

# ČÁST 1: Tepelná a mechanická zatížení

O. Vassart, L.G. Cajot & M. Brasseur

*ArcelorMittal, Esch/Alzette, Grand-Duchy of Luxembourg*

M. Strejček

*České vysoké učení technické v Praze, Česká republika*

SHRNUTÍ: Předkládaný článek seznamuje s poznatky o požárním návrhu konstrukcí, které byly získány dlouhodobými výzkumnými projekty ECSC v uplynulých 25 letech, a uplatnit je tak v praxi. Cílem je předat znalosti do dalších států v národních jazycích. Část první popisuje současné možnosti stanovení tepelotního zatížení, která byly uplatněny v návrhových normách.

## 1 ÚVOD

Vysoký počet požárů velkého rozsahu v 60. letech minulého století, jako například požár v obchodním centru “Innovation” v Bruselu, který zanechal více než 300 mrtvých nebo požár diskotéky ‘Le cinq Sept’ v Saint-Laurent-du-Pont ve Francii, vedl k zavedení mnoha nových předpisů v celé Evropě. Současně platné předpisy se zabývají:

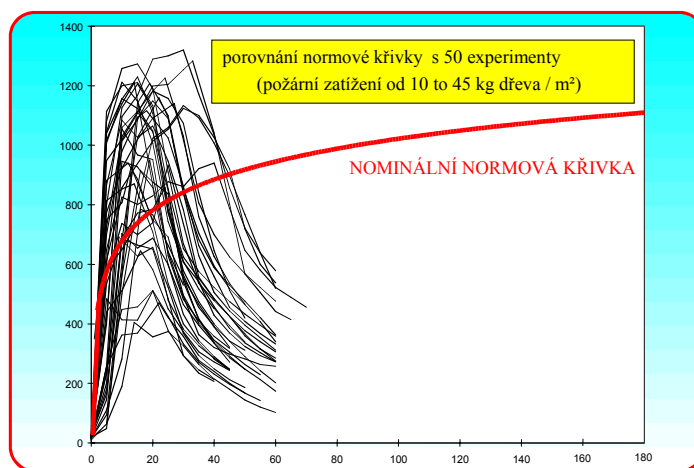
- možnostmi úniku osob,
- šířením požáru: požární odolností materiálů a jejich reakcí na oheň,
- klasifikací konstrukcí podle požární odolnosti do tříd R15, 30, 60, 90 nebo 120,
- systémy ventilací pro odvod kouře a tepla,
- aktivní požární ochranou: například ručními hasicími přístroji, detektory kouře, sprinklery,
- možnostmi přístupu požárních jednotek.

Obecné pojmy a zásady požární bezpečnosti staveb jsou shodné v celé Evropě, přesto se požadavky v jednotlivých státech liší. Podrobnosti jsou shrnuty v projektu NFSC1 [11], který byl aktualizován výsledky projektu “Risk Based Fire Requirements” [18]. Například požadovaná požární odolnost konstrukcí jednopodlažních budov ve Španělsku činí až R120, zatímco Švýcarské normy nepožadují žádnou požární odolnost [18]. Pro středně vysoké kancelářské budovy v Nizozemsku je požadovaná požární odolnost konstrukcí R60, ve Francii R120. Hlavní charakteristiky určující požadavky jsou: výška budovy, účel budovy, druh provozu a počet osob užívajících budovu. Požadavky na požární odolnost by měly být založeny na parametrech, které ovlivňují vznik a vývoj požáru. Tyto parametry zahrnují:

- požár, tj. pravděpodobnost vzniku požáru, šíření požáru, délka požáru, požární zatížení, charakter požáru...,
- podmínky ventilace,
- charakteristiky požárního úseku, tj. typ, velikost, geometrie,
- typem konstrukčních prvků,
- podmínkami evakuace,

- možnosti zásahu požárních jednotek a jejich bezpečností,
- riziko šíření ohně na sousední budovy,
- vliv aktivní požární ochrany.

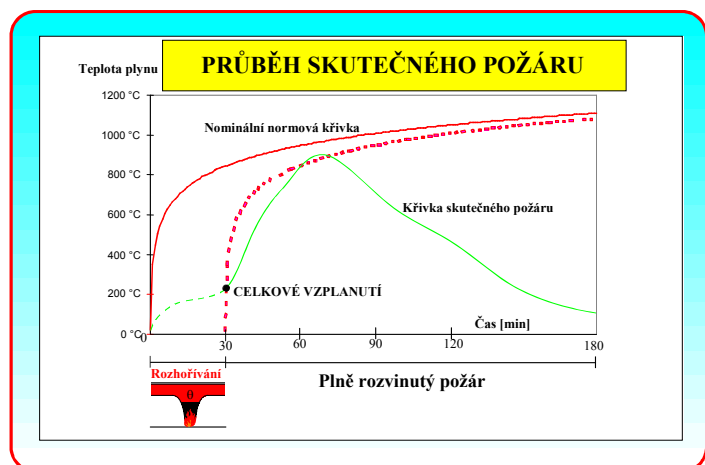
Existující předpisy obvykle neuvažují s vlivem sprinklerů při hašení požáru. Požadavky na požární bezpečnost staveb nerozlišují, kromě několika případů, rozdíly při požárním návrhu přítomnost či nepřítomnosti sprinklerů, viz [11, 18]. Ve výzkumných projektech ECSC, které se zabývají požární bezpečností staveb [11, 12, 13, 18], byla vyvinuta pokročilá metodika návrhu, která uvažuje veškeré faktory ovlivňující požár v budově, včetně vlivu aktivních protipožárních opatření. Tato metodika byla vyvinuta na základě statistických, pravděpodobnostně deterministických přístupů a analýz. Metoda je použitelná pro všechny konstrukční materiály a budovy. Na obr. 1.1 jsou srovnány teplotní křivky přirozeného požáru pro různé konfigurace, tj. velikost požárního úseku, požární zatížení, izolace stěn, charakteristiky hořlavosti, ... a nominální normová požární křivka.



Obr. 1.1 Teplotní křivky přirozeného a normového požáru

Z obrázku jsou zřejmé nepřesnosti při ověřování chování konstrukcí vystavených skutečnému požáru při uvažování nominální normové křivky. Některé faktory ovlivňující chování skutečného požáru, nominální normová křivka neuvažuje. Na obr. 1.2 jsou zachyceny fáze skutečného požáru, které zahrnují:

- Fázi doutnání: zapálení a doutnající požár při velmi nízkých teplotách, jehož trvání lze obtížně odhadnout. Tato fáze není zachycena na obr 1.2.
- Fázi rozvoje: rozhořívání (lokalizovaný požár), jehož trvání závisí především na charakteristikách požárního úseku. Požár setrvává lokalizovaný až do případného celkového vzplanutí;
- Okamžik celkového vzplanutí: lokalizovaný požár přechází v prostorový. Tato fáze je obecně velmi krátká.
- Fázi plně rozvinutého požáru: trvání této fáze závisí na požárním zatížení a podmínkách ventilace.
- Fázi dohořívání: pokles teplot nastává po vyhoření všech hořlavých materiálů.



Obr. 1.2 Fáze skutečného požáru

## 2 METODIKA NÁVRHU

### 2.1 Úvod

Stanovení rozvoje požáru v požárním úseku vyžaduje znalost mnoha parametrů, jejichž počet závisí na charakteristikách budovy. Základním parametrem je požární zatížení, které závisí na typu provozu v budově. Toto zatížení není konstantní v průběhu celé životnosti budovy. Rozložení požárního zatížení je definováno statisticky, stejně tak, jako mechanické zatížení při návrhu za běžné teploty (vlastní tíha, užité, vítr). Požární bezpečnost budov je určována na základě pravděpodobnostních metod. V požárně-bezpečnostních postupech je obecně stanovena mezní hodnota, při které nastane porušení konstrukce. Nové postupy vylepšují dosavadní metodiku návrhu hodnocením dalších faktorů, jako jsou např. pravděpodobnost poruchy nebo index bezpečnosti. Požadované úrovně požární bezpečnosti lze dosáhnout kombinací aktivních a pasivních opatření.

Požární odolnost lze určit metodou, která využije konstrukční návrh za běžné teploty a která navíc uvažuje návrhové požární zatížení v případě vzniku požáru a vliv aktivní požární ochrany.

Při modelování požáru je nezbytná znalost návrhového požárního zatížení. Modely požáru, pomocí kterých lze zjistit teplotu v požárním úseku, jsou popsány dále v textu.

### 2.2 Cíle požárního návrhu

Cílem návrhu je dosáhnout požadované úrovně požární bezpečnosti staveb, kterou lze stanovit na základě srovnání možných rizik, jakým je například porucha konstrukce za běžných podmínek. Normová pravděpodobnost poruchy konstrukce při běžných podmínkách je  $7,23 \cdot 10^{-5}$  za životnost budovy [10]. Platí podmínka:  $P_f$  (pravděpodobnost kolapsu)  $\leq P_t$  (normová pravděpodobnost).

V evropské normě je požár považován za nahodilé zatížení. Možnost vzniku požáru je určena především typem provozu a účelem budovy. Pro stanovení pravděpodobnosti vzniku požáru byla v evropských zemích uskutečněna řada statistických studií. Porovnání těchto studií lze nalézt v [11]. Pokud požár dosáhne ničivých rozměrů, může dojít ke kolapsu konstrukce. V tomto případě hraje důležitou úlohu aktivní požární ochrana, uživatelé budovy a zásah požární jednotky. Při správné součinnosti všech složek dojde ve většině případů k rychlému potlačení požáru. Podle statistických studií má rozhodující vliv na pravděpodobnost, že vznikne požár ničivých rozměrů, především aktivní požární opatření a zásah požárních jednotek. Návrhové požární zatížení je uvažováno na základě rozhodující pravděpodobnosti poruchy konstrukce, která závisí na součinnosti aktivní ochrany (sprinklery, aktivní hlásiče), pasivní ochrany (rozdělení budovy do požárních úseků) a zásahu požárních jednotek. Podrobný postup stanovení požární bezpečnosti je popsán v kapitole 5 této části.

## 2.3 Teplotní analýza požárního úseku

Rozlišují se tyto modely požáru:

- zjednodušené: převážně parametrické požáry
- zónové: tyto modely uvažují všechny hlavní faktory ovlivňující požár
- prostorové: pro běžné výpočty jsou příliš náročné. Používají se především pro modelování požárních úseků se složitou geometrií [19].

Jednozónový model uvažuje rovnoměrné rozdělení teplot v požárním úseku, zatímco dvouzónový proměnnou tloušťku horní vrstvy kouře s rovnoměrnou teplotou a dolní vrstvu o nižší teplotě.

Rozvoj požáru je ovlivněn rychlostí uvolňování tepla (RHR). Tato hodnota je určena velikostí požárního úseku, typem provozu v požárním úseku a časem. Ve fázi rozhořívání se jedná o požár lokalizovaný. Počátek této fáze je charakterizován rozvojem požáru, který lze popsat členem  $t^2$ . Rychlost uvolňování tepla je tak popsána parabolicky. Provozy v budovách lze rozdělit do 4 kategorií podle rychlosti rozvoje požáru: pomalý, střední, rychlý a velmi rychlý. Rychlost uvolňování tepla dosáhne maximální hodnoty ve fázi ustáleného stavu hoření, které může být řízeno palivem nebo ventilací.

Rozhodující je informace o změně RHR v čase a stanovení, zda se požár rozvine v prostorový nebo zda zůstane lokalizovaný. Pokud nenastane okamžik celkového vzplanutí, požár setrvá lokalizovaný. V tomto případě lze použít dvouzónový výpočetní model. Účinky lokalizovaného požáru lze určit dvouzónovým výpočetním modelem nebo empirickými modely vyvinutými při výzkumech pro "přirozený požár rozměrných požárních úseků" [8]. Tepelné účinky lokalizovaného požáru řeší metoda HASEMI [17], která je založena na výsledcích pořízených při experimentech. Použití obou zmíněných metod lze stanovit rozložení teplot v prostoru kolem lokalizovaného požáru.

## 2.4 Analýza konstrukce při požáru

Pro popis chování konstrukce za požární situace je třeba stanovit rozložení teplot v konstrukci a mechanická zatížení působící na konstrukci v průběhu požáru. Zjednodušené modely používané pro výpočet prvek/prvek jsou založeny na představě kritické teploty. Ke kolapsu konstrukce dojde, pokud její teplota přesáhne kritickou teplotu. Při nižších teplotách konstrukce stále plní svoji funkci. Pokročilé modely, které využívají při výpočtu metody konečných prvků, poskytují informace o vývoji deformací v průběhu požáru.

Znalost chování konstrukce za požární situace je nezbytná pro přijetí opatření, která jsou nutná k zamezení například nadměrných deformací či poškození konstrukce. Tato opatření závisí na přípustném poškození konstrukce v průběhu požáru a na provozu v budově. Například u patrových budov není v průběhu požáru přípustné jakékoliv poškození či kolaps. Podrobně budou výpočetní modely popsány v části 3.

## 2.5 Parametry potřebné pro výpočet

Pro výpočet je nezbytné znát charakteristiky budovy. Požární úsek se charakterizuje nejen geometrií, ale i tepelnými vlastnostmi dělicích konstrukcí, které jsou schopny akumulace a velkého přenosu tepla získaného z požáru, a okenními otvory, které přivádějí vzduch z okolního prostoru. Základní pravidla jsou uvedena v kapitole 3.

# 3 CHARAKTERISTIKY POŽÁRNÍHO ÚSEKU

## 3.1 Úvod

V postupech požárně bezpečnostního inženýrství je požární návrh obvykle založen na fyzikálním popisu tepelného zatížení. Ve srovnání s návrhovými postupy za běžných teplot, je při požárním návrhu rozhodující velikost požárního zatížení, rychlost uvolňování tepla a podmínky ventilace. U většiny budov lze předpokládat nekonečně mnoho možných scénářů požární situace, z nichž ten

nejnepříznivější je obvykle posuzován. Pro určení teplotního zatížení lze použít řadu výpočetních modelů.

### 3.2 Požárně dělící konstrukce požárního úseku

Při výpočtu požární bezpečnosti staveb je uvažováno s rozvojem požáru uvnitř požárního úseku. Nepředpokládá se další šíření požáru do okolních požárních úseků budovy. Splnění předpokladu závisí na požárně dělících konstrukcích (podlahy, stěny včetně dveří, atd.). Pro zhodnocení schopnosti plnit požárně dělící funkci je nezbytné znát chování těchto konstrukcí za zvýšených teplot, které lze ověřit několika způsoby:

- požární zkouškou: prvek je vystaven požáru ve zkušební peci, ve které je simulována požární křivka pro nejnepříznivější požární scénář;
- znaleckým posudkem: přístup využívá znalostí chování zjištěných při požárních zkouškách jednotlivých stavebních prvků zatížených normovou nominální teplotní křivkou;
- použitím normových požadavků: národní normy definují požární úsek s požadavky na požární odolnost stěn, stropů, podlah a dveří, v závislosti na provozu a geometrii budovy.

První dva přístupy lze použít pro omezený počet případů posuzování požární odolnosti dělících konstrukcí. Třetí přístup je běžné v praxi využíván nejčastěji.

### 3.3 : Tepelné vlastnosti stěn

Tepelné ztráty jsou důležitým činitelem při určování průběhu teplot v požárním úseku během požáru. Jsou způsobeny vedením a sáláním tepla přes dělící konstrukce požárního úseku, a k jejich stanovení jsou nezbytné znalosti tepelných vlastností materiálů.

Tepelné vlastnosti materiálů charakterizují tři hlavní parametry:

- měrné teplo  $c_p$
- hustota  $\rho$
- tepelná vodivost  $\lambda$

Tepelná vodivost a měrné teplo závisí na teplotě.

U zjednodušených výpočtů je tepelná pohltivost konstrukce popsána koeficientem  $b$ , který je určen z tepelných vlastností materiálů rovnicí:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (3.1)$$

- při výpočtu koeficientu povrchu  $b$ , lze hodnoty hustoty  $\rho$ , měrného tepla  $c_p$ , a tepelné vodivosti  $\lambda$ , uvažovat za běžných teplot [1].

V případě vícevrstevných konstrukcí je doporučeno hodnotu koeficientu  $b$  odvodit následovně:

- pro dvě rozdílné vrstvy s koeficienty  $b_1$  a  $b_2$ , pro které platí  $b_1 < b_2$ , potom je výsledná hodnota součinitele  $b = b_1$ ;
- v případě, že platí  $b_1 > b_2$ , je počítána mezní tloušťka materiálu vystaveného požáru podle:

$$s_{1,lim} = \sqrt{\frac{t_d \lambda_1}{c_1 \rho_1}}, \text{ kde } t_d \text{ je čas požáru až do fáze útlumu} \quad (3.2)$$

Potom je koeficient  $b$  určen:

$$\begin{array}{ll} \text{pro } s_1 > s_{1,lim}, & \text{jako } b = b_1 \\ \text{pro } s_1 < s_{1,lim}, & \text{jako } b = \frac{s_1}{s_{1,lim}} b_1 + \left( 1 - \frac{s_1}{s_{1,lim}} \right) b_2 \end{array}$$

Tepelné vlastnosti při různých teplotách běžně používaných materiálů jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tab. 3.1 Tepelné vlastnosti materiálů

Materiál	Teplota (°C)	$\lambda$ (W/m/K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg°K)
<b>Prostý beton</b>	20	2	2300	900
	200	1,63	2300	1022
	500	1,21	2300	1164
	1000	0,83	2300	1289
<b>Lehký beton</b>	20	1	1500	840
	200	0,875	1500	840
	500	0,6875	1500	840
	1000	0,5	1500	840
<b>Ocel</b>	20	54	7850	425
	200	47	7850	530
	500	37	7850	667
	1000	27	7850	650
<b>Rohože z křem. vláken</b>	20	0,035	128	800
	200	0,06	128	900
	500	0,12	128	1050
	1000	0,27	128	1100
<b>Těsnící tmel</b>	20	0,0483	200	751
	250	0,0681	200	954
	500	0,1128	200	1052
	800	0,2016	200	1059
<b>Křemíkové desky</b>	20	0,0685	450	748
	250	0,0786	450	956
	450	0,0951	450	1060
	1050	0,157	450	1440
<b>Dřevo</b>	20	0,1	450	1113
	250	0,1	450	1125
	450	0,1	450	1135
	1050	0,1	450	1164
<b>Zdivo</b>	20	1,04	2000	1113
	200	1,04	2000	1125
	500	1,18	2000	1135
	1000	1,41	2000	1164
<b>Sklo</b>	20	0,78	2700	840

### 3.4 Charakteristiky otvorů

Otvory v požárně dělicí konstrukci mohou být tvořeny okny, dveřmi a stropními otvory. Průběh požáru je závislý na počtu a velikosti těchto otvorů.

Do zjednodušených výpočtů je zaveden součinitel otvorů  $O$ , určený z rovnice (3.3) pro samostatný svislý otvor:

$$O = A_w \sqrt{H} \quad (3.3)$$

Pro více otvorů se uvažuje s celkovou plochou svislých otvorů a s váženým průměrem výšek otvorů podle:

$$A_w = \sum A_{w_i} \quad (3.4)$$

$$H = \left[ \frac{\sum A_{wi} \sqrt{H_i}}{\sum A_{wi}} \right]^2 \quad (3.5)$$

kde  $A_w$  je plocha svislého otvoru,  $H$  je výška otvoru a  $i$  je pořadové číslo otvoru.

### 3.5 Nucené větrání

Použití nuceného větrání při požáru je ověřeným způsobem ochrany zejména prostorů schodišť. Tento způsob je často využíván v systému odvětrání kouře a tepla z požárního úseku (smoke and heat exhalust ventilation system – SHEVS).

## 4 CHARAKTERISTIKY POŽÁRU

Cílem této kapitoly je poskytnout projektantovi informace, které jsou potřebné pro návrh stavebních konstrukcí za požární situace. Při návrhu je nezbytné zjistit množství energie, která působí na konstrukci při požáru. Požární experiment na skutečné konstrukci je jedním z možných postupů, jak zjistit hodnotu působící energie. Tento způsob je však neekonomický a poskytuje informace pouze jednoho z mnoha možných požárních scénářů, které mohou nastat. Vhodnějším postupem je kombinace již provedených požárních zkoušek a analytických či numerických výpočetních modelů.

### 4.1 Požární zatížení

Základní otázkou je rozhodnutí, jak definovat požární zatížení při návrhu. Obvykle je požární zatížení stanoveno statisticky, pouze ve výjimečných případech je definováno deterministicky.

#### 4.1.1 Deterministický přístup

Požární zatížení  $Q$  v požárním úseku je definováno jako celkové množství energie, které se může uvolnit v průběhu požáru. Část celkové energie je použita na zahřátí požárního úseku (dělicích konstrukcí a vnitřního vzduchu), zbytek je odveden otvory. Jednotlivé součásti budovy jako jsou hořlavá obložení stěn, podlah a stropů nebo vybavení uvnitř budovy, jako je například nábytek, tvoří požární zatížení. Požární zatížení  $Q$  na jednotku plochy požárního úseku se nazývá hustota požárního zatížení  $q_f$ .

V Eurokódu 1 je charakteristická hodnota hustoty požárního zatížení uvažována podle vztahu:

$$q_f = \frac{I}{A_f} \sum_i (\psi_i \cdot m_i \cdot H_{ui} \cdot M_i) \quad (4.1)$$

kde:  $M_i$  je množství hořlavého materiálu  $i$  (kg);  
 $H_{ui}$  je čistá výhřevnost materiálu  $i$  (MJ/kg), viz tabulka 4.1;  
 $m$  je součinitel hoření materiálu  $i$ ;  
 $\Psi_i$  je součinitel chráněného požárního zatížení pro materiál  $i$ ;  
 $A_f$  podlahová plocha požárního úseku ( $m^2$ ).

Hodnoty  $H_{ui}$  a  $M_i$  představují celkové množství energie obsažené v materiálu  $i$  uvolněné pro hoření. Součinitel  $m$  je bezrozměrné číslo, které se uvažuje v rozmezí od 0 do 1 a představuje účinnost hoření:  $m = 1$  pro velmi hořlavé materiály a  $m = 0$  pro materiály nehořlavé.

Pro standardní celulózové materiály je  $m = 0,8$ .

Čistá výhřevnost dřeva  $H_{u}$  je 17,5 MJ/kg, případně 14 MJ/kg pro ( $m H_u$ ).

Tab. 4.1 Doporučené hodnoty čisté výhřevnosti  $H_u$  (MJ/kg) hořlavých materiálů pro výpočet požárního zatížení

<b>Pevné látky</b>	
Dřevo	17,5
Jiné celulóznové materiály <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oděvy</li> <li>• Korek</li> <li>• Bavlna</li> <li>• Papír, lepenka</li> <li>• Hedvábí</li> <li>• Sláma</li> <li>• Vlna</li> </ul>	20
Uhlíkaté látky <ul style="list-style-type: none"> <li>• Antracit</li> <li>• Dřevěné uhlí</li> <li>• Uhlí</li> </ul>	30
<b>Chemické látky</b>	
Parafinová řada <ul style="list-style-type: none"> <li>• Methan</li> <li>• Ethan</li> <li>• Propan</li> <li>• Butan</li> </ul>	50
Olefinová řada <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ethylen</li> <li>• Propylen</li> <li>• Butylen</li> </ul>	45
Aromatická řada <ul style="list-style-type: none"> <li>• Benzen</li> <li>• Toluen</li> </ul>	40
Alkoholy <ul style="list-style-type: none"> <li>• Methanol</li> <li>• Ethanol</li> <li>• Ethylalkohol</li> </ul>	30
Paliva <ul style="list-style-type: none"> <li>• Benzín, petrolej</li> <li>• Nafta</li> </ul>	45
Čisté uhlovodíkové plasty <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polyethylen</li> <li>• Polystyren</li> <li>• Polypropylen</li> </ul>	40
<b>Ostatní výrobky</b>	
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	



#### 4.1.2 Statistický přístup

Hustotu požárního zatížení lze určit deterministickým přístupem, tj. sečtením veškerého požárního zatížení v požárním úseku. Pro některé specifické provozy, jako jsou například kanceláře nebo školy, jsou hodnoty hustoty požárního zatížení známy. U provozů, kde se předpokládá podobné množství hustoty požárního zatížení, lze použít statistický přístup. V těchto případech je hustota požárního zatížení uvažována střední hodnotou.

Hodnoty hustoty požárního zatížení pro různé provozy, podle [2,21,22], jsou uvedeny v tabulce 4.2. Pravděpodobnost dosažení hustoty požárního zatížení při požáru je zohledněna pomocí 80, 90 a 95% kvantilu Gumbelova rozdělení s variačním koeficientem 0,3.

Tab. 4.2 Hustoty požárního zatížení pro různé provozy v ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) podle Gumbelova rozdělení

	Odchylka	Průměr	80% kvantil	90 % kvantil	95 % kvantil
Byty	234	780	948	1085	1217
Nemocnice (pokoje)	69	230	280	320	359
Hotely (pokoje)	93	310	377	431	484
Knihovny	450	1500	1824	2087	2340
Kanceláře (standardní)	126	420	511	584	655
Školní třídy	85,5	285	347	397	445
Nákupní centra	180	600	730	835	936
Divadla (kina)	90	300	365	417	468
Doprava (veřejné prostory)	30	100	122	139	156

#### 4.2 Typ požáru

Nedílnou součástí výpočtu je stanovení množství požárního zatížení, které v případě požární situace bude hořet a jak ovlivní vývoj teplot v požárním úseku. Ve všech případech (kromě zhárství a výbuchů, které nejsou předmětem výzkumu) se v počáteční fázi jedná o lokalizovaný požár, který může, za určitých podmínek, postupně přerůst v požár prostorový.

Rozdíly mezi lokalizovaným a prostorovým požárem jsou shrnuty v tabulce 4.3.

Tab. 4.3 Rozdíly lokalizovaného a prostorového požáru

	Požární zatížení	Teplota plynu
<b>Lokalizovaný požár</b>	Pouze část požárního zatížení v požárním úseku	Dvě teplotní zóny (dvě teplotní křivky)
<b>Prostorový požár</b>	Veškeré požární zatížení v požárním úseku	Jedna teplotní zóna (jedna teplotní křivka)

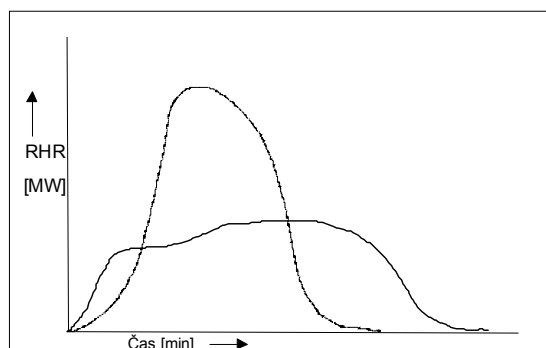
V případě prostorového požáru je do procesu hoření zapojeno veškeré požární zatížení. V průběhu požáru dochází v celém požárním úseku k mísení kouře a dalších zplodin hoření. Vzniká homogenní směs plynů o rovnoměrné teplotě, kterou lze popsat jednou teplotní křivkou. Modely pro stanovení teplotních křivek lokalizovaného či prostorového požáru budou podrobně popsány v kapitole 6.

#### 4.3 Průběh požáru

Rozvoj a útlum požáru je ovlivněn rychlostí odhořívání požárního zatížení v čase. Tuto informaci poskytuje hodnota rychlosti uvolňování tepla  $RHR$ .

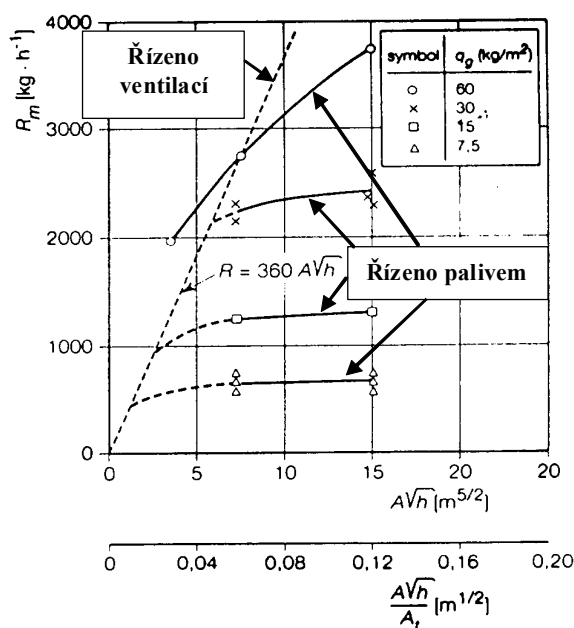
### 4.3.1 Požár řízený palivem nebo ventilací

Požární zatížení charakterizuje celkové množství dostupné energie pro hoření. Průběh teplot plynů je závislý na rychlosti uvolňování tepla v čase. Shodné požární zatížení může hořet velmi rychle nebo velmi pomalu, což vede k naprosto rozdílným teplotním křivkám.



Obr. 4.1 Rozdílné průběhy rychlosti uvolňování tepla  $RHR$  pro stejné množství požárního zatížení a stejnou plochu požárního úseku

Hodnota rychlosti uvolňování tepla  $RHR$  ovlivňuje průběh teplot plynů v čase. Fáze rozvoje, kdy z požáru malých rozměrů vzniká požár rozsáhlý, je závislá na množství kyslíku dostupného při hoření. Při dostatečném přístupu kyslíku do místa hoření je rychlost uvolňování tepla ovlivněna množstvím požárního zatížení v požárním úseku - **požár řízen palivem**. V případě malých ploch otvorů obvodových konstrukcí je rychlost uvolňování tepla ovlivněna nedostatečným množstvím kyslíku pro hoření - **požár řízen ventilací**. U obou případů dochází k rasantnímu nárůstu rychlosti uvolňování tepla  $RHR$  po celkovém vzplanutí. Tento okamžik určuje přechod mezi lokalizovaným a prostorovým požárem, který pohltí veškeré hořlavé materiály požárního úseku. Porovnání požárů řízených palivem nebo ventilací, podle množství hořícího paliva v závislosti na podmínkách ventilace, je zobrazeno v následujícím grafu, viz obr 4.2. Hodnota  $A_w \sqrt{h}$  představuje podmínky ventilace, kde  $A_w$  je celková plocha otvorů a  $h$  výška otvorů. Každá křivka je sestrojena pro rozdílnou hustotu požárního zatížení. Z grafu je patrný přechod od požáru řízeného ventilací k požáru řízeného palivem. Se vzrůstající hodnotou  $A_w \sqrt{h}$  postupně vzrůstá množství hořícího paliva až do hodnoty maximálně dostupného požárního zatížení v požárním úseku.



Obr. 4.2 Množství hořícího paliva v závislosti na podmínkách ventilace

#### 4.3.2 Výpočet průběhu RHR

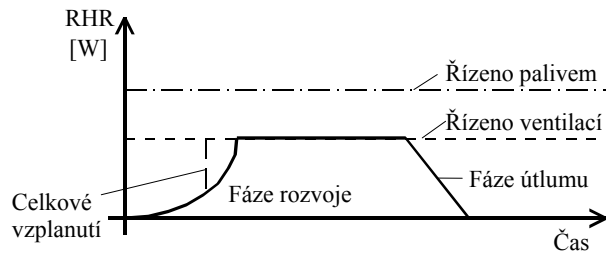
Rychlost uvolňování tepla  $RHR$  ve fázi rozvoje, viz obr 4.3, až do maximální hodnoty lze popsat:

$$RHR = (t / t_a)^2 \quad (4.2)$$

kde:  $RHR$  je rychlost uvolňování tepla ve fázi rozvoje (W)

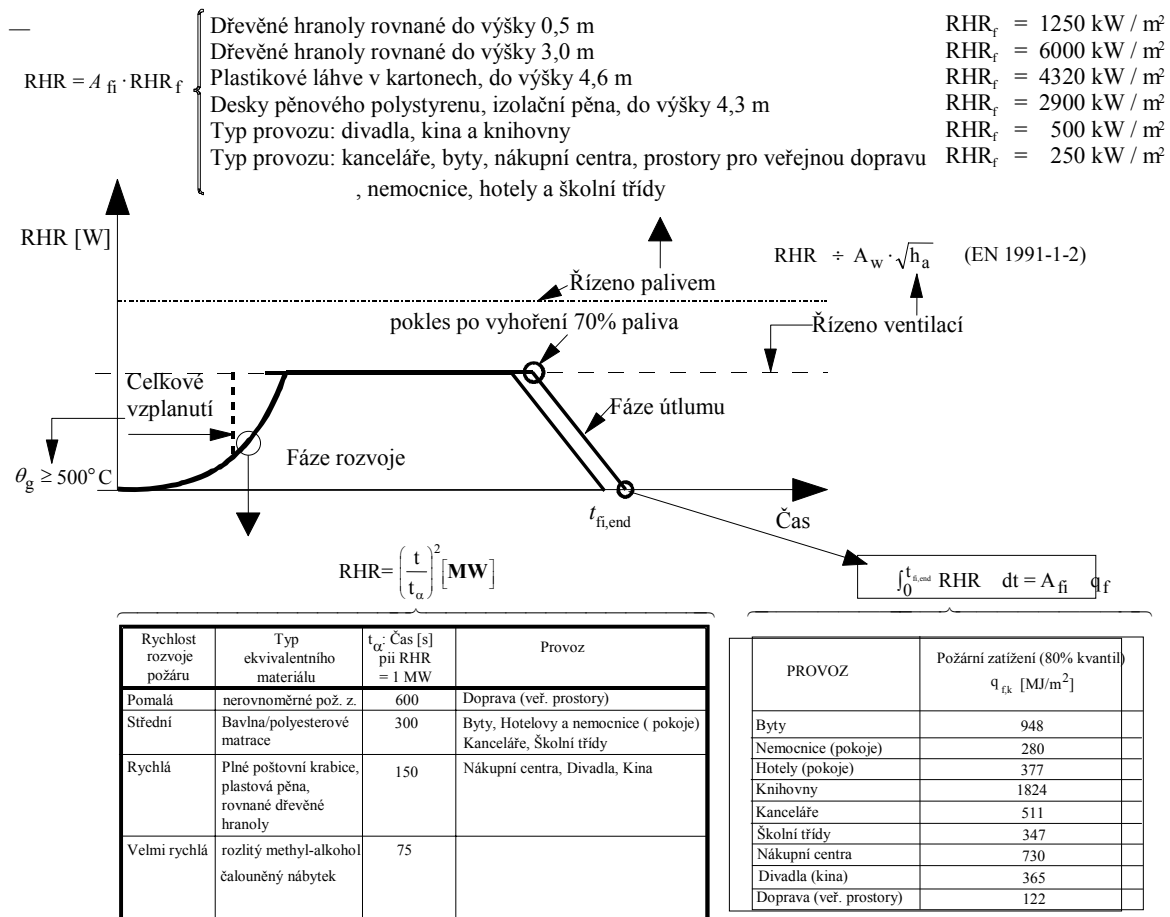
$t$  je čas (s)

$t_a$  je doba potřebná pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW (s)



Obr. 4.3 Rychlost uvolňování tepla  $RHR$  v čase

Jak již bylo zmíněno, lze průběh požáru charakterizovat třemi fázemi: fází rozvoje, ustáleným stavem, fází útlumu. Rychlost rozvoje požáru je popsána normou [1, 2]. Závisí na typu provozu v požárním úseku, ale i na dalších okolnostech, viz obr. 4.4. Po fázi rozvoje následuje ustálený stav, kde hodnota  $RHR$  dosahuje svého maxima, viz obr. 4.4. Fáze útlumu hoření je vyjádřena lineárním poklesem  $RHR$ . Počátek této fáze a její průběh lze vyjádřit početně podle [1, 2] a [7]. Na základě mnoha požárních experimentů bylo zjištěno, že počátek fáze útlumu nastává po vyhoření 70 % veškerého požárního zatížení v požárním úseku. Na následujícím obrázku je uveden návrh křivky  $RHR$  používané ve výzkumném projektu NFSC, viz obr 4.4. Křivka zahrnuje fázi rozvoje, ustálený stav a fázi útlumu.



Obr. 4.4 Návrh RHR křivky [1]

#### 4.3.3 Stanovení průběhu RHR experimentálně

Experiment je dalším možným přístupem stanovení křivky RHR. Metoda experimentálního určení křivky RHR, známá již několik let, je založena na principu měření spotřeby kyslíku při požáru v požárním úseku. Předchozí postupy vyžadovaly přesné měření teplotní enthalpie, což je velmi obtížné. Metoda spotřeby kyslíku umožňuje snadné měření s dobrou přesností. Její princip je založen na znalostech množství kyslíku potřebného při hoření určitého materiálu. Hodnoty pro běžně používané materiály ve stavebnictví byly zjištěny a jsou uvedeny v literatuře. Další způsoby stanovení RHR jsou popsány v [3,4,5,6].

V práci [5] je uveden postup, který definuje průběh požáru pomocí RHR křivek pro jednotlivé předměty nacházející se v požárním úseku. Při stanovení křivky RHR byl použit dvouzónový model simulace požáru. Databáze výsledků zahrnuje pouze omezený počet předmětů používaných především v obytných prostorech, jako jsou například židle, televizory nebo vánoční stromky. Toto omezení je vyváženo výhodou, která spočívá v důkladném popisu všech tří fází průběhu požáru. Další postup, založený na výsledcích numerické simulace, je uveden v [4]. Křivky RHR jsou popsány pomocí rovnic, odlišných pro požár pevných, tavných nebo kapalných látek. Křivka RHR je definována jako funkce rychlosti rozvoje požáru v horizontálním a vertikálním směru. Databáze výsledků uvádí hodnoty pro různé typy materiálů a provozů.

Hodnotným zdrojem informací je databáze "Initial Fires" [3], zpracovaná na University of Lund, která navazuje na databázi výsledků v [5]. Uvádí rozšířený počet předmětů užívaných v obytných prostorech i další předměty, jako jsou například různé typy automobilů. Na CTICM ve Francii byly uskutečněny požární experimenty pro zjištění RHR křivek nových automobilů (vyrobených v roce 1996), hotelových pokojů a nábytku.

## 5 PRAVDĚPODOBNOST VZNIKU POŽÁRU

### 5.1 Úvod

Pravděpodobnost vzniku požáru v plaveckém bazéně je mnohem menší než v uměleckém ateliéru. Pravděpodobnost, že požár vznikne a postupně se rozšíří do plně rozvinutého stádia, závisí na charakteristikách požárního úseku a na přítomnosti aktivních, požárně bezpečnostních opatření jako jsou samočinná hasící zařízení (sprinklery), samočinné požární hlásiče (kouřové, tepelné), zařízení dálkového přenosu k požární jednotce a zásah požární jednotky. Výzkumné projekty ECSC [11,18] se zabývají na základě skutečných událostí určením pravděpodobnosti :

- vzniku požáru
- neuhašení požáru uživateli požárního úseku
- neuhašení požáru pomocí samočinného hasicího zařízení
- neuhašení požáru požární jednotkou

Úspěšný zásah požární jednotky závisí především na citlivosti požární signalizace, rychlosti předání informace k požární jednotce a vzdálenosti budovy od požární jednotky. Z těchto předpokladů lze odvodit součinitel nebezpečí vzniku požáru  $\gamma_{q,f}$ , pro stanovení návrhového požárního zatížení podle přílohy C v prEN 1990 [10]. Postup výpočtu je shrnut v kapitole 5.4. Součinitel  $\gamma_{q,f}$  je rozdělen do tří dílčích součinitelů  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$  a  $\delta_{ni}$ , pro zohlednění velikosti požárního úseku, typ provozu a aktivní požární ochrany. Návrhová hodnota požárního zatížení vznikne přenásobením charakteristické hodnoty  $q_{f,d}$  součinitelem  $\gamma_{q,f} = \delta_{q1} \times \delta_{q2} \times \delta_{ni}$ .

Návrhové hodnoty požárního zatížení  $q_{f,d}$  je užíváno ve výpočetních modelech, kapitola 6, pro stanovení rozvoje teplot v požárním úseku.

### 5.2 Databáze požárních událostí

Databáze [11] byla shromážděna na základě skutečných požárních událostí:

- ve Švýcarsku: podrobné informace všech požárů, ( $\pm 40.000$  požárů) se škodami přesahující 1.000.000 CHF, v Bernu v letech 1986 až 1995.
- ve Francii: požáry průmyslových budov mezi lednem 1983 a únorem 1984, všechny zásahy požárních jednotek v roce 1995 (3.253.855, ze kterých 312.910 bylo pro případ požáru).
- v Nizozemsku: požáry průmyslových budov mezi lednem 1983 a lednem 1985.
- ve Finsku: všechny požáry budov v roce 1995 (2.109 požárů z celkového počtu budov 1.150.494). Rozsah požárních událostí v [18] byl rozšířen o záznamy v databázi "PRONTO" vedenou Ministerstvem vnitra a dalšími významnými databázemi.
- v Lucembursku: záznamy požárních jednotek v letech 1995 až 1997.

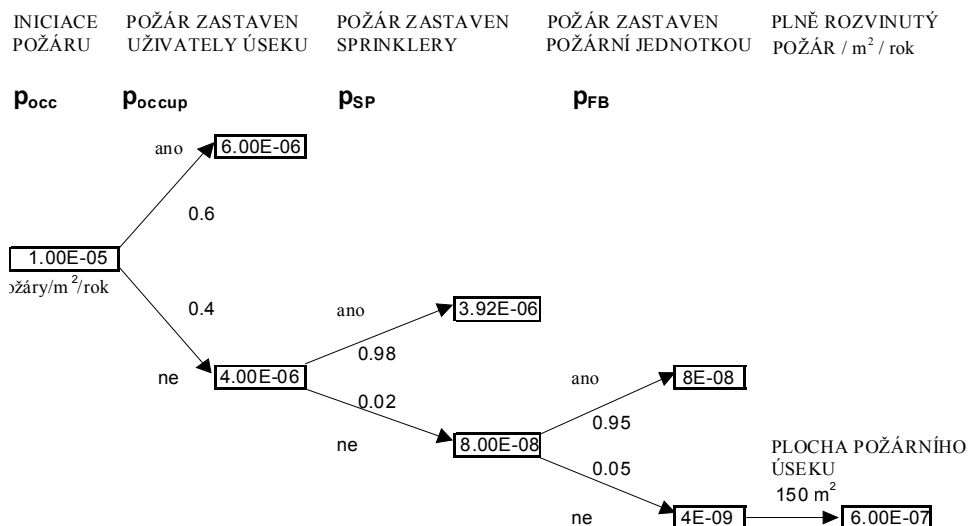
Dalším zdrojem informací je databáze nazvaná "sprinkler performance", která se zabývá účinky sprinklerů při požáru. Vznikla na základě výsledků zjištěných při požárech v USA, Finsku, Německu, Francii, Austrálii a Velké Británii [13].

Zmíněné databáze, které se týkají především bytových prostor, kanceláří a průmyslových budov, byly použity při vývoji výpočetních postupů pro návrh za požární situace. Výpočetní postup byl rozšířen pro různé případy požáru pomocí součinitele nebezpečí vzniku požáru  $\delta_{q1}$ , viz tab. 5.6.

### 5.3 Možnosti vývoje požáru

#### 5.3.1 Vývojový diagram průběhu požáru

Vývoj požáru lze popsat vývojovým diagramem na obr. 5.1, s uvažováním doporučených hodnot v tab. 5.1.



Obr. 5.1 Příklad vývojového diagramu průběhu požáru v kanceláři o ploše 150 m<sup>2</sup>

Tab. 5.1 Součinitele pro stanovení vývoje požáru

		Byty	Kanceláře	Průmyslové prostory
Výskyt požáru [1/(m <sup>2</sup> .year)]	$p_{occ}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$
Požár zastaven uživateli	$p_{occup}$	0,75	0,60	0,45
Požár zastaven sprinklery	$p_{SP}$	viz tabulka 5.5		
Požár zastaven požární jednotkou	$p_{FB}$	0,90 - 0,95	0,90 - 0,95	0,80 - 0,90

### 5.3.2 Vznik a rozvoj požáru

Pravděpodobnost vzniku požáru velkých rozměrů, který ohrožuje stabilitu budovy, lze vyjádřit jako:

$$p_{\bar{n}} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot A_{\bar{n}} \cdot p_4 \quad (5.1)$$

- kde:  $p_1$  je součinitel, který zohledňuje pravděpodobnost vzniku požáru velkých rozměrů vlivem uživatelů a standardní požární jednotky (na m<sup>2</sup> podlahové plochy za rok).  
 $p_2$  součinitel zohledňující typ požární jednotky a čas mezi ohlášením a zásahem jednotky.  
 $p_3$  součinitel vlivu samočinných požárních hlásičů (kouřových nebo tepelných) nebo zařízení dálkového přenosu k požární jednotce.  
 $p_4$  součinitel vlivu samočinných hasicích zařízení - sprinklery, (zahrnuje také možnost selhání sprinklerů při hašení).  
 $A_{\bar{n}}$  podlahová plocha požárního úseku.

Poznámka: Součinitel  $p_1$  zahrnuje zásahy uživatelů požárního úseku a požární jednotky pro zamezení rozšíření požáru, nikoliv četnost výskytu požáru. Vliv typu požární jednotky, času mezi ohlášením a zásahem požární jednotky, součinitele samočinných hlásičů a zařízení pro dálkový přenos k požární jednotce ( $p_2, p_3$ ), není zahrnut v tab. 5.1. Součinitel  $p_1$ , uvedený v tab. 5.2, lze ve v praxi uvažovat jako  $p_{occ} \cdot (1-p_{occup}) \cdot (1-p_{FB})$ .

V [11,18] je doporučeno součinitele  $p_1, p_2, p_3$  a  $p_4$  uvažovat podle následujících hodnot uvedených v tab. 5.2-5.5.

Tab. 5.2 Součinitel, který vyjadřuje četnost plně rozvinutých požárů s uvažováním vlivu požární jednotky

Provoz	$p_1 [10^{-7}/(m^2 \cdot rok)]$
Kanceláře	2 – 4
Byty	4 – 9
Průmyslové prostory	5 – 10

Tab. 5.3 Součinitel zohledňující typ požární jednotky a čas mezi ohlášením a zásahem jednotky

$p_2$	Čas mezi ohlášením a zásahem požární jednotky		
	$\leq 10'$	$10' < t \leq 20'$	$20' < t \leq 30'$
Požární jednotka			
Profesionální	0,05	0,1	0,2
Neprofesionální	0,1	0,2	1

Tab. 5.4 Součinitel vlivu samočinných požárních hlásičů (kouřových nebo tepelných) a zařízení dálkového přenosu k požární jednotce.

Aktivní požární hlásiče	$p_3$
Kouřové	0,0625
Tepelné	0,25
Samočinné ohlášení k požární jednotce	0,25

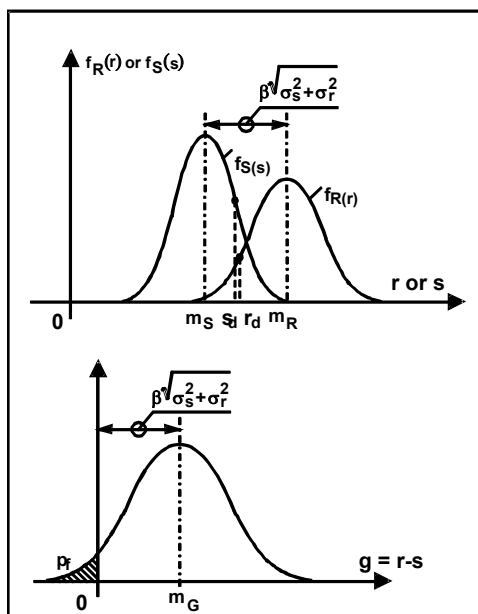
Tab. 5.5 Součinitel podle použitého typu sprinkleru

Typ použitého sprinkleru	$p_4$
Běžný (např. podle předpisů)	0,02
Lepší standard (např. s elektronicky řízeným ventilem, dva nezávislé zdroje vody)	0,01 - 0,005
Horší standard (předpisy obvykle nedoporučují)	$\geq 0,05$

## 5.4 Postup výpočtu

### 5.4.1 Stanovení návrhových hodnot zatížení a únosnosti – součinitel spolehlivosti $\gamma$ podle Eurokódů

Hodnoty únosnosti  $R$  a zatížení  $S$  jsou stanoveny na základě statistického rozdělení se směrodatnými odchylkami ( $\sigma_S$ ,  $\sigma_R$ ) a průměry ( $m_S$ ,  $m_R$ ). K dosažení dostatečné bezpečnosti je nezbytné zajistit co nejnižší pravděpodobnost  $p_f$  případné poruchy ( $S > R$ ), dané vyšrafovanou plochou v grafu na obr. 5.2. Tuto plochu lze vyjádřit indexem spolehlivosti  $\beta$ . V Eurokódech je stanovena pro běžné podmínky maximální hodnota pravděpodobnosti poruchy  $p_f = 7,23 \cdot 10^{-5}$  za životnost budovy, což odpovídá indexu spolehlivosti  $\beta=3,8$ .



Obr. 5.2 Pravděpodobnostní přístup

Návrhové hodnoty pro obě veličiny  $S$  a  $R$ , které odpovídají působícímu zatížení a únosnosti, jsou uvažovány samostatně ( $s_d$ ,  $r_d$ ). Lze rozlišit několik typů zatížení (vlastní tíha, nahodilé zatížení, zatížení sněhem a větrem, zemětřesení, požár,...) a únosností (pevnost betonu v tlaku, pevnost oceli na mezi kluzu,...), a proto je řešení komplikovanější než pouhé porovnání dvou hodnot. Z tohoto důvodu bylo do Eurokódu začleněno polopravděpodobnostní řešení na základě spolehlivostní metody FORM (First Order Reliability Method).

Toto zjednodušené řešení je v Eurokódu vyjádřeno:

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = 0,8 \text{ pro únosnost.} \quad (5.2)$$

$$\alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = (-0,7) \text{ pro hlavní zatížení a } (-0,28) \text{ pro vedlejší zatížení} \quad (5.3)$$

$$\Rightarrow s_{d,i} = \text{Návrhová hodnota} = m_{S,i} + 0,7 \beta \sigma_{S,i}$$

$$\Rightarrow r_{d,i} = \text{Návrhová hodnota} = m_{R,i} - 0,8 \beta \sigma_{R,i}$$

Uvažováním konstantních hodnot součinitelů citlivosti  $\alpha_{S,I}$  jsou návrhové hodnoty  $s_{d,i}$  pro zatížení definovány bez vlivu únosnosti. Návrhové hodnoty jsou závislé pouze na indexu spolehlivosti  $\beta$ , průměrných hodnotách a odchylkách odpovídajících statistickému rozdělení a samozřejmě na způsobu rozdělení, viz rovnice v obr. 5.2. [10].

Pro stanovení požadované bezpečnosti musí být uvažováno s návrhovými hodnotami zatížení  $s_{d,i}$ . Pokud  $\beta=3,8$ , je riziko poruchy právě rovno  $7,23 \cdot 10^{-5}$  během životnosti budovy. V důsledku toho je možné pro každé zatížení určit dílčí součinitel spolehlivosti  $\gamma$ , což je poměr mezi návrhovou a charakteristickou hodnotou. Dílčí součinitel spolehlivosti je referenční hodnota:

$$\gamma = \frac{S_d}{S_k} \quad (5.4)$$



Dílčí součinitele bezpečnosti jsou stanoveny v Eurokódu: 1,35 pro zatížení vlastní tíhou a 1,5 pro nahodilé zatížení; spolehlivost materiálu se uvažuje 1,0 pro konstrukční ocel, 1,15 pro betonářskou výztuž a 1,5 pro beton [1,16,20,24].

Příklad stanovení dílčího součinitele spolehlivosti materiálu  $\gamma_s = 1,15$  pro betonářskou výztuž je uvedeno níže [20]:

- $\beta = 3,8$  ;  $\alpha_a = 0,8$
- Statistický předpoklad: logaritmická normálová křivka
- Variační koeficient  $\left( = \frac{\sigma}{m} \right)$ :

$$V_R = \text{variační koeficient pro návrhovou hodnotu} = \sqrt{V_G^2 + V_m^2 + V_f^2} = 0,087$$

$$V_m = \text{variační koeficient nejistoty modelu} = 0,05$$

$$V_G = \text{variační koeficient odchylek zkušební vzorku} = 0,05$$

$$V_f = \text{variační koeficient pro geometrické vlastnosti} = 0,05$$

- Návrhová hodnota :  $X_d = m_X \exp(-\alpha_R \beta V_R)$   
 $= m_X \exp(-0,8 \beta V_R)$

- Charakteristická hodnota :  $X_k = m_X \exp(-k V_f)$

kde  $k = 1,645$  odpovídající 5 % kvantilu

- Součinitel spolehlivosti :  $\gamma_s = \frac{X_k}{X_d} = \exp(0,8 \beta V_R - k V_f)$   
 $= \exp(0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,087 - 1,645 \cdot 0,05) = 1,198$

#### 5.4.2 Limitní kritéria

Předpoklad limitní hodnoty pravděpodobnosti poruchy  $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$  za životnost budovy ( $1,3 \cdot 10^{-6}$  za rok) je stanoven v prEN 1990 [10]. Tento předpoklad spolehlivosti ( $\beta > 3,8$ ) pro I. mezní stav, uvažovaný při běžných podmínkách, byl rovněž stanoven jako limitní kritérium pro návrh za požární situace. Ve skutečnosti lze požadovanou bezpečnost při požární situaci rozlišit. Tato myšlenka byla uvedena v závěrečné zprávě [11], viz kapitola 2.8 přílohy B části WG5, kde je doporučeno užívat limitní hodnoty pravděpodobnosti  $p_t$  [1/rok] podle evakuace osob z požárního úseku:

$$p_t = 7,23 \cdot 10^{-4} \text{ pro běžnou evakuaci } p_t \text{ [1/rok]}$$

$$p_t = 7,23 \cdot 10^{-5} \text{ pro obtížnou evakuaci (nemocnice ap.)}$$

$$p_t = 7,23 \cdot 10^{-6} \text{ pro vyloučenou evakuaci (výškové budovy).}$$

Tento přístup může vést v budoucnosti k řadě vylepšení. Prozatím však bylo příslušnými institucemi rozhodnuto uvažovat hodnoty stanovené v prEN 1990 [10]. Přijetí nižších hodnot limitní bezpečnosti se v současné době diskutuje.

#### 5.4.3 Požární návrh a podmíněná pravděpodobnost

Příloha C v prEN 1990 [10], která popisuje polopravděpodobnostní postup stanovení návrhových hodnot zatížení a materiálových charakteristik, byla rozšířena pro požární návrh konstrukcí. Dílčí součinitele pro zatížení a spolehlivost materiálu při běžných teplotách, byly určeny pomocí polopravděpodobnostního přístupu. Tento přístup implicitně předpokládá pravděpodobnost poruchy konstrukce  $p_f$  nižší, než je limitní kritérium  $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$  za životnost budovy, což odpovídá indexu bezpečnosti  $\beta = 3,8$ :

$$p_f (\text{pravděpodobnost poruchy}) \leq p_t (\text{limitní kritérium}) \quad (5.5)$$

V případě požáru se stává hlavním zatížením požár. Toto zatížení je vyjádřeno jako hmotnost dřeva v [kg] nebo MJ.

Požární zatížení ovlivňuje konstrukci jen při určité pravděpodobnosti  $p_{fi}$ , která je určena z  $p_{start}$  (pravděpodobnost, že vznikne požár) a  $p_{spread}$  (pravděpodobnost, že se vzniklý požár rozšíří do plně rozvinutého požáru).

V případě požáru, který je považován za nahodilé zatížení, přechází rovnice (5.5) v:

$$p_{f,fi} \text{ (pravděpodobnost poruchy při požáru)} \cdot p_{fi} \text{ (pravděpodobnost požáru)} \leq p_t \text{ (limitní kritérium)}$$

což lze popsat jako:

$$\begin{aligned} - p_{f,fi} &\leq (p_t / p_{fi}) \\ - p_{f,fi} &\leq p_{t,fi} \quad \Rightarrow \quad \beta_{f,fi} \geq \beta_{fi,t} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Limitní kritérium  $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$  při pokojové teplotě zajišťuje konstantní hodnotu indexu spolehlivosti  $\beta_t$ . Při požáru je hodnota  $p_{t,fi}$  závislá na pravděpodobnosti požáru  $p_{fi}$  dle (5.6), což vede k proměnlivosti indexu spolehlivosti  $\beta_{fi,t}$ . Stanovení návrhového požárního zatížení odvozeného pomocí  $\beta_{fi,t}$  je popsáno níže.

#### 5.4.4 Návrhové požární zatížení a součinitel $\delta$

Výpočet spolehlivosti uvedený v kapitole 7.4 v [11] dokazuje, že součinitel citlivosti pro hlavní zatížení při pokojové teplotě je za požární situace výrazně redukován. Požární zatížení se tak stává hlavním zatížením.

Tento výpočet také upozornil, že předpoklad součinitele citlivosti pro hlavní zatížení (-0,7) musí být upraven na hodnotu (-0,9).

Podle hustoty požárního zatížení dané v dokumentu “The application of Fire Safety Engineering Principles to the Safety in Buildings” [14] a v analýzách prof. Fontany [15], lze požární zatížení dobře popsat pomocí Gumbelova rozdělení. Variační koeficient  $V_{qf}$  je podle [11] uvažován 0,3.

V [10] je podle předpokladu Gumbelova rozdělení návrhová hodnota hustoty požárního zatížení dána:

$$q_{f,d} = m_{qf} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} \left[ 0,577 + \ln \left( -\ln \phi(0,9 \beta_{fi,t}) \right) \right] \right\} \quad (5.7)$$

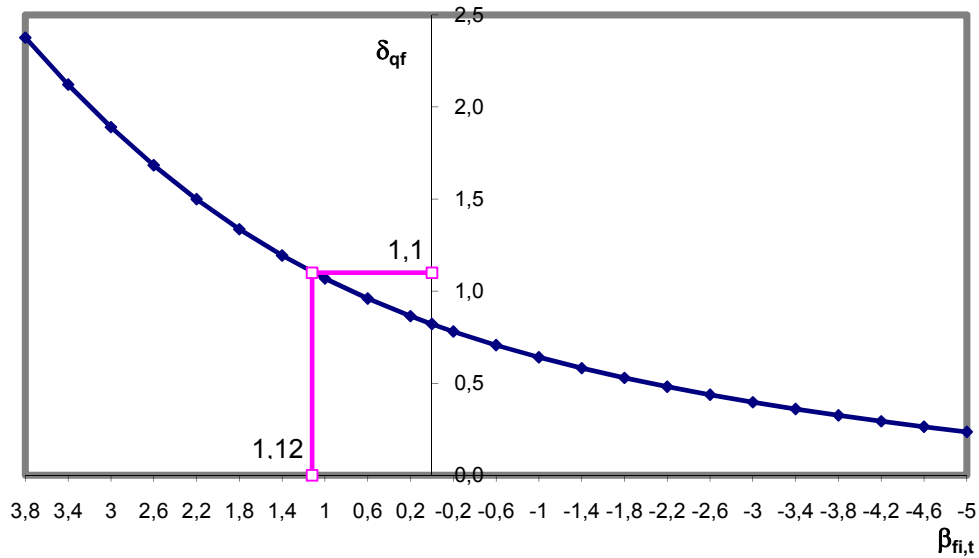
kde  $m_{qf}$  je průměrná hodnota požárního zatížení a  $\phi$  je distribuční funkce normálního rozdělení.

Podle návrhu v [11], lze při modelování požáru uvažovat součinitel spolehlivosti zatížení  $\gamma_{sd} = 1,05$ .

Pro 80% kvantil charakteristické hodnoty  $q_{f,k}$ , příloha E v EN 1991-1-2 [1] a [11], je součinitel  $\delta_{qf}$  vyjádřen:

$$\delta_{qf} = \frac{q_{f,d}}{q_{f,k}} = 1,05 \frac{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} \left[ 0,577 + \ln \left( -\ln \phi(0,9 \beta_{fi,t}) \right) \right] \right\}}{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} \left[ 0,577 + \ln \left( -\ln 0,8 \right) \right] \right\}} \quad (5.8)$$

Součinitel  $\delta_{qf}$  pro požární zatížení lze odvodit z obr. 5.3, na kterém je zobrazen vývoj  $\delta_{qf}$  jako funkce  $\beta_{fi,t}$ .



Obr. 5.3 Součinitel  $\delta_{qf}$  jako funkce  $\beta_{fi,t}$

Index spolehlivosti  $\beta_{fi,t}$  lze určit z pravděpodobnosti požáru  $p_{fi}$  podle rovnice:

$$\beta_{fi,t} = \phi^{-1} \left( \frac{p_t}{p_{fi}} \right) = \phi^{-1} \left( \frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{p_{fi}} \right)$$

kde  $\phi^{-1}$  je inverze k distribuční funkci normálního rozdělení

Tento obecný postup stanovuje:

- pravděpodobnost  $p_{fi}$
- hodnotu  $(p_t / p_{fi})$
- limitní hodnotu indexu spolehlivosti  $\beta_{fi,t}$
- součinitel  $\delta_{qf}$

Součinitel  $\delta_{qf}$  je rozdělen do tří členů  $\delta_{q1}$  a  $\delta_{q2}$  pro zohlednění nebezpečí vzniku požáru vlivem velikostí požárního úseku a typem provozu, a  $\delta_{ni}$  pro zohlednění vlivu aktivní požární ochrany, viz tab. 5.6.

Tab. 5.6 Souhrnná tabulka součinitele  $\delta$  [1]

Podlahová plocha požárního úseku $A_f$ [m <sup>2</sup> ]	Nebezpečí vzniku požáru $\delta_{q1}$	Nebezpečí vzniku požáru $\delta_{q2}$	Příklady typů provozů
25	1,10	0,78	umělecké galerie, muzea, plavecké bazény
250	1,50	1,00	byty, hotely, kanceláře
2500	1,90	1,22	výroba strojů a motorů
5000	2,00	1,44	chemické laboratoře lakovny
10000	2,13	1,66	výroba zábavné pyrotechniky nebo barev

$\delta_{ni}$ Aktivní požárně bezpečnostní opatření									
Samočinné hasicí zařízení		Samočinné požární hlásiče			Manuální hašení požáru				
Samočinné vodní hasicí zařízení $\delta_{n1}$	Nezávislé vodní zdroje $\delta_{n2}$	Elektrická požární signalizace tepel. $\delta_{n3}$	kouř. $\delta_{n4}$	Zařízení dálkové přenosu k požární jednotce $\delta_{n5}$	Závodní požární jednotka $\delta_{n6}$	Externí požární jednotka $\delta_{n7}$	Bezpečné přístup. cesty $\delta_{n8}$	Tech. prostř. požární ochrany $\delta_{n9}$	Zařízení pro odvod kouře $\delta_{n10}$
0,61	1,0   0,87   0,7	0,87 or 0,73		0,87	0,61 or 0,78	0,9 or 1,5*	1,0	1,0	1,0

\* Pro běžná požárně bezpečnostní opatření, která by měla být téměř vždy přítomná, jako je např. bezpečný přístup technických prostředků požární ochrany nebo zařízení pro odvod kouře schodišť, je doporučeno součinitel  $\delta_{ni}$  uvažovat hodnotou 1,5 v případě, že alespoň jedno ze všech opatření je nevyhovující.

Návrhové požární zatížení  $\delta_{f,d}$  lze vyjádřit podle:

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

V kapitole 6 je popsáno použití hodnoty návrhového zatížení při výpočtu rozvoje požáru.

## 6 VÝPOČET ROZVOJE POŽÁRU

### Úvod

Při numerické simulaci rozvoje požáru lze uplatnit řadu zjednodušení. V této kapitole jsou vysvětleny zjednodušené výpočtové modely pro fázi požáru před celkovým vzplanutím (modely lokalizovaného požáru a dvouzónové modely) a fázi po celkovém vzplanutí (modely plně rozvinutého požáru). Řešení pomocí prostorových modelů (např. CFD - Dynamická analýza plynů) jsou příliš složitá pro běžné použití, a proto jsou z této kapitoly vyjmuty.

### 6.1 Lokalizovaný požár

Při lokalizovaném požáru je prostor požárního úseku horizontálně rozdělen do horní horké vrstvy, kde dochází k hromadění zplodin hoření, a do spodní vrstvy, kde je teplota plynů mnohem nižší.

Tento případ požáru lze velmi dobře popsat dvouzónovými modely. Kromě předpovědi vývoje teploty plynů tyto modely poskytují informace o šíření kouře v budově a bezpečnosti osob v budově v závislosti na tloušťce horní vrstvy kouře, množství toxických plynů, hustotě tepelného toku a optické hustoty.

Horizontální části konstrukce situované nad požárem jsou ovlivněny tepelným zatížením, které závisí především na vzdálenosti povrchů konstrukce od plamenů. Výpočtem účinků lokalizovaného požáru na okolní konstrukce se zabývají metody Heskestad a Hasemi [17].

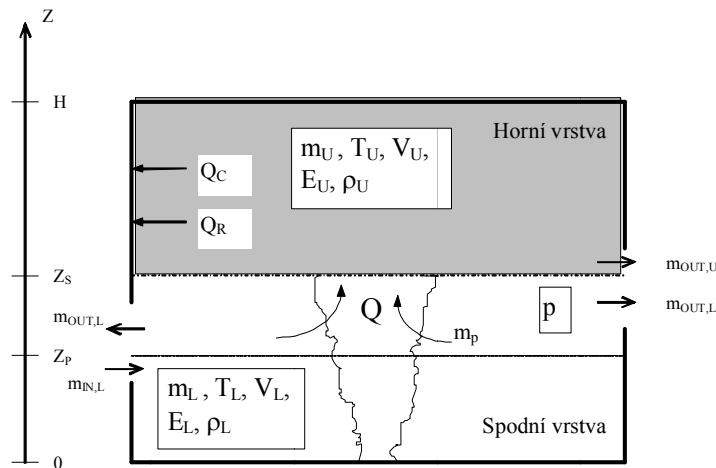
### 6.1.1 Dvouzónové modely požáru

Zónový model je název pro numerické řešení rozvoje teploty plynů v čase integrací obyčejných diferenciálních rovnic, které vyjadřují zachování hmoty a energie v každé vrstvě (zóně) požárního úseku. Je založen na předpokladu rovnoměrné teploty plynů v každé vrstvě. Pomocí zónových modelů lze, kromě rozvoje teploty plynů v čase, rovněž určit rozvoj teploty okolních konstrukcí nebo únik plynů otvory obvodových konstrukcí.

Údaje potřebné pro výpočet zónovým modelem:

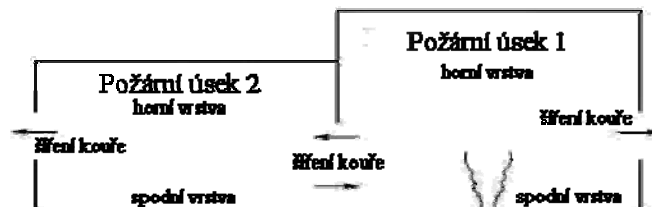
- geometrické charakteristiky - rozměry požárního úseku, otvorů a dělicích příček;
- materiálové charakteristiky obvodových konstrukcí požárního úseku
- charakteristiky požáru - RHR křivka, rychlost tepelného rozkladu, teplo při hoření paliva

Každá vrstva požárního úseku je popsána pomocí rovnic vyjadřujících rovnováhu zachování energie. Řešení přináší informace o rozvoji teplot plynů v každé ze dvou vrstev, rozvoji teploty okolních konstrukcí a úniku plynů otvory v obvodových konstrukcích. Důležitou informací je změna tloušťky vrstev v čase. Znalost tloušťky spodní vrstvy, která je chladnější a neobsahuje škodlivé látky vzniklé při hoření, je nezbytná pro stanovení možnosti úniku osob z požárního úseku v případě požáru. Rozdělení požárního úseku do vrstev s rozdílnými charakteristikami je uvedeno na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Rozdělení požárního úseku do vrstev

Na obr. 6.1 je zachycen typický případ požárního úseku, kdy dochází k výměně hmoty a energie pouze s okolním prostředím. Tyto modely však umožňují řešit i mnohem složitější případy, při kterých dochází nejenom k výměně hmoty a energie s okolním prostředím, ale i s okolními požárními úseky obklopující zkoumaný požární úsek. Lze tak snadno určit šíření kouře do ostatních požárních úseků. Takový případ je zachycen na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Šíření hmoty a energie mezi požárními úseky

### 6.1.2 Metoda Heskestad

Tepelné zatížení lokalizovaného požáru řeší metoda Heskestad [1]. Rozlišují se dva případy podle relativní délky plamene vůči stropu.

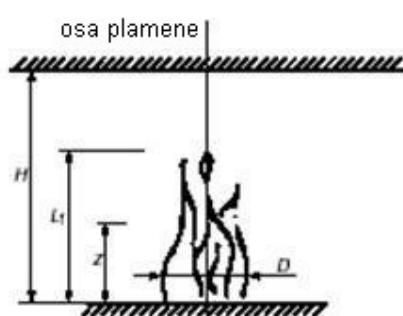
Délka plamene  $L_f$  lokalizovaného požáru, viz obr. 6.3, je dána vztahem:

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5}$$

Pokud plameny nezasahují strop požárního úseku,  $L_f < H$ ; viz obr. 6.3, nebo v případě požáru ve volném prostoru, je teplota  $\Theta_{(z)}$  v oblaku hořících plynů po výšce svislé osy dána vztahem:

$$\Theta_{(z)} = 20 + 0,25 Q_c^{2/5} \cdot (z-z_0)^{-5/3}$$

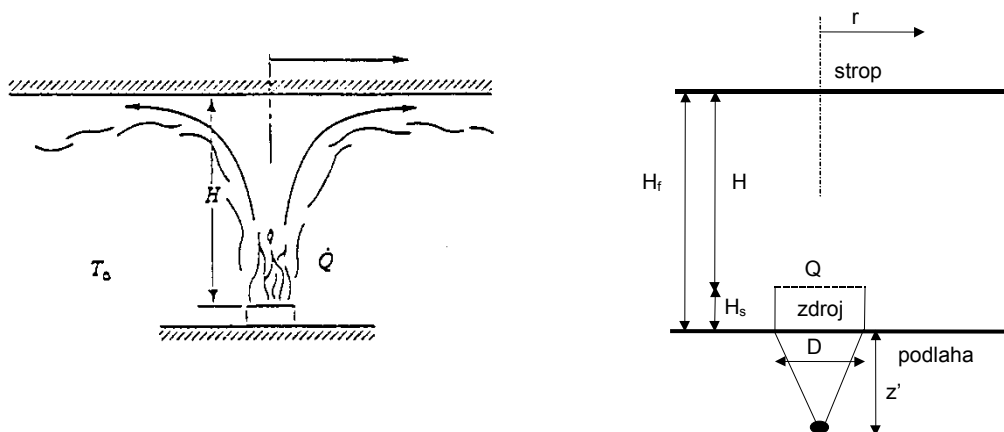
kde:  $D$  je průměr ohně, viz obr. 6.3, [m]  
 $Q$  je rychlost uvolňování tepla při požáru [W]  
 $Q_c$  je část rychlosti uvolňování tepla při požáru sdílená prouděním [W], lze uvažovat  $Q_c = 0,8 Q$   
 $z$  je proměnná výška plamene podél osy plamene [m]  
 $H$  je svislá vzdálenost mezi stropem a zdrojem požáru, viz obr. 6.3, [m]



Obr. 6.3 Model lokálního požáru pro případ, kdy plameny nezasahují strop

### 6.1.3 Metoda Hasemi [1,17]

Metoda Hasemi je jednoduchý nástroj pro zhodnocení účinků lokalizovaného požáru na vodorovné prvky konstrukcí nad požárem. Je založena na výsledcích experimentů uskutečněných na Building Research Institute in Tsukuba v Japonsku.



Obr. 6.4 Model lokálního požáru pro případ, kdy plameny zasahují strop

Potřebné údaje pro použití metody jsou:

kde:  $Q$  je rychlost uvolňování tepla při požáru [W]  
 $H_f$  svislá vzdálenost mezi stropem a podlahou [m]  
 $D$  průměr ohně [m]  
 $H_s$  svislá vzdálenost mezi podlahou a ohniskem zdroje požáru [m]

Proměnné:

- $H$  je svislá vzdálenost mezi stropem a zdrojem požáru [m]
- $Q^*$  součinitel rychlosti uvolňování tepla při požáru [-]
- $Q_H^*$  součinitel rychlosti uvolňování tepla při požáru [-]
- $z'$  svislá poloha virtuálního zdroje tepla [m]
- $L_H$  vodorovná délka plamene v místě stropu [m]
- $r$  vodorovná vzdálenost mezi osou ohně a bodem u stropu [m]

Postup výpočtu:

Stanovení  $H$  
$$H = H_f - H_s \quad (6.1)$$

Stanovení  $Q^*$  
$$Q^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 D^{2,5}} \quad (6.2)$$

Stanovení  $Q_H^*$  
$$Q_H^* = \frac{Q}{1,11 \times 10^6 H^{2,5}} \quad (6.3)$$

Stanovení  $z'$  
$$z' = 2,4 D (Q^{*2/5} - Q^{*2/3}) \quad Q^* < 1,00 \quad (6.4)$$

$$z' = 2,4 D (1,00 - Q^{*2/5}) \quad Q^* \geq 1,00 \quad (6.5)$$

Stanovení  $(L_H + H)/H$  
$$\frac{L_H + H}{H} = 2,90 Q_H^{*0,33} \quad (6.6)$$

Stanovení  $L_H$  pomocí hodnoty stanovené předchozím vztahem a z hodnoty  $H$

Stanovení tepelného toku  $q''$  v [kW/m<sup>2</sup>] ve vzdálenosti  $r$ , podle

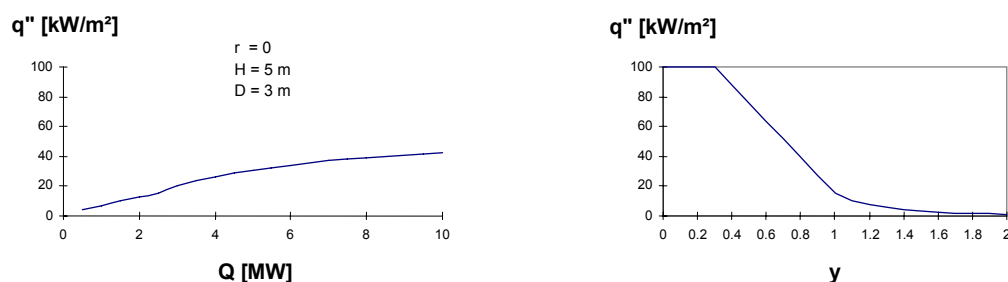
$$q'' = 100 \quad y < 0,30 \quad (6.7)$$

$$q'' = 136,30 - 121,00 y \quad 0,30 < y < 1,0 \quad (6.8)$$

$$q'' = 15 y^{-3,7} \quad y > 1,0 \quad (6.9)$$

kde 
$$y = \frac{r + H + z'}{L_H + H + z'} \quad (6.10)$$

Pokles tepelného toku  $q''$ , který dopadá na povrch stropu je funkcí součinitele  $y$  a jeho růst závisí na  $Q$ . Obě funkce jsou zobrazeny na obr. 6.5 pro  $r = 0$ ,  $H = 5$  m,  $D = 3$  m

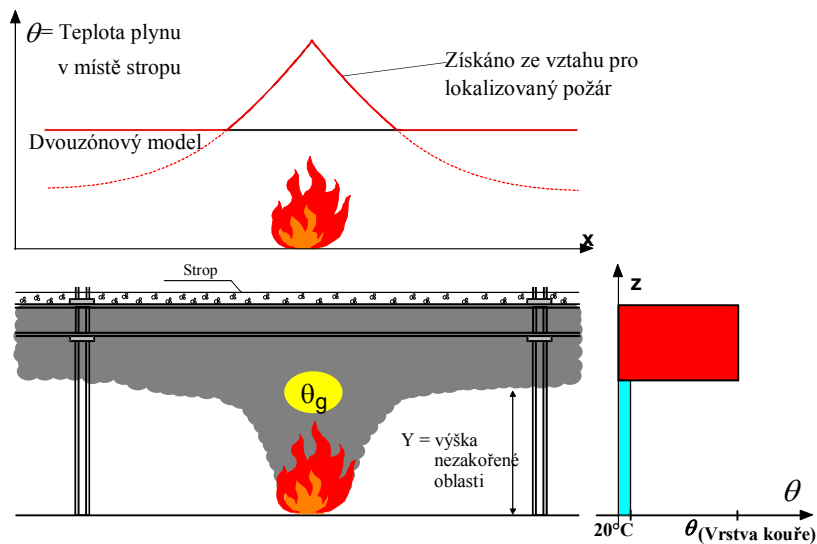


Obr. 6.5 Závislost tepelného toku  $q''$  na  $y$  a  $Q$

#### 6.1.4 Kombinace dvouzónového modelu a modelu lokalizovaného požáru

Rozložení teplot plynů v požárním úseku při lokalizovaném požáru lze předpovědět dvouzónovým modelem. Tento model předpokládá rovnoměrnou teplotu v každé uvažované vrstvě. Předpoklad rovnoměrné teploty v teplejší vrstvě je dostatečně výstižný pro stanovení množství kouře vzniklého v požárním úseku, pravděpodobnosti celkového vzplanutí, kolapsu střešní nebo stropní konstrukce, atd. Při výpočtu chování části konstrukce přímo nad zdrojem požáru není předpoklad rovnoměrné

teploty dostatečně výstižný, a proto se doporučuje dvouzónový model kombinovat s modelem lokalizovaného požáru popsaného v odstavci 6.1.3. Ve výpočtu jsou teploty v těsné blízkosti posuzované konstrukce, pro každý bod podél konstrukčního prvku, uvažovány největší hodnotou z obou předpovědních modelů.

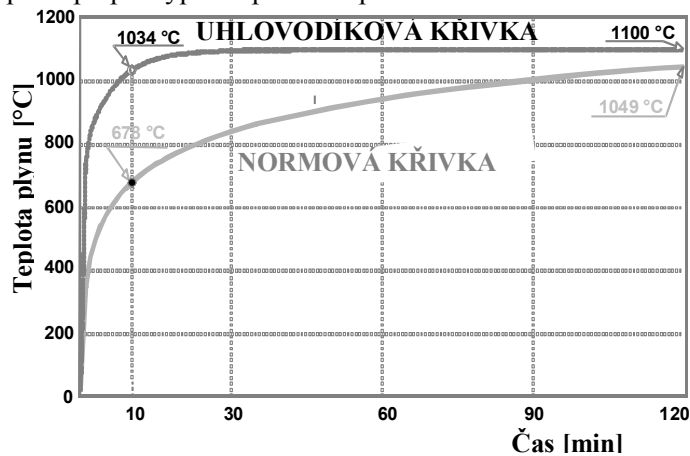


Obr. 6.6 Kombinace dvouzónového modelu s modelem lokalizovaného požáru

Tloušťku a teploty horkých plynů zakouřené zóny v úrovni ocelové konstrukce v různých vzdálenostech od zdroje požáru lze určit pomocí modelu TEFINAF [8]. Tento model předpovídá tloušťku zakouřené zóny s rovnoměrnou teplotou pomocí dvouzónového modelu a maximální teplotu přímo nad zdrojem požáru i v různých vzdálenostech od požáru pomocí modelu lokalizovaného požáru.

## 6.2 Plně rozvinutý požár

Rozložení teplot v požárním úseku při plně rozvinutém požáru lze předpovědět několika způsoby. Tato kapitola pojednává o nejvíce používaných metodách v současné praxi. Nominální normová teplotní křivka, definovaná v normách (ISO, uhlovodíková teplotní křivka), je základním z možných přístupů při výpočtu požární spolehlivosti konstrukcí.



Obr. 6.7 Nominální normová a uhlovodíková teplotní křivka

Řešení prostorovými modely není v tomto článku popsáno. Jsou pro běžné inženýrské výpočty příliš složité.



### 6.2.1 Parametrické teplotní křivky

Parametrická teplotní křivka využívá pro popis rozvoje požáru v budově hlavních fyzikálních závislostí ovlivňujících hoření. Na rozdíl od nominální normové křivky, závislost teploty v požárním úseku na čase, je popis doplněn o další parametry, které vystihují skutečný požár. Téměř všechny modely parametrických teplotních křivek popsanych v dostupné literatuře uvažují tyto parametry:

- geometrické charakteristiky požárního úseku;
- požární zatížení v požárním úseku;
- velikost otvorů v obvodových konstrukcích, střeše nebo stropu;
- typ obvodových konstrukcí, které tvoří hranice požárního úseku.

Parametrické křivky jsou založeny na předpokladu rovnoměrně rozložené teploty v celém prostoru požárního úseku, což omezuje jejich použití ve fázi po celkovém vzplanutí u požárních úseků běžných rozměrů. Přesto jsou tyto modely v porovnání s nominálními modely významným vylepšením při předpovědi rozložení teplot v požárním úseku. Výhodou je především snadný a rychlý analytický popis předpovědi, který nevyžaduje žádné sofistikované počítačové nástroje.

Návod pro výpočet parametrické teplotní křivky je obsažen v příloze A v EN 1991-1-2 [1], který je omezen následujícími předpoklady: velikost podlahové plochy požárního úseku se uvažuje maximálně do 500 m<sup>2</sup>, ve střešní nebo stropní konstrukci se nenacházejí otvory, výška prostoru nepřesahuje 4 m, koeficient  $b$  je v rozmezí 1.000 – 2.200 J/m<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>K a součinitel  $O$  v rozmezí 0,02 – 0,20. Výpočet koeficientu  $b$  a součinitele  $O$  je popsán níže.

Postup výpočtu uvedený v EN 1991-2-2 [23] přináší několik úprav:

- přesnější způsob stanovení koeficientu povrchů  $b$  pro stěny složené z různých materiálů;
- zavedení minimální délky trvání požáru pokud je řízen palivem (malé požární zatížení a velká plocha otvorů v obvodových konstrukcích);
- zavedení součinitele pro zohlednění vlivu nadměrné výměny hmoty a energie s okolním prostředím v případě požáru řízeného ventilací.

Postup stanovení parametrické teplotní křivky je platný pro jakoukoliv hodnotu koeficientu  $b$ .

Rozvoj teploty plynů v požárním úseku je určen podle:

$$\theta_g = 1,325 \left( 1 - 0,324 e^{-0,2t^*} - 0,204 e^{-1,7t^*} - 0,472 e^{-19t^*} \right) + 20^\circ\text{C} \quad (6.11)$$

kde

$$t^* = \Gamma t \quad (6.12)$$

$$\Gamma = \frac{(O/0,04)^2}{(b/1,160)^2} \quad (6.13)$$

$$O = A_v \sqrt{h} / A_t \quad (6.14)$$

kde:  $t$  je čas [hod]  
 $A_v$  celková plocha svislých otvorů [ $\text{m}^2$ ]  
 $h$  výška svislých otvorů [m]  
 $A_t$  celková plocha konstrukcí (stěn, stropu, podlahy, včetně otvorů) [ $\text{m}^2$ ]  
 $b$  koeficient povrchů [ $\text{J}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$ ], který je závislý na tepelné pohltivosti konstrukcí ohraničujících požární úsek (viz § 3.3 pro výpočet koeficientu  $b$ )

Průběh fáze rozhořívání je určen podle:

$$t_{\max} = \max\left(0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O ; t_{\lim}\right) \text{ [hod]} \quad (6.15)$$

kde:  $q_{t,d}$  je návrhová hodnota hustoty požárního zatížení pro  $A_t$  [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ]  
 $t_{\lim}$  20 minut, obdobný jako pro volné hoření  $\tau_F$  podle přílohy B v EN 1991-1-2 [1].

Podle rovnice 6.15 mohou nastat dva možné případy:

- buď je průběh fáze zahřívání vypočtené podle prvního členu rovnice 6.15,  $0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O$ , delší než limitní hodnota času  $t_{\lim}$ . Potom jsou rovnice 6.11 až 6.14 a 6.21 až 6.23 uvažovány bez jakýchkoliv úprav;
- nebo je průběh fáze zahřívání vypočtené podle prvního členu rovnice 6.15,  $0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O$ , kratší než limitní hodnota času  $t_{\lim}$ . V tomto případě jsou rovnice 6.11 až 6.14 modifikovány koeficientem otvorů  $O_{\lim}$ , který lze vyjádřit jako:

$$O_{\lim} = 0,1 \times 10^{-3} q_{t,d} / t_{\lim} \quad (6.16)$$

Rovnice 6.15 a 6.16 jsou modifikovány následujícím způsobem:

$$t_{\lim}^* = \Gamma_{\lim} t \quad (6.17)$$

$$\Gamma_{\lim} = \frac{(O_{\lim}/0,04)^2}{(b/1,160)^2} \quad (6.18)$$

kde  $t_{\lim}^*$  nahrazuje v rovnici 6.11 hodnotu  $t^*$ .

Vliv ventilace během fáze zahřívání, v případě že  $t_d = t_{\lim}$ , lze popsat:

*pokud*  $O > 0,04$  a  $q_{t,d} < 75$  a  $b < 1,160$

$$\text{potom } k = 1 + \left( \frac{O - 0,04}{0,04} \right) \left( \frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left( \frac{1.160 - b}{1.160} \right) \quad (6.19)$$

$$\text{a } \Gamma_{\text{lim}} = k \frac{(O_{\text{lim}}/0,04)^2}{(b/1.160)^2} \quad (6.20)$$

Teplotní křivka ve fázi chladnutí je dána vztahy:

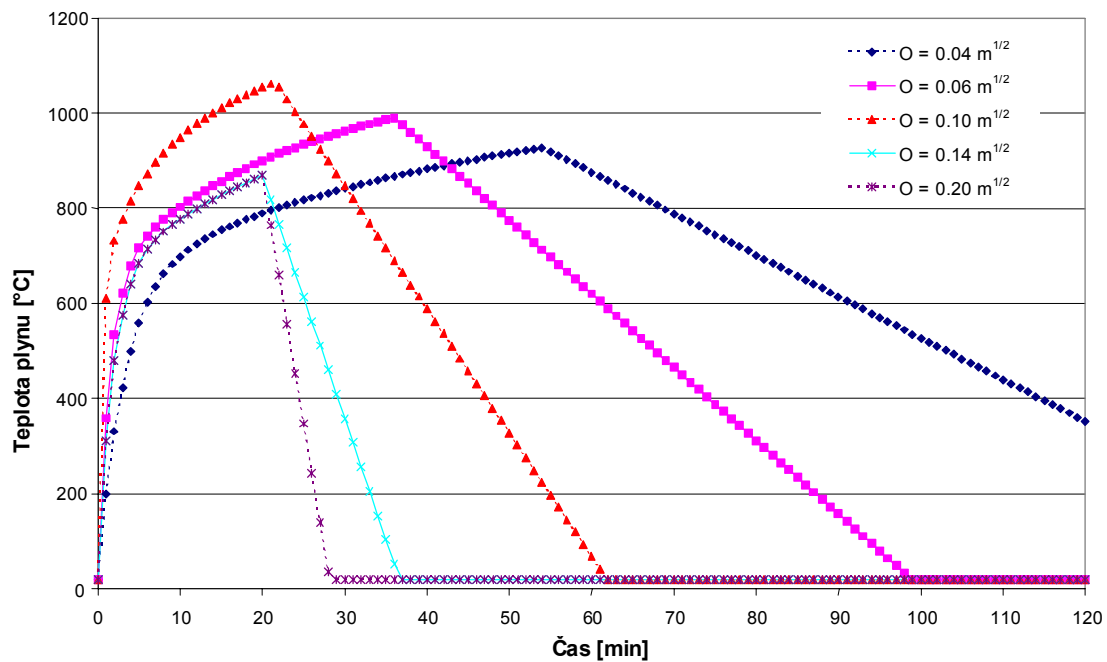
$$\Theta_g = \Theta_{\text{max}} - 625(t - t_{\text{max}}^* \cdot x) \quad \text{pro } t_d^* \leq 0,5 \quad (6.21)$$

$$\Theta_g = \Theta_{\text{max}} - 250(3 - t_{\text{max}}^*)(t - t_{\text{max}}^* \cdot x) \quad \text{pro } 0,5 \leq t_d^* \leq 2,0 \quad (6.22)$$

$$\Theta_g = \Theta_{\text{max}} - 250(t - t_{\text{max}}^* \cdot x) \quad \text{pro } 2,0 \leq t_d^* \quad (6.23)$$

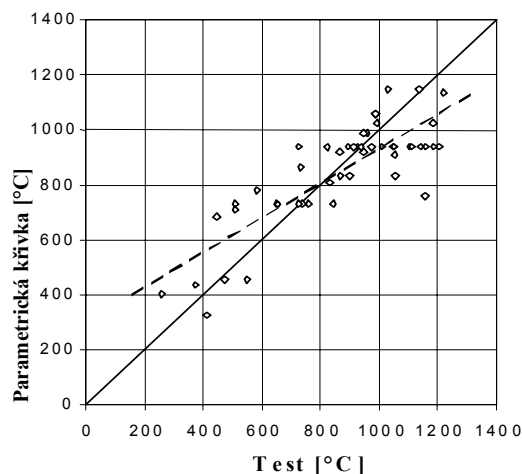
kde  $\theta_{\text{max}}$  je největší teplota na konci fáze zahřívání podle rovnice 6.11, kde  $t = t_d$  podle 6.15.

Příklad stanovení parametrické požární křivky je zobrazen na následujícím obrázku, požární zatížení  $q_{t,d} = 180 \text{ MJ/m}^2$ ,  $b = 1.160 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$ , koeficient otvorů  $O$  se uvažuje v rozsahu od  $0,04 \text{ m}^{1/2}$  do  $0,20 \text{ m}^{1/2}$ .



Obr. 6.8 Příklady parametrických požárních křivek [1]

Na obr. 6.9 jsou porovnány nejmenší teploty plynů zjištěné z experimentů [12] a pokročilých předpovědních modelů s hodnotami parametrických křivek. Původní korelační součinitel o hodnotě 0,19 stanovený v ENV 1991-2-2 [23], se nyní uvažuje hodnotou 0,83.



Obr. 6.9 Maximální dosažená teplota plynu v požárním úseku

### 6.2.2 Zónové modely

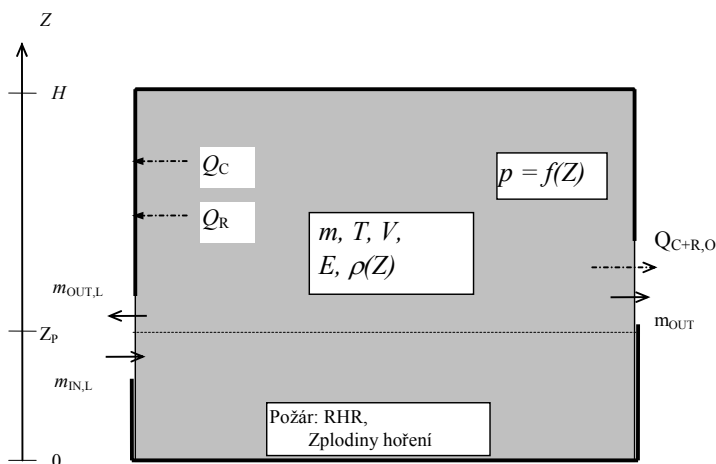
Princip zónových modelů byl již vysvětlen v odstavci 6.1.1 na dvouzónovém modelu požáru. Rozsah použití dvouzónového modelu je zaměřen především na fázi před celkovým vzplanutím. Pro předpověď rozvoje teplot u plně rozvinutého požáru je vhodnější použít jednozónový model.

### 6.2.3 Jednozónový model

Jednozónové modely požáru jsou platné pro fázi po celkovém vzplanutí a jsou založeny na předpokladu rovnoměrné teploty plynu v celém požárním úseku v průběhu požáru.

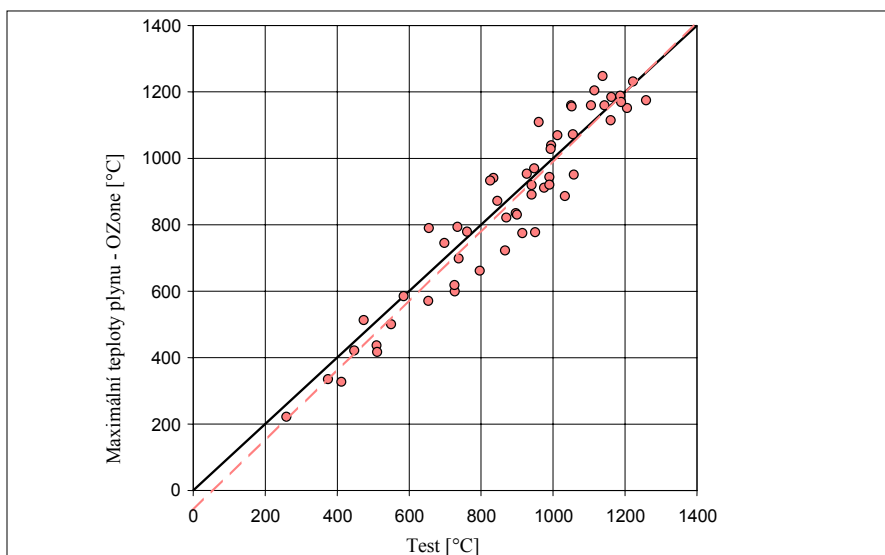
Vstupní údaje potřebné pro výpočet jsou shodné s údaji u dvouzónových modelů. V porovnání se vstupy pro parametrické předpovědní křivky jsou podrobnější.

Na následujícím obrázku je zobrazen jednozónový model požárního úseku.



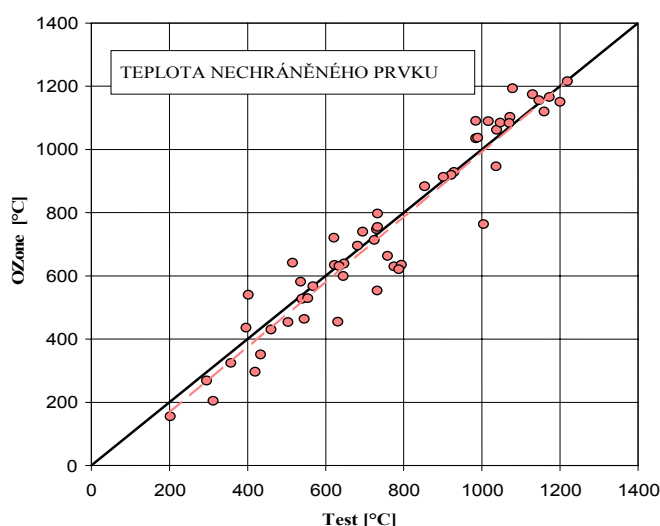
Obr. 6.10 Požární úsek vyšetřovaný jednozónovým modelem požáru

V rámci projektů ECSC a NFSC 1 & 2 [11,12] byl na University of Liège společně s PROFILARBED -Research vyvinut program OZone, který je založen na principu zónových modelů. Tento software byl využit pro porovnání s výsledky 54 experimentů. Na obr. 6.11 jsou porovnány největší teploty plynu v požárním úseku změřených při experimentech s vypočtenými v programu OZone. Body v grafu představují výsledky experimentů a plná úsečka jejich ideální polohu podle programu OZone. Pomocí lineární regrese byla proložena všemi body přímka, viz čárkovaná úsečka.



Obr. 6.11 Porovnání maximálních teplot plynu naměřených a vypočtených programem OZone

Další porovnání nabízí obr. 6.12. Pro každý experiment byl stanoven rozvoj teploty v běžném nechráněném ocelovém průřezu HEB 200,  $A_m/V = 147 \text{ m}^{-1}$ , který byl převeden na teplotu plynu při experimentu a při výpočtu programem OZone.



Obr. 6.12 Porovnání maximálních teplot naměřených a vypočtených u nechráněného ocelového prvku

### 6.3 Kombinace jednozónových a dvouzónových modelů, výběr modelu

Pokud byly stanoveny všechny potřebné charakteristiky požáru, jako jsou např. křivka  $RHR$ , geometrické údaje požárního úseku nebo charakteristiky dělicích konstrukcí, je dalším nezbytným krokem správný výběr modelu podle uvažovaného požárního scénáře. Výběr závisí na rozsahu oblastí použití každého z modelů. Obvykle jsou počáteční fáze požáru modelovány pomocí dvouzónového modelu, který v určitém okamžiku přechází v jednozónový model. Otázkou je, kdy a jak tento přechod nastává.

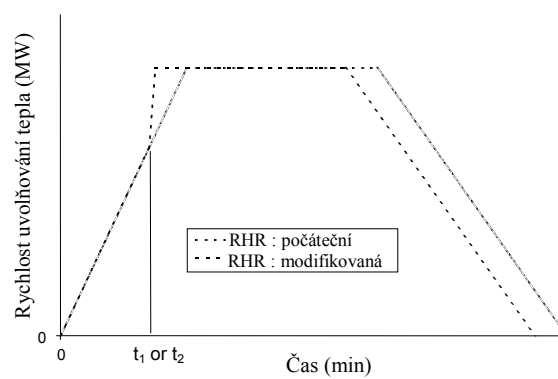
Dvouzónový model požáru poskytuje dvě základní hodnoty:

- teplotu horní vrstvy v požárním úseku  $T_u$ ;
- tloušťky obou vrstev  $H_i$ .

Tyto hodnoty určují rozsah aplikace modelu. Použití dvouzónového modelu je omezeno následujícími podmínkami, viz obr. 6.14:

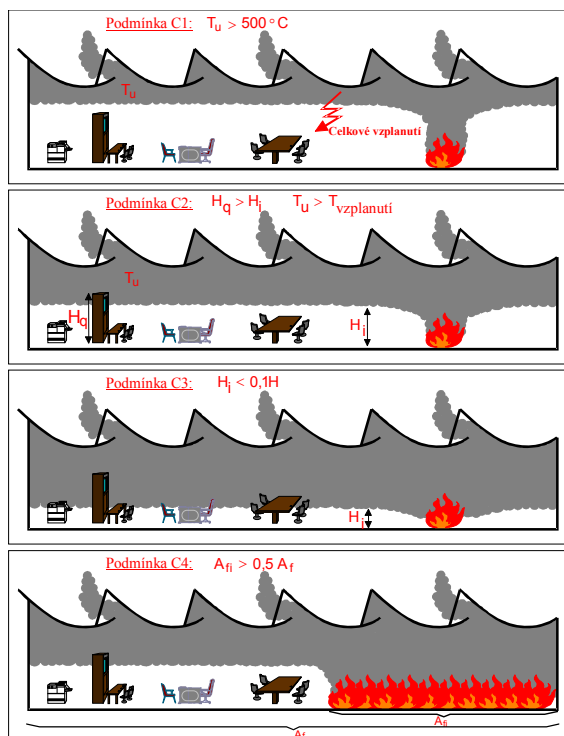
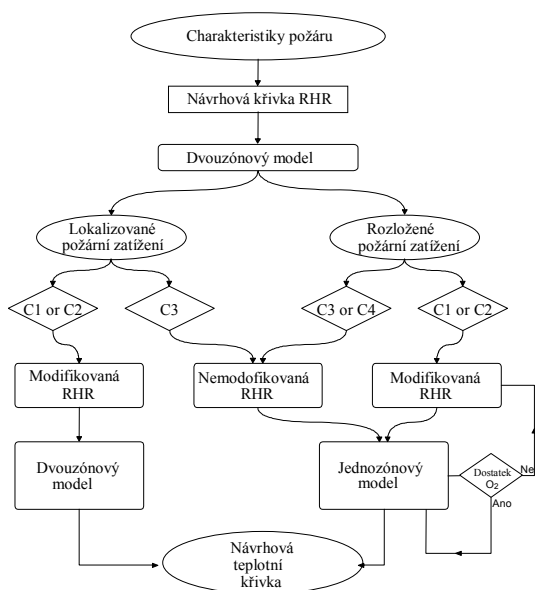
- Podmínka 1 (C1):  $T_u > 500^\circ\text{C}$ ; vysoká teplota zplodin hoření (vyšší než  $500^\circ\text{C}$ ) vede k celkovému vzplanutí veškerého požárního zatížení vlivem sálání.
- Podmínka 2 (C2):  $H_i < H_q$  a  $T_u > T_{\text{ignition}}$ ; pokud dojde ke snížení tloušťky spodní vrstvy ( $H_i$ ) tak, že hořlavé materiály se nacházejí v horní vrstvě kouře, a pokud je v horní vrstvě vysoká teplota (vyšší než  $T_{\text{ignition}}$ , kolem  $300^\circ\text{C}$ ), potom dojde k šíření požáru samovznícením.
- Podmínka 3 (C3):  $H_i < 0,1 H$ ; tloušťka spodní vrstvy je minimální, což neodpovídá předpokladu dvouzónového modelu.
- Podmínka 4 (C4):  $A_{fi} > 0,5 A_f$ ; velikost hořící plochy je v porovnání s celkovou plochou požárního úseku tak velká, že se již nejedná o lokalizovaný požár.

V případě splnění podmínek 1 a 2 se přistupuje k modifikaci rychlosti uvolňování tepla  $RHR$  v počáteční fázi (popis dvouzónovým modelem) pro popis jednozónovým modelem. Příklad modifikace je uveden na obr. 6.13.



Obr. 6.13 Návrh křivky rychlosti uvolňování tepla  $RHR$  při požáru

Výše zmíněný postup výpočtu je shrnut ve vývojovém diagramu na obr. 6.14.



Obr. 6.14 Kombinace jednozónového a dvouzónového modelu

## 7 MECHANICKÁ ZATÍŽENÍ PODLE EUROKÓDŮ

V případě požáru lze účinek mechnických zatížení působících na konstukci uvažovat podle následujícího vztahu (viz rovnice 6.11b v EN 1990):

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,j} + (\Psi_{1,1} \text{ nebo } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- kde:  $G_{k,j}$  je charakteristická hodnota stálého zatížení  
 $Q_{k,1}$  charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení  
 $Q_{k,i}$  charakteristická hodnota vedlejšího proměnného zatížení  
 $\psi_{1,1}$  součinitel pro častou hodnotu proměnného zatížení  
 $\psi_{2,i}$  součinitel pro kvazistálou hodnotu proměnného zatížení

Doporučené hodnoty součinitelů  $\psi_1$  a  $\psi_2$  jsou uvedeny v tabulce A1.1 v EN 1990. V národních přílohách mohou být tyto hodnoty upraveny.

Tab. 7.1 Doporučené hodnoty součinitelů  $\psi$  pro pozemní stavby

Zatížení	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_0$
Kategorie užitných zatížení pro pozemní stavby, viz norma (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, $30$ kN $<$ 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

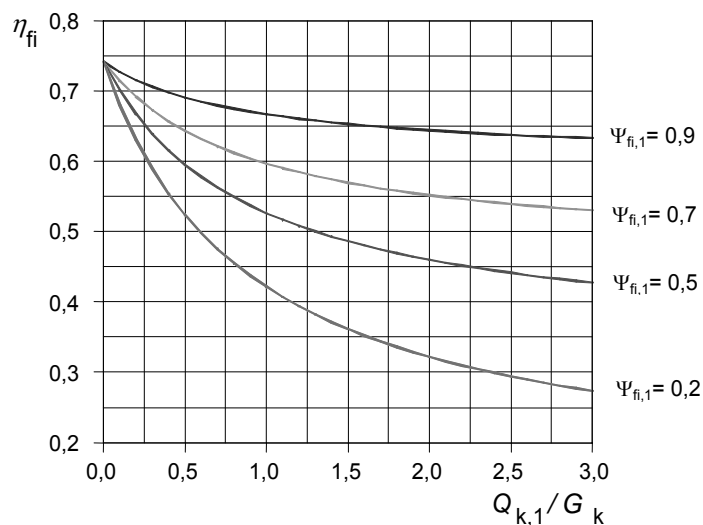
Další důležitou veličinou používanou při požárním návrhu podle Eurokódů je redukční součinitel účinku zatížení při požární situaci  $\eta_{fi,t}$ , který je definován jako  $\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{E_d}$ , kde  $E_d$  je návrhový účinek

zatížení při pokojové teplotě a  $E_{d,fi}$  je návrhový účinek zatížení při zvýšené teplotě. Redukční součinitel lze určit rovněž podle následujícího vztahu:

$$\eta_{fi,t} = \frac{G_k + \psi_{fi,t} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

kde  $\gamma_{Q,1}$  je dílčí součinitel pro hlavní proměnné zatížení.

Redukční součinitel  $\eta_{fi,t}$  závisí především na součiniteli  $\psi_{1,1}$ , který se mění podle kategorie zatížení v budově. V prEN 1993-1-2 (část pro požární zatížení ocelových konstrukcí) a prEN 1994-1-2 (část pro požární zatížení spřažených konstrukcí) je uveden graf závislosti  $\eta_{fi,t}$  na poměru  $Q_{k,1}/G_k$  a součiniteli  $\psi_{1,1}$ , viz obr. 7.1.



Obr. 7.1 Závislost redukčního součinitele  $\eta_{fi,t}$  na poměru  $Q_{k,1}/G_k$  a součiniteli  $\psi_{1,1}$



## 8 ZÁVĚR

Část 1 shrnuje možné způsoby stanovení rozvoje teplot v čase v požárním úseku. Pro zjištění teploty v jednotlivých částech konstrukce je nezbytné určit její přestup do konstrukce, který je způsoben prouděním a sáláním horkých plynů, plamenů nebo horkých povrchů konstrukcí. Důležitou úlohu při přestupu tepla představují součinitel emisivity povrchů a součinitel přestupu tepla prouděním.

Zahřívání konstrukce závisí na typu konstrukčního prvku, např. ocelový nebo spřažený ocelobetonový prvek, a na způsobu protipožární ochrany. Na přestup tepla do konstrukce se zaměřuje část 2. Rozložení teplot v konstrukci, kombinací zatížení při požáru a jeho termomechanickými vlastnostmi se zabývá část 3.

## 1 LITERATURA

- [1] CEN; EN 1991-1-2, Eurocode 1- Actions on structures, Part 1.2-Actions on structures exposed to fire. CEN Central Secretariat, Brussels, November 2002.
- [2] BSI 96/540493 "The use of Fire Safety Engineering in Buildings" (Draft 27 march 1996)
- [3] Initial Fires: Lund University, Sweden. Institute of Fire Safety Engineering. ISSN 1102-8246. ISRN LUTVDG/TVBB--3070--SE. April 1993.
- [4] ARGOS Theory Manuel (draft 5)-Danish Institute of fire technology - 22/07/92.
- [5] Peacock, Jones, Bukowski and Forney. NIST Handbook 146, Volume II - Technical Reference Guide for the Hazard I Fire Hazard Assessment Method - Version 1 - June 1991.
- [6] Babrauskas Vytenis: "Burning Rates" Section 3/Chapter 1: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Second Edition - 13th April 1995.
- [7] NKB Committee and Works reports 1994:07E: "Performance and Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation"; Nordic Committee on Building Regulations.
- [8] "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Large Compartments"; Final report CEC Agreement 7210/ SA210, 317,517,618,832-February 1997.
- [9] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Closed Car Parks" ECSC Research 7210-SA/211/318/518/620/933; 1993-1996; Final report 1999 – EUR 18867 EN
- [10] CEN; prEN1990, Eurocode – Basis of structural design, 2001.
- [11] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Competitive steel buildings through natural fire safety concept." ECSC Research 7210-SA/125,126,213,214,323,423,522,623,839,937, 1994-98; Final Report 2002 – EUR 20360 EN.
- [12] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Natural fire safety concept –Full scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool." ECSC Research 7210-060, 1997-2000; Final Report 2003 - EUR 20580 EN.
- [13] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Valorisation project - Natural Fire Safety Concept." ECSC Research 7215-PA/PB/PC –042-057, D-E-F-I-NL-UK & ECCS, 1999-2001.
- [14] DD 0000 The Use of Fire Safety Engineering in Buildings. Draft for Approval for Publication; 27. March 96, Technical Committee FSH / 24. 96/540493.
- [15] Fontana M.: "Required Fire Resistance of Building Elements" - Part A: Fire Load in Buildings, Probability Density Function - , NFSC WG4, Zürich, March 1996.
- [16] Background document Eurocode 1 (ENV 1991) Part 1 : Basis of Design, Working Document N° 94 of ECCS, March 1996.
- [17] Hasemi Y. and Tokunaga Tazo: "Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames". Fire Science and Technology, Vol.4, N°1, 1984.  
Ptchelintsev A., Hasemi Y., Nikolaenko M., "Numerical Analysis of Structures exposed to localized Fire", ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.  
Wakamatsu T., Hasemi Y., Yokobayashi Y., Ptchelintsev A.: "Experimental Study on the Heating Mechanism of a Steel Beam under Ceiling exposed to a localized Fire".

- Hasemi Y., Yokobayashi Y. , Wakamatsu T., Ptchelintsev A.: "Fire Safety of Building Components Exposed to a Localized Fire"- Scope and Experiments on Ceiling/Beam System Exposed to a Localized Fire, ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.
- [18] Hietaniemi J: " Risk-Based Fire Resistance Requirements" ECSC Research 7210-PR-251, 2000-2003.
- [19] Kumar S., Welch S., "Natural Fire Safety Concept – The development of a CFD-Based Engineering methodology for evaluating thermal action on steel and composite structures" 7210-PR184, 1999-2002.
- [20] iABSE Colloquium: Basis of Design and Actions on Structures; Background and applications of EC 1; Delft 1996.
- [21] Evaluation du Risque d'Incendie", Méthode de Calcul, Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, documentation n° 81, 1984.
- [22] Thomas P.H.: "Design Guide Structural Fire Safety", Workshop CIB W14, February 1995.
- [23] CEN; ENV1991-2-2, Eurocode 1– Basis of s design and actions on structures- Part 2-2: Actions on structures- Actions on structures exposed to fire, 1995.
- [24] Cajot L-G, Haller M., et al: "Probabilistic Quantification of a Steel Structure highlighting the potential of steel versus other materials" ECSC Research 7210-PA/PB/PC/PD-249, 2000-2003.