



## **Aplikace pokročilých modelů pohybu osob a dynamiky požáru pro bezpečnou evakuaci osob a analýzu rizik**

**Certifikovaná metodika č. CERO 1/2016**

Název projektu:

VG20132015120 Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru

Poskytovatel projektu:

Ministerstvo vnitra České republiky

Řešitel projektu:

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební



Kolektiv autorů metodiky:

doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.  
*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební*  
Ing. Petr Beneš, CSc.  
*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební*  
kpt. Ing. Luděk Vrána  
*Hasičský záchranný sbor Jihomoravského kraje*

Oponentní posudky zpracovali:

plk. Ing. Zdeněk Salátek  
*Hasičský záchranný sbor hl. m. Prahy, ředitel odboru prevence*  
prof. Ing. Alois Materna, CSc. MBA  
*Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1. místopředseda komory*  
prof. Ing. František Wald, CSc.  
*České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, vedoucí Katedry ocelových a dřevěných konstrukcí*

Dokument vznikl v rámci projektu VG20132015120 Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru, podpořeného Ministerstvem vnitra České republiky v rámci Programu bezpečnostního výzkumu ČR.

Brno 2015



## Rozsah použití metodiky

Metodika je primárně zaměřena na aplikaci modelů pohybu osob při analýze evakuačního procesu, nenahrazuje ale manuál uživatelem preferovaného softwarového nástroje. Jejím cílem je vymezit skupinu faktorů a vstupních údajů, které musí uživatel modelu pohybu osob a šíření požáru zohlednit, a nalézt minimální standardy, které je třeba při jejich zpracování dodržet.

Metodika je použitelná v situacích, kdy je aplikován odlišný postup od platné soustavy českých technických norem, konkrétně pak v situaci využití modelu pohybu osob a požáru především pro analýzu evakuačního procesu a proudění osob obecně. Důvodem pro tento odlišný postup je situace, kdy nasazení modelu znamená výhodu oproti klasickému normovému postupu. Metodika se proto dotýká využití zahraničních standardů v požárním inženýrství a reaguje na cíl *Koncepce požární prevence v ČR do roku 2016*, která byla zpracována Generálním ředitelstvím Hasičského záchranného sboru ČR, a která předpokládá zavedení systému pro posuzování projektů řešených požárním inženýrstvím.

Cílovou skupinou metodiky je proto široké spektrum autorizovaných inženýrů činných ve výstavbě, pracovníků Hasičského záchranného sboru ČR, Zdravotnické záchranné služby, Policie ČR, Městské policie a dalších složek.

## Novost postupu

Novost metodického postupu spočívá ve vymezení způsobu ověření modelu pohybu a osob ve vztahu ke vstupním údajům inženýrského posouzení evakuačního procesu. Softwarové nástroje nutné chápat pouze jako za určitých podmínek efektivní pomůcku, která však nemůže a nesmí nahrazovat erudici autorizovaného inženýra s příslušnou specializací nebo pracovníka některého ze složek IZS. Ověření schopností konkrétního nástroje reprodukovat specifické faktory pohybu osob v průběhu evakuačního procesu a doložení tohoto ověření jako součást inženýrského posouzení je v současné době celosvětově intenzivně studovanou problematikou, která dosud není standardizována.

Samostatná část metodického postupu je věnována využití modelů pohybu osob pro analýzu rizik v situacích bez přítomnosti procesu evakuace, kdy hrozí vznik kritické situace zejména vlivem vysoké hustoty osob v konkrétním místě. Jedná se zejména o události spojené s vysokou návštěvností osob, jakými jsou sportovní nebo kulturní akce.

## Struktura dokumentu

Metodika rozdělena do tří navazujících částí:

### Zásady evakuačního procesu

Aplikace modelů pohybu osob a požáru znamená použití specifického postupu jako dílčího nástroje v komplexním inženýrském posouzení evakuačního procesu. Kapitola se věnuje rozdělení evakuačního procesu na jednotlivé fáze, aktuálnímu stavu v konceptu srovnání doby dostupné a potřebné pro evakuaci, a zdůrazňuje dobu před pohybem jako velmi variabilní a zároveň klíčovou časovou komponentu v rámci doby evakuace jako celku.

## **Vstupní údaje pro inženýrské posouzení**

Uživatel modelu je při inženýrském posouzení evakuačního procesu povinen zohlednit základní charakteristiky budovy, osob, požáru, a z toho vyplývající aktuální podmínky v budově, které vymezují kritéria přijatelnosti pro evakuaci. Tyto charakteristiky jsou v případě použití softwarového nástroje současně jeho některými vstupními údaji. Softwarový nástroj je ale vždy především analytickou pomůckou, který slouží jako doplnění a rozšíření inženýrského posouzení obecně. Kapitola shrnuje příslušné vstupní údaje a zdůrazňuje skutečnost, že v případě existující nejistoty u některé ze vstupních hodnot je třeba tuto skutečnost zohlednit nejčastěji vložením časové rezervy do doby potřebné pro evakuaci.

## **Modely pohybu osob a požáru**

Kapitola se zaměřuje primárně na verifikaci a validaci modelu pohybu osob, okrajově se také věnuje rozdělení modelů pohybu osob do jednotlivých kategorií. Problematika ověření modelů pohybu osob je v současné době předmětem intenzivního výzkumu, aktuálně byly zahájeny práce na standardizaci prostřednictvím mezinárodní normy ISO v práci pracovní skupiny ISO/TC 92/SC 4/WG 7, kapitola proto shrnuje aktuální dění v této oblasti. Samostatná část je věnována aplikaci modelů pohybu osob mimo evakuační proces, zejména při posouzení rizik vyplývajících z velké koncentrace osob při sportovních nebo kulturních událostech.

## Doporučená literatura

Seznam literatury uvedený na závěr textu obsahuje více než šest desítek odborných studií a příruček, na které v různých částech odkazuje. Z tohoto obsáhlého seznamu lze uvést několik klíčových zdrojů, na které by se měl uživatel textu zaměřit přednostně.

- *ISO/TR 13387-8 Fire safety engineering — Part 8: Life safety — Occupant behaviour, location, and condition.* Základní standard, ze kterého jsou odvozeny postupy pro inženýrské posuzování evakuačního procesu. Dosud platná norma byla vydána v roce 1995.
- *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.* Celosvětově uznávaná referenční příručka v oboru požárního inženýrství. Aktuálně je k dispozici v pátém vydání pro rok 2016.
- *Fire Safety Engineering — CIBSE Guide E.* Příručka požárního inženýrství britské organizace CIBSE, je zaměřena primárně na britské standardy. Aktuálně je k dispozici ve třetím vydání pro rok 2010 (odlišeno červeným pruhem).
- *Evacuation Modelling Trends.* Kniha shrnující nejnovější trendy v problematice modelování evakuace. Vydána v roce 2015.
- *Egress Design Solutions: A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning.* Příručka primárně určená pro stavební inženýry a projektanty, sestavená přední inženýrskou společností ARUP. Vydána v roce 2007.
- *Introduction to Crowd Science.* Kniha shrnující základní postupy v disciplíně managementu davu, není primárně zaměřena na evakuační proces. Vydána v roce 2014.



## Klíčové pojmy

- **Evakuace**  
Souhrn opatření zabezpečujících přemístění osob, zvířat a věcných prostředků v daném pořadí priority z míst ohrožených mimořádnou událostí do míst, ve kterých je zajištěno pro osoby náhradní ubytování a stravování, pro zvířata ustájení a pro věcné prostředky uskladnění. Evakuace je komplexní proces, který se skládá z řady dílčích kroků.
- **Doba dostupná pro evakuaci**  
Časový interval, po který panují v místě evakuace přijatelné podmínky pro evakuované osoby.
- **Doba potřebná pro evakuaci**  
Strukturovaný časový interval od okamžiku vznícení požáru (či vzniku jiného ohrožení), po dokončení evakuace. Je složený z řady dílčích intervalů.
- **Doba evakuace**  
Časový interval složený z doby před pohybem a doby pohybu.
- **Doba před pohybem**  
Časový interval od první výstražné zprávy do zahájení evakuace. U jednotlivých osob se může velmi lišit, obtížně se kvantifikuje, může být delší než doba evakuace a na evakuační proces má proto zásadní dopad.
- **Doba pohybu**  
Časový interval od zahájení evakuace po opuštění ohrožené budovy nebo oblasti.
- **Rozpoznání**  
Období od spuštění poplachu po okamžik, kdy osoby na spuštěný poplach začínají reagovat.
- **Odezva**  
Časový interval od okamžiku, kdy si osoby uvědomí vznik kritické situace, až do okamžiku, kdy se rozhodnou pro konkrétní způsob strategie evakuace.
- **Rezerva přijatelných podmínek**  
Rozdíl mezi délkou doby dostupné a doby potřebné pro evakuaci. Přírozenou motivací je hledat takové řešení, aby rezerva přijatelných podmínek byla z důvodu neodstranitelné neurčitosti některých vstupů posouzena co největší.
- **Inženýrské (specifické) posouzení**  
Postup odlišný od normového postupu, jeho účelem je ekonomicky efektivní návrh požárně bezpečnostních opatření při dosažení přijatelné úrovně bezpečnosti.
- **Podmínky osob**  
Zahrnují veškeré vlivy požáru, které mění chování osoby nebo způsobují ztrátu jejích schopností.
- **Model**  
Účelová reprezentace reálného děje nebo některé jeho části. Nevyhnutelně se tedy jedná o zjednodušení reality.
- **Nástroj**  
Pro účely dalšího textu se nástrojem rozumí příslušný softwarový nástroj pro modelování pohybu osob, případně požáru.



- **Simulace**

Proces napodobení reálného děje prostřednictvím pomocí vytvořeného modelu.

- **Verifikace**

Ověření souladu modelu s požadavky uživatele, které vyplývají z řešeného problému.

- **Kalibrace**

Modifikace jednotlivých parametrů modelu tak, aby se jeho chování maximálně shodovalo s reálným chováním předlohy modelu. Vzhledem ke stochastické povaze modelu pohybu osob je přípustné provádět jeho kalibraci pouze úpravou jeho parametrů, které nejsou známy či změřeny, kalibraci modelů požáru je vzhledem k jeho deterministické povaze provádět nelze.

- **Validace**

Konečný test modelu, který musí být od kalibrace zcela oddělen, a to především z pohledu použitých dat, data musí být rozdílná nejen fyzicky, ale i typově.



# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>13</b>
<b>2 Zásady evakuačního procesu</b>	<b>15</b>
2.1 Strategie evakuace osob . . . . .	15
2.1.1 Současná evakuace osob . . . . .	15
2.1.2 Postupná evakuace osob . . . . .	16
2.1.3 Setrvání osob na místě . . . . .	16
2.1.4 Evakuace osob do chráněného prostoru . . . . .	16
2.2 Doba pro evakuaci osob . . . . .	17
2.2.1 Doba dostupná pro evakuaci (ASET) . . . . .	17
2.2.2 Doba potřebná pro evakuaci (RSET) . . . . .	17
2.2.3 Význam doby před pohybem pro posouzení RSET . . . . .	20
2.3 Shrnutí . . . . .	22
<b>3 Vstupní údaje pro inženýrské posouzení</b>	<b>23</b>
3.1 Charakteristika budovy . . . . .	23
3.2 Charakteristika osob . . . . .	24
3.3 Podmínky osob . . . . .	25
3.3.1 Psychologické účinky požáru . . . . .	25
3.3.2 Kombinace fyziologických a psychologických účinků . . . . .	26
3.4 Charakteristika požáru . . . . .	30
3.4.1 Návrhové požární scénáře . . . . .	30
3.4.2 Fáze požáru . . . . .	32
3.4.3 Křivky rychlosti uvolňování tepla . . . . .	32
3.4.4 Rozdělení rychlosti požáru . . . . .	34
3.4.5 Teplotní křivky . . . . .	34
3.5 Shrnutí . . . . .	35
<b>4 Modely pohybu osob a požáru</b>	<b>37</b>
4.1 Základní kategorie modelů evakuace osob . . . . .	37
4.2 Detailní faktory ovlivňující aplikaci modelu . . . . .	38
4.2.1 Účel modelu . . . . .	38
4.2.2 Reprezentace prostoru . . . . .	38
4.2.3 Perspektiva modelu . . . . .	38
4.2.4 Behaviorální vlastnosti modelu . . . . .	39
4.2.5 Model pohybu . . . . .	39
4.2.6 Požární data . . . . .	40
4.2.7 Využití modelu požáru . . . . .	41
4.2.8 Shrnutí . . . . .	42

4.3	Verifikace, kalibrace a validace modelu . . . . .	42
4.3.1	Proces verifikace modelu . . . . .	43
4.3.2	Proces kalibrace modelu . . . . .	52
4.3.3	Proces validace modelu . . . . .	53
4.3.4	Nejistota vstupu a výstupu modelu . . . . .	54
4.3.5	Základní statistické veličiny pro vyhodnocení výsledků . . . . .	55
4.4	Aplikace modelu pohybu osob mimo evakuační proces . . . . .	56
4.4.1	Prostorové nároky jednotlivce . . . . .	57
4.4.2	Aplikace úrovně kvality pěší dopravy . . . . .	57
4.5	Doporučená struktura prezentace výsledků . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>59</b>
<b>A</b>	<b>Vybrané zdroje pro charakteristiku osob</b>	<b>61</b>
A.1	Věkové složení . . . . .	61
A.2	Reakční doba . . . . .	61
A.3	Rychlost pohybu . . . . .	62
A.3.1	Rychlost pohybu po rovině . . . . .	64
A.3.2	Rychlost pohybu po schodech . . . . .	64
<b>B</b>	<b>Srovnávací analýza modelů požáru</b>	<b>67</b>
B.1	Radiační model . . . . .	69
B.2	Model kouře . . . . .	69
B.3	Tepelná vodivost materiálu . . . . .	70
B.4	Kombinace submodelů . . . . .	70
B.5	Paralelizace výpočtu . . . . .	70
<b>C</b>	<b>Stanovení prostorových nároků osob</b>	<b>73</b>
C.1	Individuální prostor . . . . .	73
C.2	Statická hustota skupiny osob . . . . .	74
C.3	Dynamická hustota skupiny osob . . . . .	74
C.4	Dynamické charakteristiky skupiny . . . . .	75
<b>D</b>	<b>Stanovení úrovně kvality pěší dopravy</b>	<b>79</b>
D.1	Základní metoda hodnocení úrovně kvality pěší dopravy . . . . .	79
D.2	Hodnocení úrovně kvality pěší dopravy podle dalších standardů . . . . .	81

# 1 Úvod

Pokročilé softwarové nástroje dnes umožňují relativně komfortně a efektivně analyzovat evakuační proces a nepříznivé podmínky působící na evakuované osoby, pochopit interakci osob mezi sebou a také mezi davem a okolním prostředím. S jejich pomocí lze testovat široké spektrum scénářů a analyzovat jejich dopady způsobem, který by byl ve skutečném prostředí klasickým experimentem možný pouze obtížně, případně by nebyl proveditelný vůbec.

Každý model je nicméně omezen vstupními údaji, které do něho vložíme, a znalostí a zkušenostmi uživatele, který jej aplikuje. Od počátku chybné předpoklady i nejlepší nástroj z principu nedokáže transformovat do korektních závěrů, správná vstupní data vložená do nevhodného nástroje pro daný účel budou rovněž znamenat nesprávné výsledky.

Nelze zároveň očekávat, že jakýkoliv dnešní model je schopen poskytnout úplný a dokonalý obraz o všech existujících vstupních údajích a výstupních hodnotách popisujících libovolný ze zvolených scénářů, a rovněž reprodukovat všechny behaviorální a fyziologické parametry všech osob v budově. Model bývá obecně definován jako účelová reprezentace reálného děje nebo některé jeho části, nevyhnutelně se tedy jedná o zjednodušení reality. Při analýze řešení kterékoliv konkrétní budovy je proto důležité vzít v úvahu všechny parametry, které mohou ovlivnit bezpečnost života jejích uživatelů a zvolit odpovídající způsob hodnocení.

Při tomto hodnocení je nezbytné zohlednit konkrétní vstupní veličiny, jako například charakteristiky posuzované budovy či osob, vzít v úvahu prostřednictvím konkrétních parametrů negativní působení požáru, a výsledky optimálním způsobem interpretovat. Softwarový nástroj, který modeluje pohyb osob či šíření požáru, je pouze jednou ze součástí kompletního procesu posouzení. K jeho aplikaci i výsledkům je nezbytné přistupovat s dostatečnou mírou kritického odstupů, uživatel nástroje by nikdy neměl mít automatickou důvěru v jeho schopnosti. K tomuto přístupu při hodnocení evakuačního procesu by měl následující text přispět.



## 2 Zásady evakuačního procesu

Cílem evakuačního procesu je zajistit, aby osoby uvnitř postiženého objektu byly schopny v případě kritické situace (nejčastěji požáru) tento objekt opustit, přesunout se do bezpečného místa, nebo zůstat na místě nezasaženém požárem po dobu nezbytnou pro potlačení požáru. To vše bez vystavení životu či zdraví nebezpečným podmínkám, či dokonce bez uvědomění si jejich existence. Taková situace představuje ideální řešení požární bezpečnosti.

Požadavek na nulové vystavení evakuovaných osob účinkům požáru může znamenat zásadní komplikace při návrhu dotčeného objektu. Efektivnější přístup k řešení požární bezpečnosti proto představuje hledání takové úrovně expozice, která umožní efektivní evakuaci osob, a zároveň neznamená ohrožení evakuačního procesu ani zdraví evakuovaných osob. Uvedený postup znamená nutnost časového hodnocení dopadu návrhového požárního scénáře na evakuované osoby z hlediska jejich místa a podmínek.

Počáteční rozmístění osob v budově a způsob, jakým se jejich poloha mění v běžné situaci i v průběhu evakuace, je ovlivněna charakteristikou budovy a osob, systému požární bezpečnosti a analyzovaném požárním scénáři. Podmínky osob závisí na jejich komplexním stavu před vznikem požáru a na jeho následných účincích, zejména působením vysoké teploty a toxických zplodin hoření.

### 2.1 Strategie evakuace osob

V případě vzniku požáru předpokládáme standardní postup evakuace budovy směrem dolů. Hlavní evakuační strategie uplatňované v tuzemsku dle normového přístupu lze shrnout do dvou základních typů:

- současná evakuace,
- postupná evakuace.

Zahraniční zkušenosti a zdroje nejčastěji pracují s dalšími dvěma typy evakuace osob [57, 49]:

- setrvání na místě (defend-in-place),
- evakuace osob do chráněného prostoru (delayed evacuation).

#### 2.1.1 Současná evakuace osob

Tato strategie zahrnuje současnou evakuaci všech osob z budovy do určeného prostoru, nejčastěji na volné prostranství. Nejrozsáhlejší dostupnou případovou studií současnosti je evakuace Světového obchodního centra v roce 2001 [21, 19, 20, 8]. Případná evakuace velkého počtu osob může způsobit vysoké hustoty osob v oblasti únikových cest. Tento faktor je silně závislý na typu budovy, jejím využití, a chování osob v průběhu evakuace. Zvýšená hustota osob v prostoru únikových cest může znamenat výrazné prodloužení celkové doby evakuace,

její redukce lze dosáhnout snížením této hustoty nebo úpravou reakční doby, které ale musí být odůvodněné. Úplná evakuace osob je typicky spontánním strategií evakuovaných osob, případně bývá řízena zasahujícími jednotkami.

### 2.1.2 Postupná evakuace osob

V případě postupné evakuace osob požadujeme po některých skupinách osob setrvání na místě po určitou dobu, aby bylo dosaženo efektivnějšího využití únikových cest, protože v místech zúžení únikových cest v případě vysoké hustoty osob dochází k poklesu intenzity proudění. Osoby v těchto skupinách nicméně mohou pociťovat stres vyplývající z pobytu v nebezpečném prostředí [49, 14].

Postupná evakuace je založena na principu, kdy osoby z nejvíce ohrožených podlaží nebo oblastí (tedy části budovy přímo zasažené požárem a části sousední) jsou evakuovány přednostně. Výsledkem této strategie je snížení doby zdržení v kritických místech únikových cest, snížení hustoty evakuovaných osob v těchto místech, a celkové zkrácení doby evakuace. Efektivita této strategie nicméně silně závisí na dostupném protipožárním zabezpečení v budově, adekvátním výcviku personálu a komunikačním vybavení v budově.

### 2.1.3 Setrvání osob na místě

Tato strategie je využívána zejména v případě výškových budov, typickým postupem je uzavření přístupových dveří do místnosti a vyčkání příchodu zasahujících jednotek. V minulosti byla strategie aplikována také v případě osob se sníženou pohyblivostí, která znemožňovala současnou evakuaci vlastními silami. Pro tuto strategii lze nalézt případové studie zpracované především pro výškové budovy [51]. Studie označuje setrvání osob na místě v případě požáru za efektivní za následujících předpokladů:

- budova disponuje vysokým počtem podlaží (6 a více), což činí úplnou evakuaci málo efektivní,
- budova je rezidenčního typu s uzavřenými místnostmi a prostředky pro vytvoření chráněných prostor,
- budova má konstrukci z nehořlavých materiálů,
- v budově je instalováno protipožární zabezpečení se zvukovou signalizací a hlasovou komunikací, která umožňuje instruovat osoby v budově.

Obecně platí, že efektivita této strategie je silně závislá na kvalitě komunikace mezi osobami v budově a zasahujícími jednotkami nebo operátorem. Nedostatečné informování osob o nezbytném postupu při této strategii se ukazuje jako hlavní příčina jejího selhání [57].

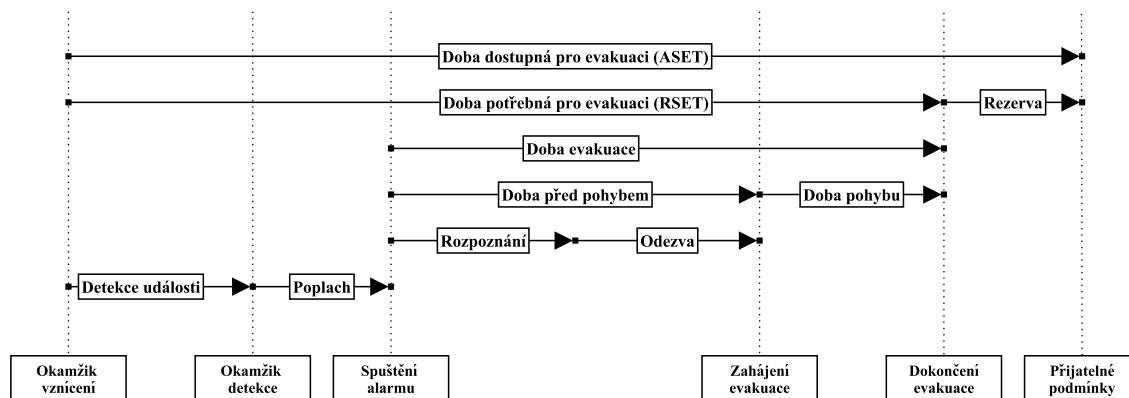
### 2.1.4 Evakuace osob do chráněného prostoru

V případě, že evakuované osoby jsou dočasně nebo trvale málo pohyblivé či zcela nepohyblivé, a nemohou využívat schodiště, vyžaduje jejich evakuace externí asistenci. Jestliže se současně jedná o budovy s vysokým počtem podlaží (např. nemocnice), může být efektivní strategie jejich dočasného přemístění do chráněného prostoru v rámci budovy a vyčkání na příchod zasahujících jednotek a dokončení evakuace.



## 2.2 Doba pro evakuaci osob

Predikce pohybu osob v průběhu evakuace je základním postupem při analýze efektivity požárního zabezpečení objektu. Obecně platí, že dostatečná ochrana je zajištěna v případě, kdy *doba potřebná* pro evakuaci (Required Safe Egress Time - RSET) je kratší než *doba dostupná* pro evakuaci (Available Safe Egress Time - ASET) [29]. Vzájemné vztahy mezi jednotlivými složkami doby potřebné a dostupné pro evakuaci jsou zachyceny na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Vztahy mezi jednotlivými složkami evakuačního procesu a jeho délkou.

### 2.2.1 Doba dostupná pro evakuaci (ASET)

Doba dostupná pro evakuaci představuje časový interval, po který panují v místě evakuace přijatelné podmínky pro evakuované osoby. Příklad stanovení takových podmínek může být následující:

- viditelnost přesahuje 10 metrů,
- koncentrace CO nepřesahuje 950 ppm,
- teplota vzduchu nepřesahuje 80 °C ve výšce 2 metry.

Pro stanovení průběžných hodnot vybraných veličin po dobu evakuace je vhodné použít požární model, přičemž přijatelné podmínky trvají až do okamžiku, kdy *libovolná* z vybraných hodnot *poprvé* překročí stanovený limit. Při stanovení limitu pro přijatelné podmínky využíváme některý obecně uznávaných zdrojů, např. [29, 62], další podrobnosti lze nalézt v kapitole 3.3 včetně příkladu vybraných kritérií přijatelnosti.

### 2.2.2 Doba potřebná pro evakuaci (RSET)

Doba potřebná pro evakuaci je komplexní veličina, která je složena z řady dalších dílčích intervalů. Nejistota jejich stanovení může znamenat výrazné prodloužení celkové doby potřebné pro evakuaci a vyčerpání časové rezervy mezi dokončením evakuace a limitem pro přijatelné podmínky v budově, případně překročení tohoto limitu a ohrožení unikajících osob.

Celková doba potřebná pro evakuaci se skládá dle obr. 2.1 z následujících základních časových intervalů:

- doba detekce události,
- doba spuštění poplachu,
- doba evakuace.

Doba detekce události je časový interval, který uplyne mezi vznícením požáru a jeho detekcí příslušným protipožárním zabezpečením, personálem budovy nebo jejími obyvateli. Pro určení tohoto časového intervalu lze požit požární model podobně jako v případě stanovení doby dostupné pro evakuaci, kdy hledáme okamžik překročení kritické hodnoty některé z veličin, které jsou pro detekci požáru rozhodující.

Doba spuštění poplachu závisí především na způsobu detekce požáru. Reakční doba elektronického protipožárního systému bude výrazně kratší než reakce obslužného personálu budovy či dokonce osob, které se v budově momentálně nachází.

Doba evakuace závisí především na podrobné znalosti lidského chování v krizových situacích a pro její určení jsou využívány pokročilé softwarové modely. Většina z těchto modelů pracuje samostatně s dobou před pohybem a dobou pohybu osob. Dobu před pohybem chápeme jako časový interval od okamžiku, kdy je konkrétní osoba na základě vzniklé situace poprvé vystavena vnějším podnětům (alarm, kouř, teplota apod.) až do okamžiku, kdy zahájí samotnou evakuaci na bezpečné místo. Doba pohybu pak představuje časovou náročnost dokončení procesu evakuace na bezpečné místo.

### **Doba před pohybem**

Pro každou osobu je doba před pohybem intervalem od první výstražné zprávy do případného zahájení evakuace. Existují různé druhy klasifikace této doby, nejčastější rozdělení je na následující základní intervaly [1, 3, 45, 54]:

- rozpoznání nebezpečí,
- odezva na nebezpečí.

Doba před pohybem se může u jednotlivých osob nebo u jejich skupin velmi lišit. Rozptyl doby před pohybem závisí na řadě faktorů, včetně vzdálenosti osob od místa požáru a jejich znalostech o požáru, existenci a rozložení únikových východů, stavu výstražného zařízení a systému řízení.

V otevřeném uspořádání prostoru (sportovní nebo kulturní události) lze očekávat nízkou variabilitu doby před pohybem, protože osoby zahájí evakuaci přibližně ve stejnou dobu. V případě komplexní geometrie prostoru lze očekávat naopak velký rozptyl této doby. Osoby v bezprostřední blízkosti požáru tak mohou za určitých okolností dokončit evakuaci dříve, než se osoby ve vzdálených částech budovy o požáru dozví.

### **Rozpoznání nebezpečí**

Časový interval rozpoznání nebezpečí představuje období od spuštění poplachu po okamžik, kdy osoby na spuštěný poplach začínají reagovat. Během této doby osoby dále pokračují v činnosti, kterou vykonávaly před zjištěním poplachu nebo příznaků požáru, tedy např. konkrétní pracovní aktivity, nakupování nebo odpočinek. Doba rozpoznání se velmi liší v závislosti na konkrétních faktorech, jakými je typ a účel budovy, charakteristika osob či instalované protipožární zabezpečení. Časová variabilita intervalu je velmi vysoká pohybuje se v rozmezí

několika sekund až po mnoho minut. Jeho délka je také odlišná u jednotlivých osob ve stejném prostoru v budově a také u podobných skupin osob v různých prostorech.

Jednoduchým vstupem je použití jednoho časového intervalu pro každou skupinu osob, například průměrnou nebo nejdelší dobu rozpoznání. Při složitějším vstupu může být každému jedinci přidělen samostatně vlastní časový interval. Pro určení doby rozpoznání je možno brát v úvahu řadu faktorů, ale zcela základní jsou následující:

- Parametry budovy:
  - účel budovy,
  - rozměry budovy (půdorysy, počet podlaží a další dispozice).
  - vybavení budovy,
  - zabezpečovací systém a řízení požární bezpečnosti.
- Stav obyvatel budovy:
  - počet osob a jejich rozmístění,
  - charakteristické vlastnosti osob, zejména věk a mobilita,
  - činnosti osob vykonávané v době vzniku požáru,
  - podmínky pro osob.
- Dynamika modelu požáru:
  - místo vzniku požáru,
  - viditelnost požáru a kouře,
  - působení vysoké teploty a zplodin hoření,
  - zprávy od ostatních osob či personálu budovy,
  - stav požárního poplachu a aktivní ochrany.

Při stanovení doby rozpoznání nebezpečí musí uživatel modelu všechny tyto skutečnosti zvážit a v případě nedostatku informací o některém z uvedených faktorů zvolit řešení na straně bezpečné, optimálně přidáním časové rezervy do doby potřebné pro evakuaci (RSET).

### **Odezva na nebezpečí**

Časový interval odezvy na nebezpečí trvá od okamžiku, kdy si osoby uvědomí vznik kritické situace, až do okamžiku, kdy se rozhodnou pro konkrétní způsob strategie evakuace. Typické činnosti vykonávané osobami v tomto časovém úseku jsou následující:

- ověřování reálnosti alarmu, hledání příznaků požáru,
- zastavení strojů ve výrobě, úschova cenných předmětů,
- vyhledání ostatních členů rodiny nebo skupiny,
- vyrozumění dalších osob,
- hledání vhodné únikové cesty,
- snaha o hašení požáru.

Jednoduchým vstupem je použití jedné hodnoty pro každou skupinu osob, například průměrnou nebo nejdelší dobu odezvy. Při složitějším vstupu může být doba odezvy přidělena každé osobě samostatně.

Časová variabilita intervalu je velmi vysoká, pohybuje se v rozmezí několika sekund až po řadu minut. Pro určení doby reakce je možno brát v úvahu řadu faktorů, ale principiální jsou následující (některé faktory jsou shodné s faktory ovlivňujícími rozpoznání nebezpečí):

- Parametry budovy:
  - účel budovy,
  - rozměry budovy (půdorysy, počet podlaží a další dispozice).
  - vybavení budovy,
  - zabezpečovací systém a řízení požární bezpečnosti,
  - navigace a osvětlení,
  - rozložení únikových východů, vědomí o jejich existenci, komplexnost prostoru jako celku.
- Stav osob budovy:
  - počet osob a jejich rozmístění,
  - charakteristické vlastnosti osob, zejména věk a mobilita,
  - činnosti osob vykonávané v době vzniku požáru,
  - rodinné nebo skupinové vztahy,
  - podmínky pro osoby.
- Dynamika modelu požáru:
  - místo vzniku požáru,
  - viditelnost požáru a kouře,
  - působení vysoké teploty a zplodin hoření,
  - zprávy od ostatních osob či personálu budovy,
  - stav požárního poplachu a aktivní ochrany

Opět platí, že pro stanovení doby odezvy na nebezpečí musí uživatel modelu všechny tyto skutečnosti zvážit a v případě nedostatku informací volit bezpečné řešení, optimálně přidáním časové rezervy do doby potřebné pro evakuaci (RSET).

### 2.2.3 Význam doby před pohybem pro posouzení RSET

Existence spolehlivých údajů o předpokládané době před pohybem v různých situacích a zahrnutí těchto údajů do modelů chování při úniku je *zcela zásadním* předpokladem pro posouzení doby RSET a tato oblast je v současné době předmětem intenzivního výzkumu [54, 36, 44, 43].

Analýza konkrétních incidentů ukazuje, že existuje korelace mezi délkou doby před pohybem osob a následky tohoto incidentu v podobě zraněných či usmrčených osob [36]. Do současnosti byla uskutečněna řada experimentů, které se pokusily kvantifikovat dobu před pohybem pro různé druhy budov, jako např. rezidenční prostory, komerční budovy nebo kina [48, 15].

Další studie jsou zaměřeny vlivy sociální a fyziky prostředí (externí faktory) a na charakteristické vlastnosti osob (interní faktory) [46, 61, 39]. Dosud nicméně platí, že znalosti o chování osob před pohybem jsou méně rozsáhlé než v případě samotného pohybu během evakuace [51, 36]. Zároveň je skutečností, že většina existujících evakuačních modelů aplikuje jednoduché předpoklady o chování osob v době před pohybem, nejčastěji v podobě prosté reakční doby na alarm.

Tyto skutečnosti je proto nutné při aplikaci reakční doby jako jednoho ze základních vstupních údajů modelů pohybu osob neustále zohledňovat a dobu před pohybem chápat jako komplexní, špatně empiricky měřitelnou a extrémně variabilní veličinu se zásadním dopadem na dobu evakuace jako celku. Zanedbání této skutečnosti může mít fatální dopady na posouzení evakuačního procesu jako celku a vést ke zcela nerealistickým předpokladům. Jako jeden z příkladů takového chybného přístupu lze uvést evakuaci pražského obchodního centra Palladium z roku 2008, které oproti původním předpokladům trvala 40 minut, přičemž doba před pohybem byla v této evakuaci zcela zásadním faktorem.

### Doba pohybu

Analýza doby pohybu je zaměřena na posouzení doby potřebné pro evakuaci osob do bezpečného místa. Konkrétní výsledek bude závislý na celé řadě vstupních údajů, mezi které patří zejména dispozice budovy, znalost budovy jejími obyvateli, místo požáru a způsob řízení požární bezpečnosti.

Pro posouzení doby pohybu je možné aplikovat modely pohybu osob na základě existujících informací a složitosti situace. Takto lze analyzovat proces evakuace a jeho časovou náročnost s dostatečnou přesností, studovat variantní řešení uspořádání prostoru, rozložení únikových východů apod.

Při analýze doby pohybu posuzujeme při využití modelu pohybu osob jako klíčové vstupní údaje zejména následující skutečnosti:

- *Počet a rozmístění osob.* Zaměřujeme se především na kapacitu prostoru. Jedním z modelovaných scénářů by měla být vždy varianta s maximálním očekávaným počtem osob. V případě, že nejsou dostupné údaje o předpokládané obsazenosti, použijeme vhodné normové či jiné zdroje. V případě rozmístění osob jako vstupní údaj bereme jejich polohu v okamžiku zahájení evakuace.
- *Charakteristika osob.* Zahrnujeme zde věk, fyzické atributy, sociální a kulturní zvyklosti, hierarchie. Obecně platí, že pouze některé atributy, o kterých máme dostupné informace, je možné bezprostředně zadat jako vstupní údaj. Patří mezi ně zejména věk osoby, rychlost jejího pohybu, mobilita, některé psychologické vlastnosti jako např. agresivita, případně specifická role v průběhu evakuace.
- *Preference únikových východů a jejich dostupnost.* Volba konkrétní únikové trasy a preference některého únikového východu má významný dopad na hustotu proudu evakovaných osob a tedy na efektivitu evakuace. Při stanovení preference únikového východu u konkrétní osoby bereme v úvahu její znalost vnitřní geometrie budovy, obsazenost budovy, systém řízení požární bezpečnosti a požární scénář.
- *Kapacita klíčových prvků geometrie.* Pomocí dostupných empirických údajů posoudíme dostupnou kapacitu proudu v klíčových bodech únikové cesty, jakými jsou dveře, chodby, a schodiště.

- *Evakuační strategie.* Slouží pro stanovení scénáře úniku jako jednoho z důležitých údajů modelu pohybu osob.

Schopnost vybraného nástroje zohlednit popsané vstupní údaje je třeba ověřit verifikačním postupem popsaným v kapitole 4.3.1 v případě, kdy verifikační test pro daný údaj existuje. Aplikace modelu pohybu osob nám kromě hodnocení doby pohybu umožňuje posuzovat další důležité parametry, mezi které patří zejména následující:

- vzdálenost k únikovému východu,
- lokální hustota osob,
- stav a počet osob v jednotlivých dílčích sektorech geometrie,
- příchozí intenzita osob do dílčího sektoru,
- odchozí intenzita osob z dílčího sektoru.

## 2.3 Shrnutí

Při využití konceptu srovnání doby dostupné a potřebné pro evakuaci je zejména s ohledem na výsledky dosavadních, výše uvedených studií, brát v úvahu následující skutečnosti.

V současné době nelze přebírat koncept ASET/RSET v jeho původní, striktně deterministické a zjednodušené podobě. Pokud srovnáváme s dodržением výše uvedených zásad dvě evakuační strategie, z nichž obě poskytují různou hodnotu RSET, ale vždy nižší než je hodnota ASET, lze je označit za vyhovující, ale nikoliv rovnocenné. Dnes nabývá na významu část představující časovou rezervu mezi hodnotou ASET a RSET, přičemž velikost této časové rezervy bývá považována jako klíčový vstupní údaj pro analýzu rizik a preferovaný bývá takový scénář, který tuto časovou rezervu nabízí co největší.

Důvodem pro popsaný přístup je stochastická povaha klíčových parametrů vstupujících do tohoto konceptu. Jednotlivé klíčové časové intervaly (rozpoznání, odezva, pohyb apod.) nejsou identické napříč obyvateli objektu a nejsou identické ani v případě opakování stejné situace u stejné osoby. Vždy se jedná náhodnou veličinu s příslušným statistickým rozdělením, a takto je třeba nakládat také s výsledky, které tyto vstupní hodnoty produkují. Základy statistického zpracování výsledků jsou popsány v kapitole 4.3.5.

## 3 Vstupní údaje pro inženýrské posouzení

V současné době rozlišujeme čtyři základní skupiny informací, které jsou klíčové pro stanovení polohy osob a místních podmínek:

- charakteristika budovy a strategie řízení požární bezpečnosti,
- charakteristika osob,
- charakteristika požáru,
- účinek požárního zásahu.

V následující části se budeme zabývat prvními třemi skupinami. Uživatel modelu musí zohlednit, které vstupní údaje má k dispozici a které nikoliv, a které je schopen ve zvoleném nástroji interpretovat přímo, a které zvolený nástroj zadat přímo neumožňuje. V případě neznalosti některého ze vstupních údajů nebo nemožnosti jej v modelu aplikovat je třeba tuto skutečnost popsat a zvolit bezpečné řešení, nejčastěji formou přidané časové rezervy k době potřebné pro evakuaci (ASET).

### 3.1 Charakteristika budovy

Skupina vstupních údajů zahrnuje podrobnosti o charakteristice budovy, jejím řízení z hlediska požární bezpečnosti a strategii bezpečnosti životů v mimořádných situacích. Je třeba zjistit zejména základní rozměry budovy, vnitřní uspořádání a instalace vztahující se k požární bezpečnosti. Konkrétní skupiny vstupních údajů jsou následující:

- *Geometrie prostoru a jeho dispozice.* Jedná se zejména o velikost budovy, její výšku, výšku všech stropů, komplexnost vnitřního uspořádání apod. Tato skupina parametrů má vliv na viditelnost požáru a tedy i rychlost reakce osob, povědomí osob o vnitřním uspořádání, jejich schopnost se v nastalé situaci orientovat, kapacitu únikových cest a východů, přístup pro požární jednotky apod.
- *Únikové cesty a únikové východy.* Klíčové je získat informace o viditelnosti, složitosti uspořádání, horizontálním sklonu (vodorovné či svislé cesty), zda jsou běžně únikové cesty a východy přístupné apod. Pro využití únikových cest je zásadní jejich správné osvětlení.
- *Užívání budovy.* V rámci skupiny údajů posuzujeme druh budovy a její účel (kulturní zařízení, administrativní komplex, zdravotnické zařízení apod.), dále pak obsazení budovy v jejích konkrétních částech.
- *Systém řízení požární bezpečnosti.* Je třeba získat informace o systému řízení požární ochrany (pokud je instalován), řízení zaměstnanců budovy a jejich uživatelů, úroveň školení personálu, evakuační strategii, aktivních a pasivních prvcích požární ochrany, označení a osvětlení, odvětrávání apod. Reakci osob ovlivňuje zejména druh varování nebo zjištěné příznaky požáru.

- *Úkryty.* Je třeba se zaměřit na jejich druh, stupeň ochrany, propojení s únikovými cestami, komunikační rozhraní, přístupnost pro zasahující jednotky apod.
- *Vlivy prostředí.* Jde zejména o vliv proudění vzduchu, evakuaci v různých podmínkách při různé plotě či vlhkosti apod. Např. vzduch přisávaný únikovými východy může dosahovat značné rychlosti a tedy negativně ovlivňovat osoby, kteří daný východ používají.

## 3.2 Charakteristika osob

Skupina vstupních údajů má dopad zejména na způsob a dobu potřebnou pro reakci na pokyny k opuštění budovy nebo spuštěný poplach, a dále způsob a dobu potřebnou pro evakuaci osob z budovy. Charakteristika osob ovlivňuje také jejich reakci na negativní účinky požáru, počínaje jeho spatřením až po přímé vystavení jeho negativním účinkům. Konkrétní skupiny vstupních údajů jsou následující:

- *Počet osob, jejich hustota a rozmístění.* Nejsou-li k dispozici přesné informace, počet se určí na základě účelu užívání dle příslušného normového postupu [5]. Je třeba zohlednit, že počet a rozmístění osob v budově se může měnit v čase, v závislosti na činnosti, roční době apod.
- *Znalost budovy.* Tento parametr silně ovlivňuje reakční dobu a preferenci únikových cest a východů. Osoby seznámené s budovou mají lepší znalost únikových cest a výstražných systémů a lze u nich předpokládat účinnější evakuaci. Osoby, kteří budovu neznají, se budou snažit spíše opustit budovu stejnou cestou, kterou přišly, a jejich reakční doba na spuštění poplachu bude horší.
- *Činnost a pozornost.* Činnost prováděná v okamžiku před požárem či interakce s ostatními osobami má vliv na reakci na pozornost a tedy na reakci vyhlášení poplachu (např. stravování v restauraci, spánek, práce apod.).
- *Mobilita a psychické schopnosti.* Řada budov je přímo určena pro osoby se sníženou pohyblivostí, či zde lze očekávat jejich významné zastoupení. Některé osoby proto budou schopny samostatného pohybu pouze omezeně či vůbec, a při evakuaci z budovy budou do určité míry záviset na pomoci jiných osob, delší bude rovněž období před pohybem, které bude vyžadovat více přípravných aktivit. Se sníženou mobilitou je často snížena rozpoznávací schopnost, a tedy prodloužení reakční doby na vyhlášený poplach.
- *Sociální příslušnost, postavení a odpovědnost.* Chování osob je ovlivněno tím, zda jsou sami nebo ve skupině. Skupinové chování má přímý dopad na rychlost pohybu osob, protože rychlost skupiny má tendenci přizpůsobit se vlastní rychlosti nejpomalejšího člena této skupiny.
- *Vazby na činnosti vykonávané před požárem, ohnisko zájmu.* Osoby jsou přirozeně vázány na činnost, která je důvodem jejich pobytu v daném místě. V případě, že se jejich pozornost upíná konkrétním směrem (např. sportovní utkání na stadionu), mají přirozenou tendenci očekávat pokyny právě z tohoto místa.
- *Citlivost na poplach.* Reakci na vyhlášení poplachu nebo pokynu k evakuaci ovlivňuje činnost vykonávaná před jeho vyhlášením, duševní a psychický stav, předchozí seznámení se systémem požární ochrany a pocit aktuálního ohrožení.
- *Podmínky osob.* Po vzniku požáru jsou podmínky osob výsledkem průběžně aktualizo-



vaného hodnocení situace, které probíhá současně s analýzou evakuace. Aktuální podmínky osob mají přímý dopad na jejich zdravotní a psychický stav a schopnost další evakuace.

### 3.3 Podmínky osob

Podmínky osob zahrnují veškeré vlivy požáru, které mění jejich chování nebo způsobují ztrátu jejich schopností. Podmínky rozdělujeme následujícím způsobem:

- psychologické vlivy,
- fyziologické vlivy,
- kombinované vlivy.

U psychologických vlivů je nezbytné stanovit, zda se osoby budou spíše cítit dostatečně v bezpečí, aby setrvaly na místě, nebo zda se budou cítit do té míry ohroženy, aby se snažily o odchod. Pokud budou chtít odejít, je nutno zjistit, zda jsou jejich podmínky v únikové cestě dostatečně dobré na to, aby se pro únik skutečně rozhodly. Tyto úvahy závisí částečně na vnímaném nebezpečí, například na spatření plamenů, a částečně na fyziologických pocitech, například na znepokojení vyvolaném dráždivým kouřem.

V případě fyziologických vlivů je třeba stanovit, zda jsou osoby fyzicky schopny uniknout. Zahrnujeme vlivy, které únik mohou zpomalit nebo ztížit, jako je působení hustého nebo dráždivého kouře. Zaměřujeme se také na stanovení okamžiku, kdy osoby pravděpodobně ztratí své schopnosti, takže nemohou uniknout bez cizí pomoci (např. ztráta vědomí v důsledku otravy oxidem uhelnatým). Důležitou součástí hodnocení je posouzení dlouhodobých nepříznivých důsledků působení a podmínek, za nichž se působení stane pravděpodobně následně smrtelným.

Mezi vlivy, které způsobují změnu chování nebo ztrátu schopností, řadíme zejména následující, přičemž s výjimkou prvních dvou mohou všechny smrtelné:

- *Spatření kouře.* Zahrnujeme zde strach vstoupit do zakouřených prostorů či prostorů se zvýšenou teplotou, obava z ohně nebo kouře jako motivace k úniku či lákavost požáru a tendence jej pozorovat (syndrom přátelství s ohněm).
- *Snížená viditelnost.* Jedná se zejména o optické vlastnosti kouře a jeho negativní (dráždivé) vlivy na oči.
- *Bolest v dýchacím ústrojí, ztížené dýchání.* Vdechnutí kouře, který může být i velmi horký, může v krajním případě vést dušení způsobeném křečí hrtanu nebo astmatickým záchvatem, případně k sekundárnímu zánětu plic.
- *Dušení při vdechnutí toxických plynů.* Způsobuje zmatek, ztrátu vědomí, ohroženy jsou zejména osoby vyššího věku a osoby se srdečními chorobami.
- *Bolest na pokožce.* Vliv bývá následován přehřátím nebo popáleninami, v důsledku vede ke zhroucení.

#### 3.3.1 Psychologické účinky požáru

Se zplodinami požáru se osoby setkají pravděpodobně nejprve při spatření požáru či plamenů, případně registrací tepla zejména radiací, teplým kouřem nebo horkými plochami. Účinek

prvního vjemu na chování osob závisí na konkrétní situaci. Je nutné posoudit, zda jsou osoby v téže místnosti jako požár a zda jsou schopny uniknout od zdroje požáru, nebo zda jsou nuceny při úniku jít směrem k požáru nebo do jeho zplodin.

Mohou-li se osoby vzdálit od zdroje požáru, může existence požáru působit jako pobídka k opuštění budovy, takže může zkrátit jejich dobu před pohybem oproti situaci, kdy osoby pouze reagují na výstrahu. Alternativně mohou některé osoby zůstat a požár sledovat (syndrom přátelství s ohněm), případně jej hasit.

V situaci, kdy jsou zplodiny požáru mezi osobou a únikovou cestou, existuje řada faktorů, které je nutno při posouzení zhodnotit, zejména pak následující:

- Pokud zplodiny a vysoká teplota dosahují pouze nízkých podkritických hodnot, mohou především negativně ovlivnit volbu únikové cesty.
- Pokud jediná úniková cesta veden oblastí se zplodinami či vysokou teplotou, osoby mohou preferovat zůstat na místě a čekat na záchranu.
- Osoba v relativně bezpečném místě se může cítit nucena riskovat průchod hustým kouřem i jinak nebezpečným prostředím, jestliže se do jejího úkrytu dostanou zplodiny hoření nebo teplo.

Je proto nutno posoudit kritéria přijatelnosti těchto vlivů na chování. V každém požárním scénáři se u jednotlivých osob liší jejich ochota pohybovat se směrem k nebezpečnému prostředí, vstoupit do něj, či se od něj naopak vzdálit.

V řadě studií byly zjištěny konkrétní poznatky o psychologických účincích požáru, jako příklad lze uvést následující [13, 68, 12]:

- Značná část osob v zakouřeném prostředí se vrací zpět, místo aby pokračovala dále, přičemž ženy se vracejí s větší pravděpodobností než muži.
- Situace, při níž se prakticky všechny osoby vracejí, nastává při viditelnosti klesající přibližně ke 3 m.
- V některých případech osoby s požárem za zády procházejí i velmi hustým kouřem, zatímco v jiných případech naopak nejsou schopny pohybu.
- Chování osob závisí také na tom, zda vrstvení kouře umožňuje lidem skrčení do úrovně, kde je hustota kouře nižší, a zda je v tomto případě použito nízko umístěné osvětlení.

Na základě těchto skutečností a ve vztahu k parametrům budovy je možno stanovit meze optické hustoty kouře. Zdroje pro vhodná kritéria jsou uvedena v literatuře [47, 52, 6].

### 3.3.2 Kombinace fyziologických a psychologických účinků

V některých případech má působení zplodin požáru na osoby přímé fyziologické účinky, a současně je omezuje také po psychologické stránce. Je třeba zdůraznit, že zdroje uvedené v této kapitole přistupují k hodnocení meze snesitelnosti mírně odlišně a odlišné jsou i kritéria, která stanovují. Základní limity pro snesitelné podmínky stanovuje normový přístup [6], důležitými zdroji pak jsou obecně uznávané příručky [29, 62].

### Působení kouře

Přes snahu vyloučit přímý styk osob s kouřem budou některé osoby pravděpodobně alespoň částečně vystaveny zplodinám, jejichž už malá koncentrace může způsobit neobyvatelnost budovy. Je proto důležité zhodnotit vliv zplodin na chování osob při úniku a na jejich přežití.

Při tomto procesu stanovujeme úroveň, pro kterou je působení možné pokládat za snesitelné, a jaké mohou být následky jejího překročení. V případě hustoty kouře se meze snesitelnosti stanoví na základě jeho negativního vlivu na rychlost pohybu a na schopnost osob nalézt cestu. Rovněž posuzujeme, jaká hustota kouře bude tolerována při strategii setrvání na místě.

Při konkrétních experimentech byly zjištěny následující skutečnosti [32, 30]:

- Při působení nedráždivého kouře klesá rychlost chůze s hustotou kouře. Při optické hustotě  $0,5 \text{ m}^{-1}$  (součinitel útlumu 1,15) bylo zjištěno, že rychlost chůze se zmenšuje z původní hodnoty cca  $1,2 \text{ ms}^{-1}$  bez působení kouře na hodnotu  $0,3 \text{ ms}^{-1}$ . V této situaci se lidé chovají podobně jako v úplné tmě (nahmatávají cestu podél zdi).
- Při působení dráždivého kouře se rychlost jejich pohybu snižuje rychleji (optická hustota  $0,2 \text{ m}^{-1}$  a součinitel útlumu 0,5) a zažívají větší úzkost.

V případě, že chceme stanovit kritéria přijatelnosti pro produkty hoření na základě jejich koncentrace v prostředí, například při stanovení doby dostupné pro evakuaci (RSET), lze využít celé řady zdrojů. V tabulce 3.1 je uveden příklad kritérií přijatelnosti pro produkty hoření [62]. Další údaje lze nalézt ve [29, 62].

Kritéria přijatelnosti pro produkty hoření				
Sloučenina	Expozice			
	5 minut		30 minut	
	Zneschopnění	Smrt	Zneschopnění	Smrt
CO	6 000	12 000	1 000	2 500
HCN	150	250	90	170
HCl	500	16 000	200	< 12 %

**Tab. 3.1:** Příklad kritérií přijatelnosti [62].

Konkrétní mechanismy pro stanovení vlivu kouře jsou uvedeny v [6].

### Dráždivé toxické plyny

Účinek látek dráždicích smysly či dýchací cesty spočívá od mírného podráždění až po silnou bolest. Tyto účinky je možno hodnotit pomocí stanovení prahové koncentrace, která při překročení znamená nepřijatelnost dalšího setrvání na místě nepřijatelnou, nebo které pravděpodobně naruší nebo zabrání bezpečnému úniku citlivějších osob [47, 6]. Uplatňujeme následující postup:

- Koncentraci každé dráždivé látky vyjadřujeme jako poměrnou část přijatelné úrovně koncentrace (FEC) pro každou dráždivou látku.
- Celkovou hodnotu FEC pro vlivy způsobené všemi přítomnými dráždivými látkami získáme součtem jednotlivých FEC.

- Součet při každém časovém přírůstku následně porovnáme s celkovou hodnotu FEC rovnou 1,0.
- Je-li celková hodnota FEC menší než 1,0, pokládá se dráždivý účinek na vystavené osoby za přijatelný a pravděpodobně nebude mít význačný nepříznivý dopad na schopnost úniku.
- Je-li celková hodnota FEC větší než 1,0, pokládá se účinek a síla podráždění u vystavených osob za nepříznivě ovlivňující jejich bezpečný únik.

Hodnoty FEC a jejich hodnocení jsou uvedeny v [6], další údaje lze nalézt ve [29, 62].

### Dusivé toxické plyny

Stanovujeme dávku působení každého dusivého plynu, tedy integrál křivky časové koncentrace [47, 25, 52, 6]. Obecně předpokládáme, že při působení bude výkonnost osob menší než obvykle a zůstane zachována pouze při menší námaze.

- Dávku dusivého toxického plynu vyjadřujeme jako poměrnou účinnou dávku (FED) pro každou dusivou látku v každém samostatném časovém přírůstku.
- Celkovou hodnotu FED pro vlivy způsobené všemi přítomnými dusivými látkami získáme součtem jednotlivých FED.
- Celkový součet se pak porovná s předem stanovenou celkovou hodnotou FED, která představuje přijatelný stupeň zneschopnění.
- Jestliže celková součtová hodnota FED je menší než předem stanovená hodnota FED, pokládá se stupeň bezpečného úniku exponovaných osob za přijatelný.
- Jestliže celková součtová hodnota FED je větší než předem stanovená cílová hodnota FED, pokládá se stupeň bezpečného úniku exponovaných osob za nepřijatelný.

Hodnoty FED a jejich hodnocení jsou uvedeny v [6, 3, 29].

### Teplo

Radiace je závažná v situacích, kdy osoby musí při úniku procházet blízko kolem ohniska požáru a v situacích, kdy musí při úniku procházet pod vrstvou horkých zplodin. Tehdy je možno stanovit kritéria snesitelnosti působení radiace [47, 26, 6]. Průchod pod vrstvou horkých zplodin je velmi důležitou složkou posouzení a je základem řady inženýrských řešení. V tabulce 3.2 je uveden příklad kritérií přijatelnosti pro vysokou teplotu [62].

Vysoké teploty mohou vést k ohrožení života třemi základními mechanismy:

- tepelný šok z přehřátí,
- povrchové popáleniny,
- popálení dýchacího ústrojí.

Při aplikaci modelu posuzujeme následující kritéria:

- práh silné bolesti a popálení kůže,

Kritéria přijatelnosti pro vysokou teplotu			
Druh působení	Expozice	Dopady	Teplota
Radiace		Bolest na kůži	185 °C
Vedení (např. kov)	1 sekunda	Popáleniny	60 °C
Konvekce	30 minut	Přehřátí	100 °C
Konvekce	< 5 minut	Popálení kůže a/nebo dýchacích cest	120 °C
Konvekce	< 1 minuta	Popálení kůže a/nebo dýchacích cest	190 °C

**Tab. 3.2:** Příklad kritérií přijatelnosti pro působení vysoké teploty [62].

- expozice teplem, při němž je přehřátí dostatečné pro snížení duševních schopností a tedy ohrožuje přežití.

Pro meze snesitelnosti platí následující obecně platné limity:

- Mez snesitelnosti popálení kůže je obvykle nižší než u dýchacího ústrojí v případě, že je vlhkost vzduchu nižší než 10 %.
- Při nasycení vzduchu vodní parou je kritická hodnota popálení dýchacího ústrojí již 60 °C, k tomuto nasycení může dojít při hašení požáru vodou.

Teplu rozlišujeme na následující kategorie:

- *Radiační teplo.* Zaměřujeme se na vlivy bolesti a popálení pokožky, snesitelné meze působení jsou uvedeny výše.
- *Konvekční teplo.* Kritickou hranicí pro posouzení vlivu je teplota přibližně 121 °C. Pod touto hranicí uvažujeme pouze o přehřátí, nad touto hranicí o bolesti a popálení pokožky. Při stanovení vlivu lze použít stejný model zneschopňující dávky FED jako v případě toxických plynů následujícím způsobem:
  - Při vystavení konvekčnímu teplu s vlhkostí vzduchu menší než 10 % po dobu až 2 hodin můžeme vypočítat hodnotu FED pro součtový účinek radiačního a konvekčního tepla.
  - Celkový součet porovnáme s předem stanovenou celkovou hodnotou FED, představující přijatelnou pravděpodobnost ztráty schopností.
  - Jestliže celková součtová hodnota FED je menší než předem stanovená cílová hodnota FED, pokládá se pravděpodobnost bezpečného úniku exponovaných osob za přijatelnou.
  - Jestliže celková součtová hodnota FED je větší než předem stanovená cílová hodnota FED, pokládá se pravděpodobnost bezpečného úniku exponovaných osob za nepřijatelnou.

Podrobnosti jsou uvedeny v [6], další údaje lze nalézt ve zdrojích [29, 62].

### Obecná pravidla pro toxické plyny a teplotu

- Vliv zplodin hoření a vysoké teploty představuje soustavu fyziologických efektů, které nastávají v různých časech, a které negativně působí svojí koncentrací (kouř a dráždivé plyny) nebo absorbovanou dávkou osobou (dusivé plyny a teplo).

- Riziko vyplývající ze zplodin hoření a vysoké teploty je komplexní děj, který velmi silně závislé na konkrétním vývoji požáru a dalších okolnostech. Repräsentace toxicity jedním číslem proto není realistická.
- Riziko by mělo být vyjadřováno v podobě časového intervalu přijatelných podmínek a v případě aplikace modelů požáru a pohybu osob je nezbytné, aby měly tyto nástroje implementovaný příslušný algoritmus pro výpočet limitních dávek pro unikající osoby. Příslušný verifikační test je uveden v kapitole 4.3.1.

### 3.4 Charakteristika požáru

Pro posouzení míry bezpečnosti evakuovaných osob je třeba plynule aktualizovat informace o rozsahu požáru a zplodin hoření a o jejich vlivu na budovu. Charakteristické vlastnosti požáru rozdělujeme do dvou základních skupin:

- *Vlastnosti ovlivňující požární poplach.* Jde zejména o viditelnost plamenů a kouře, aby bylo možné odhadnout dobu, kdy si osoby situaci uvědomí, a odhadnout způsob jejich reakce. Je třeba stanovit dobu aktivace samočinné požární signalizace, kdy budou k dispozici informace o šíření požáru a stanovit, jaké informace mají osoby při požáru k dispozici.
- *Vlastnosti přímo charakterizující požár.* Jde zejména o velikost a rozsah požáru, hustotu kouře, koncentraci toxických plynů, teplotu a tepelný tok ve všech prostorech budovy, dále způsob aktivace hasicích zařízení a vlastnosti zařízení pro odvod kouře. U obsazených prostorů se tyto údaje využívají pro stanovení přijatelnosti podmínek v prostoru pro osoby a posouzení jejich úniku. U neobsazených prostorů se tyto údaje využívají zejména pokud tvoří součást možných únikových cest nebo úkrytů. Pokud uvažujeme existenci horké vrstvy zplodin hoření, je nutno udat výšku teplé vrstvy a dolů směřující radiační tok.

#### 3.4.1 Návrhové požární scénáře

Návrhové požární scénáře představují specifické modelové požáry typické pro dané užívání. Scénáře berou v úvahu následující skutečnosti:

- počet a rozmístění osob,
- činnost osob,
- geometrii prostoru, velikost a členitost,
- vybavení místností,
- vlastnosti hořlavého materiálu,
- určení prvního vzníceného předmětu a jeho poloha,
- podmínky odvětrávání.

Výběru vhodných návrhových požárních scénářů je nutné věnovat dostatečnou pozornost, protože výběr nesprávné varianty většinou zcela změní výsledky studie. Řešení by mělo být provedeno pro všechny návrhové požární scénáře s vysokou pravděpodobností vzniku a současně se závažnými následky, přičemž nejhorší možná varianta by měla být posuzována vždy.

Pro klasifikaci pravděpodobnosti konkrétního požárního scénáře lze použít např. kvalitativní analýzu včetně pravděpodobnostního stromu událostí se zahrnutím vstupů, které vznik scénáře ovlivňují [38]. Základní návrhové požární scénáře jsou následující:

- *Izolovaný hořící předmět.* Příkladem scénáře je pokoj s minimálním vybavením (např. pokoj pacientů ve zdravotnickém zařízení) se dvěma lůžky a otevřeným oknem, kdy došlo ke vznícení jednoho ze dvou lůžek. Typicky je ale nutné posoudit více variant scénáře s ohledem na konkrétní druh provozu.
- *Rychle se rozvíjející požár.* Jde o požár s výjimečně rychlou dynamikou rozvoje, který nastane v hlavních únikových cestách. Typicky vybíráme jako zasaženou únikovou cestu s největší kapacitou, předpokládáme základní charakteristiku provozu v objektu. Hlavním účelem posouzení je analýza dopadu snížení počtu únikových cest.
- *Požár v neobsazeném prostoru sousedícím s funkční místností.* Scénář modeluje ohrožení velký počet obyvatel sousední místnosti nebo jiného prostoru, než kde požár přímo vznikl. Předpokládáme jeho další postup do prostoru, kde může být největší koncentrace obyvatel budovy. Typickým příkladem je požár ve skladu sousedícím s největší užitkovou místností v budově, obsah místnosti specifikujeme tak, aby vytvářel největší reálné požární zatížení. V užitkové místnosti předpokládáme maximální obsazenost.
- *Požár ve skrytém prostoru sousedícím s funkční místností.* Scénář modeluje požár ve skrytém prostoru uvnitř stěny nebo stropu, který sousedí s velkou obsazenou místností. Předpokládáme, že se dále šíří do prostoru s největší koncentrací obyvatel v budově. Typickým příkladem je požár ve skrytém stropním prostoru nebo dutině stěny. Zdrojem hoření jsou skryté hořlavé materiály, jako např. tepelná nebo elektrická izolace. V užitkové místnosti předpokládáme maximální obsazenost.
- *Požár s malým zdrojem vznícení.* Scénář modeluje omezeně se rozvíjející požár v těsné blízkosti obsazeného prostoru, který následně způsobí významné hoření. Příkladem je požár od cigarety v odpadkovém koši, který následně zapálí vydatnější zdroj hoření, který ovšem obyvatele neohrožuje přímo ohněm. V užitkové místnosti předpokládáme maximální obsazenost.
- *Požár s maximální intenzitou na základě požárního zatížení.* Scénář modeluje požár s největší možnou intenzitou s největší možnou charakteristikou požárního zatížení při běžném provozu v budově. Příkladem je požár vznikající při extrémním nahromadění hořlavých materiálů při normálním provozu v budově. Vlastnosti materiálu volíme takové, aby došlo k jeho nejrychlejšímu rozvoji a maximálnímu vývinu kouře. V objektu předpokládáme základní charakteristiku provozu.
- *Požár působící z vnějšího prostředí.* Scénář je zaměřen na situaci, kdy ke vznícení dochází v místě vzdáleném od hodnoceného prostoru, přičemž požár se do tohoto prostoru rozšířil, odřízl možnost úniku či zde způsobil nepřijatelné podmínky pro obyvatele. Počáteční požár je nejbližší a nejprudší možný. Předpokládá se základní charakteristika provozu v objektu.
- *Požár běžného materiálu s neúčinným systémem požární ochrany.* Scénář modeluje požár vzniklý v běžném hořlavém materiálu v situaci, kdy jsou všechna pasivní a aktivní zařízení požární ochrany neúčinná. Je zaměřen na nespolehlivost či nedostupnost těchto prostředků. Typickým příkladem jsou následující situace:

- Požár vznikající v hořlavých materiálech v chodbě lůžkové části nemocnice. Předpokládá se, že při zjištění požáru personál nechal otevřené všechny dveře a je plně využito kapacity pokojů.
- Požár vznikající v hořlavých materiálech ve velké shromažďovací místnosti uvnitř budovy. Předpokládá se, že hasicí zařízení je mimo provoz.

### 3.4.2 Fáze požáru

V idealizovaném případě rozdělujeme požár do čtyř základních fází:

- *Iniciační (počáteční) fáze.* Během této fáze dochází k akumulaci energie potřebné pro další hoření, uvolňování energie materiálem do okolí je velmi nízké.
- *Fáze rozvoje.* V této fázi se požár rychle rozrůstá, uvolňování energie strmě narůstá. Vzniká sloupec zplodin hoření, vlivem teplotního a tlakového rozdílu je nasáván chladnější okolní vzduch. Jestliže zplodiny dosáhnou stropu, vzniká podstropní proudění a tepelné výměně mezi zplodinami a konstrukcí, formuje se horká vrstva kouře s výrazným teplotním rozhraním. Pokud dosáhne hustota tepelného toku na úrovni podlahy nadkritické hodnoty (udává se  $20 \text{ kWm}^{-2}$ ), nastává celkové vzplanutí. V takovém případě je přežití osob v zasaženém prostoru již prakticky vyloučeno [34].
- *Rozvinutá fáze.* Intenzita hoření je v této fázi plně řízena palivem a přísunem vzduchu v případě, že existuje větrání prostoru. V této fázi je intenzita hoření relativně stabilní.
- *Fáze dohořívání.* V této fázi dochází k postupnému poklesu intenzity hoření vlivem nedostatečného přísunu paliva či vzduchu.

### 3.4.3 Křivky rychlosti uvolňování tepla

Pro analýzu dopadů rozvoje požáru na evakuované osoby je nezbytné stanovit průběh požáru v čase, tedy definujeme *návrhový požár*. Základním a nejjednodušším způsobem bývá prosté stanovení průběhu uvolňování tepla v čase, které definujeme v modelu prostřednictvím křivky *Heat Release Rate* (HRR) a vyjadřujeme ji v jednotkách kW nebo MW.

V požárních modelech využíváme při návrhovém požáru různou míru idealizace, rozdělenou do několika úrovní. Vždy je nutné specifikovat, zda je návrhový požár po dosažení maxima konstantní, zda existuje analogický předpis pro vyhasnutí požáru, a kdy jeho modelové hoření končí.

#### Konstantní výkon

Model předpokládá konstantní průběh výkonu definovaný následujícím vztahem

$$P(t) = C,$$

kde  $P(t)$  je výkon požáru v závislosti na čase  $t$  a  $C$  je konstanta. Nevýhody tohoto nejjednoduššího modelu jsou zřejmé: takto definovaný návrhový požár je nejvíce vzdálen realitě a při simulaci modelu lze očekávat některé nerealistické výsledky zejména na počátku jeho rozvoje. Příklad závislosti je na obr. 3.1.

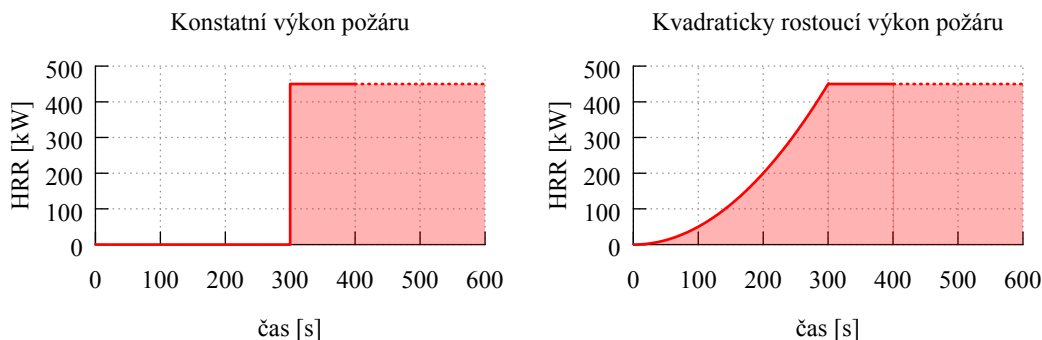


### Kvadraticky rostoucí výkon

Model, v literatuře označovaný jako *t-square fire*, předpokládá kvadraticky rostoucí průběh výkonu. Vychází z výsledků reálných zkoušek, které ukazují, že počáteční počáteční fázi požáru komplexních materiálů složených z více hořlavin (a tedy obtížně analyticky definovatelných) je možné charakterizovat kvadratickou křivkou. Návrhový požár je definovaný následujícím vztahem

$$P(t) = Ct^2,$$

kde  $C$  je opět konstanta. Výkon tedy roste se druhou mocninou času, po dosažení maximální hodnoty výkonu v čase  $t_{\max}$  je výkon požáru již konstantní s hodnotou  $P_{\max}$  až do okamžiku, kdy opět klesá. Příklad závislosti je na obr. 3.1.



**Obr. 3.1:** Srovnání konstantního a kvadratického průběhu výkonu požáru.

### Výkon definovaný komplexní křivkou

Model je v tomto případě popsán např. následujícím analytickým vztahem,

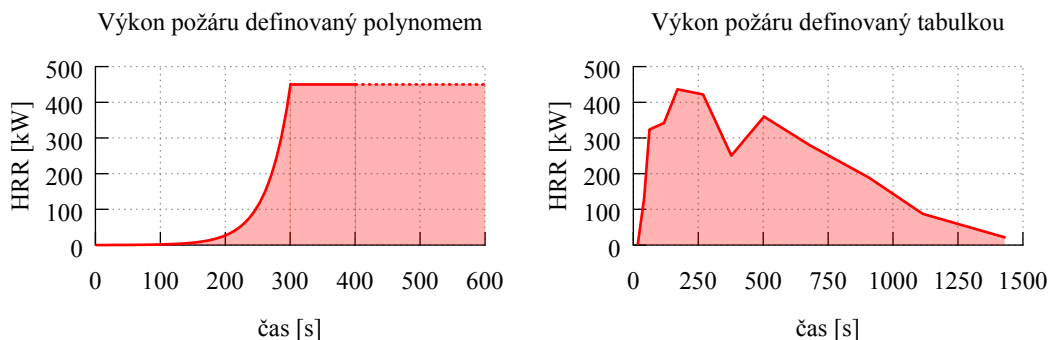
$$P(t) = A + Bt + Ct^2 + De^{Et},$$

kdy je třeba určit jednotlivé konstanty  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  a  $E$  často z experimentálního měření. V praxi se u většího počtu členů polynomu jedná o poměrně obtížný matematický úkol. Po dosažení maximální hodnoty výkonu v čase  $t_{\max}$  je výkon požáru již konstantní s hodnotou  $P_{\max}$  až do okamžiku, kdy opět klesá. Příklad závislosti je na obr. 3.2.

### Výkon definovaný tabulkou

V takovém případě není k dispozici analytický předpis, který umožňuje určit výkon v závislosti na čase  $P(t)$ , ale tabulkové hodnoty, které explicitně definují proměnný výkon požáru v průběhu jeho hoření. Příklad závislosti je na obr. 3.2.

Značným problémem je experimentální stanovení reálného výkonu požáru v průběhu času. Řešení poskytuje např. kalorimetrické měření v laboratorních podmínkách, nicméně ne vždy je modelovaný scénář natolik standardní, aby bylo možné se opřít o již existující data. V takovém případě je žádoucí v popisu modelu podrobně popsat, jakým způsobem byla křivka HRR stanovena a případně z jakých zdrojů autor modelu čerpal.



**Obr. 3.2:** Srovnání příkladu průběhu výkonu požáru stanoveného komplexní křivkou a tabulkovými hodnotami.

### 3.4.4 Rozdělení rychlosti požáru

Pro určení okamžiku  $t_{\max}$ , kdy je výkon požáru již konstantní s hodnotou  $P_{\max}$ , rozlišujeme dle [34] čtyři základní kategorie návrhového požáru dle rychlosti jeho rozvoje. Dále jsou dle [38] popsány typické příklady daného materiálu:

- *Pomalý rozvoj.*  $t_{\max} = 600$  s. Typickým příkladem jsou požáry podlahových krytin.
- *Středně rychlý rozvoj.*  $t_{\max} = 300$  s. Příkladem jsou požáry nábytku.
- *Rychlý rozvoj.*  $t_{\max} = 150$  s. Příkladem jsou požáry lůžkovin nebo čalounění.
- *Velmi rychlý rozvoj.*  $t_{\max} = 75$  s. Příkladem jsou požáry čalouněného či dřevěného nábytku, balicího materiálů, pěnových materiálů apod.

### 3.4.5 Teplotní křivky

V případě, kdy se zaměřujeme na stavební konstrukce, jsou v tuzemských normách zavedeny požární scénáře, které pro prvky použité ve stavebních konstrukcích a objektech stanovují jednu nebo více úrovní tepelného namáhání, to znamená velikost zkušební zatížení v poměru k únosnosti prvku při normální teplotě. Jednotlivým požárním scénářům odpovídají rozdílné teplotní křivky, scénář tedy není určen výkonem zdroje, ale teplotou konstrukce [2].

- *Teplotní normová křivka.* Představuje mezinárodně stanovený jednotný časový průběh pro požár po celkovém vzplanutí, který je definován vztahem

$$T(t) = 345 \log(8t + 1) + 20,$$

kde  $T(t)$  je průměrná teplota ve zkušební peci ve stupních Celsia a  $t$  čas od začátku zkoušky v minutách. Parametry konkrétního požáru se převádí na požár normový tak, aby plocha pod oběma křivkami byla identická.

- *Uhlovodíková teplotní křivka.* Stanovena pro požáry ropných produktů, je definována vztahem

$$T(t) = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20.$$

V tomto případě je třeba zohlednit, že se jedná o velmi rychlý nárůst teploty, což má negativní dopad na posouzení evakuace. Při takto rychlém hoření mohou být některé metody výpočtu evakuace neplatné.

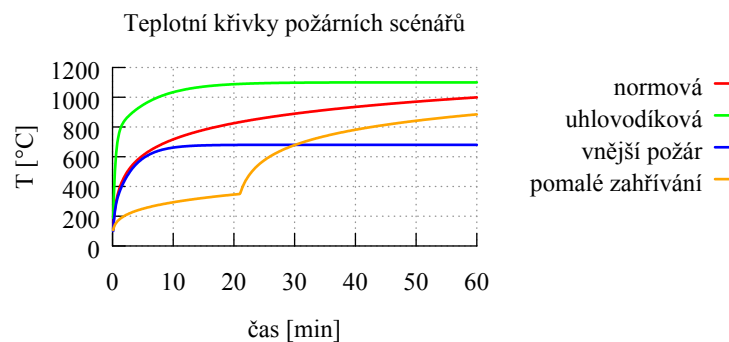
- *Křivka vnějšího požáru.* Stanovena pro případ volně hořícího vnějšího požáru nebo např. obvodové konstrukce, je definována vztahem

$$T(t) = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20.$$

- *Křivka pomalého zahřívání.* Stanovena pro konstrukční prvky, jejichž vlastnosti závisí na vysoké intenzitě zahřívání.

$$T(t) = \begin{cases} 154t^{0,25} + 20, & 0 < t \leq 21 \\ 345 \log[8(t - 20) + 1] + 20, & 21 < t \leq 60 \end{cases}$$

Křivky pro jednotlivé uvedené požární scénáře jsou zachyceny na obr. 3.3.



**Obr. 3.3:** Teplotní křivky pro jednotlivé požární scénáře.

### 3.5 Shrnutí

Vstupní údaje popsané v této kapitole zohledňujeme v použitém softwarovém nástroji ve vztahu k jejich dostupnosti a schopnosti vybraného nástroje jejich vliv příslušným způsobem reprodukovat. Jestliže příslušný vstupní údaj není k dispozici, volíme vždy řešení na stranu bezpečnou, nejčastěji formou přidání časové rezervy k výsledné době potřebné pro evakuaci (RSET). Schopnost softwarového nástroje reprodukovat vliv příslušného vstupního údaje ověřujeme dostupným verifikačním testem, jejich současná úplná sestava je popsána v kapitole 4.3.3.



## 4 Modely pohybu osob a požáru

Výzkum modelování pohybu a chování osob je intenzivně realizován během posledních čtyř desítek let. Zpočátku byla pozornost věnována procesu pohybu, přičemž klíčové studie jsou věnovány dvěma základním směrům:

- pohyb osob v případě mimořádné situace a jejich evakuace,
- pohyb osob v běžných podmínkách, klíčové práce jsou [18, 63, 64].

Výzkum procesu evakuace je novější, v posledních letech se stále více věnuje pozornost behaviorální reakci osob v mimořádných situacích, zejména chování zahrnutému v koncepci procesu před pohybem, spolu s dalším chováním ovlivňujícím proces pohybu, jako například hledáním cesty. Je třeba zdůraznit, že proces před pohybem může vyžadovat dobu stejně dlouhou nebo i delší, než proces pohybu, současný výzkum je proto zaměřen na zjištění empirických údajů o době před pohybem v různých situacích, použitelných v modelech [15, 39, 61], případně na vývoj konkrétních modelů schopných tuto dobu predikovat [43].

### 4.1 Základní kategorie modelů evakuace osob

Nástroje využívané pro modelování a simulaci evakuace rozdělujeme do tří základních kategorií:

- *Modely popisující chování pomocí jednoduchých rovnic.* Popis je založen na empirických údajích a rovnicích, které jsou v písemné formě nebo implementovány do softwarového nástroje. Rovnice jsou odvozeny na základě zjištěného pozorování chování osob, většinou při pohybu v běžných situacích. Tyto modely mohou být použity pro relativně dobré hodnocení doby evakuace v závislosti na stanovených předpokladech a na množství parametrů. Omezující jsou pro ni komplexní scénáře a velký počet osob.
- *Hydraulické modely.* Modely předpokládají osoby automaticky reagující na vnější podněty, nedávají prostor pro individuální rozhodování. V případě vyhlášení poplachu modely předpokládají, že dojde k okamžitému ukončení všech činností a prakticky robotickému vyklizení budovy. Rychlost chůze a směr pohybu se odvozuje pouze podle fyzikálních a geometrických parametrů, jakými je zejména lokální hustota osob a kapacita jednotlivých klíčových prvků infrastruktury. Výsledkem tohoto postupu je většinou relativně optimistické hodnocení času potřebného pro evakuaci, která v reálných případech probíhá vlivem delší doby před pohybem výrazně pomaleji.
- *Modely zahrnující chování osob.* Tyto modely berou v úvahu kromě fyzikální charakteristiky prostoru také jednotlivce jako samostatnou entitu. Zahrnují také reakce na podněty (např. požární nebezpečí) a individualitu každého jednotlivce (vlastní reakční doba, preference určitého únikového východu apod.). Tyto modely mohou poskytovat nejlepší odhad doby evakuace.

## 4.2 Detailní faktory ovlivňující aplikaci modelu

Aplikace modelu evakuace závisí na následujících faktorech:

- účel modelu,
- reprezentace prostoru,
- perspektiva modelu,
- behaviorální vlastnosti modelu.

### 4.2.1 Účel modelu

Modely pohybu osob přistupují k hodnocení evakuačního procesu třemi základními způsoby:

- *Optimalizační přístup.* Uvedený přístup předpokládá, že osoby volí při evakuaci optimální trasu a nezdržují se ostatními činnostmi. Využití je možné v situaci, kdy pracujeme s velkým množstvím osob a lze na ně nahlížet jako na homogenní soubor bez potřeby analyzovat chování jednotlivých osob a jeho dopady na evakuaci jako celek.
- *Simulační přístup.* V rámci tohoto přístupu reprezentujeme každou osobu samostatně včetně její trajektorie, a můžeme analyzovat její individuální rozhodnutí. Míra dosažitelné podrobnosti modelu i přesnost jejich výsledků se v různých nástrojích velmi liší.
- *Analýza rizik.* V rámci tohoto přístupu se zaměřujeme na nebezpečí spojené s evakuací a kvantifikujeme riziko, nejčastěji prostřednictvím opakovaných simulací modelu a statistickým zpracováním výsledků.

### 4.2.2 Reprezentace prostoru

Prostor, v rámci kterého se pohybují modelované osoby, rozdělujeme dle jeho reprezentace následujícím způsobem:

- *Hrubá síť.* Prostor je v modelu rozdělen na jednotlivé sekce (pokoje, chodby, schodiště apod.), pohyb osob je rozlišován pouze na úrovni přechodu mezi těmito sekcemi.
- *Jemná síť.* Model rozděluje prostor na velkým počet relativně malých buněk, přes které se osoby pohybují.
- *Spojité prostor.* Prostor v takovém případě není nijak diskretizován. Poloha každé osoby je aktualizována zcela přesně.

Modely aplikující jemnou síť či spojitý prostor jsou schopny modelovat překážky a další omezení, která ovlivňují průběh evakuace osob z objektu.

### 4.2.3 Perspektiva modelu

Perspektivu modelu rozdělujeme následujícím způsobem:

- *Perspektiva osoby.* Rozlišujeme míru podrobnosti, jakou je vnímána osoba modelem, do následujících úrovní:

- *Globální perspektiva.* Osoby jsou vnímány jako homogenní soubor osob. V tomto případě je obtížné studovat dopady nepříznivých podmínek prostředí na jednotlivé osoby, lze určit pouze rozdělený nebo průměrný dopad na populaci jako celek a nelze sledovat ani dopady na specifické skupiny (např. osoby s omezenou pohyblivostí).
- *Individuální perspektiva.* Předchozí předpoklady v tomto případě neplatí. Osoby jsou rozlišeny na úroveň jednotlivce, je možné analyzovat dopady nepříznivých podmínek na tyto jednotlivce nebo specificky vymezené skupiny osob.
- *Perspektiva prostoru.* Rozlišujeme míru podrobnosti, jakou je vnímána budova osobou, do následujících úrovní:
  - *Globální perspektiva.* V tomto případě mají modelované osoby automaticky informace o všech detailech budovy, zejména jde o rozložení únikových východů, délku evakuačních tras apod. Při simulaci modelu proto automaticky volí nejlepší možnou strategii.
  - *Individuální perspektiva.* Předchozí předpoklady v tomto případě neplatí. Osoby volí svoji únikovou cestu dle osobní zkušenosti, individuálních informací apod.

#### 4.2.4 Behaviorální vlastnosti modelu

Pro reprezentaci vlastností zahrnujících chování osob v průběhu evakuace model implementuje konkrétní způsob modelování tohoto chování, které rozlišujeme následujícím způsobem:

- *Bez modelu chování.* V tomto případě je modelován pouze pohyb osob na základě fyzikálních vlivů bez specifik chování osob.
- *Implicitní chování.* Konkrétní charakteristiky chování jsou osobám přiřazeny implicitně prostřednictvím často komplikovaných pravidel závislých na externích datech, jejichž kvalita určuje validitu modelu jako celku.
- *Podmíněné chování.* Osoby reagují na situaci na základě striktně definovaných pravidel vycházejících z místních podmínek nebo lokální geometrie, které lze připodobnit programátorským technikám „pokud je situace A, potom nastává reakce B“. Všechny osoby jsou ovlivněny stejným způsobem a individuální chování je potlačeno, model je přísně deterministický.
- *Pravděpodobnostní chování.* Tato skupina modelů rozšiřuje výše uvedené podmíněné chování o pravděpodobnostní stochastický prvek, který umožňuje v chování osob variace a při opakované simulaci dává odlišné výsledky více blízké reálným očekáváním.
- *Agentní technologie.* Modely jsou zaměřeny na aplikaci umělé inteligence prostřednictvím tzv. agentní technologie. Jednotlivé osoby, tzv. agenty, jsou samostatné entity, jejich chování je odvozeno od interakce s ostatními agenty i okolním prostředím.

#### 4.2.5 Model pohybu

Ve většině případů modely předpokládají pohyb osoby prostorem s rychlostí blízkou jejich optimální rychlosti, která klesá v místech zúžení s vyšší hustotou osob a vede ke vzniku kongescí a zdržení. Rozdělení metod modelování rychlosti pohybu je následující:

- *Korelace s hustotou.* Rychlost a intenzita pohybu osob je odvozena od lokální hustoty osob.
- *Uživatelská definice.* Uživatel modelu explicitně určuje rychlost pohybu v jednotlivých sektorech geometrie.
- *Osobní vzdálenost.* Rychlost osob je odvozena na základě existence minimálního osobního prostoru kolem každé osoby.
- *Potenciál.* Metoda aplikuje na každou buňku prostoru číslo vyjadřující potenciál pro pohyb daným směrem. Vzniká tak potenciálová mapa, která vymezuje preferované či naopak odmítané strategie evakuace. Osoba má tendenci vyhledávat cestu s nejmenším potenciálem, jde o analogii s pohybem objektu v gravitačním poli.
- *Nejbližší volná buňka.* Modelovaná osoba čeká s přemístěním na uvolnění sousední buňky.
- *Podmíněný přístup.* Pohyb osoby je podmíněn okolím (geometrie prostoru, okolní osoby, požární riziko).
- *Funkční analogie.* Model pohybu je odvozen od analogie s jiným jevem, např. pohybem kontinua, gravitací, magnetickým polem apod.
- *Externí propojení.* K výpočtu pohybu osob dochází pomocí externího nástroje, jeho výstupní údaje jsou vstupními údaji pro model.
- *Získané znalosti.* Model pohybu je založen pouze na obecných znalostech o evakuačním procesu, je zaměřen na výpočet oblastí s kongescemi, zúžením apod. Nedochozí k analýze evakuačního času.
- *Volný proud.* Model pohybu je založen pouze na hodnotách pro volný, neovlivněný proud. Výsledné časy jsou následně „opraveny“ o zpoždění a další koeficienty pro lepší přiblížení výsledku realitě.
- *Celulární automata.* Osoby se pohybují v síti buněk, přičemž jejich posun z jedné buňky do druhé je řízen matematickou přechodovou tabulkou.

Řada modelů aplikuje více popsaných přístupů k modelování chování současně. Dobrým příkladem jsou celulární automata a metoda využití nejbližší volné buňky, kde druhá uvedená metoda je výrazným zjednodušením obecnějšího a mnohem komplexnějšího prvního přístupu. Jiné modely zase slučují metodu potenciálové mapy a osobní vzdálenosti nebo nejbližší volné buňky.

#### 4.2.6 Požární data

Řada modelů umožňuje integraci výsledků simulace modelu požáru přímo do modelu pohybu osob. Tato integrace nicméně probíhá různými způsoby a pro uživatele modelu je velmi důležité pochopit konkrétní podstatu tohoto propojení v jím užívaném nástroji. Postupy integrace požárních dat jsou následující:

- import požárních dat z externího modelu,
- vložení požárních dat v konkrétních okamžicích simulace evakuace,
- model pohybu osob obsahuje vlastní požární model.



Jestliže integrace požárních dat není možná žádným z uvedených způsobů, probíhá evakuace analogicky s požárním cvičením, tedy dojde k vyklizení prostoru, ale nedochází k vystavení modelovaných osob negativním účinkům požáru.

Jednoznačnou motivací k integraci požárních dat je hodnocení míry rizika pro evakuované osoby vlivem nebezpečných podmínek v průběhu požáru. Toto riziko je hodnoceno na základě tří hlavních směrů dosavadního výzkumu:

- Metoda výpočtu fyziologických dopadů vysoké teploty a toxických zplodin hoření na unikající osoby. Metoda je popsána výše, zdrojem jsou práce [47, 35].
- Chování osob v prostorách s různou zakouřeností. Jsou k dispozici empirická data o dopadu charakteru kouře na chování osob, zdrojem je práce [31].
- Vztahem mezi stupněm optické hustoty kouře a procentuálním zastoupením osob, které takto zakouřeným prostorem následně projdou, resp. zvolí alternativní trasu, se zabývá především práce [13].

#### 4.2.7 Využití modelu požáru

Model požáru je většinou sestavován a simulován odděleně od modelu pohybu osob. Základní údaje rozdělení modelů požáru je následující:

- *Výpočtové nebo pravděpodobnostní modely.* Nejjednodušší a nejméně realistická varianta. Výpočet probíhá často velmi jednoduchým způsobem s omezenými možnostmi aplikace.
- *Zónové modely.* Slouží zejména pro predikci vlastností horní horké vrstvy v průběhu požáru. Nejsou schopny postihnout turbulence a další nelineární efekty.
- *Modely na základě technologie CFD.* Nejpokročilejší a v současnosti nejvíce využívaná varianta. Poskytují realistické výsledky, mají široké možnosti použití, ale jsou velmi náročné na výpočetní výkon.

V modelu požáru aplikujeme zvolený typ návrhového požáru. Klíčové vstupní údaje pro model návrhového požáru jsou následující:

- *Model uvolňování tepla.* Nejčastěji je aplikován jednoduchý model pomocí křivky HRR, případně model spalování.
- *Křivka výkonu návrhového požáru.* Rozhodující je průběh a okamžik dosažení maxima výkonu, jeho dalšího vývoj a případné vyhasnutí (je-li tato fáze pro posouzení relevantní).

Pokročilé modely požáru aplikují submodely zohledňující dílčí charakteristiky požáru. Mezi důležité submodely s měřitelným vlivem na výsledek patří zejména následující:

- radiační model,
- model kouře.
- model materiálu včetně jeho tepelné vodivosti,
- model hašení, odvodu zplodin a odvětrávání,
- použitá paralelizace výpočtu modelu.

### 4.2.8 Shrnutí

V současnosti jsou na softwarové nástroje pro modelování pohybu osob stále relativně nákladné, což je způsobeno srovnatelnými náklady na jejich vývoj ve srovnání s jinými produkty, ale na druhou stranu výrazně užší základnou uživatelů vlivem specializace problematiky požární bezpečnosti. Proces výběru vhodného nástroje na základě požadavků uživatele a jeho budoucího účelu je proto velmi důležitý. Základní srovnávací studií je [41], její velkou výhodou je existující aktualizace.

## 4.3 Verifikace, kalibrace a validace modelu

Proces *verifikace* a *validace* modelu je klíčovým faktorem při hodnocení spolehlivosti výsledků, které modely pohybu osob poskytují, a současně při vymezení oblasti jejich reálné použitelnosti. Při konkrétní aplikaci modelu pohybu osob k procesu verifikace a validace přistupuje ještě proces kalibrace modelu, který zahrnuje dílčí modifikaci jednotlivých parametrů modelu.

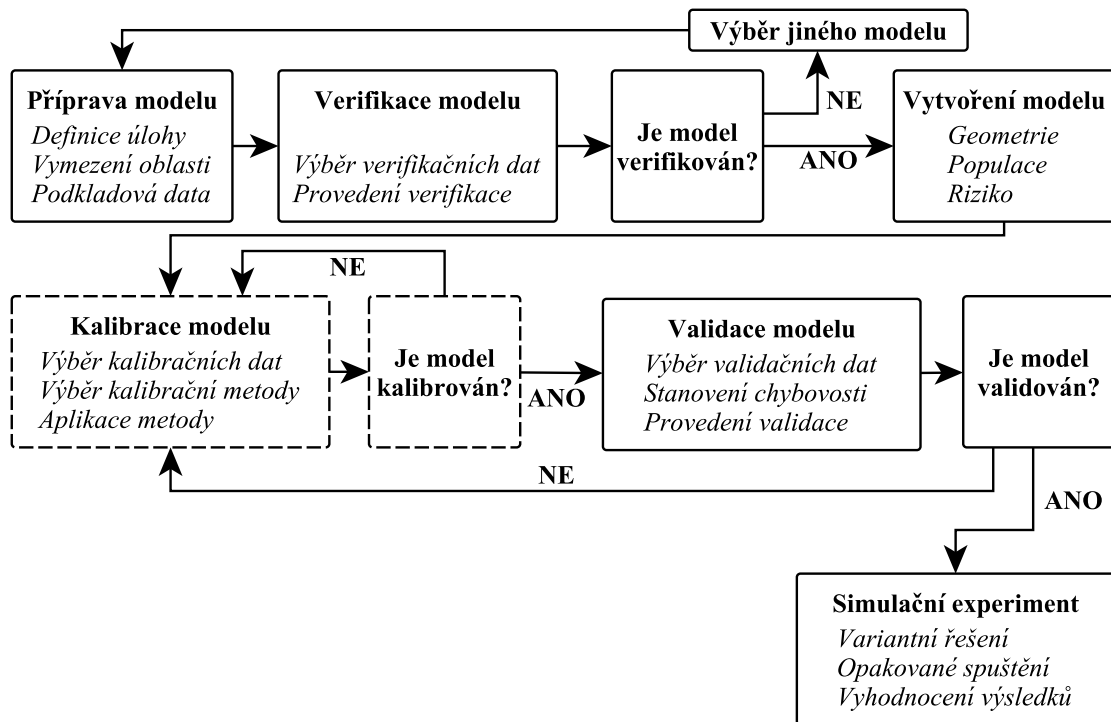
Tyto pojmy definujeme následujícím způsobem:

- *Verifikace modelu.* Pomocí tohoto procesu stanovíme, zda praktická realizace výpočtu modelu dostatečně věrně reprezentuje jeho koncept a očekávané výsledky. Tato definice je obecně akceptována v požárním inženýrství a znamená soulad modelu s požadavky uživatele, které vyplývají z řešeného problému [7]. Neúspěšná verifikace modelu je z uživatelského hlediska neopravitelná, model vykazuje v takovém případě závažné nedostatky v některém ohledu a je třeba úzce vymežit jeho použitelnost, případně zvolit jiný model.
- *Kalibrace modelu.* Proces představuje konfiguraci jednotlivých parametrů modelu tak, aby se jeho chování maximálně shodovalo s reálným očekáváním. Vzhledem ke stochastické povaze modelu pohybu osob je přípustné provádět jeho kalibraci pouze úpravou takových parametrů, které nejsou přesně známy či empiricky změřeny. Kalibraci modelu požáru je vzhledem k jeho deterministické povaze provádět *zcela nepřípustné*.
- *Validace modelu.* Pomocí tohoto procesu stanovíme, zda jsou výsledky modelu v souladu s empirickými výsledky z pohledu použití modelu a jeho výpočetní metody [7]. Jde o konečný test modelu, který musí být od verifikace a kalibrace zcela oddělen, a to především z pohledu použitých dat. Data musí být rozdílná nejen fyzicky, ale i typově. Pokud je to možné, je proces validace oddělen i personálně, tedy je prováděn jiným pracovníkem než tím, který provedl předchozí kalibraci. V případě neúspěšné validace se zpravidla vracíme ke kalibraci modelu a proces opakujeme.

Proces verifikace a validace modelu provádíme samostatně, případně prokazujeme verifikaci a validaci použitého nástroje již existující verifikační a validační studií. Při požadavku na prokázání ověření použitého modelu nelze v současné době použít standardizovaný postup dle ISO, je ale možné použít dílčí zdroje poskytující příslušné testy [4, 55, 58].

Ověření modelu znamená jeho vhodnost pro konkrétní oblast použití a posiluje obecnou důvěru v konkrétní model, neznamená ovšem konečné a úplné prokázání jeho správnosti a shody s realitou. Ověřování modelů je tak trvalý proces a součástí životního cyklu softwarového nástroje, který realizujeme zejména následujícími způsoby [4, 1, 58]:

- *Testování komponent.* Ověřujeme, zda klíčové součásti použitého nástroje fungují podle předpokladů.



**Obr. 4.1:** Schématické znázornění vztahu mezi verifikací, kalibrací a validací modelu. Fázi kalibrace modelu provádíme pouze v případě jeho stochastické povahy.

- *Funkční ověření.* Ověřujeme, zda možnosti modelu odpovídají předpokladům jeho konkrétního použití.
- *Kvalitativní ověření.* Ověření shody výsledků modelu s očekáváním či empirickými daty v situacích, kterou vyjadřujeme jinak než numericky, např. vizualizací výsledků.
- *Kvantitativní ověření.* Ověření shody výsledků modelu s očekáváním či empirickými daty v situacích, které lze vyjádřit numerickými údaji.

### 4.3.1 Proces verifikace modelu

Verifikační testy prokazují schopnost použitého modelu respektovat základní uživatelské požadavky na vlastnosti modelu, které vyplývají z předchozích vstupních údajů pro inženýrské posouzení uvedených v kapitole 3.

Verifikační testy konkrétního modelu jsou tak zcela zásadním krokem, který jeho uživateli vymezi použití modelu pro daný účel. Jestliže proces verifikace ukáže, že některé důležité aspekty inženýrského posouzení není model schopen reprodukovat (např. specifické charakteristiky osob nebo jejich podmínky), musí uživatel v případě aplikace modelu tuto skutečnost komentovat a odpovídajícím způsobem zohlednit, např. zvýšením minimální časové rezervy v celkové době potřebné pro evakuaci (RSET).

Klíčové behaviorální komponenty modelu, které je třeba podrobit verifikaci, lze rozdělit následujícím způsobem [23, 58]:

- doba před pohybem,
- pohyb a navigace,
- volba východů,
- dostupnost evakuační trasy a její výběr,
- podmínky proudění osob a jeho omezení.

V následující části jsou pro jednotlivé skupiny verifikačních testů uvedeny jejich doporučení varianty:

### Verifikace doby před pohybem

V rámci této skupiny ověřujeme čas potřebný pro zahájení evakuace [23]:

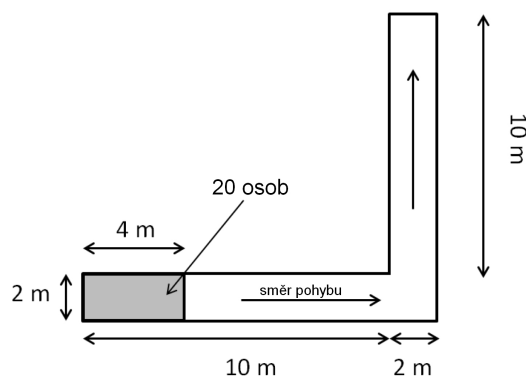
- Rozdělení doby před pohybem
  - Geometrie: Místnost o rozměrech 8 m na 5 m s východem šířky 1 m.
  - Scénář: V místnosti je 10 osob s náhodným rozmístěním. Pro osoby aplikujeme příslušné rozdělení doby před pohybem dle možností modelu (např. normální rozdělení, rovnoměrné apod.).
  - Očekávané chování: Okamžik pohyb každé osoby směrem k východu spadá do příslušného intervalu.
  - Metoda: Kvantitativní verifikace.
  - Požadavky na uživatele: Test je třeba opakovat pro každé ze zvolených rozdělení a statisticky zpracovat.

### Verifikace pohybu a navigace

V rámci této skupiny testů ověřujeme klíčové charakteristiky osob z hlediska jejich pohybu, schopnosti orientace v prostoru a účinků nepříznivých podmínek, které jsou uvedeny v kapitole 3. Testy jsou sestaveny s ohledem na klíčové vlastnosti aktuálně dostupných modelů [41].

- Rychlost chůze osoby v koridoru
  - Geometrie: Koridor délky 40 m a šířky 2 m.
  - Scénář: Jedna osoba s pevně stanovenou rychlostí  $1 \text{ ms}^{-1}$  projde koridorem.
  - Očekávané chování: Osoba dosáhne konce koridoru v čase 40 s.
  - Metoda: Kvantitativní verifikace.
  - Požadavky na uživatele: Výsledky testu závisí na reprezentaci prostoru (viz kapitola 4.2.2). Měly by být proto opakovány nejméně pro dvě různé orientace koridoru (např.  $0^\circ$  a  $90^\circ$ ) a v případě možnosti také pro různé nastavení jemnosti sítě reprezentující prostor.
- Rychlost chůze osoby po schodech
  - Geometrie: Schodiště délky 100 m a šířky 2 m.

- Scénář: Jedna osoba s pevně stanovenou rychlostí  $1 \text{ ms}^{-1}$  projde schodištěm nahoru a dolů.
  - Očekávané chování: Osoba dosáhne konce schodiště v čase 100 s.
  - Metoda: Kvantitativní verifikace.
  - Požadavky na uživatele: Podobně jako v předcházejícím testu je třeba ověřit dopady reprezentace prostoru na výsledky rotací koridoru a změnou jemnosti sítě.
- Pohyb skupiny osob kolem rohu koridoru
    - Geometrie: Koridor délky 10 m a šířky 2 m, na který navazuje druhá část pod úhlem  $90^\circ$  se stejnými parametry, konkrétní uspořádání je na obr. 4.2.
    - Scénář: Dvacet osob je rovnoměrně rozloženo na začátku koridoru na ploše 4 m na 2 m. Jejich reakční doba je okamžitá a mají pevně stanovenou rychlost  $1 \text{ ms}^{-1}$ .
    - Očekávané chování: Úspěšná navigace osob během simulace kolem rohu koridoru bez jejich uvíznutí či dokonce průchodu zdi.
    - Metoda: Kvalitativní verifikace.
    - Požadavky na uživatele: Zvláštní požadavky nejsou. Test je zaměřen primárně na schopnost pohybu kolem rohu koridoru, neklade požadavky na specifické chování osob v této situaci.

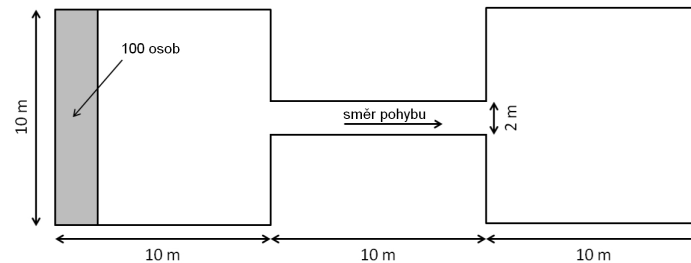


**Obr. 4.2:** Geometrie verifikačního testu pohybu osob kolem rohu koridoru.

- Demografické vlastnosti osob
  - Geometrie: Místnost o rozměrech 100 m na 100 m.
  - Scénář: 100 osob je rovnoměrně rozloženo v místnosti, jejich rychlost pohybu je rozdělena způsobem odpovídajícím předpokládanému demografickému složení osob v závislosti na typu budovy. Demografické parametry je možné získat např. ve studii [42].
  - Očekávané chování: Distribuce rychlosti chůze dle požadovaného statistického rozdělení.
  - Metoda: Kvantitativní verifikace.

- Požadavky na uživatele: Test je třeba opakovat pro každé ze zvolených rozdělení a statisticky zpracovat.
- Vliv omezené viditelnosti na rychlost chůze
  - Geometrie: Koridor o délce 100 m, šířce 2 m a s východem umístěným na konci koridoru.
  - Scénář: Volná rychlost chůze pohybu osoby je nastavena na hodnotu  $1,25 \text{ ms}^{-1}$ , aplikujeme koeficient extinkce  $1,0 \text{ m}^{-1}$  a v modelu nepoužíváme žádné zdroje světla. Test je založen na doporučení publikovaném ve studii modelu FDS+Evac [37] a vychází ze studie analyzující korelace mezi viditelností a rychlostí pohybu v evakuačních modelech [56].
  - Očekávané chování: Osoba dosáhne konce koridoru ve stejnou dobu, která je určena rovněž manuálním výpočtem dle korelace ve studii [56].
  - Metoda: Kvantitativní verifikace.
  - Požadavky na uživatele: Test je třeba opakovat pro různé extinkční koeficienty na základě datových setů publikovaných v dostupných studiích [16, 32].
- Fyziologický vliv kouře a toxických zplodin
  - Geometrie: Místnost o rozměrech 10 m a 10 m a výšce 3 m.
  - Scénář: Model je zaměřen na test implementace konceptu FED [47, 53]. Osoba je umístěna do středu místnosti s extrémně vysokou reakční dobou, která zamezí jejímu pohybu, a je vystavena negativnímu vlivu různých toxických látek (HCN, CO, HCl atd.) a teploty.
  - Očekávané chování: Hodnota  $FED = 1$  je dosažena ve stejnou dobu v modelu i ručním výpočtem.
  - Metoda: Kvantitativní verifikace.
  - Požadavky na uživatele: Test je možné uskutečnit pouze v případě, že zvolený model zahrnuje také požární data, resp. data o toxicitě. Další informace o modelech tohoto typu lze získat v přehledových studiích [41].
- Prostisměrné proudění osob
  - Geometrie: Dvě místnosti o rozměrech 10 m a 10 m, spojené koridorem o délce 10 m a šířce 2 m.
  - Scénář: Do jedné místnosti je umístěna skupina 100 osob s okamžitou reakční dobou a rychlostí chůze rozloženou dle typu budovy [42].
    1. Skupina 100 osob se přemístí z jedné místnosti do druhé, čas je zaznamenán.
    2. Test opakujeme pro dalších 10, 50 a 100 osob ve druhé místnosti s identickými parametry jako v první místnosti.
    3. Obě populace se nyní pohybují do opačných místností koridorem, čas je zaznamenán.
  - Očekávané chování: Doba pohybu osob koridorem narůstá se zvyšující se intenzitou protisměrného proudění.

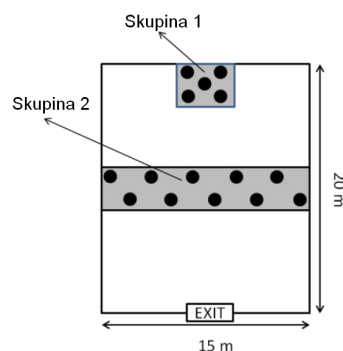
- Metoda: Kvalitativní verifikace.
- Požadavky na uživatele: Nejsou konkrétní požadavky, výsledky nicméně vyžadují kvalitativní rozbor.



**Obr. 4.3:** Geometrie verifikačního testu protisměrného proudění osob.

- Skupinové chování osob

- Geometrie: Místnost o rozměrech 15 m a 20 m s východem o šířce 1 m.
- Scénář: V místnosti je 5 osob v rámci jedné skupiny, 4 osoby s okamžitou reakční dobou a volnou rychlostí pohybu  $1,25 \text{ ms}^{-1}$  a pátá osoba s redukovanou rychlostí pohybu na hodnotu  $0,5 \text{ ms}^{-1}$ . V centrální části místnosti je další skupina 10 osob s výrazně redukovanou rychlostí  $0,2 \text{ ms}^{-1}$ . Osoby v první skupině jsou směrem k východu místnosti.
- Očekávané chování: Osoby v první skupině dosáhnou východu společně, respektive se jejich okamžik průchodu exitem nebude lišit o více než 10 s.
- Metoda: Kvantitativní verifikace.
- Požadavky na uživatele: Použitý model musí zahrnovat skupinové chování osob [41].

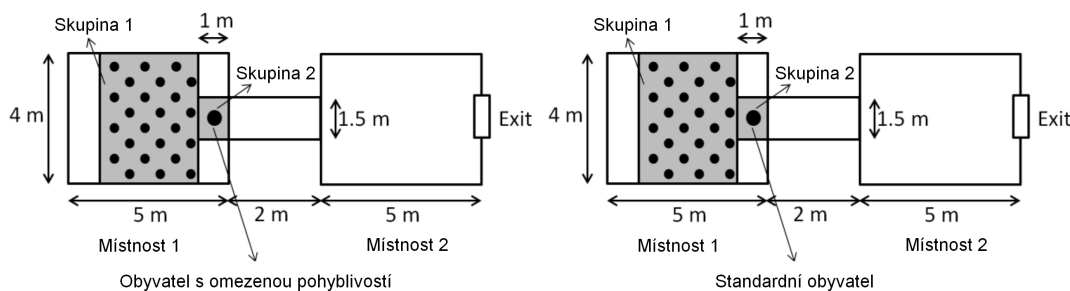


**Obr. 4.4:** Geometrie verifikačního testu skupinového chování osob.

- Osoby s omezenou pohyblivostí

- Geometrie: Dvě místnosti o rozměrech 5 m a 4 m spojené koridorem o délce 2 m a šířce 1,5 m. Ve druhé místnosti je umístěn východ.

- Scénář 1: Místnost 1 je obsazena skupinou 24 osob s rychlostí pohybu  $1,25 \text{ ms}^{-1}$  a standardním půdorysem těla a 1 osobou s omezenou rychlostí pohybu  $0,8 \text{ ms}^{-1}$  v místnosti a  $0,4 \text{ ms}^{-1}$  v koridoru, přičemž půdorys osoby zabírá více než polovinu šířky koridoru (model osoby na kolečkovém křesle). Všechny osoby odejdou východem ve druhé místnosti.
- Scénář 2: Identický test bez osoby s omezenou pohyblivostí, všech 25 osob má identické vlastnosti.
- Očekávané chování: Osoby v prvním případě dosáhnou východu za delší dobu než ve druhém případě.
- Metoda: Kvalitativní verifikace.
- Požadavky na uživatele: Použitý model musí zahrnovat osoby s omezenou pohyblivostí nebo osoby s výrazně odlišným půdorysem. Je vhodné použít vizualizační nástroj.



**Obr. 4.5:** Geometrie verifikačního testu modelu osob s omezenou pohyblivostí.

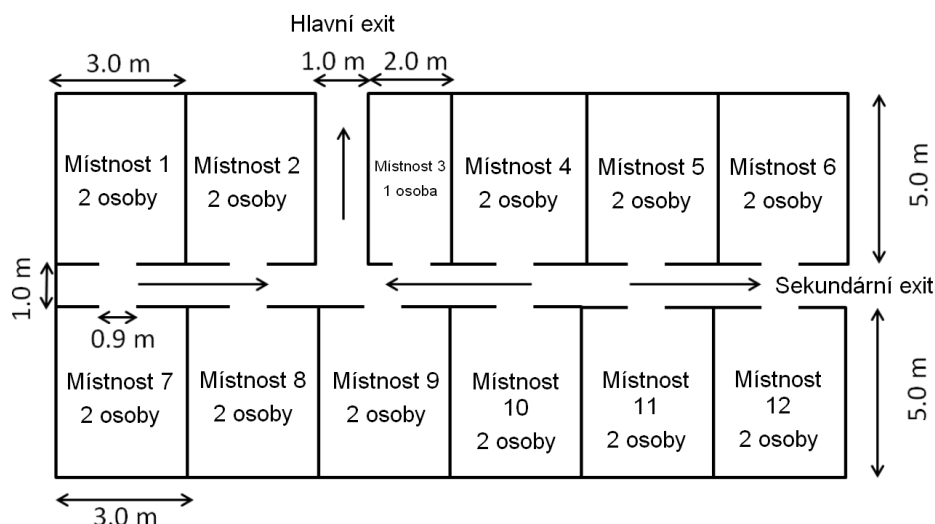
### Verifikace volby východu

Skupina verifikačních testů je zaměřena na schopnost modelu specifikovat konkrétní využití únikových východů. Dílčí komponenty softwarových nástrojů, které tuto vlastnost garantují, jsou založeny na jednoduchých kritériích (např. volba nejbližšího východu nebo nutnost specifikace uživatelem modelu), která znamenají striktně deterministický přístup (první test), či je schopen zahrnout psychologické a sociální aspekty evakuace na individuální úrovni pravděpodobnostním přístupem (druhý a třetí test).

- Přirazení konkrétního východu osobám
  - Geometrie: Místnost dle obr. 4.6.
  - Scénář: V místnostech jsou rozmístěny osoby dle schématu s okamžitou reakční dobou a rychlostí pohybu dle typu budovy [42]. Osoby v místnostech 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 a 10 jsou přiřazeny k hlavnímu východu, ostatní osoby k sekundárnímu východu.
  - Očekávané chování: Osoby opustí geometrii preferovanými východy. Test ověřuje deterministické schopnosti modelu.
  - Metoda: Kvalitativní verifikace.

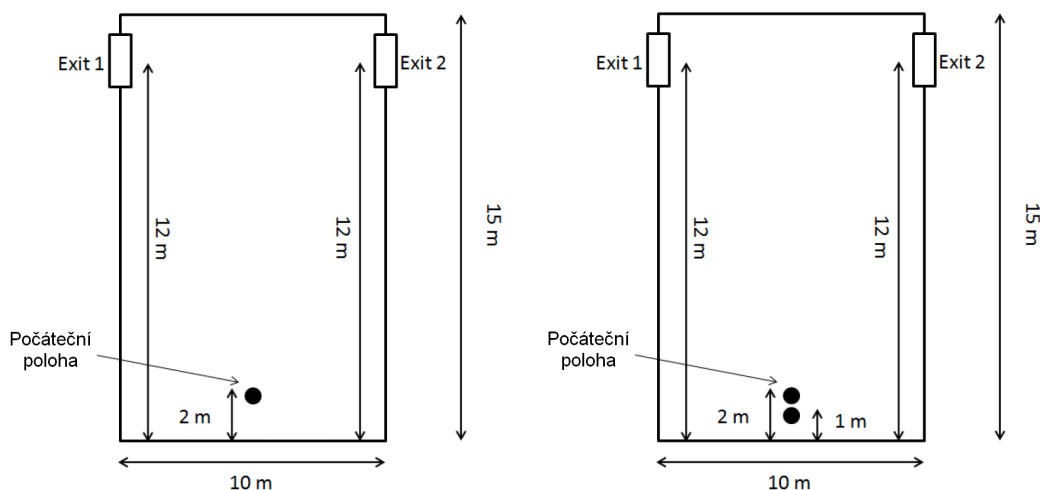


- Požadavky na uživatele: Nejsou kladeny zvláštní požadavky. Je vhodné použít vizualizační nástroj. Uživatel modelu musí vzít v úvahu, zda jeho aplikovaný model pracuje na deterministickém nebo pravděpodobnostním principu.



**Obr. 4.6:** Geometrie verifikačního testu přiřazení konkrétního východu osobám.

- Sociální aspekty při volbě východu
  - Geometrie: Místnost o rozměrech 10 m a 15 m dle obr. 4.7.
  - Scénář 1: Osoba s rychlostí pohybu  $1,0 \text{ ms}^{-1}$  a okamžitou reakční dobou, která nemá pevně stanoven preferovaný únikový východ. Opakovaným spuštěním testu dosáhneme stabilního rozložení volby únikového východu s odchylkou nepřesahující 1 % pro další spuštění simulace.
  - Scénář 2: Identický test, přidáme druhou osobu se stejnými parametry umístěnou 2 m před první osobu, která má pevně přiřazen únikový druhý východ. Opakovaným spuštěním testu dosáhneme stabilního rozložení volby únikového východu s odchylkou nepřesahující 1 % pro další spuštění simulace.
  - Očekávané chování: Ve scénáři č. 2 došlo k vyššímu využití východu č. 2. Test ověřuje pravděpodobnostní schopnosti modelu.
  - Metoda: Kvantitativní verifikace.
  - Požadavky na uživatele: Test je možné realizovat pouze v případě, kdy použitý model neaplikuje výrazně jednodušší (deterministickou) volbu únikového východu, která sociální vliv nezahrnuje. Jestliže je model založen výhradně na deterministické metodě volby únikových východů, uživatel musí tuto skutečnost okomentovat a odpovídajícím způsobem zohlednit.
- Preference známého únikového východu
  - Geometrie: Místnost o rozměrech 10 m a 15 m dle obr. 4.8.



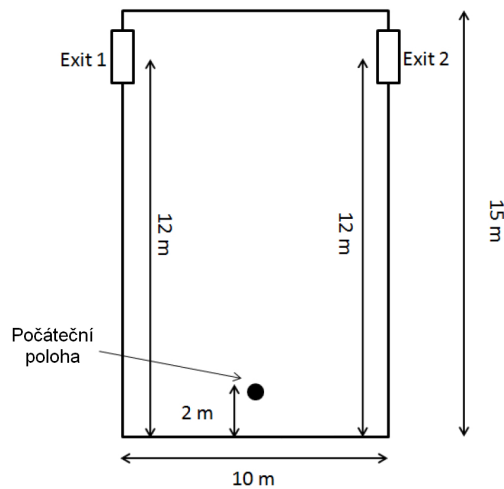
**Obr. 4.7:** Geometrie verifikačního testu sociálních aspektů při volbě východu.

- Scénář 1: Osoba s rychlostí pohybu  $1,0 \text{ ms}^{-1}$  a okamžitou reakční dobou, která není obeznámena s žádným z únikových východů. Opakovaným spuštěním testu dosáhneme stabilního rozložení volby únikového východu s odchylkou nepřesahující 1 % pro další spuštění simulace.
- Scénář 2: Identický test, osoba je obeznámena s únikovým východem č. 2. Opakovaným spuštěním testu dosáhneme stabilního rozložení volby únikového východu s odchylkou nepřesahující 1 % pro další spuštění simulace.
- Očekávané chování: Ve scénáři č. 2 došlo k vyššímu využití východu č. 2. Test ověřuje pravděpodobnostní schopnosti modelu.
- Metoda: Kvantitativní verifikace.
- Požadavky na uživatele: Test je možné realizovat v případě, kdy použitý model neaplikuje výrazně jednodušší (deterministickou) volbu únikového východu, kdy uživatel přímo definuje procentuální vytížení únikových východů. Jestliže je model založen výhradně na deterministické metodě volby únikových východů, uživatel musí tuto skutečnost okomentovat a odpovídajícím způsobem zohlednit.

### Verifikace dostupnosti evakuační trasy a jejího výběru

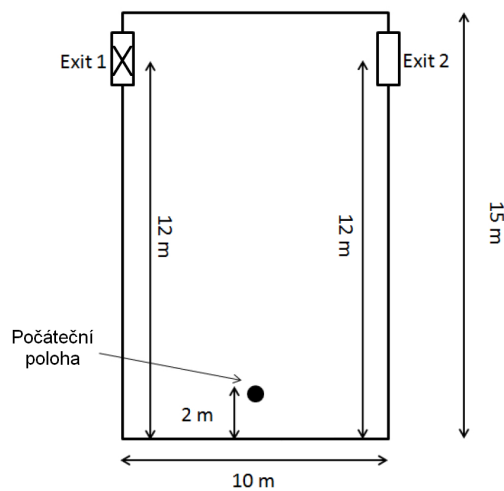
Verifikační test je zaměřena na schopnost modelu přiřadit konkrétní únikovou cestu dynamicky v průběhu evakuace, tedy zohlednit např. uzavření konkrétního únikového východu z důvodu nepříznivých podmínek pro osoby [23].

- Dynamická změna dostupného únikového východu
  - Geometrie: Místnost o rozměrech 10 m a 15 m dle obr. 4.9.
  - Scénář: Osoba s rychlostí pohybu  $1,0 \text{ ms}^{-1}$  a okamžitou reakční dobou je umístěna do místnosti. Po 1 s od zahájení evakuace je uzavřen únikový východ č. 1.
  - Očekávané chování: Východ č. 1 není použit.



**Obr. 4.8:** Geometrie verifikačního testu preference známého únikového východu.

- Metoda: Kvantitativní verifikace.
- Požadavky na uživatele: Test je možné realizovat v případě, kdy použitý model obsahuje komponentu pro dynamickou volbu únikových východů a jejich dostupnost.



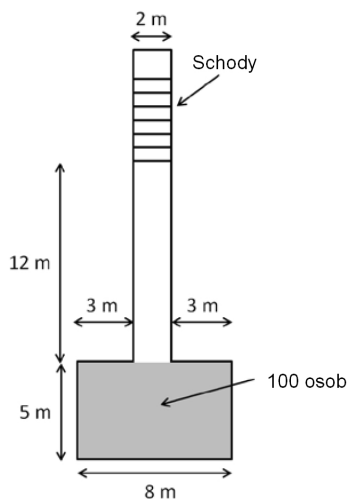
**Obr. 4.9:** Geometrie verifikačního testu dynamické změny dostupného únikového východu.

### Verifikace proudění osob a jejich omezení

Skupina verifikačních testů je zaměřena na schopnost modelu reprodukovat kongesce v místech zúžení geometrie a na obecný vztah mezi rychlostí pohybu osob, jejich hustotou a intenzitou pohybu [23, 27, 63].

- Vznik kongesce
  - Geometrie: Místnost se schodištěm směrem dolů dle obr. 4.10.

- Scénář: V místnosti je 100 osob s rychlostí rozloženou v populaci dle typu budovy [42] a okamžitou reakční dobou.
- Očekávané chování: Vznik kongesce u východu z místnosti a na počátku schodiště.
- Metoda: Kvalitativní verifikace.
- Požadavky na uživatele: Nejsou kladeny zvláštní požadavky.



**Obr. 4.10:** Geometrie verifikačního testu vzniku kongesce.

- Maximální intenzita proudění osob
  - Geometrie: Místnost o rozměrech 8 m a 5 m s východem o šířce 1 m umístěným ve středu kratší strany.
  - Scénář: V místnosti je 100 osob s přiřazeným únikovým východem, který má pevně stanovenou maximální propustnost.
  - Očekávané chování: Vznik kongesce u východu z místnosti a na počátku schodiště.
  - Metoda: Kvantitativní verifikace.
  - Požadavky na uživatele: Test je citlivý na použití konkrétní sítě reprezentující prostor. Maximální doporučená hodnota intenzity při průchodu dveřmi je v tomto případě  $80 \text{ osob} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  [4].

#### 4.3.2 Proces kalibrace modelu

Vzhledem k obvykle značnému počtu parametrů modelů pohybu osob je vhodné aplikovat proces kalibrace následujícím způsobem:

- Před procesem kalibrace předem vymezíme okruh parametrů, jejichž počáteční hodnoty nastavené výrobcem modelu považujeme za věrohodné. Tyto parametry následně z procesu kalibrace vyloučíme.
- Kalibraci omezuje množství parametrů, které je zpracovatelné.

- V prvním kroku kalibrujeme globální parametry modelu jako celku.
- Ve druhém kroku kalibrujeme lokální parametry, ovlivňující např. konkrétní úsek modelu.
- Kalibraci provádíme pouze pro model pohybu osob modifikací parametrů, které nebyly změřeny či není známa jejich přesná hodnota. Kalibraci modelů požáru je vzhledem k jeho deterministické povaze provádět *zcela nepřijatelné*.

Při kalibraci modelu rozdělujeme tento proces do následujících základních skupin dle použitých parametrů [28]:

- *Kalibrace podle agregovaných mikroskopických veličin.* Úpravou parametrů modelu se snažíme dosáhnout shody jím produkovaných agregovaných veličin s realitou. Nejčastěji používanými veličinami je intenzita proudění osob, průměrná rychlost ve sledovaném profilu nebo statistické rozložení hustoty na sledovaném úseku.
- *Kalibrace podle makroskopických vlastností.* Hledáme shodu chování modelu s jeho očekávanými makroskopickými vlastnostmi, např. vztahu mezi hustotou osob a rychlostí jejich pohybu nebo hustotou a intenzitou proudění.
- *Kalibrace podle prostorového uspořádání.* Cílem je nalézt odpovídající výskyt klíčových skupinových projevů, např. klastrování.

Kalibraci provádíme s využitím následujících zdrojů:

- makroskopická empirická data v případě, kdy jsou k dispozici (např. střední hustota, střední rychlost apod.),
- expertní odhad (posuzujeme, zda se model chová v souladu s naším očekáváním).

Kalibrace modelu je relativně zdlouhavý proces. Neúspěšná počáteční kalibrace modelu znamená opakování procesu až do okamžiku dosažení přijatelné shody očekávaného chování modelu s kalibračními daty. Přijatelnost v podobě akceptačních kritérií stanovujeme před procesem kalibrace.

### 4.3.3 Proces validace modelu

Validace modelu je prováděna na typově odlišných datech oproti kalibraci. Jestliže tedy provádíme kalibraci podle průměrné rychlosti, pro validaci vybíráme jinou veličinu. V případě validace modelu ale musíme vzít v úvahu zejména následující skutečnosti:

- Existuje pouze málo existujících empirických dat o chování osob v případě požáru, což omezuje počet a variabilitu validačních testů.
- Validační testy jsou závislé na technologii sběru těchto dat, jejich přesnosti a podrobnosti poskytované dokumentace.
- Schopnosti současných evakuačních modelů jsou z toho důvodu z hlediska behaviorálních vlastností omezeny.

V současné době proto není k dispozici dostatečně pestrá sestava experimentálních dat, která by umožnila provádět validaci v podobné šíři a pestrosti, jako v případě verifikace.

Příklady vhodných dílčích datových sad nicméně lze v některých studiích identifikovat [59]. V následujícím seznamu jsou uvedeny klíčové zdroje pro validační testy včetně doporučení proměnných veličin, které jsou vhodné pro srovnání (validaci) výsledků modelu a příslušných empirických dat.

- *Validace doby před pohybem.* Srovnáváme dobu evakuace a vytížení únikových východů. Vhodným zdrojem je [10].
- *Validace pohybu a navigace.* Srovnáváme dobu evakuace. Vhodným zdrojem je [40].
- *Validace dostupnosti východů, volby a výběru trasy.* Srovnáváme vytížení únikových východů. Vhodným zdrojem je [48].
- *Validace proudění osob a jeho omezení.* Srovnáváme dobu evakuace, rychlost pohybu a intenzitu proudění. Vhodným zdrojem je [17, 27, 60].
- *Úplná validace.* Srovnáváme dobu evakuace. Vhodným zdrojem je [22].

#### 4.3.4 Nejistota vstupu a výstupu modelu

Z hlediska interpretace výsledků modelu klasifikujeme následujícím způsobem:

- Pro *lineární* a *nelineární* modely je určující charakter matematických rovnic, které jsou v modelu obsaženy, tedy zda jsou tyto rovnice lineární či nelineární. Nelineární modely jsou většinou velmi citlivé na vstupní parametry, jejich malá změna často vede ke kvalitativně odlišným výsledkům.
- Pro *deterministické* a *stochastické* modely je rozhodující, zda model vykazuje po opakování simulace stejné (deterministické) chování, či je jednou z jeho komponent nahodilý (stochastický) prvek a výsledky jsou vždy mírně odlišné.
- Pro *statické* a *dynamické* modely je rozhodující, zda obsahují prvek času (dynamické modely), či nikoliv.

V případě modelů pohybu osob a požáru toto rozdělení aplikujeme následujícím způsobem:

- *Modely pohybu osob* jsou *nelineární* vlivem vzájemné nelineární interakce osob, *stochastické* vlivem prvku nahodilosti vlastností osob v populaci a jejich interakce, a *dynamické* vlivem aplikace času jako základní komponenty modelu a jeho simulace. Opakované spuštění modelu osob se stejnými vstupními údaji proto nesmí dávat identické výsledky, simulaci jednoho modelu je nutné spouštět opakovaně a výsledky zpracovávat s využitím vhodných statistických metod.
- *Modely požáru* a dalších rizik jsou *nelineární* vlivem aplikovaných matematických rovnic, *deterministické* vlivem absence prvku nahodilosti v modelu a *dynamické* vlivem aplikace času jako základní komponenty modelu. Opakované spuštění modelu požáru se stejnými vstupními údaji proto musí dávat identické výsledky.

Při procesu ověření použitého modelu pohybu osob je nezbytné věnovat pozornost problému nejistota vstupu a výstupu modelu. Tato nejistota je rozdělena následujícím způsobem [24]:

- Nejistota empirických dat, která je spojena s omezenou přesností použité technologie měření.

- Nejistota vstupních dat modelu, která je spojena s použitými matematickými postupy pro odvození vstupních dat modelu z empirického měření (např. použití určité statistické distribuce).
- Nejistota spojená s vnitřním uspořádáním modelu, použitými algoritmy a předpoklady.
- Nejistota spojená s behaviorálními vlastnostmi osob, které se snaží model reprodukovat.

Nejistota behaviorálních vlastností osob, které se snažíme v modelu reprodukovat, je spojena se stochastickými faktory lidského chování obecně. Jestliže opakovaně provedeme stejný empirický evakuační test za identických podmínek se stejnými osobami, výsledky budou odlišné. Jednou provedeným experimentem nebo jednou simulací modelu proto není možné reprezentovat celé spektrum možného chování osob za daných podmínek [9].

V případě empirických dat je uživatel limitován jejich obecně malou dostupností, která vyplývá ze složitosti realizace evakuačních experimentů a rizika spojeného s testy chování osob za nebezpečných podmínek. Uživatel modelu při jeho ověřování se proto musí snažit využívat co nejširší spektrum dostupných dat z různých zdrojů, které jsou uvedeny např. v kapitole 4.3.3.

V případě interpretace výsledků simulace modelu je ze stejných důvodů třeba vyhovět následujícím požadavkům:

- Veškeré výsledky modelu pohybu osob chápeme jako náhodné veličiny.
- Pro kvalitní statistické vyhodnocení výsledků je třeba simulaci spouštět *opakovaně*. Minimální počet opakovaných procesů je 10, tato hodnota je uznávána jako obecný práh statistické relevance při zpracování dat obecně. Alternativou je volit takový počet simulací modelu, kdy jeho každé další spuštění neznamená změnu výsledné střední hodnoty studované proměnné o více než 1 % a tato odchylka konverguje k nulové hodnotě.
- Osoby při každém běhu simulace rozmístíme v mezích možností modelu náhodně z hlediska jejich konkrétního rozestavení i specifických vlastností.

#### 4.3.5 Základní statistické veličiny pro vyhodnocení výsledků

Při statistickém vyhodnocení výsledků využíváme následující veličiny:

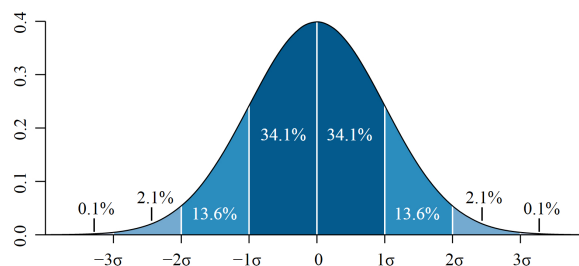
##### Směrodatná odchylka

Jde o kvadratický průměr odchylek hodnot od jejich aritmetického průměru, který se řídí následujícím vztahem

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2},$$

kde  $x_i$  je konkrétní hodnota veličiny po simulaci modelu s pořadovým číslem  $i$ ,  $\bar{x}$  je střední hodnota veličiny,  $N$  je celkový počet simulací.

Jestliže se odchylka hodnoty řídí normálním (Gaussovým) rozdělením, pak pravděpodobnost, že se hodnota náhodné veličiny bude od střední hodnoty lišit nejvýše o jednu směrodatnou odchylku, je 68,2 %, pravděpodobnost, že se hodnota bude lišit nejvýše o dvě směrodatné odchylky, je 95,4 % (viz obr. 4.11).



**Obr. 4.11:** Normální rozdělení náhodné veličiny s vyznačenými pásmy směrodatné odchylky  $\sigma$ .

### Interval spolehlivosti

Rozsah hodnot, ve kterém leží skutečná hodnota s určitou pravděpodobností. Výběr intervalu spolehlivosti závisí především na účelu, pro který budou použity výsledky simulace. Pokud jsou např. testovány dvě velmi podobné alternativy, k jejich rozlišení je vhodné volit velmi malý interval spolehlivosti. Menší interval spolehlivosti vyžaduje větší počet simulačních procesů k dosažení dané úrovně spolehlivosti. Pro interval spolehlivosti nejčastěji používáme hladiny spolehlivosti  $\alpha$  s úrovněmi 90 %, 95 % a 99 %. Hladina spolehlivosti 95 % pak znamená, že s touto pravděpodobností se skutečná hodnota v daném intervalu nachází.

Počet simulací nutný ke stanovení statisticky spolehlivého výsledku není možné určit předem, můžeme jej ale zjistit na základě několika prvních simulací modelu. Požadovaný minimální počet simulačních procesů lze odvodit z následující tabulky, kde *rozsah* definujeme jako interval spolehlivosti dělený směrodatnou odchylkou po prvních několika simulacích modelu.

Minimální počet simulací pro dosažení potřebné úrovně spolehlivosti					
Rozsah	$\alpha$	Počet simulací	Rozsah	$\alpha$	Počet simulací
0,5	90 %	64	1,5	90 %	9
0,5	95 %	83	1,5	95 %	12
0,5	99 %	130	1,5	99 %	18
1,0	90 %	18	2,0	90 %	6
1,0	95 %	23	2,0	95 %	8
1,0	99 %	36	2,0	99 %	12

**Tab. 4.1:** Minimální počet simulací na základě požadované úrovně spolehlivosti a požadovaného rozsahu.

## 4.4 Aplikace modelu pohybu osob mimo evakuační proces

Pokročilé modely pohybu osob jsou kromě svého primárního využití při simulaci procesu evakuace využitelné rovněž při analýze rizik spojených s hromadnými událostmi, které přímo proces evakuace nezahrnují. Rizika jsou v těchto případech téměř výhradně spojena s vysokou hustotou osob, která vzniká jako důsledek chybného nebo nedostatečného řízení události ze strany jeho organizátorů, podpořeného často nedostatečnou analýzou v projektové fázi přípravy události. V současné době již existují podrobné zahraniční studie zaměřené na tuto problematiku označovanou jako *management davu* [64, 65, 63].



#### 4.4.1 Prostorové nároky jednotlivce

Jako základní nástroj pro analýzu rizik spojených s konáním události používáme stanovení prostorových nároků jednotlivce. Při analýze uplatňujeme následující postup:

- Hustotu osob, respektive požadavky osob na prostor, vyjadřujeme v jednotkách  $\text{osob.m}^{-2}$ , respektive  $\text{m}^2.\text{osoba}^{-1}$ .
- Při výpočtu hustoty osob nebo jejich prostorových nároků uplatňujeme jako základní nástroj *osobní elipsu*. Jde o eliptickou čáru, která opisuje půdorys osoby včetně minimálního prostoru, který odráží její snahu se vyhnout přímému kontaktu s okolím.
- Základní plocha osobní elipsy je  $0,22 \text{ m}^2$ . Obvyklý interval této plochy je  $0,20\text{--}0,26 \text{ m}^2$ , v případě aplikace jiné hodnoty je třeba ji zdůvodnit.
- Plocha osobní elipsy odpovídá hustotě osob v intervalu  $4\text{--}5 \text{ osob.m}^{-2}$ . Tato hodnota uplatňována jako hranice počínajícího zvýšeného rizika vzniku incidentu v případě *nehybné* skupiny osob.
- V případě *pohybující* se skupiny osob je hranice počínajícího zvýšeného rizika vzniku incidentu přibližně poloviční, tedy  $2,5 \text{ osob.m}^{-2}$ .
- Hodnoty platí pro skupinu osob, jejichž půdorysné elipsy jsou orientovány stejným směrem. Při různé orientaci je třeba tuto hodnotu adekvátně snížit na základě míry nahodilosti této orientace.

#### 4.4.2 Aplikace úrovně kvality pěší dopravy

Při analýze výsledků modelu pohybu osob a souvisejících rizik vyplývajících z jejich hustoty aplikujeme jako základní veličinu *úroveň kvality pěší dopravy*. Principy užití jsou následující:

- Hustotu osob či prostor obsazený osobou vyjadřujeme kvalitativně pomocí zjednodušené pětibodové stupnice A–F, kde A je hustota nejnižší s minimálním rizikem, F je hustota nejvyšší s nejvyšším rizikem vzniku incidentu.
- Základní zdroje stanovení úrovně kvality pěší dopravy jsou [18, 66, 11].
- Pro různé typy geometrie stanovujeme odlišné hraniční hodnoty jednotlivých úrovní kvality pěší dopravy a tyto části posuzujeme vždy odděleně. Základní rozlišení je následující:
  - *Čekací plochy*. Lze dosahovat relativně nejvyšších hustot s nízkým rizikem.
  - *Schody a rampy*. Lze dosahovat relativně nižších hodnot s nízkým rizikem.
  - *Chodníky*. Lze dosahovat pouze nízkých hustot s nízkým rizikem.

Pokud nevyhovuje posuzovaná geometrie uvedenému základnímu rozdělení, je potřeba hodnocení upravit a zdůvodnit.

### 4.5 Doporučená struktura prezentace výsledků

Vedle struktury technické zprávy řešení požární bezpečnosti popsané v normovém postupu by měla zpráva, která využívá modely pohybu osob a požáru, obsahovat následující doplňující informace [5]:

Úroveň kvality pěší dopravy [osob.m <sup>-2</sup> ]						
Chodníky		Schody a rampy		Čekací plochy		Úroveň
Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
0	0,308	0	0,538	0	0,828	<b>A</b>
0,308	0,431	0,538	0,718	0,828	1,076	<b>B</b>
0,431	0,718	0,718	1,076	1,076	1,538	<b>C</b>
0,718	1,076	1,076	1,538	1,538	3,588	<b>D</b>
1,076	2,153	1,538	2,691	3,588	5,382	<b>E</b>
2,153	—	2,691	—	5,382	—	<b>F</b>

**Tab. 4.2:** Úroveň kvality pěší dopravy [18].

- modelovaná úloha,
  - modelovaný prostor, popis prostoru, jeho využití, navigační a jiné prvky, existující východy, protipožární ochrana apod.,
  - popis předmětu analýzy a vymezení oblasti řešení,
  - jaké otázky mají být zodpovězeny a jaké nikoliv,
- použitý nástroj a model,
  - název, výrobce a verze,
  - použitý model,
  - kritické hodnoty,
  - vstupní data, jejich zdroj a způsob zpracování,
  - verifikace modelu, dokládáme proces nebo zdroj již provedené verifikace,
  - kalibrace modelu, popisujeme způsob kalibrace včetně použitých dat (pokud je samotný proces kalibrace přípustný),
  - validace modelu, dokládáme proces nebo zdroj již provedené validace modelu,
- posuzovaný scénář,
  - předpoklady, okrajové podmínky,
  - počet simulací modelu,
  - zvolené předpoklady, aplikovaná zjednodušení včetně posouzení dopadů,
  - míra nejistoty jednotlivých vstupních hodnot a způsob jejího ošetření (platí zejména pro dobu před pohybem),
- výsledky grafická znázornění,
  - celkový evakuační čas, statistické parametry výsledků
  - zobrazení průběhu evakuace v určitých časových krocích vizualizací nebo formou hustoty,
  - zvolené předpoklady, aplikovaná zjednodušení včetně posouzení dopadů,
  - specifické události v průběhu simulace modelu (fronty, extrémní hustota apod.)

## 5 Závěr

V předchozích kapitolách byly shrnuty základní kroky a definována klíčová omezení, které si musí uživatel softwarového nástroje při posouzení evakuačního procesu trvale uvědomovat. Libovolná nejistota v některém ze vstupních parametrů musí vždy vést k úpravě hodnocení na stranu bezpečnou, nejčastěji formou přidání dostatečné časové rezervy k hodnocení doby potřebné pro evakuaci. Uživatel zároveň nesmí nikdy automaticky předpokládat správnost výsledků poskytovaných softwarovým nástrojem, ale neustále tyto výsledky podrobovat zpětné vazbě, kritickému rozboru a případně alternativnímu posouzení prostřednictvím jiných metod výpočtu.

Softwarové nástroje pro modelování pohybu osob a požáru v současné době procházejí dynamickým vývojem. Vlivem stále výkonnějšího a cenově dostupnějšího hardware dramaticky rostou i možnosti software. Základní principy hodnocení evakuačního procesu nicméně zůstávají stejné, text proto pomáhá vymezit minimální standardy aplikace softwarových nástrojů pro modely pohybu osob a požáru bez vztahu k jejich konkrétním technickým parametrům či dokonce konkrétnímu postupu jejich aplikace v podobě softwarového manuálu.

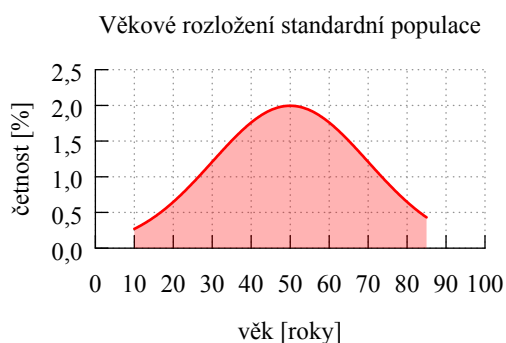


# Příloha A

## Vybrané zdroje pro charakteristiku osob

### A.1 Věkové složení

Pokud nejsou k dispozici přesnější údaje o věkovém složení, je možné využít obecné rozložení dle německé směrnice *RIMEA* [55]. Populace je v tomto případě rozdělena na muže a ženy ve stejném poměru (1:1), věkové složení má střední hodnotu 50 let a směrodatnou odchylku 20 let. Minimální věk osoby je 10 let, maximální věk 85 let. Grafické znázornění věkového složení standardní populace je na obr. A.1.



Obr. A.1: Věkové složení standardní populace [55].

### A.2 Reakční doba

V případě modelu pohybu osob je reakční doba chápána jako interval mezi spuštěním signálu pro evakuaci či opuštění prostoru při simulaci modelu a reakcí konkrétní modelované osoby na tento signál. V případě, že není k dispozici konkrétní informace o reakční době osob, lze využít jako zdroje pro její stanovení [55]. Národní normy uvažují pouze rychlou evakuaci, tedy okamžitou reakci osob ve stejný okamžik.

Směrnice rozděluje evakuační scénáře do tří základních skupin [55]:

- *Rychlá evakuace.* Všechny evakuované osoby mají reakční dobu nulovou. Jde o krajní variantu, která často znamená vysoké zatížení evakuačních tras a únikových východů.
- *Plynulá evakuace.* Osobám je přiřazena rovnoměrně rozložená reakční doba v intervalu 0–60 s. Znamená menší riziko zahlcení únikových východů.

- *Pomalá evakuace.* Osobám je přiřazena rovnoměrně rozložená reakční doba v intervalu stanoveném na základě komplexního hodnocení dle typu budovy, charakteristiky osob, požárního systému a způsobu řízení požární bezpečnosti.

V případě pomalé evakuace je možné interval určit dle komplexního hodnocení budovy, jejího vybavení, úrovně detekce požáru a charakteristiky osob, které se v budově zdržují. Kategorizace budovy podle uvedených kritérií je uvedena v tabulce A.1.

Kategorizace dle typu budovy, jejího vybavení a složení osob				
Typ budovy a složení osob				
Kategorie	Využití budovy	Bdělost	Orientace	Hustota
B1	kanceláře, průmysl	vysoká	vysoká	nízká
B2	shromažďovací prostory	vysoká	nízká	vysoká
B3	rezidenční bydlení	nízká	vysoká	nízká
B4	bydlení s dohledem	dohled	dohled	nízká
B5	hotely, ubytovny	nízká	nízká	nízká
Kategorie	Systém hlášení požáru			
S1	Automatický požární alarm s okamžitým varováním			
S2	Dvoustupňový systém hlášení s okamžitým varováním centrály a následným varováním postižených oblastí s časovým prodloužením			
S3	Žádný, případně lokální automatický hlásič požáru			
Kategorie	Komplexita budovy			
K1	Jednoduchý otevřený půdorys, jednopodlažní budova, východy viditelné a vedoucí přímo ven z budovy.			
K2	Jednoduchý půdorys, více místností a podlaží.			
K3	Velká budova, komplexní půdorys.			
Kategorie	Požární bezpečnost			
P1	Požárních hlídky dobře vyškoleny a ve vysokém počtu. Bezpečnostní systém a postupy nezávisle ověřené.			
P2	Požárních hlídky dobře vyškoleny. Bezpečnostní systém nebyl nezávisle ověřen.			
P3	Splněny pouze minimální standardy.			

**Tab. A.1:** Kategorizace budovy dle jejího vybavení a složení osob pro stanovení reakční doby v případě pomalé evakuace [55].

Po provedení kategorizace budovy stanovíme interval reakční doby osob. Krajiní hodnoty intervalu jsou uvedeny v tabulce A.2. V případě vyšší komplexity budovy se v některých případech k reakčnímu času přidává konstantní hodnota 0,5 nebo 1,0 minuty.

### A.3 Rychlost pohybu

Rychlost pohybu osoby je důležitý parametr populace modelu, pro její stanovení je k dispozici několik zdrojů. V tuzemském prostředí lze využít normovaných hodnot dle [5]. Hodnoty jsou

Rozdělení reakční doby				
Parametry vybavení budovy			$t_{r,\min}$	$t_{r,\max}$
Typ budovy B1				
P1	K1–K2	S1–S2	0,5	1,0
P2	K1–K2	S1–S2	1,0	2,0
P3	K1–K2	S1–S3	10	20
K3 (obtížnější orientace)			+0,5	
Typ budovy B2				
P1	K1	S1–S2	0,5	2,0
P2	K1	S1–S2	1,0	3,0
P3	K1	S1–S3	10	20
K2 (obtížnější orientace)			+0,5	
K3 (obtížnější orientace)			+1,0	
Typ budovy B3				
P2	K1	S1	5,0	10
P3	K1	S3	10	>20
Typ budovy B4				
P1	K2	S1–S2	10	20
P2	K2	S1–S2	15	25
P3	K2	S3–S3	15	25
Typ budovy B5				
P1	K2	S1–S2	15	20
P2	K2	S1–S2	20	25
P3	K2	S3–S3	20	25
K3 (obtížnější orientace)			+1,0	

**Tab. A.2:** Stanovení reakční doby obyvatel budovy na základě její kategorizace v případě pomalé evakuace [55].

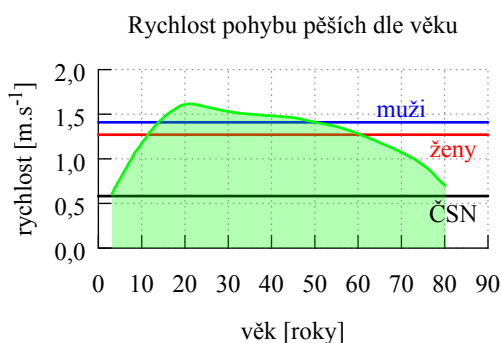
uvedeny v tabulce A.3, norma neuvažuje s rozdílnými rychlostmi podle věku nebo schopnosti pohybu. Osoby s omezenou schopností pohybu jsou započteny při posudku evakuace zvětšením šířky únikového pruhu.

Rychlost evakuovaných osob dle ČSN 73 0802	
Směr pohybu	Rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
Po rovině	0,583
Po schodech dolů	0,500
Po schodech nahoru	0,417

**Tab. A.3:** Rychlost evakuovaných osob dle ČSN 73 0802 [5].

### A.3.1 Rychlost pohybu po rovině

Alternativním zdrojem dat o rychlosti osob po rovině je práce Weidmana [67]. Dokument stanovuje orientační rozdělení rychlosti dle věku, které je na obr. A.2, a určuje střední rychlost pohybu pro muže a ženy, která činí  $1,41 \text{ ms}^{-1}$ , resp.  $1,27 \text{ ms}^{-1}$ .



**Obr. A.2:** Rychlost chůze v závislosti na věku dle Weidmana [67].

Rychlost osob dle Weidmana [ $\text{m.s}^{-1}$ ]					
Osoby	Min.	Max.	Osoby	Min.	Max.
Ženy (<30 let)	0,516	1,433	Muži (<30 let)	0,580	1,610
Ženy (30–50 let)	1,255	1,371	Muži (30–50 let)	1,410	1,514
Ženy (>50 let)	0,605	1,255	Muži (>50 let)	0,671	1,392
Ženy (snížená pohyblivost)	0,409	0,676	Muži (snížená pohyblivost)	0,460	0,760

**Tab. A.4:** Podrobné rozdělení rychlosti chůze v závislosti na věku dle Weidmana [67].

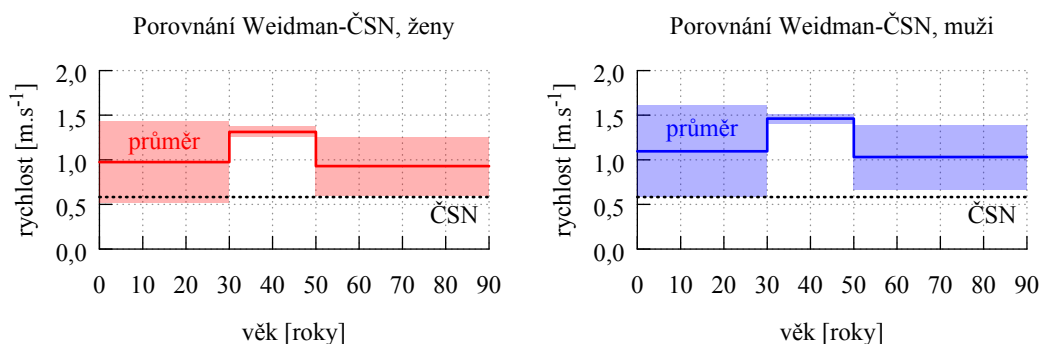
Na obr. A.3 jsou údaje uvedené v tabulce A.4 graficky srovnány s údaji podle [5]. Z výsledků je zřejmé, že rozptyl rychlostí je ve věkovém pásmu 30–50 let pro obě pohlaví relativně velmi úzký ve srovnání s věkovými extrémy. Rovněž je patrné, že údaje podle [5] jsou v případě jejich aplikace v modelu pohybu osob posunuty na stranu bezpečnou, nicméně jsou s ostatními zdroji plně srovnatelné a realistické.

### A.3.2 Rychlost pohybu po schodech

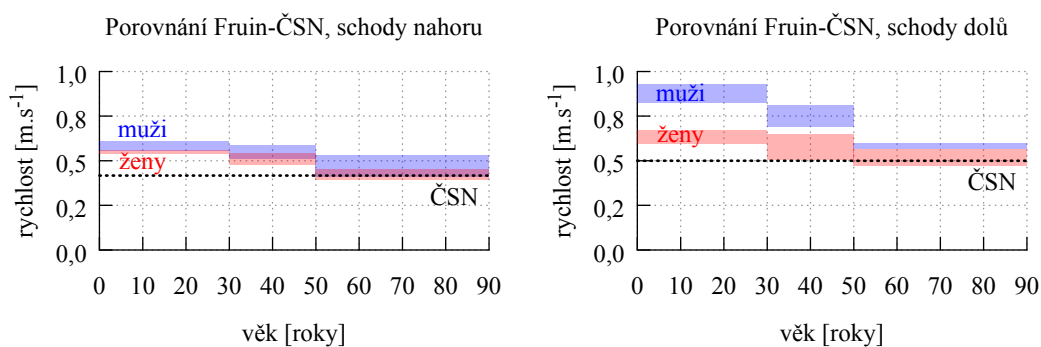
Pokud se zaměříme na pohyb po schodech, je vhodným zdrojem informací práce Fruina [18]. Dokument rozlišuje různé věkové skupiny podobně [67], a zabývá se rychlostí jejich chůze po schodech s různým sklonem a oběma směry (nahoru i dolů). Výsledný soubor dat je v tab. A.5, grafické porovnání potom na obr. A.4.

Výsledky je vzhledem k rozdílné metodice měření a zpracování výsledků obtížné snadno porovnávat. Zatímco [67] stanovuje maximální a minimální hodnotu pro chůzi po rovině, dokument [18] dává k dispozici data pro chůzi na schodech s různým sklonem jako průměrnou hodnotu (nikoliv rozsah).





**Obr. A.3:** Grafické srovnání rychlosti chůze po rovině v závislosti na věku dle Weidmana a ČSN [67, 5]. Pro obě pohlaví a všechny věkové skupiny je zobrazen rozptyl maximální a minimální hodnoty a průměrná hodnota dle měření Weidmana, a dále pro srovnání hodnota stanovená ČSN 73 0802.



**Obr. A.4:** Grafické srovnání rychlosti chůze do schodů směrem nahoru a dolů dle Fruina a ČSN 73 0802 [18, 5]. Pro obě pohlaví a všechny věkové skupiny je zobrazen rozdíl průměrných hodnot daný sklonem schodiště 32° a 27°, a dále pro srovnání hodnota stanovená ČSN 73 0802.

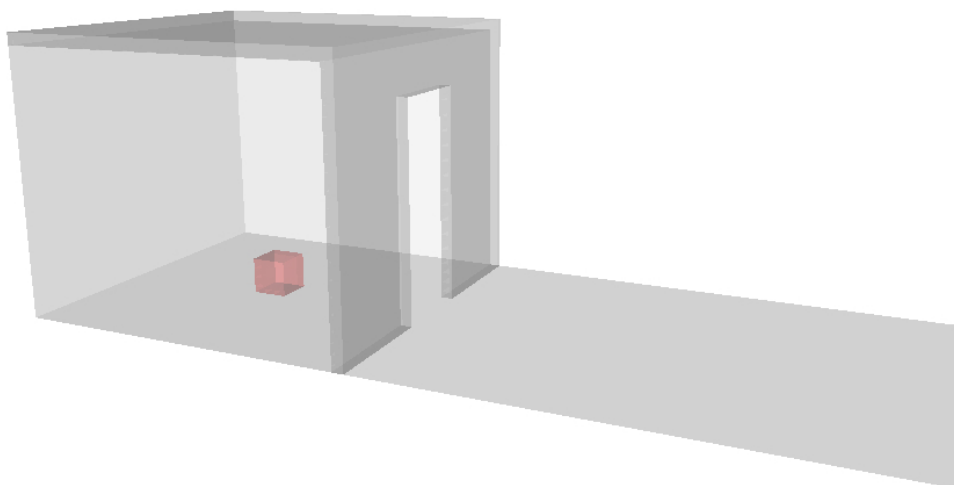
Rychlost osob dle Fruina na schodech s různým sklonem				
Osoby	A — dolů	B — dolů	A — nahoru	B — nahoru
Věk <30 let [m.s <sup>-1</sup> ]				
Ženy	0,594	0,671	0,538	0,559
Muži	0,828	0,930	0,559	0,610
Průměr	0,757	0,813	0,549	0,584
Věk 30–50 let [m.s <sup>-1</sup> ]				
Ženy	0,508	0,650	0,478	0,544
Muži	0,691	0,813	0,513	0,589
Průměr	0,645	0,777	0,503	0,579
Věk >50 let [m.s <sup>-1</sup> ]				
Ženy	0,472	0,564	0,391	0,452
Muži	0,569	0,599	0,432	0,411
Průměr	0,549	0,594	0,422	0,422
Celkový průměr	0,671	0,772	0,508	0,574

**Tab. A.5:** Rychlost dle Fruina na schodech s různým sklonem. Varianta A: výška 0,178 m, šířka 0,286 m, sklon 32°. Varianta B: výška 0,152 m, šířka 0,305 m, sklon 27° [18].

## Příloha B

### Srovnávací analýza modelů požáru

Jako příklad srovnání dopadů jednotlivých submodelů požáru na jeho celkový výsledek byl zvolen modifikovaný Stecklerův experiment. Jde o standardizovaný požární test, který uskutečnil tým amerického National Bureau of Standards (předchůdce dnešního NIST) v roce 1982 [33]. Srovnávací analýza vycházející ze Stecklerova experimentu se odehrává v místnosti se čtvercovým půdorysem o hraně 2,8 m, výška stropu je 2,2 m, a ve středu stěny jsou umístěny vstupní dveře o šířce 0,74 m a výšce 1,83 m. Zdroj požáru je umístěn symetricky ve středu místnosti a v průběhu experimentu sledujeme rozložení teploty a rychlosti proudění vzduchu po dobu 60 s od počátku rozvoje požáru. Použitým modelem je nástroj SMARTFIRE.

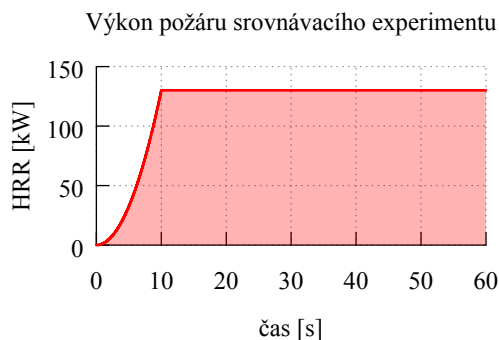


**Obr. B.1:** Konfigurace modifikovaného Stecklerova experimentu, který je použit pro srovnávací analýzu dopadů jednotlivých vstupních údajů do požárního modelu.

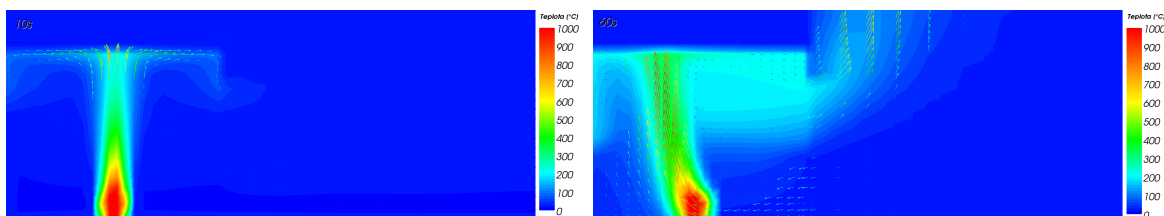
Pro potřebu srovnávacího experimentu byl zvolen návrhový model kvadraticky rostoucí v čase, který dosáhne maxima  $P = 130$  kW v čase  $t_{\max} = 10$  s, po dosažení této hodnoty je výkon požáru již nadále konstantní až do okamžiku  $t_{\text{end}} = 60$  s, kdy analýza končí.

Orientační rozložení teploty vzduchu a rychlosti proudění je v podélném řezu středem požáru na obr. B.3. Situace se v průběhu experimentu dynamicky vyvíjí, na konci sledovaného časového úseku je ale již prakticky stabilní, dochází k nasávání čerstvého vzduchu ke zdroji požáru ve spodní části dveří, v horní části dveří ohřátý vzduch naopak proudí opačným směrem pod horní hranou vstupních dveří.

Pro další srovnávací analýzu budeme využívat údaje o teplotě detekované v ose vstupních



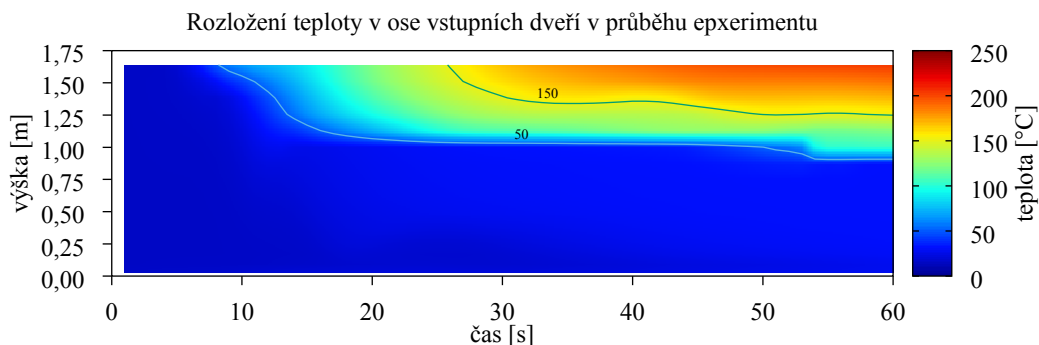
**Obr. B.2:** Průběh výkonu návrhového požáru v případě srovnávacího experimentu.



**Obr. B.3:** Orientační rozložení teploty vzduchu a rychlosti proudění v podélném řezu středem požáru v čase 10 s po zahájení experimentu (vlevo) a 60 s po zahájení experimentu (vpravo).

dveří, které jsou analyzovány každou sekundu po dobu trvání testu, celkem je tedy k dispozici 60 údajů o teplotě v ose vstupních dveří. Ty jsou zachyceny na obr. B.4, který umožňuje odečítat výšku v ose dveří, čas i teplotu. Pro lepší orientaci jsou zobrazeny izotermy pro 50 °C a 150 °C. Data jsou mezi jednotlivými výpočetními kroky interpolována, výsledkem je tak hladký průběh teploty.

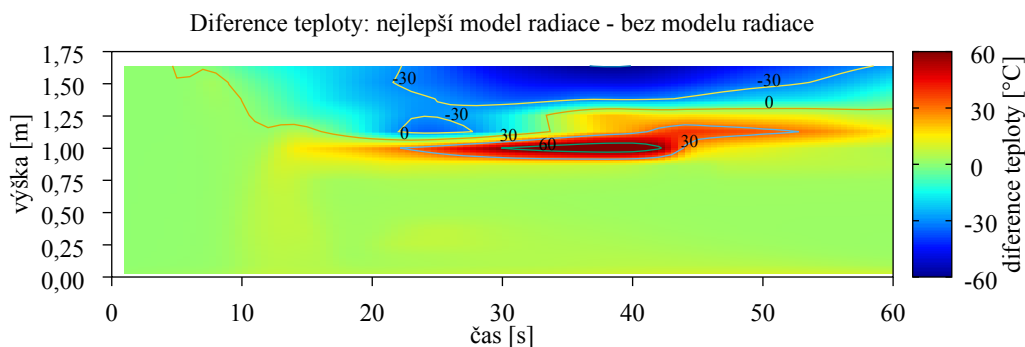
Z grafu je patrné, že k prvnímu významnému zvýšení teploty v ose dveří dochází přibližně v čase  $t_{\text{end}} = 10$ , na konci experimentu v čase  $t_{\text{end}} = 60$  je již situace relativně stabilní a horká vrstva vzduchu, který proudí vstupními dveřmi ven z místnosti, klesla do výšky přibližně 1 m. Maximální teplota u horní hrany dveří je na konci experimentu nižší než 200 °C.



**Obr. B.4:** Teplota v ose dveří v průběhu experimentu. Celkem 60 údajů o teplotě je složeno do jednoho grafu a interpolováno. Výsledkem je hladký průběh teploty v závislosti na čase a výšce v ose dveří.

## B.1 Radiační model

Radiační model popisuje přenos tepla zářením v globálním modelu, jeho vliv na výsledky simulace je většinou velmi významný. Pro přiblížení dopadu modelu na výsledky experimentu je na obr. B.5 zachycena diference teploty v ose dveří.

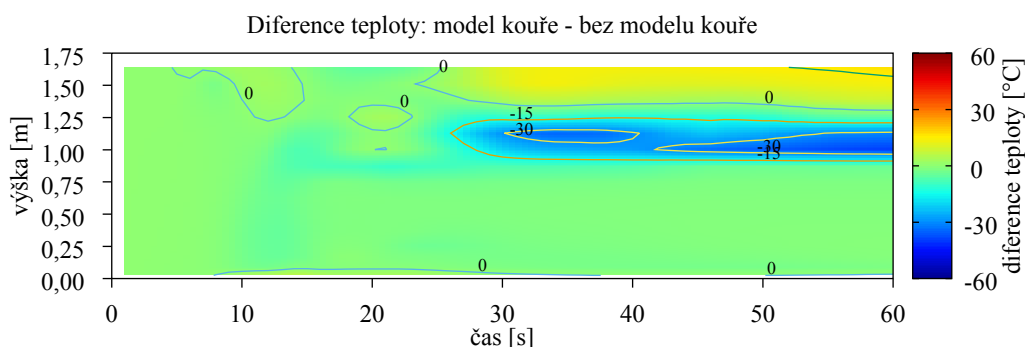


**Obr. B.5:** Srovnání teploty v ose dveří v závislosti na čase při aplikaci pokročilého modelu radiace a zcela bez přenosu tepla zářením.

Z výsledků jasně vyplývá významný dopad využití modelu radiace na výsledky simulace modelu jako celku. Bez jeho využití je teplota u horní hrany dveří vyšší o více než 30 °C, naopak na rozhraní horké a studené vrstvy vzduchu vzniká rozdíl teplot přesahující 60 °C. Globálně je spodní polovina grafu posunuta do kladných hodnot, tedy je patrný vliv ohřívání studené vrstvy vzduchu radiací horké vrstvy.

## B.2 Model kouře

Model kouře je významný při analýze rizik pro unikající osoby, v případě srovnávací analýzy je klíčová jeho schopnost absorpce tepelného záření. Na obr. B.6 je zachycena stejným způsobem diference teploty pro variantu s modelem kouře a bez něj.



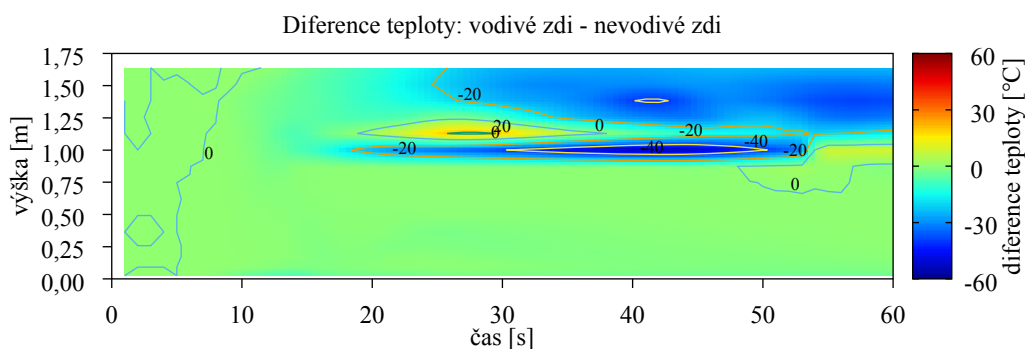
**Obr. B.6:** Srovnání teploty v ose dveří v závislosti na čase při aplikaci modelu kouře a zcela bez jeho využití.

Výsledky potvrzují předpoklad absorpce tepelného záření, dopad je ale méně významný, než v případě radiace. Významná část tepelné energie zůstává absorbována ve vrstvě kouře

v horní části horské vrstvy, její spodní část je naopak o desítky stupňů chladnější. Spodní polovina grafu je zdatelně posunuta o přibližně 10 °C do záporných hodnot vlivem absorpce energie vrstvou kouře.

### B.3 Tepelná vodivost materiálu

Schopnost jednotlivých objektů modelu, zejména v případě stěn místnosti či velkých konstrukčních prvků, pohlcovat a přenášet tepelnou energii, je velmi významná. Na obr. B.7 je zachycena diference teploty pro variantu tepelně vodivých stěn místnosti a variantu nevodivé konstrukce.



**Obr. B.7:** Srovnání teploty v ose dveří v závislosti na čase při aplikaci vodivosti materiálu stěn a v případě nevodivé konstrukce.

Je opět patrné, že vodivost stěn místnosti významně snižuje teplotu v horké vrstvě vzduchu i v modelu jako celku. V grafu se prakticky nevyskytují oblasti s kladnými hodnotami, výsledky modelu jako celku jsou zřetelně posunuty jedním směrem.

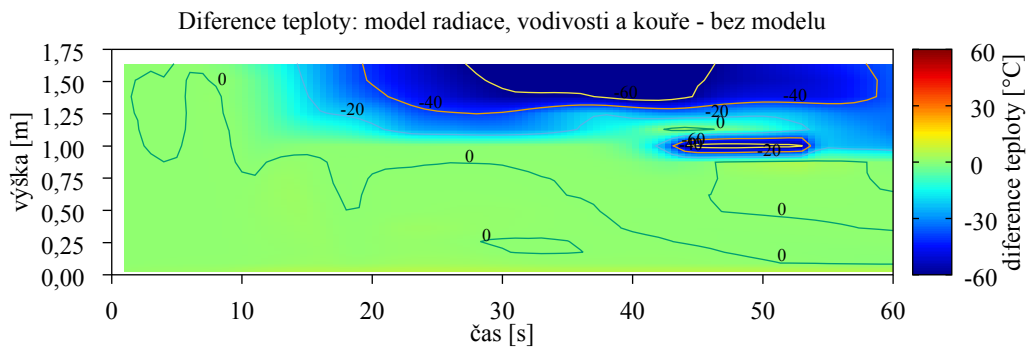
### B.4 Kombinace submodelů

Vlivy jednotlivých výše popsaných modelů se v případě současné aplikace sčítají. Na obr. B.8 je diference teploty pro současnou aplikaci všech dílčích modelů (radiace, kouř a tepelně vodivá konstrukce) a pro základní model bez těchto komponent.

Z výsledků je zcela jasně patrné, že tyto dílčí modely mají zásadní dopad na teplotu horké vrstvy, která je významným rizikovým faktorem pro ohrožené osoby. Teplota horké vrstvy se v tomto srovnání liší o více než 60 °C ve značné části srovnávacího experimentu, naopak dopad na studenou vrstvu vzduchu ve spodní části grafu je spíše zanedbatelný.

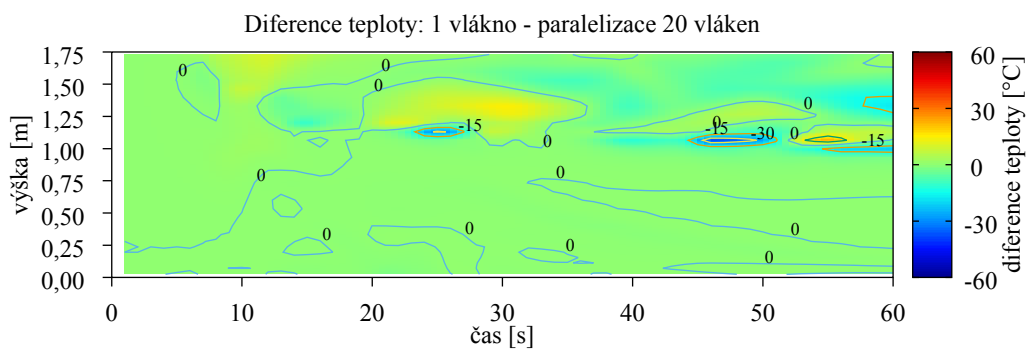
### B.5 Paralelizace výpočtu

Paralelizace výpočtu modelu požáru je velmi významná vlastnost technologie CFD. Rozdělení prostoru konečných objemů na dílčí subprostory, v rámci kterých pak běží výpočet odděleně a jednotlivé subprostory si předávají v každém výpočetním kroku údaje nezbytné pro vzájemnou interakci, má rovněž měřitelný dopad. Na obr. B.9 je zachycena diference teploty pro



**Obr. B.8:** Srovnání teploty v ose dveří v závislosti na čase při aplikaci vodivosti materiálu stěn a v případě nevodivé konstrukce.

variantu výpočtu s jediným vláknem a pro variantu masivní paralelizace výpočtu při využití 20 samostatných vláken.



**Obr. B.9:** Srovnání teploty v ose dveří v závislosti na čase při výpočtu pomocí jednoho vlákna a při masivní paralelizaci výpočtu prostřednictvím 20 vláken.

Výsledky ukazují, že ze všech výše popsaných variant je efekt paralelizace výpočtu nejméně významný. Jsou patrné pouze omezené a lokální výkyvy, ke kterým dochází zejména v místě vysokého teplotního gradientu, tedy na rozhraní horké a studené vrstvy. Zbývající části grafu oscilují kolem nulových hodnot a dopad paralelizace je tak v tomto případě naprosto zanedbatelný.





## Příloha C

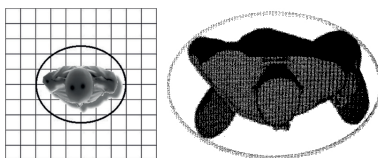
### Stanovení prostorových nároků osob

Pro analýzu rizik spojených s vysokou hustotou osob je nezbytné porozumění prostorovým potřebám jednotlivce. Tyto požadavky jsou vyjadřovány formou hustoty (jednotkou je  $\text{m}^{-2}$ ), případně jako inverzní hodnota, tedy prostor obsazený jednou osobou (jednotkou je  $\text{m}^2$ ). V praxi častěji využívanou variantou je hustota.

Prostorové nároky davu jsou výrazně odlišné pro stojící a pohybující se skupiny osob. Obecně platí, že při stejné hustotě osob riziko roste úměrně se zvyšující se rychlostí jejich pohybu. Protože se v případě naprosté většiny hromadných událostí současně vyskytují oblasti s převážně nehybně stojícím davem (např. v okolí koncertního pódia) i proudícím davem (např. ve vstupních koridorech), je třeba uspořádání těchto částí i odpovídající míru rizika posuzovat odděleně.

#### C.1 Individuální prostor

Jednotlivec je z hlediska minimálního prostoru, který zaujímá, a interakcí s okolními osobami, popisován tzv. osobní elipsou. Koncept byl poprvé uvedený do praxe Johnem J. Fruinem [18]. Prostor je definován jako eliptická čára znázorňující 95% percentil<sup>1</sup> půdorysných rozměrů oblečeného dospělého muže s určitým přidaným prostorem, který odráží snahu jednotlivce vyhýbat se přímému dotyku s okolními osobami. Schématické znázornění této elipsy je na obr. C.1, přičemž zobrazený čtverec má hranu o délce 1 m. Včetně přidaného prostoru tak má základní elipsa těla rozměry 61 cm v delší ose a 46 cm v kratší ose, plocha této elipsy je  $0,22 \text{ m}^2$ .



**Obr. C.1:** Zobrazení osobní elipsy jako minimálního prostoru, který jednotlivec zaujímá. Obrázek vlevo reprezentuje Fruinův koncept. Zobrazený čtverec má hranu 1 m. Základní osobní elipsa dle Fruinova konceptu má rozměry 61 cm v delší ose a 46 cm v kratší ose [18]. Obrázek vpravo popisuje Pheasantův koncept. Průměrná plocha této elipsy je  $0,20 \text{ m}^2$  [50].

Pokud se zaměříme pouze na čisté půdorysné rozměry lidského těla, lze využít alternativní zdroj dat o prostorových nárocích chodců publikaci Stephena Pheasanta [50]. Rozměry chodců jsou rozděleny dle pohlaví a klíčových národností. Alternativní koncept osobní elipsy je na obr. C.1, vybrané údaje shrnuje tabulka C.1.

<sup>1</sup>Percentil vyjadřuje, kolik procent vzorků ve statistickém souboru je stejných nebo horších. V tomto konkrétním případě tedy pouze 5 % populace přesahuje uvedené rozměry.

Rozměry lidského těla			
Země původu	Šířka [cm]	Hloubka [cm]	Plocha [m <sup>2</sup> ]
Velká Británie - muž	51,0	32,5	0,26
Velká Británie - žena	51,0	32,5	0,26
Polsko - muž	47,5	27,5	0,21
Polsko - žena	41,0	28,5	0,18
Francie - muž	51,5	28,0	0,23
Francie - žena	47,0	29,5	0,22
Švédsko - muž	51,0	25,5	0,20
Švédsko - žena	42,5	30,0	0,20
Švýcarsko - muž	51,5	28,0	0,22
Švýcarsko - žena	47,0	29,5	0,23
Průměr	45,6	28,2	0,20
Maximum	51,5	32,5	0,26

**Tab. C.1:** Rozměry lidského těla dle různých zemí původu a pohlaví se zaměřením na Evropu [50].

Údaje Pheasanta v tabulce jsou oproti hodnotám Fruina výrazně nižší, jde nicméně o čisté rozměry bez započtení minimálního osobního prostoru kolem těla. Plocha elipsy uvedená v tabulce už tyto rozměry zahrnuje. Z uvedených výsledků je zřejmé, že plocha, kterou zaujímá jednotlivec v rámci větší skupiny osob, se pohybuje v rozmezí hodnot 0,20 m<sup>2</sup> (průměrná hodnota) až 0,26 m<sup>2</sup> (maximální hodnota), tedy maximální hustota osob, kterou lze ještě označit za komfortní, se pohybuje v intervalu 4–5 osob.m<sup>-2</sup>.

## C.2 Statická hustota skupiny osob

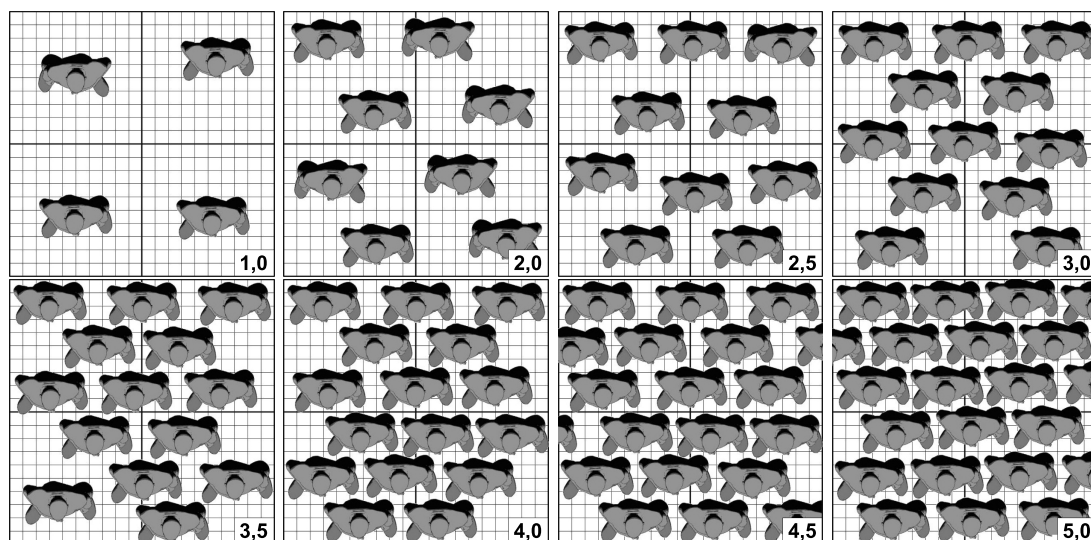
Na obr. C.2 je ilustrace situace odpovídající statické hustotě osob v rozmezí 1 až 5 osob.m<sup>-2</sup>. Je vždy zvoleno schématické půdorysné zobrazení.

Z vizualizace je zřejmé, že hustota 5 osob.m<sup>2</sup> je z hlediska osobního komfortu hraniční, při vyšších hodnotách už dochází k porušení minimální komfortní zóny. Tato hodnota platí pro skupinu osob stojící a hledící *stejným* směrem, např. během koncertu nebo sportovního zápasu. Pokud budou mít osoby tendenci hledět různým směrem, maximální komfortní hustota bude klesat a pokles bude přímo úměrný míře nahodilosti preferovaných směrů.

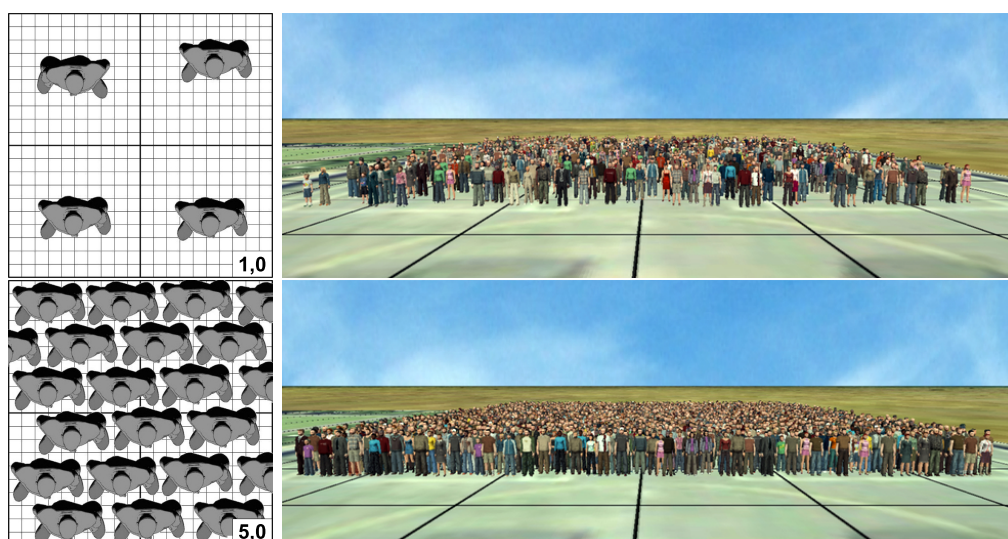
Současně platí, že při šikmém pohledu operátora (např. průmyslovou kamerou), který provádí na akci dozor, je vizuální dojem reálné hustoty výrazně odlišný (pocitově vyšší), než v případě půdorysného pohledu z vyvýšeného stanoviště nebo např. helikoptéry. Na obr. C.3 je zachyceno toto srovnání pro nízkou hustotu 1 osoba.m<sup>-2</sup> při pohledu seshora a při šikmém pohledu.

## C.3 Dynamická hustota skupiny osob

Prostorové nároky pohybující se skupiny osoby jsou vyšší než v případě skupiny stojící. Na obr. C.4 je zachyceno srovnání dvojice hodnot hustoty 1,0 a 2,5 osob.m<sup>-2</sup> při pohledu seshora, přičemž u pohybujících se osob jde o volný, neovlivněný pohyb bez vynucené interakce s okol-



**Obr. C.2:** Statická hustota osob odpovídající postupně rostoucím hodnotám v intervalu 1,0–5,0 osob.m<sup>-2</sup> při schématickém pohledu seshora [64].

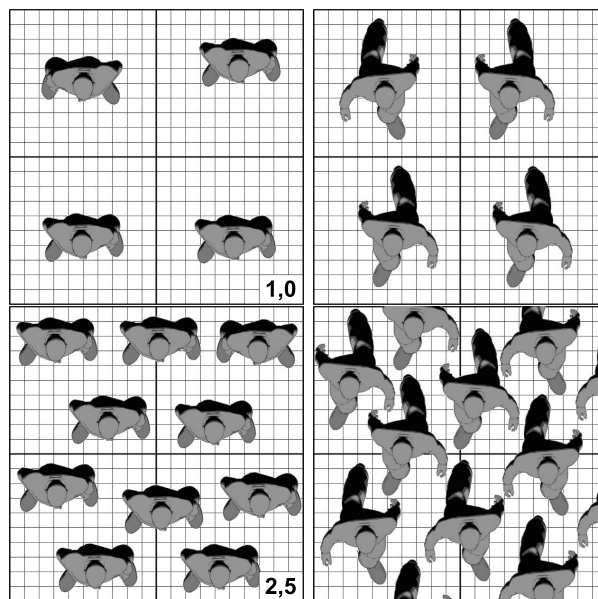


**Obr. C.3:** Srovnání půdorysného a šikmého pohledu na stejné hustoty osob [64].

ním. Je zřejmé, že hustota přesahující 2,5 osob.m<sup>-2</sup> už není komfortní a znamená zvýšené riziko. Tuto skutečnost je nutné vzít do úvahy zejména při bezpečnostním posouzení různých částí interiéru či exteriéru během jedné události (např. vstupní koridor na stadion vs. hlediště).

## C.4 Dynamické charakteristiky skupiny

Pohyb osob, zejména pokud probíhá stejným směrem např. ve vstupních koridorech, na chodnících atd., svazují vzájemné vztahy rychlost pohybu osob, intenzitu tohoto pohybu a hustotu davu.

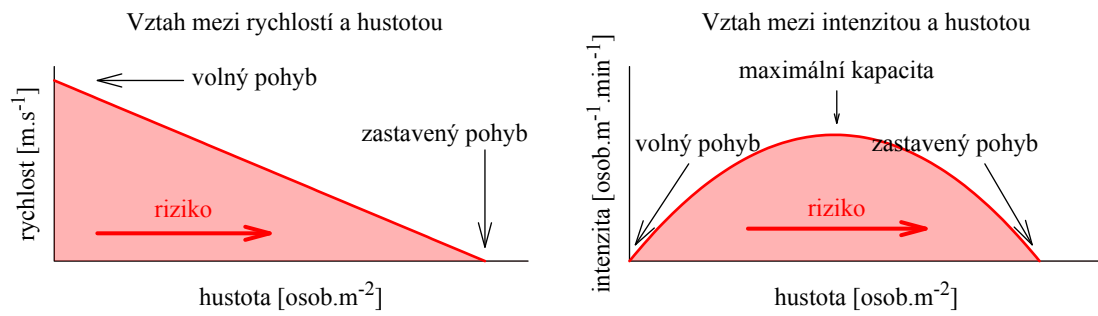


**Obr. C.4:** Srovnání statické a dynamické hustoty osob odpovídající hodnotám v intervalu 1,0 a 2,5 osob.m<sup>-2</sup> při schématickém pohledu seshora. Hustota přesahující 2,5 osob.m<sup>-2</sup> už znamená zvýšené riziko [64].

Vztah mezi rychlostí proudění osob a jejich hustotou lze považovat za kvazilineární. Jestliže je hustota osob v koridoru velmi nízká, pohybuje se proud osob rychlostí blízkou maximální. S rostoucí hustotou rychlost pohybu jednotlivců klesá, po dosažení maximální hustoty se pohyb zcela zastaví a dochází ke vzniku kongesce. Současně s nárůstem hustoty a snižováním rychlosti pohybu proudu osob narůstá pro tyto osoby riziko vzniku kritické události. Vztah rychlosti a hustoty pěšího proudu je v idealizované podobě zachycen na obr. C.5, reálně naměřené hodnoty bývají od ideální přímky odlišné vlivem dalších efektů, které není možné zobecnit.

Vztah mezi intenzitou proudění osob a jejich hustotou připomíná kvadratickou křivku. Maximální intenzita proudění osob, a tedy maximální kapacita koridoru, je dosažena v situaci, kdy již hustota narůstá, ale není ještě natolik vysoká, aby výrazněji omezovala rychlost proudění osob. Pokud hustota dále roste, rychlost proudění se zpomaluje a sledovaným průřezem prochází za jednotku času stále méně osob. Při dosažení maximální hustoty se proud zastaví a jeho intenzita klesne k nule. Tento vztah je v idealizované podobě znázorněn na obr. C.5 a opět platí, že reálně naměřené hodnoty se vlivem složitosti uspořádání konkrétní události od tohoto ideálního tvaru liší.

Za maximální zaznamenanou intenzitu pohybu osob lze považovat pohyb dobře vycvičených vojáků v sevřeném pochodovém útvaru, kde byla zaznamenaná intenzita dosahující 160 osob.m<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> při stabilní hustotě dosahující 1,8 osob.m<sup>-1</sup> [18]. Pro pohyb běžných osob je tato intenzita nicméně neudržitelná.



**Obr. C.5:** Idealizovaný vztah mezi rychlostí proudu pohybujících se osob a jejich hustotou (vlevo), idealizovaný vztah mezi intenzitou proudu pohybujících se osob a jejich hustotou (vpravo).



## Příloha D

### Stanovení úrovně kvality pěší dopravy

Pojem úroveň kvality má svůj původ v dopravním inženýrství, kde je používán také pod originálním názvem Level of Service (LoS). Jde o kvalitativní vyjádření situace na dopravní síti pomocí zjednodušené stupnice A–F. Úroveň kvality dopravy A znamená volnou dopravu, kdy se jednotliví aktéři vzájemně neovlivňují a pohybují se rychlostí blízkou maximální hodnotě, úroveň F pak znamená opačnou situaci, kdy se účastníci dopravy vlivem vysoké hustoty pohybují velmi pomalu či zcela zastaví. Metrika původně určená pro motorovou dopravu se postupně rozšířila do řady dalších oblastí včetně pěší přepravy. České normativní prostředí tuto metodu vyjma motorové dopravy ale zatím nijak neaplikuje.

#### D.1 Základní metoda hodnocení úrovně kvality pěší dopravy

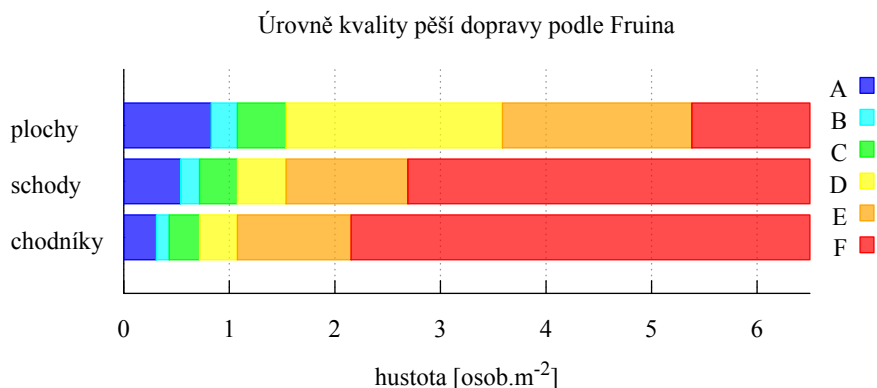
V odborné literatuře existuje celá řada konkrétních metod pro stanovení úrovně kvality dopravy. Inženýrská praxe široce akceptuje metodu popsanou Fruinem [18], která rozlišuje jednotlivé úrovně pro chodníky, schodiště a čekací plochy vlivem různých dynamických vlastností pěšího proudu. Konkrétní číselné vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro úrovně kvality pěší dopravy jsou v tabulce D.1.

Úroveň kvality pěší dopravy podle Fruina [osob.m <sup>-2</sup> ]						
Chodníky		Schody a rampy		Čekací plochy		Úroveň
Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
0	0,308	0	0,538	0	0,828	<b>A</b>
0,308	0,431	0,538	0,718	0,828	1,076	<b>B</b>
0,431	0,718	0,718	1,076	1,076	1,538	<b>C</b>
0,718	1,076	1,076	1,538	1,538	3,588	<b>D</b>
1,076	2,153	1,538	2,691	3,588	5,382	<b>E</b>
2,153	—	2,691	—	5,382	—	<b>F</b>

**Tab. D.1:** Úroveň kvality dopravy podle Fruina, která je dnes respektována jako standard [18].

Z výsledků v tabulce D.1 je patrné, že rozdíly hodnocení úrovně kvality pěší dopravy pro chodníky a schody (rampy) jsou poměrně malé, odstup čekacích ploch je naopak relativně značný. Rozdíly si lépe uvědomíme, pokud vzájemně graficky srovnáme jednotlivé úrovně mezi sebou, příklad takového srovnání je na obr. D.1. Z této jednoduché analýzy je patrné, že kromě minimálních a maximálních hodnot hustoty osob pro žádné dva typy komunikace nedochází k překryvu hodnocení úrovně kvality, tedy stejná hustota je v různých typech komunikace hodnocena vždy různě. Pro nízké hodnoty hustoty jsou ale rozdíly v hodnocení velmi malé,

případně splývají krajní hodnoty (např. hodnota  $1,076 \text{ osob.m}^{-2}$  je mezní hodnotou úrovně B a C pro čekací plochy, úrovně C a D pro schody/rampy a úrovně D a E pro chodníky). Pro rostoucí hustoty se ale divergence výrazně zvyšuje. Tato analýza je užitečná zejména v nestandardních typech komunikací pro pěší, které nelze jednoznačně zařadit k některému z uvedených typů a je třeba zvážit určitou úpravu mezních hodnot (např. prudká stoupání).



**Obr. D.1:** Srovnání úrovně kvality pěší dopravy podle Fruina pro různé typy komunikace.

Pro vizuální hodnocení jednotlivých úrovní kvality dopravy, kdy nemáme k dispozici jednoznačné číslo určující hustotu, je důležitý jejich kvalitativní (slovní) popis, který je uveden v tabulce D.2. Zároveň tento popis slouží jako zpětná vazba u již přiřazeného hodnocení.

Kvalitativní popis kvality pěší dopravy	
Úroveň	Kvalitativní popis
<b>A</b>	Chodec se volně pohybuje všemi směry, nedochází k interakci s ostatními chodci.
<b>B</b>	Chodec se volně pohybuje všemi směry, sporadicky dochází k interakci s ostatními chodci a změně směru.
<b>C</b>	K interakci či snížení rychlosti dochází často, chůze v protisměru je obtížná.
<b>D</b>	Většina chodců je interakci negativně ovlivněna, dochází ke snížení rychlosti, změně dráhy, proplétání chodců mezi sebou.
<b>E</b>	Všichni chodci přizpůsobují rychlost svému okolí, proud se pohybuje jako celek s občasným zastavením.
<b>F</b>	Kritická hustota pěšího proudu, pohybuje se pomalu jako celek s častým zastavením, nepřetržitá interakce a přeskupování chodců.

**Tab. D.2:** Kvalitativní popis úrovně kvality dopravy podle Fruina [18].



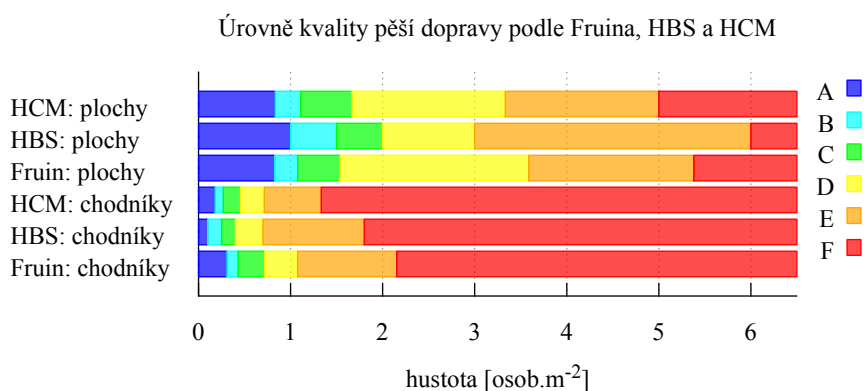
## D.2 Hodnocení úrovně kvality pěší dopravy podle dalších standardů

Hodnocení úrovně kvality pěší dopravy podle Fruina je dnes široce akceptováno, ale existují další alternativní metriky. Základním zdrojem informací v této problematice je v USA práce *Highway Capacity Manual*, v Německu potom *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* [66, 11]. Obě příručky přebírají od Fruina metodu stanovení úrovně kvality pěší dopravy na šestibodové škále, liší se pouze v hraničních hodnotách. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce D.3.

Úroveň kvality pěší dopravy podle HBS a HCM [osob.m <sup>-2</sup> ]								
HBS				HCM				Úroveň
Chodníky		Čekací plochy		Chodníky		Čekací plochy		
Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
0	0,100	0	1,000	0	0,179	0	0,833	A
0,100	0,250	1,000	1,500	0,179	0,270	0,833	1,111	B
0,250	0,400	1,500	2,000	0,270	0,455	1,111	1,667	C
0,400	0,700	2,000	3,000	0,455	0,714	1,667	3,333	D
0,700	1,800	3,000	6,000	0,714	1,333	3,333	5,000	E
1,800	—	6,000	—	1,333	—	5,000	—	F

**Tab. D.3:** Úroveň kvality dopravy podle německých standardů HBS a amerických standardů HCM [66, 11].

Z údajů v tabulce D.3 vyplývá méně podrobné dělení, obě příručky rozlišují komunikace pouze na chodníky a čekací plochy. Dále je zřejmé, že hodnoty jsou podobné s hodnocením dle Fruina, konkrétní srovnání je zachyceno na obr. D.2.



**Obr. D.2:** Srovnání úrovně kvality pěší dopravy podle Fruina, HBS a HCM pro různé typy komunikace.

Z výsledků na obr. D.2 je zřejmé, že odchylky v hodnocení nejsou nijak dramatické. V případě, že se při hodnocení situace chceme odchylovat na stranu bezpečnou a chceme aplikovat vždy nejméně příznivou hodnotu z uvedených, budeme nejčastěji využívat hraniční hodnoty z HCM.



## Literatura

- [1] ISO/TR 13387-8 Fire Engineering: Life Safety — Occupant Behaviour, Location and Condition. 1999.
- [2] ČSN 73 4205 Komíny — Pálené/Keramické komínové nástavce — Požadavky a zkušební metody. 2003.
- [3] PD 7974-6:2004 The Application of Fire Safety Engineering Principles to Fire Safety Design of Buildings. 2004.
- [4] Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships. 2007.
- [5] ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb — Nevýrobní objekty. 2009.
- [6] ISO 13571:2012 Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires. 2012.
- [7] ISO 16730:2008 Fire safety engineering — Assessment, verification and validation of calculation methods. 2012.
- [8] Averill, J. D.: Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, Occupant Behaviour. Egress and Emergency Communications. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [9] Averill, J. D.: Five Grand Challenges in Pedestrian and Evacuation Dynamics. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2011.
- [10] Bayer, K.; Rejnö, T.: Evacuation Alarm — Optimizing Through Full-scale Experiment. Technická zpráva, Lund University, 1999.
- [11] Brillon, W.: *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2009.
- [12] Bryan, J. L.: Smoke as a Determinant of Human Behaviour in Fire Situations. Technická zpráva, National Bureau of Standards, 1977.
- [13] Bryan, L. J.: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, kapitola Behavioral Response to Fire and Smoke. National Fire Protection Association, 2002, s. 3315–3340.
- [14] Cepolina, E.: Phased Evacuation: An Optimisation Model Which Takes Into Account the Capacity Drop Phenomenon in Pedestrian Flows. *Fire Safety Journal*, ročník 44, 2009: s. 532–544.
- [15] Fahy, R. F.; Proulx, G.: Toward Creating a Database on Delay Time to Start Evacuation and Walking Speeds for Use in Evacuation Modeling. In *Human Behaviour in Fire 2001*, 2001.

- 
- [16] Frantzich, H.; Nilsson, D.: Evacuation in Dense Smoke: Behaviour and Movement: Technical Report 3126. Technická zpráva, Lund University, 2003.
- [17] Frantzisch, H.; Nilssonlsson, D.; Eriksson, O.: Evaluation and Validation of Evacuation Programs. Technická zpráva, Lund University, 2007.
- [18] Fruin, J. J.: *Pedestrian Planning and Design*. Elevator World, Inc., 1971.
- [19] Galea, E.: Approximating the Evacuation of the World Trade Center North Tower Using Computer Simulation. *Fire Protection Engineering*, ročník 18, č. 2, 2008: s. 85–115.
- [20] Galea, E.: The UK WTC9/11 Evacuation Study: An Overview of the Methodologies Employed and Some Preliminary Analysis. In *Proceedings of the 4th Pedestrian and Evacuation Dynamics Conference*, 2008.
- [21] Galea, E.; Blake, S.: Collection and Analysis of Human Behaviour Data Appearing in the Mass Media Relating to the Evacuation of the World Trade Centre Towers of 11 September 2001. Technická zpráva, Office of the Deputy Prime Minister, 2004.
- [22] Grosshandler, W. L.; Bryner, N. P.; Madrzykowski, D.; aj.: Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [23] Gwynne, S. M. V.; Kuligowski, E. D.; Spearpoint, M.: More Thoughts on Defaults. In *Fifth International Symposium on Human Behaviour in Fire*, 2012.
- [24] Hamins, A.; McGrattan, K.: Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 2 (NUREG-1824). Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [25] Hartzell, G. E.: *Fire Protection Handbook*, kapitola Combustion Products and Their Effects on Life Safety. National Fire Protection Association, 2008, s. 11–34.
- [26] Hockey, S. M.; Rew, P. J.: Human Response to Thermal Radiation. Technická zpráva, WS Atkins Safety and Reliability, 1996.
- [27] Hoogendoorn, S. P.; Daamen, W.: Pedestrian Behaviour at Bottlenecks. *Transportation Science*, ročník 39, 2005: s. 147–159.
- [28] Hoogendoorn, S. P.; Daamen, W.: Microscopic Calibration and Validation of Pedestrian Models: Cross-Comparison of Models Using Experimental Data. In *Traffic and Granular Flow 05*, 2007.
- [29] Hurley, M. J. (editor): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer, 2015.
- [30] Jin, T.: Visibility Through Fire Smoke. *Report of the Fire Research Institute of Japan*, ročník 42, č. 5, 1976: s. 12–18.
- [31] Jin, T.: Studies on Human Behavior and Tenability. In *Fire Safety Science — Proceedings of the Fifth International Symposium*, 1997.
- [32] Jin, T.: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, kapitola Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. National Fire Protection Association, 2008, s. 242–253.

- 
- [33] K. D. Steckler, W. J. R., J. G. Quintiere: Flow Induced by Fire in a Compartment. Technická zpráva, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1982.
- [34] Karlsson, B.; Quintiere, J.: *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press, 1999.
- [35] Klote, J. H.; Milke, J. A.: *Principles of Smoke Management*. American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2002.
- [36] Kobes, M.; Helsloot, I.; de Vries, B.; aj.: Building Safety and Human Behaviour in Fire: A Literature Review. *Fire Safety Journal*, ročník 45, 2010: s. 1–11.
- [37] Korhonen, T.; Hostikka, S.: Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and User's Guide (Working paper No. 119). Technická zpráva, VTT Technical Research Center of Finland, 2009.
- [38] Kučera, P.; Pavlík, T.; Pokorný, J.; aj.: *Požární inženýrství — dynamika požáru*. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009.
- [39] Kuligowski, E. D.; Mileti, S.: Modelling Pre-Evacuation Delay by Occupants in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001. *Fire Safety Journal*, ročník 44, č. 4, 2009: s. 487–496.
- [40] Kuligowski, E. D.; Peacock, R. D.: Building Occupant Egress Data, Report of Test FR 4024. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [41] Kuligowski, E. D.; Peacock, R. D.; Hoskins, B. L.: A Review of Building Evacuation Models, NIST Technical Note 1680. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [42] Lord, J.; Meacham, B.; Moore, A.; aj.: Guide for Evaluating the Predictive Capabilities of Computer Egress Models. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [43] Lovreglio, R.; Ronchi, E.; Nilsson, D.: A Model of the Decision-Making Process During Pre-Evacuation. *Fire Safety Journal*, ročník 78, 2015: s. 168–179.
- [44] McConnell, N. C.; Boyce, K. E.; Shields, J.; aj.: The UK 9/11 Evacuation Study: Analysis of Survivor's Recognition and Response Phase. *Fire Safety Journal*, ročník 45, 2010: s. 21–34.
- [45] Nenno, P. J. D. (editor): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, kapitola Movement of People: The Evacuation Timing. National Fire Protection Association, 2002, s. 3342–3366.
- [46] Nenno, P. J. D. (editor): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, kapitola Response to Fire and Smoke. National Fire Protection Association, 2002, s. 3315–3341.
- [47] Nenno, P. J. D. (editor): *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, kapitola Toxicity Assessment of Combustion Products. National Fire Protection Association, 2002.
- [48] Nilsson, D.; Johansson, A.: Social Influence During the Initial Phase of a Fire Evacuation - Analysis of Evacuation Experiments in a Cinema Theatre. *Fire Safety Journal*, ročník 44, č. 1, 2009: s. 71–79.

- [49] Pauls, J. L.: Vertical Evacuation in Large Buildings: Missed Opportunities for Research. *Disaster Management*, ročník 6, č. 3, 1994: s. 128–132.
- [50] Pheasant, S.: *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of the Work*. CRC Press, 1996.
- [51] Proulx, G.: High-Rise Evacuation: A Questionable Concept. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire*, 2001.
- [52] Purser, D. A.: Behavioural Impairment in Smoke Environments. *Toxicology*, ročník 115, 1996: s. 25–40.
- [53] Purser, D. A.: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, kapitola Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat. National Fire Protection Association, 2008, s. 2096–2193.
- [54] Purser, D. A.; Bensilum, M.: Quantification of Behaviour for Engineering Design Standards and Escape Time Calculations. In *Human Behaviour in Fire 1998*, 1998.
- [55] RIMEA: Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungs-Analysen. 2009.
- [56] Ronchi, E.; Gwynne, S. M. V.; Purser, D. A.; aj.: Representation of the Impact of Smoke on Agent Walking Speeds in Evacuation Models. *Fire Technology*, ročník 49, č. 2, 2013: s. 411–431.
- [57] Ronchi, E.; Nilsson, D.: Fire Evacuation in High-Rise Buildings: A Review of Human Behaviour and Modelling Research. *Fire Science Reviews*, ročník 2, č. 7, 2013: s. 1–21.
- [58] Ronchi, E.; Nilsson, D.; Kuligowski, E. D.; aj.: The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models (NIST Technical Note 1822). 2013.
- [59] Ronchi, E.; Nilsson, D.; Zechlin, O.; aj.: Employing Validation and Verification Tests as an Integral Part of Evacuation Model Development. In *13th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering*, 2013.
- [60] Seyfried, A.; Rupperecht, T.; Winkens, A.; aj.: Capacity Estimation for Emergency Exits and Bottlenecks. In *11th Fire Science Engineering Conference INTERFLAM 2007*, 2007.
- [61] Sherman, M. F.; Peyrot, M.; Magda, L. A.; aj.: Modelling Pre-Evacuation Delay by Evacuees in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001: A Revisit Using Regression Analysis. *Fire Safety Journal*, ročník 46, č. 7, 2011: s. 414–424.
- [62] Smith, D. B.: *Fire Safety Engineering (CIBSE Guide E)*. CIBSE, 2010.
- [63] Still, G. K.: *Crowd Dynamics*. Dizertační práce, University of Warwick, Department of Mathematics, 2000.
- [64] Still, G. K.: *Introduction to Crowd Science*. CRC Press, 2014.
- [65] Tubbs, J.; Meacham, B.: *Egress Design Solutions A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning*. Wiley, 2007.

- 
- [66] Wachs, M.; Samuels, J. M.; Skinner, R. E.: *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, 2000.
- [67] Weidmann, U.: *Transporttechnik der Fußgänger*. Technická zpráva, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, 1993.
- [68] Wood, P. G.: *The Behaviour of People in Fires*. Technická zpráva, Loughborough University of Technology, 1972.