| | | |
|---|---|---|
| | **Specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství**<br>Kód projektu VG20122014074 | |
| Příloha č.<br>**8.6** | **POŽÁRNÍ ODOLNOST STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ** | |
| Datum vydání/aktualizace:<br>**05. 01. 2014/09. 07. 2014** | Počet stran:<br>**17** | Zpracovatel:<br>**I. Bradáčová** |

# Obsah


Úvod ..... 2

1 Požár jako návrhová situace. Postupy posuzování konstrukcí na účinky požáru ..... 3

1.1 Návrhové situace ..... 3

1.2 Požární odolnost konstrukcí ..... 3

1.3 Alternativní přístupy navrhování konstrukcí na účinky požáru ..... 6

1.3.1 Stanovení požadavků na požární odolnost konstrukcí v ČR: ..... 8

1.3.2 Společné zásady navrhování stavebních konstrukcí na účinky požáru ..... 9

1.3.3 Obecná metoda výpočtu ..... 11

1.3.4 Jednoduché metody výpočtu ..... 12

1.3.5 Interface požárních a stavebních specialistů ..... 12

2 Tepelné podmínky hořícího prostoru, tepelné zatížení, kombinace zatížení ..... 14

2.1 Přímé tepelné zatížení ..... 14

2.2 Tepelné zatížení a kombinace zatížení při požáru ..... 16

Použitá literatura ..... 17

# Úvod

Směrnice Rady 89/106/EHS, ze dne 21. 12. 1989, o sbližování zákonů, předpisů a administrativních opatření členských států týkajících se stavebních výrobků, ve znění Směrnice rady 93/68/ES, nabyla účinnosti 21. 6. 1991 a většina členských států ji také k tomuto datu přijala. Uplatnění směrnice záviselo na technických specifikacích s ní harmonizovaných, technických norem vyhlášených CEN/CENELEC a evropských technických osvědčení, vydaných EOTA.

S účinností od 24. 4. 2011 je výše citovaná směrnice nahrazena Nařízením Evropského parlamentu a Rady EU č. 305/2011 ze dne 9. března 2011, kterým se stanoví harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh a kterým se zrušuje výše citovaná Směrnice Rady 89/106/EHS o stavebních výrobcích (Construction Products Regulation - CPR).

Ve smyslu uvedených předpisů se stavebním výrobkem rozumí každý výrobek, vyrobený pro trvalé zabudování do staveb. Požadavky jsou definovány pomocí interpretačních dokumentů, které jsou tříděny podle následujících základních požadavků:

- mechanická odolnost a stabilita;
- požární bezpečnost;
- hygiena, ochrana zdraví a životního prostředí;
- bezpečnost a přístupnost při užívání;
- ochrana proti hluku;
- úspora energie a ochrana tepla;
- udržitelné využívání přírodních zdrojů.

Požární bezpečnost stavby je vnímána jako souhrn vlastností, které při požáru zaručují, aby

- byla po určitou dobu zachována stabilita konstrukce;
- byl omezen vznik a šíření ohně a kouře ve stavebním objektu;
- bylo omezeno šíření ohně na sousední konstrukce;
- osoby mohly opustit budovu nebo být zachráněny jiným způsobem;
- byla zajištěna bezpečnost zásahových a záchranných jednotek.

Spolehlivý návrh především nosných a požárně dělicích konstrukcí v podmínkách požáru v objektu nebo mimo objektu je základním a nutným předpokladem dosažení všech cílů požární bezpečnosti stavby. Jedná se o návrh konstrukcí s požadovanou požární odolností vyplývající z účelu a významu objektu, z rozvoje požáru v objektu/mimo objektu a se zohledněním teplotně závislých fyzikálních a mechanických vlastností stavebních výrobků (materiálů).

# 1 Požár jako návrhová situace. Postupy posuzování konstrukcí na účinky požáru

## *1.1 Návrhové situace*

Při výpočtu konstrukcí a základové půdy se rozlišují tři návrhové situace [1], [2] :

- *trvalá návrhová situace*, jejíž doba trvání je téhož řádu jako doba životnosti konstrukce,
- *dočasná návrhová situace*, jejíž doba trvání je kratší než doba životnosti konstrukce (např. doba realizace, rekonstrukce),
- *nehodová návrhová situace*, odpovídající uvedené mimořádné situaci podle Eurokódu 1 [4], která má malou pravděpodobnost výskytu a krátkou dobu trvání, má však význam z hlediska možných následků překročení mezních stavů. Požár je považován za mimořádnou situaci. Na základě této úvahy jsou pro výpočtové postupy požární odolnosti konstrukcí povoleny jisté úlevy oproti trvalé návrhové situaci, a to na straně zatížení a kombinace zatížení.

## *1.2 Požární odolnost konstrukcí*

Požární odolnost je základní posuzovanou vlastností konstrukcí stavebních objektů za požární situace.

Požární odolnost je doba, během níž je konstrukce schopná zachovat svou funkci. Je dána dosažením jednoho nebo více mezních stavů požární odolnosti, pro něž se užívají mezinárodně přijaté základní písmenné značky (**R** - únosnost a stabilita, **E** – celistvost, **I** – izolační schopnost, **W** – radiace, **S** – kouřotěsnost, **M** – mechanická odolnost aj. [5]).

Při posuzování požární odolnosti stavebních konstrukcí v hořícím prostoru musí být splněna podmínka:

***požadovaná požární odolnost $\leq$ zjištěná (skutečná) požární odolnost***

***Doba požadované požární odolnosti*** může být stanovena předpisy jednotlivých států (v ČR jsou požadavky na stavební konstrukce dány dobou od 15 do 180 minut, odlišně od jiných zemí). Vlastnosti (mezní stavy požární odolnosti) jsou však vymezeny jednotně a musí být prokazovány podle stejných pravidel všemi zúčastněnými zeměmi. Tato zásada umožňuje volný pohyb zboží na evropském trhu. V České republice, odlišně od jiných evropských zemí, se ve zdůvodněných případech požadavek na požární odolnost doplňuje o omezení konstrukčních částí (dílců), které mají ve své skladbě použity hořlavé výrobky a tyto mohou ovlivnit stabilitu a únosnost dílců a/nebo přispívat k intenzitě požáru hořícího prostoru.

***Požární odolnost konstrukcí*** se smí ověřit:

a) zkouškou,
b) normovou hodnotou, popř. výpočtem,
c) zkouškou a výpočtem.

Ověřování požární odolnosti konstrukce zkouškou se provádí v akreditovaných zkušebnách (v ČR PAVÚS Praha, a.s.) podle souboru zkušebních norem ČSN EN anebo podle zkušebních předpisů platných v ČR dočasně, pouze do doby vydání příslušné evropské zkušební normy.

Normové (tabulkové) hodnoty jsou sestaveny na základě zkoušek, rozšířených aplikací anebo výpočtů a lze je najít na internetových stránkách PAVÚSu, a.s., v podkladech výrobců nebo dovozců konstrukcí, popř. v ČSN a ČSN EN (ČSN 73 0821 ed.2 [6], ČSN 73 0834 [7], Eurokódy 2 až 6).

Ověření požární odolnosti výpočtem může být provedeno [1], [2]:

podle *času*:

$$t_{\mathrm{fi,d}} \geq t_{\mathrm{fi,requ}} \qquad (1)$$

podle únosnosti:

$$R_{\mathrm{fi,d,t}} \geq E_{\mathrm{fi,d,t}} \qquad (2)$$

nebo podle *teploty*:

$$\theta_{\mathrm{d}} \leq \theta_{\mathrm{cr,d}} \qquad (3)$$

V podmínkách spolehlivosti (1) až (3) značí:

$t_{\mathrm{fi,d}}$ návrhovou hodnotu normové požární odolnosti,
$t_{\mathrm{fi,requ}}$ požadovanou hodnotu normové požární odolnosti,
$R_{\mathrm{fi,d,}}$ návrhovou hodnotu únosnosti při požárním namáhání,
$E_{\mathrm{fi,d,t}}$ návrhovou hodnotu účinku zatížení při požárním namáhání,
$\theta_{\mathrm{d}}$ návrhovou hodnotu teploty materiálu při požáru,
$\theta_{\mathrm{cr,d}}$ návrhovou hodnotu kritické teploty materiálu při požáru.

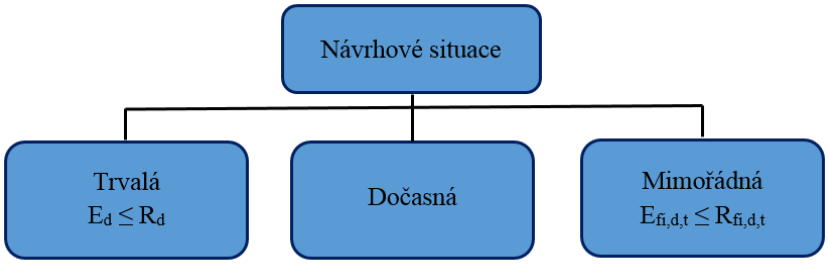
Požadovaná požární odolnost $t_{fi,requ}$ je schopnost konstrukce, její části nebo prvku plnit požadované funkce při daném účinku požáru a po předepsanou dobu.

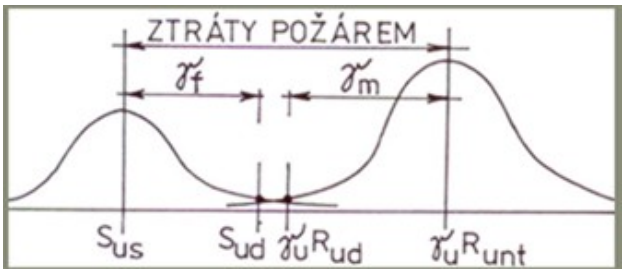
*Požární úseky* v objektu musí být navrženy tak, aby se požár nemohl šířit do dalších okolních požárních úseků. Požadovaná požární odolnost se vztahuje vždy k podmínkám v daném požárním úseku a má přitom splňovat podmínky *plně rozvinutého požáru*.

Situace *po požáru*, tj. pro fázi ochlazování se zpravidla neposuzují. Provádí-li se návrh konstrukce na předepsanou dobu požární odolnosti, není třeba posuzovat konstrukci pro dobu delší.

***Porovnání experimentálních a výpočtových metod***

Z porovnání metod použitelných k prokazování požární odolnosti stavebních konstrukcí vyplývají jejich přednosti a nedostatky [1] [2].




Obr. 1 – Návrhové situace a porovnání silových účinků zatížení a únosnosti konstrukce při požáru - upraveno z [3]

Experimentální určení požární odolnosti stavebních konstrukcí je dnes ucelenou metodou vyznačující se řadou pozitivních znaků:

1. časový vývoj teploty plynů v hořícím prostoru probíhá podle předepsaných závislostí;
2. materiál zkušebních vzorků má reálné fyzikálně mechanické vlastnosti a vykazuje tudíž i reálný nestacionární vývoj vnitřních teplot;
3. ve zkušebním vzorku je vyvolán účinek skutečných zatížení, který se sčítá, podle způsobu podepření, s účinky teplotního zatížení;
4. pevnostní a přetvárné charakteristiky materiálu zkoušené konstrukce se mění v závislosti na okamžité teplotě tak dlouho, až dojde k dosažení některého z mezních stavů.

Experimentální metody jsou však také zatíženy řadou nepřesností, které vyplynou ze srovnání s početními metodami:

1. udržení smluvních teplot ve zkušební peci je obtížně dosažitelné a nemůže svou přesností konkurovat matematickému vyjádření okrajové podmínky při řešení Fourierovy parciální diferenciální rovnice vedení tepla;
2. vývoj vnitřních teplot ve zkušebním vzorku je značně závislý na jeho vlhkosti a počáteční teplotě; dosažení požadovaného stavu oddaluje a komplikuje provedení zkoušky. Početní vyjádření vývoje teplot v konstrukci je možné a zároveň jednodušší;
3. obtížná je i realizace skutečného podepření vzorku (vetknutí nebo částečné vetknutí) vyjma nejjednoduššího případu prostého podepření. Početní metody neznají problém měřítka, vyjádření nejrozmanitějších způsobů zatížení a podepření;

4. náklady spojené s výrobou vzorků předepsaných velikostí (neodpovídají většinou skutečným rozměrům konstrukce), s jejich přepravou do zkušebny a náklady na samotnou přípravu a provedení zkoušky jsou vysoké;
5. výpočetní metody umožňují volit různé požární scénáře, přesněji lze simulovat zatížení a uložení konstrukce (prosté uložení, vetknutí), lze uvážit spolupůsobení prvků konstrukce, předností je rychlost posouzení, omezení nároků na dopravu prvků do zkušebny a celkově nižší náklady.

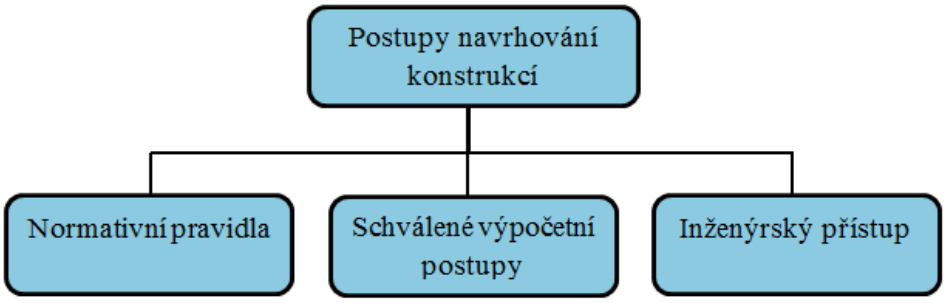
Přesto si i v budoucnu podrží experimentální metody své nezastupitelné místo v případech, kdy ostatní metody nebudou ještě dostatečně spolehlivé a pro systematickou a namátkovou kontrolu výpočetních metod. Výpočetními metodami se dosud obtížně prokazuje spolehlivost spojů a styků.

Tabulkové hodnoty budou mít pro projektovou praxi nadále velký význam, protože umožňují rychlé ověření požární odolnosti navržené konstrukce.

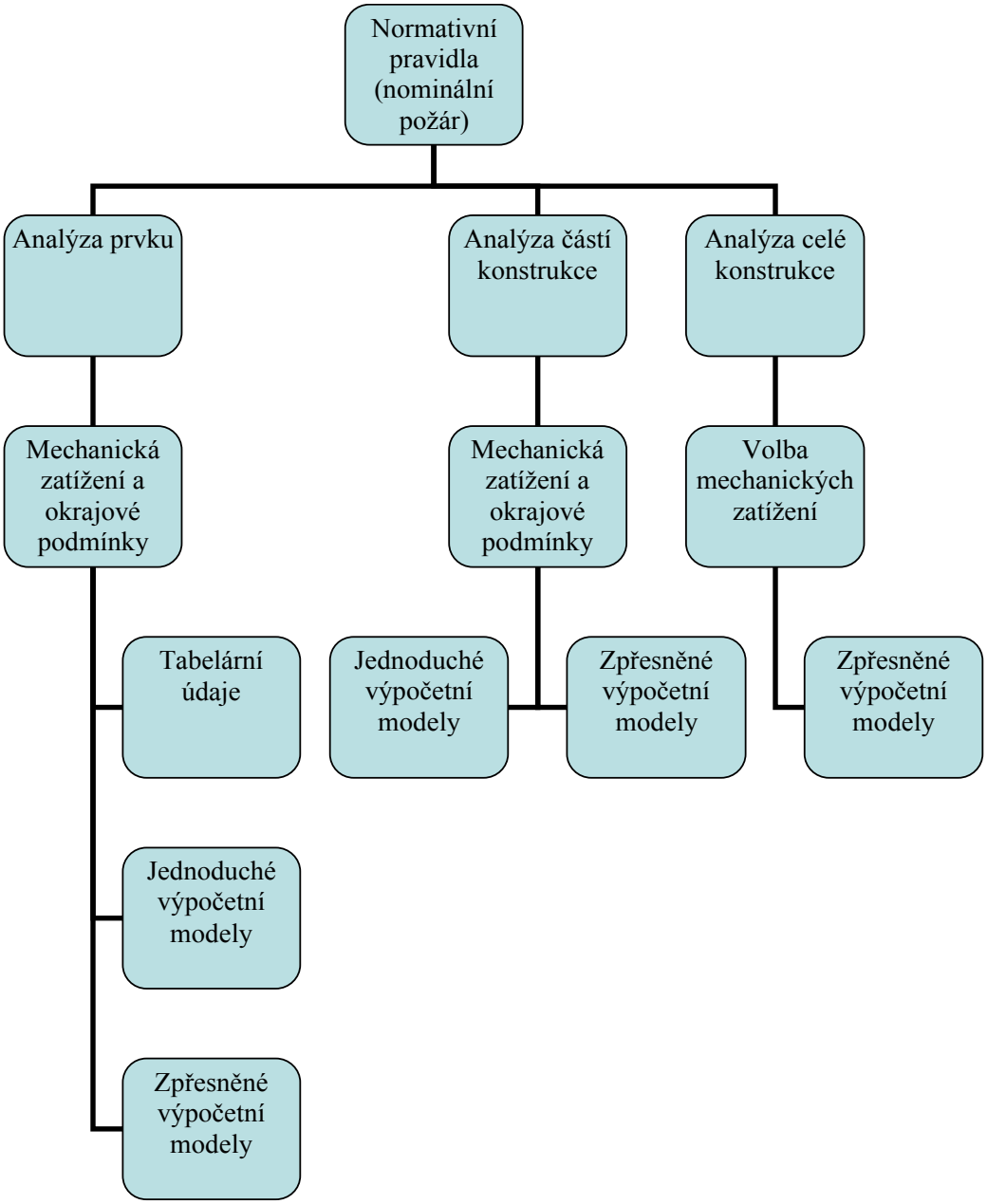
Soubor Eurokódů, tj. soubor normativních dokumentů pro konstrukční navrhování pozemních a inženýrských staveb, jehož hlavním cílem je sjednotit výpočtové metody a usnadnit volný obchod s dodávkami stavebních prací v rámci Evropské unie, legalizoval výpočetní postupy pro prokazování požární odolnosti stavebních konstrukcí v mezinárodním měřítku. Efektivní způsob určování požární odolnosti výpočtem lze použít, pokud je možno matematicky formulovat všechny vstupní údaje.

## *1.3 Alternativní přístupy navrhování konstrukcí na účinky požáru*

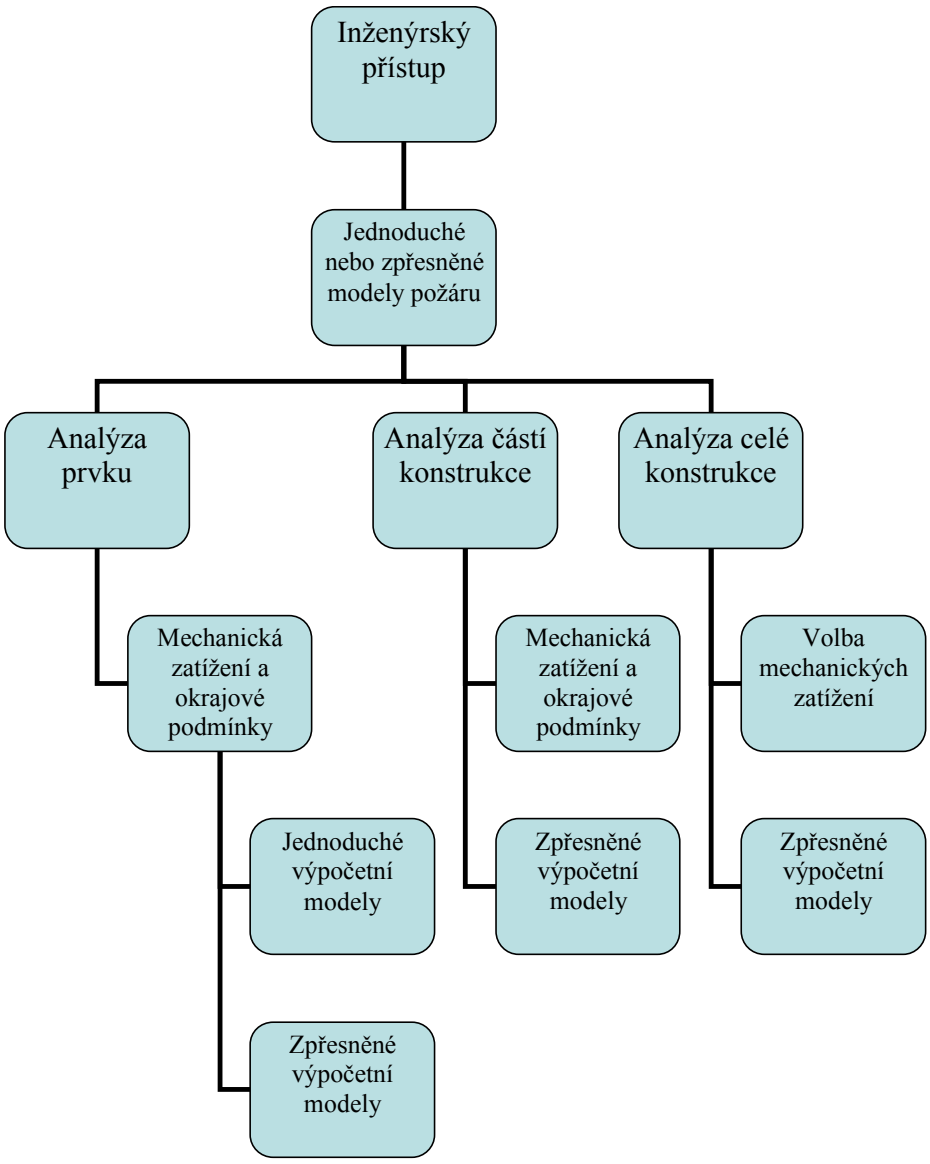
Při posuzování konstrukcí na účinky požáru se umožňuje použít alternativní přístupy – normativní pravidla, schválený výpočetní postup a inženýrský přístup [1] [2].




Obr. 2 - Alternativní postupy navrhování konstrukcí




Obr. 3 - Navrhování konstrukcí normativními pravidly




Obr. 4 - Inženýrský přístup pro navrhování konstrukcí

### 1.3.1 Stanovení požadavků na požární odolnost konstrukcí v ČR:

- *Normativní přístup* používaný v ČR vychází z tzv. stupně požární bezpečnosti. Předpokládá se teplota požáru podle normové teplotní křivky a přihlíží se ke konstrukčnímu systému objektu (nehořlavý, smíšený, hořlavý), výšce budovy a požárnímu riziku posuzovaného požárního úseku.
- *Schválený výpočtový přístup* předpokládá při určení požadavků na požární odolnost konstrukcí teplotu požáru odlišnou od normové teplotní křivky (podle doby trvání pravděpodobného požáru a podmínek odvětrání) a přihlíží ke konstrukčnímu systému objektu (nehořlavý, smíšený, hořlavý), podlažnosti budovy a významu konstrukcí pro stabilitu celého objektu nebo jeho části a pro zachování požárně dělicí funkce konstrukcí ohraničujících požární úsek [8], [9]. Novější schválený

výpočtový přístup je reprezentován postupy předepsanými souborem Eurokódů 2 (viz též [2], [10], [11]).

- Stanovení požadavků na odolnost konstrukce při *inženýrském přístupu* může zahrnout více vlivů, např. modelový scénář požáru a jeho účinky na konstrukci [12], význam konstrukce vzhledem k provozu, významu, velikosti objektu, jeho situování a posouzení rizika zřícení ve vztahu k osobám, majetku a životnímu prostředí. Tento přístup pro stanovení požadavků na požární odolnost stavebních konstrukcí není dosud v ČR blíže propracován.

### 1.3.2 Společné zásady navrhování stavebních konstrukcí na účinky požáru

Navrhování betonových, ocelových, ocelobetonových, dřevěných a zděných nosných konstrukcí na účinky požáru se řídí některými společnými zásadami [1], [2].

*Požadavky na chování* konstrukcí se vyjadřují v Eurokódech pomocí *kritérií* R (mechanické odolnosti), E (celistvosti) a I (izolační schopnosti), která odpovídají obsahem shodně označeným *mezním stavům* převzatým do ČSN 73 0810 [5]. V Eurokódech se kritérium izolační schopnosti I považuje za splněné v případech, kdy se průměrná teplota na odvráceném povrchu nezvýší za dobu ohřívání podle normové teplotní křivky požáru o více než 140 K a nejvyšší teplota na tomto povrchu se nezvýší o více než 180 K. Přitom lze požadovat od stavebních konstrukcí funkci pouze dělicí (musí vyhovět kritériím E a I) nebo pouze nosnou (kritérium R), popř. dělicí i nosnou (kritéria R, E a I).

*Tepelná a mechanická zatížení* při navrhování na účinky požáru se uváží podle zásad rozvedených dále.

*Návrhové hodnoty tepelných a mechanických vlastností materiálu* pro podmínky spolehlivosti (1) až (3) a pro mimořádnou návrhovou situaci při požáru jsou ovlivněny uvedenou malou pravděpodobností působení požáru na prvky s extrémně nízkou pevností. Návrhové hodnoty tepelných a mechanických vlastností materiálu $X_{d,fi}$ jsou definovány v požárních částech Eurokódů pro jednotlivé druhy konstrukcí takto:

- tepelné vlastnosti pro návrh s uvážením teploty:

je-li zvýšení hodnoty vlastnosti pro bezpečnost příznivé:

$$X_{d,fi} = X_k(\theta)/\gamma_{M,fi}\,, \qquad (4)$$

je-li zvýšení hodnoty vlastnosti pro bezpečnost nepříznivé:

$$X_{d,fi} = X_k(\theta).\gamma_{M,fi}\,, \qquad (5)$$

- pevnostní a přetvárné vlastnosti pro výpočet konstrukce:

$$X_{d,fi} = k(\theta).X_k(\theta)/\gamma_{M,fi}\,, \qquad (6)$$

kde $X_k(\theta)$ je charakteristická hodnota vlastnosti materiálu při návrhu pro požární situaci, obecně závislá na teplotě materiálu,

$X_k$ charakteristická hodnota pevnostní nebo přetvárné vlastnosti materiálu (např. u železobetonových konstrukcí $f_{ck}$ a $f_{yk}$ ) při návrhu pro běžnou teplotu,

$k(\theta) = X_k(\theta)/X_k$ redukční součinitel určující pevnostní nebo přetvárnou vlastnost v závislosti na teplotě materiálu $\theta$.

Nejdůležitější pro navrhování je přitom doporučení zavádět součinitel spolehlivosti materiálu pro teplotní a mechanické vlastnosti betonu a výztuže při návrhu pro požární situaci hodnotou $\gamma_{M,fi}$ = 1,0.

*Způsoby posuzování konstrukcí* pro návrhovou situaci při požáru se připouštějí tři:

- návrh celé konstrukce (globální výpočet),
- návrh částí konstrukce,
- návrh prvků konstrukce.

*Návrh celé konstrukce* představuje nejobecnější výpočetní model konstrukce a musí vyjadřovat očekávané chování konstrukce při požáru, odpovídající způsob selhání při požáru, vlastnosti materiálu závislé na teplotě včetně tuhosti a účinky teplotní roztažnosti a přetvoření (nepřímé požární zatížení). Při globálním výpočtu konstrukce musí být splněna podmínka spolehlivosti (2) pro libovolný okamžik *t* trvání plně rozvinutého požáru. Pro výpočet celé konstrukce se má používat obecná (zpřesněná) metoda výpočtu, založená na modelech dovolujících uvážit vzrůst teploty v konstrukci a mechanické chování konstrukce.

*Návrh částí konstrukce* se provádí jako alternativa ke globálnímu výpočtu konstrukce, kdy postačuje provést dostatečně výstižný výpočet pro přiměřenou část konstrukce. Tyto části konstrukce mají být vytvářeny s přihlédnutím k předpokládanému teplotnímu protažení a přetvoření tak, aby jejich interakce s ostatními částmi konstrukce mohla být v průběhu požáru aproximována časově závislým podepřením a okrajovými podmínkami. Účinky stálých a nahodilých zatížení v podporách a na okrajích smí být uváženy po dobu trvání požáru jako neproměnné. Pro aproximaci chování při globálním výpočtu konstrukce pro $t$ = 0 lze získat účinky (stálých a nahodilých) zatížení v podporách a na okrajích z výpočtu při běžné teplotě. Kromě obecné metody lze použít pro výpočet částí konstrukce i jednoduchou metodu.

*Návrh prvků* je nejjednodušší alternativou výpočtu celé konstrukce nebo její části. Pro posuzování prvků při požáru jsou vhodné buď tabulkové hodnoty, nebo obecná, popř. jednoduchá metoda. Při výpočtu prvků není třeba uvažovat účinek jejich tepelného protažení, pokud nejde o účinek nerovnoměrného rozdělení teplot po průřezu. Způsob podepření a okrajové podmínky prvků mohou být vyjádřeny jako při návrhu na běžnou teplotu. Návrh prvků je vhodný zejména pro ověřování požadavků na normovou požární odolnost.

Alternativně k výpočtovým metodám lze vycházet při požárním návrhu z výsledků zkoušek. Výhodnou se může ukázat i kombinace výsledků zkoušek a výpočtů.

### 1.3.3 Obecná metoda výpočtu

Nejuniverzálnější obecná metoda výpočtu [1], [2] smí být použita u prvků, částí konstrukce nebo celých konstrukcí a pro libovolný tvar průřezu. Má poskytnout realistické hodnocení konstrukce vystavené účinku požáru tím, že se opírá o fyzikální metody umožňující spolehlivou aproximaci očekávaného chování konstrukce, jejích částí nebo prvků za požáru.

Součástí obecné metody výpočtu mohou být zvláštní submodely pro stanovení:

a) vývoje a rozdělení teploty uvnitř prvků konstrukce – model teplotní odezvy,
b) mechanického chování konstrukce nebo její části – model mechanické odezvy.

Možné způsoby porušení, které nejsou popsány obecnou metodou výpočtu, je třeba vyloučit vhodným konstrukčním uspořádáním. Zde může jít např. o nedostatečnou schopnost přetvoření, lokální vybočení, smykové poruchy apod. U obecné metody výpočtu lze použít kteroukoli teplotní křivku požáru uvedenou v předchozí části za předpokladu, že jsou známy vlastnosti materiálu v odpovídajícím rozmezí teplot.

*Výpočet teplotní odezvy* se má v obecné metodě opírat o ověřené předpoklady a zákonitosti teorie přenosu tepla. Model teplotní odezvy má respektovat:

a) tepelné zatížení pojaté podle pravidel uvedených dříve,
b) teplotně závislé vlastnosti materiálů uvedené v části 3,
c) účinek případných požárně ochranných vrstev.

*Výpočet mechanické odezvy* má vycházet v obecné metodě z ověřených zásad a předpokladů stavební mechaniky, přičemž se uváží závislost mechanických vlastností materiálů na teplotě. Přetvoření v mezním stavu únosnosti uvažované ve výpočtu má být omezeno natolik, aby byla zajištěna kompatibilita všech částí konstrukce. Model mechanické odezvy má podle potřeby vyjádřit vliv geometrické nelinearity. Nelze opomenout ani účinek vynucených teplotních přetvoření a napětí od rovnoměrného nebo nerovnoměrného oteplení. Při praktických výpočtech je dovoleno u staticky neurčitých konstrukcí uvážit přetvoření a nepřímá zatížení při požáru prostřednictvím vynucených přetvoření (střední osové protažení a zakřivení). Únosnost konstrukce, jejích částí a prvků se hodnotí v podmínkách požáru s přihlédnutím ke skutečnému chování materiálu, např. plasticitě. Při odděleném výpočtu prvků nebo částí konstrukce je třeba uvážit okrajové podmínky a konstrukci uspořádat způsobem, který vyloučí poruchy způsobené ztrátou předpokládaného podepření prvku.

*Platnost obecných metod výpočtu* lze ověřovat následujícími postupy:

a) oprávněnost návrhových předpokladů má být ověřována na základě výsledků vhodných zkoušek;
b) ověří se citlivost metody na vliv kritických parametrů výpočtu [1], [2].

### 1.3.4 Jednoduché metody výpočtu

Jak vyplývá z uvedeného popisu, sestává obecná metoda výpočtu z definovaných a známých výpočetních kroků, jejichž použití však naráží u konstrukčních soustav a prvků obecného tvaru na praktické obtíže jak při výpočtu nestacionárních teplotních polí, tak při navazujícím výpočtu vnitřních sil a příslušných mezních stavů. Proto se při návrhu na účinky požáru nejprve používá ověřených kritérií, vycházejících z jednoduchých tvarových ukazatelů a tabulkových hodnot v návaznosti na výsledky zkoušek požární odolnosti.

Toto zjednodušené posuzování obvykle skrývá významné rezervy spolehlivosti. Pokud přitom konstrukce vyhoví pro předepsanou požární odolnost, další posuzování odpadá. Je-li odstup mezi tabulkovou a požadovanou požární odolností velký, je lépe se ihned rozhodnout pro její radikální zvýšení (záměnou prvku nebo jeho materiálu, zvětšením rozměrů průřezu, použitím povrchových ochranných vrstev apod.). Při menším rozdílu mezi požadovanou a tabulkovou požární odolností se vyzkouší před použitím obecné metody výpočtu některé z přípustných zjednodušení, která nabízejí příslušné Eurokódy.

Zjednodušení se mohou týkat např. vyšetřování *vývoje teplot* v konstrukci při požáru, kdy lze použít buď grafů teplotních profilů, nebo předpokladu rovnoměrného rozložení teploty v průřezu (dosažení tzv. *kritické teploty* materiálu). Místo obecné podmínky spolehlivosti lze ověřovat požadavek na zachování nosné funkce prvku po dobu trvání požáru *t* zjednodušenými podmínkami spolehlivosti. Za zjednodušenou metodu výpočtu lze považovat i přepočet tabulkových hodnot požární odolnosti nebo hodnot určených zkouškou při známém stupni statického využití pro odlišný (požadovaný) stupeň statického využití [1], [2].

### 1.3.5 Interface požárních a stavebních specialistů

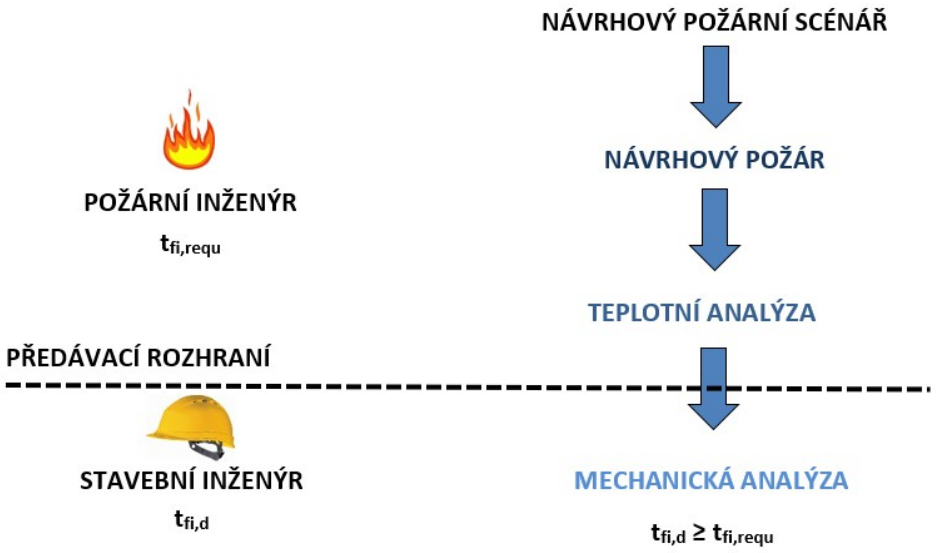
Při návrhu konstrukcí na požár dochází – obdobně jako u řady jiných inženýrských úloh – k prolínání profesí požární ochrany a stavebních oborů. Návaznost a spolupráce specialistů obou směrů umožňuje precizovat postupy požárního inženýrství s využitím hlubších znalostí jednotlivých profesí. V oblasti navrhování konstrukcí na účinky požáru je výhodné, aby požární specialista zadával požadavky na požární odolnost konstrukcí významných staveb s přihlédnutím k požárnímu riziku a možným následkům porušení staveb, např. s využitím metod analýzy rizik. Pro posouzení požární odolnosti konstrukcí konkrétní stavby požární specialista zvolí návrhový požární scénář, pro návrhový požár určí průběh teplot v hořícím prostoru a navazující prostup tepla požárně dělicími, případně obalovými konstrukcemi staveb (obvodovými a střešními plášti). Vzrůst teploty hořícího prostoru představuje přímé zatížení konstrukcí požárem. V rámci teplotní analýzy budou hodnoceny tepelně technické vlastnosti stavebních výrobků a materiálů závislé na okamžité teplotě konstrukce, které mohou být známy anebo se ověří experimentálními metodami. Požární specialista může na základě výpočtu teploty v konstrukci ověřit mezní stav izolace I a/nebo hustoty tepelného toku W, u dřevěných konstrukcí i mezní stav celistvosti E. K dosažení mezního stavu celistvosti E u nosných monolitických železobetonových konstrukcí, ocelových konstrukcí,

spřažených ocelobetonových konstrukcí a zděných konstrukcí dochází až po překročení mezních stavů R. U montovaných železobetonových konstrukcí se celistvost v místě spár odvozuje z chování při zkoušce.

Kromě přímého zatížení požárem se na konstrukci může projevit i *nepřímé zatížení,* které se projevuje *teplotním protažením, tepelným přetvořením* nebo *nerovnoměrným rozdělením teploty* po průřezu prvku.

Na teplotní analýzu navazuje mechanická analýza, která je doménou spíše stavebních inženýrů, především při hodnocení požární odolnosti podle kritérií mezního stavu únosnosti R. Stavební inženýr určí mechanická zatížení konstrukcí při požáru a okrajové podmínky, odezvu konstrukce a prokáže únosnost konstrukce podle rovnice (2) se zohledněním změny mechanických vlastností materiálů v závislosti na teplotě.

Vždy je možno uvažovat s přesahem kompetencí obou profesí přes předávací rozhraní podle podmínek dané stavby a složení týmu řešitelů.




Obr. 5 - Interface (předávací rozhraní) mezi inženýrem v oboru požární bezpečnosti staveb a stavebním inženýrem – upraveno z [3]

# 2 Tepelné podmínky hořícího prostoru, tepelné zatížení, kombinace zatížení

## *2.1 Přímé tepelné zatížení*

Při navrhování stavebních konstrukcí z požárního hlediska se uvažuje tepelné zatížení při požáru ve formě [1], [2]:

1) *nominálních teplotních křivek* požáru, vyjádřené konvenčními křivkami užívanými ke klasifikaci nebo ověřování požární odolnosti; k nim lze řadit:
   a) *normovou teplotní křivku* tzv. celulózového typu - viz rov. 7, na kterou jsou konstrukce navrhovány pro předepsanou dobu při použití tabulkových údajů nebo výpočetních modelů;

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \tag{7}$$

kde $\Theta_g$ je průměrná teplota v peci (°C);
$t$ čas (min).

   b) *teplotní křivky vnějšího požáru* ve tvaru pro posuzování objektu nebo jeho části, pokud se nachází v požárně nebezpečném prostoru jiného objektu nebo u požárních pásů:

$$\Theta_g = 20 + 660\,(1 - 0{,}687e^{-0{,}32t} - 0{,}313e^{-0{,}38t}) \tag{8}$$

kde $\Theta_g$ je teplota plynů v okolí prvku (°C),
$t$ čas (min).

   c) *uhlovodíkové teplotní křivku* danou rovnicí pro požáry, jejichž charakter je ovlivněn povrchem hořícího paliva (např. hoření kapaliny v nádržích a záchytných jímkách):

$$\Theta_g = 20 + 1080\,(1 - 0{,}325e^{-0{,}167t} - 0{,}675e^{-2{,}5t}), \tag{9}$$

kde $\Theta_g$ je teplota plynů v požárním úseku (°C),
$t$ čas (min).

   d) *křivky pomalého zahřívání* definovanou následujícím vztahem:

pro $0 < t \leq 21$

$$\Theta_g = 20 + 154\sqrt[4]{t} \tag{10}$$

pro $t > 21$

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8(t - 20) + 1), \tag{11}$$

kde $t$ je doba od začátku zkoušky (min);
$\Theta_g$ průměrná požadovaná teplota v peci (°C).

2) parametrické teplotní křivky, určené na základě požárních modelů a fyzikálních parametrů popisujících teplotní podmínky v požárním úseku.

$$\Theta_g = 1325\left(1 - 0{,}324e^{-0{,}2t^*} - 0{,}204e^{-1{,}7t^*} - 0{,}472e^{-19t^*}\right) + 20 \qquad (12)$$

kde $\Theta_g$ je teplota plynů v požárním úseku (°C),

$t^*$ $t^* = t.\Gamma$ (hod),

$t$ čas (hod),

$\Gamma$ $\Gamma = (O/b)^2 / (0{,}04/1160)^2$,

$b = \sqrt{\rho.c.\lambda}$ v intervalu $100 \leq b \leq 2200$ ($J.m^{-2}.s^{-0,5}.K^{-1}$),

$O$ parametr odvětrání $O = A_v\sqrt{h} / A_t$ s omezením $0{,}02 \leq O \leq 0{,}20$ [$m^{0,5}$],

$A_v$ plocha svislých otvorů ($m^2$),

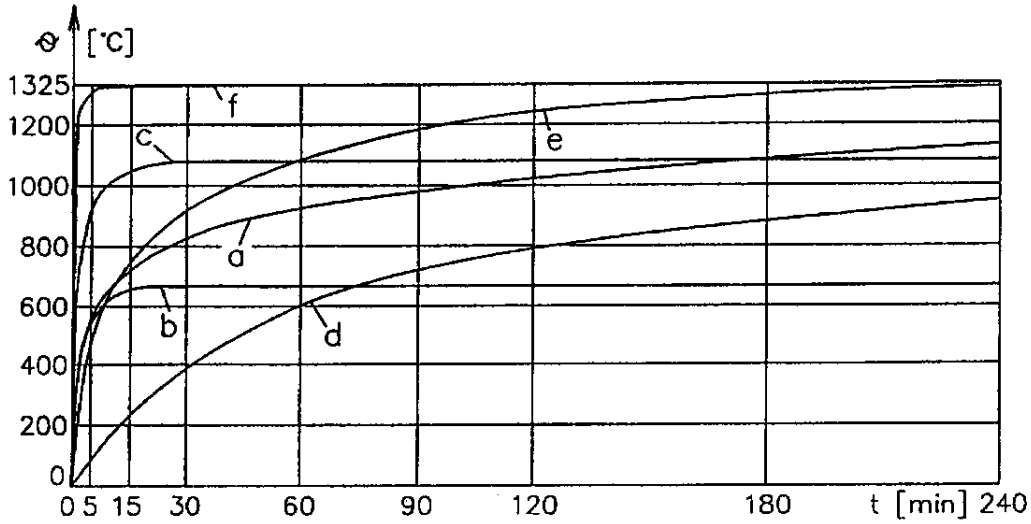
$H$ výška svislých otvorů (m),

$A_t$ celá plocha ohraničujících konstrukcí (zdi, stropy a podlahy včetně otvorů) ($m^2$),

$\rho$ objemová hmotnost povrchové vrstvy ohraničujících konstrukcí ($kg.m^{-3}$),

$c$ měrné teplo povrchové vrstvy ohraničujících konstrukcí ($J.kg^{-1}.K^{-1}$),

$\lambda$ tepelná vodivost povrchové vrstvy ohraničujících konstrukcí ($W.m^{-1}.K^{-1}$).




Obrázek 6 - Teplotní křivky požáru
a – normová podle vztahu (7), b – vnějšího požáru z rovnice (8),
c – uhlovodíková z rovnice (9),
z parametrické rovnice (12) křivky:
d – *při O* = 0,2; *b* = 2000, e – *při O* = 0,04; *b* = 1500, f – *při O* = 0,2; *b* = 1000 [1], [2]

## 2.2 Tepelné zatížení a kombinace zatížení při požáru

Jak již bylo řečeno, patří zatížení konstrukcí požárem mezi mimořádná zatížení stavebních konstrukcí a vznik požáru, který bývá zdrojem vážných škod na konstrukci, se považuje za mimořádnou situaci. Tato zásada se uplatní při výpočtu zatížení a jejich kombinací.

Od dříve uvedeného *přímého zatížení* účinkem požáru (projevujícího se vzrůstem teploty hořících plynů) se odlišuje *nepřímé zatížení* požárem, které se projevuje *teplotním protažením, tepelným přetvořením* nebo *nerovnoměrným rozdělením teploty* po průřezu prvku. Tato nepřímá teplotní zatížení mohou být v závislosti na způsobu podepření a upnutí prvku zdrojem vnitřních sil, popř. účinků druhého řádu (např. při teplotním přetvoření tlačených prvků). V odůvodněných případech mohou být účinky nepřímých teplotních zatížení zanedbány, zejména pokud působí na spolehlivost prvku příznivě. Podrobnější posouzení zpravidla vyžadují:

- účinky *teplotního protažení* prvků staticky neurčitých spojitých nebo rámových konstrukcí, zejména uvnitř a vně požárního úseku (např. sloupů a ztužujících stěn, spojitých desek nebo trámů),
- napětí od *teplotních gradientů* v průřezu nosných prvků.

Návrhové hodnoty nepřímých teplotních zatížení $A_{d,ind}$ se stanoví na základě návrhových tepelně technických a mechanických vlastností materiálů.

Zatížení stavebních konstrukcí při mimořádné návrhové situaci za požáru je věnován Eurókod 1 – Část 1-2 [4].

Pro *kombinaci zatížení* při mimořádné návrhové situaci za požáru se vychází ze zatížení, působících při trvalé nebo dočasné návrhové situaci (při běžné teplotě ovzduší). Je nesporné, že požár je zatížení s velmi nízkou pravděpodobností výskytu (jako typické nehodové zatížení se během životnosti konstrukce obvykle nevyskytne vůbec). Z hlediska katastrofálních důsledků pro zdraví, život a majetek uživatelů objektu je však nezbytné s jeho výskytem počítat. Proto se pro případ požáru kladou omezené požadavky na chování nosných konstrukcí.

Předností metody navrhování podle mezních stavů je možnost vyjádřit uvedenou nízkou pravděpodobnost vzniku požáru především ve snížené pravděpodobnosti současného výskytu nahodilých zatížení vůbec nebo alespoň jejich extrémních hodnot.

Se zmenšením stálých zatížení vlivem jejich odhoření se však zpravidla neuvažuje. Chybou by bylo snižovat při požáru užitné zatížení na chodbách a schodištích, které bývají jako únikové cesty naopak přetíženy.

Odůvodněných úlev lze dosáhnout i na levých stranách podmínek spolehlivosti (1) nebo (2), protože pravděpodobnost, že budou extrémním účinkem požáru zasaženy části konstrukce s extrémně sníženou únosností, je rovněž nízká. [1], [2].

## Použitá literatura


[1] Bradáčová, I.: *Požární bezpečnost staveb. Nevýrobní objekty (2. aktualizované vydání)*, s. 228. SPBI Ostrava 2010. ISBN 978-80-86-111-77-3.

[2] Bradáčová, I a kol.: *Stavby a jejich požární bezpečnost*. ČKAIT a ČSSI, s. 263. Praha 1999. ISBN 80-902697-2-9.

[3] Bradáčová, I.: *Developments in fire resistance computations with respect to wooden structures*. Sborník příspěvků The 1st Inernational Scientific Konference Lafeta Engeniring 2006. VŠB TU Ostrava , 17. 19. October 2006, s.11-22, ISBN 80-248-1185-5, ISNN 1801-1764.

[4] ČSN EN 1991-1-2 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*.: 8/2004, Opr.1: 12/2006 + Opr.2: 2/2010 +Opr.3: 5/2013 + NA edA: 5/2013

[5] ČSN 73 0810 *Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení*.: 4/2009 + Z1: 5/2012 + Z2: 2/2013 + Z3: 6/2013

[6] ČSN 73 0821 ed.2 *Požární bezpečnost staveb – Požární odolnost stavebních konstrukcí*.: 5/2007

[7] ČSN 73 0834 *Požární bezpečnost staveb – Změny staveb*.: 3/2011 + Z1: 7/2011 + Z2: 2/2013

[8] ČSN 73 0804 *Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty*.: 2/2010 + Z1: 2/2013

[9] Reichel, V. *Navrhování požární bezpečnosti výrobních objektů,* část IV. Zabraňujeme škodám, svazek č. 17. ČSP, Praha 1987

[10] Wald, F. a kol.: *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*, s. 336. ČVUT Praha 2005. ISBN 80-01-03157-8.

[11] Kučera, P., Česelská, T., Matečková, P.: *Požární odolnost stavebních konstrukcí*, s. 176. SPBI Ostrava 2010. ISBN 978-80-7385-094-4.

[12] Kučera P., Kaiser, R., Pavlík, T., Pokorný, J.: *Metodický postup při odlišném způsobu splnění technických podmínek požární ochrany,* s. 201. SPBI Ostrava 2008. ISBN 978-80-7385-044-9.