineering, Ph.D. práce, ČVUT v Praze, 2015.
- Hosser D., Zehfuss A J. Fire Safety Design of Multi-Storey Buildings for Natural Fires. Technical University of Braunschweig, 2016.
- Hostikka S. Development of Fire Simulation Models for Radiative Heat Transfer and Probabilistic Risk Assessment, PhD Thesis, VTT Publication 683, ISBN 978-951-38-7099-7, Espoo, 2008.
- Huang Z., Burgess I. W. and Plank R. J. Three-dimensional modelling of two full-scale fire tests on a composite building, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 1999, 134 (3), 243-255.
- Hurley M. J., Rosenbaum E. R. Performance-based fire safety design, CRC Press, 2015.
- Hurley M. J. SFPE Handbook of fire protection engineering, Springer, New York, 2016.
- Husted B. P., Westerman D. ARGOS - Theory Manual. Danish Institute of Fire and Security Technology, Hvidovre, 2009.
- Hyatt N. Guidelines for process hazards analysis. Dyadem Press, Washington, 2003.
- Charlier M., Franssen J.-M., Dumont F., Nadjai A., Vassart O. Development of an Analytical Model to Determine the Heat Flux to a Structural Element Due to a Travelling Fire. Appl. Sci. 2021, 11, 9263. <https://doi.org/10.3390/app11199263>
- Chow W.K., Li S. S., Gao Y., Chow C. L. Numerical Studies on Atrium Smoke Movement and Control with Validation by Field Tests, Building and Environment 44 (6), p. 1150, 2009.
- Jandera M., Prachař M., Wald F., Lateral-torsional buckling of class 4 section uniform and web tapered beams at elevated temperature, Thin-Walled Structures, 2020, 146.
- Janssens M.L. An Introduction to Mathematical Fire Modeling, Second Edi, CRC Press, 2000.
- Jason A. Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, Occupant Behaviour. Egress and Emergency Communications, NIST, 2005.
- Kawagoe K. Fire behaviour in room, 27, Building Research Institute, Japan Ministry of Construction, Tokyo 1958.
- Kodur V. K. R. a Agrawal A., A numerical approach for evaluating residual capacity of fire damaged concrete members. Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción. 2020, 10(2), 230-242.
- Krempaský J. Fyzika, Alfa, Bratislava, 1988.
- Kučera J., Parametrické modely požáru pro EN 1991-1-2:2021, diplomová práce, ČVUT v Praze, 2019.
- Kučera P. a kol. Metodický postup při odlišném způsobu splnění technických podmínek požární ochrany. SPBI, Ostrava, 2008.
- Kučera P., Kaiser R. Úvod do požárního inženýrství. SPBI, Ostrava, 2007. ISBN: 978-80-7385-024-1.
- Kučera P., Pavlík T., Pokorný J. a Kaiser R. Požární inženýrství – Dynamika požáru, edice SPEKTRUM, sv. 65, Ostrava – SPBI 2009, s. 152. ISBN 978-80-7385-074-6.
- Kučera P. a kol. Požární inženýrství - Aktivní prvky požární ochrany, SPBI, Ostrava, 2013.
- Kučera P. a kol. Praktické poznatky ze zkoušek určených pro validaci modelů hašení sprinklerovou hlaví, Advances in fire and safety engineering, STU, Bratislava, 2017.
- Kuligowski E. D., Peacock R. D. Building Occupant Egress Data, Report of Test FR 4024, NIST, 2010.
- Kwaśniewski L. On practical problems with verification and validation of computational models, Archives of Civil Engineering, 55 (3), 2009, 323-346
- Kwaśniewski L., Bojanowski, C. Principles of verification and validation, Journal of Structural Fire Engineering, 6 (1), 2015, 29-40.
- Lee J. Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening. Nuclear Engineering and Technology, 2019, 410-423.

- Liu Y., Xu Z.-S., Yan L. Study on Hotel Fire Investigation Based on FDS. In: 2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation: 2014, p. 697–700. Dostupné z: doi:10.1109/ICICTA.2014.170
- Lönnermark A., Ingason H. Fire Spread in Large Industrial Premises and Warehouses, Brandforsk project 630-021, SP Swedish National Testing and Research Institute, 2005.
- Lopes A. M. G., Vaz G. C., Santiago A. Numerical simulation of wooden crib fire inside compartment, paper S2F, Techno-Press, Soul, 2004.
- Lu X. a Jianjing J. Simulation for the Collapse of WTC after Aeroplane Impact. Proceedings of International Conference on Protection of Structures Against Hazard, Singapore. 2002.
- Madrzykowski D., Vettori R. L. Sprinkler fire suppression algorithm for the gsa engineering fire assessment system. NIST, Gaithersburg, 1992.
- Marshall A. W. Modelling aspects of sprinkler spray dynamics in fires. 2004
- McGrattan K. a Bareham S. Heat Release Rates of Electrical Enclosure Fires, Draft Report for Comment NUREG/CR-7197, National Institute of Standards and Technology, Engineering Laboratory; Fire Research Division, Gaithersburg, MD 20899, 2015.
- McGrattan K., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics Simulator (Version 6), User Guide. NIST Special Publication 1019-6. Baltimore, NIST, 2016, No. 1019, 2019.
- McGrattan K., a kol. Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 2 – Verification, NIST Special Publication 1018-2. Baltimore, NIST 2019.
- McGrattan, K., Myers, T. A Way to Characterize the Range of Validity of a Fire Model, Proceedings Fire and Evacuation Modeling Technical Conference, Baltimore, Maryland, 2011(2).
- Mok, W. K., Chow, W. K. Verification and Validation in Modeling Fire by CFD, International Journal on Architectural Science 5(3), p. 58, 2004.
- Molkens T. a Rossi B. Modelling Real Fire by FDS and 2-Zone Model for Structural Post-Fire Assessment. In: [online]. 2020, s. 48–60. ISBN 978-3-030-36239-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-36240-9\_4
- Nelson H.E. An Engineering View of the Fire of May 4, 1988 in the First Interstate Bank Building, Los Angeles, California (NIST IR 89-4061), Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology (NIST), 1989.
- Nilsson D., Johansson A., Social influence during the initial phase of a fire evacuation - analysis of evacuation experiments in a cinema theatre, Fire Safety Journal, 2009, 44 (1), 71-79.
- Novozhilov V. Computational fluid dynamics modeling of compartment fires, Progress in energy and combustion Science, 2001, 27, 611-666.
- Nystedt F. Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Building, Lund University, Lund, 2011.
- O Connor M. A, Martin D. M. Behaviour of a multi-storey steel framed building subjected to fire attack, Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46 (1–3), 295.
- Oberkampf W. L., Trucano T. G. Design of and Comparison with Verification and Validation Benchmarks, 2002.
- Oberkampf W. L., Trucano T. G. Verification and validation benchmarks, Nuclear Engineering and Design, 2008, 238, 716–743.
- Osman M. H., Sarbini N. N., Ibrahim I.S., Ma C.K., Ismail M. a M. F. Mohd, A case study on the structural assessment of fire damaged building. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2017, 271, 012100. ISSN 1757-8981, 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/271/1/012100
- Overholt K. J., Weinschenk C. G. a D. Madrzykowski, Simulation of a Fire in a Hillside Residential Structure - San Francisco, CA [online]. NIST TN 1856. B.m.: National Institute of Standards and Technology. 2014. Dostupné z: doi:10.6028/NIST.TN.1856

- Pauls J. Vertical Evacuation in Large Buildings: Missed Opportunities for Research. *Disaster Management*, 1994, 6 (3), 128-132.
- Pček M., Bumba J., Kelnar L., Sluka V., Postupy a metodiky analýz a hodnocení rizik pro účely zákona o prevenci závažných havárií, VUBP, 2000.
- Peacock R. D. a kol. CFAST, Consolidated Fire and Smoke Transport, Version 7. Vol. 1, Technical Reference Guide. NIST, Gaithersburg, 2018.
- Peacock, R. D. a kol. A user's guide for FAST, Engineering tools for estimating fire growth and smoke transport, NIST, Gaithersburg, 2000.
- Pettersson O. The connection between the real fire exposure and the heating conditions according to standard fire-resistance tests with special application to steel structures, CECM 3-73/73, ECCS, Brusel, 1973.
- Pettersson O., Magnusson S. E., Thor A. J., Fire Engineering Design of Steel structures. 1976.
- Proulx G. High-Rise Evacuation: A Questionable Concept, v 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire. 2001.
- Purser D. A., Bensilum M. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations, v Human Behaviour in Fire, 1998.
- Rackauskaite E., Hamel C., Law A., a Rein G. Improved formulation of travelling fires and application to concrete and steel structures, *Structures*, 3, pp. 250–260, 2015.
- Ranby A., Inha T., Myllymäki A. J. Structural Steel Fire Design. SBI 134, 2000.
- Rasbash D. The extinction of fire with plain water a review. V IAFSS Symposiums Fire Safety Science, Springer-Verlag, Berlin, 1986, 1145-1163.
- Reichel V. Navrhování požární bezpečnosti výrobních objektů, edice Zabraňujeme škodám, Česká státní pojišťovna, 17, Praha, 1987.
- Rein G. A Comparison of Three Models for the Simulation of Accidental Fires. *Journal of Fire Protection Engineering* [online]. 2006, 16(3), 183–209. ISSN 1042-3915. Dostupné z: doi:10.1177/1042391506056926
- Rein G. Multi-story Fire Analysis for High-Rise Buildings, Proceedings of the 11th International Interflam Conference, London, Sept. 2007.
- Rein G., Torero J. L., Jahn W., Stern-Gottfried J., Ryder N.L., Desanghere S., Lazaro M., Mowrer F., Coles A., Joyeux D., Alvear D., Capote J.A., Jowsey A., Abecassis-Empis C. a Reszka P. Round-robin Study of a Priori Modelling Predictions of the Dalmarnock Fire Test One. *Fire Safety Journal* 44(4), p. 590, 2009.
- RIMEA, Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungs-Analysen, 2009.
- Roache P. J. Verification and Validation in Computational Science and Engineering, Computing in Science Engineering, Hermosa Publishers, 1998.
- Rybář P. Sprinklerová hasicí zařízení, Praha, Výzbrojna požární ochrany, 1993.
- Särdqvist S. Initial Fires. RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests. (LUTVDG/TVBB--3070--SE; Vol. 3070). Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, 1993.
- Särdqvist S. An engineering approach to fire fighting tactics, Lund University, Lund, 1996.
- Särdqvist S. Water and other entinguishing agents. Karlstad: NRS Tryckeri AB. 2002
- Seyfried A., Rupprecht T., Winkens A. Capacity estimation for emergency exits and bottlenecks, v INTERFLAM 2007, 2007.
- Shen Tzu-Sheng, Yu-Hsiang Huang a Shen-Wen Chien, Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene. *Building and Environment* [online]. 2008, 43(6), 1036–1045. ISSN 0360-1323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2006.11.001
- Shyam-Sunder S., Gann R. G., Grosshandler W. L., Lew H. S., Bukowski R. W., Sadek F., Gayle F. W., Gross J. L., McAllister T. P., Averill J. D., Lawson J. R., Nelson H. E. a S. A. Cauffman, Federal Building and Fire

- Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Final Report of the National Construction Safety Team on the Collapses of the World Trade Center Towers (NIST NCSTAR 1) [online]. 2005. Dostupné z: <https://www.nist.gov/publications/federal-building-and-fire-safety-investigation-world-trade-center-disaster-final-report>
- Sheppard D. Spray Characteristics of Fire Sprinklers. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2002.
- Shestopal V. O. Firewind: computer software for the fire engineering professional, NSW Fire Modelling & Computing, Wahroonga, 2003.
- Schick R. Spray technology reference guide: understanding drop size. Wheaton: Spray Analysis and Research Services . 2008
- Schleich J. B., Cajot L. G., Pierre M. Competitive steel buildings through natural fire safety concept, CEC 7210-SA, Brussel 1999.
- SIMULIA, Abaqus 6.11 Benchmarks Manual, © Dassault Systèmes, 2011.
- Smith D. B. Fire Safety Engineering, CIBSE Guide E, 2010.
- Sokol Z.; Wald F.; Kallerová, P. Bonnet, N. Column Behaviour during Localised Fire Test, SIF, NTU, Singapore, 2008, 256-263.
- Staffanson L., Selecting design fires, diplomová práce, Lund University, Lund, 2010.
- Stamatis D. H. Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution, ASQ Quality Press, Milwaukee, 2003.
- Stern-Gottfried J. a Rein G. Travelling fires for structural design–Part I: Literature review, Fire Safety Journal, 54, pp. 74–85, 2012.
- Stern-Gottfried J., Rein G., Lane B., Torrero J.L. An innovative approach to design fires for structural analysis of non-conventional buildings, a case study, Proceedings of International Conference on Applications of Structural Fire Engineering, Czech Technical University, Prague, Czech Republic, 2009, ISBN 978-80-01-04266-3.
- Studnička J., Holický M., Marková J. Ocelové konstrukce 2, Zatížení, ČVUT v Praze, 2011.
- Šuvar M.C. , Munteanu L. a Nicola A. The use of numerical models as a modern tool in fire investigation. MATEC Web of Conferences [online]. 2020, 305, 00084. Dostupné z: [doi:10.1051/mateconf/202030500084](https://doi.org/10.1051/mateconf/202030500084)
- Sze C. Response time index of sprinklers. International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, 2009, 1-6.
- Šálek V., Cábová K., Wald F. a Jahoda M. Numerical modelling of fire test with timber fire protection. Journal of Structural Fire Engineering. 2021, 13(1), 99-117. ISSN 2040-2317. DOI 10.1108/JSFE-04-2021-0017.
- Šimonek O. Validace experimentálně naměřených parametrů sprinklerových hlavíc zónovými modely požáru, bakalářská práce, VŠB-TUO Ostrava, 2018.
- Tsui A., Spearpoint M. J. Variability of sprinkler response time index and conduction factor using the plunge test, Building Services Engineering Research and Technology, 2010, 163-176.
- Van Hees, P., Holmstedt, G., Bengtsson, S., Blomqvist, P., Dittmer, T., Hägglund, B., Tuovinen, H. Determination of Uncertainty of Different CFD Codes by Means of Comparison with Experimental Fire Scenarios, Proceedings of Fire and Materials conference San Fransisco 2009, Interscience Communications, London.
- Vulcan User's Manual, Vulcan Solutions Ltd, Sheffield, UK.
- VULCAN, A Program for the three-dimensional analysis of steel, composite and concrete framed structures in fire, Sheffield 2004.
- Wade C. a kol. B-RISK 2016, User guide and technical manual. Porirua, BRANZ, 2016.
- Wade C. A., BRANZFIRE technical reference guide, Building Research Association, Association of New Zealand, Judgeford, 2002.



- Wade C. a kol. (2016). B-RISK 2016 User Guide and Technical Manual. Porirua: BRANZ.
- Wald F. a kol. Modelování dynamiky požáru v budovách. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
- Wald F. a kol. Dílčí zpráva s výsledky literární rešerše pro řešení VP MV ČR č. VI20162019034, ČVUT Praha, 2017.
- Wald F., Burgess I., Kwasniewski L. Horová K. a kol. Benchmark studies, Verification of numerical models in fire engineering, Czech Technical University Publishing House <http://fire.fsv.cvut.cz/ifer>, Praha, 2014.
- Wald F., Burgess I., Kwasniewski L. Horová K. a kol. Benchmark studies, Experimental validation of numerical models in fire engineering, Czech Technical University Publishing House, <http://fire.fsv.cvut.cz/ifer>, Praha, 2014.
- Wald F., a kol. Fire Eurocodes - The Future? COST Action TU0904 Integrated Fire Engineering and Response. Prague : CTU - Publishing House, 2014. ISBN 978-80-01-05476-5.
- Wang Y. C., Burgess I.W., Wald F., Gillie, M. Performance-Based Fire Engineering of Structures, CRC Press, 2012.
- Węgrzyński W., Sulik P. The philosophy of fire safety engineering in the shaping of civil engineering development bulletin of the polish academy of sciences Technical sciences, 64, 4, 2016, DOI: 10.1515/bpasts-2016-0081.
- Węgrzyński W., Tofilo P. Hand Calculations, zone models and CFD – areas of disagreement and limits of application in practical fire protection engineering, 11th SFPE, Warsaw, 2016.
- Weidmann U. Transporttechnik der Fussgänger. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, 1993.
- Wickström U. Adiabatic surface temperature and the plate thermometer for calculating heat transfer and controlling fire resistance furnaces. 9th International Symposium of Fire Safety Science. 2008.
- Wicktröm Ulf. Heat transfer in fire technology. Draft prepared for EGOLF Heat Transfer Course. 2011.
- Yan Z. CFD fire simulation and its recent development, Transport phenomena in fires, kap. 10, 357-405, WIT Press, 2008.
- Yarlagadda T., Hajiloo H., Jiang L., Green M. a Usmani A. Preliminary modelling of Plasco Tower collapse, International Journal of High-Rise Buildings, 7(4), pp. 397–408, 2018.
- Yeoh G. H., Yuen, K. K. Computational fluid dynamics in fire engineering; Butterworth-Heinmann, 2009.
- Yuen A.C.Y, Yeoh G., Alexander B. a Cook M. Fire scene investigation of an arson fire incident using computational fluid dynamics based fire simulation. Building Simulation [online]. 2014, 7. Dostupné z: [doi:10.1007/s12273-014-0164-9](https://doi.org/10.1007/s12273-014-0164-9)
- Zehfuss J. Case studies of a new simplified natural fire model and safety concept for structural fire safety design. 2011.
- Zehfuss J. Hosser A. D. A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. Fire Safety Journal, 2007, 42(2), 115–126.

## Normy

- AIAA, Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations, AIAA G-077-1998, New York, (confirmed 2002).
- AICE Guidelines for hazard evaluation procedures, with worked examples, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1992.
- ASFP, Fire protection for structural steel in buildings, Association for Specialist Fire Protection, London 2002.
- ASME V&V 20-2009 Standard for verification and validation in CFD and heat transfer engineering guide for estimating material pyrolysis properties for fire modeling, WPI, 2012.

- ASTM E119-95a Standard methods of the fire tests of building construction and material, Designation, Philadelphia 1995.
- ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb, Nevýrobní objekty. 2009.
- ČSN 73 0804 Požární bezpečnost staveb - Výrobní objekty, ČNI, Praha, 2010.
- ČSN EN 1990 Zásady navrhování konstrukcí, ČNI, 2015.
- ČSN EN 1991-1-1 Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb, ČSNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1991-1-2 Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČSNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1991-1-3 Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení sněhem, ČSNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1991-1-4 Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení větrem, ČSNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1991-1-5 Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení teplotou, ČSNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1992-1-2 Navrhování betonových konstrukcí, Obecná pravidla, Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI Praha, 2006.
- ČSN EN 1993-1-2 Navrhování ocelových konstrukcí, Obecná pravidla, Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI Praha, 2007.
- ČSN EN 1995-1-2 Navrhování dřevěných konstrukcí, Obecná pravidla, Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI 2006.
- ČSN ISO 2394 Obecné zásady spolehlivosti konstrukcí, ČNI, Praha, 2016.
- DIN EN 1991-1-2 DIN NA German National Annex to Eurocode 1, Actions on structures, General actions, Actions on structures exposed to fire, DIN, Berlin 2010.
- DS EN 1991-1-2 DK NA Denisch National Annex to Eurocode 1, Actions on structures, General actions, Actions on structures exposed to fire, Copenhagen, 2014.
- EN 1993-1-14 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis, WG22 ( rozpracovaný text pracovní skupiny WG22)
- EU Regulation No 305/2011 of the European Parliament and Council, Harmonised conditions for the marketing of construction, 2011, URL: eur-lex.europa.eu.
- ISO 16730-1:2015 Fire Safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods- Part 1: General.
- ISO/TR 16730-2:2015 Fire Safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods- Part 2:Example of a zone model.
- ISO/TR 16730-3:2015 Fire Safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods- Part 3: Example of a CFD model.
- ISO/TR 16730-4:2015 Fire Safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods- Part 4: Example of a a structural model.
- ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO, Geneva, 1993.
- ISO TR 13387-8 Fire Engineering: Life Safety, Occupant Behaviour, Location and Condition. 1999.
- ISO TR 15656 Fire resistance — Guidelines for evaluating the predictive capability of calculation models for structural fire behaviour , ISO, Geneva, 2003.
- NAFEMS National Agency for Finite Element Methods, <http://www.nafems.org/>, 2013.
- NFPA Fire Protection Handbook. Applying Models to Fire Protection Engineering problems and Fire Investigations. National Fire Protection Association. Quincy, MA, 2008.
- SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection. 2. vydání, SFPE 2007.
- SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5. vydání, SFPE 2016.

UKAS, The Expression of Uncertainty in Testing, United Kingdom Accreditation Service, 2000.  
VdS 2815 Zusammenwirken von Wasserlöschanlagen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA),  
Merkblatt zum Brandschutz. Köln: VdS Schadenverhütung, 2018.

### **Certifikované metodiky**

Apeltauer T., Beneš P., Apeltauer J. a Okřinová P., Metodika využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb, 2019.  
Cábová K., Kožich M., Apeltauer T. Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů, 2019.  
Hasalová L. a Hejtmánek P. Vstupní data do modelů požáru, 2019.  
Kučera P., Chudová D., Thomitzek A., Hasalová L. Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany, 2019.  
Kučera P., Pokorný J. Metodika pro specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství. VŠB-TU Ostrava, FBI, Ostrava, 2014.