

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMATIZACE INŽENÝRSKÝCH ÚLOH A INFORMATIKY

INSTITUTE OF COMPUTER AIDED ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE

# VYUŽITÍ MODELŮ EVAKUACE OSOB A ŠÍŘENÍ POŽÁRU PRO ZVÝŠENÍ BEZPEČNOSTI SPECIFICKÝCH STAVEB

APPLICATION OF PEDESTRIAN EVACUATION AND FIRE SPREADING MODELS FOR  
SPECIFIC BUILDINGS SAFETY IMPROVEMENT

## DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Petra Okřinová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Mgr. TOMÁŠ APELTAUER, Ph.D.

BRNO 2022





*Nemůžeme obviňovat technologie, když děláme chyby.*

Tim Berners-Lee



## ABSTRAKT

Aktuální tendencí stavebnictví je tvorba výstavby takřka „bez omezení“. V projektech i při realizacích se setkáváme s netradičními kombinacemi provozního řešení, geometrie a materiálu, ke kterým je z pohledu požární bezpečnosti stále přistupováno převážně pomocí klasického normativního přístupu. Ten neumožňuje plně postihnout všechny aspekty těchto specifických staveb bez větší míry subjektivního zjednodušení. Z toho vyvstává otázka, zda i v těchto případech je stále vhodné a bezpečné využívat pouze normativní přístup, nebo by již stavby vybočující z tradiční výstavby měly být posuzovány jinak – např. tzv. požárním inženýrstvím pomocí numerických modelů. V současné době pro využívání těchto modelů mají uživatelé stále velmi málo informací, a ani v českém legislativním prostředí neexistuje žádný dokument, který by doporučoval, jak postupovat při jejich využívání pro účely požárně bezpečnostního řešení staveb. Numerické modely evakuace a šíření požáru tak představují aktuálně nejefektivnější nástroj pro analýzu dopadů a předběžné ověření účinnosti navrhovaných bezpečnostních opatření. Proto je nutné se zabývat jejich validací a užitím, s cílem inovovat stávající přístupy a standardizovat numerické modely pro požárně bezpečnostní posouzení staveb. Dále je nutné porovnat jejich možnosti a omezení ve vztahu k ČSN a sestavit komplexní informační zázemí, jako podklad pro jejich aktivnější zavádění do praxe. Předložená práce se tak zaměřuje na výše zmíněnou problematiku a demonstruje její užití na aplikačních příkladech skutečných specifických staveb a dále sadě sestavených studií. Práce dále poukazuje také na konkrétní nedostatky a zjednodušení metod normového přístupu, na základě kterých jsou poté stanoveny ověřené postupy a doporučení pro začlenění a užití numerických modelů do požárně bezpečnostní praxe.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Evakuace, evakuace osob, požárně bezpečnostní posouzení, inženýrský přístup, bezpečnost, numerický model, simulace, české technické normy, Pathfinder.

## ABSTRACT

The current trend in the construction industry is construction “without limits”. In projects and implementations, we encounter non-traditional combinations of operational solutions, geometry and materials, which are still approached mainly using the classic standards from the fire safety point of view. The latter does not allow to comprehensively cover all aspects of these specific buildings without a greater degree of subjective simplification. This raises the question of whether, even in these cases, it is still appropriate and safe to use only a standards approach, or whether buildings deviating from traditional construction should be assessed differently – for example, by so-called fire analysis using numerical models. Currently, users still have very little information about the use of these models, and even in the Czech legislation, there is no document recommending how to proceed when using them for the purposes of building fire safety solutions. Numerical models of evacuation and fire analysis are thus currently the most effective tool for impact analysis and preliminary verification of the effectiveness of proposed safety measures. Therefore, it is necessary to deal with

their validation and use, with the goal of innovating existing approaches and standardizing numerical models for fire safety assessment of buildings. Furthermore, it is necessary to compare their possibilities and limitations concerning ČSN and to put together a comprehensive information background as a basis for their more active implementation in practice. The presented work thus focuses on the above-mentioned issue and demonstrates its use of application examples of real specific buildings and a set of compiled studies. The work also points out specific shortcomings and simplifications of standard approach methods, based on which verified procedures and recommendations for the incorporation and use of numerical models in fire safety practice are then established.

## **KEYWORDS**

Evacuation, evacuation of people, engineering approach, fire safety assessment, Fire safety engineering, safety, numerical model, simulation, Czech technical standards, Pathfinder.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Ing. Petra Okřinová *Využití modelů evakuace osob a šíření požáru pro zvýšení bezpečnosti specifických staveb*. Brno, 2022. celkově 250 s. – z toho 150 s. práce a 46 s. příloh. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky. Vedoucí práce doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Využití modelů evakuace osob a šíření požáru pro zvýšení bezpečnosti specifických staveb zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 30. 6. 2022

---

Ing. Petra Okřínová  
autor práce



# Předmluva

Uskutečnění doktorského studia bylo pro mě skutečně život měnící zkušeností, která by nebyla možná bez podpory, vedení a spolupráce, jež se mi dostávalo od mnoha lidí.

Vděčím za finanční podporu, která mi byla poskytnuta mojí alma mater, ať už ve formě stipendia při studiu doktorského studijního programu „Konstrukce a dopravní stavby“, tak i prostřednictvím interní grantové soutěže, díky níž vznikly i dílčí výsledky pro tuto práci. Konkrétně se jednalo o juniorské specifické projekty *FAST-J-16-3737 – Vliv aproximace geometrie modelu na evakuační časy*, *FAST-J-17-4747 – Užití numerických modelů pro simulace evakuace a pohybu osob ve shromažďovacích stavbách* a o spolupráci v rámci standardního specifického výzkumu *FAST-S-17-4275 – Numerické modelování inženýrských úloh ve stavebnictví*, *FAST-S-18-5327 – Analýza progresivních stavebních struktur a materiálů* a *FAST-S-15-2933 – Propojení mikroskopických modelů dopravy a modelů pohybu osob a požáru při návrhu komplexních dopravně-inženýrských řešení*.

Dále bych chtěla poděkovat za důvěru a možnost se aktivně podílet na řešení vědecko-výzkumných projektů, finančně podpořených Grantovou agenturou ČR, Technologickou agenturou ČR, Ministerstvem vnitra ČR – Programu bezpečnostního výzkumu ČR. Konkrétně se jednalo o následující projekty: *VG20132015120 – Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru (SAFEVAC)*, *TA03030491 – Optimalizace technologického vybavení tunelů pozemních komunikací se zřetelem na bezpečnost a cenu (HADAS)*, *VI20162019034 – Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb (VERIFIRE)*, *TH02010372 – Systém pro monitorování, vyhodnocování a řízení proudů chodců a cyklistů*, *TH04010377 – Vývoj metod identifikace a ochrany měkkých cílů dopravní infrastruktury pro zvýšení jejich bezpečnosti a odolnosti před teroristickým útokem*, *TL02000103 – Kognitivní psychologie a prostorová syntaxe ve virtuálním prostředí pro agentní modely*, *TL02000352 – Klasifikace sociálně-psychologických parametrů osob prostřednictvím umělé inteligence a strojového vidění pro potřeby ochrany osob v reálném čase*, *VI20192022118 – Ochrana měkkých cílů v bezpečnostním prostředí ČR* a *TJ04000232 – Efektivní časoprostorové predikce s využitím metod strojového učení*. Jako řešitelka nebo členka řešitelského týmu projektů, jejichž bližší přiblížení je uvedeno v kap. 3 a Příloze D, jsem byla zodpovědná za: analýzy a ověřování PD, shromažďování informací a podkladů z dostupných zdrojů, tvorbu numerických modelů, sestavování koncepce návrhových scénářů, ověřování numerických modelů, analýzy a zpracování dat, sestavování rukopisných skladeb (pro zprávy, metodiky, publikace) a mnoho dalšího. V rámci zmiňovaných výzkumných projektů jsem měla možnost diskutovat s celou řadou odborníků, specialistů z výzkumných týmů, což značně přispělo k rozšíření mých znalostí. Největší vliv a přínos pro moji práci vznikl v rámci spolupráce s řešitelskými týmy z ČVUT v Praze, Fakulty stavební pod vedením prof. Ing. Františka Walda, CSc., MV, GR HZS – Technického ústavu požární ochrany (TUPO) pod vedením plk. Ing. Ondřeje Suchého, Ph.D., VŠB TU Ostrava, Fakulty bezpečnostního inženýrství (FBI) pod vedením doc. Ing. Petra Kučery, Ph.D., a tímto bych jim chtěla všem velmi poděkovat.



Praktické poznatky, zkušenosti, konzultace postupů a řešení požární bezpečnosti z pohledu druhé strany (schvalovatelů), které mi byly předány hasiči a požárními preventisty z řad GŘ HZS ČR, HZS hlavního města Prahy – plk. Ing. Zdeňkem Salátkem, HZS Jihomoravského kraje – kpt. Ing. Marianou Gejdošovou, kpt. Ing. Ludkem Vránou a HZS Zlínského kraje – por. Bc. Markétou Hodnou.

Podklady a projektová dokumentace pro numerické modely byly v rámci spolupráce dodány následujícími subjekty: Architektonická kancelář Chybik+Kristof, METROPROJEKT, a. s., Brněnské komunikace, a. s., Dopravní podnik města Brna, a. s., Dopravní podnik hl. m. Prahy, a. s., Výzkumný Ústav Železniční, a. s., Správa železnic, stát. organizace, Investiční odbor města Brna, Architekti Hruša – Ateliér Brno, A PLUS, a. s.

Součástí projektu *VI20162019034* byla sestavena sada metodik [205, 21, 135, 302] a databáze požárních charakteristik materiálů [396], které jsou zpřístupněny odborné veřejnosti. Vybrané informace, poznatky a autorské texty byly užity i pro potřeby této disertační práce (zejména v kap. 4.4 pro verifikaci modelu a v kap. 5 a Příloze H, jako podklad pro návrhové požáry).

Vzhledem k dlouholeté spolupráci s firmou RCE systems byla zapůjčena licence softwaru DataFromSky (DFS) a FLOW, vzorová videa pro analýzu a zpracování dat z videozáznamu pohybu pěších z reálného provozu za účelem získání zkušebních data setů pro kalibraci a validaci numerických modelů (viz kap. 4.4 a kap. 4.4) a analýzy dat jako vstupů do modelů.

Vybrané části práce byly již publikovány jako autorské nebo spoluautorské příspěvky v časopisech [25, 29, 389] a na konferencích [27, 22, 386, 134, 391, 392, 16, 18, 17], jako součást dílčích/závěrečných zpráv a software [31] nebo jako součást vzniklých metodik [136, 21, 14, 76] (pasáže jsou v jednotlivých kapitolách řádně označeny citací). Dále pak části kap. 4.4 byly již publikovány v [21, 135, 76] se spoluautory, stejně tak i části kap. G, které byly publikovány v [14]. Prezentované výstupy a výsledky viz kap. 5 vznikly převážně z provedených analýz evakuačního procesu v rámci řešených staveb (konkrétně blíže viz 3.3). Obrázky a schémata obsažené v této práci jsou přepracované nebo řádně citované či byly použity se souhlasem příslušných zdrojů. Spoluautoři publikací a všech dílčích výsledků souhlasí s využitím těchto výstupů pro tuto disertační práci. V práci jsou užity některé pasáže z dříve sepsaných tezí [387] za účelem pojednání ke státní doktorské zkoušce.

Přínosem a inspirací pro tuto práci byly i absolvované zahraniční konzultace. V roce 2017 na University of Greenwich in London s prof. Ed Galea BSc (Hons), Dip. Ed, PhD, CMath, FIMA, CEng, MIFireE na téma numerické modelování, evakuace osob se sníženou pohyblivostí a problematika vzniku kritických událostí v metru. Následně v roce 2019 na University of Maribor, Maribor s red. prof. dr. Matjaž Šraml, univ. dipl. inž. str. na téma pěší doprava, pořizování záznamu pohybu pěších a extrahování dat z videí. Skrze epidemiologickou situaci spojenou s COVID 19 bohužel nebylo možné uskutečnit další zahraniční stáže.

Jsem upřímně zavázána každému, kdo mě jakýmkoliv způsobem během posledních let pozitivně ovlivňoval, podporoval a poskytoval pomoc ve všech fázích mého Ph.D. studia.

Na prvním místě bych ráda vyjádřila své zvláštní uznání a díky svému školiteli doc. Mgr. Tomášovi Apeltauerovi, Ph.D., který mi je po celý čas skvělým mentorem a osobním vzorem. Chtěla bych mu poděkovat za možnost spolupráce, vytvoření skutečného tvůrčího zázemí, pomoc při definování směru mé práce a za jeho rady, jak v oblasti výzkumu, tak i v oblasti mého osobního rozvoje, které byly pro mne nedocenitelné. Zejména mu děkuji za rovnocennou příležitost, možnost vědeckého růstu, zpětné vazby a trpělivost, bez které by tento doktorát nebyl dosažitelný.

Moje hluboké uznání patří i zbylým členům našeho výzkumného týmu zabývajících se pohybem osob, jejich evakuací a šířením požáru a toxicity. Poděkovala bych zejména Ing. Jiřímu Apeltauerovi, Ph.D., za konzultace ohledně počítačového vyhodnocení, automatizaci modelu

a zpracování dat, Ing. Petru Benešovi, CSc., za cenné rady a zkušenosti týkající se problematiky požární bezpečnosti, Ing. Ondřeji Uhlíkovi za poskytnutí jiného úhlu pohledu při tvorbě modelů a Bc. Martinu Pařilovi za špičkový IT background. Společná spolupráce na projektech, tvorbě rozsáhlých modelů, přípravě metodik, společných článků, konzultací, prezentací výsledků i sdílení a konzultace myšlenek, týkajících se tématu práce, neocenitelným způsobem přispěla k tvorbě samotné disertační práce. Jsem jim také vděčná za porozumění, rady a za jejich smysl pro fair play a skutečnou týmovost.

Velké díky patří doc. Dr. techn. Ing. Janu Podroužkovi za tvůrčí dohled nad touto disertační prací, za jeho povzbuzení, mentorskou roli při úpravách rukopisů a vnesení tolik potřebné míry nadhledu. Mnohokrát děkuji Ing. Josefu Remešovi, Ph.D., který mi byl skvělým vedoucím diplomové práce a přivedl mě na myšlenku doktorského studia. Velké díky patří i Ing. Josefu Pláškoví, Ph.D., který mi byl velkou oporou nejen v období tvůrčích krizí, ale celkově mě vždy povzbudil pokračovat dál. Dále patří díky i doc. Dr. Ing. Jiřímu Rybičkovi za drahocenné rady při sazbě v systému L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Také jsem velmi vděčná všem z našeho ústavu AIU, kteří přispěli k mému rozvoji na akademické půdě, předali mi celou řadu cenných rad a vytvořili přátelské prostředí nejen pro tuto práci, ale pro mě. Dále bych ráda poděkovala i svému dlouholetému partnerovi, který to sice neustál, ale na začátku všeho při mě stál a býval mi oporou v nelehkých časech osobních krizí při psaní této práce. Na závěr zvláštní poděkování patří mým nejbližším a mé rodině. Slovy lze jen těžko vyjádřit vděk za jejich neutuchající podporu během celého mého studia, za snahu o zachování mého zdravého rozumu (v tomto patří velké díky zejména SFR!) a tak i možnosti dokončit to, co jsem začala.

Ohlédnutím zpět za mým úsilím mě donutilo si uvědomit, že každý z nás je jedinečný a jen na nás je, jak s tím naložíme. Je úžasné moci se podílet na pokroku, rozvoji a vzdělání, a mít tak možnost pozorovat přeměny. Celkově bych ráda poděkovala všem lidem, kteří nacházejí odhodlání a vytrvalost pro své vzdělávání, všem kolegům, studentům, kamarádům a pocestným, kteří jsou inspirací, podnětem a podporou na našich životních cestách, jelikož cesta je cíl!

Petra Okřinová  
červen 2022



# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Motivace . . . . .	3
1.2 Současný stav poznání . . . . .	5
1.2.1 Dynamika a fungování davu . . . . .	6
1.2.2 Aktuální metody . . . . .	11
1.2.3 Nové technologie . . . . .	15
1.3 Současná praxe požárně bezpečnostního posouzení . . . . .	18
1.3.1 Normový přístup . . . . .	19
1.3.2 Odlišný přístup . . . . .	20
1.3.3 Numerické modely . . . . .	23
<b>2 Cíle práce</b>	<b>27</b>
2.1 Hlavní cíl disertační práce . . . . .	27
2.2 Dílčí cíle disertační práce . . . . .	27
<b>3 Výzkumná spolupráce a inženýrská praxe</b>	<b>31</b>
3.1 Související výzkumné projekty . . . . .	31
3.2 Spolupráce s centrem AdMaS . . . . .	32
3.3 Analýza evakuačního procesu v inženýrské praxi . . . . .	32
3.4 Nové metody kalibrace a validace modelů pohybu osob . . . . .	37
<b>4 Aplikované metody pro bezpečnostní posouzení</b>	<b>39</b>
4.1 Metody posouzení . . . . .	39
4.1.1 Posouzení evakuace dle ČSN 73 08XX . . . . .	40
4.1.2 Posouzení evakuace s využitím modelu . . . . .	43
4.2 Vstupní data . . . . .	59
4.2.1 Zdroje dat . . . . .	60
4.2.2 Geometrie . . . . .	61
4.2.3 Populace . . . . .	62
4.2.4 Behaviorální vlivy . . . . .	63
4.3 Výstupní data a jejich zpracování . . . . .	64
4.4 Verifikace a validace modelu . . . . .	67
<b>5 Případové studie evakuace osob</b>	<b>73</b>
5.1 Ověřené postupy . . . . .	73
5.1.1 Návrhové scénáře . . . . .	73
5.1.2 Interpretace výsledků evakuačního modelu . . . . .	83

5.2	Případové studie . . . . .	97
5.2.1	Parametrické a citlivostní studie . . . . .	97
5.2.2	Shrnutí poznatků citlivostních a parametrických studií . . . . .	117
5.2.3	Analýza výsledků simulovaných studií . . . . .	121
5.3	Optimalizace návrhu . . . . .	123
5.3.1	Studie optimalizace geometrie . . . . .	123
5.3.2	Studie výběru variantního řešení . . . . .	127
5.4	Identifikace kritických míst . . . . .	130
5.5	Příklad validace simulačního experimentu . . . . .	135
<b>6</b>	<b>Přínosy práce pro praxi</b>	<b>137</b>
6.1	Základní získané poznatky a jejich přínosy . . . . .	137
6.2	Doporučení pro aplikaci v praxi . . . . .	138
6.2.1	Doporučená aktualizace předpisů . . . . .	139
6.2.2	Doporučení pro užití v praxi . . . . .	140
6.2.3	Doporučené užití pro účely IZS . . . . .	143
6.3	Check-list pro užití modelu evakuace osob . . . . .	144
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>147</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>151</b>
A	Historický vývoj normového přístupu v ČR . . . . .	151
B	Podpůrné metodiky a zahraniční zdroje . . . . .	155
C	Dělení numerických modelů . . . . .	160
D	Související výzkumné projekty a spolupráce . . . . .	166
E	Vstupní data pro numerický model evakuace osob . . . . .	170
F	Celkové srovnání analytického a numerického přístupu . . . . .	181
G	Moderní metody umělé inteligence a virtuální reality . . . . .	182
H	Postup sestavení návrhového požáru . . . . .	196
	<b>Literatura</b>	<b>199</b>
	<b>Seznam zkratk</b>	<b>223</b>
	<b>Seznam veličin a jednotek</b>	<b>227</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>229</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>238</b>
	<b>O autorce</b>	<b>240</b>

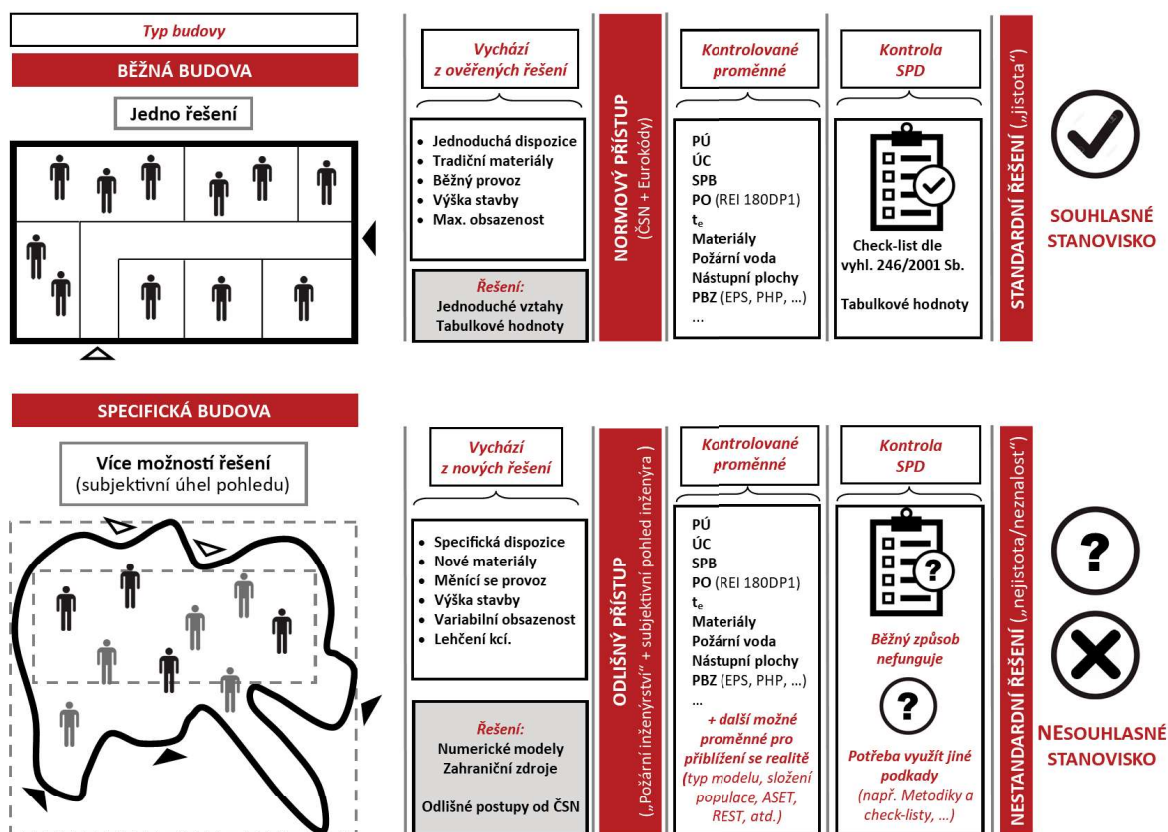
# Kapitola 1

## Úvod

Evakuace osob je dlouhodobě diskutovaným problémem, který bývá často historicky řešen v důsledku tragických úmrtí evakuovaných osob, jak při nenouzových (davové akce – tlačence, davový kolaps apod.), tak i nouzových situacích (krizové situace s ohrožením na životech – např. požárem, útočником apod.). Tato skutečnost podnítila teoretický i experimentální výzkum zaměřený na evakuaci zejména v zemích tehdejšího Sovětského svazu, USA, Velké Británii a Japonsku, jehož první výsledky se datují k roku 1930. V návaznosti na vývoj a výsledky tohoto vědního oboru vzešly i základy českého normového přístupu vytvořené Ing. Vladimírem Reichlem, DrSc. a kol., v období kolem roku 1970. V současnosti je požární bezpečnostní posouzení podřízeno primárně platné legislativě, českým technickým normám tzv. požárního kodexu ČSN 73 08XX pocházejícího právě z 80. let dvacátého století (jehož vývoj je v této práci blíže popsán viz kap. 1.3 a v Příloze A). Požární kodex je cenným nástrojem požární bezpečnosti a v některých ohledech dokonce stále převyšuje kvality standardů jiných zemí v EU, ale i přes tento fakt je zapotřebí, aby byl pravidelně novelizován a dokázal reagovat na nové směry vývoje a inovativní potřeby stavebnictví.

V porovnání s dobou normalizace dochází k velmi rychlému rozvoji odvětví, která byla dříve spíše konzervativní, jako je např. i stavebnictví. V dnešní době je již nežádoucí stavby typizovat, dobrým příkladem může být i stále masivněji rozvíjející se 3D tisk staveb, který umožňuje individualizaci, geometrickou složitost, uplatnění generativního designu, z čehož nám plyne potřeba přípravy posuzování PBŘ u specifických staveb s organickými a bio-inspirativními tvary [425]. Aktuální tendencí je tvorba výstavby takřka „bez omezení“ – jak z pohledu materiálového (využití recyklovaných materiálů, plastových dílců, kompozitů, izolantů, nehořlavých příměsí), tvarové rozmanitosti (3D tisk, organické struktury, subtilní konstrukce), provozu (vysoká koncentrace osob s hendikepem, multifunkční prostory, stavby s vysokou kapacitou – stadióny), výšky stavby (výškové budovy), podzemních staveb (garáže, metro, obchodní centra) a dostupnosti nových moderních technologií. V projektech i při realizacích se setkáváme s netradičními kombinacemi uvedených možností, které jsou v dnešní době stále posuzovány převážně klasickým normativním přístupem. Z toho však vyvstává otázka, zda i v takto specifických případech je pořád vhodné a bezpečné postupovat pouze dle normativního přístupu, nebo by již stavby vybočující z tradiční výstavby měly být posuzovány jinak. Běžně uplatňovaný normový přístup se totiž při svém užití opírá o unifikované sady postupů, empirických vztahů a tabelárních hodnot pro přímé porovnání, kterými nelze zcela postihnout všechny aspekty specifických staveb, ani jejich rozmanitost návrhu s ohledem na aktuální potřeby a trendy. Na základě toho byl českým zákonodárstvím připuštěn alternativní přístup tzv. požárního inženýrství, který je používán při posuzování požární bezpečnosti staveb v případech, kdy je klasický normativní postup nevýhodný nebo jej není možné zcela aplikovat. Do tohoto přístupu spadají i numerické modely požáru a evakuace osob (blíže viz kap. 1.3.3 a dále také jako NM), které lze považovat za ekvivalentní řešení ke standardnímu přístupu a lze jejich pomocí dosáhnout minimálně takové míry bezpečnosti, jaká je stanove-

na českými standardy při běžném postupu posouzení PBR. Bohužel samotní inženýři často nejsou dostatečně informováni, ani neumí využívat inovované postupy, které nám současná situace nabízí – viz kap. 1.2.3 a 1.3.3, i když jsou v souladu s výkladem požárního inženýrství. V současné době neexistuje v českém legislativním prostředí žádný dokument, který by doporučoval, jak postupovat při požárně bezpečnostním řešení staveb se specifickými nároky převyšujícími rámec klasického posouzení pomocí požárního inženýrství. Při posouzení požární bezpečnosti specifických staveb (tzn. stavby vybočující se běžnému popisu a zatřídění dle ČSN 73 08XX) se z jednoznačného řešení stává otevřený problém, na který lze nahlížet vícero způsoby – viz obr. 1.1.



Obr. 1.1: Porovnání klasického normového přístupu a odlišného přístupu k vypracování a schválení požárně bezpečnostního posouzení (zdroj: vlastní)

Aktuálně je projektant, autorizovaný inženýr, nucen si poměrně často pokládat otázky, které by jej nasměrovaly ke správnému řešení. Jak interpretovat vágně napsané normy? Jak zjednodušit složitost geometrie, aby bylo možné užít tabelárních hodnot? Finálně, jako zpracovatel PBR, je zodpovědný za volbu vhodného postupu, jeho následnou korektní aplikaci a správnost výsledků (předepsaná opatření). Následně stejně tak posuzovatel, úředník na stavebním úřadě či preventista (státní požární dozor, SPD), hodnotí přijatelnost volených postupů, jejich aplikace na konkrétní řešenou stavbu a konečné závěry, mnohdy na základě subjektivního dojmu, který vychází např. z odlišného přístupu od klasického ztvárnění, vybočení z tradičního seznamu kontrolovaných položek (tzv. check-listu), nebo nedostatečné průhlednosti řešení apod. Vinou vybočení z „rutinního standardu“ může SPD s předloženou (byť správně řešenou) dokumentací nesouhlasit a vydat nesouhlasné stanovisko s požadavky na nápravu. S následně vyvstalými změnami vzniká nutnost přeprojektování dokumentace či úplné změny specifického záměru, které jsou často spjaté s prodražením výstavby. Tyto kolize při procesu řešení–posuzování–schvalování jsou nepříjemné pro všechny zúčastněné strany. Lze tedy říci, že velká část realizace PBR zejména v případech posouzení rozsáhlých, specifických staveb a provozů je založena na subjektivním úsudku osob (mnohdy „na stranu bezpečnou“), což se nejvíce jako zcela optimální.

Ani v případě posouzení specifických staveb inženýrským přístupem nelze při aplikacích numerických modelů poskytnout jednoznačný, univerzální návod, jelikož je důležité ke každé takové stavbě přistupovat individuálně – v jistém pohledu řešit posouzení přímo „na míru“. Přesto lze pro jednoznačnost postupu práce zpracovatele i pro účely posuzovatele stanovit přinejmenším rámcový postup s kontrolovatelnými body, a podpořit tak zavedení pokročilých výpočetních postupů v hodnocení PBŘ i pro účel obecné ochrany osob a efektivitu protiteroristických opatření (podobná snaha byla již vyvinuta i v rámci projektu *VI20162019034*). Pro zavedení přístupu do aktivní praxe je pak nutné nastavit určitý standard sjednocení znalostí a požadavků ohledně numerického posouzení, a to pro všechny fáze a účastníky procesu (projektanty, autorizované inženýry a preventisty HZS). Tento standard lze nastavit např. pomocí odborných knih v českém jazyce, metodik, dostupných databází vstupních dat pro modelování (materiálové, charakteristiky osob), řešených aplikačních příkladů, dodání aktualizovaných check-listů, odborných seminářů a diskuzí lidí z praxe s proškolenými lidmi z odboru prevence HZS.

Předložená práce je dělena do sedmi kapitol, které lze seskupit do dvou základních ucelených částí. První část obsahuje kap. 1–4, ve kterých je představen primárně současný stav poznání dané problematiky týkající se evakuace osob, jejího posuzování a numerického modelování. Dále jsou přiblíženy možnosti užití numerických modelů evakuace osob a šíření požáru, jejich základní principy, potřebná vstupní data a jejich ověřování. V druhé části zejména pak v kap. 5 a 6 jsou uvedeny hlavní části vlastní práce. V této části jsou představeny ověřené postupy sestavování návrhových scénářů a interpretace výsledků simulací, dále pak parametrické a citlivostní studie analýzy vybraných vstupních parametrů a jejich vliv na celkový výsledek, ve srovnávání s normovým výpočetním přístupem dle ČSN, optimalizace návrhu a identifikace kritických míst. Následně jsou uvedeny i další možnosti užití numerických modelů u specifických staveb pro účely PBŘ. Z této části je následně sestavena řada poznatků ovlivňujících obecně evakuační proces osob ze specifických staveb, sada doporučení pro samotnou aplikaci tohoto přístupu (konkrétně: pro zavedení do praxe, pro užití v praxi a pro nácvik a plánování zásahu HZS (IZS) a potřeby pro zavedení) a nakonec i samotný check-list pro užití/kontrolu numerického modelu evakuace osob. Další potřebné podklady a informace pro zavedení numerických modelů evakuace osob a šíření požáru v kontextu ČSN 73 08XX do aktivní praxe pro posouzení PB specifických staveb, jako jsou vstupní data, výčet základní související literatury, ale i samotné srovnání normového přístupu a numerického modelování pro posuzování evakuace osob (jejich výhody a nevýhody), související nové moderní metody jsou uvedeny v přílohách této práce.

## 1.1 Motivace

Se zvyšujícím se růstem populace a s tím spojeným výskytem velkého počtu lidí v místech běžného denního provozu (dopravní uzly, komunikační koridory) nebo na masových akcích (sportovní utkání, koncerty, školy) se běžná situace rychle může přeměnit v situaci nouzovou, která vyvolá potřebu evakuace. V těchto případech se zejména jedná o incidenty spojené s přeplněním a s překročením kapacity, nedodržením předpisů (např. zamčené nouzové východy, dekorativní hořlavé materiály) či nedůslednou organizací apod. Takových incidentů ve světě i přes vývoj nových bezpečnostních opatření neustále přibývá a často mívají velmi závažné následky. Zejména se jedná o tragické události se ztrátami na lidských životech při různých příležitostech ve specifických typech staveb, jako jsou:

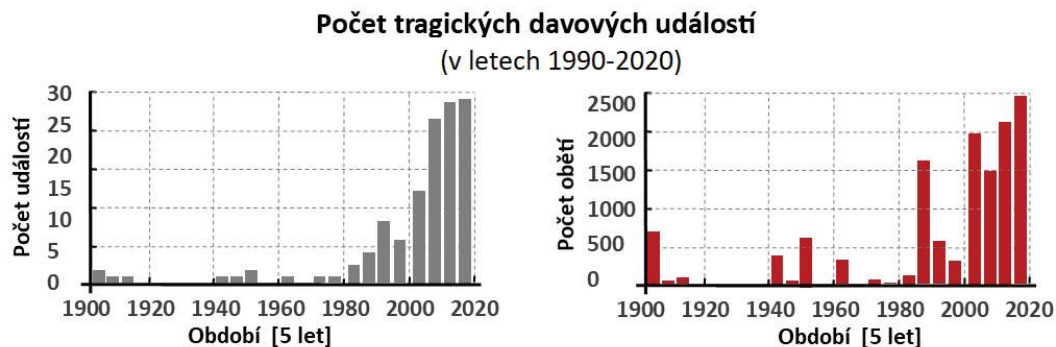
**náboženské** – 224 mrtvých a více než 425 zraněných při hinduistickém svátku u chrámu Chamunda Devi v Jodhpur [242]; 769 obětí (dle oficiálních čísel, dle reálných odhadů až 2000 obětí) v Mina při pouti do Meky [5];



- sportovní stadiony** – 96 mrtvých a 766 zraněných na stadionu v Hillsborough [106]; 28 obětí konfrontace fanoušků a policie v Káhiře [207]; 1 oběť při předzápasovém čekání v Harare;
- školy** – 6 mrtvých a 25 zraněných žáků při evakuaci školy v Kunmingu, [559]; 3 mrtví a několik desítek zraněných při inaugurační party v Bydgoszcz [397];
- výškové budovy** – 72 obětí a 73 zraněných si vyžádal požár bytového domu Grenfell Tower v Londýně [438]; 2 606 obětí teroristického útoku na World Trade Center [110];
- shromažďovací prostory a prostranství** – 456 úmrtí a 700 zranění v rámci „Water Festival v Phnom Penh“ [370]; 21 obětí a 511 zraněných na festivalu „Love Parade“ v Duisburgu [232]; 36 obětí při oslavě Nového roku v Šanghai [233]; 130 obětí při teroristickém útoku v Paříži [422]; 8 obětí a 300 zraněných na venkovním festivalu Astroworld při vystoupení Travise Scotta [381];
- kluby** – 236 mrtvých a 169 zraněných při požáru klubu ve městě v Santa Maria [38]; 152 obětí při požáru klubu v městě Perm [38]; 100 mrtvých a více než 200 zraněných při požáru stage ve West Warwicku [189];
- nákupní centra** – 9 lidí zraněných při návštěvě NC v Orlando [559]; 64 mrtvých (z toho 41 dětí) při požáru Sibiřského OC Zimňaja Višňa [105];
- metro** – 31 mrtvých a 100 lidí zraněných při požáru stanice King’s Cross v Londýně [157]; 289 obětí a 265 zraněných při požáru vlakové soupravy metra v Baku, [39]; 155 obětí při požáru lanové dráhy v Kaprunu [488]; 192 mrtvých a 148 zraněných při založení požáru metra mentálně narušeným jedincem v Daegu [252]; 5 zraněných při požáru vozu metra v Budapešti; 14 mrtvých a 45 vážně zraněných při bombovém útoku v metru v Petrohradě [48, 529].

V důsledku těchto tragických událostí i dalších podobných vznikla celá řada dodatečných předpisů a stavebně technických opatření jako prevence s celosvětovým přesahem. Příkladem zavedených dodatečných opatření je: stanovení maximální návštěvnosti, povinná instalace sprinklerových systémů, provedení nákladných renovací za účelem ochrany osob a šíření požáru, použití ohnivzdorných materiálů, instalace protipožárních dveří a kouřových stěn, instalace nouzového osvětlení, označení evakuačních cest a východů, povinnost zpřístupnit evakuační plány a proškolení pomocný personál stran jednání při nouzových situacích.

I přes všechna zavedená opatření se i nadále setkáváme s vysokou četností výskytu analogických událostí, které mají mnohdy za následek velké ztráty na životech nebo masivní újmny na zdraví, viz obr. 1.2. Velký počet obětí či zraněných je způsoben druhotným nebezpečím ve formě neadaptivního chování davu (selhání samoorganizace, davového kolapsu, tlačence, ušlapání) a často je vyšší než počet obětí v důsledku primární příčiny (ohně, výbuch, ohrožení jedincem atd.). Tento fakt poukazuje na důležitost lepšího pochopení dynamiky pohybu evakuovaných osob, které lze použít k ověření skutečné funkčnosti a bezpečnosti budovy, stejně jako k plánování či usnadnění řízení evakuačních procesů.



**Obr. 1.2:** Statistika tragických davových událostí spojených s vysokou koncentrací počtu osob či požárem v letech 1900–2020 v intervalu 5 let (zdroj: vlastní přepracováno z [520]).

První podněty jako motivace pro tuto práci vzešly již při zpracovávání autorčiny diplomové práce s názvem „Bezbariérový bytovým dům s rehabilitačním centrem“ [385], jejíž součástí bylo vypracování PBŘ. Při jeho zpracování autorka narazila na první omezení ČSN přístupu při potřebě zohlednit reálný proces evakuace osob se specifickými potřebami (osoby na vozíku, o berlích a s nutností asistence), který je v ČSN velmi zjednodušený. Proto ke klasickém PBŘ byl vytvořen numerický model evakuace osob jako funkční doplněk.

Dosud využívané technické normy a směrnice zásad požární ochrany pro projektování a výstavbu nestanovují všechny proměnné a nezohledňují vazby reálného života. Například pro návrh metra není pro podzemní úseky stanoven tepelný výkon návrhového požáru (viz kap. 5.1.1 a Příloha H) a dostupná jsou pouze data pro úseky nadzemní, což je nedostatečné. Uvažuje pouze s možností všech přístupných východů. Dále je evakuace osob se specifickými potřebami zohledněna pouze součinitelem vyjadřujícím podmínky evakuace (míra samostatnosti, typ ÚC, blíže viz kap. 4.1.1), který sice zohledňuje jejich přítomnost, ale nezohlední reálnou možnost využití evakuační cesty (např. osoba na vozíku reálně nemůže při evakuaci samostatně užít schody).

Numerické modelování je aktuálním tématem, které může být architektům a projektantům nápomocné a poskytnout jim jistou míru svobody při navrhování funkčních, estetických, komfortních a bezpečných prostor, které by s použitím analytických postupů nebylo možné nebo by bylo značně omezené. Analytické metody jsou často od počátku limitovány okrajovými podmínkami, striktně danými postupy a neumožňují přílišnou materiálovou, kapacitní ani geometrickou rozmanitost bez ohledu na aktuální možnosti. Tato omezení by mohla přispět k využití tzv. virtuálního posuzování, která se stávají trendem nejen v oblasti evakuace a požární bezpečnosti, jež je předmětem této práce, ale v široké škále dalších oblastí, jakou je např. medicína (neuronové stimulace [355], průtok krve [62]), mechanika (dynamické chování staveb [248, 423]), akustika [143], technické zařízení budov (větrání místností [591], proudění vzduchu [431]), hydrologie (degradace permafrostu [266], vysychání lužních polí [46]) atd.

Aplikace modelu evakuace osob v kombinaci s modelem šíření požáru a jeho dopadů na unikající osoby umožní výrazné rozšíření stávajících možností při navrhování a následném posuzování staveb ve vazbě na metody požárního inženýrství a ochranu měkkých cílů. V současnosti je zapotřebí inovovat využívané analytické metody požární bezpečnosti a standardizovat využití numerických modelů evakuace a požáru. Stanovit základy pro jejich využití účely PBŘ a ochranu měkkých cílů, jelikož představují aktuálně nejefektivnější nástroje pro analýzu rizik a ověření účinnosti bezpečnostních opatření.

## 1.2 Současný stav poznání

V následujících odstavcích budou detailněji rozvedeny vybrané aspekty současného stavu dané problematiky, a to s využitím domácích i zahraničních zdrojů literatury.

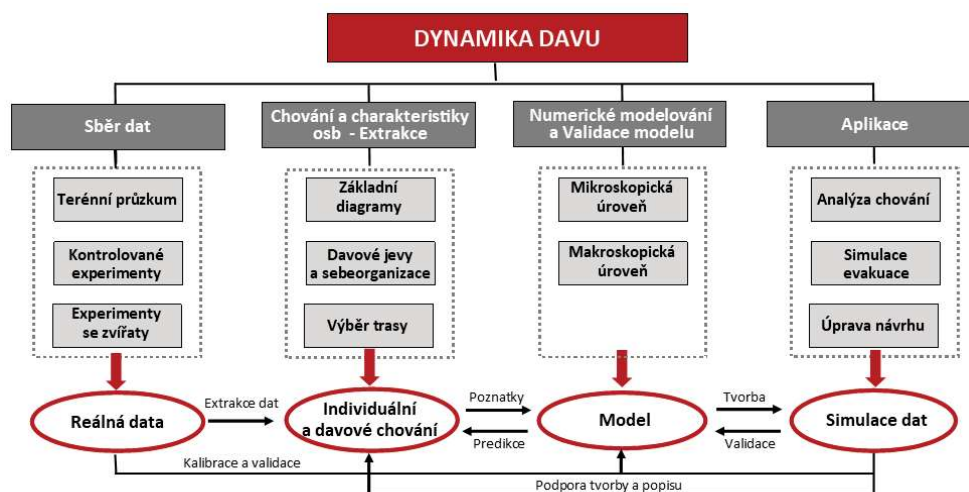
Následkem řady tragických událostí, které se udály v posledních letech (příklady uvedeny v kap. 1.1), došlo k rozvoji vědeckých prací týkajících se klíčových témat, jako jsou ochrana měkkých cílů, požární bezpečnost a zejména nouzová evakuace. Při nouzové evakuaci často dochází k vážným zraněním a ztrátám na životech, a to nejen vlivem prvotního rizika (požár, výbuch, teroristický útok atd.), ale často také v důsledku vzniku davové tragédie (panika, tlačení, davový kolaps, selhání samoorganizace, ušlapání atd.) v souvislosti s eskalací prvotního rizika, jako sekundární riziko. Tragédie, podnětené životu ohrožujícími situacemi, vznikají zejména na přeplněných a špatně přístupných místech, jako např. koncertní haly, dopravní uzly, stavby metra apod. Výše uvedené poznatky vycházejí zejména z výsledků expertíz incidentů, na které poukazují práce [182, 51, 309, 158].

Základem pro zajištění bezpečnosti v místech, stavbách a na akcích s vysokou koncentrací lidí jsou poznatky o fungování davu v různých situacích, pochopení jeho chování a pohybu chodců spolu s jejich včasnou predikcí. Pro samotné studium neadaptivního chování v přepl-

něném prostředí je třeba prvně detailně pochopit aspekty lidského a sociálního chování i při mimořádných situacích z psychologického i sociologického hlediska. Z těchto důvodů je i tato problematika detailněji rozvedena v následující kap. 1.2.1.

### 1.2.1 Dynamika a fungování davu

V procesech dynamiky davu je registrováno mnoho skrytých nebezpečí – vysoká hustota osob, tvorba kongescí, upadnutí jedince, protisměrné proudy, vliv samotného chování osob (sobecké chování, dravost, role vůdce, tvorba skupin atd.) a samozřejmě i jejich kombinace. Původcem vzniku takových nebezpečí může být nedostatečná příprava při davových akcích nebo jejich nedůsledná organizace. Proto studie dynamiky davu a jeho vnitřních mechanismů, jak při běžných situacích, tak při těch nouzových (při evakuaci), je velmi důležitá pro schopnost těmto mimořádným událostem předcházet.



Obr. 1.3: Schéma dynamiky davu a evakuace chodců se vztahy mezi jednotlivými fázemi (zdroj: vlastní, přepracováno z [144])

Mezi aktuální a detailní přehledové články, které shrnují nejdůležitější poznatky v rámci vývoje dynamiky pěších při nouzových i nenouzových situacích, patří práce Dong et al. [144], kde jsou rozebírána témata zabývající se zejména: sběrem dat, charakteristickými vlastnostmi a chováním osob ve vztahu k numerickému modelování dynamiky (viz obr. 1.3). Pro samotné pochopení dynamiky pěších je nutné primárně porozumění základním pilířům této problematiky, kterými jsou: tvorba základních diagramů (sběr dat), základní charakteristiky dynamiky pěších, chování chodců v davu, faktory ovlivňující volbu trasy, východu a vliv dynamiky na návrh a principy chování davu a jeho sebeorganizace. Tyto základní pilíře jsou blíže vysvětleny v odstavcích níže.

#### Tvorba základních diagramů dynamiky davu

Základní diagramy, popisující dynamiku pěších, vycházejí z experimentů a pozorování v terénu. Tato data popisují chování a vlastnosti chodců za různých podmínek – lokality pozorování (různé druhy zemí), druhy pohybu s vlivem směru a typu hranic (otevřený nebo uzavřený prostor), vzájemný vliv jednotlivých proměnných (hustoty na rychlost, průtoku na hustotu atd.). Příkladem nejaktuálnějších prací mohou být např. [371, 288, 492], mezi klasickou prací lze potom zařadit jednosměrný model z roku 1958 [208]. Dále jsou základní diagramy stanovovány pro konkrétní typy geometrií – „Single File Movement in Circle“ (vychází z tzv. 1D experimentů, které jsou náchylné na kulturní rozdíly) [495, 90], pro pohyb v koridoru (experimenty s různými šířkami koridorů, určuje se pro jednosměrné i obousměrné proudění [589, 307, 588, 316, 307], pro úzká místa (vliv šířky „úzkého hrdla“ na průtok, vliv počáteční hustoty na průtok, vliv složení davu na průtok) [494, 323, 486, 371], pro schody (vliv šířky

schodiště na průtok, vliv směru dolů/nahoru, vliv sklonu na průtok) [91, 73, 287] a další, např. křížení koridorů [587].

### **Základní charakteristiky dynamiky pěších**

Tyto charakteristiky získáváme i při experimentech demonstrujících extrémní situace – např. místa s vysokými hustotami a velmi úzká místa. V situacích a místech, kde by bylo užití lidských figurantů neetické či nebezpečné, jsou využívána zvířata (ovce, myši, mravenci, krysy) [332, 222, 185]. Tato praxe vychází také z předpokladu, že lidé mají základní zvířecí instinkt a při nouzových situacích je jejich jednání eliminováno na elementární vzorce chování (zachránit si život) jako u zvířat [223].

V rámci evakuačních (nouzových) experimentů jsou zkoumány zejména reálné vzorce chování – volba cesty a následování s ohledem na evakuační čas [222, 185], pozorování přechodu laminárního proudění davu do turbulentního nebo do jevu stop-and-go [216] a vliv rozložení (pozice) osob po prostoru [588]. V případě nenouzových experimentů se pak jedná zejména o shromažďování dat pro sestavování základních diagramů závislosti rychlosti a průtoku na hustotě [362, 193, 495], poznatků o samoorganizaci osob [247] a průchodu osob zúženými místy [215].

### **Chování chodců v davu**

Základním principem studií zabývajících se problematikou běžného chování chodců je možnost porozumět pohybovým mechanismům proudění osob za nenouzových i nouzových situací, jejich směřování, výběr trasy, jejich chování při určitých podmínkách (při změně geometrie, ovlivnění bočním proudem apod.) a jeho realistického zanesení do simulace.

- **Simulace běžného nenouzového chování chodce**

V rámci studií běžného proudění osob je možné pozorovat dvě základní skupiny jevů. První skupina se zabývá prouděním osob (různé směry a jejich kombinace) [255], vyhýbáním se kolizím [264, 449] a předbíháním v davu [580]. V rámci druhé skupiny je sledována samoorganizace davu, jako je tvorba pruhů [230, 344, 513], rušivý přechod [365, 568], oscilace v úzkých místech a ucpání úzkého hrdla [214, 573, 604] a stop-and-go vlny [366, 316]. Těmto jevům je blíže věnována kap. 1.2.1. Do modelů běžného provozu jsou pak často zaváděny i speciální vzorce vyhodnocující aktuální situaci za měnících se podmínek, jako je například výběr nejkratší fronty osobou, založený na principu vyhodnocení aktuální doby cestování [451], nebo výběr trasy s minimálními celkovými „náklady na chůzi“ k dosažení cíle [254].

- **Simulace chování osob při nouzové evakuaci**

Studie založené na experimentech dynamiky davu při nouzových situacích jsou velmi nákladné a v některých případech i nebezpečné (jak bylo zmiňováno již výše, např. při účincích požáru). Proto je pro tyto případy vhodné využití numerických simulací, které jsou schopny reálného ztvárnění a poskytnutí informací o evakuaci. Další výhodou simulací je možnost získání informací s předstihem, jako predikce dříve, než nastane mimořádná situace. Proto i s cílem zvýšení účinnosti evakuace davu dochází ke tvorbě modelů pohybu, na kterých můžeme pozorovat a analyzovat chování, charakteristiky evakuovaných osob, volby evakuačních strategií ve vztahu ke konkrétním scénářům. Za zmínku stojí zejména studie chování osob popisující výběr exitu [104, 546, 379], chováním davu při nouzových situacích [342, 333, 526] (a další chování – následování jedinců [314], asistence [466], vůdce [416], skupiny [418]), vliv hustoty a vznik kongescí [574, 167], či špatná viditelnost [497, 526].

### **Faktory ovlivňující volbu trasy nebo východu**

Již poznatky z roku 1982 [222] zavádějí teorii o výběru trasy a základních rozhodujících faktorech výběru – vzdálenost k nejbližšímu východu, složitost trasy – a je zde zmíněn i fakt, že se nejedná o jediné ovlivňující faktory. Tyto poznatky dále rozvádějí i práce [222, 226, 333],

kteřé byly následně doplněny o další faktory, jako jsou např. viditelnost východu, viditelné nebezpečí, vytíženost trasy [194], místní i globální zvyky apod. Důležité je zdůraznit i fakt, že během evakuace může docházet i k interakcím s okolními osobami, které vedou k následování jedinců/skupin (založeno na teorii her – blíže viz 4.1.2) [514, 226, 61].

### Vliv dynamiky chodců na návrh geometrie prostoru

V literatuře se objevují pro účely tvorby optimalizované geometrie únikových tras různé modely a techniky, založené na výsledcích výzkumu vycházejících z experimentů nebo simulací dynamiky davu při evakuaci. Tyto studie se zejména zabývají konfigurací koncepce tvaru koridorů [314], místností a tvorbou evakuačních plánů [2]. Dále je zkoumán vliv umístění a šířky východů na účinnost evakuace a vzdálenost dveří od stěny [400]. V [214] se uvádí, že dvoje dveře u stěny mají vyšší účinnost než dveře dvojnásobné šířky, naopak [342] uvádí, že změna šířky dveří nemusí vždy vést k proměnnému nárůstu průtoku osob dveřmi. Dále se diskutuje o výrazném vlivu překážek v rámci únikových cest [570, 167]. Příklad negativního vlivu překážek v podobě špatného návrhu geometrie, stojících skupinek osob uvádí [575] nebo naopak pozitivního vlivu – vložení naváděcích prvků se zmiňuje [525] nebo vložení usměrňovacích sloupek maximalizujících účinnost evakuace [253].

### Chování davu a jeho sebeorganizace

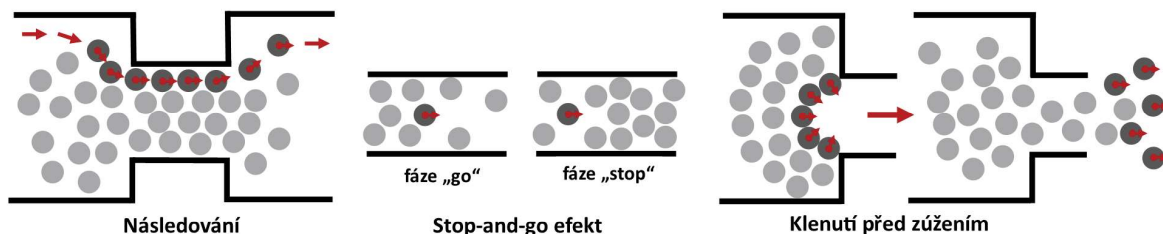
V rámci dynamiky davu lze sledovat celou řadu kolektivních jevů a sebeorganizace, které mohou sloužit jako měřítko k ověření správnosti pro jakýkoliv typ modelu – blíže také viz obr. 1.4. Problémem kolektivních jevů se zabývá např. i další ze současných přehledových článků [484], který popisuje principy a poznatky jednotlivých pozorovaných jevů v rámci dynamiky davu.

#### Zahlcení a kolize

Se zahlcením se setkáváme u protisměrných proudů se zvýšenou hustotou, kdy se chodci vzájemně blokují, nebo v místech se sníženou kapacitou. V praxi tomu může být např. u dveří, vstupu na schodiště, vstupu na eskalátory, vstupu do dopravního prostředku, zúžené místo překážkou v koridoru (studie úzkých míst) [184]. Toto téma dále rozvádějí práce [433, 364]. V článku [484] je zmiňována podobnost kongescí a kolizí v davech chodců s řadou částicových systémů. Dále [566] uvádí, že u úzkých míst je možné pozorovat tzv. klenutí, při němž dochází k stabilizační struktuře davu v důsledku třecích sil před vstupem do úzkého místa.

#### Hustotní vlivy → efekt stop-and-go

Jedná se o kvaziperiodické variace hustoty v prostoru a čase (tzv. „nestabilní hustotní vlny“), které jsou pozorovány nejčastěji u míst s velmi vysokým počtem osob, jak v reálných, tak i v experimentálních situacích [491, 493, 568]. Před stavem hustotních vln bývá tzv. stop-and-go jev, při kterém se v davu střídají fáze „go“ (fáze kdy osoby mají před sebou volný prostor → dav se uvádí do pohybu) a následně fáze „stop“ (fáze, kdy před osobami již není místo a jsou nuceny zastavit → postupné zpomalování až do bodu zastavení a následná kumulace lidí), blíže se tomuto jevu věnují práce [536, 430, 187].



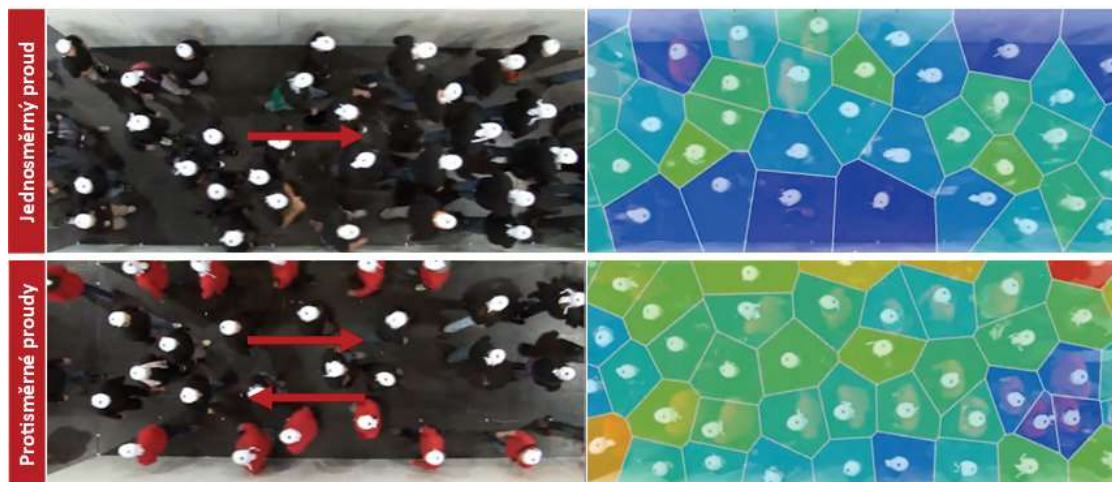
Obr. 1.4: Vybrané davové jevy – efekt následování, efekt stop-and-go a efekt klenutí (zdroj: vlastní)

#### Formování do pruhů

Dalším pozorovaným jevem je formování davu do pruhů, jež je na počátku zapříčiněno jedincem, který si ve směru chůze hledá cestu s nejmenším odporem a spontánně tohoto úsilí využívají i další jedinci v davu, kteří ho následují s cílem vyhnout se kolizím (→ vytvoření



pruhu za následováním). Je potřeba rozlišovat, jestli se jedná o jeden jednosměrný, nebo dva protisměrné proudy, jak je popsáno v [192, 288, 288, 383, 569], názorně na obr. 1.5. Dále výsledky z [154] ukazují, že obousměrný tok se stává nejstabilnější právě až ve fázi vytvoření pruhů, kdy se chodci pohybují laterálně, což umožňuje pochopit důvody, proč obousměrný tok je účinný při nízkých hustotách, ale při vysokých hustotách (pro dynamický pohyb kolem  $3,5 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ ) vede až zablokování (tzv. gridlock) [321, 589].



Obr. 1.5: Názorná ukázka rozdílu působení osob navzájem – v jednosměrném proudu (nahore) a protisměrném proudu (dole) (zdroj: upraveno a převzato z [166])

### Další skupinové jevy

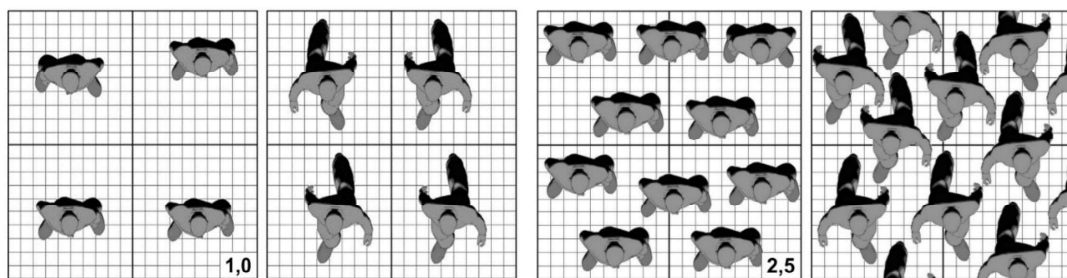
V rámci davu lze také sledovat tzv. zpětné kmitání, ke kterému dochází např. při střetu (dávání si přednosti) jedinců dvou protisměrných proudů v úzkém místě nebo v místech přetížení. Na principu tohoto jevu je možné detekovat lokalizaci přetížení davu v reálném čase, a to pomocí oscilační mapy, jako je tomu v práci [269]. Vybočení z trajektorie nebo drobná zacházka se záměrem zvýšení efektivity pohybu (např. kruhové předbíhání nebo dynamické obíhání), které jsou vykonávány s cílem plynulého pohybu či zkrácení času čekání, jsou také základními prvky dynamiky davu.

### Specifické jevy při nouzových situacích

Základní teorie kolektivního chování i při nouzových situacích byla definována Gustavem Le Bon již v roce 1895 v práci [310]. Autor v ní popisuje sociální psychologii davu, skupinové chování (chování skupiny jedinců je odlišné oproti chování izolovaného jedince) a další podněty, ze kterých vychází, nebo na ně navazují mnohé výzkumné práce dodnes [353, 489]. Kolektivní chování při nouzové situaci je často spojováno s potřebou přesunu do bezpečí, jejíž důsledkem je „panické chování“<sup>1</sup> (sobecké, asociální a iracionální chování), které se šíří celou skupinou a má velký vliv na celkový čas evakuace. V rámci prací [261, 467] zabývajících se zpětnou analýzou davových tragédií bylo upozorněno na fakt, že většina výše zmiňovaného chování nebyla vůbec pozorována, nebo neměla vliv na výsledek. Naopak často se ukázalo, že reálnou příčinou tragédie bylo poddimenzování geometrie únikových cest [89].

Vypovídajícím zdrojem o míře rizika a nebezpečnosti davů za extrémních situací mohou být např. práce G. K. Still [521, 522], ve kterých upozorňuje na riziko vzniku tragických událostí v místech s vysokou hustotou osob (pro statický dav cca  $5 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ , pro dynamický dav cca  $2,5 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$  – viz obr. 1.6) a s rostoucím stresem (ohrožení mimořádnou událostí – požár, útočník; nemožnost se pohnout).

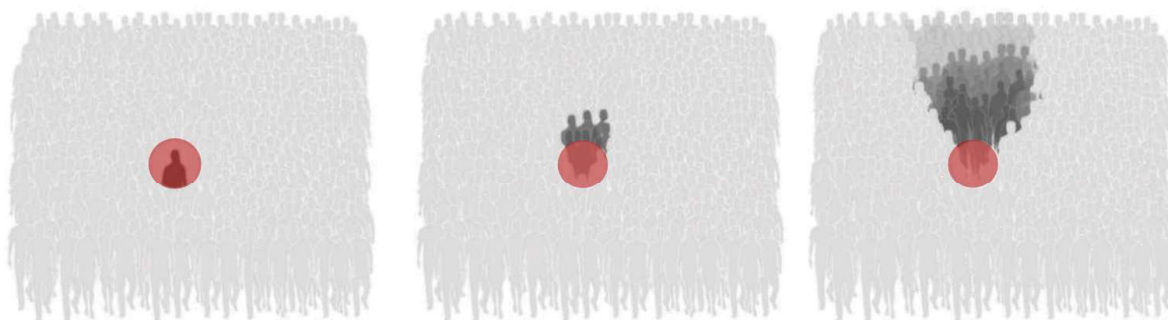
<sup>1</sup> Označení „panika, panické chování“ není zcela korektní pojem u krizových situací, jelikož není jednoznačně definován.



Obr. 1.6: Půdorysné srovnání statického a dynamického davu (zdroj: převzato z [522])

Při běžných situacích lidé v menších davech, či davech s nižší hustotou, mají možnost kognitivního chování – jsou schopni vnímat směr, informace, rozhodovat se a případně „volně“ se pohybovat. Naopak v případě davů s vysokou hustotou dochází k hromadnému pohybu, kdy si jednotlivci nemají možnost volně zvolit vlastní cestu (v tomto případě hovoříme, že se dav chová jako kapalina) a davem se šíří lokální fluktuace hustoty → enormně se navyšuje riziko vzniku krizové situace a jakýkoliv dostatečně silný impulz může přerůst v řetězový, nekontrolovatelný proces („davovou tragédií“) s fatálními následky. V souvislosti s tím jsou rozlišovány následující základní davové tragédie [522]:

- **Davová „panika“** – nesprávný termín, který není jednoznačně definován, vzniklý s potřebou pojmenovat stav mysli a specifické chování osob při krizových situacích. Mylně bývá o lidech v těchto situacích tvrzeno, že neuvažují, chovají se zmatečně, sobecky a že právě díky tomu jsou následkem ztráty na životech. Často tak bývá chybně uváděna jako prvotní příčina davové tragédie – studie uvedené výše toto tvrzení vyvracejí.
- **Tlačence** – jev, při kterém jsou osoby utlačeny nebo rozdrčeny okolním davem o pevnou překážku (např. mříž, stěna). Osoba je přitlačena vlivem vysoké hustoty davu k překážce, dochází k prudkému zvýšení tlaku na osobu, nastává komprese hrudního koše, osoba se nemůže nadechnout → fraktury kostí a následné usmrcení zraněním nebo udušením.
- **Davový kolaps** – jev, který nastává při překročení kritických hodnot hustoty a následné porušení rovnováhy vnitřních sil davu (obr. 1.7). Tlaky mezi jednotlivými osobami navzájem se v takovém davu zvyšují tak dlouho, až nastane jejich silová rovnováha, při které dochází např. k upadnutí osoby (vypadnutí článku). Následně tak dochází k uvolnění tlaku v tomto místě a okolní lidé začínají nekontrolovaně padat do vznikajícího prostoru, do doby kdy vnitřní tlak v davu nepoklesne pod kritickou hodnotu.



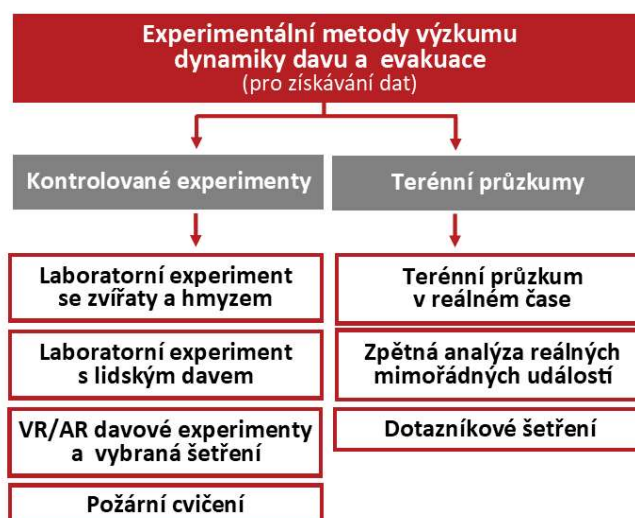
Obr. 1.7: Schéma narušení rovnováhy v davu s vysokou hustotou a následné propuknutí davového kolapsu (zdroj: upraveno a převzato z [522])

## 1.2.2 Aktuální metody

### Experimentální metody

Experimenty dělají se s cílem získání nových poznatků o jednotlivých aspektech, popisující pohyb osob/davu (jak při běžných – experimenty s lidmi, tak nouzových podmínkách – experimenty se zvířaty), anebo s cílem získat data jako vstupní hodnoty pro výpočty a numerické modelování. Jejich realizace je časově i finančně velice nákladná, a o to více jsou ceněny již realizované experimenty, které slouží k pochopení davové dynamiky nebo jako zdroj pro základní diagramy (kap. 1.2.1).

Základem experimentů je cílené pozorování (za různých okolních a okrajových) podmínek chování osob (např. reakce na spadlý předmět, dým, hlášení), interakcí, dávání přednosti (např. na eskalátorech, úzkých místech), tvorby a četnosti skupin, měřitelných charakteristik (rychlost, průtok a hustota), trajektorií, následování osob, davových jevů a samoorganizace apod. Stěžejní práce zabývající se experimenty sledující davové jevy byly již uvedeny v předchozí kap. 1.2.1.



**Obr. 1.8:** Dělení základních experimentálních metod pro výzkum a získávání dat o dynamice davu (zdroj: vlastní, přepracováno dle [101])

Mezi nejzákladnější řadíme následující dvě skupiny experimentů – experimenty v laboratorních podmínkách (kontrolovatelné experimenty) a pozorování v terénu (terénní průzkum), viz obr. 1.8.

- **Kontrolované experimenty**

Kontrolované experimenty slouží k získání měřitelných dat jednotlivců, pro jednoduché ověření principů fungování davu na izolovaných zadáních bez nepříznivých vnějších vlivů. Účastníci experimentu (dále figuranti) jsou do jisté míry informováni o základních instrukcích zkoušeného scénáře (např. figurant dostává obecné informace – „budete se nacházet v prostoru a vaším úkolem bude najít východ“, „budete ve vlaku a po zaznění signálu jej opusťte“, „budete chodit dokola a nesmíte předbíhat jedině před vámi“ atd.). Zde však lze spekulovat do jaké míry jsou konečné výsledky ovlivněny tímto předáním informací.

Kontrolované experimenty je možno dělit dále dle účelu:

- **Experimenty základní 1D** – figuranti chodí v předem vytyčeném koridoru (šířkou pro jednu osobu) kruhového nebo oválného tvaru a jsou instruováni základními pravidly. [495, 506, 344, 192]. → účel: získat základní veličiny davu bez vlivu okolních chodců.



- **Experimenty ztvárňující reálné situace** – provádějí se častěji a více se podobají reálným situacím (více osob, prostor pro individualitu, reálná geometrie, překážky, interakce atd. Figuranti se pohybují v konkrétní testovací geometrii a dle zadaného scénáře (směr chůze, cílový bod), [138]. Příkladem je práce K. Fridolfa [170], ve které uskutečnil celou sadu experimentů zabývajících se dynamikou davu při evakuaci v tunelu nebo přímo z vlakové soustavy. → účel: pozorování jednotlivých principů davu a vznikajících sociálních jevů, nebo k ověření konkrétních parametrů, variant geometrie či vlivu vnějšího působení (překážek, protiproudu, zúžení, atypické geometrie atd.).

- **Terénní průzkumy**

V současné době již nejsme odkázáni pouze na původní metody průzkumu v terénu (pozorování davu odborným pohledem nebo úseková či profilová měření), kterými jsme schopni získávat jen zlomek možných výstupů (rychlost jedince, počet osob, průtok profilem atd.).

S běžným užíváním kamer došlo i k nárůstu množství záznamového materiálu, zachycujícího situace běžného proudění a pohybu osob, davových situací, kolizí až po extrémní situace, jako jsou např. záznamy tragických událostí a evakuací. Spolu s vývojem techniky a vývojem zpracování obrazu je možno z videozáznamu na základě identifikace jednotlivých osob extrahovat data, jako jsou např. rychlosti osob, trajektorie osob, vzdálenosti osob mezi sebou, distance od překážek, směr, počet osob, vzorce chování, rozměry osob, pohlaví, střetnutí osob (kolize, setkání) a hustotu davu atd. (toto téma rozvedeno blíže viz G). Získaná data lze detailně analyzovat a v případě potřeby doplnění některého z měřitelných parametrů extrakci opakovat. Velkou výhodou je také možnost opětovného přehrávání (rekapitulace scény, vizuální analýza a pozorování). Technologie mohou být využívány i v reálném čase k získávání dat, jako predikce nebezpečí – rozpoznání obličeje nebezpečné osoby, upozornění na neobvyčejné chování, blokování východu či kritickou hustotu [511, 510, 354].

## Analytické metody

Analytické metody aplikují zjednodušené výpočtové postupy, využívající základní empirické, semi-empirické či teoretické vztahy, tabelární hodnoty, obecné okrajové a počáteční podmínky. Výpočty lze provést ručně, prostřednictvím jednoduchého tabulkového procesoru, nebo přímým hodnocením (z tabulek). Výpočetní postupy vycházejí ze zkušeností, základních fyzikálních principů a studií, zabývajících se rychlostí pohybu, hustotou davu, tělesnými rozměry, průtokem, kapacitou a vztahem mezi těmito proměnnými, jak je popsáno v těchto základních zdrojích [435, 173, 409, 114]. Zjednodušené výpočetní postupy pro odpovídající charakteristiky jsou zakotveny v požárním kodexu ČSN 73 08XX (o vývoji normového přístupu viz příl. A a popsání principů v kap. 1.3.1). Příkladem může být empirický vztah doby evakuace sestavený v roce 1955 v práci K. Togawa [534], který se stal podkladem i pro základní vztah doby evakuace uváděný v českých technických normách. Řešením jsou analytická vyjádření vybraných základních evakuačních a požárních procesů podle ČSN 73 08XX, konkrétně se jedná o výpočty – mezní délka ÚC, šířka ÚC, doba zakouření a předpokládaná doba evakuace (uvedeno blíže viz kap. 4.1.1).

## Numerické metody

Numerické metody jsou komplexním postupem k řešení numerických problémů, které využíváme zejména v případech, kdy užití analytického přístupu je příliš komplikované nebo zcela nemožné (např. výpočetně náročné, mnoho proměnných, obsáhnutí behaviorálního aspektu apod.). V oblasti evakuace osob jsou používány nejčastěji numerické modely pohybu osob,

kterých je celá řada a využívají odlišných principů a matematických metod [297]. Takové numerické modely jsou abstraktním matematickým popisem základních principů pohybu osob, vstupních charakteristik a stávajících nebo nově vznikajících procesů evakuace, které jsou popisovány v jednotlivých krocích pomocí matematických algoritmů.

Mezi nejpokrokovější využívané numerické modely pro simulaci evakuace osob a šíření požáru řadíme ty: nejčastěji založené na MKP (MKO) [542], modelování dynamiky tekutin (CFD) [234], celulárních automatech [578, 231, 320, 74], modelech sociálních sil [217] a agentních technologiích [458, 500, 93]. Modely pro simulaci evakuace osob jsou tvořeny tak, aby věrohodně odrazily specifickou povahu krizových scénářů, zejména kolektivního chování [203], výskytu jevů chůze během evakuace (tvorba pruhů, oscilace v úzkých místech) [214] speciálního chování evakuovaných (znalost prostoru, reakce na prostředí, vazby osob) [539, 262] a specifických vlastností cestujícího (osoby s omezenou schopností pohybu, dítěte) [100]. Některé řady nástrojů již umožňují i spřažené simulace (např. FDS+Evac [284], buildingEXODUS + SMARTFIRE [178]), částečně spřaženou simulaci nebo je možné do modelu evakuace alespoň importovat výsledná data simulace požáru (Pyrosim + Pathfinder [561]), díky čemuž lze vyhodnocovat přímý dopad požáru na evakuované osoby (např. postupný vývoj požáru, jeho teplotního pole a zakouření prostor). Spřažené simulace je možné užít i pro zpětnou expertízu nebo pro forenzní analýzu požáru (např. nočního klubu [560], střelnice v Pusan [183]). Detailní dělení modelů a nastínění jejich principů jsou dále rozvedena v kap. 1.3.3, kde jsou současně diskutovány i vztahy norem a legislativy k aktuálním možnostem využití tohoto numerického přístupu při posouzení požární bezpečnosti.

V posledních několika desetiletích došlo z masivnímu vývoji numerického modelování, díky kterému je v dnešní době k dispozici více než sedmdesát dostupných modelů pohybu osob specializovaných na modelů evakuaci osob a šíření požáru [337]. Mezi komerčně dostupné SW nástroje patří – WAYOUT [561] (modely hydraulické); FDS+EVAC [284], Simulex [505] (modely částečně behaviorální); PathFinder [406], ESCAPES [539], Legion [313] (realistické ztvárnění chování za pomocí strojového učení), STEPS [519], Exodus [178] (modely behaviorální) a mnoho dalších [297]. K dispozici jsou i další volně přístupné nástroje (např. Repast software [460]), u kterých jsou ale omezené možnosti modelování. Naopak tomu je u tzv. open source licencí, které umožňují uživateli úpravu zdrojového kódu za účelem přizpůsobení, což je uživatelsky nejvýhodnější, ale zároveň i nejnáročnější (např. VADARE [544]). Samotný směr vývoje modelů je často stanovován uživateli v přímé komunikaci s vývojáři nebo dotazníkovým online průzkumem, který pravidelně provádí Ronchi et al. (počet zúčastněných byl 234 uživatelů z 41 zemí světa) [472, 470, 337].

Přestože se numerické metody staly v podstatě součástí běžných procesů a jsou využívány i v jiných oborech, jejich výstupy jsou stále vyvraceny nebo zpochybňovány. Často jsou kladeny i přísnější standardy na průkaznost výsledků, zejména pokud se jedná o aplikace sloužící k předpovědi kontroverzních témat, jako je např. stanovení míry nebezpečí, ohrožení osob, ztrát na životech atd. I z tohoto důvodu je nutné si uvědomit, že právě numerické modely jsou omezeny nejistotami a neurčitostí (vstupních parametrů, okrajových podmínek, interpretací uživatele apod.), které je nutno kontrolovat nebo tuto skutečnost alespoň odborně zohlednit [482]. V rámci modelu je třeba předem odhadnout a implementovat návrhové scénáře (viz kap. 5.1.1). V nich je nutno obsáhnout základní pravidla (provoz, parametry osoby, základní geometrie), interní nastavení modelů (aktualizace [507], krok, síť), zohlednit i další možné proměnné (individuální chování osob, rozhodování, kooperativní chování), což při rychlosti změn a vývoji ve světě spolu s nejistotou vstupních dat není pokaždé snadné [97, 240]. Pro tyto účely byla zavedena, jako jeden ze základních standardů pro hodnocení míry spolehlivosti modelů (výsledků/aplikovaných řešení) tzv. citlivostní analýza [482, 474] užívaná i v kap. 5. Při samotném výběru nástroje a jeho vhodnosti užití pro danou úlohu je nutné, aby byl uživatel detailně obeznámen s jeho vlastnostmi, především s mírou přiblížení se realitě. Mezi

nejzákladnější faktory pro výběr řadíme ztvárnění pohybu a zkoumané měřítko, dle čehož rozlišujeme následující tři skupiny modelů:

- **Modely makroskopické**

Makroskopické modely nepracují s osobami jako s jednotlivci, ale spíše na ně nahlíží jako na celek (kontinuum) – mají malou úroveň detailu. Pohyb je v tomto modelu popisován spíše v globálním měřítku, model minimalizuje proměnné a parametry a zaměřuje se hlavně na celkový výkon, zejména tok chodců, aktuální obsazenost, kapacitu nebo charakteristickou rychlost. Chování davu je ztvárněno spíše jako neadaptivní, dochází ke vzniku kolektivních jevů vlivem vystalých situací či mimořádných událostí. Hlavní výhodou je, že zmiňovanými zjednodušeními modely snižují výpočetní složitost, i když jsou založeny na komplikovaných a obtížně řešitelných diferenciálních rovnicích, které jsou náročné jak na implementaci do simulačních nástrojů, tak i na samotné matematické řešení, což umožňuje dokonce i simulaci evakuace v reálném čase, jak je demonstrováno v práci [243]. Příkladem může být Jiang et al. [254], ve své práci využil makroskopický model dynamiky davu vyššího řádu odvozený z dynamiky tekutin, výsledná data ztvárňující celkový tok davu, kde je pracováno s lokálně sdruženými hodnotami, charakterizujícími celé skupiny osob – např. hustotou, směrovým vektorem a rychlostí (→ velmi hrubý detail). Makroskopické modely jsou užity i v pracích např. pro optimalizaci dopravy při evakuaci [54], jako model šíření kouře při evakuaci [345] a pro simulaci chování davu při úniku toxických látek [268].

- **Modely mezoskopické**

Mezoskopické modely jsou hybridním řešením mezi makroskopickými a mikroskopickými modely. Chodci v modelu jsou rozděleni do skupin a jsou jim přiděleny společné charakteristické rysy, jako je stejná rychlost, cíl cesty, reakční doba či trasa pohybu. Mezoskopické modely ve velké části případů potlačují individualitu osob a interakce, což poskytuje kompromis zajišťující výkon bez ztráty hlavních informací o chodcích. Příkladem může být práce Teknomo a Gerilla [528], která využívá zmíněných principů ke ztvárnění modelu multiagentní peší simulace na mezoskopické úrovni detailů – přístup využívající multiagentní rámec, kde jsou agenti modelováni na mřížkové síti a jsou schopni ovládat své vlastní načasování pro opuštění buňky. Práce Shi et al. [503] využívá mezoskopický model pro zjednodušení mikroskopického modelu pohybu osob korelovaný s hustotou a rychlostí. Další příklady využití mezoskopických modelů pro ztvárnění evakuačních procesů jsou uvedeny v [308, 501, 49].

- **Modely mikroskopické**

Mikroskopické modely ztvárňují každého chodce jako jedince s individuálními parametry, které určují jejich vlastní dynamiku pohybu (rychlost, zrychlení, distance od překážky, dravost, trajektorie atd.). Zaměřují se na chování jednotlivců (jednání a rozhodování jednotlivců v davu je odlišné, než když jsou sami nebo v malé skupině), sociální interakce mezi nimi navzájem i mezi nimi a prostředím (vyhnutí se překážce, kolize, předjíždění, držení si odstupů) s cílem zabránit nebezpečí při davových situacích (evakuacích) – skrze tyto vlastnosti byly vyhodnoceny jako nejhodnotnější pro účely posouzení PBR a jsou využívány i v této práci. Mikroskopické modely jsou nejvíce využívanou skupinou pro simulaci evakuace osob, a to z důvodu jejich realistického a detailního popisu jedinců v situaci. Proto také v tomto směru jsou modely vyvíjeny a obohacovány o nové prvky a algoritmy. Příkladem mohou být algoritmy interpretující podobnost mezi dynamikou biologických procesů a dynamikou davu při evakuačních procesech, jako je například SI (= Swarm intelligence, „intelligence rojů“) [340, 599], díky kterému je možné lépe simulovat chování davu při evakuaci. Podobné algoritmy aplikoval i Hajjem et al. [204], který navrhl systém plánování evakuace založený na ACO (= Ant Colony Optimization, „optimalizace mravenčí kolonií“), jenž umožňuje tvorbu účinnějších a flexibilnějších evakuačních plánů. Dále také tým Yang et al. [571] rozšířil

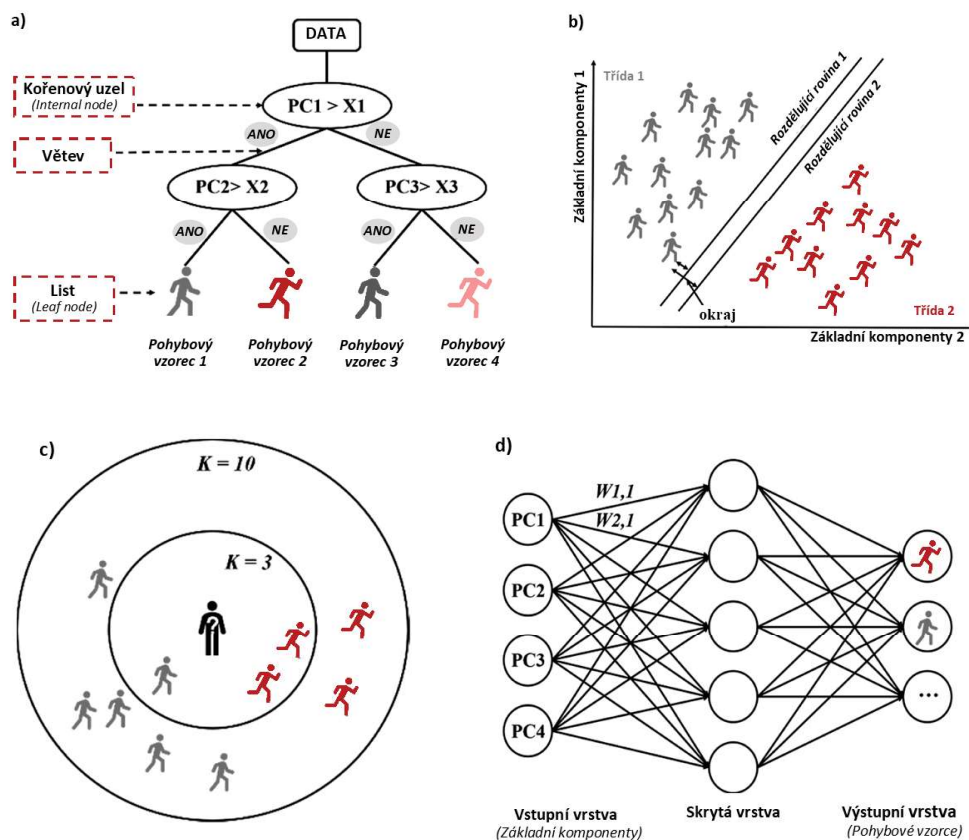
model o metodu vícenásobného rozlišení, umožňující nový způsob simulace dynamiky davu, k čemuž využil model založený na rámci multi-agenta a modifikovaném algoritmu PSO (= Particle swarm optimization), „optimalizace částicového roje“. Mikroskopické modely byly užity také k odhadu deformačních sil u hustého davu [251] a pro simulaci chování osob při evakuaci z venkovního veřejného prostoru [329].

### 1.2.3 Nové technologie

V rámci výzkumu dynamiky davu a jejich principů fungování se setkáváme čím dál častěji s přístupy založenými na využití nových technologií, jako jsou: strojové učení, strojové vidění, BIM technologie a virtuální realita. Tyto technologie bývají využívány zejména k sestavování podkladů pro vylepšení interpretace reality v numerických modelech, získávání dat a poznatků o davové dynamice, predikci kritických událostí a řízení davu, výpočtu v reálném čase, k ověřování či jako výukový nástroj. V následujících odstavcích budou představeny jednotlivé technologie a uvedeny příklady jejich využití v rámci dynamiky davu a numerického modelování.

#### Strojové učení (Machine learning, ML)

Jedná se o algoritmy a techniky, které umožňují systému „učit se“ pravidla, která jsou následně užívána ke zlepšení pohybů chodců, a tedy i efektivněji reagovat na změny vznikající v okolním modelovém prostředí. Strojové učení není pouze jednou metodou neuronových sítí, jak bývá někdy mylně myšleno, ale je zastoupeno celou řadou výpočetních metod, např. rozhodovací stromy (DT = Decision Tree) [50], metoda podpůrných vektorů (SVM = Support Vector Machine) [115], algoritmus K-nejbližších sousedů (KNN = K-Nearest Neighbor) [322], umělé neuronové sítě (ANN = Artificial Neural Network) [577] apod, viz 1.9. Každá z metod ML vykazuje odlišné vlastnosti a výhody v různých aspektech.



**Obr. 1.9:** Vybrané příklady metod strojového učení – a) metoda rozhodovací strom; b) metoda podpůrných vektorů; c) algoritmus K-nejbližších sousedů; d) umělé neuronové sítě (zdroj: vlastní, přepracováno dle [559])

Příkladem užití v tomto směru může být práce Liu et al. [326], kde bylo provedeno vylepšení základního modelu sociálních sil pomocí metody strojového učení s cílem vylepšit funkci sociální síly ( $\rightarrow$  schopnost chodců se učit a interpretace kognitivních funkcí). Výsledky této práce ukázaly, že aplikací nové metody došlo ke zlepšení simulace osob vyhýbajících se překážkám i optimalizaci evakuačního času.

Dalším příkladem může být zavedení metod strojového učení ke studiu dynamiky pohybu osob ze záznamu experimentu nouzové evakuace, kterým se zabývá práce Wang et al [559]. Pohybové vzorce v této práci byly kategorizovány pomocí dvoustupňové klastrové analýzy a hlavní ovlivňující faktory byly identifikovány pomocí analýzy hlavních komponent. Následně byly zkoumány pomocí různých metod strojového učení, kde výsledkem bylo porovnání přesnosti predikce jednotlivých metod ve srovnání s tradičními metodami MLM (Multinomial Logit Model). Ukázalo se, že u složitějších scénářů dochází ke znatelnému zlepšení přesnosti predikce oproti metodě MLM, což dokazuje proveditelnost analýzy dynamiky pohybu pomocí metod ML.

Yuks et al. ve své práci [581] zlepšil pomocí ML chování agentů v modelu pohybu osob, konkrétně užití umělých neuronových sítí (ANN) a genetických algoritmů (GA). Pomocí nich byla určena nejvhodnější fitness-hodnotící funkce, která umožnila změnu učení agentů s cílem zlepšit jejich chování v simulačním prostředí, jako je např. efektivní lokomoce, vyhýbání se překážkám, pohyb směrem k viditelným cílům a vzájemná komunikace.

Zhang et al. zase využil konvoluční neuronovou síť (CNN) s cílem získání konečného počtu lidí v davu na konkrétní ploše. Vstupní data byla ve formě obrazu, kde byli lidé detekováni na základě velikosti hlavy a jejich počtu. Výstupem byla mapa místních hustot (počet lidí na metr čtvereční) [590].

V práci Torrens et al. [537] bylo využito KNN za účelem automatického odvozování nových schémat pro realistické a kvantitativně věrohodné pohybového chování agentních modelů. Jako vstupní data byly využity kombinace zaznamenaných GPS trajektorie z vycházkových tras v Salt Lake City a Jokohamě a sledovaných (skicovaných) dat o pohybu předškolních dětí v interiéru budovy. Finálně dochází ke kombinaci vzorků pohybu z reálného světa ve spojení se synteticky generovaným pohybem agentů.

Práce Mustapha et al. [369] využívá ML k predikci davových událostí na základě odhadu toku – pomocí senzorů FBG (měří průměrné mechanické napětí), WiFi signálů z mobilních telefonů a kombinací metod CNN a SVM.

Jako reakce na chybějící možnost numerických simulací provádět analýzu evakuace v reálném čase navrhuje práce Peng et al. [419] přístup dynamického plánování evakuačních cest v rozsáhlých veřejných budovách. Přístup je založený na neuronových sítích. Vychází ze zjednodušeného modelu evakuace a dynamického algoritmu trénovaného na tréninkové sadě dat z reálné veřejné budovy. Výsledky ověřovacích testů ukázaly, že navrhovaný přístup je až desetkrát rychlejší než dostupné nástroje založené na vyhledávacích algoritmech.

### **Strojové vidění (Machine vision, MV /Computer vision, CV)**

Jedná se o získání, zpracování, analýzu obrazových informací s využitím počítačové techniky. Objektem počítačového vidění může být prakticky cokoliv a pomocí těchto metod lze získat různé informace z videozáznamů – identifikace lidské tváře nebo chůze, hustotu davu, výskyt činností předcházející davovým jevům, extrakce charakteristik davu nebo jednotlivců (rychlosti, trajektorie v čase, vzdálenosti mezi osobami, zrychlení atd.) a další.

Praktickým příkladem užití pro zkoumání dynamiky davu může být článek Liu et al. [327], kde využívají MV pro extrakci dat z videa (charakteristiky osob). Podobný postup extrakce je využit i v této práci v Příloze G – kap. G. Dalším příkladem může být použití strojového vidění k dohledu nad davovými situacemi a prevencí vzniku negativních davových jevů, která vychází z analýz algoritmů CV předešlých davových tragédií [576]. Kahn et al. [270] zase ve své práci představuje sadu nástrojů pro počítačové vidění, kterou vyvinuli nejen pro účel

inicializace simulačních modelů, ale také jako možnost validace výsledků simulace. Podobně tomu je i v práci Botles et al., CV užívá k automatické extrakci trajektorií se záznamu experimentu „T-křižovatky“ a následně i k ověření a analýze mikroskopických modelů [59]. V práci Musse et al. je využito strojové vidění pro zdokonalení pohybu virtuálních agentů s cílem zlepšit realističnost simulace běžných životních situací [367].

Stejně jako v případě numerických simulací se samotná přesnost CV i ML odvíjí od kvality a původu vstupních dat (získané pozorování, GPS, vzorkování videa). Data jsou využívána jako tréninková množina a následně jako ověřovací množina (jiná sada dat) pro vyzkoušení funkčnosti algoritmu (v případně nekvalitních dat na začátku získáváme i nekvalitní výsledky). Využití umělé inteligence (strojového učení) a CV pro evakuační modely, pohyb osob či zpracování videozáznamů skýtá obrovský potenciál pro další posun v tomto směru výzkumu.

### Využití BIM pro účely PBŘ

Informační model budovy (Building Information Modeling = BIM) je geometrický model uchováající databázi informací a charakteristik o stavbě a jejích jednotlivých prvcích. Nejedná se pouze o 3D model, jak bývá mylně interpretováno, ale zejména o informace vztahující se k jednotlivým prvkům stavby, které je možno využívat v průběhu celé životnosti stavby. Během návrhu lze vytvořit projektovou dokumentaci s rozmístěním jednotlivých požárně bezpečnostních zařízení se všemi potřebnými informacemi (typ, počet, umístění, expirace atd.), která mohou být následně využita pro jednotlivé etapy budovy – návrhová (výkazy počtu), užívání (kontrola revizí PBZ), provozní (zásah IZS dle importovaných dat v GIS, informace o rozmístění hydrantů, hasicích přístrojů, uzávěrů plynu atd.).

Za účelem výpočtu PBŘ jsou vyvíjeny pro BIM doplňky, jako je např. BIMFIRE [53] (aplikace pro nástroj Revit), který empiricky dle předpisů [norma] stanovuje hodnoty pro stupeň požární bezpečnosti (dle druhu objektu), požární zatížení (dle účelu místnosti), odstupové vzdálenosti (dle požárního zatížení a velikosti otvoru), PO požárně dělících konstrukcí, evakuaci osob (obsazenost objektu je stanovena dle skladby místností a následně jsou posuzovány mezní délky a šířky únikových cest) v rámci interakce s informačním modelem. Doplněk je ve formě šablony, jejíž součástí jsou implementované skripty a komponenty, které provádějí výpočty PBŘ z dostupných hodnot v informačním modelu. Hlavní výhodou této formy zpracování je propojení projektu PBŘ s originálním souborem, kde lze provádět změny, které jsou automaticky zaneseny i do tohoto projektu, a výpočet lze provést opakovaně.

Pro účely numerického modelování je BIM užíván spíše jako podklad pro tvorbu geometrie objektu [93] a v konečné fázi jako podklad pro vizuální výstupy simulací (hmota budovy, věrohodná reprodukce 3D objektu), případně i ve formě VR. Přesto je z výsledků dotazníkového průzkumu [337] zřejmé, že by uživatelé uvítali větší interakce modelů evakuace osob s BIM. Respondenti uvádějí zejména potřebu automatické tvorby geometrie budovy pro model s cílem ušetření času, možnost zahrnout do informací BIM i údaje o obsazenosti a typu osob. Dále řada respondentů zmiňuje potřebu integrované schopnosti automatického provádění ručních výpočtů, či přání provádět modelování evakuace chodců přímo v nástroji BIM, což je považováno za ne úplně vhodné řešení z hlediska výpočetní náročnosti a funkční odlišnosti nástroje (vhodnější se jeví volit nástroj jako doplněk nebo nástavbu). Nově vyvinuté informační technologie, jako je Building Information Modeling (BIM), virtuální realita (Virtual Reality, VR), rozšířená realita (Augmented Reality, AR) apod. neslouží k samotnému posouzení evakuace z pohledu požární bezpečnosti, ale mají schopnosti integrace a spolupráce dat jako konzistentní vizuální prezentace, které přispívají k lepšímu pochopení návrhu, k bezpečnostní výchově i k zpětné vizualizaci nehod v rámci expertíz.

### Virtuální realita (Virtual reality, VR)

Virtuální realita je technologie umožňující uživateli ocitnout se v simulovaném 3D prostředí, interagovat s ním, reagovat na podněty a získávat zpětnou vazbu v reálném čase. VR díky

pokrokům technologií a často využívaných herních enginů umožňuje vytvořit skutečně věrohodnou iluzi reálné situace s pohlcujícím prožitkem uživatele. VR technologie jsou v dnešní době široce využívaným nástrojem nejen v oboru bezpečnosti a evakuace osob [65, 65].

VR technologie jsou v rámci bezpečnostního výzkumu v první řadě využívány zejména pro studie zabývající se lidským chováním – příkladem může být práce D. Snopkové et al. [508], kde je VR využíváno pro simulovaný experiment zaměřující se na chování osob při evakuaci, kde jsou vyhodnocovány jejich orientační schopnosti, využití orientačního plánu a evakuačního značení pro volbu výsledné evakuační trasy. Virtuální prostředí poskytuje experimentům maximální možnou míru kontroly, snadno se replikují a umožňují bezpečné studium chování a rozhodování osob ve scénářích, které by jinak byly příliš nebezpečné. VR má schopnost vytvářet věrohodné stresující prostředí, jako je vytvoření krizových scénářů (útok útočnicka, požár budovy, evakuace apod.), které je užíváno k vyvolání různých mentálních a behaviorálních reakcí u osob, podobně jak by tomu bylo při jejich skutečném ohrožení [603]. Příkladem může být příspěvek L. Cao et al. [81], který se pomocí VR simulací zabývá vlivem stresu při vzniku požáru na osoby a jejich prostorovou orientaci, znalosti vnitřní dispozice budovy a schopnost se evakuovat. Na základě VR studií jsou získávány nové experimentální poznatky o chování lidí při hledání cesty [532], jejich reakční době, nápomocné chování lidí při evakuaci [181], chování při ohrožení ohněm [81], chování před evakuací (např. při útoku střelce) [60], vlivu genderu na chování osob při evakuaci [85], sociálních faktorech při evakuaci [274], vlivu faktorů prostředí (např. značení [147], přítomnost kouře [564]) apod., které jsou využívány ke zvýšení efektivnosti evakuace (ověřování konkrétních řešení a jejich kombinací), ale i pro vylepšování chování osob evakuačních modelů.

V druhé řadě je VR užíváno pro edukaci a výcvik zaměstnanců firem či pracovníků IZS na krizové situace. Výuka se zaměřuje na trénink evakuace z budovy, rozpoznání nebezpečí a osvojení si konkrétních záchranných/evakuačních procesů. Výcviky pro zaměstnance mají nahradit např. tzv. požární cvičení, která jsou značně časově náročná, nedokáží reflektovat reálné nebezpečí a často jsou s nimi spojeny náklady na přerušení běžných provozních činností (provoz, výroba, práce zaměstnanců apod.) [7, 201, 156]. Příkladem může být studie K. Andersen et al. [7], která se věnuje simulovanému tréninku evakuace horníků z dolu v rámci školení BOZP v těžební společnosti MENS. Dle průzkumů [96, 334] má výuka pomocí VR větší dopad na uchování nabytých znalostí účastníků než tradiční přístupy díky možnosti si danou situaci moci prožít, vyzkoušet si ji řešit a získat případnou zpětnou vazbu se správným řešením. Jednotlivé technologie VR, jejich principy a využití pro zvýšení bezpečnosti jsou blíže rozvedeny v této práci v Příloze G.

### 1.3 Současná praxe požárně bezpečnostního posouzení

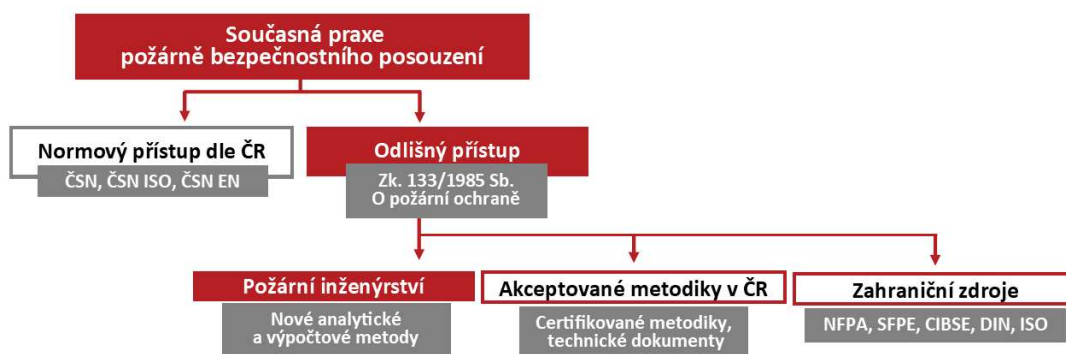
Požárně bezpečnostní řešení stanovuje kompaktní souhrn požadavků a podmínek, které jsou závazné a musí být zohledněny již v návrhové fázi projektu, a to jak v jeho stavební, tak i v technologické části.

Oblast navrhování staveb je velmi široká a zahrnuje rozličné přístupy k návrhu, zohledňující jak požadavky investora, tak i požadavky stávajících předpisů pro projektovou činnost.

V současné době je využíváno pro účely PBS a PBR následujících dvou základních návrhových přístupů (obr. 1.10), a to:

- **Normového přístupu** – požárně bezpečnostní řešení je navrhováno pouze na základě souboru požárního kodexu ČSN 73 08XX, kde jsou předepsané obecné postupy a požadavky na požární bezpečnost staveb, které jsou stanovovány na základě tabulkových či zjednodušených výpočtových metod. Tento přístup může být doplněn případně o schválené výpočtové postupy, např. z Eurokódů.





Obr. 1.10: Schéma přístupů k požárně bezpečnostnímu posouzení a jejich vzájemné vztahy (zdroj: vlastní, přepracováno z [304])

- **Odlišného přístupu** – požárně bezpečnostní řešení je navrhováno na základě výsledků kvalitativních a kvantitativních analýz na základě zahraničních technických standardů (blíže viz kap. 1.3.2), metodických postupů akceptovaných v tuzemsku [304] (blíže viz Příloha B) nebo tzv. požárního inženýrství. Definice požárního inženýrství a jeho možnost zavedení je uvedena v kap. 1.3.2. Podpůrnými prostředky pro pochopení a správnou aplikaci mohou být certifikované metodiky [136, 21, 135, 205].

### 1.3.1 Normový přístup

Postup podle českých technických norem, konkrétně na základě požárního kodexu ČSN 73 08XX, stanovuje technické podmínky požární ochrany pro navrhování, provádění a užívání běžných staveb na základě přesně definovaných postupů, empirických vztahů a tabulárních hodnot. Samotný vznik a historický vývoj normového přístupu ČSN 73 08XX v ČR je blíže nastíněn v Příloze A. Technické normy nejsou obecně závazné, přesto podle výlučného odkazu na přílohu vyhl. Ministerstva vnitra č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb (ve znění vyhlášky č. 268/2011 Sb.), se stal požární kodex spolu s dalšími návaznými normami součástí závazného právního předpisu a jeho užívání je povinné.

Další související právní předpisy jsou:

- zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně, ve znění pozdějších předpisů,
- zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů,
- vyhláška Ministerstva vnitra č. 246/2001 Sb., o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci), ve znění vyhlášky č. 221/2014 Sb.,
- zákon č. 415/2021 Sb., kterým se mění zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně, ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů,
- vyhláška Ministerstva vnitra č. 460/2021 Sb., o kategorizaci staveb z hlediska požární bezpečnosti a ochrany obyvatelstva.

Aktuální rozsah zpracování a obsahu PBR (náležitosti projektové dokumentace a jejího posouzení) definuje konkrétně vyhl. č. 246/2001 Sb., podle § 41 z pohledu zpracovatele a podle § 46 odst. 1 písm. b) z pohledu stavební prevence, který zahrnuje následující:

- možnost bezpečné evakuace osob, zvířat a majetku z hořící nebo požárem ohrožené stavby nebo její části do volného prostoru nebo do jiné požárem neohrožené části stavby,
- zachování stability a nosnosti konstrukcí po stanovenou dobu,
- rozdělení stavby do požárních úseků, stanovení jejich velikosti, zabránění možnosti šíření požáru a jeho zplodin mezi jednotlivými požárními úseky uvnitř stavby, zabránění možnosti šíření požáru na sousední objekty,



- posouzení zda navržené stavební hmoty odpovídají stanoveným požadavkům (stupeň hořlavosti, odkapávání v podmínkách požáru, rychlost šíření plamene po povrchu apod.),
- určení způsobu zabezpečení stavby požární vodou, popřípadě jinými hasebními látkami, věcnými prostředky požární ochrany a požárně bezpečnostními zařízeními,
- vymezení zásahových cest, příjezdových komunikací, popřípadě nástupních ploch pro požární techniku,
- opatření k zajištění bezpečnosti osob provádějících hašení požáru a záchranné práce,
- navržení technických, popřípadě technologických zařízení stavby (rozvodná potrubí, vzduchotechnická zařízení, vytápění apod.) z hlediska požadavků požární bezpečnosti, popřípadě stanovení zvláštních požadavků na zvýšení požární odolnosti stavebních konstrukcí nebo snížení hořlavosti stavebních hmot,
- rozsah a způsob umístění výstražných a bezpečnostních značek a tabulek.

Pro navrhování požární bezpečnosti, které nelze při PBŘ celistvě obsáhnout požárním kodexem (tzv. specifických staveb), lze doplnit po dohodě s GŘ HZS tyto normy o interní směrnici, jako je zavedena např. pro účely posouzení pražského metra – interní směrnice DPP „22-2012-01: *Zásady požární ochrany pro projektování a výstavbu pražského metra*“. V případech, kdy nebudou podmínky pro výstavbu umožňovat naplnění jeho požadavků, musí být navrhovaná řešení (projektová dokumentace) mimořádně projednána a schválena HZS. Zápis o projednání a písemné schválení musí být doložen k dokumentaci.

Požární kodex ani speciální směrnice často nejsou novelizovány v pravidelných intervalech, a nejsou zde tedy zahrnuty reakce na výrazný posun ve vývoji nových technologií, provozu (např. automatický provoz metra, nové materiály, elektromobily, zvýšená koncentrace lidí apod.) a nových dostupných bezpečnostních opatření. Nově je diskutována potřeba zařazení i tématu rizika teroristického napadení stavby se zvýšeným rizikem útoku na tzv. měkký cíl. V návaznosti na tyto skutečnosti (témata a nové poznatky vývoje) by měly být zohledněny v požadavcích na zajišťování bezpečnosti osob jak v při evakuaci osob, tak i zásahu HZS a IZS v nouzových situacích.

### 1.3.2 Odlišný přístup

Odlišným přístupem (případně i tzv. rozšířený přístup) při posuzování staveb se rozumí dle § 99 zákona č. 133/1985 Sb., o požární ochraně [524] to, že „*autorizovaná osoba může při návrhu PBŘ použít postup odlišný od postupu, který stanoví česká technická norma nebo jiný technický dokument upravující podmínky požární ochrany*“. Jinými dokumenty jsou myšleny [550, 552], které upřesňují nároky na zpracování požárně bezpečnostního řešení tímto přístupem. „Rozšířený přístup“ řešení požární bezpečnosti a postupu odlišného od klasického normativního vychází primárně ze souboru norem ČSN 73 08XX, kde je hlavní zmínka v ČSN 73 0802, článku 5.1.3 a Příloze I, kdy se připouští možnost vypracování PBŘ pomocí tzv. inženýrského přístupu. Další zmínky můžeme najít i v článcích 6.6.10, 6.6.12, 8.4.6, 9.1.1.1.

Využití tohoto přístupu je blíže popsáno ve zdroji [123], článek 5.1.3. říká, že: „*U stavebních objektů vyšších než 60,0 m u stavebních objektů, kde je soustředěn velký počet osob (např. v metru, na stadiónu, v nemocnicích), nebo u objektů ze specifického charakteru provozu (např. automatický provoz, asistovaná péče) vyžadujících podrobnější, popř. částečně odchylné řešení oproti této normě, se doporučuje zpracovat odborné expertizy (expertní zprávy, expertní posudky apod.) k projektovému řešení požárního zajištění těchto objektů. V odborné expertize se může užít přesnějších výpočtových metod, analyzujících podrobněji podmínky posuzované stavby po vzniku požáru, zejména intenzitu požáru, jeho šíření a šíření zplodin hoření, podmínky evakuace a zásahu s ohledem na užívání a provoz objektu*“.

Zásady návrhu PBR při odlišném způsobu plnění technických podmínek požární ochrany od ČSN 73 08XX jsou zakotveny v informativní příloze ČSN 73 0802, příloha č. I (specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti) [123].

### Požární inženýrství

Požární inženýrství je jedním z možných odlišných přístupů od české technické normy nebo jiného technického dokumentu upravujícího podmínky požární ochrany. Při řešení jsou využívány nejnovější poznatky z oblasti přírodních, technických a aplikovaných věd, jejichž prostřednictvím hledáme efektivní zajištění požární bezpečnosti. Tento postup přináší možnost komplexního specifického posouzení PBR u nestandardních a vysoce rizikových objektů, jak svojí rozlohou a počtem lidí (sportovní stadiony, koncertní sály), tak i složitostí (hotely, obchodní domy) či charakterem provozu (metro, LDN, JIP) – pro tzv. specifické stavby.

V případech, kdy není možno klasickým tabulkovým způsobem dostatečně zohlednit specifčnost stavby nebo některých jejích částí, je možné pro stanovení požadavků na PBR využít odlišných postupů, jelikož je v těchto případech normativní přístup příliš složitý nebo konzervativní. Přístup umožňuje užít přesnějších výpočtových a analytických metod (jakými je třeba numerický model evakuace nebo model požáru, zakouření a šíření toxických látek) za účelem analýzy průběhu evakuace a vývoje požáru (zakouření, toxicitu, vliv konstrukce atd.) či posouzení podmínek pro zásah HZS a IZS. Lze tedy říci, že přesnější metody výpočtů a analýzy slouží k upřesnění konečného stanovení požadavků PBR a nutných požárně bezpečnostních opatření. Hlavním cílem tohoto specifického posouzení je hospodárný návrh požárně bezpečnostních opatření při zachování akceptovatelné úrovně požární bezpečnosti a zohlednění čl. 5.1.3, kde je uvedeno, že by toto řešení nemělo zapříčinit zásadní překročení limitních hodnot stanovených požárním kodexem ČSN 73 08XX [123]. Pokud by i přesto došlo k razantnímu snížení požadavku na PBR oproti standardům, lze takové řešení považovat za přijatelné pouze v případě předložení kompletních výsledků expertízy, včetně detailního komentáře a následné ověření a schválení HZS nebo jiným dotčeným orgánem.

### Podpůrné metodiky akceptované v ČR

Dále je možné využít postupů uvedených v akceptovaných metodikách na území ČR – následně uvedené metodiky vznikly v rámci řešení souvisejících projektů (viz kap. 3.1).

Uvedené metodiky jsou určeny všem zpracovatelům a autorizovaným inženýrům v oboru PBR, projektantům návazných oblastí (oborů pozemní stavby, statika a dynamika staveb, TZB atd.), výrobcům materiálů PO a dalším odborníkům a expertům, kteří se podílejí na zpracování PB PBR stavby a kteří mají k výkonu vybraných činností ve výstavbě oprávnění v roli zpracovatelů.

Dále pak i příslušníkům Ministerstva vnitra, GR HZS České republiky a preventistům HZS, kteří hodnotí vypracování dokumentaci PBR (v roli posuzovatelů) a pracovníkům jednotek HZS a IZS.

Metodiky slouží především jako podpůrné dokumenty, které vymezují kdy, v jakých případech a jakým způsobem je vhodné aplikovat odlišný postup. Nenahrazují však manuál uživatelem preferovaného SW, slouží spíše jako pomocné vodítko poskytující základní náhled na inženýrské posouzení, zejména numerických modelů a možností jejich využití.

Stanovují limity a potřeby vstupních parametrů i uživatelského nastavení a definují minimální standardy, které je třeba dodržovat při tomto způsobu posuzování.

Následně uvedené metodiky vznikly ve spolupráci našeho řešitelského týmu, kde je studentka spoluautorkou:

- **Metodika – Aplikace pokročilých modelů pohybu osob a dynamiky požáru pro bezpečnou evakuaci osob a analýzu rizik**, (VG20132015120 *Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru (SAFEVAC)*, programu bezpečnostního výzkumu ČR [25]).

- **Metodika využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb, WP3** (*VI20162019034 – Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb (VERIFIRE)*), podpořeného MV České republiky [21].
- **Metodika využití detekce pěších pro městské plánování a analýzu rizik TH02010372** *Systém pro monitorování, vyhodnocování a řízení proudů chodců a cyklistů*, (podpořeného TAČR v rámci výzvy EPSILON [14]).

### Další certifikované metodiky a jiné zdroje

Dalšími podpůrnými certifikovanými metodikami zabývajícími se problematikou požární bezpečnosti (jako např. posouzením specifických tunelových staveb, dílčími požárně bezpečnostními posouzeními, volbou, upřesněním vstupních dat pro numerické modely), které vznikly v rámci spolupráce na společných výzkumných projektech (viz kap. 3.1), částečně nebo zcela díky partnerským řešitelským týmům, jsou především:

- **Aplikace numerických modelů pro bezpečnou evakuaci vozidel při požárech v železničních tunelech** (*VG20132015120 – SAFEVAC*) [136].
- **Vstupní data do modelů požáru** (*VI20162019034 – VERIFIRE WP1*) [205].
- **Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů** (*VI20162019034 – VERIFIRE WP2*) [135].
- **Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany** (*VI20162019034 – VERIFIRE WP2*) [302].
- **Publikace – Ověřování modelů v požární bezpečnosti** [76].

Zdroj vzniklý mimo naši spolupráci, který se také zabývá inženýrským přístupem, numerickými modely evakuace osob a šíření požáru z pohledu PBŘ v podmínkách české legislativy, a stojí za zmínku je **Metodika pro specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství** [304].

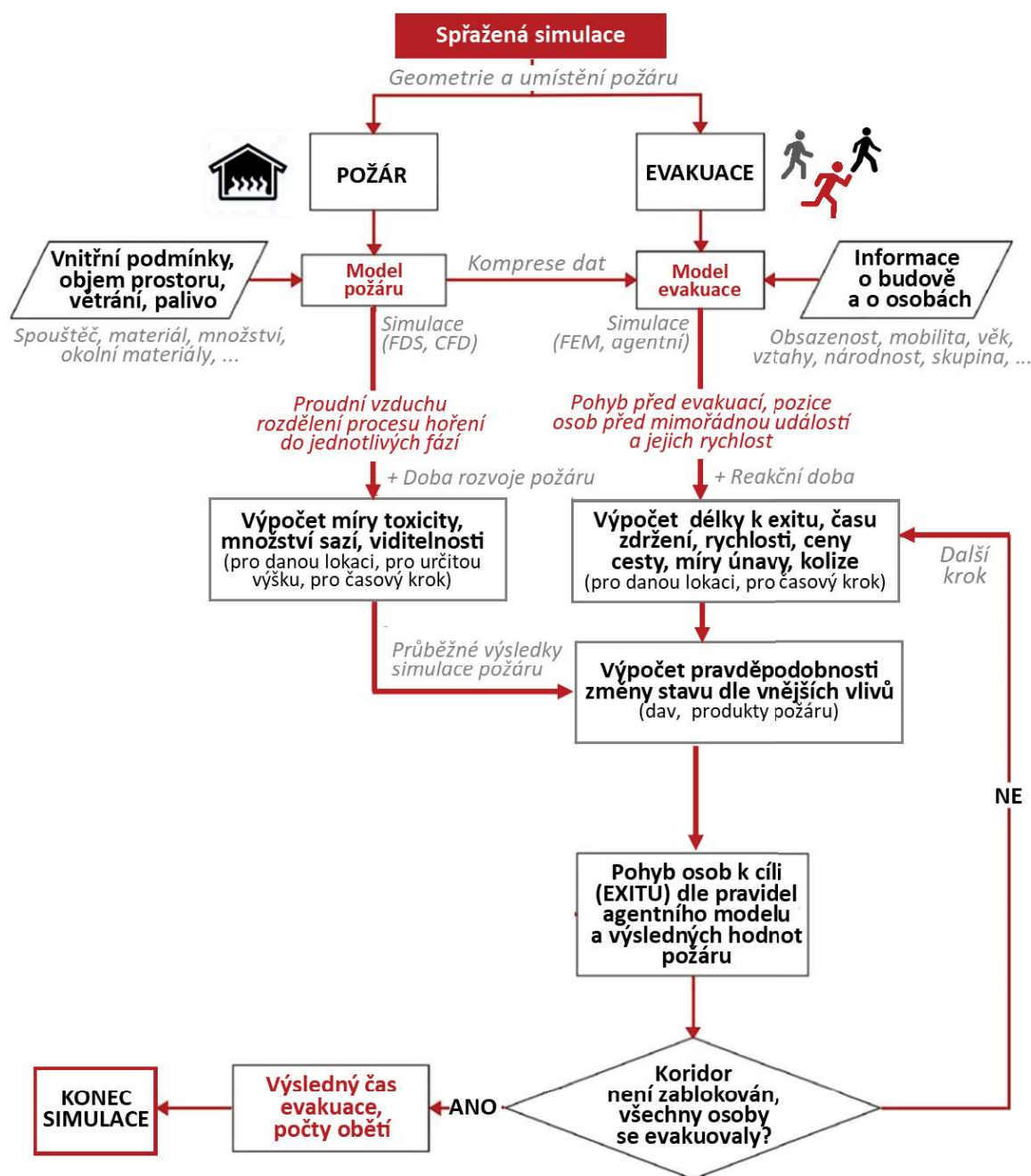
### Zahraniční zdroje

Dalším příkladem odlišného přístupu může být užití i jiných alternativních zahraničních zdrojů a jejich postupů PBŘ. Zahraniční standardy jsou chápány jako uznávané postupy odchylné od ČSN – vybrané z těch nejužívanějších pro danou problematiku jsou uvedeny níže ve výčtu a jejich detailnější představení je podrobněji rozvedeno v Příloze refzahranicni-priloha.

- **ISO/TR 13387-8 Fire safety engineering – Part 8: Life safety – Occupant behaviour, location and condition** (ISO, 1999) [162].
- **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering** (SFPE, 2016) [235, 441, 294, 376, 295, 257, 237, 195].
- **NFPA 101 Life Safety Code** (National Fire Protection Association, 2018) [108].
- **Hosser, D.: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes** (vfdb, 2013) [315].
- **Fire Safety Engineerin – CIBSE Guide E.** (CIBSE, 2019) [149].
- **Evacuation Modelling Trends** (2016) [132].
- **Egress Design Solutions: A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning** (Arup, 2007) [540].
- **Introduction to Crowd Science** (G. Keith Still, 2014) [522].

### 1.3.3 Numerické modely

Rozšířením možnosti využití požárního inženýrství (performance-based design), které umožňuje užít numerické modelování jako alternativu pro proces navrhování a posuzování PBŘ u nestandardních, specifických a rizikových staveb (jak je stanoveno v ČSN 73 0802 a legislativě ČR, blíže viz kap. 1.3.2), došlo k značnému nárůstu četnosti užití těchto numerických modelů, a s tím i k rozvoji tohoto odvětví. Přístupy založené na numerickém modelování jsou velmi komplexní a umožňují stanovení konkrétních specifických podmínek při průběhu požáru a jejich dopad na osoby při evakuaci – tzv. spřažené simulace evakuace a požáru. Spřažené simulace využívají obou modelů (nebo importu dat), jak modelu evakuace, tak i modelu požáru, které jsou popsány níže – jejich schéma principu společné simulace je na obr. 1.11. Pomocí spřažených simulací lze testovat široké spektrum scénářů, analyzovat vzájemné dopady simulací a predikovat jejich vznik či případný vývoj.



Obr. 1.11: Schéma principu spřažené simulace modelu evakuace, požáru a šíření toxických látek (zdroj: vlastní, přepracováno dle [183, 94])

Jedním z nejvýznamnějších omezení a úskalí numerického modelování je korektnost vstupních dat → vložíme-li na počátku do modelu chybná data, nikdy nedocílíme relevantních výstupů. Z tohoto důvodu je nezbytné, aby nástroje aplikoval pouze zkušený uživatel, který je schopen své znalosti prokázat a případná pochybení identifikovat [29]. Na této osobě závisí volba abstraktního modelu pro danou úlohu, stanovení míry zjednodušení geometrie (podkladu pro model a detailností ztvárnění), diskretizace – výběr vhodné výpočetní sítě (hrubá/jemná, diskrétní/spojitá) a zadání konkrétních okrajových podmínek s ohledem na zamýšlené scénáře.

## Modely evakuace osob

Numerické modely evakuace osob jsou rychle se rozvíjející alternativou k běžným výpočetním postupům PBR. Při využití běžného výpočtu pracujeme především s rychlostí osob, počtem osob a jednotkovou kapacitou únikového pruhu (čímž zohledňujeme délku únikové cesty a šířku koridoru, kterým se osoby evakuují). V případě numerického modelu můžeme postihnout veškeré parametry zkoumaného prostoru (konkrétní dimenze), vlastnosti a charakteristiky osob (věk, mobilita atd.) a další specifické faktory ovlivňující evakuační procesy (viditelnost, míra toxicity v ovzduší atd.) [25, 303].

Modely využíváme pro bližší pochopení vlastností a chování lidí za konkrétních podmínek (chování davu, chování v konkrétním prostoru, reakce na situaci/geometrie atd.), abychom dokázali popsat vznikající děje, pochopili je a stanovili jejich následný vývoj i pro budoucí očekávané situace. Díky modelům je možné již v přípravné fázi zohlednit poznatky jak v návrhu geometrie, tak i pro zásah IZS a HZS. Příkladem je volba dispozičního řešení stavby nebo vnitřního uspořádání dopravního prostředku (vlak, letadlo), která má významný vliv na případnou evakuaci velkého počtu lidí.

Nejvhodnější čas pro ověření správnosti návrhu a užití modelu je již při projekci, protože v této fázi je určitý prostor pro případné změny a úpravy. U realizovaných staveb může být náprava chybného řešení značně složitá, neboť se většinou jedná o zabudované konstrukce, speciální materiály, což vyvolá rozsáhlé investice v podobě vícenákladů. I v takových situacích může být smysluplné nejprve záměr/požadavek ověřit simulací a teprve na základě výsledků přikročit k nápravě a k výběru vhodné varianty.

Před započítáním samotné tvorby modelu je hlavním úkolem detailní pochopení funkčních možností jednotlivých nástrojů tak, aby byl uživatel schopen posoudit, zda model umožňuje reálné ztvárnění s dostatečnou vypovídající hodnotou – tzv. míru přiblížení se realitě. Vše se odvíjí od možností modelu, jako je např. možná míra podrobnosti geometrie, měřítko, zohlednění různého chování osob a jejich pohybu, případně limity ztvárnění návrhových scénářů apod. Aktuálně je k dispozici celá řada numerických modelů určených pro ztvárnění konkrétní scénářů nebo budov (účel – behaviorální chování, dopravní prostředky, nízkopodlažní budovy), ale také celá řada univerzálních modelů (bez omezení užití). Numerické modelování nabízí v dnešní době možnost simulace pohybu evakuovaných osob v prostoru a reálném čase, i s ohledem na specifické individuální charakteristiky osob.

Úplně nejzákladnější dělení numerických modelů evakuace zavádí zdroje Gwynne et al. [196] a Kulignowski et al. [297], případně i [483, 25, 303], z nichž je čerpáno, kteří dělí zejména dle metod modelování, reprezentace prostoru, dle perspektivy, dle behaviorálních vlastností, dle ztvárnění pohybu a dle ztvárnění pohybu. Rozdělení modelů a jejich základní principy jsou uvedeny blíže viz Příloha C.

## Modely požáru

Numerické modely se posledních letech staly velmi účinnými nástroji se stále rostoucím uplatněním v oblasti požárně bezpečnostního inženýrství. Modely napomáhají již při posuzování konstrukcí v návrhové fázi, dále při optimalizaci návrhu požárně bezpečnostních zařízení

i stanovení podmínek pro záchranné práce a bezpečnou evakuaci. Lze je dělit do tří základních skupin – výpočetní zjednodušené modely, pravděpodobnostní modely a deterministické modely. Popis jejich základních principů a rozdělení v těchto funkčních skupinách je blíže představeno v Příloze C.



## Kapitola 2

# Cíle práce

### 2.1 Hlavní cíl disertační práce

*„Hlavním cílem práce je inovovat v současnosti využívané analytické metody požární bezpečnosti velkých komplexních staveb a standardizovat využití numerických modelů evakuace osob a šíření požáru v tomto typu staveb.“*

Pro samotné dosažení hlavního cíle jsou stanoveny konkrétní dílčí cíle:

- Volba vhodných materiálů pro specifikace požárně technických charakteristik (PTCH) dle volené situace a budovy.
- Určení dopadu vybraných parametrů na evakuační proces osob.
- Vyhodnocení možností a postupů pro projektanty PBŘ, složky HZS a IZS.

Cílem práce není nahrazení norem, ale nabídnutí vhodného, ověřeného doplňku k normám. Poskytnout komplexní podklady pro případnou novou generaci ČSN zabývajících se numerickým modelováním, nebo alespoň zohledňující užití numerických modelů pro účely PBŘ, jak tomu je již v zahraničí [162, 108]. Sestavení ucelené sady informací o postupech, vstupních datech a doporučení pro aplikaci numerických modelů jako podkladu při jejich užívání a zavádění do aktivní praxe.

### 2.2 Dílčí cíle disertační práce

#### Dílčí cíl 1.: Volba vhodných materiálů pro specifikace PTCH dle volené situace a budovy

Dílčím cílem je vybrat vhodné materiály a jejich požárně technické charakteristiky pro simulované parametrické a citlivostní studie referenčních staveb uvedených v kap. 3.3, nikoliv jejich samotné stanovení nebo měření. Vstupní data o požáru pro účely numerického modelování je nutné stanovit realističtěji a ve větším záběru tak, aby nebylo potřeba přistupovat k performance-based designu (s vědomě nesprávnými vstupy) nebo k užití normových tabulárních hodnot, jak je tomu dnes. Reálně sestavené návrhové požární scénáře a odpovídající návrhové požáry jsou důležitými vstupními daty, která následně rozhodují i o kvalitě výstupů ze simulací numerických modelů a je třeba je volit s ohledem na typ stavby a požárního scénáře, zohledňující skutečné materiály, jejich množství a požární technické charakteristiky dle jejich reálného výskytu.

→ **Výsledek:** V rámci práce jsou sestaveny vzorové sady materiálů pro specifické stavby (např. metro, LDN, OC), které slouží jako vhodný příklad výběru pro sestavování návrhových požárů hnaných palivem při posuzování těchto konkrétních typů staveb a volených scénářů. Vzorové sady výtípaných materiálů (a jejich PTCH specifikace) jsou čerpány zejména



z *Materiálové databáze ověřených požárně technických charakteristik materiálů* [396] vzniklé z projektu *VI20162019034* a další zahraniční literatury [114, 444, 463]), byly následně využity pro situace parametrických a citlivostních studií (viz kap. 5.2) a konkrétní numerické modely evakuace osob s působením požáru při testování referenčních staveb – vyhodnocení evakuace z pohledu dopadu produktu hoření na evakuované osoby. Součástí práce je vypracována kap. 5.1.1, která nastiňuje metodický popis stanovování požárních návrhových scénářů a návrhových požárů u specifických staveb. Aktuálně preferovaný postup sestavování návrhového požáru pro numerický model dle [131] pro úplnost této práce je uveden viz Příloha H.

### **Dílčí cíl 2.: Určení dopadu vybraných parametrů na evakuační proces osob**

Dílčím cílem je určení dopadu vybraných parametrů na evakuační proces díky komplexní sadě parametrických a citlivostních studií. Bude provedeno porovnání užití numerických modelů a normového přístupu v kontextu ČSN z pohledu funkčnosti, zohlednění proměnných a případných zjednodušení. Získané poznatky budou shromážděny tak, aby mohly být užity jako podklad pro případnou aktualizaci stávajících ČSN (aktualizace na základě identifikace zjednodušení, která prokazatelně mohou mít v reálné situaci silný dopad na evakuované osoby z hlediska jejich bezpečnosti – robustní vliv na kvalitu posouzení). Zhodnocení užití numerického modelu pro posouzení specifických staveb (jako stavby s kritickými parametry a vysokým rizikem dopadu) v kontextu vlivu jednotlivých parametrů na evakuační proces a jeho případné doporučení pro aktivní začlenění u těchto typů staveb.

→ **Výsledek:** Je sestavena sada citlivostních a parametrických studií, pro jejichž výsledky simulací je provedena analýza. Celý proces a výsledky jsou srovnávány s klasickým ČSN přístupem. Studie ověřují vliv jednotlivých vybraných parametrů (např. režim, vstupní data, vliv geometrie, složení osob, ztvárnění pohybu, scénář apod.). Následně dochází ke srovnání s normovým přístupem – upozornění na nezohledněné a citlivé variantní řešení (parametry) či jejich zjednodušení v ČSN. Finálně je provedeno vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů na evakuační proces pro konkrétní typové skupiny staveb (typu: stadion, LDN, tunel a ostatní) viz kap. 5.2.2.

### **Dílčí cíl 3.: Vyhodnocení možností a postupů pro projektanty PBŘ, složky HZS a IZS**

Dílčím cílem bude ověření možností a postupů užití numerických modelů i jejich omezení pro postupy posuzování PBŘ u specifických staveb ve vztahu k ČSN a další alternace jejich využití pro složky HZS a IZS. Budou provedeny vzorové aplikace tohoto odlišného přístupu na vybraných referenčních stavbách (např. stadion, metro, LDN, škola apod.) s cílem zhodnocení podmínek evakuace, zásahu a úrovně požární bezpečnosti těchto referenčních staveb. Z aplikací a analýz výsledků bude sestavena sada doporučení a poznatků pro zavedení a užití numerických modelů v praxi. Doporučení budou vycházet i z poznatků vyplývajících z jednání se stranou projekce (např. DPP, METROPROJEKT, s. r. o., BKOM, a. s., architektonickými ateliéry) a strany složek HZS (preventisti, DPP HZS, GŘ HZS) [392]. Dojde k zhodnocení komplexity PBŘ u specifických staveb dle přístupu ČSN. Všechny získané poznatky budou shromážděny do komplexního informačního souhrnu o numerických modelech a jeho užití jako podkladu pro aktivní zavádění do praxe, tak i jako informačního základu pro případnou novelizaci ČSN.

→ **Výsledek:** Je vytvořena sada ověřených aplikací numerického modelování evakuace osob na vybraných specifických referenčních stavbách pro účely PBŘ – pro které jsou analyzovány dopady variantních scénářů za různých situací s cílem zhodnocení podmínek evakuace (vyhodnocení evakuačních časů, úrovně kvality pěší dopravy a vlivu geometrie), podmínek zásahu a ověření funkce požárních zařízení. Z vytvořených referenčních příkladů je násled-

ně sestavena sada poznatků a doporučení pro aktivní zavedení a užití přístupu numerického modelování do praxe. Dále je sestaven soubor informací (v českém jazyce) coby podkladu pro požití numerických modelů v praxi a případnou novelizaci ČSN, aktualizaci směrnic, metodik či regulí upravujících užití numerických modelů v inženýrské praxi. Také jsou nastíněny ověřené postupy tvorby a kontroly PBŘ při užití numerického modelování jak pro projektanty, tak i preventisty HZS (jaké výsledky jsou užitečné a jakou korektní podobu by měly mít při předání (návrh struktury kontrolního check-list – viz kap. 6.3). Dále jsou představeny možnosti využití numerických modelů pro HZS – identifikace kritických míst, optimalizace návrhu, VR a 3D, které mohou být využity pro optimalizaci návrhu, provozních postupů (evakuace, zásahu, krizového managementu, bezpečnostních opatření či výcvik jednotek IZS).



## Kapitola 3

# Výzkumná spolupráce a inženýrská praxe

V průběhu práce se studentka podílela jako součást našeho výzkumného týmu na řešení řady projektů aplikovaného výzkumu (viz níže), které přispěly k rozvoji i vlastním poznatkům o problematice evakuace osob, šíření požáru a požární bezpečnosti. Na výzkumných úkolech spolupracovala s řešitelskými týmy složenými z kolegů výzkumníků a pracovníků organizací úzce spjatých nejen s problematikou PBR (HZS, zkušební laboratoře, ČKAIT), ale také s dalšími odborně přidruženými obory s přesahem do psychologie, sociologie, dopravních průzkumů, zpracování obrazu, matematiky, materiálového inženýrství apod. Součástí autorčina působení na VUT FAST byla práce na řešení desítek úloh zaměřujících se na evakuaci, davovou dynamiku a bezpečnostní analýzu staveb. Mimo to se zabývá dlouhodobě i méně souvisejícími tématy, jako jsou např. bezbariérovost, navrhování staveb, posudky běžného provozu, urban design, bezpečnost a ochrana měkkých cílů apod.). Na základě výzkumných spoluprací a inženýrské praxe získala ucelený náhled na danou problematiku v souvislostech, shromáždila informace a načerpala cenné zkušenosti a nové poznatky zejména pro práci s numerickými modely evakuace (pohybu) osob a šíření požáru. Zaměřila se zejména na jejich výběr, možnosti jejich užití, parametrické a citlivostní analýzy, jejich reálnou aplikaci, formulaci vstupních dat, možnosti V & V numerických modelů a jejich realizace (např. verifikační karty), stanovování návrhových scénářů, možnosti a vhodnost jejich využití a neposlední řadě i ověřeného způsobu vyhodnocování a interpretace výsledků ve vztahu k české legislativě apod.

### 3.1 Související výzkumné projekty

Jedním z hlavních východisek pro tuto práci je zapojení na projektech aplikovaného výzkumu, kde se studentka/autorka práce věnovala především: tvorbě numerických modelů, analýze evakuačního procesu, ověřování citlivosti parametrů, sestavování verifikačních karet, tvorbě umělých dat jako databáze pro predikci, tvorbě metodik (uvedených v kap. 1.3.2 či v Příloze B), analýza davu v rámci pěší dopravy a získávání dat pro kalibraci modelu, využití numerických modelů pro predikci a ochranu MK aj. Spolupráce probíhala na souvisejících výzkumných projektech, které jsou blíže popsány v Příloze D a jejich výčet je uveden níže:

- *VG20132015120 – Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru*, (SAFEVAC, 04/2013-12/2015).
- *TA03030491 – Optimalizace technologického vybavení tunelů pozemních komunikací se zřetelem na bezpečnost a cenu*, (HADES, 01/2013-12/2015).
- *VI20162019034 – Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb*, (VERIFIRE, 01/2016-12/2019).

- *TH02010372 – Systém pro monitorování, vyhodnocování a řízení proudů chodců a cyklistů*, (01/2017-12/2019).
- *TH04010377 – Vývoj metod identifikace a ochrany měkkých cílů dopravní infrastruktury pro zvýšení jejich bezpečnosti a odolnosti před teroristickým útokem*, (01/2019-12/2022).
- *TL02000103 – Kognitivní psychologie a prostorová syntaxe ve virtuálním prostředí pro agentní modely*, (01/2019-12/2022).
- *TL02000352 – Klasifikace sociálně-psychologických parametrů osob prostřednictvím umělé inteligence a strojového vidění pro potřeby ochrany osob v reálném čase*, (01/2019-12/2021).
- *VI20192022118 – Ochrana měkkých cílů v bezpečnostním prostředí ČR*, (07/2019-12/2022).
- *TJ04000232 – Efektivní časoprostorové predikce s využitím metod strojového učení*, (ESPRED, 06/2020-05/2022).

## 3.2 Spolupráce s centrem AdMaS

Centrum AdMaS disponuje moderními technologiemi i pro oblast požární bezpečnosti, např. softwarovými nástroji pro numerické simulace evakuace osob, požáru a šíření toxických látek, celou řadou zařízení pro vykonávání zkušebních metod reakce stavebních výrobků na oheň. Ve spolupráci s centrem byla realizována celá řada našich projektů aplikovaného výzkumu a vývoje v požárně bezpečnostní a bezpečnostní oblasti, jako je např. *VG20132015120*, *TA03030491* aj. a také jsme zde zpracovali několik odborných analýz a posouzení staveb – např. *pavilon EXPO 2015*, *Tunel Zvěrotice*, *Zemský stadion Brno* atd. (blíže rozvedeno v kap. 3.3), pro které byly využity agentní numerické modely evakuace (pohybu) osob a CFD modely šíření požáru a toxicity.

## 3.3 Analýza evakuačního procesu v inženýrské praxi

Základem analýzy evakuačního procesu je ověření průběhu evakuace za jiných než standardních situací – mezi tyto situace může patřit např. ohrožení požárem, odložené zavazadlo (potenciálně výbušné zařízení), ozbrojený útok nebo zatarasení některých únikových východů. Tyto postupy lze využít i pro ověřování nových opatření či předpisu před jejich zavedením (např. nařízení komise (EU) č. 1303/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se bezpečnosti v železničních tunelech železničního systému EU). Detailní analýza evakuačního procesu v inženýrské praxi byla při studentčině práci provedena hned na několika referenčních stavbách (uvedených níže viz odst. *Řešené stavby*), pro které bylo vypracováno komplexní posouzení evakuace osob, v některých případech doplněné i o posouzení účinků požáru na evakuované.

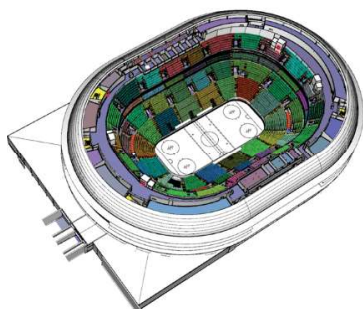
### Řešené stavby

Analýza evakuačního procesu byla řešena na vybraných referenčních specifických stavbách z inženýrské praxe, pro které byly vytvořeny konkrétní numerické modely evakuace osob (případně i šíření požáru a toxicity). Při analýze byly jednotlivé situace řešeny parametricky pro různou obsazenost (v našich studiích 1 000–30 000 osob) a v několika opakováních, tak aby bylo možné provést statistické vyhodnocení evakuačních časů. Parametry agentů (digitální reprezentace osob) jsou převzaty z odborné literatury a pro každé opakování jsou znovu generovány na základě pravděpodobnostní funkce, stejně jako je náhodně měněna jejich výchozí pozice a behaviorální vlastnosti osob. Výsledky modelu jsou platné pro konkrétní zvolené návrhové scénáře, vstupní parametry s okrajovými podmínkami, které byly stanoveny na základě dodaných podkladů, odborné literatury a možností užitého nástroje. Zevrubný popis modelů a provedených analýz u jednotlivých objektů je nastíněn následovně:

- **Aréna Brno**

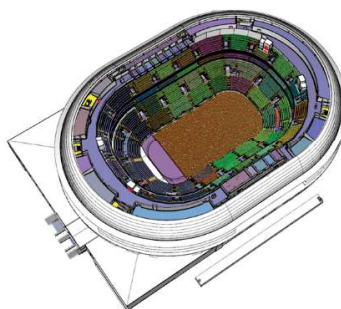
Předmětem analýzy bylo posouzení návrhu Multifunkčního sportovního a kulturního pavilonu v Brně, který má zajistit zázemí pro všechny masové události v regionu (koncerty, sportovní utkání apod.). Budova arény se skládá z 6 NP a 2 PP, kde v 1. PP je řešena „lední“ plocha pro hokej nebo koncert (na stání/sezení). V ostatních podlažích jsou řešeny tribuny, které jsou přístupné schodišti primárně z vrchu. Všechny evakuační východy pro veřejnost jsou umístěny v úrovni 1. NP.

**SPORTOVNÍ UTKÁNÍ NA PLOŠE BEZ ÚČASTI DIVÁKŮ NA PLOŠE**



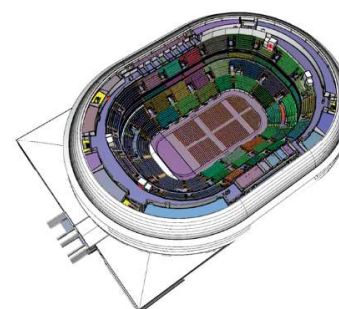
**OBSAZENO: 13 992 os.**

**KONCERT STOJÍCÍ DIVÁCI NA PLOŠE**



**OBSAZENO: 14 156 os.**

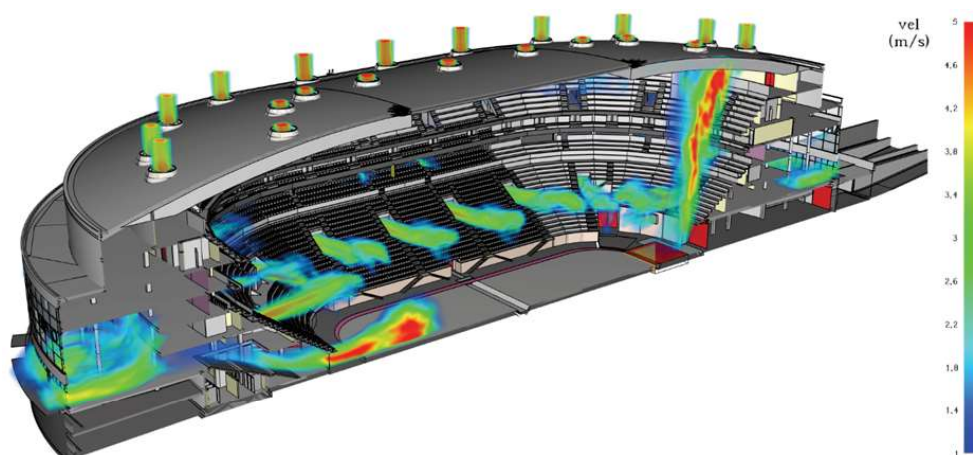
**KONCERT SEDÍCÍ DIVÁCI NA PLOŠE**



**OBSAZENO: 10 556 os.**

**Obr. 3.1:** Schéma modelovaných variant a jejich celková obsazenost návštěvníky pro stavbu Aréna Brno (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19][33])

Modelovány jsou tři základní scénáře s obsazeností 10 556–14 156 osob, které jsou navrženy v PD (blíže viz obr. 3.1) – sportovní utkání bez účastníků na ploše, koncert stojící diváci na ploše, koncert sedící diváci na ploše. Jednotlivé varianty byly simulovány s různou kombinací parametrů osob (rozdělení reakční doby, procentuální zastoupení – muži:ženy:děti:hendikepovaní apod). Hlavním cílem bylo ověření PBR (obr. 3.2, jelikož užití normového přístupu PBR nebylo v první fázi vyhovující – čas předpokládané evakuace osob byl delší než doba zakouření posuzovaných prostor. Na základě toho byly vytvořeny pro arénu modely evakuace a požáru, kterými byl ověřen návrh a po opakované optimalizaci a konzultaci s HZS byla navržena nová bezpečnostní opatření a stavební úpravy [33].

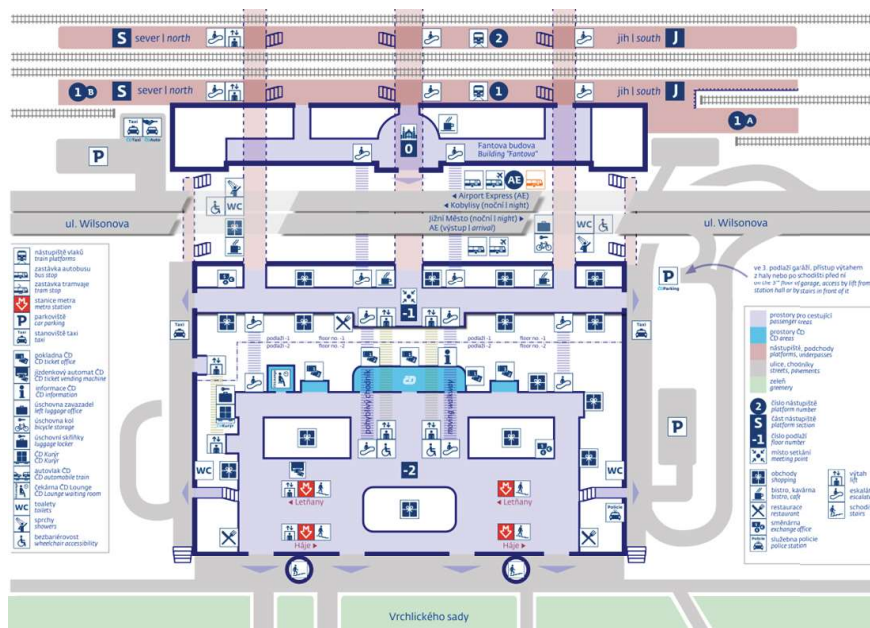


**Obr. 3.2:** Ukázka modelu požáru Aréna Brno, kdy v 80 s dochází k aktivaci ZOKT (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [10])

- **Nová odbavovací hala budovy Hlavního vlakového nádraží v Praze**

Předmětem studie bylo ověření průběhu evakuace za jiných situací než standardních, kdy jsou dostupné všechny evakuační východy. Byly uvažovány pouze veřejně přístupné

části, kde se pohybují cestující. Budova sestává ze tří podzemních a jednoho nadzemního podlaží Fantovy budovy – viz obr. 3.3. Jejím primárním účelem je odbavení cestujících vlakové dopravy, metra, ale i osob využívajících doplňkové služby budovy.



**Obr. 3.3:** Schéma geometrie nové odbavovací haly budovy Hlavního vlakového nádraží pro analýzu bezpečnosti (zdroj: upraveno a převzato z [88])

Při tomto posouzení byla provedena detailní analýza evakuace osob, bez přítomnosti kouře z pohledu ochrany měkkého cíle, kdy byly uvažovány takové situace, jako je napadení útočníkem (osamělý střelec, osoba s výbušninou) a případné umístění bomby v zavazadle (odložené zavazadlo jako potenciální výbušné zařízení). Model byl řešen v sedmi variantách scénářů, které kombinovaly různé variace dostupných únikových cest a proměnných parametrů (věkové rozložení, rychlost, reakční doba, apod.). Obsazenost modelu byla modelována 1 000–10 000 osob, v které jsou uvažovány i případné evakuované osoby ze stanice metra trasy C, která má přímou návaznost na odbavovací halu. Celkově bylo modelováno 70 variant modelu [20].



**Obr. 3.4:** Ukázka práce využití numerického modelu k posouzení evakuace osob ze Zemského stadionu Brno (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [15])

#### • Zemský stadion Brno

V souvislosti s plánovanou rekonstrukcí Stadionu za Lužánkami s cílem zajištění požadavků FIFA pro mezinárodní fotbalová utkání byla zpracována detailní analýza evakuace osob bez přítomnosti kouře. Stadion sestává z jednoho podzemního a osmi nadzemních podlaží (blíže viz obr. 3.4). Tribuny jsou schodově rozvrstveny kolem hřiště

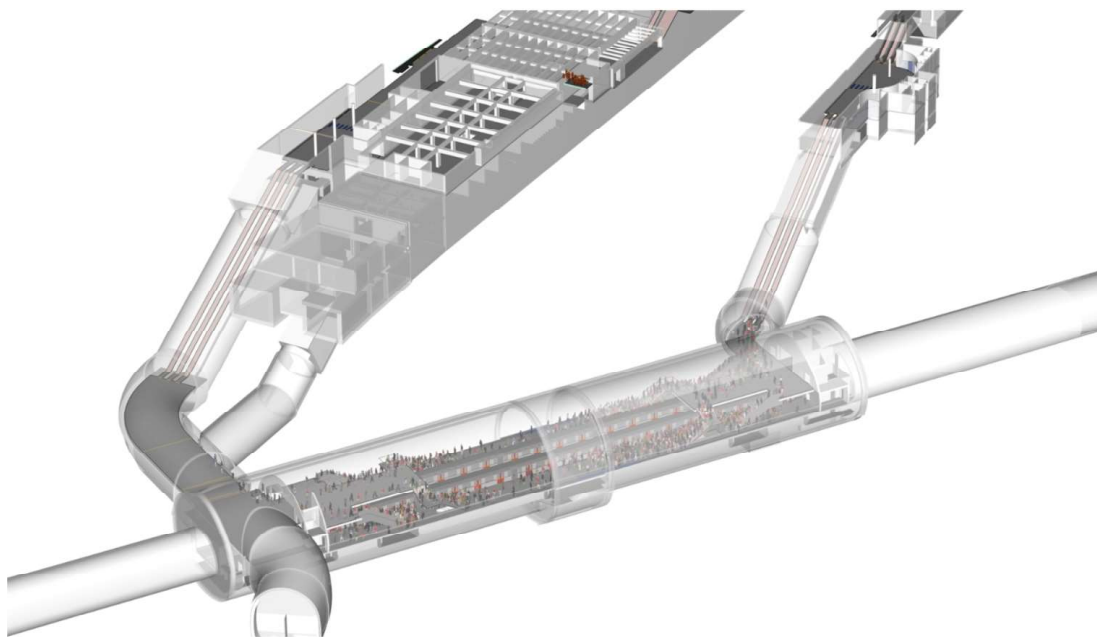


a jsou děleny do čtyř základních sektorů. Budova má šestnáct hlavních východů, na něž navazuje stejný počet schodišťových tubusů propojujících jednotlivá podlaží.

Prvotním účelem analýzy byla optimalizace dispozic a interiérových prvků stadiónu a eliminace provozních chyb s cílem zajištění maximálního komfortu a bezpečnosti při vyklizení či případné evakuace osob. Hlavním předmětem analýzy byl proces evakuace jak při nouzové (evakuace stadionu), tak i nenouzové situace (vyklizení stadionu po zápase). Uvažovaná obsazenost modelu byla 30 tis. osob. Pro model byly sestaveny čtyři základní scénáře v různých kombinacích proměnných parametrů (věkové rozložení, rychlost, reakční doba, apod.). Z nichž bylo modelováno 6 nejkritičtějších variant modelu [15].

- **Stanice metra**

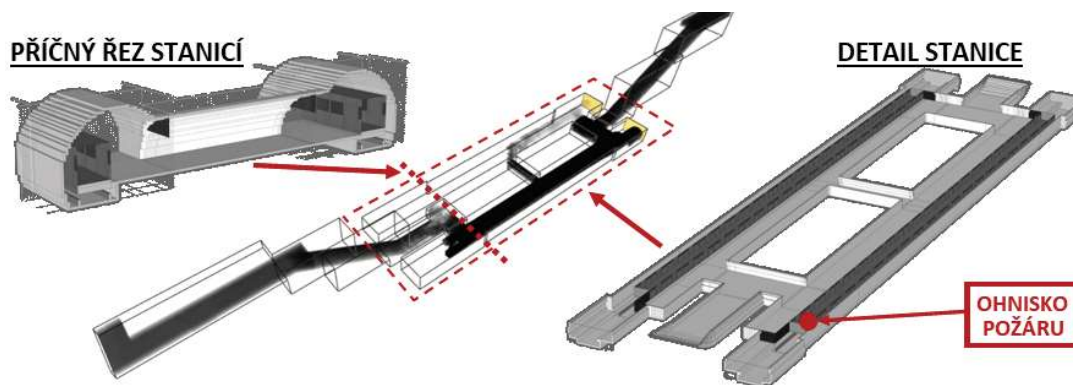
Byla provedena analýza evakuace stanic metra na trase D s cílem ověření bezpečné evakuace, optimalizace protipožárního a bezpečnostního vybavení, a také získání poznatků pro plánování případného zásahu HZS a IZS. Vybrány byly stanice s nejkritičtějšími parametry – Olbrachtova – nejhluběji umístěná stanice s dvouúrodním centrálním nástupištěm a Pankrác – přestupní jednodílná stanice s rozsáhlou dispozicí (viz obr. 3.5). Pro stanice byl uvažován základní scénář příjezdu dvou plně obsazených souprav do stanice, kde se již vyskytují čekající cestující. Obsazenost stanic byla modelována ve variantách 1 050–2 050 osob.



**Obr. 3.5:** Ukázka práce využití numerického modelu evakuace a šíření požáru k posouzení stanice metra – Pankrác (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11, 392])

Předmětem byla analýza evakuace za přítomnosti kouře, viz obr. 3.6 – předpoklad vzniku požáru v jedné z vlakových souprav (přítomnost žháře, který polije sedačku hořlavinou a zapálí ji). Pro stanice byly sestaveny modely šíření požáru a toxicity, kde byl užit návrhový požár s parametry: čas dosažení maxima 900 s, špičkový výkon v maximum, lineární nárůst a spalovaným materiálem byl nylon (modelováno hoření plastových sedaček s čalouněním). V rámci studie byla provedena také analýza vlivu symetrické a asymetrické evakuace na celkový evakuační čas a podmínky zásahu IZS v různých kombinacích proměnných parametrů. Celkově bylo analyzováno 8–12 variant modelu každé stanice [11].





**Obr. 3.6:** Ukázka numerického modelu požáru a jednoho z jeho výstupů (vizualizace šíření kouře) pro dvoulodní stanici metra Olbrachtova (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11] přepracováno)

- **Tunelové úseky metra trasy D**

Předmětem analýzy evakuace osob a negativních vlivů požáru na ně byla stavba traťových mezistaničních tubusů metra trasy D, uložených v hloubkách 6–44 m, jejichž délky se pohybovaly v rozmezí 675–1 210 m. Referenčním úsekem pro posouzení byla zvolena nejdelší část jednokolejného tubusu s největší osovou vzdáleností tubusových propojek o celkové délce 336 m. Hlavním scénářem byla situace, kdy dojde přes všechna nařízení k nouzovému zastavení plně obsazené (525 os.) pětivozové vlakové soupravy v tunelovém tubusu a dojde k nutné evakuaci osob do prostoru tunelu.

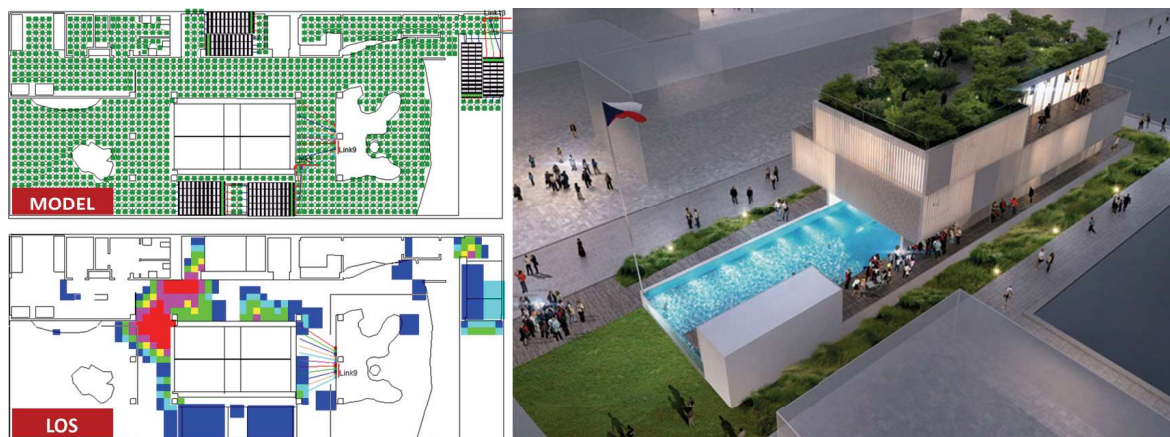
Cílem posouzení bylo navržení optimalizovaného uspořádání tunelového tubusu z pohledu bezpečné, efektivní evakuace (evakuace do kolejiště, evakuace na lávku, evakuace na únikový chodník a výškovým rozdílem) a provozních požadavků s ohledem na celkový evakuační čas. Zmiňované uspořádání bylo testováno v různých kombinacích scénářů (symetrická evakuace, nesymetrická evakuace, evakuace z vlaku čelem, dveřmi, dveřmi a okny) a proměnných parametrů (věkové složení, rychlosti, procentuální zastoupení osob apod.). V rámci posouzení byl analyzován i vliv vnitřního uspořádání vlakové soupravy na evakuační čas a míru ohrožení osob produkty hoření. Celkově bylo pro tunelový tubus ztvárněno 24 variant modelu evakuace a model požáru a šíření toxicity (materiál hoření – nylon) [11, 391].

- **Železniční tunel Zvěrotice**

Železniční tunel Zvěrotice je součástí IV. železničního koridoru Dolní Dvořiště – Praha Hostivař. Jedná se o dvoukolejný tubus, jehož celková délka je 370 m. Pro evakuaci po obou stranách tunelu slouží únikové chodníky, kde při nutnosti jejich užití musí osoby překonat výškový rozdíl 1,25 m (mezi podlahou vagónu a povrchem únikového chodníku). Základním scénářem bylo nouzové zastavení vlakové soupravy uvnitř tunelu způsobené vznikem požáru a následná evakuace osob do bezpečí (k portálu tunelu). Pro model byly zvoleny dvě varianty vlakových souprav (šestivozová a jedenáctivozová). Obsazenost souprav byla modelována 594–1 089 osob. Předmětem analýzy bylo posouzení voleného způsobu evakuace, vlivu výškového rozdílu a pozice vagónu na celkový evakuační čas. Celkově byly sestaveny 4 nejkritičtější varianty modelu v různých kombinacích proměnných parametrů (procentuální zastoupení, reakční doba, věkové složení apod.) a to včetně posouzení negativních vlivů požáru na unikající osoby.

- **Český pavilon EXPO, Milano 2015**

Předmětem posouzení byl Český pavilon na veletrhu EXPO v Miláně (obr. 3.7), který je řešen jako čtyřpodlažní budova s otevřenou dispozicí a jedním centrálním a dvěma nouzovými schodišti. Obsazenost objektu byla modelována pro maximální kapacitu 430 osob ve dvacetičtyřech variantách scénářů, kde bylo variováno umístění ložiska požáru, rozmístění počtu osob ve vztahu k provozu (konference, výstava, raut, společenský večer) a s různými kombinacemi proměnných parametrů (věkové složení, rychlostní rozdělení, procentuální zastoupení osob s hendikepem apod.).



**Obr. 3.7:** Ukázka analýzy evakuace Českého pavilonu EXPO, Milano 2015 – Agentní model s diskrétní sítí a výstupní data Level of Service – LOS (vlevo), 3D vizualizace pavilonu (vpravo); (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [13] přepracováno)

Mimo výše uvedených staveb byly realizovány i další pomocné a dílčí modely, jak pro výzkumné studie, tak pro reálná posouzení – např. zjednodušený model Janáčkova kulturního centra (JKC), obecný model školy, model lůžkového oddělení LDN, model hokejové haly Rondo, modely vybraných kulturních akcí (festivály, trhy, koncerty, model teroristického útoku (např. Borough Market v Londýně, v Manchester Aréně na koncertu Ariany Grande) aj.

### 3.4 Nové metody kalibrace a validace modelů pohybu osob

Formulací nového modelu pohybu osob se zabývají doc. Mgr. Milan Krbálek, Ph.D., Ing. Marek Bukáček a Ing. Jana Vacková na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze ve spolupráci s naší výzkumným týmem. Cílem je využití dat extrahovaných z videozáznamu pro kalibraci a validaci evakuačních modelů (blíže viz Příloha G).

Data jsou extrahována z videozáznamů pomocí nástroje DFS (ukázka blíže viz obr. 3.8), který je vyvíjen s námi spolupracující firmou RCE Systems. Takto získané trajektorie osob mohou být využity pro kalibraci a validaci modelů podstatně lépe než dosud využívaná profilová měření, která hodnotí pouze některé dílčí veličiny, např. rychlost pohybu osob v daném místě, evakuační čas z části objektu jako celku, ale nejsou už schopna postihnout chování jednotlivců ani celé skupiny ve větší míře detailu. Například některé nástroje (i námi preferovaný Pathfinder) pro simulaci pohybu osob a jejich případnou evakuaci umožňují také export a následnou analýzu trajektorií jednotlivých osob v rámci celé skupiny. Trajektorie, získané ze simulace, lze následně analyticky vyhodnotit oproti trajektoriím skutečných osob (získaných z videozáznamu) za stejné/podobné situace.



**Obr. 3.8:** Ukázka extrakce dat z videozáznamu pomocí DFS – detekce osob s id a jejich vzdálenosti vůči překážkám/osobám (vlevo) a aplikace profilového měření do extrakce dat z videozáznamu (vpravo) (zdroj: převzato od RCE Systems [220])



## Kapitola 4

# Aplikované metody pro bezpečnostní posouzení

Pojem bezpečnost je vykládán jako ochrana před hrozbami a riziky, vytvoření optimalizovaného řešení z pohledu dostatečného technického a technologického vybavení systému (v našem případě stavby) pro zajištění maximální možné míry bezpečí (s ohledem na ekonomickou stránku věci) [515]. Pro její zajištění bývá využívána tzv. analýza bezpečnosti, nebo také jinak analýza rizik, která je účinným proaktivním opatřením pro hodnocení bezpečnostních rizik při provozu a při vzniku nouzových situací systémů (staveb). Analýzou bezpečnosti ověřujeme, zda je systém schopen odolávat známým a předvídatelným hrozbám, aby byla zachována struktura, stabilita a spolehlivost systému a zajištěny přijatelné podmínky pro jeho uživatele. I při analýze bezpečnosti staveb z pohledu PBR a ochrany měkkých cílů je zvláště věnována pozornost bezpečnosti, ochraně zdraví a života osob, které jsou především řešeny evakuací. Evakuaci lze definovat jako rychlý a bezpečný přesun osob (zvířat) z míst nebo staveb zasažených mimořádnou událostí (jako je např. požár, výbuch, havárie apod.), které ohrožují osoby na jejich zdraví a životech na místo, které je bezpečné. Jedním ze stěžejních předpokladů pro bezpečnost budovy, nejen z pohledu PBR, je bezpečná evakuace, a proto se i tato práce dále zabývá zejména analýzou evakuace osob.

### 4.1 Metody posouzení

Evakuační modelování je multidisciplinární věda zahrnující různorodé oblasti výzkumu, mj. psychologii, požární bezpečnost, sociologii, fyziku, matematiku, fyziologii, chemii, informatiku atd. [293]. K dosažení stanovených cílů práce je nutno shromáždit poznatky z realizovaných aplikací numerických modelů a přeměnit tyto v ověřené postupy pro řešení problémů z různých perspektiv. Použité metody by měly být zaměřeny na sběr informací potřebných k vyřešení dílčích cílů, validaci a verifikaci modelů, případně ověření použití různých strategií a nástrojů pro sestavení postupů v souladu s platnou legislativou při aplikaci numerických modelů, jako funkčního a efektivního nástroje, jelikož nevhodná volba modelu či špatně zvolená strategie modelování může výrazně snížit kvalitu výsledků a ovlivnit i jejich spolehlivost či použitelnost.

Následující odstavce kapitoly se zabývají metodologickými aspekty užitými během tvorby této práce, zejména posouzením evakuace osob dle:

- postupů ČSN,
- numerickým modelováním.

### 4.1.1 Posouzení evakuace dle ČSN 73 08XX

Principy analytického posuzování evakuace osob z budov vycházejí z požárního kodexu *ČSN 73 08XX*. Jedná se o ucelenou sadu zjednodušených výpočetních metod s návazností na tabelární hodnoty vycházející zejména z norem *ČSN 73 0802 Nevýrobní objekty* a *ČSN 73 0804 Výrobní objekty*. Základní jeho principy byly již zmiňovány v kap 1.3.1. Samotná aplikace metod přístupu ČSN při posuzování evakuace osob je pak rozvedena v následujících odstavcích.

#### Obsazení objektu osobami

Dle normové hodnoty z *ČSN 73 0818* je pro jednotlivé místnosti (s výjimkou místností, kde se nepředpokládá trvalý pobyt osob – např. chodby, hygienické zázemí, ÚC atd.) dle jejich účelu stanoven příslušný počet osob. Tento počet je stanoven na základě taxativních hodnot počtu m<sup>2</sup> připadajících na osobu v rámci provozu, či dle stanoveného koeficientu, kterým se přenásobuje navrhovaný počet osob (vždy je uvažován nejvyšší počet osob v místnosti). Když není možno využít ani jednu z uváděných variant, je projektem navrhovaný počet osob přenásoben koeficientem 1,5 (tzn. navýšení počtu osob o 50 %). Je-li objekt obsazen osobami, dochází k tzv. přerozdělení osob do jednotlivých směrů úniku, a to rovnoměrně, bez ohledu na vzdálenost a znalost objektu.

#### Rozdělení únikových cest

Primárně pro nevýrobní objekty jsou únikové cesty (ÚC) děleny podle stupně ochrany na:

- **Nechráněné únikové cesty (NÚC)** – trvale volný komunikační prostor, směřující z posuzovaného požárního úseku (PÚ) k východu na volné prostranství nebo do chráněné únikové cesty (CHÚC). Mají konkrétní délková a výšková omezení (mezní délky ÚC a převýšení podlaží) a lze je vést přes jeden sousední PÚ.
- **Chráněné únikové cesty (CHÚC)** – trvale volný komunikační prostor bez požárního zatížení, vedoucí k východu na volné prostranství a zabezpečující ochranu proti účinkům požáru (chodba, schodiště, evakuační výtah). Dle dispozičního (limitní dimenze, s/bez předsíně), konstrukčního a technického provedení (větrání přirozené, nucené, kombinované nebo přetlakové) jsou děleny do 3 typů CHÚC – A, B a C.
- **Částečně chráněné únikové cesty (ČCHÚC)** – zejména se vyskytují u změn staveb a u výrobních objektů. Oproti CHÚC mají snížené požadavky na požární odolnost konstrukcí, požární větrání apod.

#### Počet ÚC

Základní zásada při návrhu PBR je, že z každého posuzovaného místa musí být dostupné nejméně dvě samostatné ÚC, vedoucí různými směry na volné prostranství nebo do CHÚC. Pouze jeden směr úniku je povolen jen výjimečně za určitých podmínek (vyhovující mezní délky, limitní počet osob v budově, členění do min 3 PÚ).

#### Užití ÚC – specifický provoz

Při náhledu do projektových norem požárního kodexu *ČSN 73 08XX* jsou pro ÚC stanoveny specifické požadavky, které jsou nejpřísnější pro stavby posuzované např. dle *ČSN 73 0831 Shromažďovací prostory* a *ČSN 73 0835 Budovy zdravotnických zařízení a sociální péče* – typu zařízení – ambulantní, lůžková, sociální péče. Jsou zde stanoveny specifické požadavky na kapacitu evakuačních výtahů, plošné navýšení dimenze koridorů pro přesun lůžek ze sousedního PÚ, zvýšené požadavky na požární odolnosti materiálů a technické vybavení ÚC.

#### Posouzení – přepravní kapacity

Základem jejich posouzení je pouze zhodnocení přepravní kapacity a možnost jejich provozu při požáru.

- **Eskalátory** není možné považovat za jedinou ÚC, vyjma speciálních případů staveb, např. stavba metra. V rámci vzniku požáru dochází k jejich úplnému zastavení nebo

zastavení eskalátoru směřujícího proti směru úniku a jeho vyčlenění pro IZS (jsou-li k dispozici dva eskalátory, pak jeden jede v směru úniku a druhý stojí; jsou-li k dispozici tři eskalátory, tak dva jsou v provozu ve směru úniku a třetí stojí).

- **Výtahy** rozlišujeme na konkrétní typy dle jejich provozuschopnosti – evakuační výtah (pro samovolnou evakuaci), požární výtah (pro zásah a evakuaci) nebo běžný výtah (za požáru nefunkční). Výpočet přepravní kapacity evakuačních výtahů pro osoby neschopné samostatného pohybu, lze stanovit dle vzorce (např. pro počet evakuačních výtahů  $X$  pro jedno podlaží, dle Přílohy B, ČSN 73 0835 vztah):

$$X = \frac{L \cdot (t_m + t_n + \frac{H_1}{v} + 10)}{30 \cdot t_p} \quad (4.1)$$

kde

$L$  ... počet evakuovaných osob (lůžek) z posuzovaného podlaží [-],

$t_m$  ... časová ztráta rozjezdem [s],

$t_n$  ... časová ztráta otevření a zavření dveří [s],

$H_1$  ... výškový rozdíl mezi nástupní a výstupní plochou [m],

$v$  ... jmenovitá rychlost výtahu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$t_p$  ... doba, po kterou je zajištěn provoz výtahu [min].

Celkový počet evakuačních výtahů pro posuzovanou budovu je stanoven součtem všech výtahů pro jednotlivá podlaží se zaokrouhlením nahoru.

### Mezní délky ÚC

Tento parametr je nutné posoudit zejména u ÚC s jedním směrem úniku. Díky němu dochází často ke změnám návrhu umístění schodištvých jader a rozmístění únikových východů. Mezní délka NÚC  $l_{\max}$  je dána tabelárně v závislosti na součiniteli a počtu ÚC (v některých případech lze prodloužit o max. 50 %). Skutečné délky  $l_{\text{skut}}$  se v návrhu měří od nejzazšího místa v PÚ až do CHÚC, nebo k východu na volné prostranství.

$$l_{\max} > l_{\text{skut}} \quad (4.2)$$

Mezní délky CHÚC se stanovují pouze pro typ A, kdy se jedná o jedinou ÚC,  $l_{\max} = 120$  m

### Mezní šířky ÚC

Mezní šířka NÚC a CHÚC  $u$  vychází z obsazenosti objektu osobami a jejich přerozdělení mezi únikové směry. Jsou posuzována tzv. kritická místa (zúžená místa, kde může dojít k nahromadění osob – jako např. schodiště, dveře, zúžená místa v koridoru, místa, kde dochází ke změně počtu prchajících osob atd.) a jejich šířka je přepočítávána na počet únikových pruhů (ÚP) se zaokrouhlením směrem nahoru. Šířka jednoho ÚP je pro jednu osobu stanovena na 550 mm.

$$u = \frac{E}{K} \cdot s \quad (4.3)$$

kde

$E$  ... počet evakuovaných osob z posuzovaného místa [os.],

$K$  ... počet evakuovaných osob v posuzovaném kritickém místě (určováno v závislosti na úniku osob – po rovině, po schodech dolů, po schodech nahoru) [os.],

$s$  ... součinitel vyjadřující podmínky evakuace (evakuace současná/postupná) [-].

Min. šířka ÚC  $u_{\min}$  pro:

- NÚC = 1 ÚP (550 mm),
- CHÚC = 1,5 ÚP (825 mm), kde dveře šířky 800 mm jsou uvažovány jako vyhovující.

(u specifických staveb mohou být požadovány větší šířky ÚC)

$$u > u_{\min} \quad (4.4)$$

### Doba zakouření akumulární vrstvy

Doba zakouření  $t_e$  je čas, po který je únik z hořících prostor po NÚC pro evakuované osoby bezpečný, konkrétně se jedná o časový limit, kdy ještě zplodiny a kouř nezaplňují prostor 2,5 m nad podlahou (pro garáže 1,9 m).

$$t_e = \frac{1,25 \cdot \sqrt{h_s}}{a \cdot c} \quad (4.5)$$

kde

$h_s$  ... světlá výška posuzovaného prostoru [m],

$a$  ... součinitel vyjadřující rychlost odhořívání [-],

$c$  ... součinitel vyjadřující vliv požárně bezpečnostních zařízení [-].

### Předpokládaná doba evakuace

Při posuzování doby evakuace  $t_u$  z objektu používáme základní vztah 4.6, kde první člen popisuje dobu potřebnou k překonání vzdálenosti k východu (0,75 je koeficient vyjadřující skutečnost, že všechny osoby neběží stejnou cestou) a druhý člen definuje dobu potřebnou pro průchod všech osob nejužším posuzovaným místem evakuační cesty (např. kritické dveře). Předpokládaná doba evakuace se stanovuje samostatně pro každou NÚC, CHÚC i ČCHÚC.

$$t_u = \frac{0,75 \cdot l_u}{v_u} + \frac{E \cdot s}{K_u \cdot u} \quad (4.6)$$

kde

$t_u$  ... doba pohybu osob objektem [min],

$l_u$  ... skutečná délka únikové cesty [m],

$v_u$  ... rychlost pohybu osob [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] (v případě posuzování evakuační cesty, kde je složený pohyb – po schodech dolů, po rovině, po schodech nahoru – je uvažována nejpomalejší rychlost, nebo rychlost, která nejvíce převládá),

$s$  ... součinitel podmínek evakuace [-],

$K_u$  ... jednotková kapacita únikového pruhu [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ],

$u$  ... počet únikových pruhů [-],

$E$  ... Počet evakuovaných osob z posuzovaného místa [os.].

Doba zakouření akumulární vrstvy  $t_e$  se porovnává s předpokládanou dobou evakuace  $t_u$ , a zde musí platit:

$$t_u \leq t_e \quad (4.7)$$

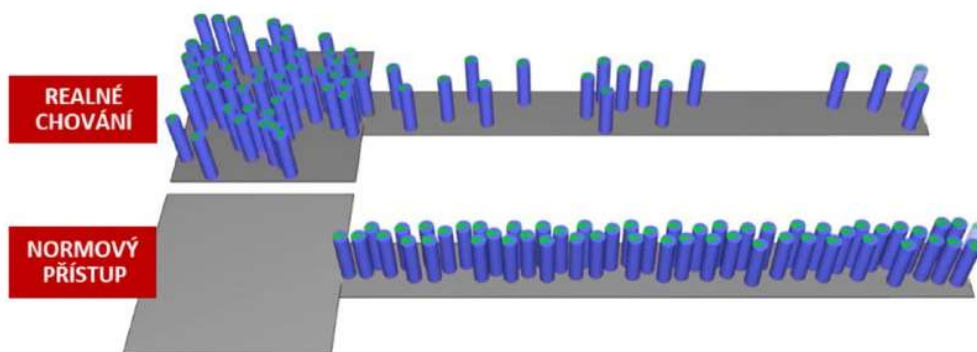
(osoby jsou z posuzovaného prostoru evakuovány dříve, než dojde k jeho zakouření).

### Zhodnocení analytického postupu dle ČSN

Při posouzení na základě výpočtu dle ČSN 73 0802 dochází k míře zjednodušení, která s sebou přináší určitá omezení, neboť popis procesu evakuace je pouze rámcový, vycházející z kapacity, dimenzí ÚC a poměrně malých evakuačních rychlostí evakuovaných osob (zohlednění bezpečnostního koeficientu normotvůrcem). Nedochází zde k reálnému zohlednění osob se specifickými potřebami (osoby na vozíku, o berlích, s nutností asistence – toto se zohledňuje pouze u výpočtu ÚP) a tyto osoby jsou uvažovány jako pohybu schopné, bez ohledu na



možný terén (schody, velké vzdálenosti apod.). Základním výpočtem dle ČSN 73 0802 není zohledňován vliv hustoty davu na rychlost osob při evakuaci. Tento vliv je naopak již částečně zohledněn u NÚC staveb výrobních, posuzovaných dle normy ČSN 73 0804 (připadá-li na osobu menší plocha, než  $2 \text{ m}^2$ , dochází ke snížení rychlosti, naopak je-li tato plocha větší jak  $10 \text{ m}^2$ , je možné navýšit rychlost v NÚC až o 25 %). Názorné srovnání reálného pohybu a chování osob s normovým přístupem je uvedeno blíže na obr. 4.1.



**Obr. 4.1:** Příklad dvou stejných skupin osob ve stejném čase, kde první skupina reprodukuje reálné vzorce chování (nahore) a druhá se řídí pravidly normového přístupu (dole) (zdroj: vlastní, z [388])

#### 4.1.2 Posouzení evakuace s využitím modelu

Přístup numerického modelování evakuace osob oproti analytickému přístupu funguje na principu časoprostorové diskretizace, která umožňuje ztvárnit celou řadu okrajových podmínek, včetně korelované prostorové variability, a na rozdíl od analytické formulace, kdy se uvažuje pouze s vybranými jednoduchými okrajovými podmínkami. Čas a prostor jsou diskretizovány na konečný počet dělení (kroků oblasti), ve kterých je pomocí agentních technologií ztvárněno vlastní chování a pohyb osob (principy agentních modelů a spojitých/diskrétních sítí jsou dále popsány v kap. 4.1.2). Jak již bylo zmiňováno v kap. 1.2, existuje více přístupů numerického modelování evakuace osob, ale pro účely této práce byly vybrány agentní modely [500, 92], o kterých i nadále bude hovořeno. Agentní modely ztvárňují každou osobu jako samostatného agenta reagujícího (jednajícího) v návaznosti na aktuální okolní podmínky a stav sousedních agentů. Pokročilé modely dokáží lépe popsat realitu a ztvárnit větší úroveň detailu než jiné numerické modely (interpretace prostoru, vybavení, osob a jejich vlastností apod.), modelovat specifické prvky provozu (eskalátor, výtah, překážky, prvky PBZ atd.) a v neposlední řadě i vlastnosti a chování osob (věk, mobilitu, složení, sociální vazby apod.) a lokální formulace pravidel.

Na základě vlastních zkušeností a výsledků průzkumů [337, 470, 472], které se zabývají vhodností užívání dostupných evakuačních modelů z hlediska interpretací reality, zohlednění vnějších vlivů (interakce, kouř, vybavení), chování osob, možností ztvárnění posuzovaného prostoru apod., byly vyhodnoceny pro potřeby komplexního posouzení evakuace z pohledu PBŘ jako nejvhodnější behaviorální agentní modely, převážně se spojitou sítí, např. nástroj Pathfinder [406], [404]. Pathfinder byl zvolen i jako hlavní nástroj pro tvorbu dílčích modelů, případových studií a demonstrací využití numerického modelování evakuace osob v rámci této práce. Samotné základní dělení numerických modelů evakuace osob bylo již nastíněno v kap. 1.2 a jejich detailnější dělení pro pochopení jejich principů je pak uvedeno v Příloze C.

#### Abstrakce modelu

Numerický model evakuace osob usiluje o reprodukci reálného systému (např. dům plný lidí, stanice metra, atd.) při konkrétní situaci (např. propuknutí požáru, evakuace). Realita



je v rámci problematiky evakuace osob velmi komplexní a obsahuje celou řadu náhodných a neurčitých parametrů, jako jsou např. behaviorální vlastnosti osob, jejich chování, rozhodování, vnější vlivy okolí apod. Protože ale taková reprodukce reálného systému vyžaduje teoreticky nekonečně velké výpočetní prostředky, musíme se spokojit s abstraktním popisem reality, kdy vycházíme z dostupných výpočetních prostředků na jedné straně a požadavků na přesnost a zachycení vhodné míry detailů na straně druhé. Evakuace osob ze staveb je tzv. mnohorozměrným problémem, pro který aplikace numerických modelů vyžaduje dobrou znalost problematiky a zkušený inženýrský úsudek modeláře – samotná volba je kompromisem jednotlivých vah (také je nutné dávat pozor na přeurčitost a citlivost vstupních parametrů). Pro simulace evakuace osob je vytvořen tzv. abstraktní model (dále jen model), pro který je inženýrským úsudkem určována vhodná míra zjednodušení (např. časový krok, typ sítě, typy a počet chování apod.). Poté co je zvolen vhodně zjednodušený model reality, tzn. „abstraktní model“, je možné začít simulovat, tj. využít modelu s cílem studia konkrétních problémů, sledování procesů (samoorganizace), jevů (úzké hrdlo), vzorců chování osob (předbíhání), hledání parametrů a jejich citlivostí (evakuační čas) – získání tak odpovědí na otázky, hypotézy apod. Výsledné numerické modely jsou komplexní a stochastické ve srovnání s analytickými metodami – díky náhodné povaze vstupních parametrů a okrajových podmínek, které popisují pohyb a chování osob, pro které nemáme přesná vstupní data nebo zkušenosti (např. rozhodování, individualita, povaha osob atd.) – individuální proměnné každého jedince. Simulace založené na abstraktních modelech je možné využít pro pochopení citlivosti kap. 5.2 a identifikaci významných parametrů procesu evakuace. Modely a jejich parametry je možné verifikovat pomocí experimentů (z důvodu ceny a složitosti realizace pouze vybrané části), nebo tzv. simulovaných hypotetických studií, což je značnou výhodou proti experimentům, jelikož jsou nákladově efektivnější.

V rámci numerických metod je nutné také věnovat zvýšenou pozornost overfittingu (chybě modelování způsobené přizpůsobením modelu konkrétní vstupní sadě dat, což může být irelevantní pro jiná vstupní data) a overdeterminismu (stavu, kdy účinek je určen několika příčinami, přičemž by každá z nich sama o sobě stačila k zohlednění účinku → přeurčitost problému). Numerické metody jsou schopné interpretovat původ pozorované variability chování osob a přispět tak do určité míry ke kontrole vrozené neurčitosti. Numerické modely využívají matematické postupy, jejichž numerická metoda by měla obsahovat odhad chyby. Základní charakteristikou numerických metod je stabilita konvergence, kterou lze regulovat např. počtem kroků, uzlů či iterací. Numerické metody lze využít pro zvýšení bezpečnosti stávajících budov, nebo již ve fázi návrhu staveb [19] či infrastruktury [11].

### Prediktivní schopnost modelu

Před vlastním posouzením evakuace osob je nutno zvážit použité metody posuzování a jejich prediktivní schopnosti. Jelikož proces evakuace osob skýtá více proměnných (aspekty lidského chování, dimenze těla, rychlost osob, jejich hybnost atd.), je třeba užít takových metod, u kterých je možné řešit nejistotu jak vstupních parametrů, tak i získaných výsledků. To je důležité zejména v případech krizových událostí či požáru, při kterých je lidské chování díky stresovým faktorům velmi proměnlivé [295, 191, 292].

V rámci numerického modelování se setkáváme zejména s těmito typy nejistot [388]:

- **Nejistota vstupů modelu** – jedná se zejména o nejistotu aplikovaných hodnot vstupních podkladů a parametrů, která může být výsledkem nejistoty samotných empirických dat (jejich přesnosti měření, špatnému matematickému zpracování empirických dat).
- **Vnitřní nejistota** – nejistota související s implementovanou výpočetní metodou (vnitřní uspořádání, užití algoritmů a konkrétních předpokladů).
- **Behaviorální nejistota** – nejistota spojená se stochastickými parametry implementovanými do modelu, s cílem pokrytí všech aspektů reálného lidského chování.

- **Nejistota statistického zpracování výsledků** – simulaci modelu je třeba spustit opakovaně (s MC) a provést korektní statistické vyhodnocení (minimálně střední hodnota výsledků, směrodatná odchylka, interval spolehlivosti), blíže viz kap. 4.3.

Nejistoty je možné dále dělit na epistemické a aleatorní, které se nedají jednoznačně oddělit, a ani je nelze zcela zredukovat – v případě aleatorních (vrozených) nejistot je nelze zredukovat [426, 427, 135].

- **Aleatorní nejistoty** – vrozená (přirozená) variabilita, kterou jsme schopni jen velmi málo ovlivnit. Je předurčená a v modelu evakuace reprezentuje nepředvídatelnost lidského chování a sociálních faktorů (např. IQ, rychlost chůze, chování, myšlení atd.), díky těmto jevům je omezena prediktivní schopnost modelu v reálném prostředí.
- **Epistemické nejistoty** – na rozdíl od vrozené variability je možné ji redukovat (snížení chybovosti měření, redukce zjištěním, studiem literatury, učním se postupů, zvýšením kvalifikace a zkušeností apod.). Týká se to především validity samotného modelu (čím přesněji je realita v modelu reprezentovaná, tím je nejistota menší). Jedná se např. o lidský faktor (chybovost, nepozornost, neznalost), schopnost osoby, vědomosti osoby atd.

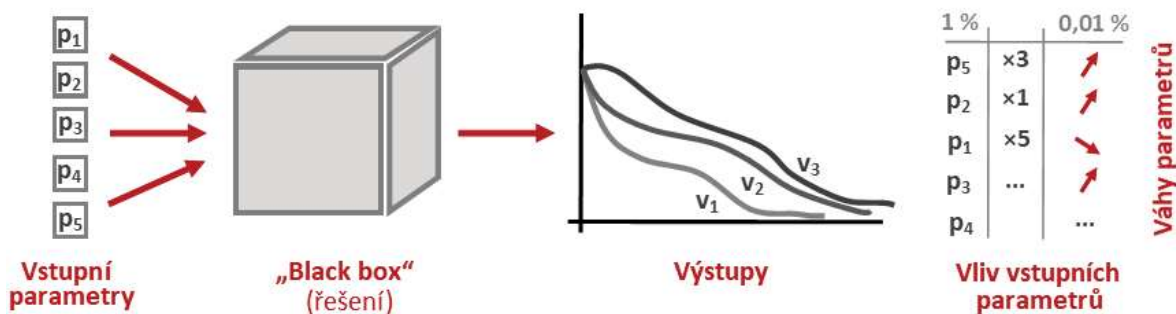
Nejistoty v modelu lze redukovat použitím několika základních strategií nebo jejich kombinací, jak je uvedeno například v [469, 135]. Může se jednat o kontrolu a volbu korektních dat (blíže viz kap. 4.2), aplikaci bezpečnostních faktorů, užití citlivostní analýzy, volbu menšího počtu nejistých parametrů, použití robustnějšího a lépe validovaného modelu nebo korektní statistické zpracování dat.

#### **Aplikace bezpečnostních faktorů**

Jedna z nejjednodušších metod, která je využívána při inženýrských analýzách v případech, kdy jsme si vědomi, že užitý model je ovlivněn nejistotou, nebo když je komplexní testování neúčelné. V případě analýzy evakuace osob jsou bezpečnostní faktory použity zejména ve vstupním kalibračním kroku, kde dochází nejčastěji k úpravě hodnoty proměnné, čerpané z literatury. Další využití bezpečnostních faktorů je například v průběhu analýzy výstupních dat, kde uživatel provede odhad nejistoty související s určitým aspektem procesu evakuace a definuje hodnotu bezpečnostní konstanty, kterou se výsledná hodnota vynásobí, nebo se k ní přičte (např. RSET). Hodnota bezpečnostního faktoru (konstanty) může být stanovena na základě číselných výstupů podobných scénářů/staveb dle jiných metod, jiného modelu, experimentu či samotné inženýrské zkušenosti uživatele (modeláře).

#### **Analýza citlivosti (Sensitive analysis, SA)**

Metoda, která je využívána pro testování nejistoty a citlivosti celkového výsledku, v našem případě předpovědi evakuace osob. SA je studie výstupů modelu ve vztahu k různým variacím jednotlivých vstupních parametrů modelu [482]. Primárně je využívána uživateli (modeláři) k porozumění fungování či posouzení vhodnosti nového nástroje. SA je používána ke zhodnocení vlivu vstupních kombinací parametrů na konečný výsledek. Citlivostní studie identifikují nejvýznamnější parametry a jejich vliv na celkový výsledek simulace (SA je užívána často i opakovaně). Říká, jaký má parametr vliv na výsledek (rostoucí/klesající trend), následně je tvořena stupnice citlivosti (jak reaguje model, na které vstupy a jak moc je citlivý) a na závěr je hodnocena unikátnost řešení. Principem SA je postupné zkoušení jednotlivých (samostatných) parametrů nástroje – návod k SA postupu pro evakuační modely (konkrétně pro stavby typu budova) uvádí například J. Lord ve svém článku [330]. SA byla provedena i v rámci studie G. Grewolls [190], konkrétně pro vstupní parametry nástroje Pathfinder (jak pro vstupní parametry osob, tak geometrie i samostatně stochastických prvků).



Obr. 4.2: Proces identifikace nejvýznamnějších parametrů (zdroj: vlastní)

### Parametrické studie

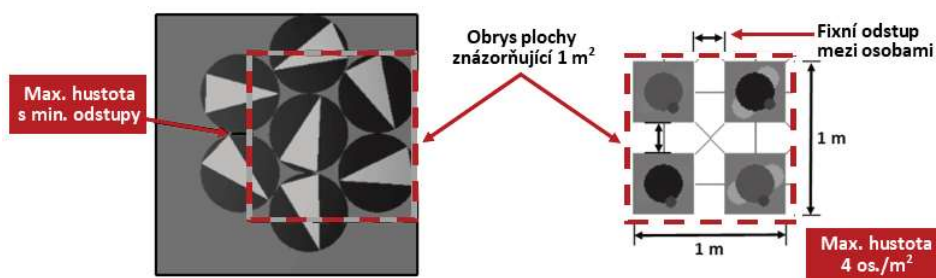
Parametrické studie se zabývají vlivem vstupních parametrů na vybrané výstupní veličiny (na celkové řešení problému). Na rozdíl od citlivostních studií nepočítáme s rovnoměrným pokrytím návrhového prostoru, ale systematicky vybíráme pouze pro daný problém relevantní kombinace vstupních parametrů. Umožňují návrhářům zhodnocení vlivů konkrétních parametrů na výsledky řešení a rozhodování o nejvhodnějším návrhu. Modelář obvykle provádí parametrizaci pomocí jednoduchých či více parametrických scénářů návrhu a následně vstupní kombinace jsou konkrétním podkladem pro simulace. Příkladem může být vliv délky únikové cesty na evakuační čas, vliv počtu únikových východů na evakuační čas [285, 20], vliv překážek, vliv pasivní/aktivní ZOKT na podmínky evakuace, vliv šířky únikového schodiště na evakuační čas, vliv počtu osob či vliv složení populace (hendikepovaní, děti, mladí, senioři apod.) atd., nebo viz kap. 5.2. K parametrickým studiím je možné přistupovat jako k nastavení vstupní proměnné (či více proměnných), jako cíli studie nebo k porovnáním cílů v rámci různých sad parametrů. V rámci parametrických studií je možné zvažovat výhodnější varianty řešení (bezpečnostně, technicky, ekonomicky), než je řešení aktuální.

→ Citlivostní a parametrické studie jsou také využitelné pro kvantifikaci robustnosti modelu, ověření jeho spolehlivosti a zároveň jsou i nástrojem optimalizace. V rámci práce vzniklo velké množství parametrických a citlivostních studií (viz kap. 5), které slouží k ověření bezpečného užívání numerických modelů evakuace osob. Jedná se o postupy, kdy výsledky simulací nejsou předvídatelné a pomocí studií je ověřeno, zda se nejedná o náhodu.

### Principy agentních modelů

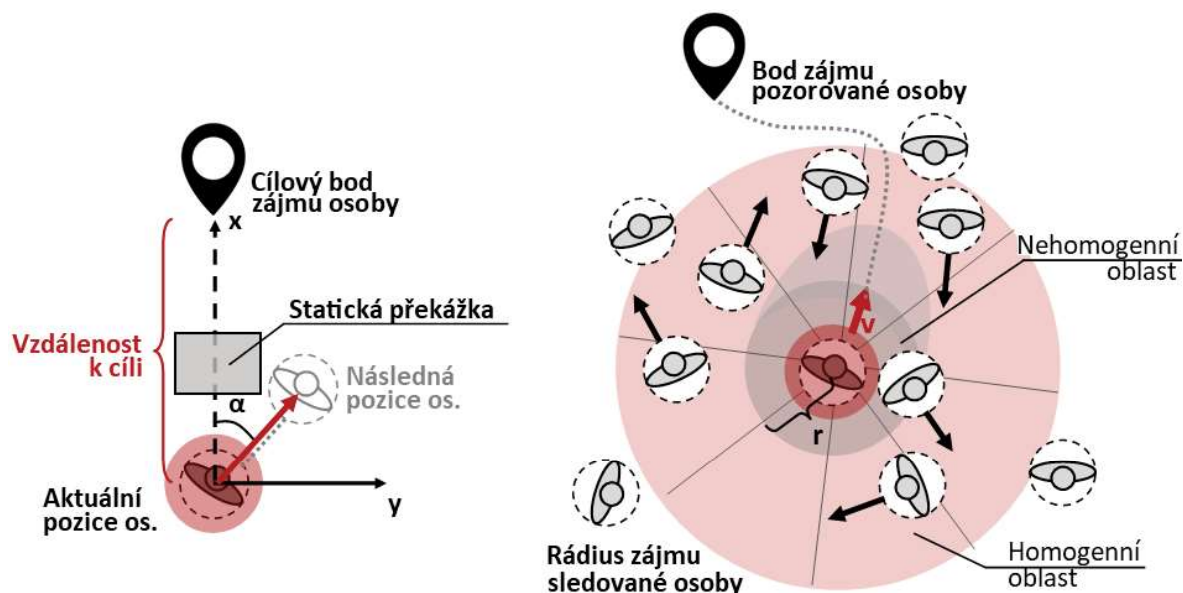
Pro začátek je nutné definovat, jak je chápán základní rozdíl mezi modelem a simulací. Model je fyzickou nebo digitální reprezentací konkrétně řešeného systému (budovy obchodního centra, koridoru v dopravním uzlu, prostoru nádraží apod.), který je popsán vstupními parametry (rozměry geometrie, počet lidí, procentuální zastoupení atd.) a okrajovými podmínkami. Simulace je procesem, kdy využíváme model ke studiu stávajících nebo navrhovaných charakteristik systému, zkoumaných jevů, chování, procesů, pozorovaných parametrů apod. Účelem simulace je studium charakteristik reálného nebo teoretického systému díky manipulaci s proměnnými, které v reálném systému nelze ovládat.

Pokročilé modely často fungují na dvojrozměrné spojitě síti, sestavené z trojúhelníkových ploch, na kterých probíhá pohyb osob bez technického, výpočetního nebo prostorového omezení, na rozdíl od modelů s diskretní sítí. Při jejím použití tak lze docílit vyšší lokální hustoty, které jsou důležitým hodnotícím kritériem bezpečné evakuace než v případě diskretní sítě, jak je patrné i z obr. 4.3.



Obr. 4.3: Ukázka prostorového ztvárnění maximální hustoty – model se spojitou sítí (vlevo), model s diskrétní sítí (vpravo), (zdroj: vlastní)

Modely využívají tzv. agentů, díky nimž je každý chodec popsán jako samostatná entita (agent) s přesně definovanými vlastnosti. Chování davu je pak určeno vzájemnými interakcemi jednotlivých agentů mezi sebou (např. přirozenou tendencí se vyhýbat vzájemným srážkám, změna fronty v případě dlouhého čekání apod.) a interakcí mezi agenty a okolím (např. hledají nejbližší únikový východ nebo překonávají překážky), obr. 4.4. Pro výběr únikové cesty pak model využívá algoritmu označovaného „místně nejrychlejší“, osoba je tak schopna vyhodnotit velikost fronty a vzdálenost k dalším dveřím. Modelování pohybu osob pomocí těchto agentních technologií tak představují zatím nejvěrohodnější využívané ztvárnění pohybu a chování osob [28].



Obr. 4.4: Schéma principu pohybu agentů v modelu – pohyb agenta k cíli a statická překážka (vlevo), pohyb agenta k cíli a vliv rádus zájmu s výskytem mobilních překážek v podobě okolních agentů, kde lze rychlost vyjádřit  $r = 2 \times |v|$ , (zdroj: vlastní, přepracováno z [537])

### Výpočetní režimy

Při pokročilém modelování pohybu osob při evakuaci jsou zpravidla využívány základní dva výpočetní přístupy – režimem SFPE [376, 177] a režimem inverzního řízení (Steering) [462, 6]. Srovnání jejich vlivu na výsledek je interpretováno ve studii kap. 5.2.1 nebo v pracích [11, 23].

#### Režim SFPE (= Society of Fire Protection Engineers)

Režim SFPE vychází z principů prezentovaných v SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [376] a The SFPE Engineering Guide: Human Behavior in Fire [177]. Pohyb je v režimu SFPE založen na modelu proudění, kdy je pohyb osob v modelu řešen jako tok, ovlivněný především hustotou osob v jednotlivých místnostech a rychlost chůze osob je určována dle kinetické teorie látek (makroskopické pozorování stavu s mikroskopickým pohybem částic) v závislosti na terénu [406]. Maximální rychlost chůze osob je funkcí závislou na hustotě

totě osob v místnosti a efektivní šířce dveří (rychlost toku osob skrze dveře a úzké koridory je určena dle jejich parametrů, blíže viz odst. *Dveře*).

Přestože se jedná o agentní model, fundamentální principy tohoto výpočetního režimu se blíží spíše makroskopickým modelům (CFD). Jednou ze základních vlastností režimu SFPE je fakt, že mezi chodci nedochází k fyzickým srážkám a stejný prostor může obsadit více osob, což je v praxi nereálné. Dochází k vzájemnému „překrytí“ osob, zejména v místech vzniku front → kde dochází i k nárůstu hustoty, což má vliv na pohyb osob (zpomalení rychlosti). Toto přirozeně vede k odlišným výsledkům evakuace a limituje také možnosti vizuálního vyhodnocení – např. vstup osoby do EXITu neznamená pouze odejití osoby z modelu, ale také frontu velkého počtu osob ztvárněnou na jednom místě jako půdorys jedné osoby.

### Režim inverzního řízení (= Steering)

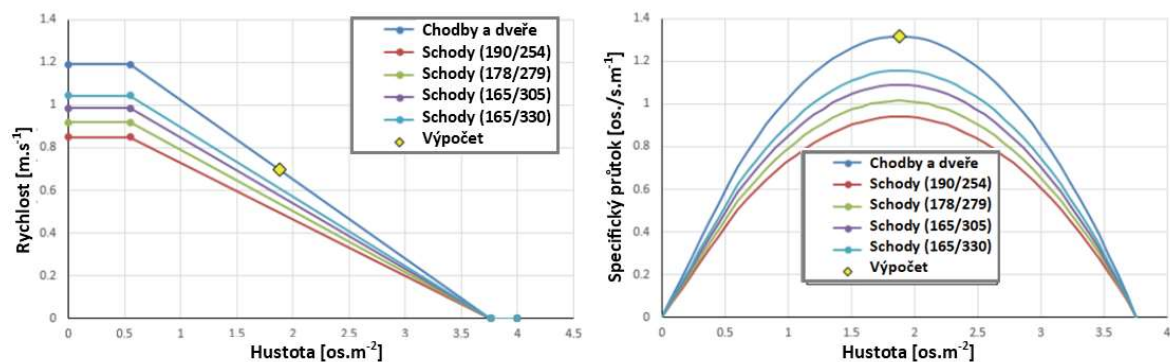
Režim inverzního řízení lze označit za komplexnější a obecně pokročilejší nežli SFPE. Je založen na myšlence inverzního chování. Toto chování při řízení agentních osob bylo poprvé představeno v článku C. Reynoldse [462] a později došlo k jeho zdokonalení v práci H. B. Amor [6], která se později stala i základem pro tyto modely.

Režim řízení poskytuje zobrazení přirozeného pohybu chodců. Konstrukce modelu není založena na frontách pro chodce, ani na vlivu hustoty, jak je tomu u SFPE, ale na jevech, ke kterým dochází při přirozeném pohybu osob. Režim inverzního řízení předpokládá, že si každá jednotlivá osoba určí svoji trajektorii k cíli a na základě následných událostí a podnětů ji průběžně přehodnocuje – může dojít k odchýlení (např. velká fronta → výběr alternativní trasy), přičemž neustále sleduje původní naplánovanou křivku. Režim řízení ve srovnání s SFPE vykazuje v modelu kratší časy a vstup osoby do EXITu znamená její skutečné opuštění modelu.

Schody jsou v obou případech považovány za speciální oblasti geometrie, ve kterých je rychlost a dynamika pohybu osob řešena alternativním výpočtem dle zvoleného režimu, blíže viz odst. *Schodiště*.

### Výpočet rychlosti

Samotný výpočet řídicí rychlosti osob se odvíjí od volby simulačního režimu, jelikož každý z nich k jeho výpočtu přistupuje odlišně. Základní principy výpočtu rychlosti dle jednotlivých režimů jsou představeny níže.



Obr. 4.5: Základní diagramy závislosti rychlosti na hustotě (vlevo) a specifickém toku na hustotě (vpravo) pro režim SFPE (zdroj: přepracováno z [235], [407])

### Výpočet rychlosti v režimu SFPE

Základní rychlost cestujícího je v SFPE definována jako funkce hustoty, typu terénu a křivky závislosti rychlosti dle základních pěti diagramů SFPE (viz obr. 4.5). Skutečná rychlost, kterou se osoba v modelu pohybuje, se v režimu SFPE odvíjí od maximální rychlosti cestujícího (vstupní hodnota), typu terénu, po kterém se pohybuje, konstanty odvíjející se od



terénu (sklon schodiště omezuje rychlost osob), hustoty obyvatel v aktuální místnosti a případně i faktoru modifikace rychlosti, který reprezentuje účinky prostředí (kouř, navigace, eskalátory, jezdicí koberce atd.).

Základní princip výpočtu pohybu osob vychází z práce S. Gwynne et al. [202], která jej definuje jako funkci hustoty ( $\text{os}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Pokud je hustota  $< 0,55 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ , pak je rychlost osoby nezávislá na rychlosti ostatních (maximální rychlost). Funkce pro určení rychlosti při hustotách mezi  $0,55\text{--}3,79 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$  je lineární a je vyjádřena následujícím vztahem:

$$S = k - akD \quad (4.8)$$

kde

$k$  ... koeficient typu terénu,

( $k = 1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  – rovinný terén a rampy,  $k = 1,0 - 1,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  – pro sadu předdefinovaných tvarů schodišť) [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$a$  ... koeficient vycházející z půdorysného průmětu osoby,  $a = 0,266$  [-],

$D$  ... hustota osob v prostoru [ $\text{os}\cdot\text{m}^2$ ],

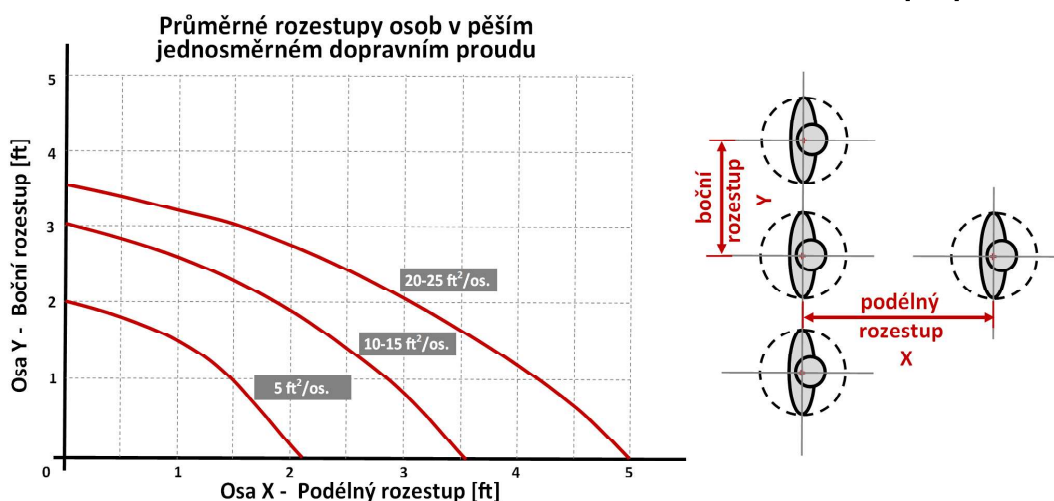
$S$  ... rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Pokud je hustota  $> 3,8 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ , je rychlost pohybu nulová.

Na výpočet rychlosti mají vliv i jednotlivé prvky geometrie modelu – v režimu SFPE jsou jednotlivé dveře vnímány jako omezovače průtoku, které spojují místnosti a schody. Tok osob skrze dveře je předepsán dle směrnic SFPE. Toto je prováděno pomocí časovače zpoždění, který řídí, jak rychle mohou cestující procházet dveřmi. Když osoba prochází dveřmi, dochází k výpočtu zpoždění na základě specifického toku dveří, které je přidáno k vlastnostem dveří. Než může projít dveřmi další osoba, musí uplynout vypočtené zpoždění, a tím je dosaženo konkrétního limitu průtoku. Pro pohyb osob po schodišti v režimu SFPE je základní rychlost ovlivněna hustotou, tvarem schodiště (pro konkrétní výšky podstupnic a hloubky nášlapů) a křivkou závislosti rychlosti – viz obr. 4.5. Dle sklonu a proporcí schodiště je omezoována rychlost pohybu osob, ale není zde rozlišena rychlost dle konkrétních typů terénu a směrů pohybu (po rovině, po schodech nahoru, po schodech dolů apod.). Naopak rampy jsou při výpočtu rychlosti uvažovány jako běžné místnosti – rychlost je stanovena dle hustoty osob na rampě bez ohledu na sklon a směr cesty.

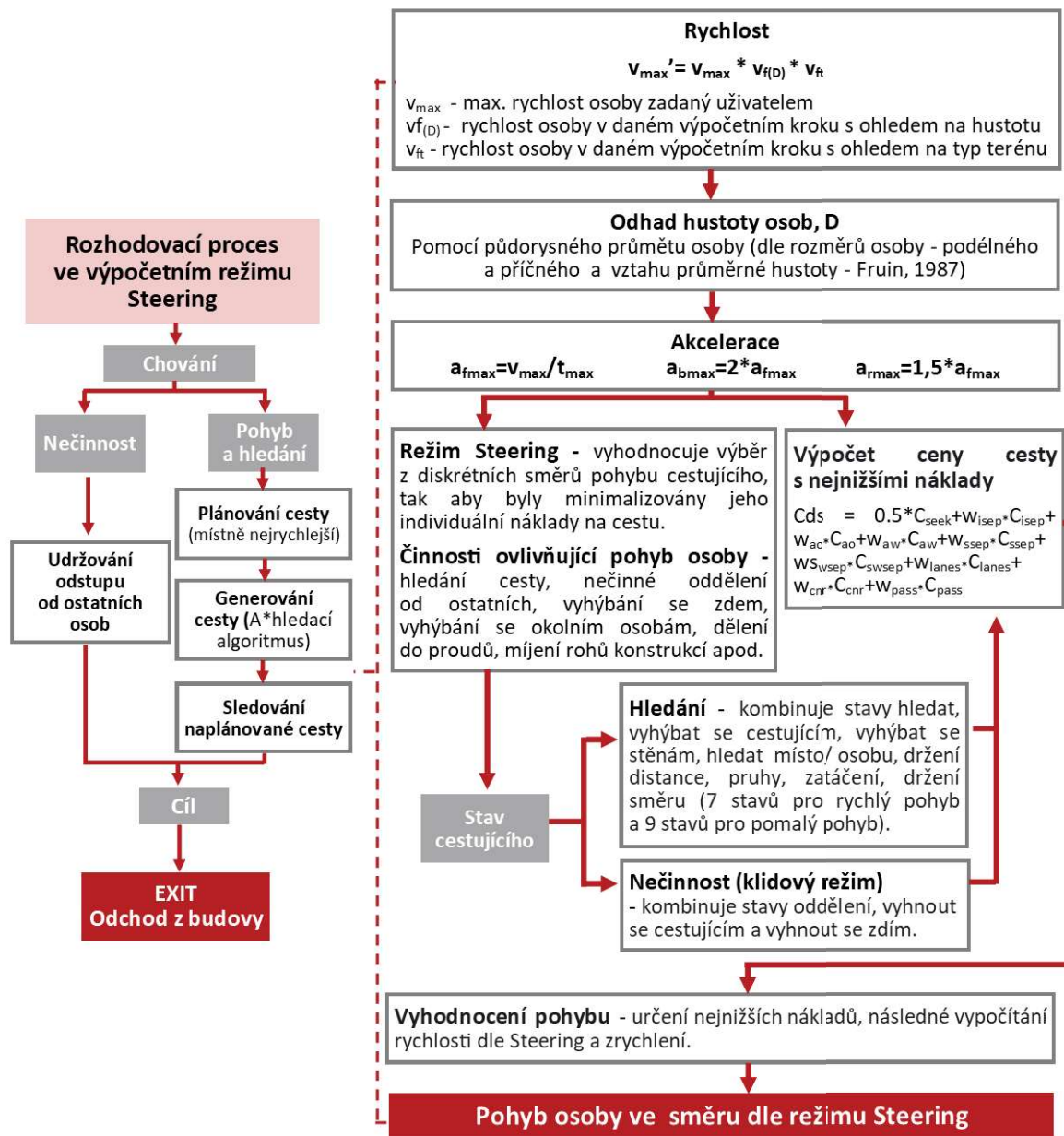
### Výpočet rychlosti v režimu Steering

Pohyb osoby je kombinací mechanismů řízení následování naplánované trasy a predikcí srážek s okolními osobami, která vychází zejména ze studie J. Fruina z roku 1971 [172].



Obr. 4.6: Příklad vývoje podélných a bočních rozstupů mezi osobami jednosměrného proudu v závislosti na hustotě osob v prostoru ( $2,32\text{--}1,85 \text{ m}^2\cdot\text{os}^{-1}$ ;  $1,39\text{--}0,93 \text{ m}^2\cdot\text{os}^{-1}$ ;  $0,467 \text{ m}^2\cdot\text{os}^{-1}$ ) (zdroj: vlastní, přepracováno z [172])

Fruin v této práci říká, že konflikt je funkcí rychlosti a vzdálenosti jednotlivých osob v dopravním proudu a je možné za něj považovat každou situaci, kde je potřeba přizpůsobit rychlost a směr chůze (zastavení, srážka, změna rychlosti, vybočení z trasy). Tyto mechanismy umožňují osobám odchýlit se od plánované trajektorie, ale stále udržovat správný směr k cíli. Např. častější odchylování od trajektorie nastává díky kolizím v prostoru již s průměrnou obsazeností  $2,32 \text{ os} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $25 \text{ person} \cdot \text{ft}^{-2}$ ). Při navýšení obsazenosti dochází primárně ke zmenšování podélných rozestupů (prostor ve směru chůze, graficky znázorněno na obr. 4.6 (vpravo)) než ke zmenšování bočních rozestupů.



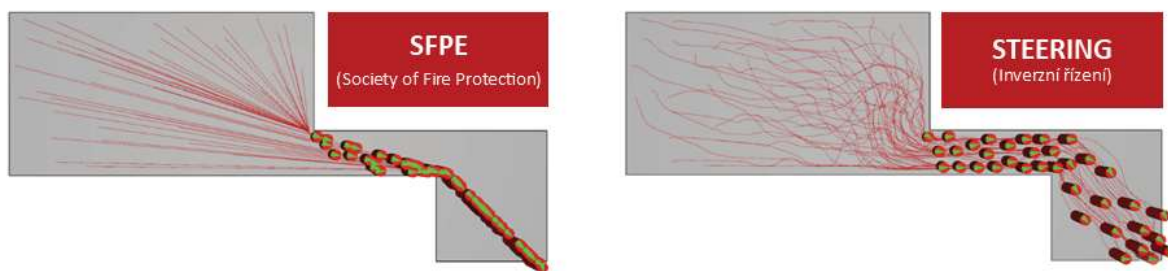
Obr. 4.7: Schéma výpočetního principu Steering – výpočet procesu pohybu osoby k cíli (zdroj: vlastní, přepracováno z [399])

Samotná rychlost osob v modelu při režimu Steering se odvíjí od maximální rychlosti (vstupní hodnota), aktuálního terénu (rovina, schody, rampa atd.) a rozestupů okolních cestujících (k odhadu hustoty). Rychlost osob je v průběhu cesty redukována okolními vlivy – např. vyhýbání se ostatním osobám, udržování odstupu od stěny, zajištění volné nepřerušované chůze apod. V režimu řízení lze výpočet složek rychlosti počítat dle nastavení SFPE, nebo mohou být uživatelem definované jako frakce lineárních funkcí (funkce hustoty cestujících

cích, funkce sklonu schodišťového/rampového ramene v závislosti na typu a sklonu terénu). K dispozici je pět základních diagramů (rovina, schody nahoru, schody dolů, rampa nahoru, rampa dolů) s různými jmenovitými rychlostmi pro každý případ, díky čemuž lze definovat různé funkce rychlosti dle pohybu osoby a typu terénu (stoupá/klesá, po schodech/rampách) a pohyb osob skrze dveře nijak omezován – na rozdíl od výpočtů SFPE. Základní princip výpočtu rychlosti a celková aplikace při simulaci evakuace je přehledně vyobrazena na obr. 4.7. Pro výslednou rychlost osoby je důležitá složka akcelerace. Akcelerace v režimu Steering nastává vždy, když osoba zahajuje nebo obnovuje pohyb z klidového stavu – dochází k počáteční akceleraci, nežli dosáhne maximální aktuální rychlosti. Akcelerace se skládá ze tří složek – tangenciální dopředné složky zrychlení (využívající parametr Acceleration Time), tangenciální obrácené složky zrychlení a radiální složky zrychlení. Z těchto složek je pak stanovena konečná velikost vektoru zrychlení.

### Tvar trajektorií

Tvar trajektorií (trasy) se také odvíjí od zvoleného výpočetního režimu. V režimu SFPE je křivka trajektorie osoby reprezentována pouze přímkovým úsekem (od aktuální polohy k následujícímu bodu). V režimu řízení (Steering) se jedná o kvadratickou B-spline, aby byla trajektorie osob plynulejší a realističtější (viz obr. 4.8 (vpravo)). K sestrojení B-spline je využívána aktuální poloha osoby, poloha aktuálně vybraného následujícího bodu a kontrolní bod, který je promítnut zpět ve směru od aktuálního vybraného bodu k dalšímu vybranému bodu.



Obr. 4.8: Příklad ztvárnění trajektorie chodců v režimu SFPE (vlevo) a Steering (vpravo) (zdroj: vlastní)

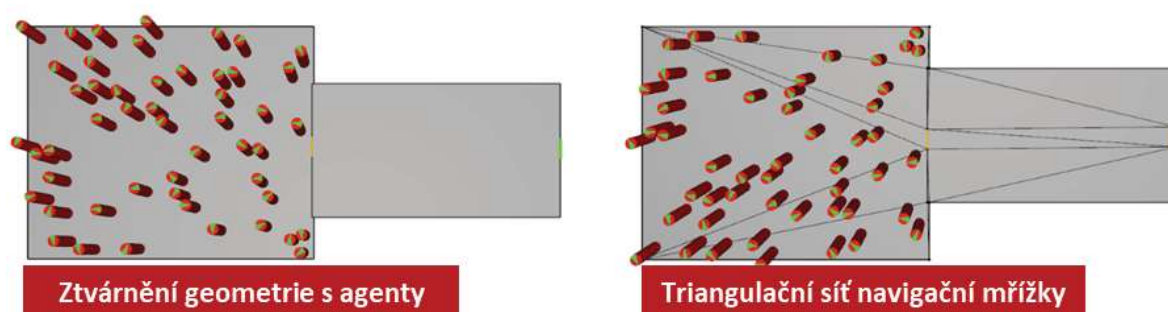
### Reprezentace prostoru

Při testování různých platform pro numerické modelování pohybu (evakuace) osob se ukázalo, že reprezentace prostoru je pro posouzení rizik poměrně významná – např. studie S7 v kap. 5.2.1. Geometrie modelu bývá možné tvořit přímo v nástrojích, nebo je možné ji importovat ve formátech .dwg, .dxf a .fbx, jako pomocný podklad. Pro ztvárnění prostoru (místnosti, stavby, areálu atd.) slouží několik základních komponent, jako: místnost, dveře, schodiště, rampa (nakloněná rovina), stěna apod. Pomocí zmínovaných základních komponent a jejich kombinací lze namodelovat libovolný interiér či exteriér do konkrétních detailů, jako jsou ústupky stěn, výškové rozdíly, subtilní konstrukce (sloupky, zábradlí, turnikety atd.) a jiné členitosti prostoru. Nástroje umožňují funkční modifikaci komponent pro definování technických zařízení stavby, jakými jsou pojízdne koberce, eskalátory a osobní výtahy atd.

### Místnost

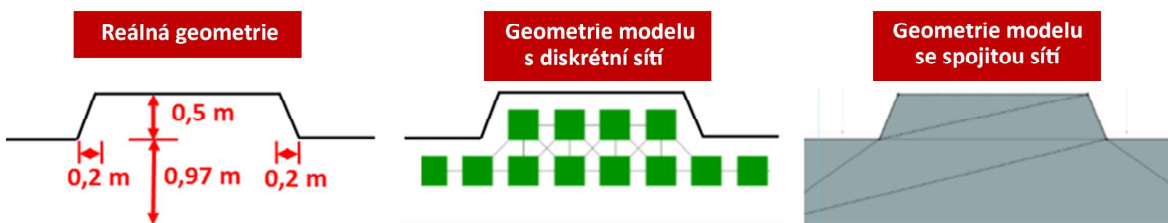
Ztvárnění prostoru geometrie modelů bývá realizováno pomocí tzv. místností. Místnosti jsou plochami libovolného tvaru, po jejich obvodě je hranice, kterou může agent překročit pouze pomocí spojovací komponenty „dveře“. Tvorba geometrie modelovaného prostoru je založena na tzv. navigační mřížce (navigační meshe), viz obr. 4.9. Podobně jako v případě MKP je podlahová plocha rozdělena na menší podoblasti pomocí triangulační sítě, na které probíhá výpočet. Výsledkem je přirozený volný pohyb agentů po prostoru, kde je tato síť definována.





Obr. 4.9: Příklad jednoduché geometrie – plocha je na první pohled reprezentovaná jako jeden celek (vlevo), ale ve skutečnosti je dělena pomocí navigační mřížky – triangulační síť (vpravo) (zdroj: vlastní)

V případě diskrétní reprezentace prostoru je sice možné v některých případech lepší výpočetní výkon, ale naproti tomu užitím spojitě sítě je možné docílit přesné reprezentace prostoru bez větší míry aproximace a tím získat reálné vykreslení místnosti s ohledem na tvar a včetně detailnějších prvků (nábytek, vybavení stavby, sloupky, zábradlí apod.). Dobrým příkladem může být koridor evakuačního chodníku v železničním tunelu nepravidelného tvaru, viz obr. 4.10, který lze tímto způsobem modelovat v reálných proporcích s proměnlivými šířkovými poměry. Dle studie S7 v kap. 5.2.1 se ukázala reprezentace prostoru jako zásadní pro posuzování hromadných evakuací osob, a to zejména u míst se složitější geometrií.



Obr. 4.10: Srovnání reprezentace prostoru v modelu s diskrétní sítí (EXODUS) a v modelu se spojitou sítí (Pathfinder) – příklad evakuačního chodníku v železničním tunelu (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [32])

Pro prvek místnost je možné nastavit parametry ovlivňující možnosti jeho využití, jako např. kapacita místnosti (početem osob, hustotou nebo v závislosti na typu provozu – garáže, knihovna, čekárna, restaurace atd.), označení místnosti jako útočiště (místo, kde lidé vyčkávají na příchod IZS), nastavení faktoru modifikace rychlosti (po celou dobu nebo po určitý čas – např. snížení rychlosti v důsledku zakouření místnosti), nebo omezení vstupu (vstup jen pro osoby s oprávněním).

### Dveře

Dveře jsou prvkem geometrie, který zajišťuje propojení jednotlivých entit modelu (sousedních místností, schodišť apod.), díky čemuž je umožněn volný průchod agentů po geometrii modelu. Jinak v případě, že jsou dveře definované na vnější hranici modelu a slouží jako vstup/výstup (EXIT) do/z modelu. Dveřím lze nastavovat konkrétní šířky, omezit jejich průtok, stanovit, zda je možný průchod pouze jednosměrný/obousměrný, jestli jsou dveře dostupné, případně jestli se otevřou až po uplynutí určitého časového limitu (např. otevření dveří na signál EPS), nebo je možné i upravit přístupová práva.

### Schodiště

Komponentou schodiště jsou propojovány různé výškové úrovně modelu. Schody lze považovat za specifickou výpočetní oblast, kde je maximální rychlost osoby řízena sklonem schodiště a alternativním výpočtem dle zvoleného režimu. Pro samotné schodiště je taktéž možné nastavení velkého množství parametrů (např. šířka schodišťového ramene, výška schodišťového stupně, hloubka nášlapu, sklon schodiště, faktor modifikace). Na jeho začátku i na konci je připojeno pomocí prvku dveře (nastavitelné podobně jako samostatné dveře), průtok a jeho

tvár je reprezentován reálně. Schodiště v modelu lze řešit i jako jednosměrné/obousměrné a nastavit mu konkrétní rychlost, čehož je nejčastěji využíváno při modelování eskalátorů (podobně i pojízdnych ramp).

### Rampy

Prvek rampa je reprezentován v modelu jako nakloněná rovina – podobně jako schody, ale ve výpočtu je s ním zacházeno velmi odlišně, zejména u výpočetního režimu SFPE (blíže viz výpočet rychlosti). Pro rampy je možné nastavení velkého množství parametrů, obdobně jako je tomu u schodiště, např. šířka, jednosměrnost/obousměrnost, modifikátor rychlosti, sklon atd.

### Překážky

Překážky v prostoru lze vnímat při numerickém modelování jako např. zúžení, sloup, výškový rozdíl, zábradlí, prvky volně stojící v prostoru, nebo vybavení stavby (nábytek, poutače, turnikety, atd.). Tyto objekty bývají v modelu interpretovány jako volná místa v meshi nebo jako místnost bez dveří.

### Reprezentace osob

Osoby v modelech je možné již ztvárnit tak, aby co nejdříve odrážely složení a charakter reálného davu. Lze jim přiřadit parametry dle pohlaví, věku, tělesných proporcí, schopnosti samotného pohybu a jejich vlastnosti – tělesné proporce, výšku, rychlost, reakční dobu, akceleraci, redukční faktor, faktor přizpůsobení se úzkým místům, priority, preference apod. Osoby do modelu (na výpočetní mesh) vkládáme dle reálného obsazení (např. ve třídě je třicet dětí v lavici po dvou, diváci v hledišti „sedící“ na sedačkách), rovnoměrně, náhodně nebo dle konkrétní hustoty (počet osob na  $1 \text{ m}^2$ ). Pokročilé modely umožňují generovat osoby do modelu pomocí tzv. zdrojů, které produkují osoby v zadaných intenzitách [ $\text{os} \cdot \text{s}^{-1}$ ]. Agentům lze definovat různá chování a činnosti, které při/před evakuací provedou, a s tím spojený např. předevakuační čas a návrhové scénáře (blíže viz kap. 5.1.1).

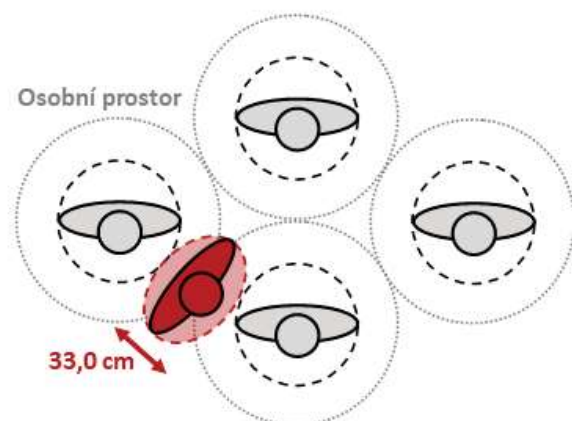


**Obr. 4.11:** Schéma ztvárnění reálné osoby v modelu – A – osoba, B – parametrizace lidského těla do elipsy, C – ztvárnění v rámci modelu (zdroj: vlastní, přepracováno dle [373])

Osoby bývají zpravidla reprezentovány jako pohybující se kruhy/elipsy (v 3D prostoru bývají znázorněny jako válce, viz obr. 4.11 o průměru 45,58 cm a plochou  $0,17 \text{ m}^2$ ). Osobám je možné nastavit distanci, kterou udržují od překážek i ostatních osob – blíže viz Příloha E. Rozměry mohou být nastaveny uživatelem s cílem zohlednit specifika modelované skupiny osob (dítě, dospělý jedinec), nebo zohlednit antropometrii osob (proporce těla dle národností, procentuální zastoupení obézních lidí apod.) – viz Příloha E.

### Redukce rozměru těla osoby při pohybu

V rámci modelu je možné zohlednit potřebu osoby redukovat svoje rozměry po dobu nezbytnou pro projití úzkými místy (úzké dveře, východ z tribuny, úzký koridor), kdy dochází k dočasnému snížení redukčního faktoru (zmenší se poloměr osoby) a zároveň okolní osoby detekující tohoto cestujícího sníží také své poloměry o nastavené redukční faktory (efekt uhnutí). Minimální rozměr osoby je 33,0 cm a vychází z maximální hloubky lidského těla pro 95% percentil měřených osob dle práce S. Pheasanta [421], viz obr. 4.12.

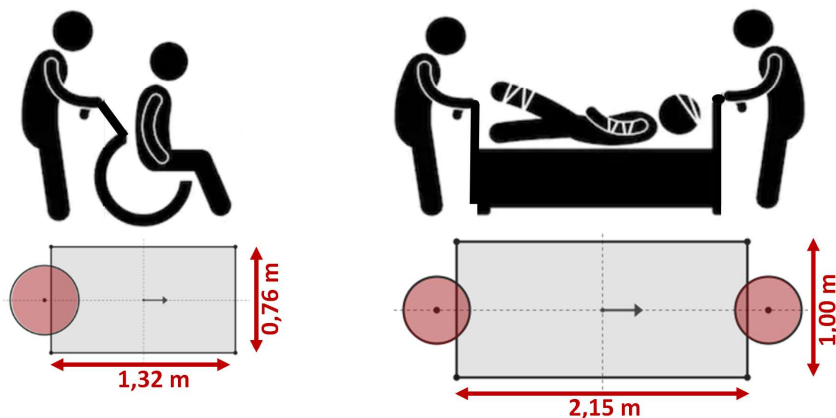


**Obr. 4.12:** Názorné schéma redukce dimenzí lidského těla na úkor osobního prostoru a prostoru okolních osob (zdroj: vlastní, přepracováno dle [172])

Dochází tak k simulaci reálného pohybu osoby, která se pro průchod úzkým místem natočí bokem – tato skutečnost je zohledněna pomocí parametru: redukčního faktoru (přenásobuje rozměr osob pro zohlednění komprese při kongescích) a minimálního diametru (redukuje rozměry osoby pro pohyb ve stísněných prostorách).

### Osoby s omezenou schopností pohybu

Osoby s omezenou schopností pohybu či případnou potřebou asistence je možno v pokročilých modelech znázornit pomocí „rozměrů vozidla“ – vozík, lůžko, osoba se zavazadlem apod. Dále každému „vozidlu“ lze přiřadit potřebný počet asistujících osob pro jeho případnou manipulaci (pohyb), která se může odvíjet od míry soběstačnosti (osoba na vozíku + 1 asistent, nosítka + 2 záchranáři, lůžko + 2–4 asistenti apod.), názorně viz obr. 4.13.

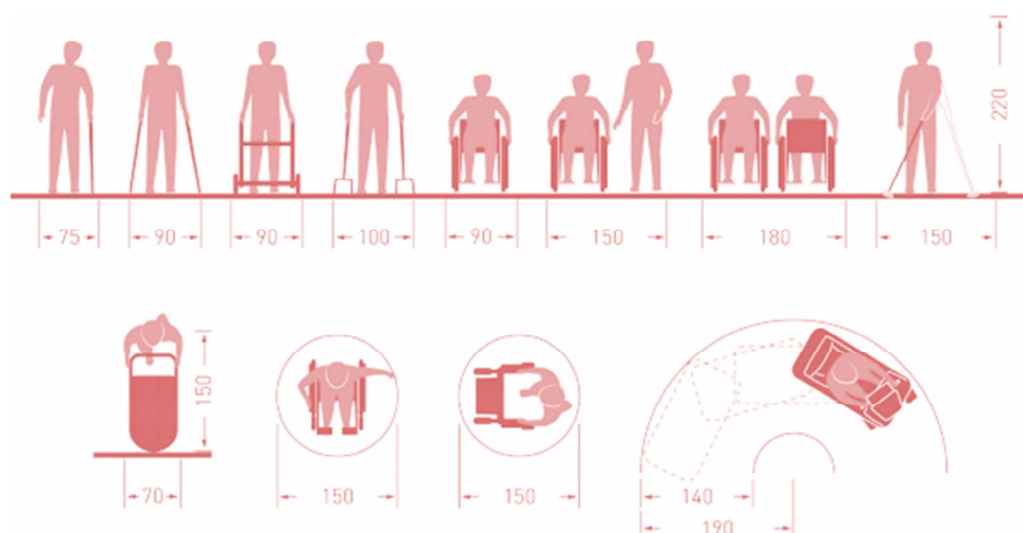


**Obr. 4.13:** Ztvárnění osoby s omezenou schopností pohybu v nástroji (zdroj: vlastní)

Rozměry „dopravních prostředků“ lze uzpůsobit dle přesných rozměrů vybavení nebo konkrétních typů – lůžko, nosítka, elektrický vozík, atd.) či vytvářet zcela nové tvary dle modelových potřeb (osoba o berlích, osoba s kočárkem, osoba s vodícím psem atd.). Konkrétní prostorové nároky osob se specifickými potřebami jsou uvedeny blíže na obr. 4.14.

### Reprezentace pohybu a chování osob

Numerické agentní modely jsou v dnešní době schopny interpretace individuálního lidského a sociálního chování z hlediska rozhodování člověka, jeho psychologie i sociální interakce s okolními lidmi. Agenti jsou schopni interagovat s prostředím či dalšími agenty na základě pravidel, kterými je řízen jejich pohyb, proto je i agent definován jako „něco, co vnímá a jedná“. Na mikroskopické úrovni jedinci jednají a rozhodují se odlišně, než když jsou sami nebo v malé skupině (takřka bez vlivu). Na makroskopické úrovni je chování davu neadaptivní, dochází ke vzniku kolektivních jevů vlivem vyvolaných situací či mimořádných událostí.



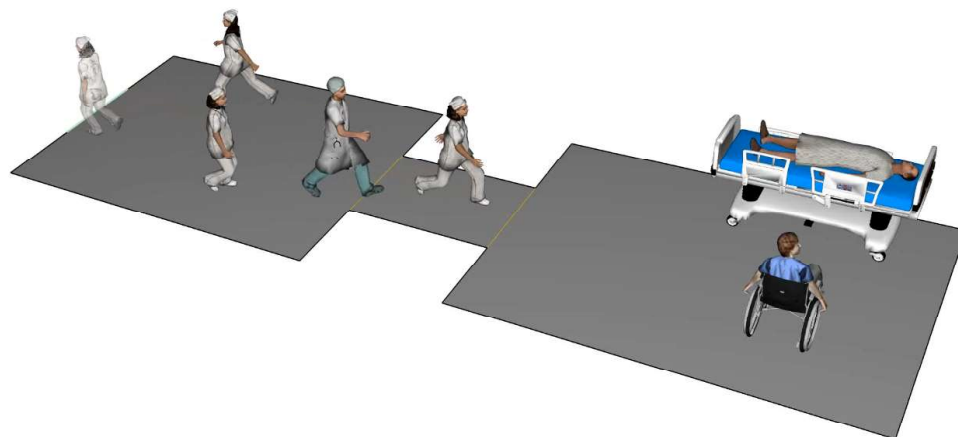
**Obr. 4.14:** Reprezentace prostorových nároků osob s omezenou schopností pohybu a orientace dle Vyhl. č. 398/2009 (zdroj: upraveno a převzato z [516, 553, 72])

### Chování – volba cíle

Každá osoba v modelu má na počátku přiřazené konkrétní základní chování, nebo jejich kombinace, které lze dle principů dělit do tří základních skupin chování:

- **Dosažení konkrétního cíle** – osoby v modelu mají za úkol dosáhnout konkrétního cíle ve formě místnosti, východu, výtahu, čekacího bodu či bezpečné zóny (útočiště).
- **Čekání** – osoby v modelu jsou nuceny čekat na přijetí výtahu, pomoc asistenta (obr. 4.15) či na uplynutí časového intervalu (ztvárňující odblokování nouzových východů → zohlednění procesů krizového managementu). Čekání bývá znázorněno jako nehybný stav vyčkávání na místě, nebo také dochází k popocházení agentů s cílem udržení si odstupů od okolních osob.
- **Speciální schéma chování** – příkladem může být: asistování, odpojení se od asistenta, změna profilu nebo změna chování (v případě asistence jsou osoby vedeny k pomoci a evakuaci osob s omezenou schopností pohybu, nebo je tímto chováním simulována pomoc IZS).

Samotné chování může být ovlivněno i kapacitou místností, či vznikem mimořádné události. V případě obsazení maximální kapacity místnosti dochází k automatickému přechodu na chování typu „čekání“ nežli se uvolní kapacita, nebo dokonce ke změně celkové trasy.



**Obr. 4.15:** Ukázka chování osob při asistované evakuaci (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [388])

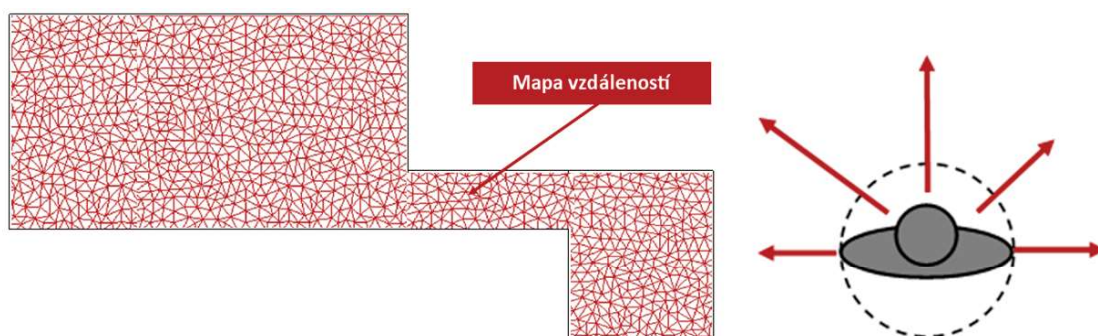


## Hledání cesty

Je-li osobě přiřazen cíl nebo jeho možné varianty, následují jednotlivé procesy, jako jsou: hledání cesty na meshi, plánování cesty (mapa vzdálenosti, směr, ověření kapacita místnosti, rozhodování k pohybu), předejití kolizí s překážkami či ostatními pohybujícími se osobami, generování cesty a její sledování k dosažení přiděleného cíle.

### Mapa vzdálenosti

V rámci každé plochy místnosti bývá řešena tzv. mapa vzdálenosti ke dveřím, která rozděluje plochu místnosti na menší trojúhelníky, než je samotná mesh (obr. 4.16). Každému vrcholu trojúhelníků na mapě jsou generovány hodnoty nejmenší vzdálenosti od všech dostupných dveří v místnosti. Osoba v modelu při každém výpočetním kroku kontroluje, zda se nezměnila mapa vzdálenosti dveří a aktualizuje dle toho i svá rozhodnutí.



**Obr. 4.16:** Ukázka mapy vzdáleností, kterou se řídí osoby při výběru trasy (vlevo), ukázka inverzních směrů řízení po 30° a jejich míru atraktivivity dle kritérií – délka trasy, množství kolizí a překážek (vpravo), (zdroj: vlastní, přepracováno dle [6])

### Směr pohybu

V procesu hledání cesty následně poté, co osoba získá informaci o nejlepší vzdálenosti (dle dat z mapy vzdálenosti), je určen ideální směr. Osoba kolem sebe rozděljuje pomyslný prostor ( $0^{\circ}$ – $360^{\circ}$ ) do směrů – sekcí po  $30^{\circ}$ , viz obr. 4.16, pro které osoba vyhodnocuje vzorkování s následujícími kritérii:

- hledání nejdelší možné trasy (max. délky) ke dveřím v tomto směru,
- hledání trasy bez kolizí s ostatními a bez potřeby vychýlení se z vybraného směru.

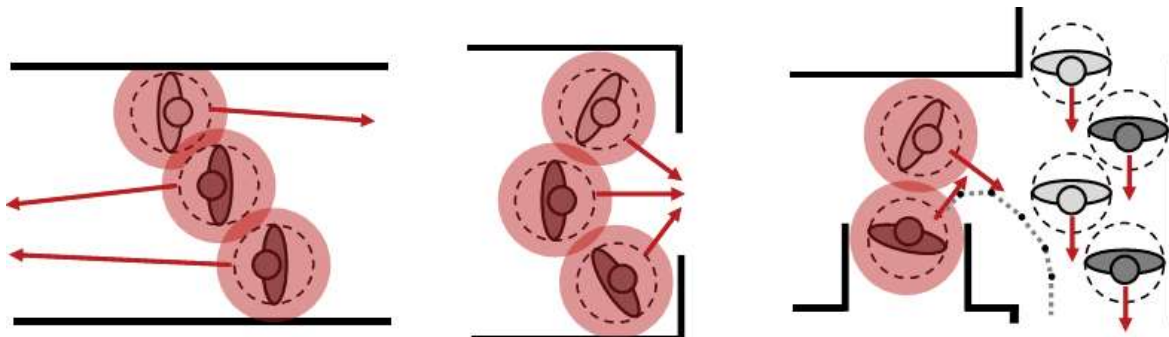
### Rozhodnutí k pohybu

Jakmile osoba v modelu má k dispozici informace o pro ni nejvýhodnější cestě (délce, směru), rozhoduje se, jestli pohyb tímto směrem provede nebo zůstane na aktuálním místě, např. i v situaci, kdy osoba potřebuje asistenci, setrvává na místě a vyčkává na pomoc.

Základním principem rozhodování všech modelů pohybu je tzv. rozhodovací matice, která je jednoduchým a efektivním způsobem, jak vystihnout komplexní základní chování jedinců v prostoru a čase – nahrazení jejich chování abstraktním modelem. Je třeba volit správnou míru abstrakce – nelze modelovat vše, ale přesto je nutné nalézt dostatečně souhrnný a zároveň výstižný model pro ztvárnění návrhového scénáře osob (viz kap. 5.1). Rozhodovací matici lze použít pro popis lokálních pravidel na úrovni jednotlivce a následně pomocí deterministické evoluce (v čase). Z výchozího stavu a jeho jednoduchých pravidel pro popis chování jednotlivců vzniká velmi komplexní řetězec chování. Jedna z prvních aplikací tohoto přístupu byla v roce 1970 provedena J. H. Conway na tzv. hře života [111], kde v rámci modelu celulárních automat byla aplikována jednoduchá pravidla, která určují podmínky života (smrti) konkrétní buňky v závislosti na počtu živých/mrtvých buněk v jejím okolí, což mělo za výsledek ztvárnění evolučního růstu komplexity.

### Plánování trasy

Proces stanovení plánu pro přesun osoby směrem k cíli je tvořen s ohledem na následování vyhodnocené trasy a vyhýbání se okolním cestujícím. Dochází tak k využití tzv. místně nejrychlejší trasy k dosažení cíle, ke kterému vede hned několik možných cest, které se liší délkou, překážkami, počtem osob, se kterými se osoba střetává atd.



**Obr. 4.17:** Schéma principu chování a pohybu osob v modelu – osoby míří k protilehlým bodům zájmu, dochází k redukcí rozměrů těla (kompresi) a vzdálenosti od stěny (vlevo), osoby směřují v podobném bodu zájmu – dveře (ve středu), plánování cesty s ohledem na okolní pohyb osob – stlačení těla, vyhýbání se a pohyb kolem rohu (vpravo) (zdroj: vlastní)

→ nelze globálně říci, že nejkratší cesta je vždy ta nejrychlejší/nejvýhodnější, proto také numerické nástroje využívají pro plánování cesty hierarchický přístup, který využívá jak místních informací, kde se osoba právě nachází (počet dveří a velikost fronty), tak i globálních znalostí budovy. Na základě těchto informací a propočtu nákladů na cestu osoba vybírá „místní cíl“, pro který je generována trasa, již osoba následuje. Osoba vybírá cestu s nejnižšími náklady a do výpočtu vstupuje celá řada kritérií a preferencí, jako je např. aktuální doba cesty do místnosti, čas strávený ve frontě, vzdálenost, celková aktuální délka východu, preference konkrétních dveří, únava, kolize apod. Kroky plánování trasy jsou pravidelně opakovány, dokud není dosaženo konečného cíle, jak je vidět na obr. 4.4.

### Generování trasy

Pro sestavení trasy k dosažení cíle je používána kombinace vyhledávacího algoritmu dle práce Hart et al. [210] a triangulační navigační síť. Trasa je reprezentována jako spojnice bodů na hranách triangulační sítě – viz obr. 4.17 (vpravo), která je finálně optimalizována pomocí tzv. string pullingu [260], aby byly zachovány poloměry a distance od okolních překážek.

### Proces výpočtu

Počítačová simulace (výpočetní model) má za úkol simulovat chování osob abstraktního modelu konkrétního systému při evakuaci. Díky stochastické povaze parametrů chování osob (např. vlastnosti osob, počáteční pozice, reakční doba) jsou hodnoty pro tyto parametry do modelu zanášeny v podobě deterministických hodnot, které jsou vybírány náhodně jako hodnoty z distribuční funkce, fuzzy funkce nebo z intervalu (tvorba pravděpodobnostního procesu, kde charakteristiky jsou hledanými hodnotami). Proto i u numerického přístupu je často součástí řešiče i metoda odhadu Monte Carlo (MC) [152], která je založená na opakovaných realizacích agentních simulací s různými vstupy, kde vstupní nahodilost řeší pravděpodobnostní úlohy s pokrytím celého náhodného prostoru. U numerických modelů evakuace je využíváno MC s cílem získání rozsáhlé sady výstupních dat z agentních simulací pro kvalitní statistické vyhodnocení evakuačního času. Přestože součástí nástroje Pathfinder je od roku 2018 funkce pro MC, parametrické i citlivostní studie (viz kap. 5.2.1) jsou založeny na stejném principu s tím, že funkci MC si simuluje sám uživatel tak, že kombinuje náhodné a systematické prvky při generování vstupních kombinací a sleduje, jak je rozptyl pozorovaných veličin spolehlivý [405].

Jedná se o pokročilé metody, které jsou však náročné na definici vstupů i výpočetní schopnosti skrze velký počet opakování, různé variace vstupních dat a varianty návrhových scénářů. Proto jsou jednotlivé běhy modelů spouštěny modeláři prostřednictvím skriptů a nebo podporují případnou symbiózu s některými otevřenými nástroji (demonstrace pomocí surogátních modelů).

### Vliv velikosti časového výpočetního kroku na simulaci:

- **Zvětšení velikosti výpočetního kroku** – způsobuje urychlení simulace na úkor výpočetního detailu (např. při přílišném zvětšení výpočetního kroku simulace nestíhá predikovat srážky osob – osoby navzájem narušují osobní prostory, nebo sebou dokonce procházejí; dochází ke kritickému navýšení lokální hustoty, což má za následek zasekávání osob ve dveřích).
- **Zmenšení velikost výpočetního kroku** – zajišťuje zvýšení výpočetní přesnosti simulace na úkor prodloužení výpočetního času – dochází k navýšení časové náročnosti, které se odvíjí od velikosti stavby a počtu agentů v modelu.

Příklad vhodného defaultního nastavení velikosti výpočetního kroku – 0,025 s.

### Jednotlivé úkony v modifikační fázi simulace

Nástroje fungují na simulační smyčce, kde je za použití explicitních integračních schémat počítán pohyb osob v diskrétních časových krocích. Aktualizace stavu probíhá synchronně, kdy se stav každého agenta aktualizuje současně v každém časovém kroku, aniž by kterýkoliv nový stav agentů ovlivnil stav ostatních okolních agentů. Synchronní přístup zavádí předpoklad přítomnosti tzv. globálních hodin, aby bylo docíleno společné aktualizace stavu všech agentů současně. Implementaci synchronní aktualizace lze rozdělit do dvou fází. V první fázi dochází na základě okolních podmínek a pravidel aktualizace k výpočtu nového stavu každého agenta, který se dočasně ukládá. Druhá fáze je aktualizací stavů, kdy dochází v jeden okamžik ke zkopírování nových stavů všech agentů (na rozdíl od asynchronní aktualizace, kdy dochází k aktualizaci jednotlivých stavů agentů nezávisle tak, že nový stav již ovlivňuje výpočet stavů v sousedních agentů – změny stavu jsou implementovány okamžitě) [375, 52, 113]. Pokročilejší modely ztvárňující chování osob jsou založeny sice na složitějších algoritmech (viz kap. 4.1.2), ale zmiňované základní principy rozhodovací matice, díky kterým získáváme náhodné realistické chování bez generování náhodných čísel, zůstávají zachovány. Pro každý časový výpočetní krok jsou provedeny následující úkony:

#### 1. Aktualizace aktuálního cílového bodu pro každého cestujícího

V této fázi dochází u každé osoby v modelu ke kontrole cesty k aktuálnímu cíli, který byl pro každou osobu určen již v prvním kroku. Je proveden přepočítání „nákladů na dosažení místního cíle“ pro jednotlivé směry (dveře), na základě čehož následně osoba volí směr s nejnižšími náklady. Tento výpočetní krok je časově nejnáročnější z celého výpočetního procesu.

#### 2. Výpočet rychlosti u jednotlivých osob v modelu

Výpočet rychlosti osob se odvíjí zejména od samotné volby režimu (blíže viz předešlý odst. *Výpočet rychlosti*) v závislosti na – základní zadané rychlosti, hustotě, terénu, směru pohybu (nahoru, dolů), vzdálenosti okolních osob a předcházení kolizím (blíže výpočet viz kap. 4.1.2.)

#### 3. Zvýšení aktuálního výpočetního časového kroku

#### 4. Přesun osob v modelu

Tato fáze simulace zahrnuje hned několik dílčích mezikroků:

- **Výpočet rychlosti pro aktuální okamžik**, který je odvislý od volby výpočetního režimu, jak již bylo zmiňováno výše v závislosti na aktuální hustotě v místnosti či maximální řídicí vzdálenosti.

- **Úprava rychlosti jako prevence kolize:**  
Některé výpočetní režimy vůbec nezohledňují kolize osob v davu, při simulaci se osoby nestřetávají a udržují si pevný odstup. Pro kolize osoby se stěnou probíhá úprava ve dvou krocích – první před pohybem (směr nastaven tak, aby přinutila osoby klouzat podél nejbližší zdi) a druhý případně při pohybu (osoba se pohybuje předdefinovanou rychlostí, ale může dojít k její změně při kontaktu se stěnou). V druhém případě dochází k predikci možného vzniku kolizí, a dle toho jsou následně upravovány směry a rychlosti osob v modelu tak, aby se jim předcházelo.
- **Integrace konečné rychlosti a přesun:**  
Pomocí explicitní Eulerovy integrace vypočíte pohyb osob s přihlédnutím k aktuální rychlosti každého jedince a individuálnímu zrychlení na normální rychlost chůze. V této fázi simulace dochází k propojení jednotlivých maximálních rychlostí osob pro aktuální výpočetní krok, s cílem urazit maximální možnou vzdálenost ve směru zvoleného cíle, nebo alespoň vzdálenost do bodu nejbližší kolize ve směru cíle.

5. Aktualizace výstupního souboru (pro daný krok).

## 4.2 Vstupní data

U modelu evakuace je mnoho proměnných vstupních parametrů týkajících se zejména behaviorálních vlastností osob, které jsou náhodné povahy, což ztvárňuje klasický mnohazměrný problém. Proto je v rámci modelování evakuace osob nutné věnovat zvýšenou pozornost overfittingu (během kalibrace, validace) a overdeterminismu (přeurčitosti problému). Díky tomu je nutné velmi opatrně přistupovat k fázi kalibrace, validace, verifikace a zároveň nepřidávat další detaily (proměnné), pro které není k dispozici dostatek dat nebo zkušeností (z teorie pohybu dle aktuálních poznatků). Modelář si musí být vždy vědom nebezpečí chybovosti (tzv. šumu) dat, která může vzniknout při sběru, či zpracování empirických hodnot, proto je nutné ověření relevantnosti a úplnosti dat, od kterých se odvíjí přesnost výsledků. Užití nekvalitních vstupních dat může mít za následek snížení/selhání prediktivní schopnosti celého modelu.

Konkrétní podoba sady vstupních dat se odvíjí od možností užitého nástroje. Ve většině pokročilých nástrojů se setkáváme se vstupy uvedenými v následujících podkap. 4.2.2, 4.2.3 a 4.2.4, které jsou definovány samotným modelářem před začátkem prováděné analýzy. Tato data lze je dělit do základních třech skupin:

- **Geometrie** – jedná o popis prostorového vymezení modelu a jednotlivých prvků geometrie (překážky, výtahy, eskalátory, východy), jejich dimenze a vlastnosti (šířky ÚC, rychlost výtahu apod.). Obecně tyto informace bývají snadno dostupné (podklady od projektanta, reálné zaměření na místě).
- **Populace** – jde o parametry osob a jejich vlastnosti, které jsou více neurčité (složení, věk, rychlost, chování apod.). Při jejich stanovení se vychází primárně ze sběru dat, ze statistických průzkumů, z kvalifikovaného odhadu či historické zkušenosti (procentuální zastoupení, obvyklá skladba návštěvníků, odhad dle podobné události, data z předchozích analýz atd.).
- **Behaviorální vlivy** – jedná se o základní popisy a předpoklady lidského chování a sociálních vazeb (např. matka se evakuuje se svým dítětem, osoba na lůžku potřebuje asistenci, přátelé tvoří skupinky, volba pocitově přijatelnější cesty, vyhýbání se překážkám apod.). Modely ztvárňují chování jedinců a jsou přirozenou základní součástí nástrojů, které mohou být doplněny o celou řadu přiřazených a vytvořených vzorců chování přímo v modelu (např. čekat na místě, jít k určitému východu, jít seskupit lidi a odvést je do bezpečí, pomoci konkrétní skupině osob apod.).



Nastavení vlastního modelu lze upravit vnitřními parametry řešiče SW. V případě zohlednění účinků požáru při evakuaci je nutné stanovit i vstupní parametry rizika pro samostatný model požáru (geometrii, návrhový požár, přítomnost a typ PBZ – blíže viz kap. 5.1.1).

#### 4.2.1 Zdroje dat

Obecně je možné vstupní data získat pomocí experimentů, analýzou případových studií, analýzou videozáznamů pohybu osob, sběrem dat nebo teoretických úvah apod. V této práci použité vstupní parametry pro numerické modely nejsou získány vlastním měřením, ani spoluprací s výzkumnými partnery, byly čerpány primárně ze zahraniční literatury [173, 562, 563, 241, 465, 474] a dostupných podkladů k Pathfinder [406, 404, 403], zejména z „keys studies V & V“ [407]. Vstupní data pro evakuační modely jsou primárně čerpána z experimentů a zpětných analýz reálných mimořádných událostí.

- **Experimenty**

Jak již bylo zmíněno v kap. 1.2.2, slouží pro získávání dat o chování osob a dynamice pěšího proudu různé typy experimentů. Experimenty lze provádět jak v laboratorních podmínkách, tak i v terénu. Základním principem experimentu je základní stručné instruuování figurantů o scénáři a následné pozorování situace vznikajících jevů v reálném čase a prostoru. Při předání instrukcí může dojít k vnesení vlivu výzkumníka, kterým dochází ke znehodnocení dat. Experimentální data pro model evakuace je možné dále získat ze sběru dat (např. z video záznamu, dotazníkového průzkumu, směrového průzkumu atd.). Experimenty se nejčastěji zabývají chováním osob a rychlostí jejich pohybu při vzniku návrhových situací (požár, kouř, toxicita), jejich reakcí na změnu geometrie či omezení toku (zatarasení východu, překážky), umístění vizuálních informací o evakuační cestě a vlastního zahájení evakuace (informace pro zahájení, délka reakční doby). V poslední době se pro tyto účely stále častěji využívá technologií VR (blíže viz Příloha G), trekování osob pomocí elektroniky (např. mobilní telefony – IP, GPS) a trekování osob na videu (blíže viz kap. 3.4 a Příloha G).

Příkladem shromážděných experimentálních dat pro pozemní stavby může být dílo M. Kobes, který ve své práci [278] sestavil přehled celé řady experimentů zabývajících se evakuací osob z hořících budov. Z nich následně vyvozuje, že vědecké experimenty zřídka vedou k důkladnému vyhodnocení základních principů požární bezpečnosti vzhledem k tomu, že reakce každé osoby na oheň je individuální, závisí na prostředí (i jeho vybavení), ve kterém se osoba nachází a interakci s okolními osobami. Dále uvádí, že je možné ztvárnit pochopené chování osob při evakuaci, ale těžko je interpretovatelná jejich motivace (k tomu, co dělají). V oblasti podzemních a tunelových staveb nejvýznamnější přezkoumání provedl K. Fridolf et al. [171].

Samotná empirická data z experimentů je nutné před použitím důkladně zkontrolovat, vyčistit a ověřit. Taková data jsou následně velmi ceněna pro jejich obecně malou dostupnost, která vyplývá ze složitosti realizace evakuačních experimentů i rizika spojeného s testy chování osob za nebezpečných podmínek. Proto je nutné, aby se uživatel modelu snažil při jeho ověřování využívat co nejširší spektrum dostupných dat z různých zdrojů. Data je možno využít jak k verifikaci samotného modelu, tak i k validaci výsledků (data musí být odlišná od dat užitých ke kalibraci), příklad vlastního užití viz [391].

- **Zpětná analýza reálných mimořádných událostí**

Zpětné analýzy reálných evakuací mohou poskytovat podrobné informace o chování lidí v přirozeném prostředí a řešení situace při reálném požáru (jako hrozícím nebezpečí). V důsledku toho mohou být, na rozdíl od evakuačních experimentů s uměle nadefinovaným scénářem, zdrojem skutečných nezakreslených a tím cenných informací o lidském chování. Při analýze kritických událostí jsou využívány různé typy zdrojů informací,

jako jsou rozhovory s evakuovanými osobami a členy IZS, pozorování (videozáznamů, výpovědí) a rekonstrukce události (numerická simulace, velkorozměrové experimenty, VR). Aby měla vypovídající hodnotu, musí být data z těchto událostí systematicky analyzována a správně vyhodnocena. Při aplikaci těchto dat do modelů je nutné zvážit další sociologické aspekty (znalost prostředí, vztahy mezi osobami) či typ analyzované stavby (nepředpokládáme, že evakuace z neznámých podzemních prostor bude stejná jako evakuace ze standardní budovy). Shromážděná data z expertíz bývají extrapolována a využita pro modelování evakuace konkrétních staveb.

Možnými příklady případových studií jsou oficiální vyšetřování požárů v různých typech staveb, o kterých je možné se dočíst v literatuře. Takovými zdroji mohou být např. případová studie požáru polyfunkčního kancelářského objektu v Ósace z roku 1984 [229], několik výzkumných zpráv o chování osob při evakuaci v World Trade Center [290] [293]; pro tunelové stavby a stavby metra pak vyšetřovací zpráva požáru stanice King's Cross, 1987 [157], rekonstrukce události požáru lanové dráhy Kaprun [488], rekonstrukce požáru vlaku ve stanici Jungangno v Daegu [252] nebo rekonstrukce havárie v tunelu Mont Blanc a vliv související toxicity na evakuované osoby [443]. Další sada analýz událostí v metru je uváděna i v práci K. Fridolf [171].

### 4.2.2 Geometrie

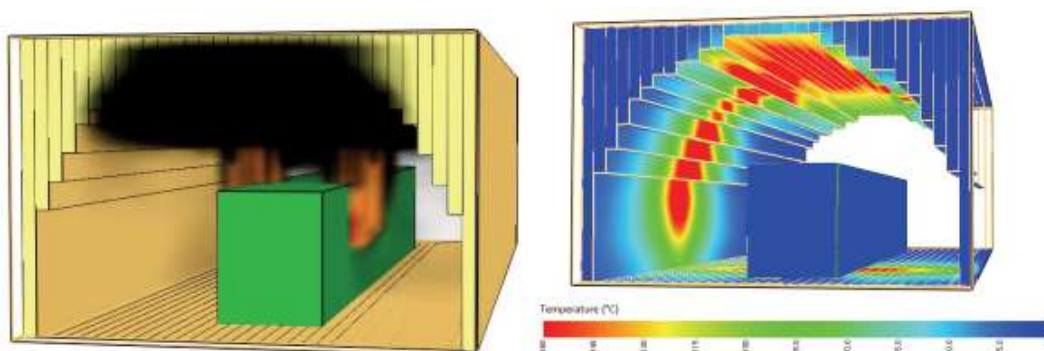
Podkladem pro tvorbu vlastní geometrie modelů primárně slouží výkresová dokumentace konkrétní stavby, či případně místní šetření (pasport stavby, zmapování aktuálního provozního řešení prostoru, identifikace překážek apod.). Tyto informace jsou do modelu vnášeny elektronické výkresy/modely ve formátech .dwg, .fbx, .ifc apod. Na základě těchto podkladů je tvořena detailní geometrie jednotlivých modelů reprezentujících posuzovaný prostor.



**Obr. 4.18:** Ukázka komplexní tvorby geometrie OC – interiér specifické stavby ve formátu .fbx (vlevo), příklad aproximace geometrie pro model požáru (vpravo) (zdroj: převzato z [21] a ve spolupráci s [21])

Jejich detail se odvíjí od účelu konkrétního modelu – např. pro model evakuace je důležitým detailem ztvárnění překážek v prostoru, kde se osoby pohybují; oproti tomu pro model požáru jsou tyto informace podružné. Samotný detail ztvárnění geometrie se také odvíjí od volby nástroje (blíže viz kap. 4.1.2). Do modelů lze zanést členitost prostoru, ústupky stěn, subtilní a dočasné konstrukce (např. sloupky, zábradlí, reklamní poutače, turnikety atd.) i konkrétní technická zařízení stavby, jako jsou např. evakuační výtahy, ZOKT, SHZ, kouřové clony apod. Ne vždy je řešení při tvorbě geometrie konvenční tvar stavby, který lze jednoduše popsat standardními postupy. V nestandardních případech je nutno přistoupit k aproximaci vytvářené geometrie. Na obr. 4.18 je uveden příklad ztvárnění komplexní specifické geometrie při posuzování rozsáhlého obchodního centra, pro numerický model požáru, kde byla simulována účinnost ZOKT. Při tvorbě geometrie dochází k aproximaci tvaru, který vychází z odborného inženýrského úsudku situací. Vzhledem k tomu, že výsledný tvar geometrie modelu udává

současně i tvar výpočetní sítě, má silný vliv nejen na simulovaný průběh, ale i na konečné výsledky simulace (příklad výsledku viz obr. 4.19).



**Obr. 4.19:** Příklad geometrie modelu požáru v tunelu, kde je důležité zvážit míru aproximace, aby nedošlo k deficitu/přebytku místa, díky kterému by mohlo dojít k silnému zkreslení výsledků – průběh požáru a postup produktů hoření v prostorách klenby se budou chovat jinak než např. v případě obdélníkového průřezu (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [136, 134])

### 4.2.3 Populace

Termín populace označuje obsazení modelu agenty, kteří reprezentují reálné lidi a jejich chování při evakuaci. Agenti jsou definováni řadou parametrů, přičemž velkou část z nich lze chápat z pohledu výsledného evakuačního času jako klíčové. Kvantitativní a kvalitativní charakteristiky davu (např. věk, půdorysný průmět, složení davu, sociální vztahy, reakční doba, rychlost, mobilita apod.) výrazně ovlivňují evakuační proces a mění i dynamické vlastnosti davu jako celku. Proto je nutno k nim přihlížet zejména při posuzování případů nouzových evakuací, kdy se od těchto charakteristik odvíjí jejich úspěšnost. Čím profilovanější data jsou k dispozici, tím více se lze při modelování přiblížit realitě.

Vstupní parametry pro posuzování evakuace předepisované soustavou norem *ČSN 73 08XX* jsou poměrně omezené a v některých ohledech velmi zjednodušené. Předpokládají například okamžitou reakční dobu, či naopak pomalou rychlost pohybu bez statistického rozložení atd. Zahraniční zdroje, zmiňované již v kap. 1.3 i níže, poskytují podstatně širší variabilitu možných vstupních parametrů [487]. V těchto případech je však nutné pečlivě zvážit, zda užitím vstupních dat nedojde k nepřijatelnému ovlivnění výsledků na stranu nebezpečnou. Mezi základní uznávané zdroje pro čerpání dat o charakteristikách evakuovaného davu (blíže popsané v Příloze B) se řadí zejména následující:

- **Směrnice Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen (RIMEA)** [465],
- **Revised Guidelines on Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships (IMO Guidelines 1238)** [241],
- **The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models (NIST Technical Note 1822)** [474].

Jednotlivé charakteristiky osob ovlivňují jejich reakci na vznik případného nebezpečí, celkově ovlivňují vývoj samotné evakuace a vybrané z nich mohou být pro evakuační proces přímo kritické, jako je např. reakční doba nebo rychlost pohybu osob. Proto i v části této práce – konkrétně v Příloze E – jsou představeny nejčastěji užívané sady základních ověřených charakteristik osob, které bývají reprezentovány v pokročilých numerických modelech (převážně jako intervalové rozložení) a byly užity i pro analýzy zmiňovaných referenčních staveb v této práci.

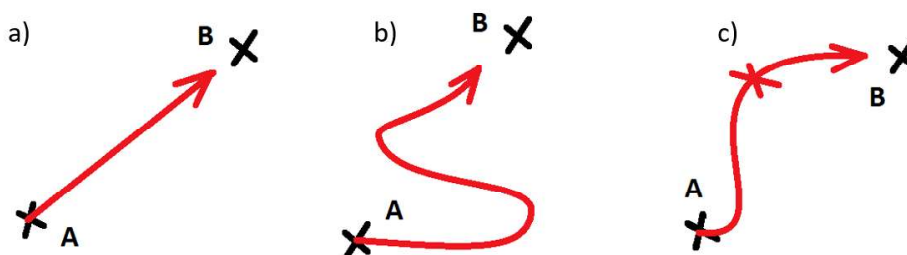
#### 4.2.4 Behaviorální vlivy

Chování osob je vnášeno do modelu pomocí behaviorálních parametrů jedinců či sad scénářů (viz kap. 5.1.1), které věrně odrážejí jednání a rozhodování jedinců. Jelikož samotná data o behaviorálních aspektech osob při evakuaci vstupujících do numerických modelů jsou velmi úzkoprofilová, představuje její komplexní posouzení stále poměrně extrémní případ vysoko-rozměrného problému a nelze očekávat v brzké době zcela jednoduchá řešení. Do té doby může předložený původní rámec sloužit k interpretaci různých zdrojů a velikostí experimentálního rozptylu pozorovaných v klasických experimentech či k ilustraci důležitých důsledků pro lepší realismus při hodnocení spolehlivosti konkrétních budov, jejich infrastruktury i různých návrhových scénářů. Osoby v modelu lze ztvárnit a vnímat jako – jedince (individuální povahy), osobu se specifickými potřebami, sociální skupinu, osobu s doprovodem či jedince s konkrétní rolí/úkolom apod.

##### Osoba – jednatel

V procesu evakuace ovlivňuje chování osob jako jedinců velké množství faktorů. Mezi tyto faktory můžeme zařadit např. zájmy nebo cíle osob, znalost/neznalost cesty, rozmístění překážek v prostoru, smyslové vjemy, pozornost osob, rychlost reakce na podněty, fyzická zdatnost, rychlost pohybu osoby a další.

V průběhu pohybu jedince jeho mozek vyhodnocuje a „přepočítává“ jednotlivé trajektorie v závislosti na prostoru, interakci a chování ostatních jedinců. Ve vazbě na tyto aspekty pak cyklicky vyhodnocuje svou vlastní dráhu. Pokud bychom hledali trasu z bodu A (aktuální poloha osoby v budově) do bodu B (EXIT, volné prostranství/bezpečné místo), máme teoreticky nekonečné množství možností. Trasa, kterou si jedinec při evakuaci vybere, může pak být např. nejkratší trasou („rovnou pryč“), dezorientovanou trasou (osoba je v šoku, opilá nebo je v budově např. hustý kouř), účelnou trasou s přidanými zastávkami (osoba se zastavuje na kontrolních bodech – např. kontrola, jestli někdo nezůstal pozadu apod.), případně jejich kombinací, viz obr. 4.20 [90].



Obr. 4.20: Znárodnění možných trajektorií jedince při evakuaci k východu – a) nejkratší trasa, b) účelná trasa (obhlídka), c) trasa s přidanou zastávkou (zdroj: vlastní, věnováno od [378])

##### Osoba s omezenou schopností pohybu a orientace

Velká část osob s hendikepem má specifické potřeby co se týče způsobu pohybu, rychlosti pohybu, fyzické zdatnosti, možnosti překonávat překážky (ve formě výškových rozdílů, schodišť, nevhodného povrchu komunikace atd.) i prostorových nároků na pohyb (osoby s omezenou schopností pohybu a orientace často ke svému pohybu využívají různé kompenzační pomůcky, jako jsou např. hole, vozíky, chodítka atd.), které uměle zvětšují půdorysnou plochu uživatele, názorně viz obr. 4.14). Případná omezení a nároky osob je třeba zohlednit již ve fázi posouzení a stanovit jejich vliv na celkový proces evakuace. V modelu je možno tato omezení a nároky simulovat formou změny rozměrových charakteristik jedince a jeho rychlostního či pohybového omezení v geometrii prostoru.

##### Skupina

V rámci proudu evakuovaných osob můžeme sledovat i tvorbu skupinek (dvou a více na sebe vázaných osob), např. osoby, které se znají – kamarádi, rodina, školní skupina apod.

Skupina pak udržuje tvar, osoby se pohybují se pospolitě a jsou na sebe vázány prostorově sociálními vazbami. Často se následují a mají stejný cíl cesty. Skupinu osob jako takovou lze při posuzování evakuace v numerickém modelu ztvárnit a je možné u ní vytvořit konkrétní vazby, nebo stanovit tzv. vůdce skupiny (osoba s přirozenými vůdčími schopnostmi nebo autoritou), který udává tempo, směr pohybu apod. Skupina se v modelu chová jako celek jednotlivých entit, které mezi sebou interagují, celková rychlost skupiny se pak odvíjí od rychlosti a interakcí jednotlivých účastníků s okolím.

### Osoba s doprovodem

Jedná se o osobu, která je omezena určitým hendikepem stran samostatného pohybu. Role a účel doprovodu jsou dány soběstačností doprovázeného jedince – doprovod vykonává pomocné funkce (může být oporou doprovázené osobě – dítěti, starší nebo zraněné osobě) nebo doprovod slouží jako zdroj pohybu (osoba tlačí invalidní vozík, kočárek) atd. Osoba s doprovodem může být v modelu chápána i jako malá skupinka 2–4 osob, které mají (až na drobné odchylky) stejný směr cesty a vůči sobě vazbu.

### Osoba s rolí

Při krizových situacích vznikají samovolně role tzv. lídrů [179]. Role lídra nejčastěji vychází z povahy a postavení jedince, nebo je předurčena jeho rolí v běžném životě (např. povoláním – hasič, policista, voják, vedoucí pracovník apod.). Při vzniku krizové situace lídr intuitivně přejímá svoji roli, začíná usměrňovat dav a navigovat jej do bezpečí (vybírá cestu, udává rychlost přemístění). V rámci modelu lze ztvárnit roli lídra jako součást skupiny (viz odstavec „Skupina“) nebo jako nezávislého účastníka provozu. Tento pak působí jako jednotlivec, jež má v rámci dané situace konkrétní roli/úkol (např. osoba pomáhající jiné osobě s omezenou schopností pohybu, osoba navádějící dav apod.).

## 4.3 Výstupní data a jejich zpracování

Pokud jsou numerické modely užívány korektně, mohou být velmi cenným doplňkem analytických postupů. Pokročilé evakuační modely umožňují různé formy výstupů např. statistické výstupy, grafy, textové sumarizace dat, vizuální výstupy ve formě heat map a 3D video reprezentace celého procesu evakuace. Výstupy modelů mohou být natolik podrobné, že je možno provést vizuální analýzu a v návrhu posuzované geometrie přesně identifikovat kritická místa a překážky. Lze analyzovat vznikající kongesce a stanovit, které z nich jsou pouze provozního charakteru a které jsou opravdu kritické. Chyby odhalené v navrhované geometrii lze v rámci (heuristické) optimalizace opravit, nový návrh zanést do modelu a znovu ověřit simulací (blíže viz kap. 5.4). Tento proces lze opakovat tak dlouho, dokud se neprotne představa projektanta s bezpečnými výsledky simulace. Další důležité výstupy, které se vyhodnocují pro celkové zhodnocení evakuace, jsou celkový evakuační čas, dílčí evakuační časy do bezpečí (CHÚC), kapacita únikových cest, hustotní mapy, mapy zdržení, průměrná rychlost osob, mapy času k východu, časy posledních průchozích atd.

Při hodnocení evakuace osob se mezi fundamentální výstupy řadí zejména hodnoty **celkové doby evakuace osob**. Doba dostupná pro evakuaci (ASET, Available Safe Egress Time) a doba potřebná pro evakuaci (RSET, Required Safe Egress Time), které jsou stanovovány v závislosti na vnitřních podmínkách panujících v budově při evakuaci, blíže viz kap. 5.1.2. Dalšími důležitými výstupy jsou kritická místa, doba zdržení, průměrná rychlost, hustota osob (místa s kritickou hustotou osob), úroveň pěší dopravy apod. Výstupní data nemusí sloužit pouze ke zhodnocení celkového procesu evakuace, ale mohou být využita jako podklad pro optimalizaci návrhu, na jehož základě lze následně stanovit další opatření stavebního, technického a organizačního rázu (změny geometrie, počty evakuačních cest, zvýšení nároků na PBZ, zefektivnění zásahového plánu, apod.), blíže viz kap. 5.3.

U simulací (spřažené/částečně spřažené) obsahujících požár jsou pak vyhodnocovány přímé dopady produktů hoření a vývoje požáru (např. hustota kouře, viditelnost, radiace, toxicita, odpadávající části hořící konstrukce, případně i vliv nouzového osvětlení apod. [412]) na evakuující se osoby [470]. Ale ne všechny nástroje tuto současnou analýzu umožňují, jedná se spíše o ojedinělé případy vyspělých modelů, jelikož je zde nutné se vyrovnat s odlišností technologií jednotlivých modelů, vysokým počtem nekontrolovatelných proměnných a obecnou přeurčitostí modelů. V případech, kdy nástroje neumožňují spřažené simulace, je možné vyhodnotit dopad účinků požáru na osoby zjednodušeně, takže výsledky simulace modelu požáru a toxicity jsou časově překryty přes výsledky simulace evakuace osob, díky čemuž lze stanovit, zda se v danou dobu v konkrétním místě ještě někdo vyskytuje, nebo jaká je míra koncentrace toxických plynů v konkrétním čase a místě. Fyziologické účinky na jedince vystaveného toxickému a tepelnému prostředí se stanoví pomocí konceptu FED (Fractional Effective Dose), který je blíže představen v [444, 197] a dalšími hodnotami, které jsou blíže rozvedeny viz 5.1.2.

Pro efektivní zpracování výstupních dat je nutné, aby nástroj umožňoval interpretaci výstupů ve formátech .txt nebo .csv, které slouží zejména pro statistická zpracování výsledků (velký vzorek dat, vyhodnocení spolehlivosti apod.). Výstupy simulací bývají zejména u malých modelů analyzovány ručně, v případě větších akcí (rozlohou objektu, počtem osob) se přistupuje k využívání nástrojů, jako jsou např. tabulkové procesory, skripty apod.

### Statistické zpracování výsledků

Nejistota behaviorálních vlastností osob a počátečních podmínek, které se snažíme v modelu evakuace reprodukovat, je úzce spojena se stochastickou povahou lidského chování a jeho ztvárněním v rámci pokročilých modelů evakuace osob. Stochastickými parametry jsou zejména ty, kterými je popisováno chování osob (např. povaha osoby, asertivita, ohleduplnost apod.), ale i ty základní definující individuální pohyb každého jedince (rychlost pohybu, reakční doba, typ apod.). Jestliže opakovaně provedeme stejnou simulaci (totožně i empirický evakuační test) se stejnými osobami za identických podmínek, výsledky budou odlišné – viz obr. 4.21. Na základě toho lze konstatovat, že jednou provedenou simulací modelu (experimentem) není možné prezentovat celé spektrum možných výsledků chování osob za daných podmínek [40].

Pro zohlednění těchto parametrů je nutné opakované spouštění modelu, přičemž optimální počet opakování souvisí s velikostí rozptylu a očekávanou pravděpodobností sledovaného jevu, což představuje desítky samotných simulací (v rámci simulace typu MC → změny charakteristik a rozmístění osob). Variační koeficient pravděpodobnosti  $V_{pf}$  (odhad chyby výsledné pravděpodobnosti  $\times 100$ ) lze definovat v následujícím tvaru:

$$V_{pf} = \frac{1}{\sqrt{N \cdot p_f}} \quad (4.9)$$

kde

$N$  ... počet simulací,

$p_f$  ... pravděpodobnost.

Se zvyšujícím se počtem simulací pak variační koeficient pravděpodobnosti nabývá příznivějších hodnot.

Pro statistické zpracování dat, jak je uváděno např. v článku R. Lovreglio et al. [336] zabývajícím se předpovědí konvergence celkových výsledků evakuačních modelů, uvádí minimální počet deset simulací (opakování), nebo v práci D. Novák et al. [382], která se zabývá spolehlivostí a matematickou teorií pravděpodobnosti, je v případech využití MC LHS (které jsou extrémně náročné na realizaci) doporučen minimální počet 21 simulací (opakování). Nebo lze alternativně užít volby takového vhodného počtu simulací modelu, kdy každé další spuštění



neznamená změnu výsledné střední hodnoty sledované proměnné o více jak 1 % (situace, kdy odchylka konverguje k nulové hodnotě).



Obr. 4.21: Příklad vlivu stochastických parametrů modelu při pokročilém modelování evakuace (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [391])

Při statistickém zpracování výsledků evakuačních modelů nepracujeme s přesnými hodnotami, ale s následujícími veličinami:

- **Střední hodnota výsledků (diskrétní hodnota náhodné veličiny)** je klíčovým aspektem jejího rozdělení pravděpodobnosti – při velkém počtu nezávislých pokusů je možné téměř jistě očekávat, že relativní četnost se bude blížit teoretické hodnotě pravděpodobnosti a lze ji popsat střední hodnotou náhodné veličiny. Jedná se o vážený průměr všech jejích hodnot (pro spojitě náhodné veličiny je součet nahrazen integrálem proměnné vzhledem k její hustotě pravděpodobnosti).
- **Směrodatná odchylka (míra statistické variability souboru)** se počítá jako kvadratický průměr odchylek hodnot od střední hodnoty nebo od jejich aritmetického průměru. Je vyjádřena následujícím vztahem:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.10)$$

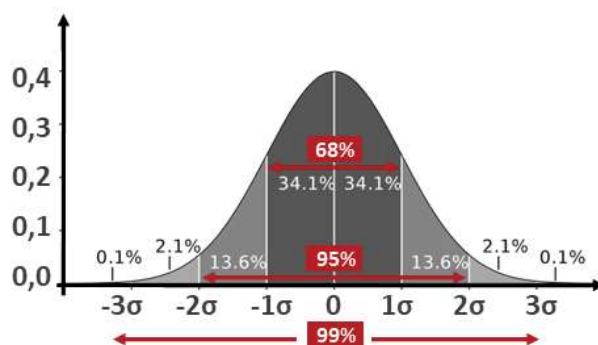
kde

$x_i$  ... hodnota konkrétní sledované veličiny s pořadovým číslem  $i$ ,

$\bar{x}$  ... střední hodnota sledované veličiny,

$N$  ... celkový počet opakování (simulací).

Jestliže se odchylka hodnoty řídí normálním (Gaussovým) rozdělením, pak pravděpodobnost, že se hodnota náhodné veličiny bude od střední hodnoty lišit nejvýše o  $1\sigma$ , je 68,2 % a pravděpodobnost, že se hodnota bude lišit nejvýše o  $2\sigma$ , je 95,4 % (viz obr. 4.22 [25]).



Obr. 4.22: Gaussovo normální rozdělení s vyznačenými pásy směrodatné odchylky  $\sigma$  (zdroj: vlastní, přepracováno dle [25])

- **Interval spolehlivosti** je rozsahem hodnot, ve kterém leží reálná hodnota s určitou pravděpodobností. Pro interval spolehlivosti jsou nejčastěji užívány hladiny spolehlivosti s úrovněmi 90 %, 95 % a 99 % (hladina spolehlivosti 95 % pak znamená, že s touto pravděpodobností se reálná hodnota v daném intervalu vyskytuje). Výběr intervalu spolehlivosti závisí především na účelu užití výsledků simulace (např. pro porovnání podobných výběrů jsou voleny velmi malé intervaly spolehlivosti, dosažení požadované spolehlivosti pak vyžaduje větší počet simulací).

Celkově je spolehlivost matematických modelů definována procesem verifikace, validace a kalibrace (blíže viz kap. 4.4), přičemž modely evakuace osob nejsou v tomto výjimkou.

### Zhodnocení numerického postupu

Velkou výhodou numerického přístupu je možnost detailního ztvárnění, stejně jako variabilita vstupních dat a možnost opakovaných zkoušek tzv. na nečisto. Díky provedeným studiím a aplikačním příkladům se povedlo ověřit, že pomocí numerických modelů lze jednotlivé prvky modelu (osoby, geometrii, reálnou obsazenost, provoz, překážky atd.) ztvárnit v takovém detailu, kterého běžnými postupy nedokážeme dosáhnout a díky tomu lze na posuzovaný objekt/návrh nahlížet více realisticky.

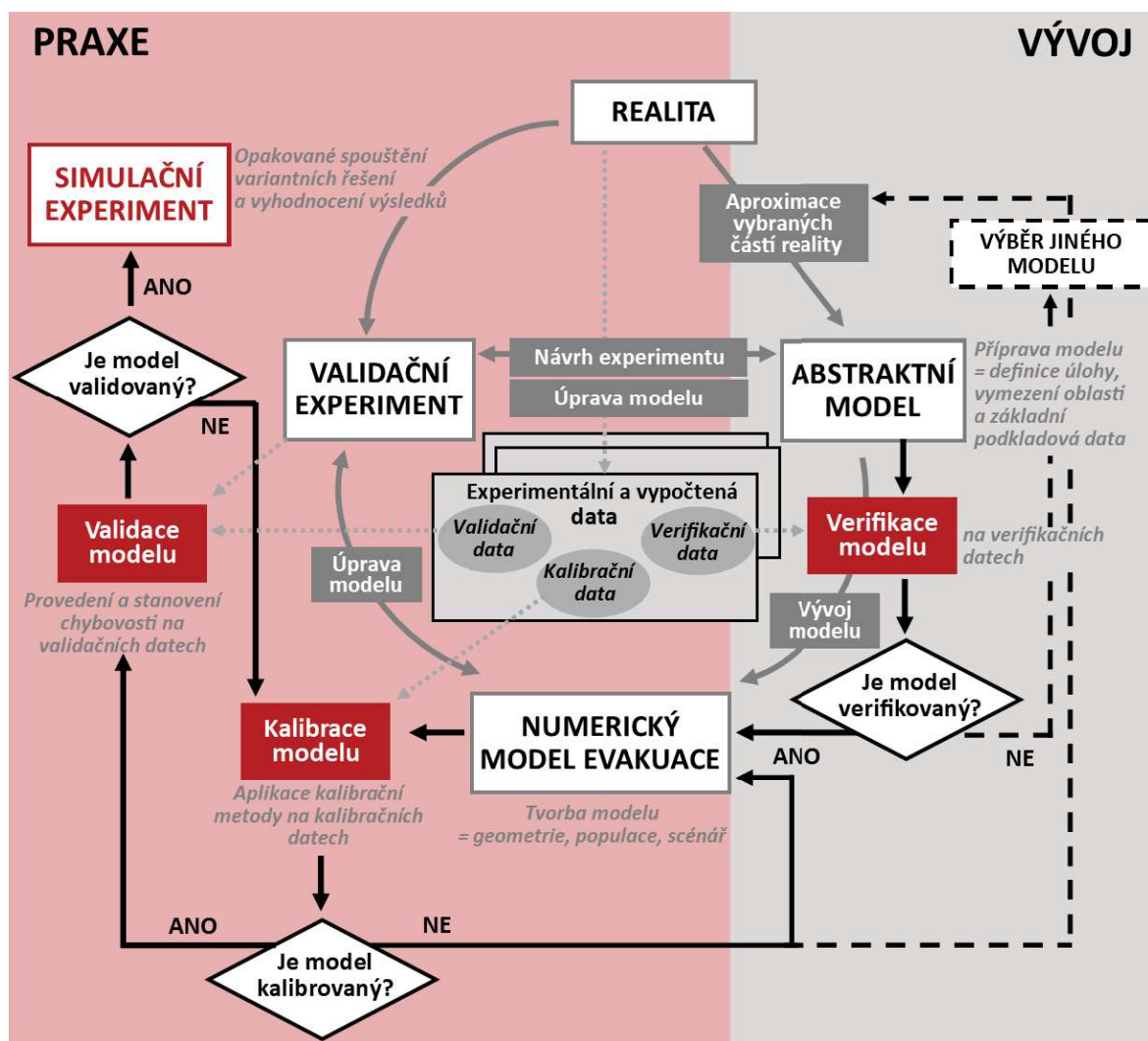
Numerických modelů lze s výhodou využít jak pro návrhovou fázi projekce, tak i pro dodatečnou analýzu. Pomocí nich lze účinně ověřovat návrhy, následně optimalizovat kritická místa [32], a tím dosáhnout zvýšení bezpečnosti. Numerické modely je možno využít rovněž při analýze ekonomické stránky stavby z pohledu PBŘ (počet větracích otvorů [384], požární odolnost konstrukcí [396], počet evakuačních koridorů [285] atd.) stejně jako lze ověřovat efektivnost jednotlivých variant návrhů, tak i specifických evakuačních a krizových scénářů [20]. Dle výsledků simulací pro analyzované varianty lze pak navrhnout nová řešení, tato zapracovat a znovu ověřit. Tento proces je možné provádět opakovaně, optimalizovat dokud není dosaženo vyhovujícího výsledku, nebo ověřovat i další varianty řešení. Celková efektivita této metody je ovlivněna především:

- **výběrem modelu a výpočetního přístupu** (viz odst. *Výpočetní režimy*),
- **kvalitou vstupních dat** (míra aproximace, vlastnosti osob, vhodné vstupy do modelovaného scénáře, viz kap. 4.2),
- **výběrem vhodného modelového scénáře** (viz kap. 5.1.1),
- **správnou interpretací výsledků simulací z modelu** (viz kap. 5.1.2).

## 4.4 Verifikace a validace modelu

Ověřování jakéhokoliv simulačního nástroje je neustálou aktivitou a je nedílnou součástí jeho životního cyklu, jak je znázorněno na obr. 4.23. Celkové komplexní ověřování se skládá ze tří základních procesů, a to: **verifikace**, **kalibrace** a **validace**. Proces validace a verifikace (V&V) dle Gaela et al. je klíčovým faktorem při hodnocení spolehlivosti výsledku a ověřovací testy modelu jsou považovány za užitečnou metodu jak pro studium nejistot evakuačních modelů, tak i k vymezení oblastí jejich použitelnosti [176]. V rámci konkrétní aplikace V&V vstupuje do tohoto procesu ještě i proces kalibrace, který se zabývá modifikací jednotlivých parametrů modelu. V případě stochastických modelů evakuace dochází ke kalibraci pouze parametrů neznámých nebo zcela neměřitelných (např. přiblížení se experimentálním datům o chování osob), v případě deterministických modelů (např. požáru) – se kalibrace neprovádí. Aby bylo možné procesy evakuace kvantifikovat, je potřeba definovat základní veličiny pro ověřování evakuačních modelů. Tyto prvky musí představovat aspekty, které lze řešit v rámci většiny modelů.





Obr. 4.23: Schéma procesu ověřování modelu při vývoji a v praxi (zdroj: vlastní)

Výše zmiňované procesy provádíme samostatně a je nutné je od sebe zcela oddělit, a to jak z pohledu použitých dat (odlišný dataset, volba jiné ověřované veličiny), tak ideálně i personálního provedení. Proces V&V modelu je prováděn samotným uživatelem, nebo je prokazován existující V&V použitého nástroje, jako je např. [407]. I v průzkumech [472, 470, 337] se uživatelé evakuačních modelů shodují, že jedním z nejdůležitějších kritérií při výběru evakuačního modelu je dostupnost V&V dat, a to z důvodu, že i sebesložitější model se stává nedůvěryhodným, pokud nejsou k dispozici data (výsledky) z V&V. Tento fakt se stává zásadním problémem zejména pokud má být model používán k predikci událostí, a ne pouze k simulaci situací, které se už staly. V případě tvorby dodatečného modelu události, která již nastala, je kalibrace snadná, ale nemůžeme s jistotou říci, že se jedná o univerzální řešení pro všechny následující situace.

Celkově v rámci oboru numerického modelování evakuace a šíření požáru v budovách donekdávna neexistoval žádný jednotný mezinárodní standard, stanovující postupy a testy, který by hodnotil V&V modelů evakuace. V důsledku této absence byli vývojáři nuceni k využití nekonzistentních postupů a k testům určeným původně k jinému užití (např. IMO testy předložené v MSC/Circ. 1238 původně pro testování analýz osobních lodí [241], testy RIMEA [465] vycházející z testů IMO – pouze na verifikační testy rozšířeny o další sady zohledňující chybějící funkce modelů, ISO 16730 [245] obecný standard pro V&V bez zaměření na evakuační modely apod.). V návaznosti na tento fakt vědci z National Institute of Standards and Technology and Lund University přezkoumali v roce 2013 aktuálně dostupné testy a vydali dokument *NIST Technical Note 1822*, který obsahuje seznam revidovaných a doplněných

V&V testovacích příkladech [475]. Následně se tento dokument stal základem mezinárodního obecného standardu pro V&V modelů evakuace a požáru. Novým standardem pro V&V modelů evakuace budov se stal v roce 2020 základním zdrojem *ISO 20414 Fire safety engineering – Verification and validation protocol for building fire evacuation models* [246], který vzešel zejména z dokumentu [474].

Při nedostatku dat pro proces V&V lze verifikaci provést na hypotetických testovacích příkladech, které jsou definovány jako jednoduché evakuační scénáře, u nichž lze očekávaný výsledek odvodit dle jednoduchých matematických vzorců, důkazů a měření.

## Verifikace

V ISO 16730 [163] je specifikována verifikace pomocí všeobecně známé definice – „Verifikace je proces stanovující, zda matematické stránky modelu dostatečně věrně reprezentují jeho koncepci a očekávané výsledky“. Jedná se o tzv. ověření souladu modelu s požadavky uživatele, které vyplývají z řešeného problému, kdy výsledky jsou porovnávány navzájem mezi sebou a s přesnými analytickými nebo numerickými referenčními řešeními – tzv. verifikačními testy. Verifikační testy evakuačních modelů by měly být jednoduché (ověření jednotlivých jevů) a univerzální, tak aby je bylo možné aplikovat pro všechny dostupné modely (nástroje), případně díky nim definovat konkrétní možnosti a omezení těchto modelů. Jedná se zpravidla o sady testů s širokou škálou příkladů od těch jednodušších, až po ty komplexnější, které jsou dobře zdokumentovány (jak jejich vstupní parametry, tak i očekávané výstupy a v případě validace i konkrétně definované srovnávací sady dat z experimentů) – příkladem takového dokumentu může být [407]. Neúspěšná verifikace modelu je z uživatelského hlediska neopravitelná, jelikož model vykazuje v některém ohledu značné nedostatky, a je tak nutné vymezit jeho použitelnost, případně zvolit jiný model či zohlednit tento fakt ve výsledku [25, 76]. Lze rozlišit přinejmenším čtyři základní metody ověření evakuačních modelů [475, 25, 76]:

- **Testování jednotlivých komponent** – jedná se o ověření dílčích prvků modelu a jejich výsledků, jak uvádí [474], testovací příklady pro tento přístup lze dělit do základních dvou kategorií:
  - **Analytické ověření komponent**, u kterého lze výsledky simulací modelu porovnávat s hodnotami teoreticky vypočtenými, jako je např. rychlost chůze, rychlost na eskalátoru, doba, za kterou urazí agent danou vzdálenost apod.,
  - **Ověření interpretace nouzového chování osob**, kdy ověřujeme schopnosti modelů kvalitně reprodukovat výsledky, které odráží aktuální poznání o chování osob při mimořádných situacích (nejedná se o validaci, ale spíše o ověření souladu s teoriemi chování [290]). Sledováno je zejména ztvárnění scénářů a chování osob v modelu – vzorce chování (zipování, klastrování, priority atd.), kongesce, skupinové chování apod.
- **Funkční ověření modelu**, které udává, zda model odpovídá předpokladům jeho konkrétního použití.
- **Kvantitativní ověření modelu**, které lze obecně vyjádřit jako procentuální rozdíl mezi očekávanými výsledky, empiricky vypočtenými výsledky a skutečnými výsledky simulace.
- **Kvalitativní ověření modelu**, jež se opírá o kvalitativní pozorování očekávaného chování osob dle aktuálních poznatků teorie chování a výsledků simulací.

Pro verifikaci evakuačních modelů bylo v práci Gwynne et al. [199], následně i dle Ronchi et al. [475], identifikováno pět základních skupin behaviorálních aspektů, které je nutné v modelu evakuace zohlednit [246]:

- **doba před pohybem** – ověřuje čas potřebný před zahájením samotné evakuace

- **pohyb a navigace** – ověřuje možnost zohlednění pohybu a orientace (cestovní rychlosti) za různých podmínek – únava, kouř, hybnost apod.
  - rychlost chůze v koridoru [407],
  - rychlost chůze po schodech (nahoru/dolů) [407],
  - pohyb kolem rohu koridoru [241],
  - užití výtahu/eskalátoru [241],
  - protisměrné proudění osob (vliv zvyšující se intenzity a interakcí osob na rychlost pohybu) [330],
  - skupinové chování osob [297],
  - vliv přítomnosti osob s omezenou schopností pohybu (snížená rychlost, znemožnění užití vybraných cest) [474],
  - vliv demografického složení na rychlost pohybu (složení osob v závislosti na demografické křivce/typu budovy, např. [330]),
  - vliv omezené viditelnosti na rychlost pohybu (ověření korelace viditelnosti a rychlosti pohybu [470, 257]),
  - fyziologické působení kouře, produktů hoření a vysoké teploty na osoby [444, 443] [447].
- **volba východů** – ověření schopnosti modelu specifikovat využití jednotlivých východů – pevné přiřazení východu, volba nejbližšího východu, volba na základě sociologických a psychologických aspektů
  - přiřazení konkrétního východu [330],
  - sociální faktory při volbě východu (vliv ostatních osob),
  - preference únikových východů (znalost/neznalost východů).
- **dostupnost a výběr evakuační trasy** – ověření schopnosti modelu přiřadit osobám konkrétní ÚC či reagovat na změnu podmínek na ÚC.
  - dynamická změna preference východu při změně jeho dostupnosti (např. během evakuačního procesu dochází k uzavření některého z východů/ÚC) [200].
- **omezení toku** – ověřuje schopnost vytvoření kongesce v místech geometrických zúžení a vliv rostoucí hustoty na rychlost a intenzitu pohybu
  - vznik kongesce (v úzkých místech – dveře, pod schody) [200, 227, 521],
  - maximální intenzita proudění pohybu osob (dosažení maximální intenzity na konkrétním profilu) [241].



**Obr. 4.24:** Ukázka vzorové verifikační karty – zadání verifikačního příkladu (vlevo), výsledek verifikačního příkladu ve formě videa (vpravo), (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [135])

Jak specifikuje i ISO 16730 [163], je doporučeno, aby výsledky verifikačních testů byly podrobně zdokumentovány spolu se všemi použitými charakteristikami – podrobným textovým popisem příkladu, vstupními daty i jejich výsledky – komplexní sada verifikačních karet pro ověřování modelů evakuace osob v ČR (obr. 4.24), které částečně vycházejí z konceptu verifikačních testů IMO [241], ale byly poupraveny z pohledu posuzování staveb podobně jako v práci Ronchi et al. [474], doplněny o varianty aplikující data z ČSN – blíže viz [135, 76].

## Validace

Validace je finální testování modelu, které ověřuje, jestli výpočetní metody numerického modelu a jeho aplikace jsou v souladu s empirickými výsledky – porovnává numerické řešení s experimentálními daty [144]. Validace není nutně pouhou procedurou pro testování vědecké teorie nebo procesem určování míry, do jaké je metoda výpočtu přesnou reprezentací reálného světa – „shoda mezi modelem a realitou“, tak jak uvádí [245]. V obecnějším smyslu validace může znamenat spíše ověření, zda je model/daná metoda vhodná pro zamýšlené použití a jestli je schopen dostatečně dobře reprodukovat realitu pro zamýšlený účel, protože splňuje stanovené výkonnostní požadavky v kontextu s modelem [245].

Během posledních desetiletí byla vyvinuta celá řada různých typů numerických modelů evakuace osob (viz Příloha C). K dosažení přesvědčivých a kvalitních modelů evakuace, které jsou schopny správně předpovídat a reprodukovat dynamiku davu v různých scénářích, zejména pokud jsou požadovány kvantitativní a kvalitativní predikce (např. průměrné rychlosti, doby evakuace, počtu osob či jejich rozmístění), je nutné provádět jejich kalibrační a validační testy. Obecně existují tři základní způsoby kalibrace a validace modelu pohybu osob [144, 338]:

- **Porovnání výsledků simulace se základními diagramy** (ověření interpretace základních veličin popisujících dynamiku davu) [58, 485, 216, 155, 99].
- **Ověření schopnosti modelu reprezentovat reálné ztvárnění davových jevů** (testování výkonnosti návrhového modelu) [598, 218, 289, 213].
- **Porovnání výsledků simulace se shromážděnými daty z terénního pozorování, kontrolovaných experimentů, VR experimentů, s extrahovanými daty a umělými datasety** [338, 368, 137, 225, 319, 228, 277, 156].

Je nutné si uvědomit, že testování validace (kalibrace) se opírá zejména o schopnost modelu reprezentovat a předvídat chování evakuovaných osob ve vztahu k současným teoretickým a experimentálním poznatkům a v závislosti na nedostatku dat o lidském chování v ohni – předpovědi jsou deterministické nebo závislé na uživateli. Dále pak o kvalitu datasetů odvíjejících se od technologie sběru, jejich přesnosti a míře detailu (s tím spojené i nejistoty) a dostupnost experimentálních dat – v rámci evakuačních modelů se jedná o data vzácná, úzkoprofilová (omezuje možný počet validačních příkladů).

**Tab. 4.1:** Příklady prací uvádějících vhodné dílčí data sety pro validaci modelu (zdroj: [479])

Validace	Srovnávaný parametr	Zdroj dat
Doba před pohybem	volba evakuace, vytížení únikových východů	[47]
Pohyb a navigace	doba evakuace	[414]
Dostupnost východů, volby a výběru trasy	vytížení únikových východů	[379]
Proudění osob a jeho omezení	doba evakuace, intenzita proudění, rychlost pohybu	[227, 494, 168]
Úplná validace	celková doba evakuace	[191]

Ronchi et al. [479] ve své práci odkazuje na vhodné příklady dílčích datasetů pro validační testy. Jednotlivé zdroje s doporučením konkrétních proměnných veličin pro validaci modelů s empirickými daty jsou uvedeny v tab. 4.1. V případě neúspěšné validace je možné se vrátit do fáze kalibrace a celý proces znovu opakovat.

Datasety pro validaci evaluačních modelů, získané z experimentálních měření/cvičení, nejsou příliš rozsáhlé, tak aby bylo možné provést kvalitní podrobnou validaci výsledků, jako při verifikaci modelu. V návaznosti na nedostatečné množství dat pro validaci evakuace a s rozvojem nových technologií, jako jsou umělá inteligence (AI), počítačové vidění (MV) a virtuální realita (VR), je připuštěna možnost ověření evakuace s umělými daty, daty extrahovanými z videozáznamu (reálných situací) a virtuálních experimentů. Využitím nových technologií pro získávání dalších datasetů pro ověřování, ale také i pro jiné možnosti využití v rámci požární bezpečnosti, jsou podrobně rozvedeny v Příloze G.

## Kapitola 5

# Případové studie evakuace osob

Následující kapitola navazuje na teoretický základ, znalosti o současném stavu poznání dané problematiky, které byly již představeny v předešlých kapitolách (konkrétně kap. 1–4).

V této kapitole jsou nastíněny možnosti užití numerického modelu a jeho ověřené užití v kontextu existujících platných českých norem, jak z pohledu vlastních principů pro modelování evakuace osob, tak i jeho samostatných vstupních dat. Dále jsou uvedeny námi ověřené postupy pro aplikaci numerických modelů, sestavování návrhových scénářů, interpretaci a samotné vyhodnocení modelu v souladu s ČSN a pro účely PBŘ. Klíčovou částí je uvedení sady parametrických a citlivostních studií vybraných vstupních parametrů, ukazující jejich vlivy a dopady na posouzení evakuačního procesu, v porovnání s klasickým normativním ČSN přístupem. Dále jsou představeny konkrétní aplikace numerických modelů pohybu osob a šíření požáru při analýze rizik a jiné způsoby jejich využití pro ověření a následnou optimalizaci zajišťující bezpečnost staveb. Výsledky a poznatky z uvedených studií a příkladů mohou sloužit jako názorný podklad pro práci zpracovatelů, posuzovatelů PD PBŘ, tak i pro samotné normotvůrce.

### 5.1 Ověřené postupy

Následně budou uvedeny ověřené postupy, který byly využívány pro práci s numerickými modely na různých referenčních stavbách pro sestavování návrhových scénářů, vyhodnocování a interpelaci výsledků a celkové posouzení evakuačního procesu respektující potřeby ČSN 73 08XX, tak aby bylo docíleno dostatečně komplexního posouzení evakuačního procesu u specifických staveb. Všechny postupy jsou doplněny o potřebné reference a odkazy na potřebná data, čerpaná především ze zahraničních zdrojů nejrůznějších vědeckých prací a těch odkazujících na způsoby využívané v zahraničních standardech.

#### 5.1.1 Návrhové scénáře

Návrhové scénáře popisují předpokládaný vznik a průběh nouzové situace, ať už jde o evakuaci ohrožených osob za standardní situace (rozumíme situaci, kdy je uvažována pouze běžná/výpočtová obsazenost osobami, jsou dostupné všechny evakuační východy, objekt je obsazen pouze jedním typovým vzorkem osob – běžný, zdatný jedinec bez omezení), evakuaci osob za specifických podmínek (vše odlišné od těch standardních), nebo evakuaci osob s přítomností požáru. Lze říci, že jde o tzv. hypotetické scénáře reálného světa. Návrhový scénář zavádí komplexní přehled informací o posuzované stavbě (jejich vstupních údajích – blíže viz kap. 4.2, pro samotné modely).

Tyto informace lze dělit do tří základních skupin:

- **Celkové informace o stavbě** – jedná se o charakteristiky objektu, popisující především konstrukční a dispoziční vlastnosti stavby – např. typ stavby, její rozměry, provozní poměry budovy, výškové uspořádání, umístění evakuačních cest, dimenze, vybavení stavby (zařízení, nábytek, překážky), technická zařízení a jejich funkčnost (výtahy, eskalátory) atd.
- **Charakteristiky evakuovaných osob** – popisují osoby z hlediska jejich výskytu a rozmístění v objektu, reakci osob na pokyny k evakuaci a následnou schopnost samotné evakuace či schopnosti jejich interakce na okolní podněty – např.: počty osob, charakteristiky osob (mobilita, věk, role atd.), jejich rozmístění ve stavbě, činnosti, které vykonávají, přítomnost krizového managementu apod.
- **Informace o případném požáru** – informace, z kterých se stanovuje vlastní požární scénář – typ budovy/provozu, zejména návrhový požár a okrajové podmínky prostředí – např.: hořlavé materiály v objektu a jejich vlastnosti (palivo), zdroje a příčiny vznícení, podmínky větrání, možné šíření požáru, vybavení PBZ atd.

Za vzniku mimořádné události je nutné být v maximální možné míře připraven na různé scénáře, jež mohou nastat (např. v případě běžného provozu budovy školy bez krizových událostí je možné uvažovat scénáře: žáci o přestávce na chodbách, žáci při studiu ve třídách, žáci při obědové pauze v jídelně, konání sportovního turnaje škol v tělocvičně a současně probíhající výuka ve třídách atd.) jak z technického, tak i z procesního hlediska. V takových případech zpravidla musí evakuované osoby spoléhat na vlastní schopnosti a překonávat řadu překážek včetně orientace v neznámém a vysoce stresujícím prostředí. Návrh preventivních opatření, v reakci na modelovaný scénář, může pomoci při řešení nastalé události či eliminaci jejich následků. Proto se i v zahraničí často přistupuje k tvorbě bezpečnostní analýzy založené na návrhových scénářích [79, 37, 276].

Při posuzování staveb lze sestavit téměř nekonečný počet možných scénářů, nicméně zabývat se všemi by znamenalo značnou časovou náročnost a následná analýza by byla prakticky nereálná. Z těchto důvodů je pro analýzu nezbytné volit konečný soubor těch nejrizikovějších a zároveň nejpravděpodobnějších scénářů, jejichž výsledky představují přijatelnou horní mez rizika. Při sestavování je nutno umět předvídat i to, co jsme ještě pro danou stavbu nezažili (extrapolace mimo naše zkušenosti). Pro správnost volby scénářů dle jejich důležitosti je u uživatele třeba značných zkušeností a vědomostí z celé řady vědních oborů (chemie, fyziky, psychologie, sociologie, proxemiky apod.) – tzv. odborný inženýrský odhad, jelikož se jedná o otázky sdružených jevů (coupled, multiphysics). Jelikož v rámci evakuace dochází k vzájemné interakci osob, proudění vzduchu, CFD obecně, šíření kouře, požáru atd., což je výpočetně extrémně náročné, volíme s ohledem na to pouze několik vybraných návrhových scénářů, které zvládneme „upočítat“. Určení vhodné sady požárních scénářů je základním předpokladem efektivní analýzy stavby i zajištění bezpečného návrhu PBŘ jak z hlediska stavebních konstrukcí, tak eliminace ohrožení zdraví a života osob.

## Evakuační návrhové scénáře

Návrhové evakuační scénáře popisují předpokládaný sled událostí při průběhu evakuace a chování osob v čase a prostoru (bez vzniku a účinků požáru) pro konkrétní stavbu, která je charakterizována celou řadou faktorů. ČSN při posouzení evakuace vychází ze základních postupů, viz kap. 4.1.1, které počítají pouze s posouzením jednoho jediného scénáře, kdy osoby z nejdálšího místa unikají směrem k východu z budovy za předpokladu dostupnosti všech východů, ÚC a funkčnosti vybavení PBZ. V případě reálného procesu evakuace ale může dojít k celé řadě různých scénářů, do kterých vstupuje velké množství parametrů (složení osob, dostupnost východů, náhlá změna, reálný vývoj, mimořádná událost apod.), jež normový přístup zohledňuje minimálně nebo je nezohledňuje vůbec, přestože mohou mít značný vliv na evakuaci i její celkový výsledek. Nelze předpokládat, že v reálné situaci dojde

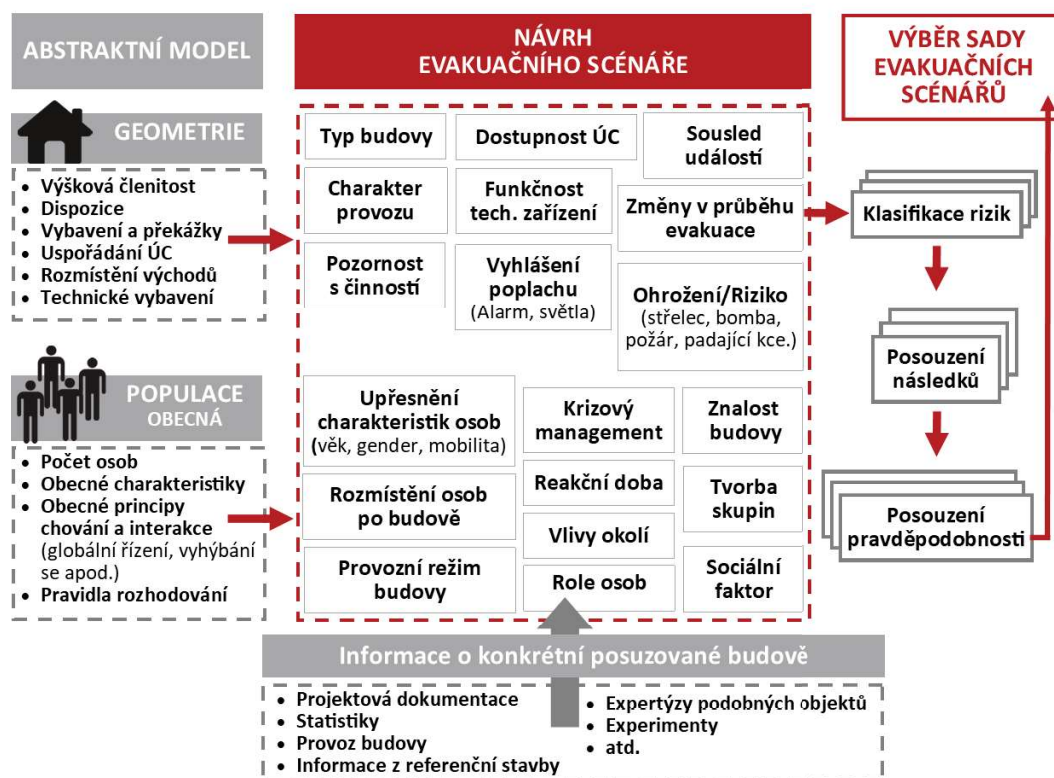


k respektování normového dělení obsazenosti na PÚ a striktnímu přiřazení daného únikového východu, osoby se spíše budou chovat dle základních instinktů pro záchranu vlastního života [185]. Modely jsou schopny tyto vzorce reálně interpretovat a díky tomu poskytnout vzhled do průběhu potenciální situace.

Při výběru modelových scénářů evakuace je nutné ověřovat důležitost jednotlivých parametrů a jejich dopad – především pomocí parametrických a citlivostních studií, např. viz kap. 5.2. V rámci posuzování je nutné zohlednit pravděpodobnost výskytu mimořádných událostí a specifických kombinací parametrů jako v případech, kdy dojde k „ucpání“ některé z ÚC, když něco nefunguje nebo když dojde k útoku. Během tvorby návrhového scénáře je nutné myslet i na jiné mimořádné události, než je v PBR běžně uvažovaná evakuace při požáru (např. útok na měkký cíl, osamělý střelec, narušený jedinec s bombou apod.). Při těchto událostech nejsou osoby ohroženy požárem, ale dochází k ohrožení jiným typem nebezpečí, v důsledku čehož je nutné evakuovat velkou masu lidí. Stále se jedná o evakuaci a její spojení s často skloňovaným tématem ochrany měkkých cílů při řešení bezpečnostních opatření.

### Postup sestavování evakuačního scénáře

Pro lepší představu je na obr. 5.1 uvedeno názorné schéma procesu sestavování evakuačních scénářů. Při jejich sestavování řešíme primárně pohled na budovu jako celek a analyzujeme její dispoziční i výškové členění, uspořádání jednotlivých ÚC a rozmístění východů. V rámci návrhu scénářů s vyhlášením evakuace zohledňujeme i funkčnost instalovaných zařízení na ÚC, jako je např. výtah, evakuační výtah, eskalátor, únikové dveře na EPS apod.

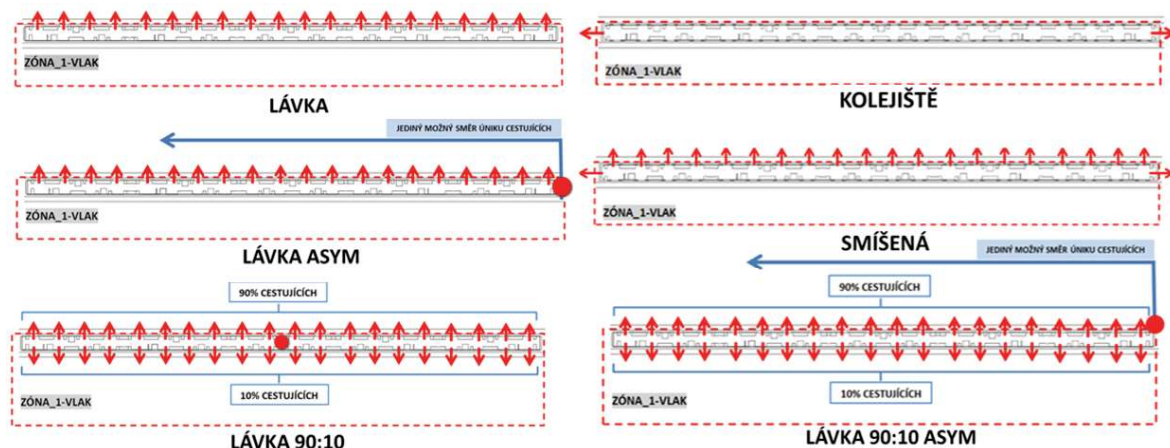


Obr. 5.1: Schéma procesu sestavování a výběru evakuačního návrhového scénáře (zdroj: vlastní)

Následně probíhá zatřídění objektu dle typu a charakteru jeho provozu (např. škola, divadlo, obchodní dům, nemocnice apod.), na základě čehož jsme schopni stanovit obsazenost objektu osobami, jejich rozmístění po budově (koncentraci osob v jednotlivých částech budovy), věkové složení, genderové složení, zastoupení osob se specifickými potřebami, pohybovou strukturu provozu a provozní cyklus budovy (otevírací doba, denní provoz, jízdní řády, špičkové hodiny apod.). Dále dochází ke specifikaci samotných osob (jejich rolí, úkolů v rámci stres managementu, klíčových znalostí, vazeb, povahy, chování, míry zodpovědnosti apod.)

a definici stavu ÚC během průběhu evakuace (dostupnost východů, zatarasení po uplynutí času, znemožnění užití požárního výtahu apod.). V poslední řadě vstupuje do scénáře i vliv okolí (psychický stav a s tím spojená míra trpělivosti, sociální vazby, tvorba skupin a skupinového chování) a případně i vliv účinků požáru (kouř, toxicita, viditelnost, vysoké teploty apod.), který je podrobně představen v kap. 5.1.2 a kap. 5.1.1.

Výsledkem sestavování návrhových evakuačních scénářů je jejich komplexní sada – scénáře v různých variantách a kritických kombinacích – viz obr. 5.2. Mezi nejkritičtější varianty se zpravidla řadí ty s největší délkou ÚC, s největším počtem zúžených míst a překážek na ÚC, obsahující místo s vysokou koncentrací osob, s nuceným souběhem davů, se sníženou dostupností ÚC a s neočekávanou změnou v průběhu evakuace. (Pro srovnání je vhodné volit i jeden scénář dle předpokladů ČSN.)



Obr. 5.2: Ukázka sestavené sady návrhových scénářů evakuace při analýze ÚC pro tunel (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11])

### Aspekty procesu evakuace

Na proces evakuace je nutné nahlížet komplexně, nikoliv jen jako na pohyb osob – jednotlivců v prostoru, v kterém se pohybují z bodu „A“ do bodu „B“ bez působení okolních vlivů. Naopak je nutné zahrnout i vnější vlivy prostředí, okolních lidí, psychologicko-sociologický stav jedinců i případný vývoj událostí během celého procesu evakuace. Vlivy ovlivňující zejména pohyb a chování osob při průběhu evakuace si představíme v následujících odstavcích.

### Aspekty ovlivňující pohyb osob při evakuaci

- **Rozhodovací matice**

Samotný výběr ÚC nebo výběr východu je ovlivněn zejména:

- **typem evakuace** – řízená/neřízená evakuace [198],
- **existencí vůdce** – přítomnost přirozeného leadera nebo vedoucího zaměstnance (vůdčí rysy) [416],
- **znalostí budovy** – užívané trasy (převážně cesta, kterou osoby přišly) [464, 290],
- **orientačním systémem** – naváděcí evakuační značení či osvětlení [379, 174, 273],
- **dostupností trasy** – volná, bez nebezpečí, nepřístupná [451] [254],
- **vlivem okolních osob** – jít s davem (tzv. band wagon) či následování osob [222, 185, 226].

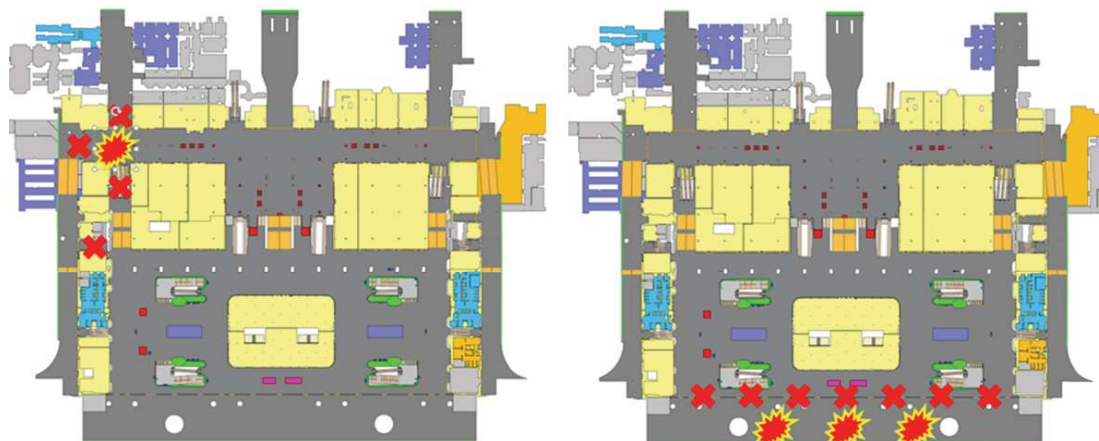
- **Dostupnost tras**

Základním předpokladem, podobně jak je tomu i u přístupu dle ČSN 73 08XX, je dostupnost všech ÚC v daném okamžiku evakuace. Dostupnost tras je uvažována dle [222, 226, 333] jako:

- **běžná provozní** – všechny trasy a východy jsou dostupné jako při běžném provozu,

- **znenpřístupnění jedné nebo více tras (ÚC/východu)** – situace způsobená špatným provozním postupem (uzamčené dveře, vznik masivní kongesce) nebo vznikem mimořádné události (vyřazení technického zařízení z provozu, zatarasení východu, zřícení konstrukce, vznik nebezpečí – požár, útočník apod.).

V reálných situacích mohou nastat různé varianty přístupnosti tras, a proto je nutné ověřit i různé varianty kombinací nedostupných ÚC, jak je zmiňováno i ve studii odst. 5.2.1 a odst. 5.2.1.



**Obr. 5.3:** Názorná ukázka schémat evakuačních scénářů s dostupností tras (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20])

- **Reakční doba**

Jak už bylo uváděno (blíže viz Příloha E), rozlišujeme dle reakční doby tři základní evakuační scénáře – rychlou evakuaci, plynulou evakuaci a pomalou evakuaci. Na výslednou dobu před pohybem působí řada vnějších podnětů a behaviorálních vlastností osob, které mohou mít vliv [465, 198, 198, 278, 335]:

- **zpomalující** – špatný psychický a fyzický stav jedince (toxicita, špatná viditelnost, zkratovitě jednání, dezorientace), vliv psychoaktivních látek a alkoholu (osoby pod vlivem mají delší reakční dobu – setrvávají na místě a tvoří umělé kongesce) [523], sociální faktor (vazba na někoho v davu), hendikep, manipulace s osobními věcmi (sbírání zavazadel, kočárku, kabelky apod.),
- **urychlující** – alarm, vyhlášení poplachu, pokyn k opuštění budovy, nařízení vůdce, znalost prostředí apod.

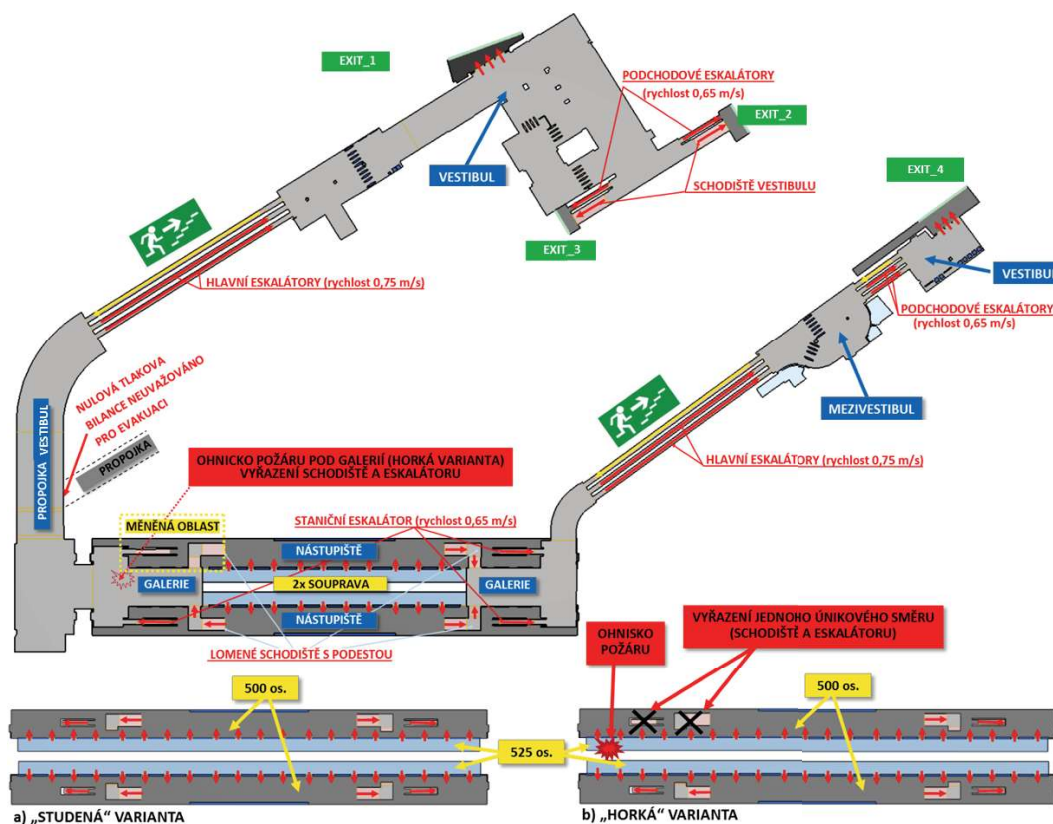
- **Pohyb a orientace v prostoru**

Základním předpokladem běžné evakuace osoby je pohyb k nejbližšímu (známému) východu, ale při tvorbě scénáře je nutné zohlednit i další faktory, které mohou ovlivnit pohyb a orientaci při výběru evakuační trasy, jako jsou např.:

- **sociální faktor** – tvorby skupin (známých osob, následování masy) a vazby na osoby v okolí (na rodinu, přátele) [142, 499, 296],
- **mobilita osob** – únava, vliv účinků požáru, osoba na vozíku musí volit sobě přístupnou trasu (výtah) [291, 459, 100],
- **aktuální podmínky okolního prostředí** – vysoké teploty, kouř, toxicita (produkty požáru) [69, 186],
- **aktuální stav na ÚC** – kongesce, fronty, vznik mimořádné události (požár, zatarasení) [69, 194],
- **znalost prostoru** – návyky a osobní preference (např. pracovník zná prostory budovy – „domácí prostředí“, naopak návštěvník budovy zná pouze cestu, kterou přišel) [290],



- **vliv psychoaktivních látek a alkoholu** – osoba pod vlivem může být agresivní, a vyvolávat tak i agresi v rámci davu [523, 70, 57],
- **hrozící nebezpečí** – útočník, bomba, ohrožení provozem a materiály, které se tam vyskytují apod. [107, 145].



Obr. 5.4: Výsledné schéma návrhového scénáře evakuace stanice metra pro – a) nenouzovou variantu („studená varianta“, vlevo) a b) nouzovou variantu („horká varianta“, vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [392, 11] přepracováno)

### Aspekty ovlivňující chování osob při evakuaci

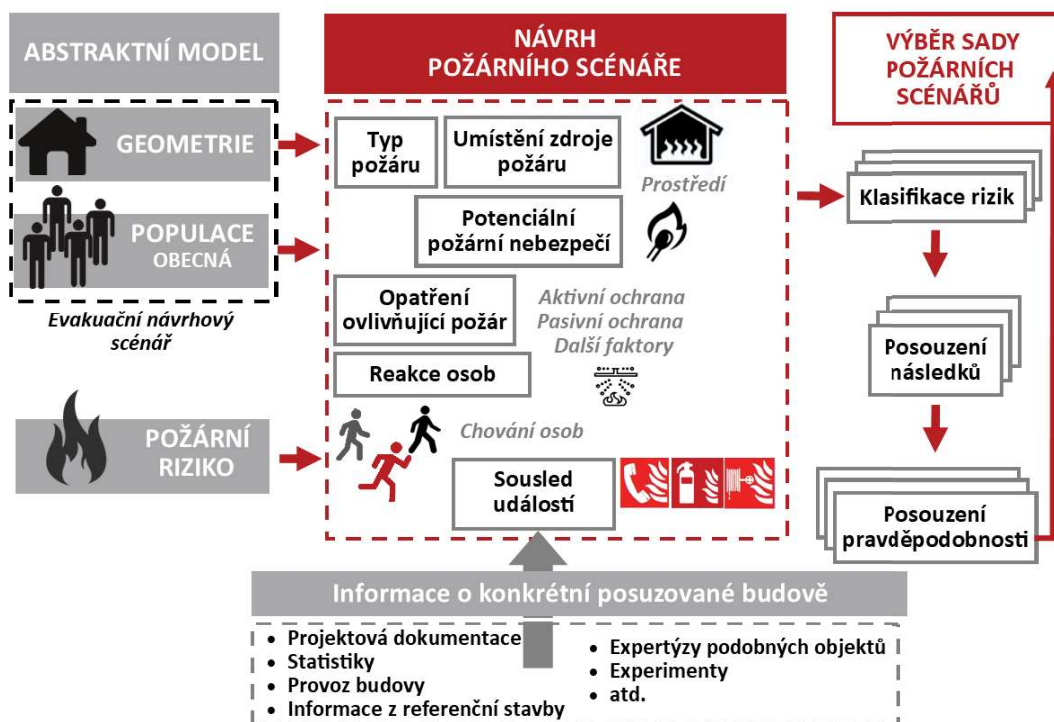
Evakuace a chování osob při ní se odvíjí od vzniklé situace a jejího vlivu na osoby (dostupnost cest, požár, zakouření, davová psychóza, sociální vliv apod.) Základní vlivy lze dělit na vlivy psychologického, fyziologického a sociologického rázu.

- **Psychologické vlivy** – jedná zejména o míru tzv. pocitu bezpečí – jak se osoba v dané situaci cítí, jak moc si uvědomuje ohrožení a díky tomu mění své chování. Často se toto odvíjí od vizuálního kontaktu s nebezpečím (plameny, kouř, prchající lidé). Velkou roli při davových situacích, kterou je i samotná evakuace, sehrává míra stresu a doba, po kterou jsou jí osoby nedobrovolně vystaveny. Obzvláště se jedná o situace, kdy se evakuovaní lidé dostávají do kongescí nebo míst, kde nemohou nic dělat a ani nemohou změnit svá rozhodnutí (vydat se zpět). Příkladem mohou být i studie zabývající se dopady psychologického chování osob za mimořádných situací [80, 70], vliv typu budovy na složení osob a jejich chování [477], interpretace lidského chování v návaznosti na požárně bezpečnostní řešení [199], vnímání rizika [290] apod.
- **Fyziologické vlivy** – jsou spojeny zvláště s fyzickou schopností jedinců uniknout působení okolních vlivů, které jejich schopnosti evakuovat ztěžují nebo zpomalují (kouř, nedostatečná viditelnost, teplota, bolest kůže a dýchacích cest – blíže viz kap. 5.1.2) [443, 444, 497, 526].
- **Sociologické vlivy** – odrážejí fakt, že je naše chování ovlivněno především naším postojem k okolí. Dav není homogenním celkem a sociální statusy, vazby a role v něm mají velkou roli, což znamená značný dopad i na proces evakuace. Celkově se odvíjí

od psychických procesů (poznávání, paměťové, pozornosti), psychického stavu (citově, emocionálně), psychických vlastností (schopnosti, temperament, charakter, rysy osobnosti) každého jedince [379].

### Požární návrhové scénáře

Návrhové požární scénáře popisují předpokládaný průběh odpovídajícího požáru v čase a prostoru pro konkrétní stavbu, která je charakterizována celou řadou faktorů (např. provoz, materiálové řešení, chování osob, aktivní ochrana BPZ, požární zatížení atd.). Jedná se o faktory, které mohou výrazně ovlivnit rozvoj a šíření požáru. Na jejich základě je pak sestaven souhrnný soubor možných požárních scénářů a zhodnocení jejich relativního rizika (tj. součin pravděpodobnosti výskytu požáru a jeho následků). Proces jejich sestavení je uveden blíže viz obr. 5.5. Obvykle je řešeno i více pravděpodobných modelů současně.



Obr. 5.5: Schéma sestavování požárních scénářů (zdroj: vlastní, přepracováno dle [304])

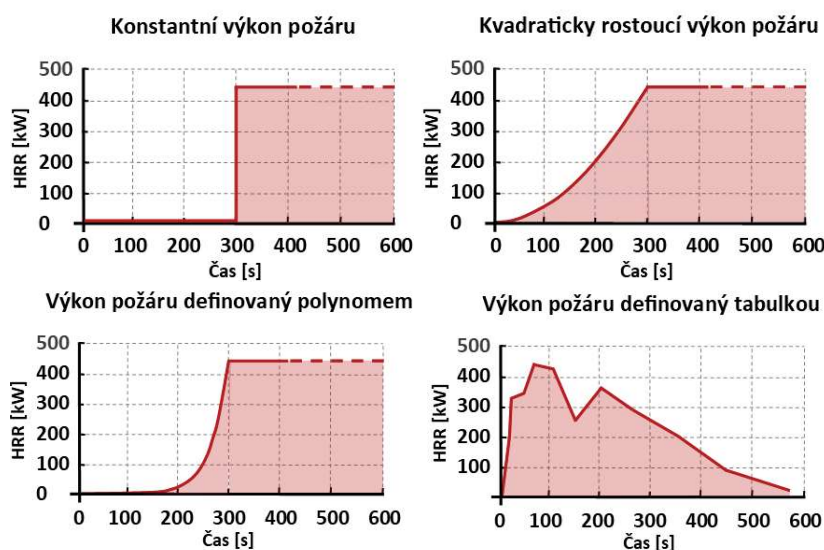
Příklady návrhových požárních scénářů a bližší informace o nich lze čerpat např. z [236, 301, 21, 205]. Pro návrhové požární scénáře jsou definovány základní parametry, jako jsou – příčina vznícení, místo vznícení, palivo, další materiály v okolí ohniska, působení požáru (vnitřní/vnější), charakter objektu/provozu, další vyskytující se materiály a vybavení (budoucí palivo pro rozvoj požáru), zhodnocení složení materiálů z pohledu indexu šíření plamene/toxicity a množství produkovaného kouře, míru dopadu, rychlost šíření, obsazenost okolních místností, POP, neúčinná pasivní/aktivní zařízení požární ochrany, způsob a účinek hašení atd. Velká část požárního scénáře je obsažena v rámci tzv. návrhového požáru.

### Návrhový požár

Návrhový požár je idealizovanou reprezentací reálného požáru, ke kterému může v dané situaci dojít. Stanovuje kvantitativní popis předpokládaných charakteristik požáru, obvykle se jedná o idealizovaný popis jejich časových změn – např. rychlost uvolňování tepla, velikost požáru, rychlost šíření plamene, uvolňování kouře či toxicity a její koncentrace (CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) a teploty v různých místech prostoru) [123]. Popisuje jednotlivé fáze požáru a slouží jako podklad pro návrhový požární scénář, na jehož základě je možné predikovat vývoj a následky konkrétního požáru – např. návrhový požár pro metro (hořící sedadlo vlakové soupravy),

požár stadionu (hořící stages), požár tunelu (hořící automobil, vlak) – jeho sestavení viz Příloha H.

Vstupní data pro návrhový požár ve formě rychlosti uvolněného tepla v závislosti na čase jsou do modelu nejčastěji aplikována jako křivka HRR (Heat Release Rate), nebo případně RHR (Rate of Heat Release), získaná z modelu uvolněného tepla či modelu spalování [131]. V modelu bývá nejčastěji interpretována tzv. požární křivkou návrhového požáru, pro kterou je nejprve určen rámcový požární scénář (kde, co, pravděpodobnost vznícení). Následně je stanoven její popis pomocí křivky HRR, která popisuje jednotlivé fáze vývoje požáru pro vznícený materiál. Pak je tato křivka modifikována na základě vnějších vlivů (ventilace, SHZ) a doplněna o další část křivky dle případného vznícení dalšího předmětu (paliva) a znovu modifikována. Tento cyklus je opakován dle množství hořlavých látek a jejich postupného vzněcování až do fáze dohořívání posledního paliva.



**Obr. 5.6:** Příklady návrhových HRR křivek výkonu požáru s různými průběhy – konstruovaný průběh (vlevo nahoře), kvadraticky rostoucí (vpravo nahoře), průběh stanovený komplexní křivkou (vlevo dole) a průběh definovaný hodnotami z tabulky (vpravo dole) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [25] přepracováno)

Pro model je HRR křivka definována nejčastěji jako matematická či tabelární křivka návrhového požáru s různou mírou idealizace (např. křivka konstantního výkonu – (5.2), křivka kvadraticky rostoucího výkonu – (5.3), výkon definovaný komplexní křivkou – (5.3), nebo na obr. 5.6). Dále křivkou, která je definovaná tabulkou či křivkou získaná z experimentálních dat – obr. 5.8 a obr. 5.9, u kterých je nutné v popisu vždy uvést, jakým způsobem a za jakých podmínek byla data měřena – např. kalorimetrické laboratorní měření blíže viz [205, 21].

$$P(t) = C \quad [\text{MW}] \quad (5.1)$$

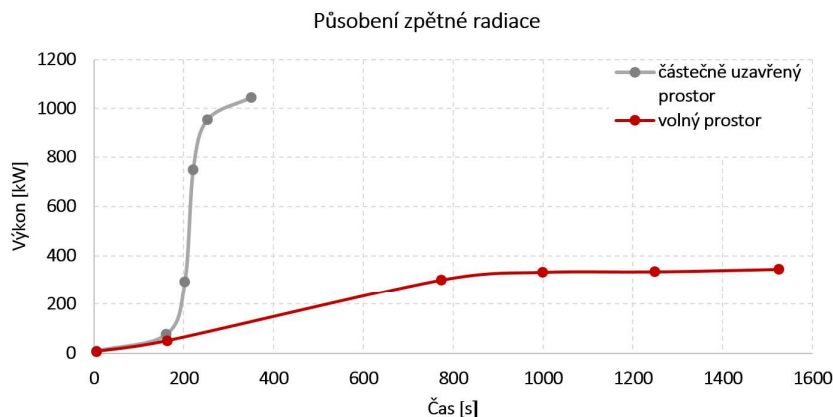
$$P(t) = C \cdot t^2 \quad [\text{MW}] \quad (5.2)$$

$$P(t) = A + B \cdot tC \cdot t^2 + C \cdot t^2 + D \cdot e^{E \cdot t} \quad [\text{MW}] \quad (5.3)$$

Pro popis požáru u většiny případů uvažujeme čtyři hlavní fáze, viz obr. 5.8 [21], pro něž můžeme získat data například z [146, 236, 235]:

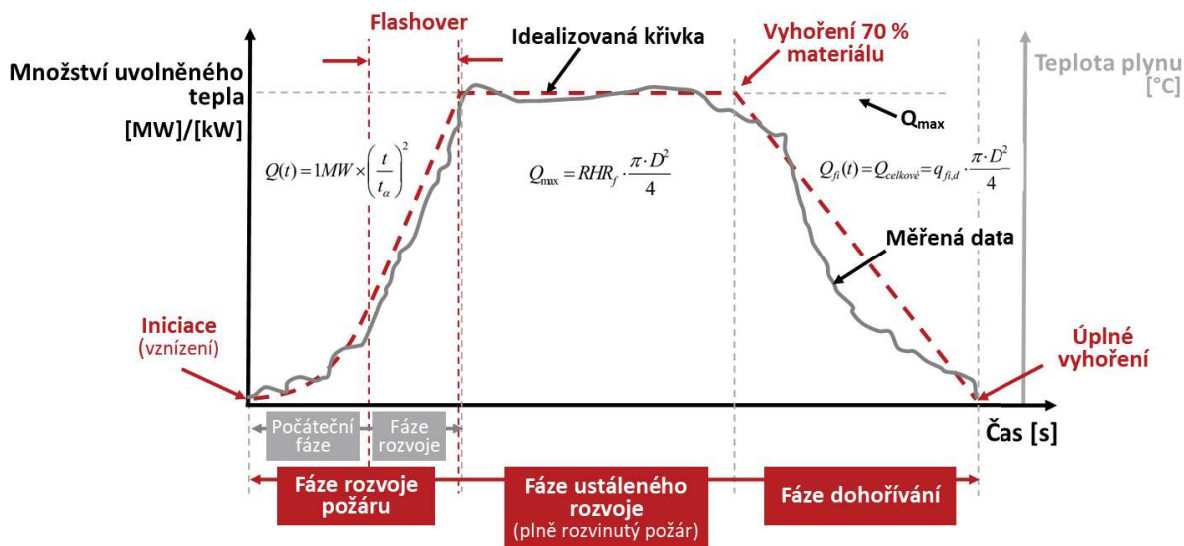
- **Fáze vznícení** – rychlost uvolněného tepla je minimální (odvíjí se od hořícího materiálu, v případě dodání hořlaviny – např. benzin, aceton, metanol atd. – dochází u této fáze k razantnějšímu zrychlení). U většiny deterministických modelů bývá tato fáze zanedbána předpokladem, že k vznícení již došlo a pro model je uvažován přímo rozvoj hoření, což ale nemusí být pro vyhodnocování dopadů požáru na evakuované osoby dostačující, jelikož právě ve fázi vznícení dochází k hoření při nízkých teplotách a možnému vzniku toxických látek.

- **Fáze rozvoje** – roste rychlost uvolňovaného tepla a šíření plamene, což se odvíjí od paliva, proudění vzduchu (např. silný vliv při požárech tunelových staveb) a umístění paliva v prostoru (zejména u uzavřených prostor, kde dochází ke zpětné radiaci (obr. 5.7), díky které palivo hoří intenzivněji). Následuje zlomový stav celkového vzplanutí (tzv. flash over), kdy dochází z vývoji požáru z lokálního do prostorového (jsou pohlceny všechny hořlavé materiály v místnosti).



Obr. 5.7: Působení zpětné radiace na rozvoj požáru (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [21] upraveno)

- **Fáze plného rozvinutí požáru** – zde dochází k ustálení množství uvolněného tepla a další vývoj se primárně odvíjí od podmínek větrání a dalších dostupných, prozatím nevznícených, zdrojů paliva (další iniciace požáru a cyklení).
- **Fáze dohořívání** – je postupným poklesem rychlosti uvolňovaného tepla. Tato fáze v řadě bezpečnostních analýz bývá dokonce zcela potlačena, jelikož předešlé fáze požáru demonstrují kritičtější podmínky (teplota, toxicita atd.) pro ohrožení unikajících osob.



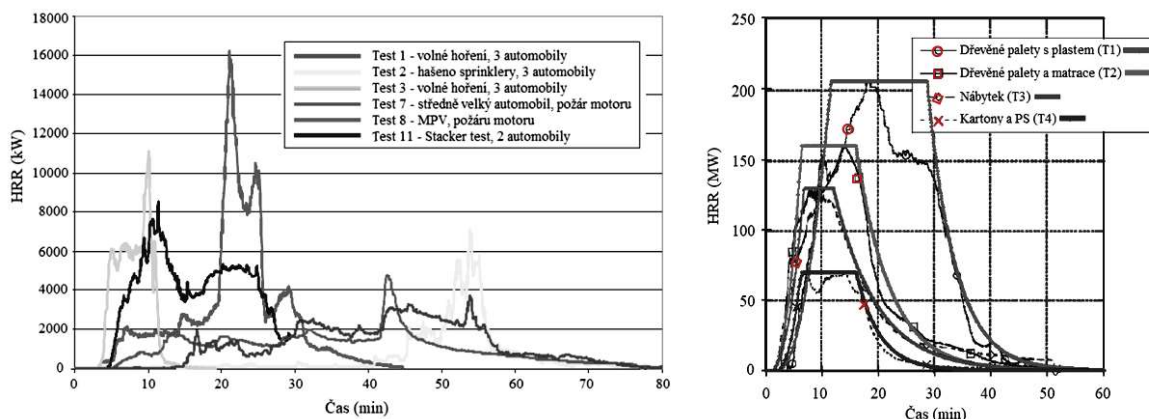
Obr. 5.8: Schéma popisu jednotlivých fází návrhového požáru (zdroj: vlastní, zpracováno dle [235, 133, 509])

Rychlost uvolňování tepla je popsána parabolicky, počátek je roven cca  $t^2$  a maxima dosahuje v ustáleném stavu, kdy lze její průběh dál řídit ventilací nebo palivem (podrobněji viz obr. H.1 v Příloze H). Výsledný tvar požární křivky návrhového požáru je závislý na velikosti požárního zatížení PÚ, typu provozu a času.

Využití pokročilých numerických modelů umožňuje zohlednit v rámci návrhového požáru právě jednotlivé jeho fáze a hlavní faktory, které jej ovlivňují, jako je např. hmotnostní a energetická výměna, či výměna plynu. Samotná vstupní křivka (HRR) a její tvar se odvíjí od detailního popisu návrhového scénáře, od posuzovaného prostoru (uzavřený/otevřený/budova/tunel), materiálu hoření (textil, postel, sedadlo, automobil, automobil



s nákladem), použití PBZ (hašení sprinklery) apod. Příklady HRR křivek požárních zkoušek dopravních prostředků v tunelových stavbách s různými okrajovými podmínkami jsou uvedeny na obr. 5.9.



Obr. 5.9: HRR požárních zkoušek osobních automobilů (zdroj: převzato z [95, 221])

### Volba vhodných materiálů pro specifikace PTCH dle volené situace a budovy

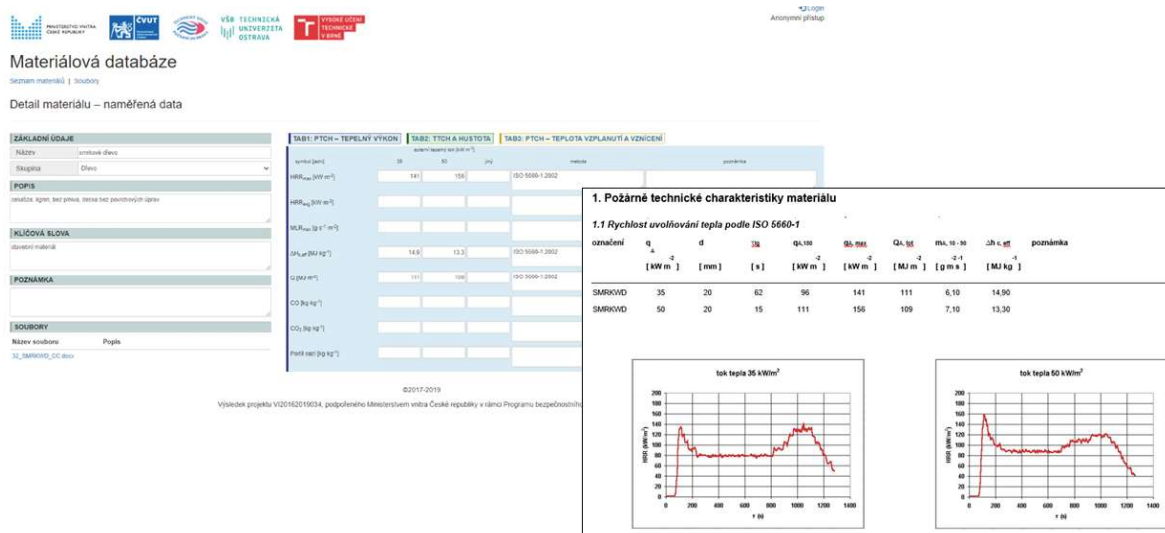
Přestože existují pokročilé modely pro výpočet a simulaci rozvoje požáru, nelze je spolehlivě a bezpečně aplikovat bez základních znalostí jeho rozvoje a procesu hoření, stejně jako při absenci základních vstupních údajů, pro návrhové požáry. Jak již bylo zmiňováno na začátku kap. 5.1.1, je při sestavování nutné vytipovat co nejpřesněji konkrétní materiály vyskytující se ve vybraných typech staveb (např. pro metro – ve stanicích, tunelech, uvnitř vozů; pro stadión – v zázemí, na pódiu; v nemocnici – v pokojích pacientů, ordinacích apod.), nebo by mohly být vneseny a využity v případě žhářského útoku.

Tab. 5.1: Příklad výběru materiálů pro požární návrhové požáry konkrétních specifických staveb (zdroj: vlastní, jejich PTCH čerpán z [396])

Typ stavby	Požární scénář	Vytipované materiály
Stadion	<ul style="list-style-type: none"> <li>Požár stage – bednění, textil, kabeláž</li> <li>Požár v zázemí termickém (technologické zařízení) / provozním (stánek fast food, šatna, catering apod.)</li> </ul>	Dřevo, nylon, kabely – PVC, PUR Olej ve fritéze, lepenka, textil, dřevo (nábytek)
LDN	<ul style="list-style-type: none"> <li>Požár pokoje pacienta – postel s pěnovou matrací a lůžkovinami</li> </ul>	Polyuretan, nylon, textil, dřevo (nábytek)
Tunel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Požár vlakové soupravy – sedadlo + donesený materiál</li> <li>Zahoření elektroinstalace</li> <li>Zahoření nečistot</li> </ul>	Lepenka, benzin, nylon, polyuretan, mazut Kabely – PVC, PUR Mastnota + prach
Obchodní centrum (OC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Požár OC – skladovaný materiál</li> <li>Požár odpadkového koše</li> <li>Požár ve „food corner“</li> </ul>	Nylon, lepenka, textil Plast, papír Olej ve fritéze, lepenka, skladované potraviny
Žhářský útok	<ul style="list-style-type: none"> <li>Žhář vnesl palivo do budovy s sebou</li> </ul>	Karton + benzin Nylon (tašky s oblečením) + benzin Vulkanizovaná pryž + benzin

Je nutné volit kritické varianty z pohledu množství a materiálového složení s přihlédnutím k pravděpodobnosti možnosti vzniku uvažované události. Pro názornost byly v tab. 5.1 uvedeny příklady materiálů a jejich množství pro sestavení konkrétních návrhových požárů pro jednotlivé typové specifické stavby dle jejich povahy a jejich provozu. Pro vybrané materiály je třeba stanovit požárně technické charakteristiky (PTCH), nebo je čerpat z dostupných

zdrojů např. z [396, 205, 302], kde jsou PTCH stanoveny na základě dostupných experimentálních dat – laboratorních požárních testů. Zmiňované zdroje vznikly *VI20162019034* byla vytvořena certifikovaná metodika – *Vstupní data do modelů požáru* [205], která se věnuje právě problematice definování zdrojů hoření jako vstupních dat pro numerické modely dle jejich komplexity přístupu. Pro samotnou tvorbu návrhových požárů vznikla *Materiálová databáze ověřených požárně technických charakteristik materiálů* [396], která je souhrnným přehledem dat, získaných zejména z velkorozměrových zkoušek, laboratorního měření (konickým kalorimetrem) a z rešerší literatury (blíže viz obr. 5.10).



**Obr. 5.10:** Ukázka databáze ověřených požárně technických charakteristik materiálů, projektu VERIFIRE (vlevo) a příklad vstupních dat pro návrhový požár (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s projektem *VI20162019034* [396])

Pro ucelenost a okamžité aktivní využití v rámci numerických modelů by bylo vhodné tuto databázi revidovat, doplnit o základní charakteristiky jednotlivých stavebních materiálů potřebné i při užití standardních výpočetních metod dle ČSN (např. objemová hmotnost, výhřevnost apod.) a to s ohledem na možnost provedení srovnání výsledků těchto výpočetních metod a předpoklad, že i při zavádění do praxe (minimálně na začátku) budou muset být předkládány oba způsoby výpočtu. Dále by bylo vhodné se zaměřit na rozšíření množství druhů nabízených materiálů a jejich specifikací, zejména obkladových a izolačních hmot (např. neuvažovat pouze jeden univerzální izolant EPS F70, ale obsáhnout celou aktuálně využívanou škálu v praxi zejména dle jejich objemové hmotnosti a možností užití). Pro aktivní užití numerických modelů požáru a šíření toxicity je nutné stávající databázi [205] doplnit i o materiály, které nejsou čistě stavebního charakteru, ale mohou se vyskytovat v konkrétních posuzovaných typech staveb a jejich specifický provozech – jako jsou skladované materiály (potravin, textil, hořlaviny, nábytek apod.), textilní materiály (závěsy, lůžkoviny), polyuretan (matrace, čalounění), PVC (podlahové krytiny, elektroinstalace apod.).

### 5.1.2 Interpretace výsledků evakuačního modelu

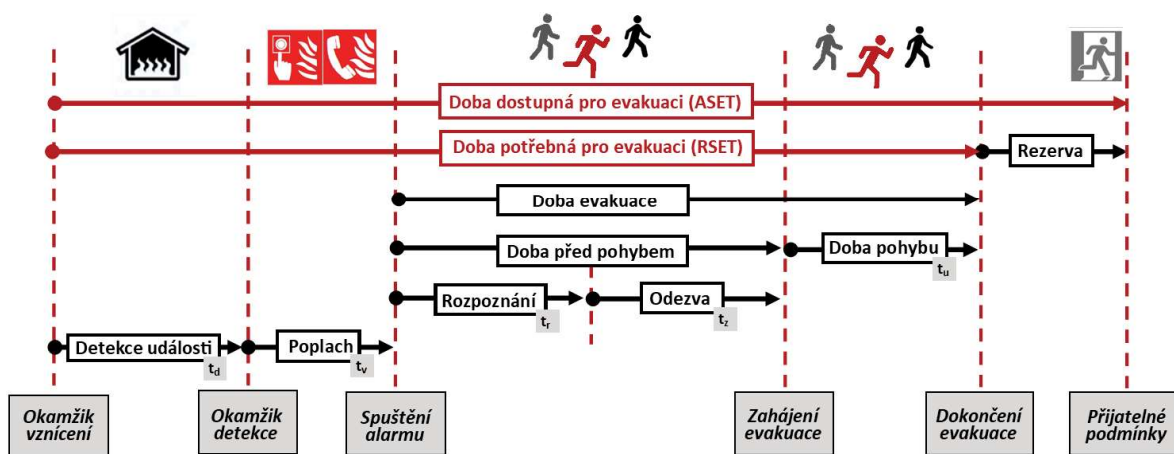
Na základě získaných zkušeností, ověřených postupů z jednotlivých posudků referenčních staveb a jednání s HZS, byla sestavena sada vhodných výstupů pro vyhodnocení a interpretaci výsledků evakuačního modelu pro účely PBR v souladu s ČSN, která dostatečně reflektuje a názorně demonstuje splnění/nesplnění požadavků. Při interpretaci výsledků je prováděno časové zhodnocení dopadu návrhového požárního scénáře na evakuované osoby z hlediska jejich umístění a aktuálních okolních podmínek (vývoje evakuačního scénáře). Mezi klíčové výstupní parametry jsou při posuzování evakuace osob vyhodnocovány následující: doba evakuace, doba zdržení, průměrná rychlost pohybu osoby, místa s kritickou hustotou osob,

úroveň kvality pěší dopravy, vystavení osoby účinkům požáru (ty jsou přiblíženy níže) a také identifikace kritických míst (ty jsou názorně demonstrovány v kap. 5.3 a kap. 5.4).

Cílem posudku je zajistit, aby osoby uvnitř zasažené stavby byly schopny v případě kritické situace posuzovaný objekt opustit a přesunout se do bezpečného místa nebo zůstat na místě nezasaženém požárem/útokem po dobu nezbytnou pro jeho potlačení. To vše bez vystavení se životu a 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 ještě umožní účinnou evakuaci osob, a současně neznamená ohrožení jejich zdraví [16].

## Doba evakuace

Při vzniku kritické situace musí při evakuaci každý účastník opustit prostor v takovém čase, aby nedošlo k jeho ohrožení v nastalých podmínkách. Celkové posouzení evakuační doby je založeno na porovnání doby dostupné pro evakuaci (ASET) a doby potřebné pro evakuaci (RSET); vzájemné vztahy mezi jednotlivými složkami jsou blíže vysvětleny níže a na obr. 5.11. Stanovení míry bezpečnosti pro evakuační čas je pak rozdílem mezi ASET a RSET, kde ASET musí být vždy větší hodnotou. Výsledkem je část evakuační doby představující časovou (bezpečnostní) rezervu. Ta bývá považována za klíčový vstupní údaj pro analýzu rizik. Čím větší tato časová rezerva je, tím větší je i míra bezpečnosti osob při evakuačním procesu [487].



Obr. 5.11: Struktura jednotlivých časových úseků evakuačního procesu pro nouzovou a nenouzovou evakuaci (zdroj: vlastní, přepracováno dle [235])

Při analýze efektivity zabezpečení je predikce pohybu osob v průběhu evakuace základním postupem. Obecně platí, že bezpečnost evakuovaných je zajištěna v případě, kdy doba potřebná pro evakuaci (ASET) je kratší než doba dostupná pro evakuaci (RSET) [441, 235]. Tedy:

$$ASET \geq RSET + \text{časová rezerva} \quad (5.4)$$

Při vyhodnocování je nutné mít na paměti, že jednotlivé klíčové časové intervaly (rozpoznání, odezva, pohyb apod.) nejsou napříč účastníky provozu identické, a nejsou identické ani v případě opakování stejné situace u stejné osoby. Výsledek je ovlivněn stochastickou povahou klíčových parametrů vstupujících do konceptu posouzení. V tomto případě časová (bezpečnostní) rezerva může být užita k pokrytí vyvstalých nejistot.

### Doba dostupná pro evakuaci (ASET)

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

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

Pro stanovení 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 z obecně uznávaných zdrojů, např. [235, 149].

### Doba potřebná pro evakuaci (RSET)

Doba potřebná pro evakuaci je komplexní veličina, která je složena z řady dílčích intervalů, viz vztah 5.5. 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 z následujících časových intervalů [16]:

$$RSET = t_d + t_v + t_r + t_z + t_u \text{ [min]} \quad (5.5)$$

kde

$t_d$  ... doba detekce [min],

$t_v$  ... doba vyhlášení poplachu [min],

$t_r$  ... doba evakuace [min],

$t_z$  ... doba před pohybem [min],

$t_u$  ... doba pohybu [min].

- **Doba detekce**,  $t_d$  události je časový interval, který uplyne od vznícení požáru do jeho detekce příslušným protipožárním zabezpečením, personálem budovy nebo jejími návštěvníky/obyvateli. Pro určení tohoto časového intervalu lze použít 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 vyhlášení poplachu**,  $t_v$  závisí především na způsobu detekce požáru. Reakční doba elektronického protipožárního systému bude výrazně kratší než reakce obslužného personálu, která je silně závislá na lidském faktoru.
- **Doba samotné evakuace** je časový interval od vyhlášení evakuace do okamžiku, kdy se osoba rozhodne k pohybu. Závisí především na podrobné znalosti lidského chování v krizových situacích. Pro její určení jsou využívány právě pokročilé softwarové modely. Většina ze zmiňovaných modelů (viz kap. *Numerické modely*) pracuje s dobou před pohybem a s dobou pohybu osob samostatně.
- **Dobu před pohybem**,  $t_z$  chápeme jako časový interval od okamžiku, kdy je konkrétní osoba na základě vzniklé situace poprvé vystavena vnějším podnětům (alarm, kouř, teplota, křik apod.), rozhoduje se až do okamžiku, kdy se rozhodne zahájit pohyb pro samotnou evakuaci na bezpečné místo.

$$t_{vz} = t_r + t_z \text{ [min]} \quad (5.6)$$

kde

$t_{vz}$  ... doba před pohybem [min],

$t_r$  ... doba rozhodnutí [min],

$t_z$  ... doba odezvy [min].

- **Doba pohybu**,  $t_u$  pak představuje časovou náročnost dokončení procesu evakuace na bezpečné místo. Samotná doba pohybu, nebo i doba evakuace jedince, je ovlivněna celou řadou parametrů, jako např. vzdálenost jedince od východu, počet a rozmístění osob, charakteristika osob (rychlost, mobilita atd.), preference, znalost a dostupnost únikových východů, kapacita klíčových prvků geometrie, instalace orientačního systému apod.

Dle obr. 5.11 je patrné, že samotná doba pohybu  $t_u$  je znatelně kratší než doba před pohybem  $t_{vz}$ , ale to není pravidlem zejména u specifických budov s vyšší obsazeností osob se sníženou mobilitou, jakými může být např. LDN, nemocnice, stacionář apod., kde často dochází k rychlému rozpoznání a pravidelnému nácvičku evakuačního procesu (plánování krizového managementu), ale samotná doba pohybu  $t_u$  je díky obsazení modelu (osoby na vozíku, imobilní atd.) značně časově náročnější, proto pro tento typ staveb platí vztah:

$$t_{vz} \ll t_u \quad [\text{min}] \quad (5.7)$$

kde

$t_{vz}$  ... doba před pohybem [min],

$t_u$  ... doba pohybu [min].

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. I proto je tato oblast v současné době předmětem intenzivního výzkumu (např. D. Purser et al. [445], M. Kobes et al. [278], N. C. McConnell et al. [349], R. Lovreglio et al. [339]).

### Doba zdržení cestujících

Dalším ukazatelem efektivity evakuace z budovy či posuzovaných prostor (případně i řešených variant návrhů) je celkové zdržení evakuovaných osob při průchodu těmito prostorami. Simulace zahrnuje průběh evakuace všech osob z budovy, čímž nastává situace, kdy jsou koridory vytíženy na maximum a je zde nutno předejít jakékoliv chybě (ve formě špatného návrhu, vzniku masivních provozních kongescí či nadměrného zdržení). Pro každou simulovanou osobu lze při procesu evakuace stanovit kumulativní časové zdržení, díky kterému lze vyhodnotit i účinnost případně navrhovaných úprav.

### Průměrná rychlost pohybu osoby

Alternativním hodnotícím parametrem je průměrná rychlost osoby při evakuaci. Tento ukazatel doplňuje předchozí srovnávací metodu a současně slouží jako nepřímý indikátor bezpečnosti navrženého řešení. Riziko zranění, způsobené například kolizí osob či zakopnutím, se zvyšuje s klesající průměrnou rychlostí a současně s rostoucí lokální hustotou pěšího proudu a s tím spojeným i zvyšujícím se stresem osob v těchto situacích.

### Kritická místa geometrie

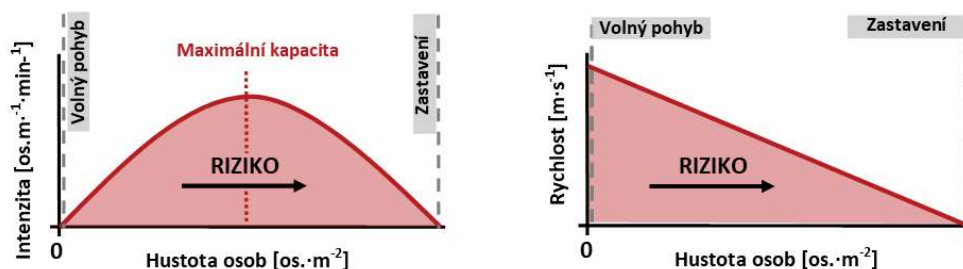
Výsledky simulace umožňují identifikaci kritických míst (blíže viz kap. 5.4), kde lze očekávat zejména zvýšenou hustotu osob, jejich přílišnou fyzickou interakci či delší zdržení za nastalých



podmínek (např. míra zakouření, vysoká teplota, přítomnost toxických látek apod.). Tyto faktory vedou ke zvýšenému stresu osob a případnému vzniku kritických událostí (např. zranění, ušlapání apod.). Na tato zjištění je pak možno reagovat formou úprav stávající stavby nebo změny návrhu. Účinnost změn pak lze opakovaně ověřovat.

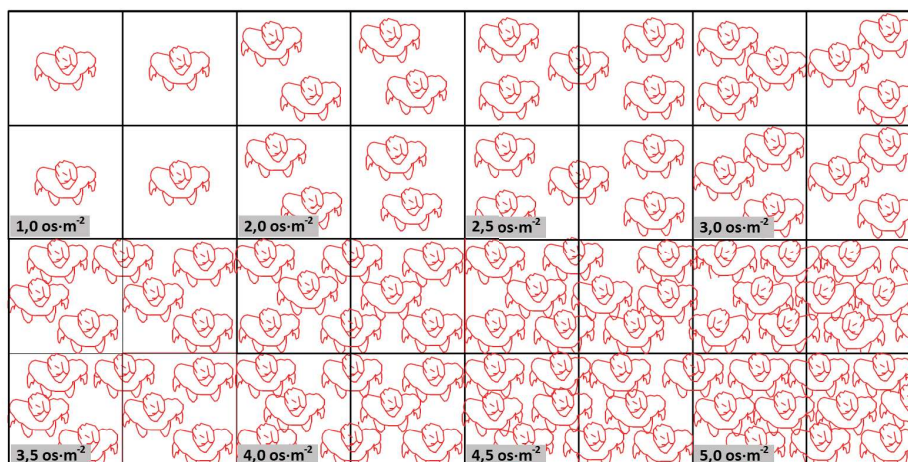
### Místa s kritickou hustotou

Kromě evakuačního času je třeba brát v potaz jako důležitý rizikový faktor také lokální hustotu osob. Platí, že riziková úroveň hustoty je pro stojící a pohybující se skupinu osob odlišná. Při překročení kritické úrovně lokální hustoty dramaticky roste riziko zranění nebo dokonce úmrtí jednotlivce či skupiny osob v důsledku mechanických poranění (nejčastěji fraktury) nebo udušení způsobeného nemožností pohybu bránice. Popsaná rizika, spojená s vysokou hustotou osob, vzniklá jako důsledek samotného evakuačního procesu a konkrétní geometrie modelovaného prostoru (např. nouzový východ z tunelu), jsou pokročilé modely evakuace osob schopny vyhodnotit. Klíčovou metrikou tohoto posouzení je tzv. úroveň kvality pěší dopravy, blíže viz odst. 5.1.2 [17].



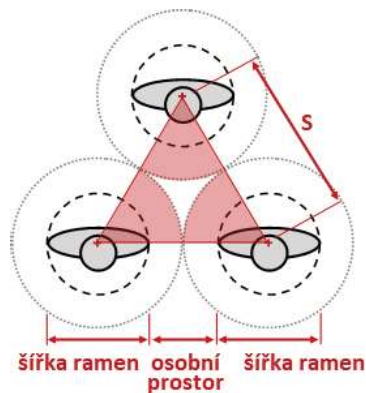
**Obr. 5.12:** Přibližný vztah mezi intenzitou proudu pohybujících se osob a jejich hustotou (vlevo) a přibližný vztah mezi rychlostí proudu pohybujících se osob a jejich hustotou (vpravo) (zdroj: vlastní, přepracováno dle [25])

Jednotlivec je z hlediska minimálního prostoru, který zaujímá, a interakcí s okolními osobami, popisován tzv. elipsou těla. Fruinův koncept tuto elipsu definuje jako eliptickou čáru, znázorňující 95% percentil půdorysných rozměrů oblečeného dospělého muže s určitým přidaným prostorem, který odrazí snahu jednotlivce vyhýbat se přímému dotyku s okolními osobami – tzv. základní elipsa těla, která byla již dříve představena v kap. 4.2.3. Uvedené hodnoty jsou dnes v inženýrské praxi široce akceptovány a bývají s určitými odchylkami aplikovány při návrhu dopravních terminálů, tunelů apod.



**Obr. 5.13:** Znázornění statické hustoty davu – od nízkých hodnot hustoty  $1,0 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$  až po ty kritické  $5,0 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$  (zdroj: vlastní, věnováno od [605], přepracováno dle [521])

Pokud vezmeme v úvahu národnostní, věková a zdravotní specifika osob, pak se plocha, kterou zaujímá jednatel v rámci větší skupiny osob, pohybuje v rozmezí hodnot  $0,20 \text{ m}^2$  (průměrná hodnota) až  $0,26 \text{ m}^2$  (maximální hodnota). Tedy maximální hustota osob, kterou lze označit za hraniční, pohybuje se v intervalu  $4\text{--}5 \text{ osob}\cdot\text{m}^{-2}$ , jak je vidět na obr. 5.13, a její vyšší hodnoty jsou již nebezpečné.



Obr. 5.14: Schéma výpočtu hustoty osob na plochu (zdroj: vlastní, přepracováno dle [403])

$$A_{\text{TRI}} = \frac{1}{2}(S \sin 60^\circ) = \left(\frac{\sqrt{3}}{4}\right) S^2 \quad (5.8)$$

$$\#_{\text{PERS}} = (3) \left(\frac{60^\circ}{360^\circ}\right) = \frac{1}{2} \quad (5.9)$$

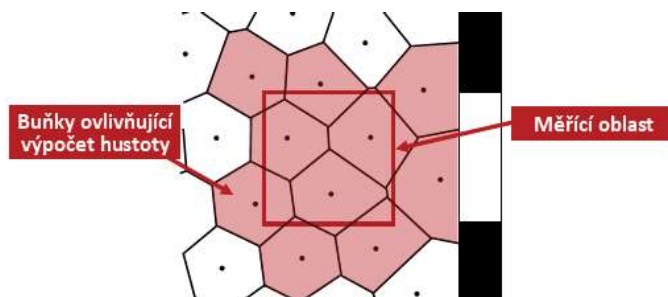
$$\rho_{\text{HEX}} = \frac{\#_{\text{PERS}}}{A_{\text{TRI}}} = \frac{\frac{1}{2}}{\left(\frac{\sqrt{3}}{4}\right) S^2} = \frac{2}{(\sqrt{3})S^2} \quad (5.10)$$

Nástroje většinou definují hustotu osob na ploše jako zjednodušenou (hexagonální), kde dochází k výpočtu plochy trojúhelníka, který má v sobě mezeru. Délka hrany trojúhelníka je definována šířkou ramen osoby a velikostí osobního prostoru, blíže viz obr. 5.14.

### Výpočet lokální hustoty

- **Měřicí oblast**

Pro samotný výpočet hustoty a rychlosti je možné využít také měřících oblastí (ohraňovaná plocha, viz obr. 5.15) využívajících Steffen a Seyfriedovu metodu [518] založenou na Voronoiho diagramu. Pro implementaci Voronoiho diagramu je spojitá plocha, ztvárňující prostor pro možný pohyb, rozdělena mezi osoby do uzavřených buněk. Díky velikosti jednotlivých buněk je vypočítána hustota (rychlost) pro každou osobu v daný okamžik. Jednotlivé hodnoty hustot jsou spojeny pro celkový výsledek pomocí váženého průměru, kde jsou váhy dané velikostí měřící oblasti protínající Voronoiho buňky. Za maximální rádius vlivu okolních osob je brána vzdálenost  $1,41 \text{ m}$  ( $4 \text{ m}^2$ ), další vzdálenější osoby nemají na výpočet vliv. Využití Voronoiho diagramu a následné interpolace buněk je pro interpretaci výsledků poměrně zásadní.



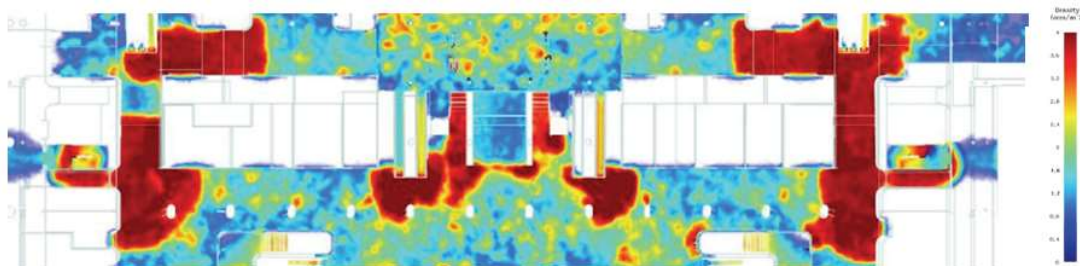
Obr. 5.15: Schéma průniku měřící oblasti a plochy pro pohyb osob rozdělené do Voronoiho buněk (vlevo), barevné schéma lokální hustoty proudícího davu – reálný experiment (zdroj: vlastní, přepracováno dle [406, 166])

- **Měřicí profil**

Případně lze v rámci modelu aplikovat měřící profily stejně, jak je tomu při profilovém měření v terénu. Pro toto měření lze zvolit v modelu jakékoliv dveře (dveře mezi místnostmi, cíleně vytvořené dveře na profilu koridoru nebo i dveře na konci schodiště),



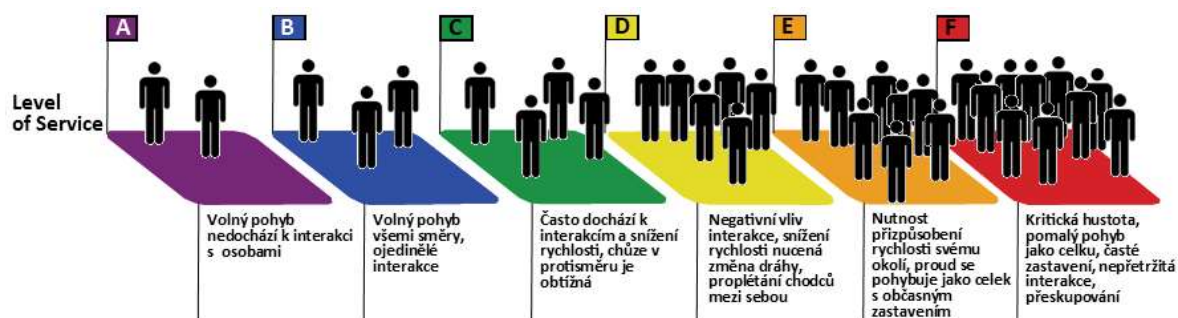
které měří průtok osob ( $\text{os}\cdot\text{s}^{-1}$ ) skrze profil, přepočtený na šířku těchto dveří, nebo také počet osob, jejich ID, průměrnou rychlost mezi profily apod.



**Obr. 5.16:** Příklad interpretace výsledků hustotní mapy – výřez posuzované stavby (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20])

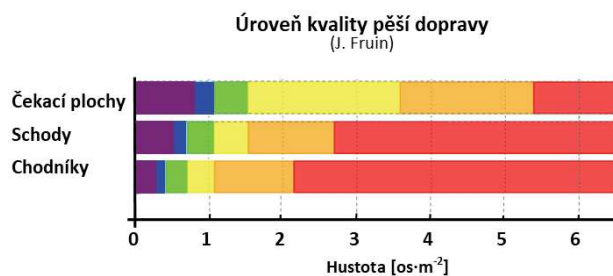
### Úroveň kvality pěší dopravy (LOS)

Pojem úroveň kvality (Level of Service = LOS) má původ v dopravním inženýrství. Jedná se o kvalitativní vyjádření dopravní situace na komunikaci, zohledňující prostorovou situaci jednotlivých úrovní pomocí zjednodušené stupnice A–F s kvalitativním slovním popisem, pro názornost blíže viz obr. 5.17. Úroveň kvality dopravy označovaná A (tmavě modrá) znamená volný pohyb osob, kdy se jednotlivé osoby vzájemně neovlivňují a díky tomu se pohybují rychlostí blízkou maximální hodnotě. Úroveň označovaná F (červená) pak znamená opačnou situaci, kdy jsou osoby velmi ovlivněny okolními osobami i vysokou hustotou davu, pohybují se velmi pomalu a při nárůstu hustoty na kritické hodnoty dochází až k jejich úplnému zastavení.



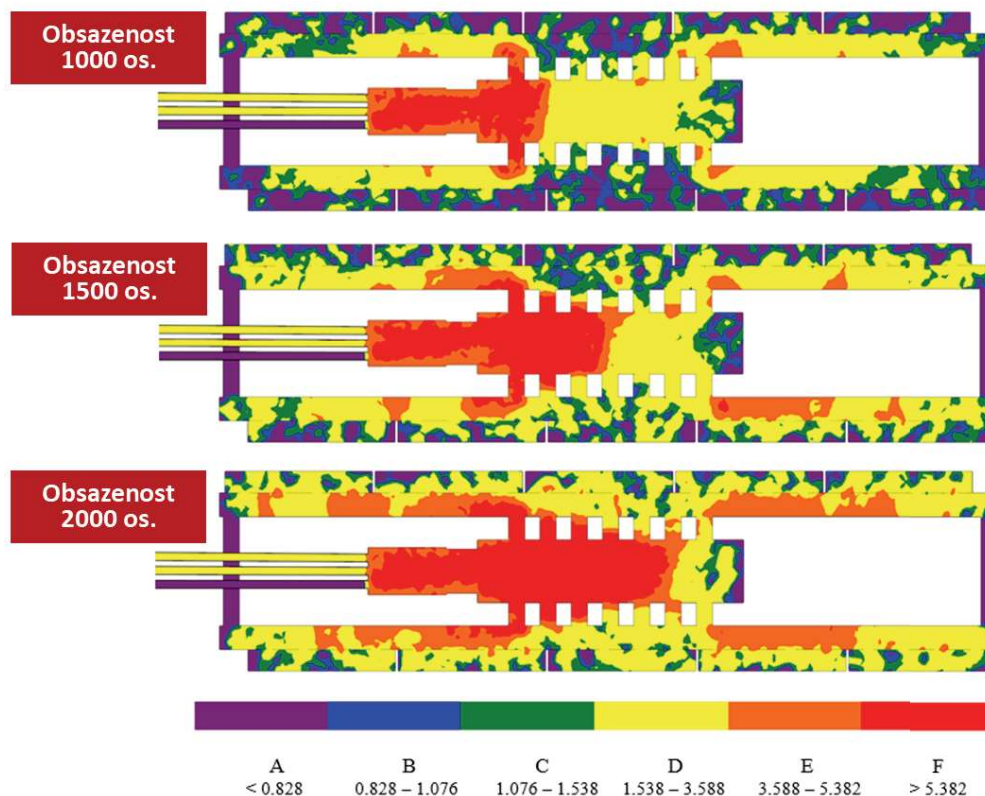
**Obr. 5.17:** Grafické znázornění Level of Service (LOS) se slovním popisem (zdroj: vlastní, přepracováno dle [173])

V odborné literatuře [172, 555, 66] existují zmínky o celé řadě konkrétních metod pro stanovení úrovně kvality pěší dopravy. Jednou z nejuznávanějších je metoda z r. 1987, popsána J. Fruinem, která je považována za standard. Fruin ve své metodě zohledňuje i dynamiku pěšího proudu, uvažuje jednotlivé úrovně odlišně pro plochy, schody a chodníky 5.18 – problematika je podrobněji rozebrána v [173].



**Obr. 5.18:** Úroveň kvality pěší dopravy pro různé typy komunikací – čekací plochy, schody, chodníky dle Fruina (zdroj: převzato z [173])

Pro vizuální hodnocení jednotlivých úrovní kvality pěší dopravy, kdy nemáme k dispozici jednoznačné číslo určující hustotu, je důležitý jejich kvalitativní slovní popis (uvedený na obr. 5.17), který pak slouží jako zpětná vazba u již přiřazeného hodnocení.



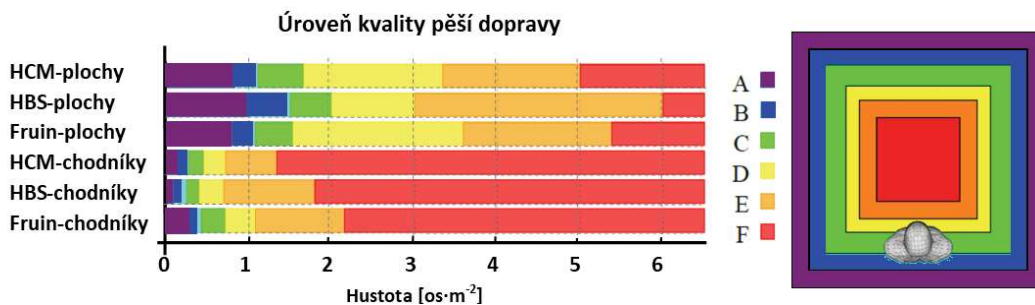
**Obr. 5.19:** Příklad kvalitativního posouzení vlivu obsazenosti objektu na LOS v průběhu evakuace, v čase 120 s, pro obsazenost 1000 os., 1500 os., 2000 os. (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [557] přepracováno)

Konkrétní číselná vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro úrovně kvality pěší dopravy jsou v tab. 5.2.

**Tab. 5.2:** Číselná vyjádření úrovně kvality pěší dopravy pro různé typy komunikace dle Fruina (zdroj: přepracováno z [173])

Úroveň	Chodníky		Schody a rampy		Čekací plochy	
	Min. [os·m <sup>-2</sup> ]	Max. [os·m <sup>-2</sup> ]	Min. [os·m <sup>-2</sup> ]	Max. [os·m <sup>-2</sup> ]	Min. [os·m <sup>-2</sup> ]	Max. [os·m <sup>-2</sup> ]
A	0,000	0,308	0,000	0,538	0,000	0,828
B	0,308	0,431	0,538	0,718	0,828	1,076
C	0,431	0,718	0,718	1,076	1,076	1,538
D	0,718	1,076	1,076	1,538	1,538	3,588
E	1,076	2,153	1,538	2,691	3,588	5,382
F	2,153	–	2,691	–	5,382	–

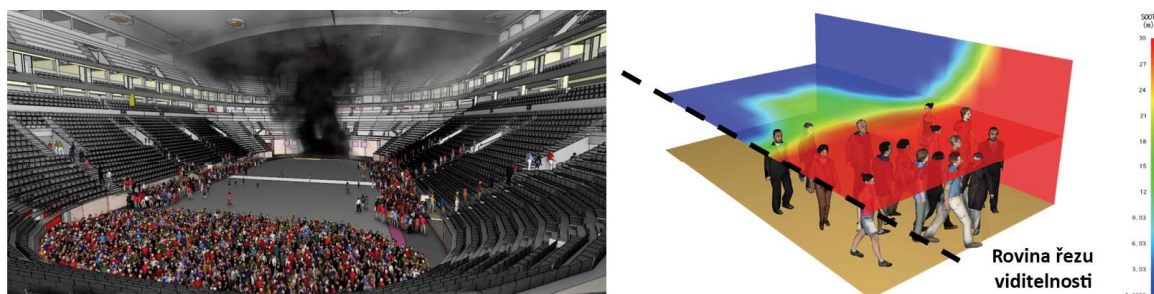
Z tabulky vyplývá, že hodnoty pro chodníky a čekací plochy se značně liší. Zatímco v případě chodníku je nejvyššího stupně F dosaženo pro hustotu přibližně 2,2 osob·m<sup>-2</sup>, v případě čekací plochy je tato hodnota přibližně 5,4 osob·m<sup>-2</sup>, tedy více než dvojnásobná. Pro lepší představu, jaké prostorové nároky má jedinec v jednotlivých úrovních kvality pěší dopravy vzhledem k půdorysu stojící osoby, slouží znázornění na obr. 5.20.



**Obr. 5.20:** Rozdělení úrovní kvality pěší dopavy podle typu komunikace a hustoty osob dle [555] (HCM), [66] (HBS) a J. Fruina [173] (vlevo), grafické vyjádření prostorových nároků pro jednotlivé úrovně kvality pěší dopavy stojící osoby – od úrovně A (modrá) po úroveň F (červená) – rozměry odpovídají úrovním kvality pěší dopavy pro chodník (vpravo) (zdroj: upraveno a převzato z [173, 555, 66])

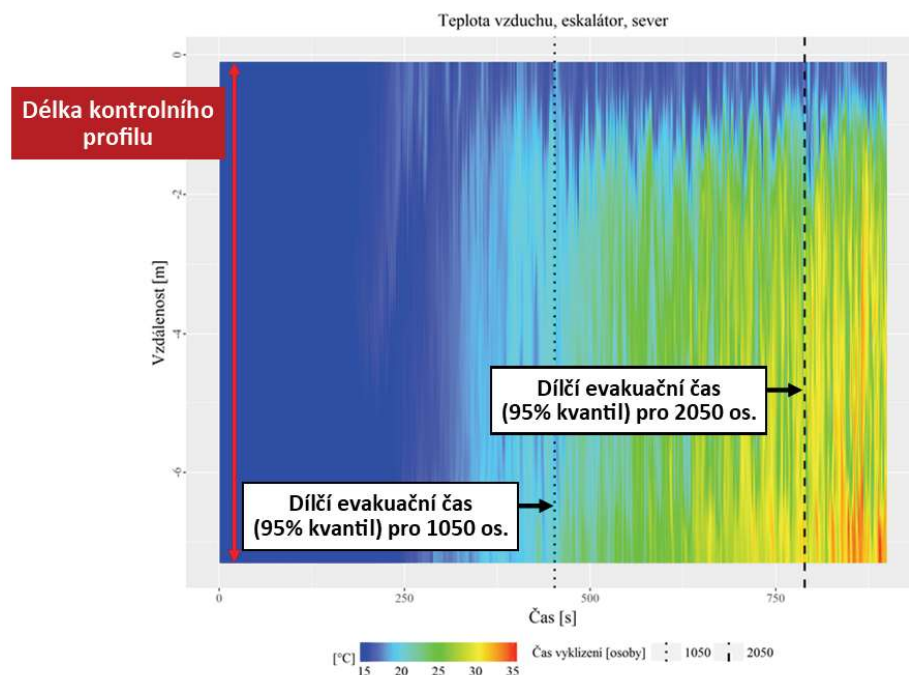
### Vystavení osoby účinkům požáru

Šíření požáru a jeho toxicity je komplexním dějem, který je závislý na celé řadě okolností a vstupních podmínek (vyskytující se materiál, geometrie prostoru, přívod vzduchu apod.), které mohou silně ovlivnit evakuované osoby. Některé stávající modely a simulační prostředí přímo spojují požární a evakuační modely pro holistický přístup posouzení s cílem určení dopadu požáru v objektu na evakuované osoby, zejména pak vyjádření rizika časovým intervalem zajišťujícím snesitelné/přijatelné podmínky pro evakuaci osob (jmenovitě časová rezerva mezi ASET a RSET, které byly blíže představeny, viz kap. 5.1.2). Analýza se zaměřuje na stanovení předpokládané doby, za kterou evakuované osoby pravděpodobně začnou ztrácet vlivem okolních podmínek své schopnosti (např. otrava CO, dezorientovanost v zakouřeném prostoru, přehřátí atd.), nemohou tak již uniknout bez cizí pomoci a v poslední fázi dochází k jejich usmrcení.



**Obr. 5.21:** Ukázka vizualizace spřažené simulace evakuace osob a rozvoje požáru (vpravo) a zobrazení roviny řezu znázorňující viditelnost pro evakuované osoby v čase (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19, 10] a upraveno a převzato z [403])

V případech spřažení těchto dvou typů modelů a jejich výsledků (částečná integrace výsledků modelů požáru, nebo pomocí submodelů) lze efektivně ověřovat dopady produktů požáru (především koncentrace toxicit a zvýšené teploty) na schopnost evakuace osob (obr. 5.21 a obr. 5.22). Tyto dopady lze vyhodnocovat jak prostorově, tak i individuálně pro každou osobu, takže v každém kroku simulace je pro každou osobu stanovena aktuální koncentrace tepla a toxicity pro 90% výšku průměrné osoby = 1,6 m – měřicí bod je ve výšce 1,53 m nad zemí (úroveň hlavy) a ve výšce kolen = 0,5 m (úroveň hlavy při ležení/plazení – v případech vysoké kouřové vrstvy nebo teplotního pole, kdy dochází k přesunu pohybu osob na zem a snížení jejich rychlosti [444]).



**Obr. 5.22:** Grafické vyhodnocení dostupné doby evakuace – překrytí výsledků vývoje teplotního pole z modelu požáru a s výsledky modelu evakuace pro obsazenost 1050 os. a 2050 os. (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11] upraveno)

V místech, ve kterých se při simulaci vyskytují osoby, jsou individuální koncentrace z pohledu evakuace vhodným ukazatelem zhodnocení dopadu na tyto osoby (zejména hovoříme o veličinách – celkovém evakuačním čase (TET, Total Evacuation Time), osobním evakuačním čase (PET, Personal Evacuation Time), kumulativní expozici osoby radiačnímu a konvekčnímu teplu (FIH, kumulativní expozice jednotlivce radiačnímu a konvekčnímu teplu) a FIN (kumulativní expozice jednotlivce toxickým plynům). V případných kritických místech posuzovaných staveb (v kongescích) stanovujeme limit pro snesitelnost (kumulativní expozice jednotlivce radiačnímu teplu – tzv. model prahu bolesti, s ekvivalentem expozice  $2,5 \text{ kW/m}^2$  po dobu 24 sekund), intoxikaci (FED, FIC dle [444]) a případné následky při jejich překročení (např. neschopnost pohybu jedince – s ekvivalentem expozice  $2,6 \text{ kW/m}^2$  po dobu 5 minut, což může mít za následek 1% úmrtnost) [197], neboť právě zde dochází k integraci jak časové, tak i prostorové roviny. Mnohem méně modelů používá k predikci dopadu na rychlost osob míru viditelnosti a výběr trasy/exitu agentů [94].

### Limity přijatelných podmínek

Pro zhodnocení přijatelnosti podmínek pro evakuované osoby je využíváno limitních hodnot stanovených jak normovým přístupem dle ISO 13571 [325], tak i hodnot uváděných v mezinárodních příručkách [235, 149] pro jednotlivé produkty požáru, které jsou do simulací numerického modelu interpretovány algoritmem pro výpočet limitních dávek (koncentrace jsou uváděny v jednotkách ppm – „parts per million“).

**Tab. 5.3:** Limitní hodnoty pro toxické produkty hoření při stanovování RSET (zdroj: [446, 272, 377])

	Doba expozice			
	5 min		30 min	
	Ohrožení schopnosti evakuace	Smrt	Ohrožení schopnosti evakuace	Smrt
Toxický plyn	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[ppm]
CO	6 000	12 000	1 000	2 500
HCN	150	250	90	170
HCl	500	1 600	200	<12 %



Hodnoty teploty vzduchu a koncentrací toxických produktů hoření – oxidu uhelnatého (CO), kyanovodíku (HCN), případně i chlorovodíku (HCl) spolu s dobou expozice představují konkrétní dopady na evakuované osoby. Inhalace dráždivých či dusivých toxických plynů evakuujícími se osobami způsobuje podráždění až silné bolesti. Osoby ztrácejí výkonnost se evakuovat až do krajní meze zneschopnění (nastává ztráta mobility/smrt, tab. 5.3). Účinky těchto plynů se stanoví pomocí tzv. prahových koncentrací [ppm]. Překročení jejich limitních hodnot (blíže viz [244, 235]) znamená vznik nepřijatelných podmínek pro setrvání osob na tomto místě, od kterých se odvíjí i doba dostupná pro evakuaci (ASET) [235, 149].

V každém samostatném časovém přírůstku je stanovováno následující:

- **pro dusivé toxické plyny – poměrná účinná dávka FED** [235, 244]:

$$\text{FED} = \sum_{i=1}^n \sum_{t_1}^{t_2} \frac{C_i}{(C \cdot t)_i} \cdot \Delta t \quad (5.11)$$

kde

$C_i$  ... koncentrace toxické složky  $i$  ve zplodinách hoření [ppm],

$(C \cdot t)_i$  ... součin koncentrace toxikantu  $i$  a expoziční doby  $t$  [ppm·min] – vyjádření expoziční dávky, způsobující očekávaný toxikologický účinek.

- **pro dráždivé toxické plyny – poměrná část přijatelné úrovně koncentrace FEC** [235, 149]:

$$\begin{aligned} \text{FEC} = & (\varphi_{\text{HCl}}/F_{\text{HCl}}) + (\varphi_{\text{HF}}/F_{\text{HF}}) + (\varphi_{\text{HBr}}/F_{\text{HBr}}) + (\varphi_{\text{SO}_2}/F_{\text{SO}_2}) + \\ & + (\varphi_{\text{NO}_2}/F_{\text{NO}_2}) + (\varphi_{\text{akrolein}}/F_{\text{akrolein}}) + \\ & + (\varphi_{\text{formaldehyd}}/F_{\text{formaldehyd}}) + (\varphi_{\text{iritant}}/F_{\text{iritant}}) \quad [-] \end{aligned} \quad (5.12)$$

kde

$\varphi$  ... průměrná koncentrace příslušné dráždivé látky [ppm],

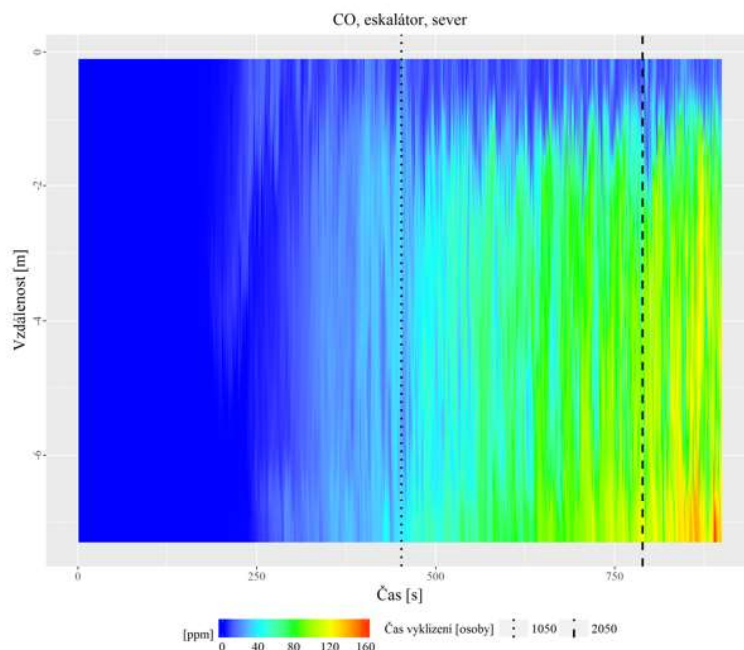
$F$  ... koncentrace dráždivého plynu ohrožující schopnost osoby uskutečnit evakuaci [ppm].

### Toxické zplodiny hoření

- **Oxid uhelnatý (CO)** je základním produktem uvolňujícím se při všech typech hoření. Při vdechnutí toxické koncentrace CO dochází k otravě, jejímiž příznaky je bolest hlavy, malátnost, zmatenost, nevolnost, ospalost apod., limitní hodnoty blíže viz tab. 5.4. CO se váže v krvi na hemoglobin červených krvinek a v případě 60% navázání CO nastává u člověka smrt.

**Tab. 5.4:** Kritické hodnoty dávek CO a doby expozice touto koncentrací, následné dopady na evakuované osoby (zdroj: [446, 272, 377])

CO [ppm]	Doba expozice	Dopady na zasaženou osobu
60	10 min	Riziko dlouhodobých následků
120	5 min	Ohrožení schopnosti evakuace
1 000	30 min	Neschopnost evakuace
2 500	30 min	Smrt
6 000	5 min	Neschopnost evakuace
12 000	5 min	Smrt



**Obr. 5.23:** Příklad grafického vyhodnocení dostupné doby evakuace v kontrolním profilu – z pohledu množství toxických zplodin hoření – konkrétně pro obsah CO (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11])

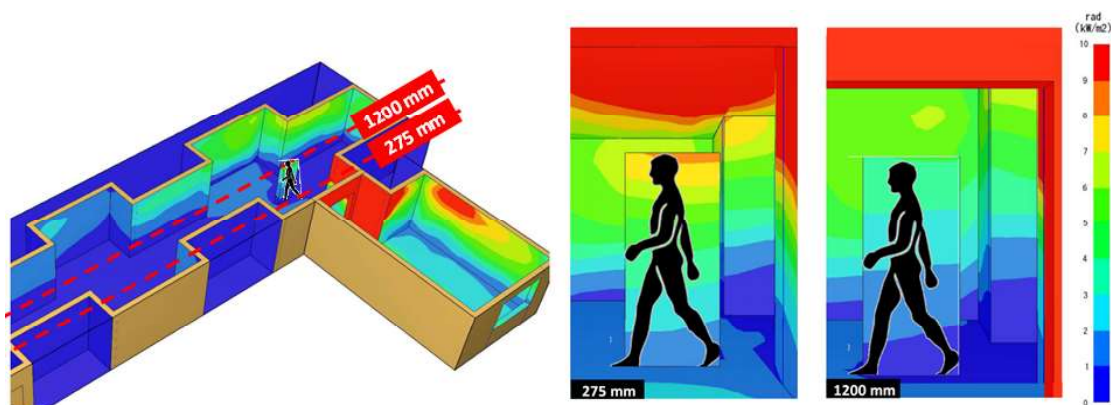
- **Oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ )** se vyskytuje podobně jako CO u všech typů požárů. I když se dá považovat za méně rizikový produkt hoření (není toxický až do 5% koncentrace, přičemž jeho koncentrace obvykle dosahují několika promile), při dosažení hraničních koncentrací dochází u evakuovaných osob ke stimulaci dýchání a rychlení jejich dechu až na trojnásobnou frekvenci.
- **Kyanovodík** je látka uvolňující se při hoření plastů s obsahem dusíku – jde zejména o moderní materiály na bázi umělých hmot, užívané v interiérech a elektroinstalacích (nylon, polyuretan, polyamid, akrylátbutylstyren apod.). Dostupné studie [446, 272] prokázaly, že již vystavení osoby malým dávkám HCN (< 80 ppm) vede k mírné hyperventilaci. V případě silnější expozice (cca 200 ppm po dobu pouhých dvou minut) dochází u osob ke ztrátě vědomí, blíže viz tab. 5.5.

**Tab. 5.5:** Kritické hodnoty dávek HCN a doby expozice těmto koncentracím – následné dopady na evakuované osoby (zdroj: přepracováno z [446, 272, 377])

HCN [ppm]	Doba expozice	Dopady na zasaženou osobu
<80	1 hod	Mírná hypertenze
100	30 min	Ztráta vědomí
200	2 min	Ztráta vědomí
>300	sekundy	Smrt
1 000	okamžitě	Ztráta vědomí a smrt

### Vysoká teplota

Na osoby unikající z hořící budovy působí různé kombinace konvekčního a radičního tepla. Osoby jsou vystaveny radičním účinkům při úniku kolem ohniska požáru, POP i při úniku pod vrstvou horkých zplodin tvořících se pod stropní konstrukcí. Tyto vysoké teploty nejčastěji způsobují popáleniny kůže, popáleniny dýchacích cest a tepelný šok přehřátím. V konečném důsledku mohou vést přímo až k ohrožení života evakuovaných.



**Obr. 5.24:** Příklad expozice rozvinutého požáru, radiací od POP na unikající osobu – celkový pohled (vlevo), ve vzdálenosti 275 mm od POP (ve středu) a ve vzdálenosti 1200 mm od POP (vpravo), (zdroj: vlastní ve spolupráci s [390, 21] přepracováno)

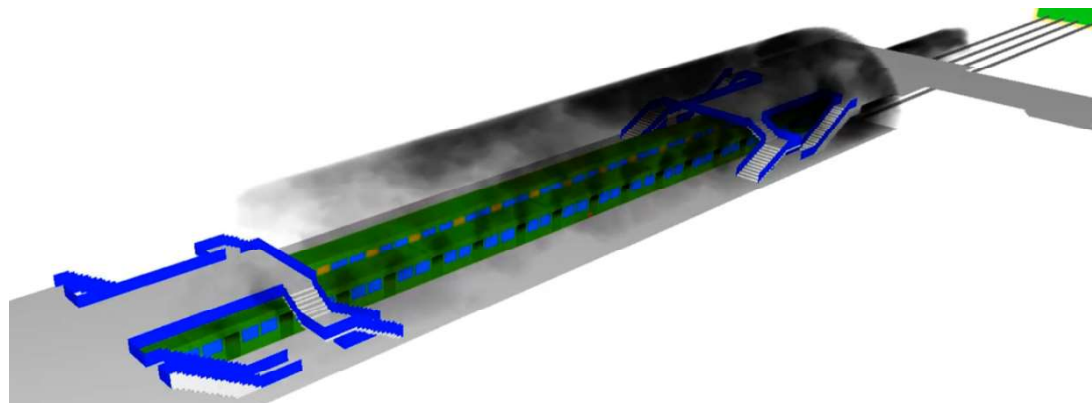
Proto je vývoj teplot v čase a jeho dopad na osoby velmi důležitou součástí posouzení evakuace. V následující tab. 5.6 jsou uvedeny konkrétní dopady na osoby pro kritické hodnoty teplot a doby expozice.

**Tab. 5.6:** Kritické hodnoty teplot a dob expozice těmito teplotami, následné dopady na evakuované osoby (je-li vzduch nasycený vodní párou, např. z hašení požáru, je limitní již teplota 60 °C) (zdroj: přepracováno z [149])

Teplota [°C]	Typ působení	Doba expozice	Dopady na zasaženou osobu
60	Kondukcí	sekundy	Popáleniny (např. o kovový předmět)
60	Konvekce	10 min	Ohrožení schopnosti evakuace
100	Konvekce	30 min	Přehřátí
120	Konvekce	5 min	Popáleniny kůže a dýchacích cest
185	Konvekce	1 min	Popáleniny kůže a dýchacích cest
190	Radiace	okamžitě	Bolest na kůži
500	–	–	Teplota vznícení bavlněného oblečení

### Hustota zakouření

Hustota zakouření je jedním z parametrů, který negativně ovlivňuje rychlost pohybu, orientaci osob a jejich schopnost nalezení cesty ze zasaženého prostoru. Již vlivem nedráždivého kouře při optické hustotě  $0,5 \text{ m}^{-1}$  (se součinitelem útlumu 1,15) jsou lidé nuceni se chovat, jako by v prostoru byla úplná tma (nahmatávají cestu těsně podél stěn). Díky tomu dochází ke snížení jejich rychlosti až na čtvrtinové hodnoty. V případě dráždivého kouře jsou negativní dopady na jejich rychlost ještě umocněny, jelikož zasažené osoby pocítují větší úzkost (již při optické hustotě  $0,2 \text{ m}^{-1}$  a součiniteli útlumu 0,5) [256, 257].



**Obr. 5.25:** Příklad šíření kouře ve stanici metra (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11])



→ Pomocí výše uvedených veličin je možné zhodnotit přípustnost uvažované strategie evakuace osob v návaznosti na rozvoj požáru a množství produktů jeho hoření. Stanovit do jaké míry hustoty kouře, teploty a koncentrací toxických plynů je ještě setrvání na místě a vyčkání na záchranné složky vhodné (bezpečné) a kdy už nikoli. Tyto informace jsou užitečné přímo i pro záchranné složky HZS a IZS, které díky nim mohou efektivně vyhodnocovat volbu výstroje a plánování samotného zásahu (např. viz obr. 5.25).

## 5.2 Případové studie

Numerické modely evakuace při posuzování evakuačního procesu obsahují celou řadu vstupních parametrů (proměnných), které nejsou spolehlivě známy. Proto i při jejich samotném použití je nedílnou součástí testování jejich predikčních schopností, odvíjejících se zejména od nejistot vstupů, které byly již blíže představeny v kap. 4.1.2. V návaznosti na to jsou právě níže uvedeny i příklady nástrojů na zpracování parametrických a citlivostní analýz výsledků simulací pro ověřování základních vlastností modelů a vlivu vstupních parametrů, blíže viz kap. 5.2.3.

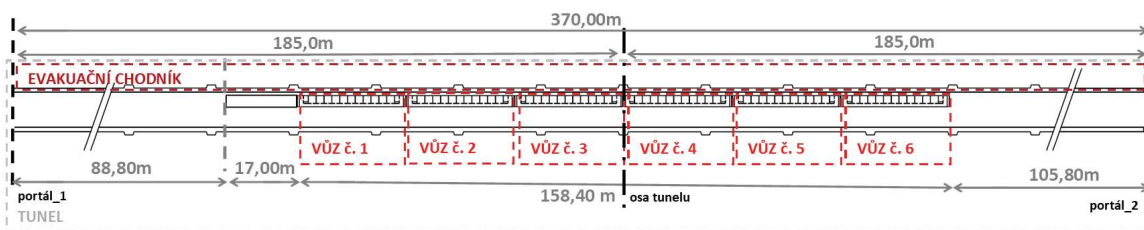
### 5.2.1 Parametrické a citlivostní studie

Parametrické a citlivostní studie slouží k otestování okrajových podmínek nejen norem, ale i samotného numerického modelu (výsledkem jsou obálky např. evakuačního času, viz obr. 5.52 nebo obr. 5.27). Lze je použít k vyhodnocení významu klíčových vstupních parametrů modelu evakuace a jejich vlivu na konečné výsledky, v našem případě především na výslednou dobu evakuace. Díky tomu jsou využívány jako podklad pro zvládnutí nejistoty parametrů modelu a je usilováno o snížení nejistoty (rozptylu) především dominantních citlivých parametrů. Níže v odstavcích jsou následně uvedeny konkrétní aplikace citlivostních a parametrických studií (S1–S13) a analýz, jako jsou studie vlivu davových jevů a pozice vagónu vlakové soupravy, vlivu redistribuce osob, vlivu kapacity ÚC, vlivu složení davu, vlivu formy vstupních dat, vlivu voleného scénáře, vlivu míry samostatnosti a potřeby asistence jiných osob, vlivu aproximace geometrie, vlivu počtu ÚC, vlivu reakční doby, vlivu protipožárních opatření (PBZ), vlivu obsazenosti, vlivu volby výpočetního přístupu apod. Studie vycházejí z aplikačních příkladů, které interpretují aktuální potřeby při užití numerických modelů v rámci PBŘ pro jejich ověření a možnou aplikaci v souladu s podmínkami ČSN 73 08XX. Uvedené parametrické a citlivostní studie přinášejí náhled na vliv konkrétních vstupních parametrů a jejich dopadu při posouzení evakuačního procesu.

#### S1 – Davové jevy a pozice místa evakuace

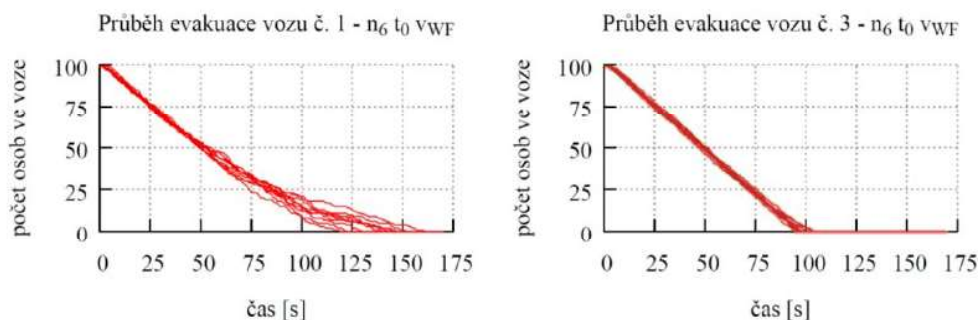
Davové jevy (představené blíže již viz kap. 1.2.1) a jejich dopady (jako jsou např. vznik kongescí, změna směru, zvýšení hustoty a s tím spojené snížení pohybového komfortu či právě i odříznutí osob proudícím davem apod.), nelze normovým přístupem detailně zohlednit. Normový přístup zohledňuje pouze kapacitu ÚC skrze počet ÚP bez ohledu na možné změny a vývoj situace, díky čemuž tento přístup neumožňuje predikovat případný (reálný) potenciaální vývoj evakuace, i když jak je uvedeno v následující studii (zejména u tunelových staveb), může mít predikce vývoje evakuace významný vliv na krizové řízení či návrh bezpečnostních opatření.

Následující studie ověřená numerickým modelem poukazuje, že nejen redistribuce osob ze soupravy a její vnitřní uspořádání významně ovlivňuje průběh evakuace (jak je řešeno v [32, 11, 24], blíže viz kap. 5.2.1), ale i např. samotná pozice vozů soupravy je důležitým faktorem evakuace. Názorným příkladem může být studie tunelu, z které pocházejí i grafy na obr. 5.27, na nichž je možné pozorovat značně rozdílný rozptyl výsledků evakuačních časů pro jednu ze simulovaných kombinací variant modelu (konkrétně –  $n_6$   $t_0$   $v_{WF}$  – šestivozová souprava, okamžitá reakční doba, rychlost dle Weidmann a Fruin) pro vozy č. 1 a č. 3.



Obr. 5.26: Schéma posuzované studie vlakové soupravy se šesti vozy (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [32])

V případě vozu č. 1 je možné sledovat značné prodloužení evakuačního času díky tomu, jak jsou unikající osoby významně omezovány osobami, které proudí po evakuačním chodníku v prostoru podél vozu směrem k portálu tunelu (totéž platí pro symetrický vůz č. 6 na opačném konci soupravy). Naopak nejlepší výsledky, z pohledu vyklizení jednotlivých vagonů, vykazuje prostřední část soupravy, konkrétně vůz č. 3 a č. 4, blíže viz [32].



Obr. 5.27: Rozdílný rozptyl v průběhu času evakuace vozů č. 1 a č. 3 pro variantu modelu s označením  $n_6$   $t_0$   $v_{WF}$  z hlediska počtu osob ve voze, kdy v prvním případě (vlevo) vychází pro čas 110 s počet osob ve voze 0 až 20 zatímco v druhém případě (vpravo) je tato variabilita minimální, (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [32])

Z výsledných dob evakuace jednotlivých vozů soupravy jsou nejvíce problematické krajní vozy, nikoli však přímo první a poslední vůz soupravy. V případě šestivozové soupravy je osobami unikajícími ze středních částí soupravy po únikovém chodníku nejvíce negativně ovlivněn druhý a předposlední vůz soupravy, kde jsou cestující odříznuti ve voze davem proudícím kolem vlakové soupravy. (Detailněji také viz výsledky studie na obr. 5.43).

→ **Vyhodnocení:** Evakuace osob u tunelových staveb, zejména z vlakových souprav, je u počátečních a koncových vozů významně méně efektivní než v případě vozů v prostřední části vlakové soupravy díky vznikajícím davovým jevům v prostoru únikového chodníku (kongesce, dočasné odříznutí ÚC z některých vozů soupravy, nasledování apod.).

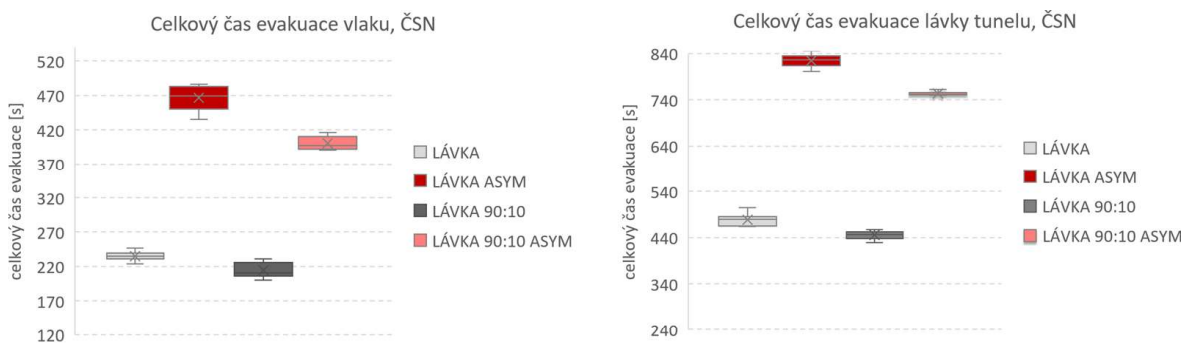
## S2 – Redistribuce osob

V rámci normového posouzení evakuace osob je primárně uvažováno s rovnoměrnou redistribucí dvěma a více evakuačními směry (pouze ve velmi málo případech jedním směrem). Jednosměrná evakuace je povolena jen v ojedinělých případech, stanovených v ČSN 73 08XX a je limitována přísnými tabelárními hodnotami. V reálných případech, zejména při mimořádných událostech, přirozeně nedochází ke zcela symetrickým evakuacím tak, jak je předpokládáno při normovém posouzení, ale zpravidla k asymetrické či silně asymetrické evakuaci, jak je tomu především u tunelových staveb (blíže viz obr. 5.28) [32, 24, 11, 24], nebo při vyřazení některé z uvažovaných cest (např. požárem, technickou závadou, útokem narušitele, jak je uváděno při incidentech v kap. 1.1).



Obr. 5.28: Porovnání časového průběhu nouzové evakuace tunelu – varianta asymetrické evakuace „LAVKA ASYM“ (nahore) a varianta symetrické evakuace „LAVKA“ (dole) – rozdíly průměrných časů vyklizení mezi variantami jsou pro vlakovou soupravu 9,02 min (541,0 s) a pro celkové vyklizení tunelové části 11,48 min (689,7 s) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [24, 391])

→ **Vyhodnocení:** I z výsledků studie na obr. 5.29 je patrné, že je zapotřebí při posuzování uvažovat i krizové scénáře, v jejichž důsledku dochází k silně asymetrickým evakuacím s odlišnou redistribucí oproti obecnému posouzení, které mají za následek významné prodloužení předpokládané doby evakuace až takřka na dvojnásobek, jak je tomu např. při posouzení [24, 32, 11, 19, 20, 23].

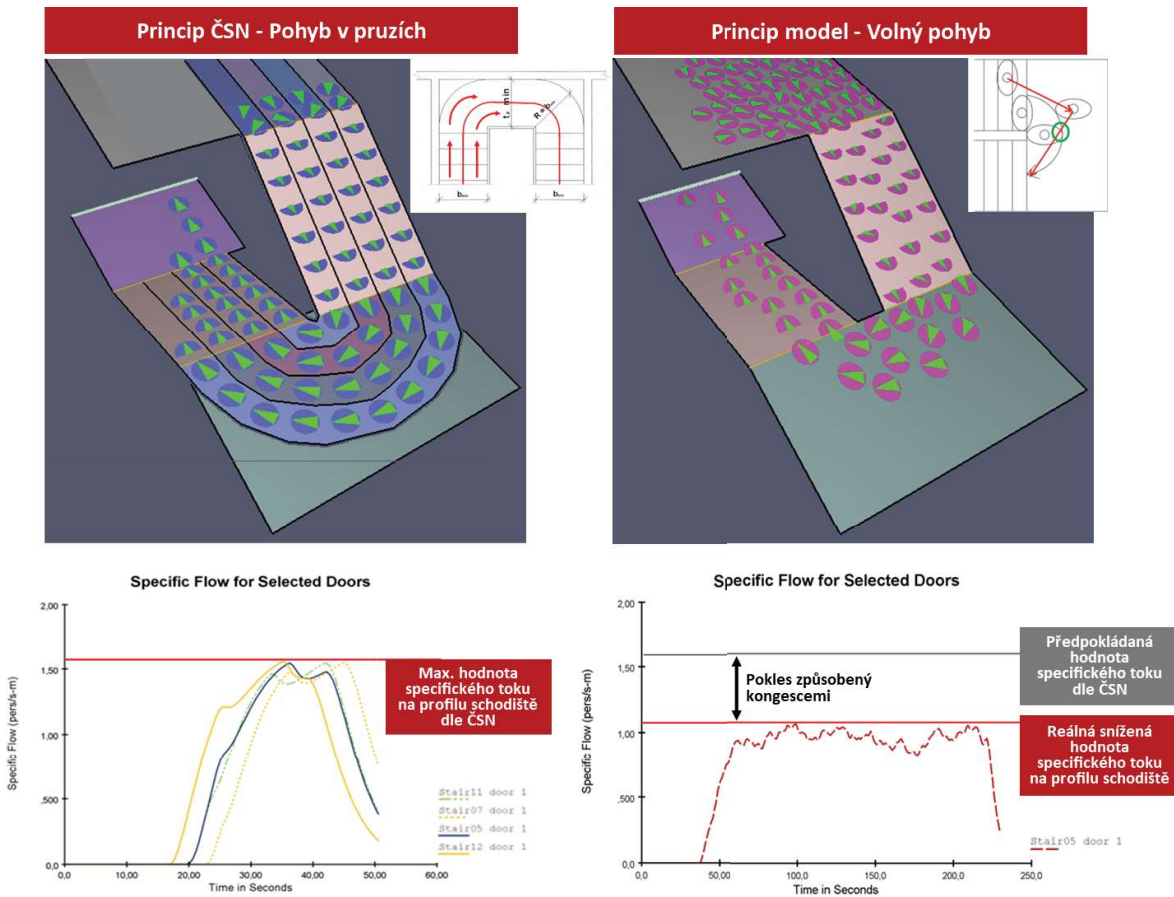


Obr. 5.29: Výsledný celkový čas evakuace z vlakové soupravy (vlevo) a výsledný celkový čas evakuace z tunelu (vpravo) pro ukázkou silně asymetrické varianty evakuace na lávku („LAVKA ASYM“) tunelového úseku (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [24, 391])

### S3 – Kapacita únikové cesty

Dle principů normového posouzení ČSN 73 08XX jsou při posouzení evakuace ÚC téměř ideálně děleny do únikových pruhů (ÚP) – po celé délce únikových koridorů, jak na chodbách, tak ramenech schodiště, tak i na podestách, kde jsou tvořeny částmi polokružnic – blíže viz obr. 5.30. V těchto ÚP je předpokládán ideální pohyb osob – konstantně za sebou, bez ohledu na vnější podněty a interakce dalších osob. ČSN přístup nepředpokládá, že by se osoby při procesu evakuace zpomalovaly nebo zcela zastavily, jako tomu zpravidla bývá u front před

schodišti, dveřmi a úzkými hrdly, čímž je zajištěna stálá kapacita na jednotlivých úsecích ÚC. To však není příliš realistické. V místech vzniku front obvykle hustota osob dosahuje hodnot více jak  $4 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ , i v těchto situacích ČSN uvažuje, že je dosahováno stále jednotkové kapacity  $K_u = 50 \text{ os}\cdot\text{min}^{-1}$  (při úniku po rovině;  $0,830 \text{ os}\cdot\text{s}^{-1}$ ), a to s rychlostí  $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $0,583 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), čemuž odpovídá hustota  $2,6 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ . Při uvažovaných parametrech je dosahováno maximálního specifického toku  $1,51 \text{ os}\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$ .



**Obr. 5.30:** Srovnání principu odlišné reprezentace chování davu dle ČSN 73 0802 (vlevo) a dle modelu SFPE (vpravo) na schodišti (zdroj: vlastní ve spolupráci s [15])

Naopak v modelu se spojitou sítí se osoby pohybují volně, interagují a hledají nejkratší cestu jejich úniku, stejně jako tomu je v reálné situaci. Osoby na ÚC využívají její kapacity dle aktuální situace, až po tu maximální možnou. V místech podest se agenti nepohybují po částech kružnic, ale po obecných křivkách reprezentujících nejrychlejší cesty, díky čemuž zde dochází k přirozeným kolizím, vzniku front, zdržení osob a poklesu specifického toku, jak je vidět na spodní části obr. 5.30.

→ **Vyhodnocení:** Z výsledků studie vyplývá, že užití numerického modelu umožňuje zohlednit skutečný tvar geometrie ÚC po celé jejich délce (šířce) a její reálný vliv na pohyb osob v prostoru, který může mít i negativní dopad na celkový průběh (čas) evakuace.

#### S4 – Složení davu

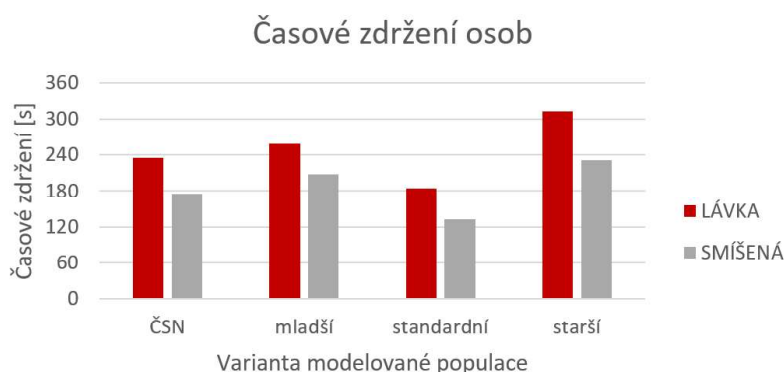
Při normovém posouzení evakuace je (převážně) brána v úvahu homogenní skupina evakovaných osob, kde jsou všechny osoby popsány stejnými parametry – věk, mobilita, rychlost, fyzická zdatnost, mohutnost postavy apod. Při běžném pozorování davu je na první pohled viditelné, že reálný dav je spíše heterogenní povahy s přihlédnutím k jednotlivým parametřům, což zdatně ovlivňuje celkovou dobu evakuace. Složení davu se může odvíjet od provozu,



typu akcí, charakteru budovy – např. škola, školka, výrobní závod, pečovatelský dům, koncert interpreta s fanoušky převážně věku 55+, akce pro děti (dětský den, dětský koncert), sportovní utkání, masová dance party apod.

- **Dle věku**

Praktickým příkladem citlivosti modelu evakuace na složení populace může být studie posouzení evakuace stanice [11] nebo tunelu metra [24], pro kterou byly testovány tři varianty věkového zastoupení osob (mladší, standardní a starší) ve vztahu k ČSN při dvou řešených evakuačních scénářích – LÁVKA a SMÍŠENÁ. Pro jednotlivé scénáře byly osoby zastoupeny ve variantách „mladší“ – muži a ženy do věku 30 let v poměru 50:50, „standardní“ – muži a ženy ve věku 30–50 let v poměru 50:50 a „staří“ – muži a ženy věku nad 50 let se zastoupením osob s pohybovým hendikepem v poměru 47:3:48:2. Primární ztvárnění rozdílných fyzických charakteristik jednotlivých skupin evakuovaných osob je realizováno pomocí statistického rozložení jejich rychlosti pohybu v agentním modelu.



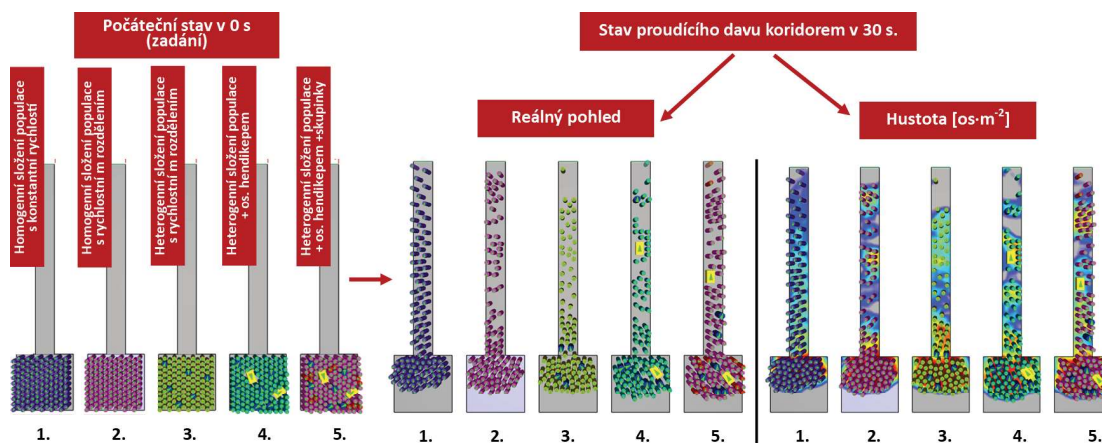
**Obr. 5.31:** Ukázka vlivu složení osob na čas zdržení v posuzovaných prostorách – na první pohled je zřejmé kratší zdržení osob ve variantě ČSN oproti obsazení modelu populací starších osob, které v posuzovaných prostorách setrvávají přibližně o 60 s déle (nad hodnoty normového přístupu), což může být pro samotnou evakuaci značně rozhodující (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [24])

→ **Vyhodnocení:** Jak je zřejmé i vidět z obr. 5.31 složení davu má silný vliv na dobu zdržení osob, tedy i na výslednou dobu evakuace. Varianta složení osob dle standardů ČSN se ve srovnání s variantami obsazenosti, kde se značným zastoupením osob mladší a starší populace se může dokonce stát variantou, která je spíše poddimenzovaná na stranu nebezpečnou, což může vést k chybnému posudku.

- **Dle různorodosti davu**

Názorným příkladem vlivu složení nehomogenního davu mohou být výsledky studie vlivu kvantitativních a kvalitativních charakteristik, které výrazně mění dynamické vlastnosti skupiny jako celku. Jsou zahrnuty základní charakteristiky osob, jako je rychlost, reakce na podněty, ohleduplnost, rozhodování, průbojnost, fyzická zdatnost, věk, tělesné rozměry osob apod., které většinou nejsou klasickým přístupem nijak zohledněny oproti možnostem užití pokročilého numerického modelu.

V numerickém modelu lze dále zohlednit i možnost vzniku skupin – osob na sebe vázaných či závislých (děti s rodiči, skupina kamarádů), osoby s doprovodem (maminka s kočárkem, osoba na vozíku s asistentem, osoby na vozíku nebo o berlích). V modelu jsou uvažovány i osoby zabírající větší půdorysnou plochu, než je předepsána standardizovanou elipsou těla. Pro studii je sestaveno pět variantních řešení s různou skladbou populace (všechny modely mají stejnou geometrii a počáteční podmínky) – názorněji viz obr. 5.32.



**Obr. 5.32:** Studie vlivu kvantitativních a kvalitativních charakteristik osob pro koridor délky 20 m a šířky 2 m – počáteční stav – geometrické schéma modelu (vlevo), reálný půdorysný pohled v 30 s (na středu) a hustota davu v 30 s (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [14])

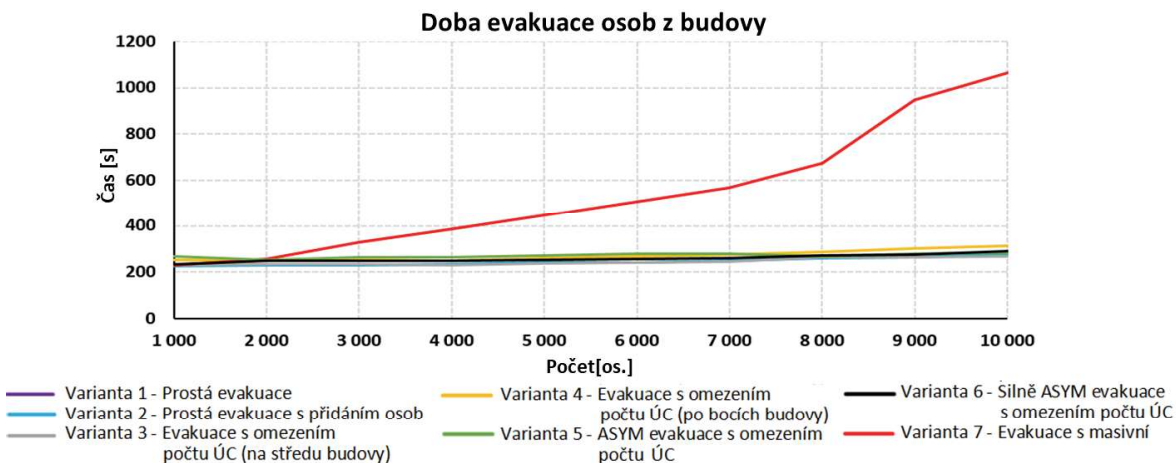
Varianta 1, popisující obecný dav s konstantní rychlostí, je z pohledu délky zdržení nejvýhodnější, ale neinterpretuje reálný popis chování skutečného davu. Interpretací skutečnosti se nejvíce blíží varianta 5, v rámci které je možné pozorovat i výrazné zdržení oproti ostatním variantám (o 15–25 %). U varianty 4 a varianty 5 lze navíc pozorovat výrazné dynamické změny kvality pěší dopravy v průběhu celé simulace.

→ **Vyhodnocení:** Z výsledků studie je zřetelné, že samotné složení modelovaného davu má velký vliv jak na samotnou hustotu či zdržení osob ve stavbách, tak i samotnou plynulost pohybu evakuovaných, což má značný dopad na celkovou dobu evakuace.

## S5 – Volba modelovaného scénáře

Jak již několikrát bylo zmiňováno, český normativní přístup posuzuje evakuaci osob jedním obecným scénářem, který ne vždy je tím nejkritičtějším (všechny osoby se evakuují okamžitě a všemi východy budovy). Není zde uvažováno s variantním řešením a přístup vůbec neodráží případný vznik mimořádné situace a ani nepřipouští možnost zkomplikování procesu evakuace.

Názorný příklad, proč je nezbytné posuzovat celou škálu různých variant krizových scénářů (zejména s proměnlivým počtem ÚC) a ne pouze jedno obecné řešení, je dobře vidět v následující studii, pro kterou byl vytvořen numerický model a simulováno celkem sedm vytipovaných nejkritičtějších variant scénářů s ohledem na možné zatarasení některých ÚC požárem, útočníkem nebo bombou.



**Obr. 5.33:** Srovnání efektivity vyklizení z pohledu doby evakuace osob jednotlivých modelovaných scénářů budovy – M2SD (zdroj: vlastní z [20])

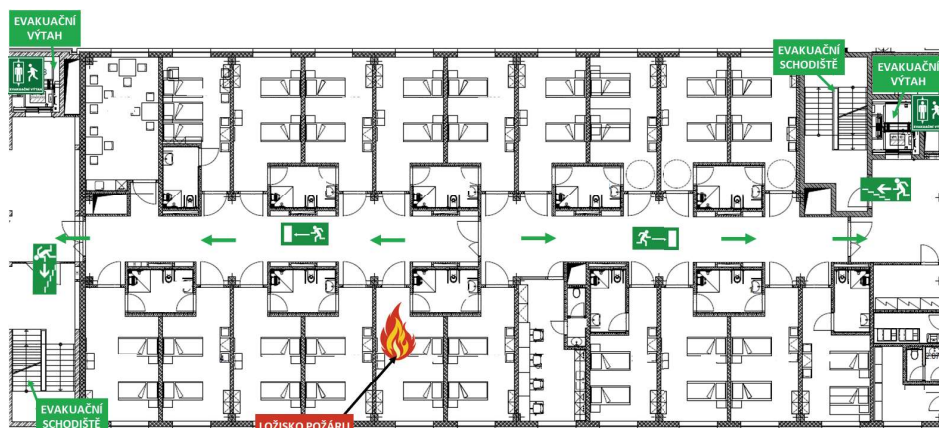


Z výsledků na obr. 5.33 je patrné, že většina simulovaných scénářů mimořádných událostí potvrzuje, že je možné budovu evakuovat rychlostí, která se blíží evakuaci za standardních podmínek (při dostupnosti všech evakuačních východů). V šesti modelovaných scénářích má doba evakuace slabý rozptyl v rozmezí 250–300 s. Oproti tomu sedmá varianta, při které dochází k enormnímu potlačení dostupnosti běžně nejvytíženějším evakuačních východů z budovy, silně vybočuje a její doba evakuace dosahuje až 1 050 s. Při této variantě dochází k enormnímu navýšení (o více jak trojnásobek) doby evakuace oproti době standardní evakuace díky vzniku dlouhotrvajících kongescí (blíže viz obr. 5.33) v řádu desítek minut s vysokou hustotou osob, a tím i rostoucím rizikem úrazu nebo úmrtí – jedná se o vysoce stresující situaci.

→ **Vyhodnocení:** Díky analýze komplexní sady krizových scénářů je možné vyhodnotit míru rizika a efektivně zacílit pozornost na zvýšení bezpečnosti v konkrétních místech a následně navrhnout odpovídající a účinná bezpečnostní opatření.

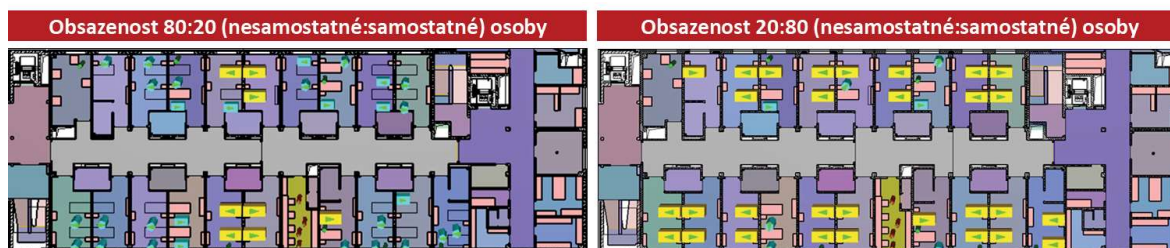
### S6 – Míra samostatnosti a potřeby asistence jiných osob

Jak již bylo zmiňováno v kap. 1.1 a kap. 4.1.1, normový přístup zohledňuje sníženou schopnost pohybu či potřebu asistence (pro osoby neschopné či se sníženou schopností samostatného pohybu) pouze ve velmi omezené míře, a to pomocí součinitele  $s$  (v rozmezí 1,0–2,0), kterým je v normovém výpočtu přenásoben počet unikajících osob. Tím dochází k navýšení počtu evakuovaných osob a umělému prodloužení celkového evakuačního času, ale další faktory reálného procesu evakuace těchto specifických osob, jako jsou půdorysný rozměr, nutnost asistence (přítomnosti více osob), odlišná rychlost apod., mající silný vliv na průběh evakuace, nejsou zohledněny.



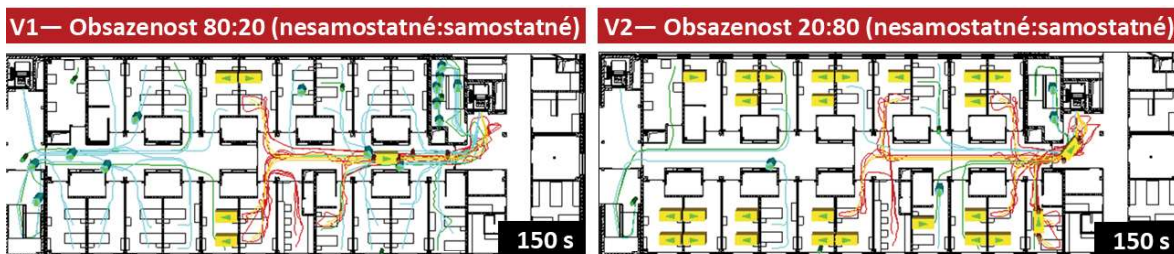
Obr. 5.34: Schéma geometrie scénáře posuzovaného LDN oddělení (zdroj: vlastní z [21, 390])

Příkladem citlivosti modelu evakuace na složení populace z pohledu typu evakuované osoby a její potřeby asistence může být posouzení oddělení LDN [21, 390] (na obr. 5.34), pro které bylo testováno několik variant kombinací obsazenosti modelu osobami s omezenou schopností pohybu, z kterých byly vybrány skrze názornost výsledků následující dvě, blíže viz obr. 5.35 (v práci [21] je pro srovnání uveden i detailní normový výpočet).



Obr. 5.35: Schéma obsazenosti dle míry samostatnosti pohybu, posuzovaného LDN oddělení – varianta „V1“ (vlevo) a varianta „V2“ (vpravo) (zdroj: vlastní z [21, 390])

Na obr. 5.35 jsou vyobrazeny vybrané varianty obsazenosti posuzovaného oddělení. Konkrétně značené „V1“, ve které je uvažováno 80 % osob neschopných samostatného pohybu (30 os. lůžko), 20 % osob s omezenou schopností pohybu (2 os. invalidní vozík, 5 os. berle) a osoby schopné samostatného pohybu (4 os. personál, 7 os. návštěvy). U „V2“ je uvažováno 20 % pacientů neschopných samostatného pohybu (8 os. lůžko), 80 % pacientů s omezenou schopností pohybu (9 os. invalidní vozík, 20 os. berle) a další osoby schopné samostatného pohybu (4 os. personál, 7 os. návštěvy).



**Obr. 5.36:** Průběh nouzové evakuace ve složení „V1“ (vlevo) a „V2“ (vpravo) – názorná demonstrace vlivu zastoupení osob vyžadující různou míru asistence v posuzovaném objektu může mít vliv na celkovou účinnost evakuace – ve stejném čase 150 s setrvává ve „V1“ 23 osob (z toho 4 čekajících na asistenci) a ve „V2“ 31 osob (z toho čekajících na asistenci 26) (zdroj: vlastní z [21, 390])

Celková doba evakuace osob posuzovaného oddělení LDN nabývá hodnot pro jednotlivé variace obsazenosti – „V1“ s 20% zastoupením osob neschopných samotného pohybu 228,4 s a „V2“, kde je uvažováno s 80% zastoupením osob neschopných samostatného pohybu, je tato doba prodloužena takřka na trojnásobek, 601,1 s. Oproti tomu při běžném normativním přístupu pomocí analytického výpočtu (dle vztahu viz 4.1.1) je předpokládaná doba evakuace stanovena na 1,19 min (71,4 s).

→ **Vyhodnocení:** Celková doba evakuace dle ČSN přístupu je více jak osmkrát nižší oproti výsledkům návrhových scénářů reálné obsazenosti, což je velmi důležitým zjištěním zejména pro samotný provoz (pro obslužný personál) i pro záchranné složky HZS a IZS s ohledem k možnosti efektivní optimalizace evakuačních procesů a koordinaci pracovníků při evakuaci daného oddělení.

## S7 – Aproximace detailu geometrie

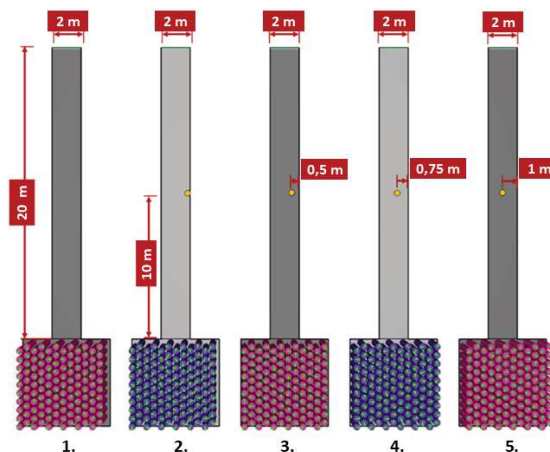
Český normativní přístup pohlíží na posouzení geometrie evakuačních cest budovy v globálním měřítku pouze se zaměřením na posouzení mezních délek a šířek ÚC (bližší vztahy pro výpočet viz kap. 4.1.1 či detailní studie v [21]. Mezní délky  $l_{skut}$  se posuzují od začátku NÚC (CHÚC), což je zpravidla nejvzdálenější místo PÚ (v odůvodněných případech se počátek ÚC posouvá do osy dveří funkčně ucelené skupiny místností) po dveře na volné prostranství. Získaná hodnota je pak poměřována s tabelární hodnotou ČSN. Posuzování šířek ÚC se provádí na NÚC (CHÚC) v místech s kritickým zúžením (zpravidla dveřích). Šířky těchto míst jsou přepočítány na ÚP a jsou porovnány s minimální vypočtenou šířkou, která se odvíjí od způsobu evakuace (současná/postupná) a přerozdělení evakuovaných osob na jednotlivé ÚC. V případech, že se nejedná o kritické místo, nedochází k posouzení, např. například jde-li o umístění drobné překážky výstupku linie koridoru (sloupek, sloup, odpadkový koš, automat s nápoji, nábytek apod.), tyto prvky jsou ČSN zanedbány, nebo spíše ošetřeny přízviskem ÚC jako „trvale volného komunikačního prostoru“.

Z praxe víme, jaká bývá reálná situace na ÚC, a proto jsou v následujících studiích vyhodnoceny vlivy aproximace geometrie, konkrétně překážek, umístěných v rámci koridorů (ÚC) – překážky typu bodové a liniové.

- **Vliv umístění malé bodové překážky**

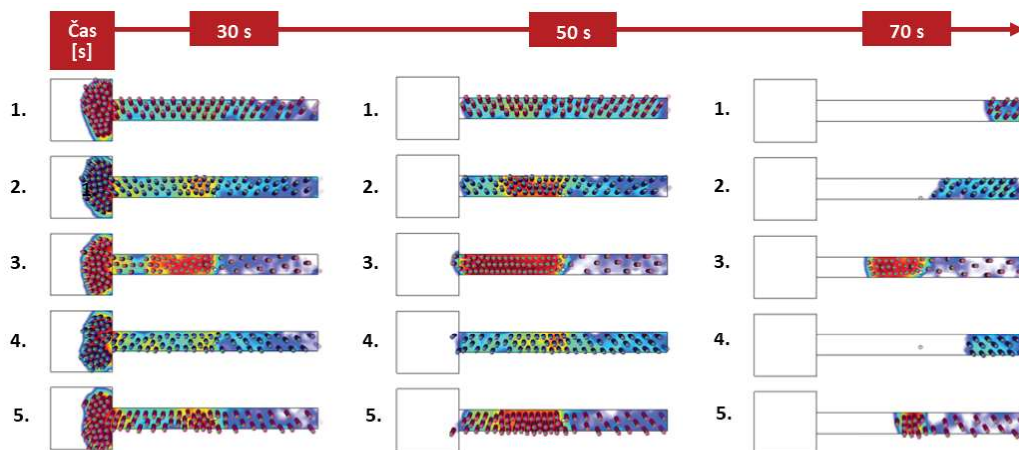
V této studii v rámci koridoru je v různých pozicích umístěna bodová překážka o průměru 0,30 m, blíže viz obr. 5.40, kterou může představovat např. sloup, odpadkový

koš, vybavení interiéru, poutač apod. Bylo testováno celkem pět variant umístění malé překážky – bez překážky, překážka umístěná přímo na okraji komunikace, překážka umístěná (na osu) ve vzdálenosti 0,50 m od pravého okraje komunikace, překážka umístěná (na osu) ve vzdálenosti 0,75 m od pravého okraje komunikace, překážka umístěná (na osu) ve vzdálenosti 1,00 m od pravého okraje komunikace.



**Obr. 5.37:** Schéma studie ověřující vliv bodových překážek na celkový evakuační čas a vznik kritických míst při evakuačním procesu (zdroj: vlastní z [14])

Z pohledu vzniku kritických kongescí a délky zdržení při průchodu koridorem je nejméně výhodná varianta 3, kde je umístěna překážka na ose ve vzdálenosti 0,5 m. Proudící dav je v koridoru omezen pouze na zbylé místo vlevo, protože vpravo od překážky je nedostatečné místo pro průchod osoby. Podobný, i když výrazně slabší efekt, můžeme pozorovat u varianty 5, kde je překážka umístěna přímo do středu komunikace a dav je nucen se rozdělit na dva proudy, které překážku „obtékají“.

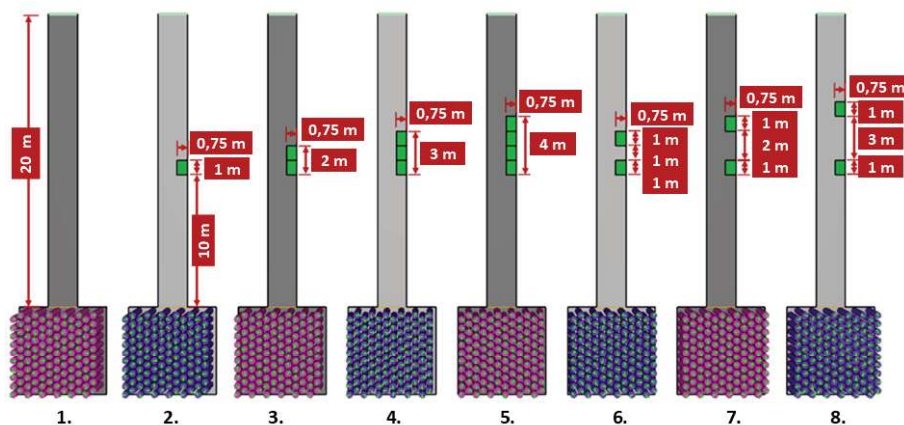


**Obr. 5.38:** Výsledné hustoty studie vlivu umístění bodových překážek do koridoru ÚC (zdroj: vlastní z [14])

- **Vliv umístění větší liniové překážky**

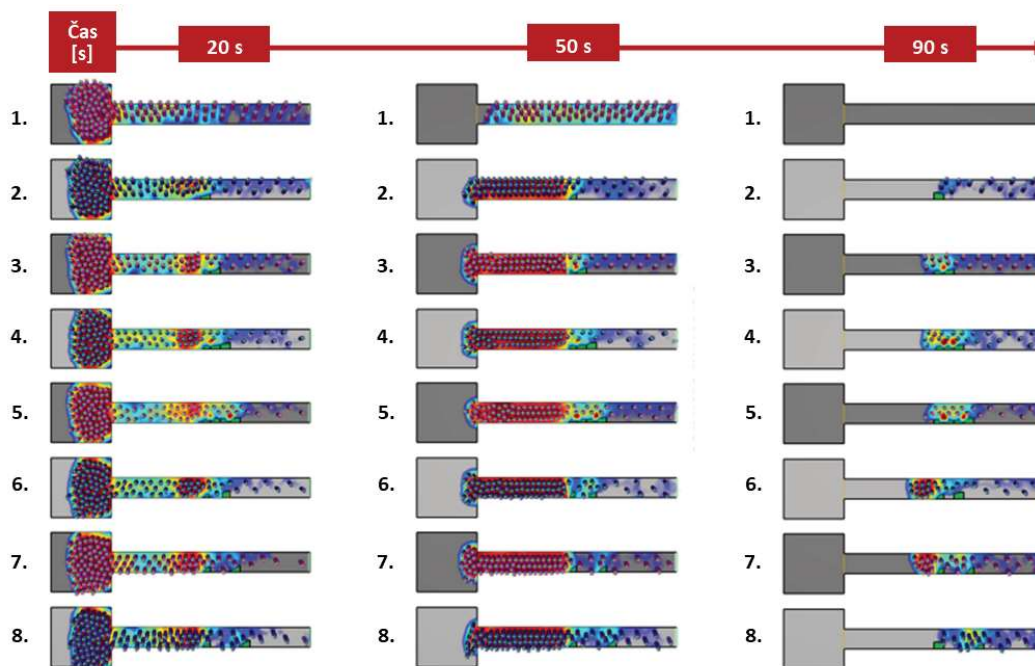
Pro tuto studii jsou v rámci koridoru v osmi variantách v různých pozicích umístovány liniové překážky o modulu  $1,0 \times 0,7$  m, které mohou představovat např. lavičku, obslužný pult, automat na nápoje, stánek, interiérovou zeleň apod. Jejich rozmístění je lépe patrné z obr. 5.39.





Obr. 5.39: Schéma studie ověřující vliv liniových překážek na celkový evakuační čas a vznik kritických míst při evakuačním procesu (zdroj: vlastní z [14])

Dle výsledků z pohledu délky zdržení při průchodu koridorem a potenciálně i rizikem vzniku kritických kongescí je nejvýhodnější varianta 1 bez překážek, následně varianta 2 s jednou překážkou a varianta 8, kdy jsou moduly překážek od sebe nejvíce vzdáleny. Nejméně příznivými variantami z pohledu vzniku kongescí jsou příklady 6 a 7, kde jsou mezi jednotlivými překážkovými moduly mezery 1 m a 2 m.



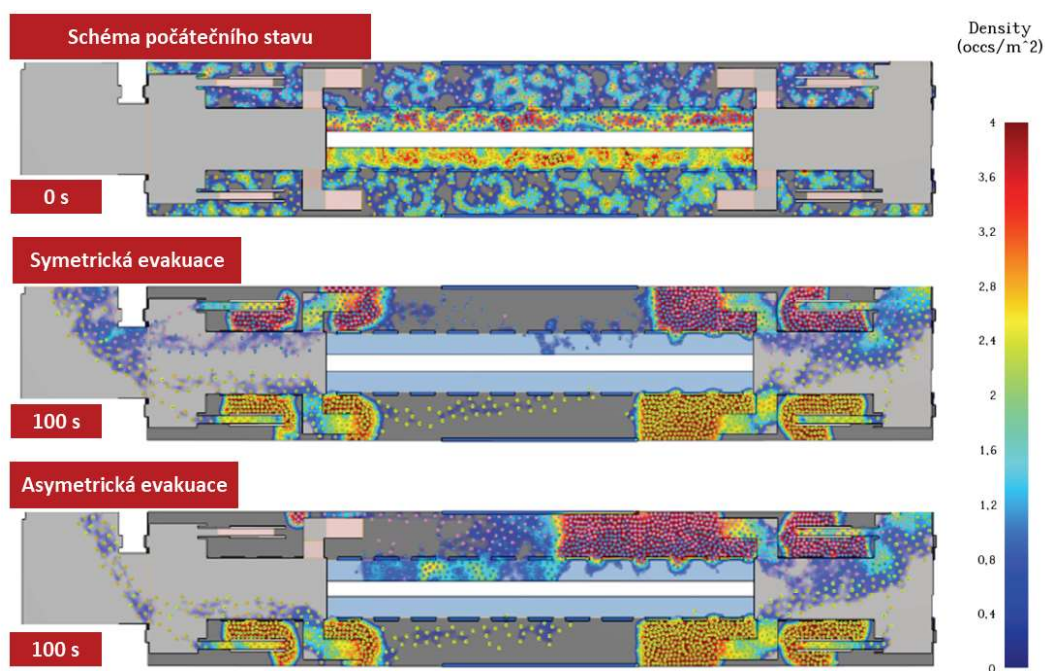
Obr. 5.40: Výsledné hustoty studie vlivu umístění bodových překážek do koridoru ÚC (zdroj: vlastní z [14])

→ **Vyhodnocení:** Ze získaných výstupů citlivosti na aproximaci geometrie je zřejmé, jak je uvedeno na obr. 5.40 a 5.38, že i malé překážky či jejich zdánlivě nevýznamná změna umístění v koridoru ÚC mají značný vliv na konečné výsledky evakuace. Díky tomu se jeví zohlednění přesnější geometrie s jejími detaily jako velmi důležité pro podrobnou analýzu bezpečnosti při evakuačním procesu.

## S8 – Počet únikových cest

Normový přístup uvažuje vždy s dostupností všech ÚC pro proces evakuace, i když při reálných situacích je velmi pravděpodobné znepřístupnění (uzavření/zatarasení) jedné či dokonce více ÚC. Je uváděna pouze jedna hodnota předpokládané celkové doby evakuace, tedy nejsou uváděny hodnoty pro mimořádné události (atypické od varianty PBŘ), které nelze ani následně jednoduše určit, jako tomu je u užití modelu a ověřování sady evakuačních scénářů.

Dobrým příkladem vlivu počtu únikových cest na průběh evakuace je posouzení typizované jednolodní stanice metra vycházející z [11]. Pro simulaci evakuace osob z této stanice jsou vybrány pro srovnání dvě varianty – symetrická evakuace (v případě dostupnosti všech evakuačních tras) a asymetrická evakuace (v případě uzavření jedné trasy – levého schodiště). Pro lepší názornost viz obr. 5.41 – srovnání procesu vývoje evakuace variant se zobrazením lokální hustoty osob.



**Obr. 5.41:** Srovnání vývoje evakuace osob typizované jednolodní stanice metra – schéma počátečního stavu v čase 0 s (nahore), symetrická evakuace – v případě dostupnosti všech únikových cest (uprostřed) a asymetrická evakuace v případě uzavření levého horního schodiště (dole) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11, 17])

Výsledné hodnoty celkové doby evakuace simulací jsou pro symetrickou variantu posudku 885,6 s a pro asymetrickou variantu posudku 1085,3 s. Samotná odlišnost výsledků studie není nijak zvlášť překvapivá a je z nich jasně patrné, že průběh symetrického a asymetrického evakuačního procesu je (pro tuto konkrétní stavbu) diametrálně odlišný a celkový evakuační čas se liší více než 20 %.

→ **Vyhodnocení:** Vlivem změny dostupnosti počtu ÚC v průběhu procesu evakuace dochází k výrazně rozdílné redistribuci osob a tím i značně odlišnému průběhu evakuace. V případě asymetrických variant evakuací dochází ke vzniku masivních kongescí (s rizikem vzniku sekundárního nebezpečí), díky čemuž dochází k velkému prodloužení celkové doby evakuace a snížení efektivity zásahu HZS a ISZ.

## S9 – Reakční doba a rychlost osob

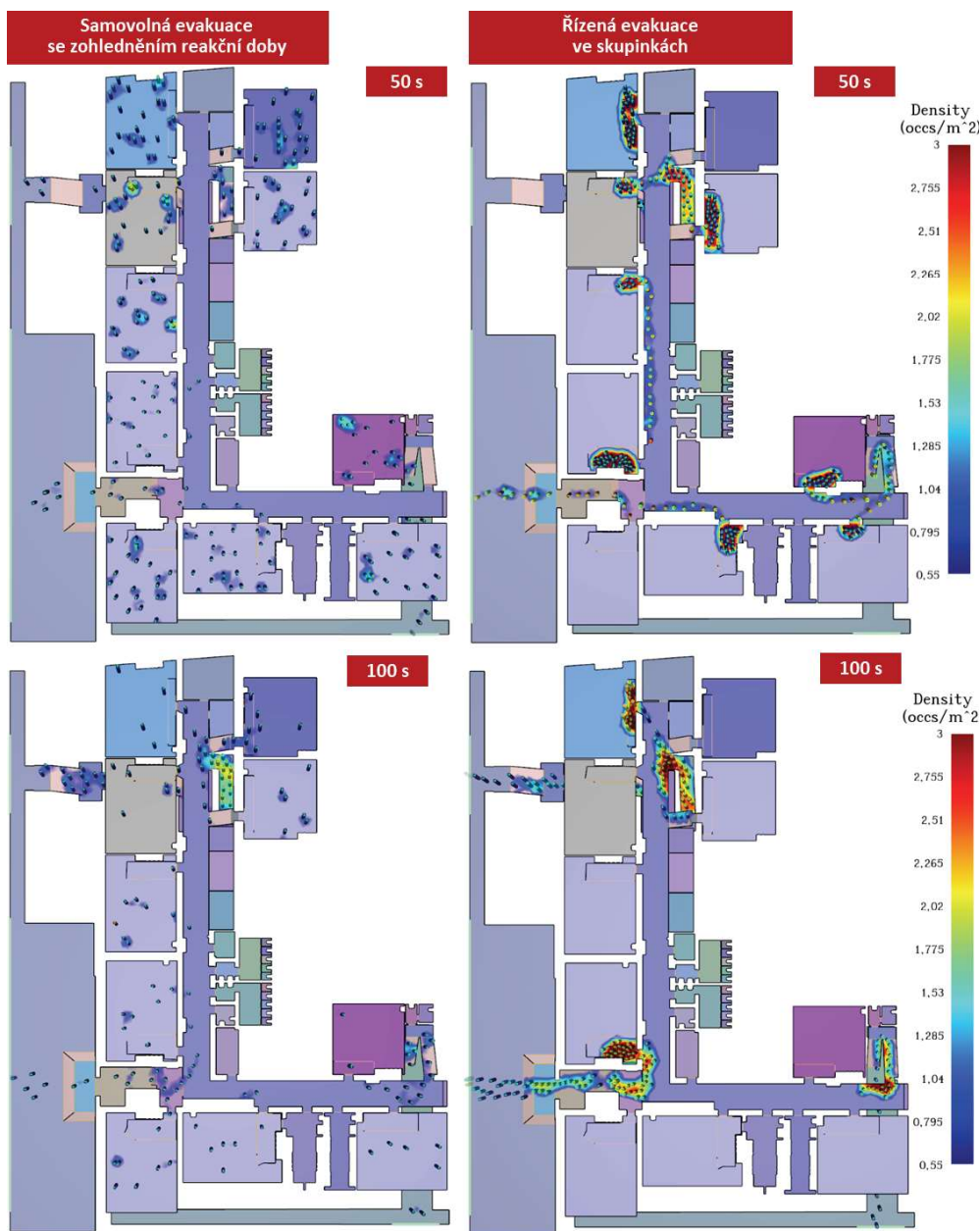
Při stanovení doby evakuace normovým výpočtem předpokládáme konstantní rychlost a okamžitou reakci evakuovaných osob na vyhlášení poplachu (pokynu k evakuaci). Jak je uvedeno v Příloze E, existuje okamžitá reakční doba pouze v ojedinělých případech a nezohledňuje

běžné aktuální činnosti osob a procesy před zahájením evakuace (např. dokončení práce, uvědomění si nebezpečí, péče o ostatní osoby, balení věcí apod.)

Pokročilé modely evakuace umožňují zohlednění způsobů zahájení procesu evakuace a jejich faktory reprodukuje reakce a behaviorální vlastnosti evakuovaných osob. Tyto vlastnosti jsou do modelu zaneseny v podobě statisticky rozložené reakční doby (doby přípravy) a fyzické charakteristiky evakuovaných (v podobě statistického rozložení rychlosti pohybu).

- **U běžných staveb**

Dobrym příkladem vlivu reakční doby (typu evakuace) je studie porovnávající výsledné doby evakuace osob z běžné budovy stanovené normativním přístupem (s nulovou reakční dobou) a stanovené prostřednictvím numerického modelu evakuace osob (se zohledněním reakční doby 0–60 s a případné řízení evakuace). Pro studii bylo vybráno posouzení referenční stavby (blíže viz obr. 5.42)



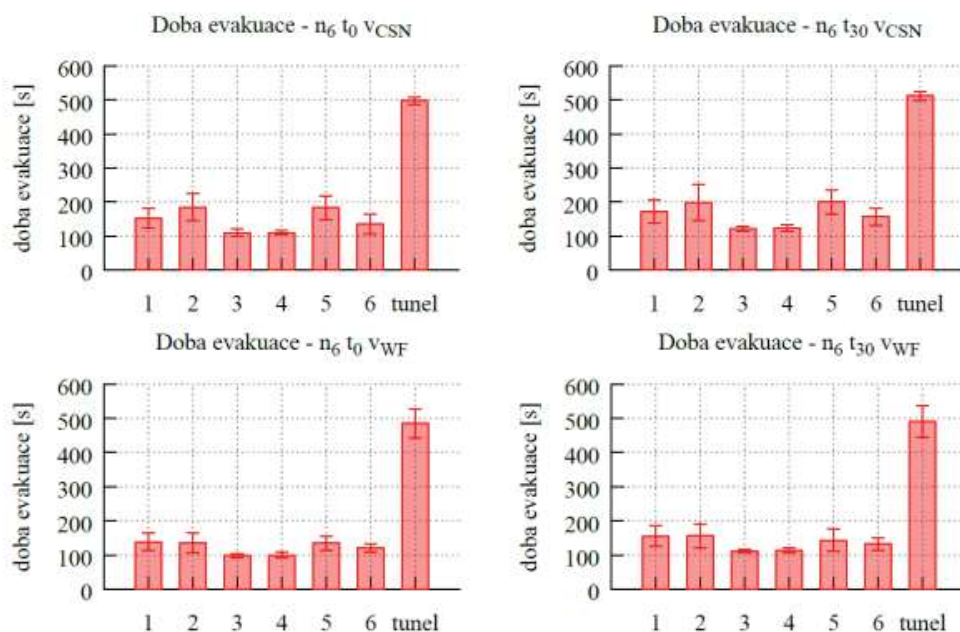
**Obr. 5.42:** Porovnání výsledků průběhu evakuace v čase – 50 s a 100 s u modelů evakuace se zohledněním reakční doby/doby přípravy – samovolná evakuace (vlevo) a řízená evakuace (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [21])



V případě normového výpočtu je doba evakuace  $t_u = 162$  s, v případě použití numerického modelu evakuace je  $t_u = 212$  s (resp. při řízené evakuaci  $t_u = 242$  s, s hladinou spolehlivosti  $P_{95}$ ). Vliv reakční doby u běžných staveb na výsledné prodloužení celkové doby evakuace je ve srovnání normovým výpočtem nízký. Délka zdržení je přibližně rovna délce zohledněné reakční doby a dokonce v některých případech dochází ke splynutí s dobou, kterou osoby setrvávají v lokálních kongescích na ÚC (ve zúžených místech – schodiště, dveře a místech souběhu evakuujících se osob), se kterými normový přístup při posouzení neuvažuje.

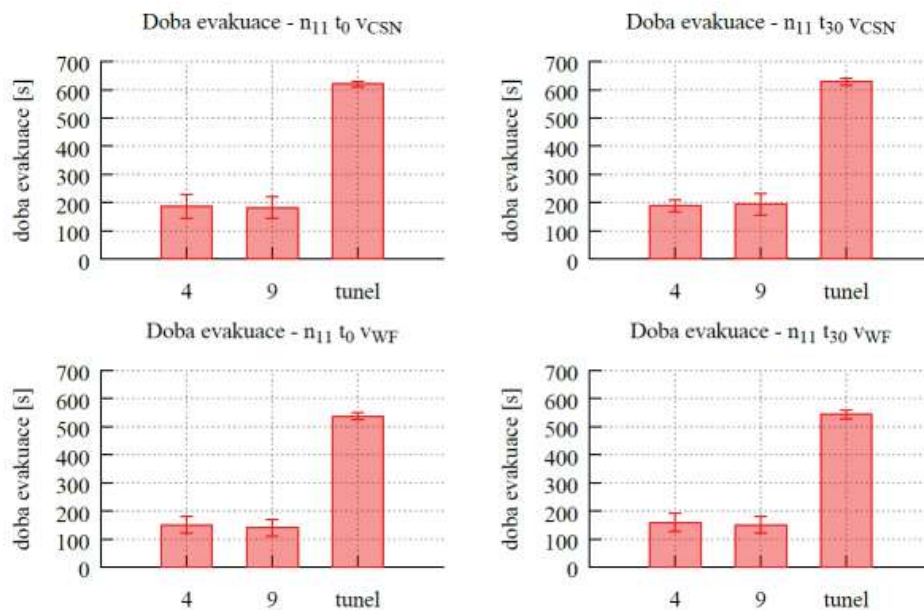
#### • U tunelových staveb

Vliv reakční doby (tak i rychlosti pohybu osob) u tunelových staveb na výslednou dobu evakuace tunelu jako celku je v případě evakuace z vlakové soupravy (šestivozové) velmi malý (resp. se pohybuje v rámci statistické odchylky doby evakuace – jak je vidět i na výsledcích studie evakuace osob z vlakové soupravy uvedené níže na obr. 5.43, chybové úsečky zobrazují oblast dvou směrodatných odchylek od střední hodnoty, tedy  $2\sigma$ ). Tento fakt je způsoben díky vzniku masivní kongesce tvořící se podél vlakové soupravy na únikovém chodníku.



**Obr. 5.43:** Ukázka malé citlivosti modelu tunelových staveb na reakční dobu osob (rychlost pohybu osob) a jejich vlivu na celkovou dobu evakuace v důsledku vzniku kongesce v místě úzkého evakuačního chodníku podél šestivozové vlakové soupravy – výsledky modelů s okamžitou reakční dobou  $t=0$  s (vlevo) a výsledky modelů s intervalovým zadáním reakční dobou  $t=0-30$  s (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [32])

V případech tunelových staveb s větším počtem modelovaných osob (např. souprava s jedenácti vozy) statistická odchylka doby evakuace klesá (viz na obr. 5.44). Vliv reakční doby na evakuační čas je pro tento typ vozů stále zanedbatelný, naopak vliv rychlosti pohybu osob je již patrný a znamená snížení celkové doby evakuace u této varianty přibližně o 10 %.



**Obr. 5.44:** Statistické vyhodnocení průběhu evakuace pro soupravu s 11 vozy. Vodorovná osa zobrazuje výsledky vozů č. 4, č. 9 a celkový výsledek pro tunel. – Ukázka změny citlivosti modelu tunelových staveb na rychlosti pohybu osob a jejich vliv statistickou odchylkou celkové doby evakuace jedenáctivozové vlakové soupravy – výsledky modelů s rychlostí dle ČSN (nahore) a výsledky modelů s rychlostí dle WF (dole) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [32])

→ **Vyhodnocení:** Reakce osob na vyhlášení požárního poplachu (reakční doba) je jedním z kritických faktorů, od kterého se odvíjí úspěšnost celé evakuace, jak je uváděno v [445, 349, 339]. Na celkový evakuační čas nemusí mít zásadní vliv, ale při celkovém posouzení evakuace je nutné ji zohlednit při posuzování jejího průběhu skrze tvorbu kongescí (spolu s rozdílnými rychlostmi pohybu osob), lokálním výskytem osob v průběhu času a zohlednit ji minimálně v RSET.

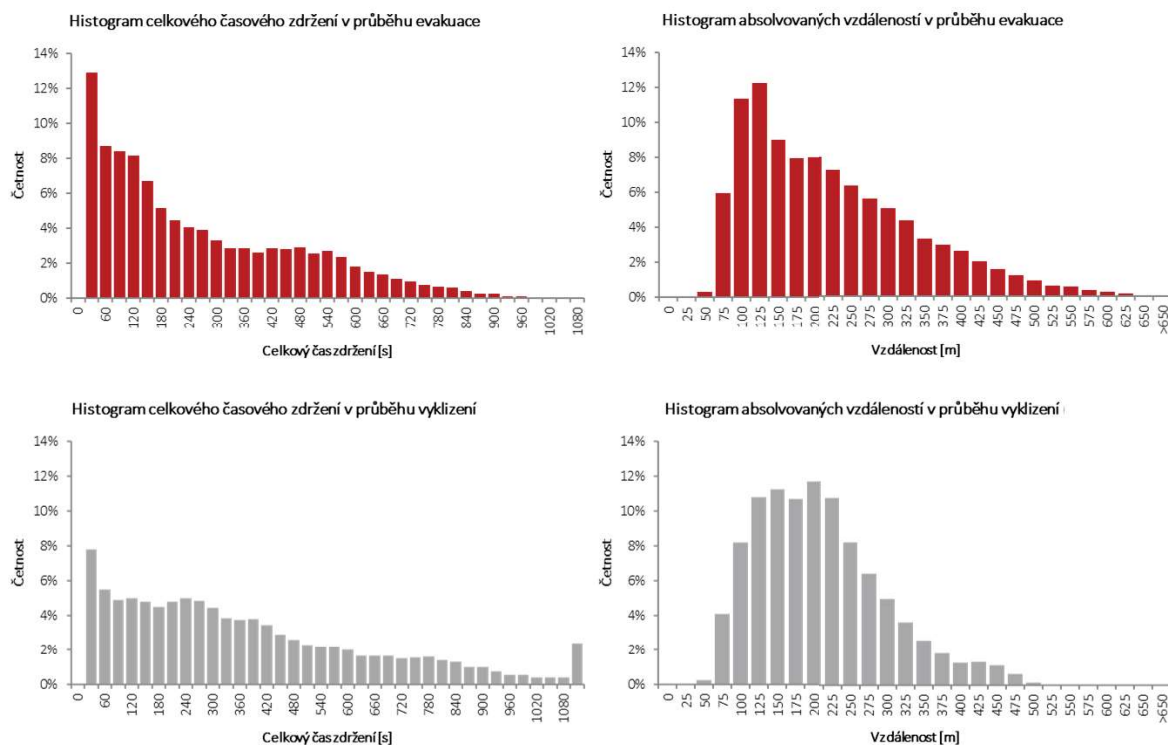
V případě, že by v modelu evakuace nebylo s těmito parametry uvažováno, celkové výsledky by byly velmi podobné těm získaným dle zjednodušeného normového postupu, a to zejména díky velmi nízké normové hodnotě evakuační rychlosti pohybu osob. Dle výsledků studie by se dalo říci, že velmi nízká rychlost pohybu osob při evakuaci zavedená do ČSN původními normotvůrci, jejíž původ není v dochované literatuře nijak odůvodněn, by mohla vysvětlovat zohlednění právě parametru reakční doby.

## S10 – Forma vstupních dat

Při normovém posouzení evakuace osob jsou hodnoty pro evakuované osoby vstupující do výpočtu čerpány z ČSN 73 08XX, kde jsou pro daná řešení přiřazeny konkrétní tabelární (převážně konstantní) hodnoty nebo jsou hodnoty určovány subjektivním uživatelským výběrem. Kontrola výpočtu se provádí nejčastěji pouze kompletním přepočtením. Normový přístup pro všechny osoby v budově definuje stejné podmínky po celou dobu jejich evakuace (počet ÚP, rychlost, neměnné podmínky prostředí při úniku, nezohlednění reakční doby apod.) a výsledkem bývá zpravidla jedna hodnota.

Naopak numerický model umožňuje variovat vstupní parametry, a reflektovat tak určitý reálný vzorek populace či modelovou situaci, díky čemuž lze efektivně odlišit například nenouzovou (vyklizení) a nouzovou evakuaci. Korektní nastavení modelu lze kontrolovat nejen na vstupních hodnotách, ale i na jejich výsledcích, kterých je celá řada. Příkladem kontroly správného nastavení nouzové a nenouzové simulace evakuace mohou být hodnoty absolvovaných vzdáleností a kumulovaných zdržení, které je jsou vyobrazeny na obr. 5.45. Jak je viditelné z výsledků nouzové evakuace (nahore), kratší čas zdržení je za cenu delší trasy

ve srovnání s nenouzovým vyklizením, kde osoby urazí potřebnou (nejkratší/známou) trasu s poměrně větším rozptylem zdržení (osoby nejsou ohrožené a nespěchají).



**Obr. 5.45:** Příklad výstupů z numerického modelu nouzová evakuace (nahore), nenouzová evakuace – vyklizení (dole) a jejich identifikace zohledněných vstupních parametrů na výsledcích absolvované vzdálenosti a kumulovaného zdržení (zdroj: vlastní, přepracováno z [15])

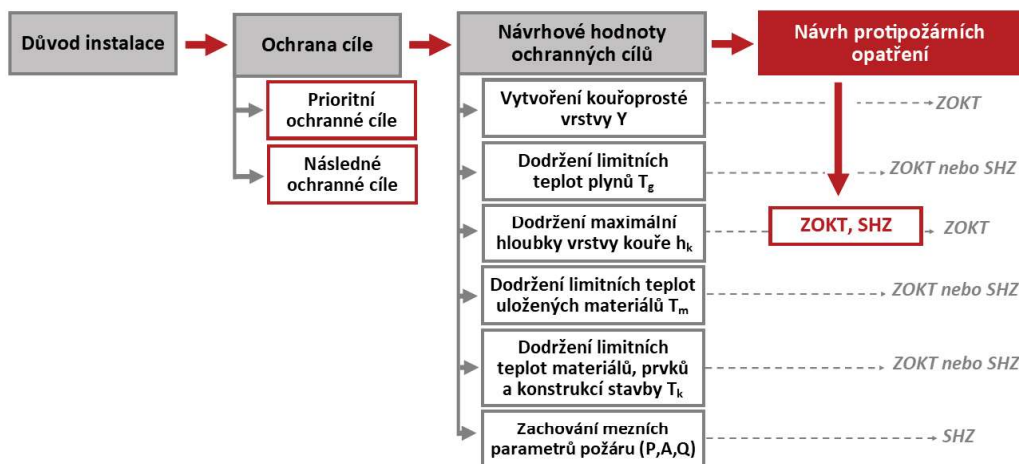
→ **Vyhodnocení:** Díky velkému množství vstupních dat modelu evakuace osob lze obsáhnout přirozenou heterogenitu a možnou variabilitu reálného davu (posuzované stavby). Vstupní data jsou zadávána jednoznačně a i z výsledků lze jednoduše odhadnout základní rámcové hodnoty bez nutnosti přepočtení.

## S11 – Protipožární opatření

Dle ČSN přístupu při posouzení evakuace z budovy dochází ke srovnání vypočtených hodnot doby zakouření akumulární vrstvy  $t_e$  a předpokládané doby evakuace  $t_u$ , jak již bylo uvedeno v kap. 1.3.1. V návrhu PBZ je zohledněna pouze jejich přítomnost (bez detailního zhodnocení vybavení) ve formě součinitele  $c$  vyjadřující vliv PBZ vstupující do výpočtu  $t_e$ , bez zohlednění jejich reálných účinků na vývoj situace a podmínek pro evakuované.

Naopak užití numerického modelu pro posouzení účinnosti vybavení stavby PBZ poskytuje projektantovi určitou možnost zhodnotit různá variantní řešení, např. užití ZOKT (aktivní, pasivní), testování pasivní varianty pro různé klimatické podmínky, ověření množství přiváděného vzduchu, množství a teploty odtahovaného kouře, vliv konkrétního navrhovaného SHZ a při propojení s modelem evakuace i možnost ověření, zda evakuované osoby nebudou ohroženy účinky požáru. Na základě výsledků simulací konkrétních budov je pak možné efektivně plánovat jak množství, tak i rozmístění aktivního protipožárního vybavení. Pro získání optimálního návrhu a maximalizace efektivity i účinnosti je možné porovnávat jednotlivé varianty řešení a jejich kombinace. Nebo jej lze využít ke zhodnocení vývoje situace v případě, kdy jsou funkční jen některá pasivní či aktivní zařízení PO, eventuálně dojde-li k vyřazení některého z PBZ (např. nefunkční zavření požárních dveří na signál EPS, výpadek dodávek vody do sprinklerů, nefunkční EPS, nefunkční ZOKT, nebo selhání samočinných kouřových klapek).

Optimalizace PBZ byla i jedním z předmětů výzkumu řešeného projektu HADES, blíže viz kap. 3.1; pozornost byla zaměřena na ověření možnosti využití numerického modelu v návrhové fázi projektu stavby s cílem zvýšit smysluplnost a efektivitu zamýšleného vybavení, optimalizovat množství aplikovaných technologií, a předejít tak možným chybám a vícenákladům. Na obr. 5.46 je uvedeno názorné schéma postupu při navrhování PBZ inženýrským posouzením.



Obr. 5.46: Schéma vztahů návrhové fáze při projektování instalace PBZ (zdroj: přepracováno z [428])

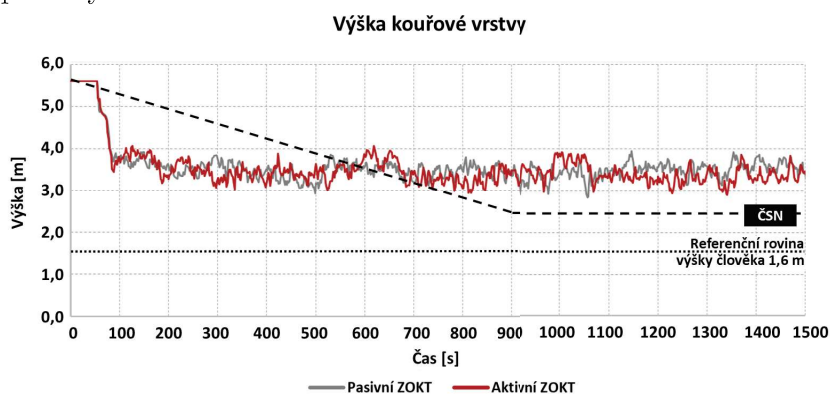
Studie vlivu protipožárního VZT a vybavení proti šíření požáru, kouře a toxicity ve specifických stavbách byla ověřena hned v několika vzorových příkladech, jako jsou: tunelový úsek metra [24], stanice metra [11], multifunkční hala [10] apod., pro které byla vyhodnocena jejich účinnost a vliv na posouzení evakuace.

Vzorovým příkladem byla vybrána studie užití pro budovu obchodního centra (OC), u kterého je simulován vývoj vnitřních podmínek při vzniku požáru, konkrétně – výšky kouřové vrstvy – obr. 5.47, teplotní pole – obr. 5.49, teplota odtahovaného kouře v budově v případě vzniku požáru pro varianty – pasivního a aktivního využití ZOKT.

- **Výška kouřové vrstvy**

Standardním výpočtem dle ČSN 73 0802 čl. 9.1.2 je obecným empirickým vztahem (4.5) stanoven čas zaplnění posuzovaných prostor OC množstvím uvolněných zplodin hoření a kouřem do úrovně 2,5 m nad podlahu v čase cca 15 minut.

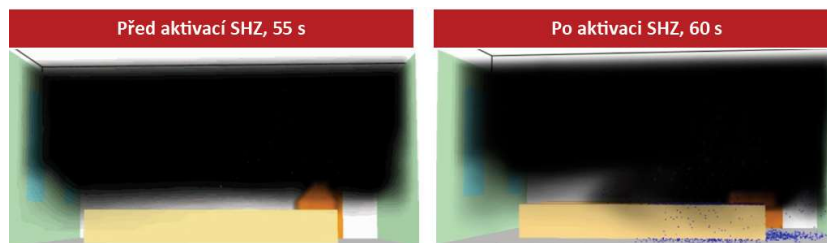
- **Vliv ZOKT** – Pomocí podrobné FDS simulace byl vyhodnocen průběh jak pro variantu pasivního užití ZOKT, tak i pro jeho aktivní užití. Jak je vidět na obr. 5.49, u obou variant nedošlo po celou délku simulace pro tuto konkrétní budovu (1 500 s = 25 min) k překročení limitní hodnoty 2,5 m dle požadavku ČSN. Výška hladiny kouře po většinu času kulminovala kolem hodnot 4,0–3,5 m nad úrovní podlahy.



Obr. 5.47: Graf vývoje výšky kouřové vrstvy v průběhu požáru (zdroj: ve spolupráci s [21])



- **Vliv SHZ** – Vztah (4.5) dle ČSN lze značně kritizovat a považovat za zjednodušený. Jelikož jeho výsledné hodnoty je možné dodatečně modifikovat dle vyvstalých podmínek následovně: má-li více než 10 % evakuovaných osob možnost pouze jedné ÚC, tak hodnota  $t_e$  se snižuje o 40 %, což nemá vypovídající hodnotu skrze samotný vývoj kouřové vrstvy, ale slouží pouze jako snížení hodnoty při srovnání  $t_e$  a  $t_u$  dle vztahu 4.7. Je-li v PÚ instalováno samočinné SHZ, je přípustné hodnotu  $t_e$  navýšit o 1 min (60 s), což by mělo reflektovat zlepšení podmínek pro evakuaci osob [123].

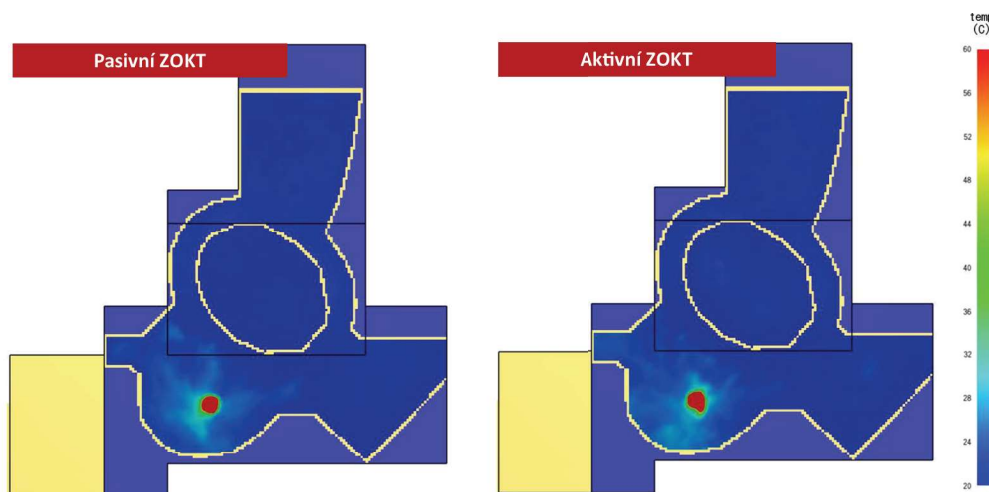


Obr. 5.48: Ukázka vlivu SHZ na kouřovou vrstvu požáru (zdroj: převzato z [161])

V reálné situaci dochází při aktivaci SHZ (sprinklerů) ke kropení kouřové vrstvy, při čemž se vlivem vodních kapek nesnižuje její výška, ani nedochází k její stabilizaci, ale naopak dochází ke srážení spodní kouřové vrstvy směrem k podlaze, jak uvádí F. Pelc v [161], to je názorně vidět na obr. 5.48, což oproti normovému pohledu naopak podmínky pro evakuované osoby silně zhoršuje.

- **Vývoj teplotního pole**

Přímo v rámci základního normového posouzení evakuace osob není nijak speciálně zohledněno globální působení teploty na unikající osoby i když, jak již bylo uvedeno v kap. 5.1.2, tyto účinky mohou mít pro evakuované fatální následky. V případě výsledků studie OC je znatelné, že vývoj teplotního pole ve vnitřních podmínkách budovy v průběhu požáru je lokálního charakteru i v 1 500 s, a to jak s pasivním tak i aktivním ZOKT, a nedochází tak k ohrožení osob.



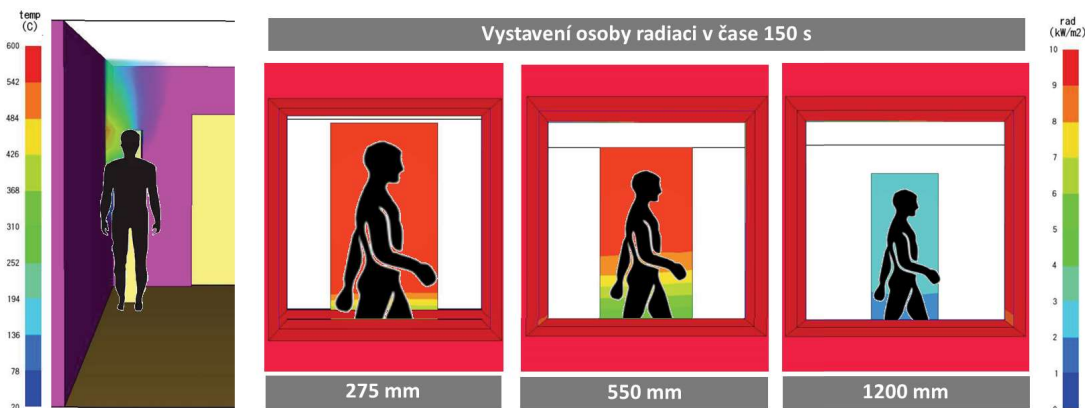
Obr. 5.49: Vizualní porovnání rozvoje teplotního pole v 1 500 s pro variantu pasivní (vlevo) a aktivní ZOKT (vpravo), měřeno v referenční výšce 1,6 m (výška průměrného člověka) nad podlahou (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [21])

- **Teplotní účinky – radiační složka**

Posouzení se zohledněním teploty je posouzení míry ohrožení unikajících osob teplotními účinky požáru (radiační složkou) v blízkosti zcela požárně otevřených ploch, a to v blízkosti ÚC/východu na volné prostranství. Ohrožení účinkem požáru se stanovuje

dle ČSN 73 0810 čl. 5.3.5, který říká, že osoby nejsou ohroženy, pokud hustota tepelného toku působící na unikající osoby (měřeno v ose nejbližšího ÚP k sálavé ploše) není vyšší jak  $10 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  po dobu 5 s, při rychlosti osob  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Hodnota tepelného toku nesmí být překročena, ani kdyby expozice osob trvala kratší dobu [129].

Studie působení teplotních účinků na evakuující se osoby srovnává získané hodnoty normovým výpočtem dle čl. 5.3.5 a) a hodnoty získané ze simulací. Hustoty tepelného toku jsou vypočteny pro vzdálenost osy ÚP od stěny chodby 275 mm ( $1/2$  ÚP) –  $8,1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  a pro polohu osy únikového pruhu v ose chodby, tj. ve vzdálenosti 1 200 mm od stěny je vypočtená hustota tepelného toku v ose únikového pruhu  $4,3 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ . Osoby unikající z posuzovaného objektu nejsou ohroženy. Výsledky z modelu CFD, jak je možné vidět na obr. 5.50, jsou shodné s výsledky normového výpočtu.



**Obr. 5.50:** Vystavení unikající osoby účinkům radiace z POP v blízkosti ÚC po plném rozvinutí požáru – ve vzdálenosti osy úniku od POP 275 mm, 550 mm a 1 200 mm (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [21, 390])

Na základě výstupů z modelu je možné sledovat vývoj radiace v čase, ověřit navrhovaná opatření (konstrukci, stínění, chlazení), při kombinaci modelů požáru a evakuace lze ověřit i kumulovanou expozici evakuovaných osob, jak je uvedeno na obr. 5.50.

→ **Vyhodnocení:** Účinnost PBZ má silný vliv na dobu dostupnou pro evakuaci (ASET) a kvalitu vnitřních podmínek, ve kterých se vyskytují evakuované osoby. Jak bylo demonstrováno ve studiích výše, není vhodné posuzovat pouze splnění požadavku (přítomnost/nepřítomnost PBZ), ale i ověřit vliv a fungování navrhované sady PBZ u konkrétní posuzované stavby. Vliv PBZ je nutné analyzovat jak z pohledu vývoje požáru samotného, tak i vzniku produktů hoření a jejich dopadu na evakuované osoby v jeho celém průběhu (vyhodnocení podmínek evakuace, podmínek pro zásah IZS). Včasná identifikace nedostatečně účinného řešení či možná optimalizace funkčně neopodstatněného PBZ předepsaného skrze obecné požadavky ČSN.

## S12 – Obsazenost a aproximace geometrie ÚC

V rámci normového posouzení je obsazení objektu prováděno dle typu prostoru a jeho odpovídajících tabelárních hodnot z [118], které jsou již od počátku sice značně nadprůměrné, jelikož mají odrážet obsazenost běžného provozu s rezervou pro vznik i výjimečných událostí. Dle ČSN 73 08018 [118] lze obsazení objektu osobami povést dvěma způsoby – buď je udáván počet osob, který je v daném provozu uvažován na  $\text{m}^2$ , nebo je projektovaný počet osob (např. bráno jako počet lůžek, sedadel apod.) přenásoben součinitelem. I přes nadprůměrnou obsazenost normového přístupu nemusí být toto navýšení zcela dostatečné pro různé provozní scénáře, nebo pro případ vzniku mimořádné události. Z tohoto důvodu jsou při posuzování numerickým modelem zpravidla ověřovány různé variace zatížení obsazeností (běžnou, mimořádnou, ve špičkové hodině, při příjezdu spoje, při různých typech akcí – koncert, sportovní zápas apod.), stejně jak tomu bylo u posouzení staveb [11, 19, 20] atd.



Dobrým příkladem je studie obsazenosti posuzované stavby na výslednou dobu evakuace při posudku tunelu. Obsazenost osobami byla stanovena dle ČSN 73 0818 – skutečná obsazenost násobená koeficientem  $1,5 = 500$  os. Tato studie byla doplněna o další reálné (nenormové) varianty obsazenosti (špičkový čas s maximální naplněností vozů i v místech uliček, obslužnost trasy větší 11vozovou soupravou) i se zohledněním zastoupení osob s omezenou schopností pohybu. Následně pro všechny varianty byla dle vztahu (4.6) vypočtena předpokládaná doba evakuace. Pro srovnání výsledných hodnot jsou vypočtené předpokládané doby evakuace uvedeny blíže viz tab. 5.7.

**Tab. 5.7:** Předpokládaná doba evakuace výpočtem dle [123] (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20])

Počet osob [os.]	$s$ [-]	$t_u$ [min]	Poznámka
500	1,00	10,6	Základní obsazenost dle předpokladu PBŘ [118]
594	1,00	11,83	Modelová obsazenost (kapacita 6vozové soupravy)
594	1,05	12,28	Modelová obsazenost (kapacita 6vozové soupravy) s 5% zastoupením osob s omezenou schopností pohybu
1089	1,00	18,48	Modelová obsazenost (kapacita 11vozové soupravy)
1089	1,05	19,21	Modelová obsazenost (kapacita 11vozové soupravy) s 5% zastoupením osob s omezenou schopností pohybu

Z porovnání výsledných evakuačních času vyplývá, že základní výpočet provedený normovým postupem (10,6 min) je relativně optimistický a nezohledňuje zejména skutečnost, že může dojít k vyšší obsazenosti soupravy (špičkový čas, osoby stojící v komunikačním prostoru, změna obslužné soupravy), a tím i vyššímu počtu evakuujících se osob, než je uvažováno při klasickém PBŘ. V případě vlakové soupravy s 11 vozy se vypočtená doba evakuace osob v závislosti na variaci vstupních hodnot (maximální obsazeností vozů) může zvýšit až o více než 80 %.

Reálné obsazenosti byly užity jako vstupní hodnoty simulovaných numerických modelů (za účelem srovnání přístupu ČSN a NM). Jejich výsledky simulací (výsledné časy evakuace) jsou uvedeny v tab. 5.8.

**Tab. 5.8:** Doba evakuace simulovaná pro modelované varianty (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20])

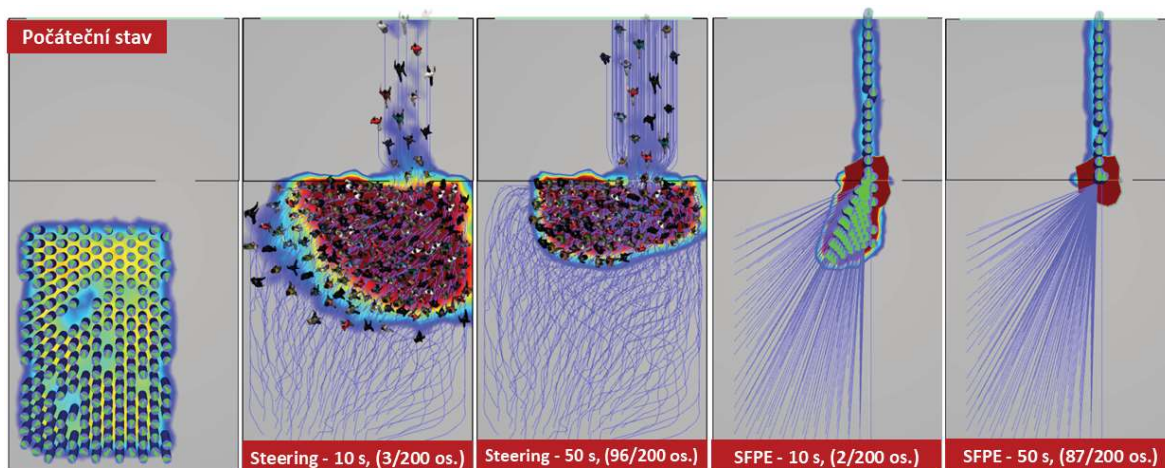
Počet osob [os.]	$t_u$ [s] ([min])	Sm. odch. $2\sigma$ [s]	Poznámka
594	485 (8,08)	43,1	Modelová obsazenost (kapacita 6vozové soupravy), rychlost dle ČSN
594	498 (8,30)	11,0	Modelová obsazenost (kapacita 6vozové soupravy) s 5% zastoupením osob s omezenou schopností pohybu, rychlost dle ČSN
1089	537 (8,95)	12,0	Modelová obsazenost (kapacita 11vozové soupravy), rychlost dle ČSN
1089	620 (10,30)	10,2	Modelová obsazenost (kapacita 11vozové soupravy) s 5% zastoupením osob s omezenou schopností pohybu, rychlost dle ČSN

Časové rozdíly mezi dobou evakuace na základě simulace (8,3–10,3 min) a dobou evakuace na základě normového výpočtu (10,6–19,2 min) jsou způsobeny především odlišnou interpretací šířky ÚC. Normový výpočet pracuje s šířkou únikového pruhu 1,5násobku 550 mm (tj. 825 mm), přičemž celková šířka únikového chodníku je 1 060 mm, tedy ekvivalent 1,93násobku této šířky. Pro model jsou uvažovány dva únikové pruhy jako šířka únikového chodníku ( $2 \text{ ÚP} = 1 100 \text{ mm}$ ) s přihlédnutím k přirozené možnosti „komprese“ lidského těla [421, 172].

→ **Vyhodnocení:** Reálná obsazenost (počet osob unikajících z posuzované budovy) zejména i se zanesením scénářů odchylojících se od jejich běžných standardů obsazenosti (vyššího počtu osob), tak i zohlednění procentuálního zastoupení osob s hendikepem, má silný vliv na konečný výsledek doby evakuace. Obsazenost je klíčovým parametrem pro správné hodnocení a případně i dimenzování ÚC. Není cílem stavbu globálně předdimenzovat skrze požadavky odvíjející se od mimořádných (ve smyslu výjimečných) obsazeností objektu, ale i přesto je nutné analyzovat evakuační procesy budovy při jejím maximálním možném zatížení obsazeností a vyhodnotit možná nebezpečí a jejich dopady, které se dají zohlednit v návrhu lokálně.

### S13 – Volba výpočetního přístupu

Jak již bylo nastíněno výše, normový přístup nahlíží na posouzení jako na porovnání konkrétního výsledku, nikoliv jako na posouzení procesu. Naopak agentními modely lze evakuaci plnohodnotně posoudit jako děj (proces) s ohledem na vývoj situace, vzniku změn a interakci v davu. Pro bližší srovnání a náhled na možné výstupy (jejich omezení) z numerických modelů byla vytvořena studie porovnávající vzorové výpočetní přístupy a jejich výsledky (i ve vztahu k běžnému výpočtu dle ČSN).



**Obr. 5.51:** Srovnání průběhu evakuace základní úlohy pro – výpočetní model chování Steering (vlevo) a výpočetní model chování SFPE (vpravo) (zdroj: vlastní)

**Tab. 5.9:** Srovnání výsledných časů evakuace při posouzení stavby se specifickou geometrií při užití modelů chování Steering a SFPE, kde dochází při silně asymetrické variantě s dvojnásobnou obsazeností k rozdílu výsledných hodnot modelů o více jak 40 % (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11])

Scénář a volba výpočetního režimu	Čas evakuace [s]	
	95% kvantil	Směrodatná odchylka
Symetrická varianta, 1 050 osob, Steering	502,8	6,3
Symetrická varianta, 1 050 osob, SFPE	622,7	5,2
Symetrická varianta, 2 050 osob, Steering	772,8	22,6
Symetrická varianta, 2 050 osob, SFPE	995,3	7,2
Asymetrická varianta, 1 050 osob, Steering	567,8	5,6
Asymetrická varianta, 1 050 osob, SFPE	768,1	1,9
Asymetrická varianta, 2 050 osob, Steering	914,2	10,7
Asymetrická varianta, 2 050 osob, SFPE	1304,1	3,0

V kap. 4.1.2 již byly představeny dva příklady výpočetních modelů chování – Steering a SFPE. Z hlediska vizuálního ztvárnění behaviorálního chování osob a analýzy dynamiky davu je vizuální ztvárnění např. modelem chování Steering jednoznačně s realističtějšími výstupy pro

vyhodnocování nežli modelem SFPE, jak je názorně vidět i na obr. 5.51. Oproti tomu model SFPE spíše odpovídá analytickým výpočtům dle ČSN, příkladem mohou být i výsledky studie srovnání modelu SFPE a modelu přizpůsobenému dle výpočtu ČSN, kde jsou zvolené rychlosti pro variantu ČSN (konstantní  $0,583 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  po rovině) a pro variantu SFPE ( $1,19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  po rovině, se závislostí na lokální hustotě) se liší max. o 12 % [11].

Při srovnání zmiňovaných dvou výpočetních přístupů pro základní úlohy (viz obr. 5.51) se výsledné evakuační časy modelů liší cca o 10–20 %, ale při posuzování specifických staveb s rozsáhlou a složitou geometrií, zvýšenou obsazeností či při aplikaci krizového scénáře se rozdíl výsledných hodnot časů evakuace modelů pohybuje mezi 20–30 %. V případech silně asymetrických evakuací, s tvorbou masivních kongescí, se rozdíl dokonce zvyšuje až na 35 až 43 %, blíže viz tab. 5.9 a [11].

→ **Vyhodnocení:** Volba výpočetního přístupu chování má silný vliv na konečnou formu výstupů evakuace osob. Při jeho volbě je nutné, aby modelář byl obeznámen se všemi funkčními principy a zjednodušeními konkrétního přístupu a volil je s ohledem na co největší možné přiblížení se realitě a na specifika posuzované stavby. Jen celistvá sada výstupů popisující úplný průběh evakuace osob, od vzniku mimořádné události až po evakuaci poslední osoby, nám může být kvalitním podkladem pro komplexní bezpečnostní analýzu.

### 5.2.2 Shrnutí poznatků citlivostních a parametrických studií

Z výsledného srovnání posuzovaných přístupů z pohledu aplikace a formy ztvárnění jednotlivých analyzovaných parametrů v rámci studií (uvedených výše v kap. 5.2.1, studie S1–S13) a při samotném požárně bezpečnostním posouzení vybraných specifických staveb, vyplynula u běžně užívaného normového přístupu silná zjednodušení i konkrétní nedostatky či nezohlednění některých důležitých parametrů majících vliv na celkový výsledek evakuace. Zmiňovaná zjednodušení a nedostatky ČSN přístupu při hodnocení specifických staveb mohou dle výsledků v lepším případě přispět k posouzením na stranu bezpečnou většinou ve formě větší časové rezervy či robustního a finančně nákladného protipožárního vybavení, v horším případě může dojít k chybným/nebezpečným úsudkům, které mohou mít za důsledek vznik masivních kongescí (se sekundárním nebezpečím), komplikace při evakuaci či nedostatečnou dobu pro bezpečný únik.

Klíčové zjednodušení klasického přístupu mající silný dopad na posouzení evakuačního procesu jsou blíže popsána v následujících odstavcích. Vlivy ostatních zkoumaných parametrů v rámci analyzovaných studií jsou pak uvedeny v souhrnném přehledu níže (viz tab. 5.10).

- **Užití jednoho obecného scénáře**, který nezohledňuje možnost vzniku mimořádných situací zejména z pohledu obsazenosti posuzované budovy (charakter davu, množství osob apod. - viz kap. 5.2.1, studie S4 a S12) a také skrze dostupnost (spíše nedostupnost) únikových tras, která může vzniknout přirozeným vývojem situace nebo v důsledku útoku na měkký cíl (viz kap. 5.2.1, studie S2, S5 a S8).
- **Hodnocení evakuačního procesu pomocí jedné sady hodnot**, evakuace osob není hodnocena jako proces (jeho průběh), ale pouze porovnání celkových hodnot  $t_e > t_u$ , pro ÚC  $l_{skut}$  a  $u_{skut}$  v jejich kritických profilech (dveře, místa souběhu proudů evakuovaných osob). Posouzení s těmito zjednodušeními jsou dostatečná pro běžné stavby menšího rozsahu s malou obsazeností, ale u staveb specifických tomu tak být nemusí. U těchto typu staveb je nutné na evakuaci osob pohlížet jako na proces a posuzovat jeho vývoj průběhu v čase (dílčí časy evakuace, vývoj šíření produktů požáru v čase, pohyb osob a tvorba kongescí apod.), především u staveb s vysokou obsazeností osob, kde je vysoká míra pravděpodobnosti tvorby masivních kongescí (kap. 5.2.1, studie S8), a tak i vzniku sekundárních rizik pro evakuované. Součástí bezpečnostní analýzy evakuačního procesu by měla být i komplexní analýza kritických míst, která je blíže rozebrána viz kap. 5.4.

- **Nezohlednění heterogenity davu** (individuálních charakteristik osob), evakuované osoby jsou brány jako homogenní početný dav. Osoby v něm jsou unifikované – stejného tvaru, konstantní rychlosti, s nulovou relační dobou, pohybující se pouze v pomyslných ÚP bez zohlednění jakékoliv možné interakce mezi osobami samými i mezi osobami a posuzovanou geometrií posuzované stavby (viz kap. 5.2.1, studie S4, S6 a S9). Absence charakteristik osob a ztvárnění jejich pohybu při posouzení vede ke značnému zjednodušení reálného procesu evakuace osob nezohledňujícímu průběh a vznik davových jevů, které mají silný dopad na celkový výsledek evakuace (evakuační čas) – blíže viz 5.2.1, studie S1 a S8.
- **Velké zjednodušení či absence osob s hendikepem** v rámci obsazenosti běžných veřejných budov není uvažováno s procentuálním zastoupením osob se specifickými potřebami. Tyto osoby jsou zohledňovány převážně jen u typu budov skupiny LZ (nemocnice, LDN, pečovatelské domy, ústavy a další lékařská zařízení), kde jejich samotného ztvárnění je zohledněno pouze součinitelem  $s$ . Samotná míra samostatnosti pohybu, prostorové nároky a potřeba asistence není jinak zohledněna a dokonce využití ÚC není nijak omezeno dle typu evakuované osoby, např. osoba na vozíku může samostatně využít k evakuaci schodiště – jinak řečeno ČSN přístupu připouští, že osoba na vozíku může chodit. Zohlednění skupiny hendikepovaných osob je důležitým parametrem jak při posouzení celkové doby evakuace (jak je vidět blíže z výsledku studie kap. 5.2.1, studie S6), tak i z hlediska jejího samotného plánování a krizového managementu.

Následně je uvedeno přehledné shrnutí poznatků parametrických a citlivostních studií parametrů a jejich vliv na proces evakuace osob a jeho výslednou celkovou evakuační dobu – blíže viz níže tab. 5.10.

**Tab. 5.10:** Souhrnný přehled srovnání normového ČSN přístupu a užití numerického modelu v rámci uvede-  
ných vzorových parametrických studií z kap. 5.2.1 (zdroj: vlastní)

	<b>Přístup ČSN</b>	<b>Přístup numerického modelu</b>	<b>Důsledky zjednodušení ČSN přístupu pro posuzování specifických staveb</b>
<b>Studie vlivu davových jevů a pozice vagónu vlakové soupravy (S1)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konstantní pohyb osob, kapacita ÚC dle počtu ÚP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ztvárnění reálného kontextu evakuace a davových jevů.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Nezohlednění reálné kapacity</b> → umělé snížení (snížení rychlosti evakuace na stranu bezpečnou)</li> <li>• <b>Nezohlednění davových jevů</b> → nezohlednění reálných procesů vzniku kongescí a davových jevů jako je odříznutí osob ve vlakovém voze.</li> </ul>
<b>Studie vlivu redistribuce osob (S2)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rovnoměrné dělení davu – do dvou a více směrů úniku (velmi ojediněle je uvažován jeden směr úniku), rovnoměrné rozmístění.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Asymetrické i silně asymetrické dělení davu</b>, výjimečně symetrické dělení (únikové směry dle aktuálního stavu a početnost davu dle aktuálního rozmístění osob).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Zjednodušení neodrážející realitu</b> → u staveb s velkým počtem osob vznik kongescí a silné prodloužení celkového evakuačního času</li> </ul>
<b>Studie vlivu kapacity ÚC (S3)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uvažuje stálá jednotková kapacita <math>K_u</math> koridoru po celou dobu evakuace (pohyb osob v pomyslných ÚP, s konstantní rychlostí a směrem osob).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ztvárnění reálné dostupné kapacity koridoru s ohledem na vývoj situace</b> – pohyb osob je volný, přirozený se zohledněním interakcí a vnějších podnětů, např. vznik kongescí.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Zjednodušení neodrážející reálný pohyb osob při evakuaci, jejich interakce a fyzické charakteristiky</b> → vliv na snížení propustnosti ÚC (vznik zdržení)</li> </ul>
<b>Studie vlivu složení davu (S4)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Homogenní skupina osob</b> – stejné konstantní parametry pro všechny osoby bez ohledu na typ budovy či událost. (výjimkou jsou stavby uváděné v ČSN 7300 835)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Heterogenní skupina – s různorodým ztvárněním vstupních parametrů</b> s ohledem na typ staveb, událost či denní dobu – zohledněn: věk, gender, hendikep, tvoření skupin, sociální vazby apod.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Zohlednění obecného vzorku populace</b> → v realitě je dav heterogenní a může docházet k silnému zastoupení určité i znevýhodněné skupiny osob (hendikepovaní, staří, děti apod.) a tím i změně charakteristik davu oproti obecným konstantním hodnotám.</li> </ul>
<b>Studie vlivu voleného scénáře (SS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Jeden obecný normový scénář</b> – osoby se evakuují okamžitě a všemi východy budovy (ne vždy se jedná o nejkritičtější scénář).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Komplexní sada evakuačních scénářů</b> – různé variace jak samotné populace, tak i dostupnosti ÚC (součástí nejkritičtější varianta scénáře).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Zjednodušení nabízí pouze jeden obecný scénář</b> → nezohledňuje vznik krizových událostí (obecný normový scénář není nejkritičtějším scénářem).</li> </ul>

(pokračování tabulky na následující straně)

	<b>Přístup ČSN</b>	<b>Přístup numerického modelu</b>	<b>Důsledky zjednodušení ČSN přístupu pro posuzování specifických staveb</b>
<b>Studie vlivu míry samostatnosti a potřeby asistence jiných osob (S6)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zohlednění <b>přítomnosti osob se sníženou schopností pohybu</b> či potřeby asistence, je <b>pouze ve velmi omezené míře</b> – pomocí součinitele <math>s</math> = umělé navýšení osob (primárně při posuzování zdravotnických zařízení dle ČSN 73 00 835).</li> <li>Okamžitá evakuace <b>všemi dostupnými ÚC i minimálním ohledem na mobilitu</b> evakuovaných.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Možnost zohlednění <b>osob se sníženou schopností pohybu i s potřebou reálné asistence personálu</b> – možnost různých variant a procentuálních zastoupení.</li> <li><b>Osoby s hendikepem jako součást běžného davu</b> (zohlednění i mimo zdravotnická zařízení).</li> <li><b>Zohlednění mobility, prostorových nároků a časové náročnosti</b> dle reálného stavu a možností evakuovaných.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Zjednodušení uvažují pohyb všech osob bez ohledu na míru samostatnosti a schopnosti pohybu po všech typech ÚC</b> → nezohledňuje reálný průběh a potřeby evakuovaných osob s omezením – asistovaná evakuace, její časové a prostorové nároky (osoby na lůžku/vozíku se reálně pohybují pouze za asistence – převážně po rovině či výtahem, ojediněle jsou evakuovány po schodišti).</li> </ul>
<b>Studie vlivu aproximace detailů geometrie (S7)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Posouzení ÚC</b> pouze z pohledu – <b>mezních délek <math>l_{skat}</math> a mezních šířek <math>u_{skat}</math></b> (nezohledňuje drobní překážky a vybavení), přepočít ÚC na počet ÚP (na stranu bezpečnou).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ztvárnění a <b>analýza reálné geometrie v podrobném měřítku</b> (zohlednění výstupků, překážek, vybavení), geometrie modelu i ÚC jako interpretace reality a skutečného pohybu osob v ní.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Zjednodušení zavádí pouze geometrické posouzení ÚC skrze parametry <math>l_{skat}</math> a <math>u_{skat}</math></b> → neodráží reálný vliv geometrie na pohyb samotných osob (změny směru, proudění, vznik kongescí).</li> </ul>
<b>Studie vlivu počtu ÚC (S8)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Dostupnost všech ÚC</b> dle PD (po celou dobu evakuace).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Reflektuje skutečný vývoj situace přístupnosti ÚC</b> – dostupnost jen některých ÚC (i v průběhu již započaté evakuace).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Zjednodušení nereflektující možnost vzniku mimořádné události a omezení počtu ÚC</b> → možnost kritického vývoje situace, vzniku masivních kongescí se značným prodloužením evakuační doby.</li> </ul>
<b>Studie vlivu reakční doby a rychlosti osob (S9)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uvažuje <b>okamžitou reakční dobu</b> (konstantní rychlost pohybu) každé osoby.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Reprodukuje reakce a behaviorální vlastnosti osob</b> → statistické rozložení reakční doby – psychologický efekt a statistické rozložení rychlosti – fyzické charakteristiky osob.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Zjednodušení nezohledňující reakční dobu</b> (nulová doba před pohybem) → nezohledňuje zdržení osob v počátečních místech, nerovnoměrné zahájení evakuace, interakce osob a vznik kongescí v úzkých místech a místech souběhu evakuujícího se davu → nezohledňuje možný výskyt osob v průběhu evakuace v postižených místech.</li> <li><b>Nezohlednění reálné rychlosti pohybů osob</b> (velmi nízká hodnota) <b>konstantní pohyb</b> → nezohledňuje reálný pohyb osob – individualitu jedince, interakce osob, samo organizaci davu, stop and go a vznik kongescí (neplynulý pohyb).</li> </ul>
<b>Studie vlivu formy vstupních dat (S10)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Vstupy – tabelární konstantní hodnoty, výsledkem jedna konstantní hodnota</b>, z které nereflektuje vývoj situace a nelze z ní jednoznačně určit zohledněné vstupy bez kompletního přepočítání výpočtu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Vstupy – různé variace parametrů</b> s ohledem na modelované scénáře a reálný vzorek populace.</li> <li>Výsledkem <b>široká škála výstupů</b> – viz 4.3 – <b>odrážející vývoj situace</b> (evakuace osob, požáru), z kterých lze identifikovat zohlednění hlavních základních vstupů.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Zjednodušení uvažující obecný univerzální popis davu</b> užívaný normové tabelární hodnoty se subjektivním výběrem → nezohledňuje reálné charakteristiky davu a nelze jednoznačně určit užitá vstupní data bez přepočtu</li> <li><b>Zjednodušení zavádí výsledek ve formě jednoho čísla</b> → neinformuje o průběhu evakuace a možných komplikacích v rámci evakuačního procesu.</li> </ul>
<b>Studie vlivu protipožárních opatření (PBZ), (S11)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zjednodušené stanovení doby <b>zakouření akumulační vrstvy <math>t_e</math></b> (jedna číselná hodnota), <b>bez detailního zohlednění vybavení PBZ</b> – což nereflektuje skutečný vývoj situace (dochází pouze k úpravě hodnoty <math>t_e</math> pro porovnání <math>t_e &gt; t_{e0}</math>).</li> <li>Není nijak zohledněno globální působení teploty na unikající osoby, <b>stanovení hustoty tepelného toku pro konkrétní vzdálenost od POP</b> jako jedné hodnoty.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Zohlednění komplexních vstupních podmínek a vybavení PBZ a jejich reálný vliv a účinnost</b> na vývoj a šíření kouře a požáru (různé variace).</li> <li>Výsledkem <b>detailní informace vývoji</b> o teplotě, množství toxických látek a vlivu na osoby v průběhu celé doby evakuace.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Zjednodušení pro návrh PBZ předepsaná na základě obecných požadavků ČSN bez ověření účinnosti</b> → opatření pro specifickou stavbu nemusí být účinná v době evakuace, ani v době zásahu (např. dle užitých materiálů není možné dosáhnout teplot pro spuštění SHZ), možnost vzniku návrhu předimenzovaných opatření.</li> <li><b>Zjednodušení využívající pro posudek jednu konkrétní konstantní hodnotu</b> → není zohledněna možnost přihlídnout k vývoji situace požáru a dopadu na osoby v průběhu jejich evakuace.</li> </ul>

(pokračování tabulky na následující straně)



	<b>Přístup ČSN</b>	<b>Přístup numerického modelu</b>	<b>Důsledky zjednodušení ČSN přístupu pro posuzování specifických staveb</b>
<b>Studie vlivu obsazenosti (S12)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Základní normová obsazenost</b> dle ČSN 73 0818, s ohledem účel místností rovnoměrné rozmístění počet m<sup>2</sup> na osobu.</li> <li>• <b>Skutečná šířka ÚC je přepočítána do násobků počtu ÚP</b> (zohledňuje se 1,5x násobek ÚP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Obsazenost dle reálné kapacity</b>, s ohledem na konanou událost, dopravní vytíženost, či statistiky návštěvnosti atd.</li> <li>• <b>Rozmístění osob</b> v modelovaném prostoru je <b>s ohledem na reálný provoz</b> (tvorba front, obsazení sedadel, přirozená kumulace osob na vybraných místech).</li> <li>• <b>Zohlednění skutečného tvaru (šířek) geometrie ÚC.</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Zjednodušení zavádí obecnou obsazenost s rovnoměrným rozprostřením osob</b> → neodráží reálný provoz a jeho zatížení kumulací osob v konkrétních místech posuzované budovy, nezohledňuje obsazenost mimořádných situací (ranní špička, setkání, příchod osob).</li> <li>• <b>Zjednodušení geometrie ÚC na 1,5 násobky ÚP</b> → vnáší do posouzení silné zkreslení, které znemožňuje posouzení reálných evakuačních procesů, a také vlivem toho dochází k umělému navýšení celkové doby evakuace.</li> </ul>
<b>Studie vlivu volby výpočetního přístupu (S13)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Výpočet předpokládané doby evakuace pro jeden obecný scénář</b> s konstantními vstupními hodnotami a výsledkem je pro celý průběh evakuace jedna hodnota <math>t_e</math>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pro výpočet celkové doby evakuace je <b>možné volit výpočetní přístup</b> (např. Steering, zahrnuje do výpočtu např. vliv aktuální hustoty davu na rychlost evakuovaných osob), a <b>celou řadu návrhových scénářů.</b></li> <li>• <b>Výstupem je celá škála možných výsledků a jejich interpretace</b> právě dle zvoleného výpočetního režimu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Zjednodušení zavádí výsledek jako hodnotu jednoho obecného scénáře</b> (s velmi omezeným počtem proměnných) → výsledek jako jedna hodnota je nedostačným popisem složitého procesu evakuace osob u specifických staveb a zajištění maximální bezpečnosti posuzované stavby (reálně mnohem více proměnných popisující vývoj evakuace v jejím průběhu). → Není hodnocen průběh procesu evakuace osob, ale pouze jeho výsledek</li> </ul>

### Celkové vyhodnocení vlivu parametrů na evakuaci konkrétních typů specifických staveb

Pro zhodnocení vlivu zkoumaných parametrů na evakuační proces u specifických staveb byly vybrány základní čtyři typové skupiny staveb, které jsou přiblíženy níže:

- **Stadion** – stavba s provozním charakterem stadionu/multifunkční haly s vysokým počtem osob, s typickou kaskádovitou členitostí, bývá výškově velmi členitá a je zde často uvažována evakuace masivními schodištvými tubusy (ze shora dolů), primární rozmístění osob je v prostorách tribun (v hledišti), je uvažována evakuace osob po tribunách (převážně směrem vzhůru), procentuální zastoupení osob s hendikepem je spíše nízké (určitý počet bezbariérových míst s konkrétním rozmístěním a návazností na ÚC, osoby jsou doprovázeny vlastním doprovodem).
- **LDN** – stavba charakteru lékařské zařízení (LDN, nemocnice, dům s pečovatelskou službou, ústav apod.) s vysokým procentuální zastoupení osob s hendikepem, osoby vyžadují asistenci (velmi často jsou pohybově nesamostatné), široké komunikační koridory pro pohyb osob na lůžkách (na nosítkách), rozmístění osob je na jednotlivých pokojích, pro evakuaci jsou často využívány evakuační výtahy či je uvažována evakuace za protipožární předěl, evakuace je z velké části asistovaná jak ze strany personálu, tak i složek HZS.
- **Tunel** – primárně se jedná stavbu dopravního charakteru (tunel vlakový, tunel metra), jedná se o stavbu tubusového tvaru s omezenými podmínkami evakuace, nízká výška profilu stavby s vysokým rizikem rychlého zakouření, specifický způsob šíření produktů hoření (komínový efekt či kumulace kouřové vrstvy), evakuace z dopravního prostředku, omezené podmínky ÚC (jedná se o velmi úzké nouzové koridory a únikové lávky/chodníky, v některých případech nelze užít prostor kolejiště), zcela neznámé prostředí, výskyt osob s hendikepem je zde minimální primárně za doprovodu asistence (při absenci asistuje personál – řidič).
- **Ostatní** – jedná se o typizovanou specifickou stavbu – budovu běžného veřejného charakteru (kancelářská budova, obchodní centrum apod.), stavba obvyklá dispozicí dle konkrétního provozu, známé ÚC doplněnými zpravidla o další nouzové, velký počet osob, procentuální zastoupení osob s hendikepem se odvíjí od celkového zastoupení v populaci (veřejná budova), osoby s hendikepem se vyskytují jak s doprovodem tak



i bez, budovy jsou zařízeny různým provozním vybavením a nábytkem podél (na středu) komunikačních prostor.

Pro hodnocení vlivu/dopadu jednotlivých parametrů byla sestavena hodnotící škála 1–4. 1 = hodnocený parametr má slabý či velmi slabý vliv na evakuační proces, 2 = hodnocený parametr má spíše slabý vliv na evakuační proces, 3 = hodnocený parametr má spíše silný vliv na evakuační proces a 4 = hodnocený parametr má silný vliv na evakuační proces (přehledně viz tab. 5.11).

**Tab. 5.11:** Škála hodnocení vlivu parametrů na evakuační proces (zdroj: vlastní)

Vliv parametru na evakuaci			
1	2	3	4
Slabý	Spíše slabý	Spíše silný	Silný

Následně v tab. 5.12 pro každý parametr byla přiřazena hodnota vyjadřující sílu vlivu (dopadu) na proces evakuace osob z konkrétního typu budovy.

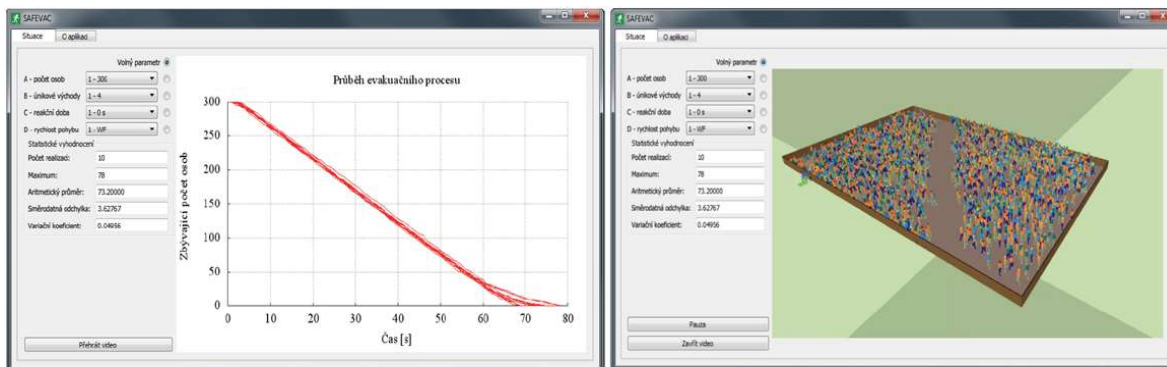
**Tab. 5.12:** Škála hodnocení vlivu parametrů na evakuační proces (zdroj: vlastní)

Parametr	Typ stavby			
	Stadion	LDN	Tunel	Ostatní
vliv davových jevů	4	2	4	3
vliv redistribuce osob	3	4	4	3
vliv kapacity	4	3	3	3
vliv složení davu	3	4	3	3
vliv voleného scénáře	4	4	4	4
vliv potřeby asistence	2	4	2	1
vliv aproximace geometrie	4	3	4	4
vliv aproximace detailů geometrie	4	2	3	3
vliv počtu ÚC	4	4	4	4
vliv reakční doby	2	2	3	2
vliv rychlosti osob	3	3	3	4
vliv formy vstupních dat	4	4	4	4
vliv protipožárních opatření	3	4	4	3
vliv obsazenosti	3	4	4	3

Dle uvedených hodnot v tab. 5.12 je zřejmé, že jednotlivé parametry mají značně odlišný vliv při posuzování evakuace u různých typů staveb, což nás utvrzuje v doporučení, že je nutné ke každé specifické stavbě při posouzení přistupovat zcela individuálně, s důrazem na zohlednění co největšího množství charakteristik posuzované stavby, jejího provozu a obsazenosti osobami.

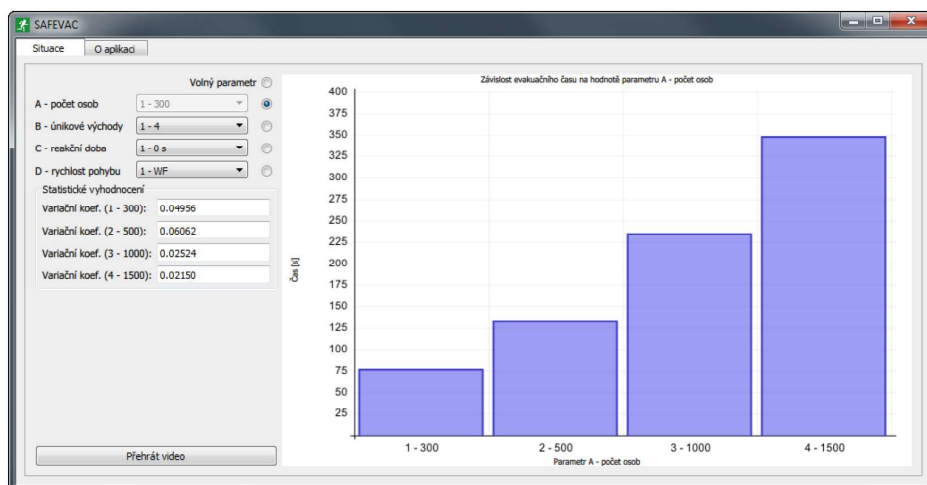
### 5.2.3 Analýza výsledků simulovaných studií

Jako příklad funkčního, uživatelsky přívětivého nástroje i pro dodatečnou parametrickou a citlivostní analýzu výsledků simulací modelu evakuačního procesu, byla vyvinuta v rámci projektu *VG20132015120* aplikace SAFEVAC. Slouží především pro ověření základních vlastností modelu a vlivu jeho klíčových parametrů (např. viz obr. 5.52) na celkový průběh evakuace.



**Obr. 5.52:** Aplikace SAFEVAC – analýzou dat – 10 opakování pro zadanou kombinaci parametrů – výsledný graf průběhu evakuace (vlevo), vizualizace simulace na videu (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s projektem VG20132015120 [30])

Vstupní data pro analýzu mohou být poskytnuta libovolným mikroskopickým modelem pohybu osob, ale musí být dodržena předepsaná datová struktura a názvosloví. Následně aplikace může být využívána i pro rychlou analýzu dopadů změn uspořádání a obsazenosti sledovaného prostoru na celkový evakuační proces (např. změna dostupnosti ÚC, počet osob, věkové složení apod.), např. viz obr. 5.53.



**Obr. 5.53:** Ukázka citlivostní analýzy pro parametr počet osob – graf znázorňující závislost evakuačního času na parametru počtu osob (zdroj: vlastní, ve spolupráci s VG20132015120 [30])

Podobné aplikace lze navíc rozšířit i o možnost zadání maximálního času ASET, vyhodnocení RSET doplněné o výpočet předpokládaného počtu osob zasažených zplodinami či vysokou teplotou. Při citlivostní analýze výsledků uvedené na obr. 5.54, je aplikace pro uživatele doplněna o možnost zadání vlastní hodnoty parametrů, na základě níž je vypočtena předpokládaná hodnota evakuačního času, které lze doplnit ještě o statistické parametry, jak tomu bylo např. v práci [20]).

Uvedené aplikace mohou být ukázkou, jak zpřístupnit data z citlivostních a parametrických studií pro práci běžných uživatelů (bez nutnosti vlastnit nebo ovládat numerický model), při zachování možnosti zkusit si jednotlivé kombinace parametrů a jejich vliv na průběh evakuačního procesu v reálném čase.

## Evakuační čas AIU



**Obr. 5.54:** Ukázka možnosti zpracování výsledků citlivostních analýz evakuace osob z posuzované budovy ve formě uživatelsky nastavitelné aplikace (zdroj: ve spolupráci s projektem *TL02000103*)

## 5.3 Optimalizace návrhu

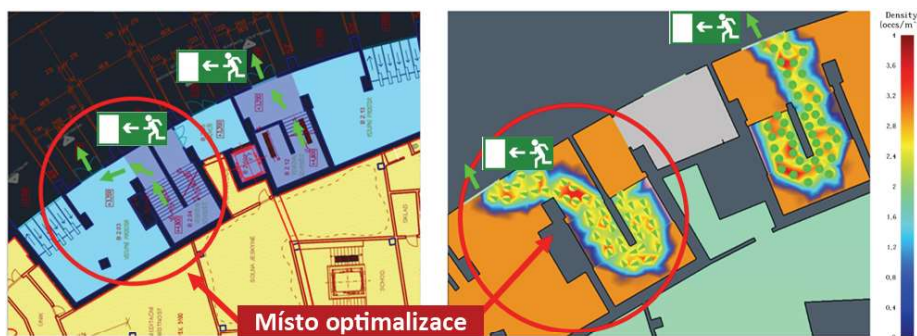
Cílem optimalizace návrhu stavby je efektivní ověření a případné úpravy stávající/nově vznikající projektové dokumentace tak, aby došlo k účinnému odstranění chyb návrhu za účelem zlepšení jeho funkčnosti, bezpečnosti a plynulosti provozu. Proces optimalizace pomocí agentního modelu je prováděn s důrazem na zachování co největší míry individuality a myšlenky autora návrhu (architekta, projektanta, investora).

### 5.3.1 Studie optimalizace geometrie

Názorným příkladem může být studie optimalizace návrhu a analýza bezpečnosti, která byla provedena na projektu stadionu, blíže viz kap. 3.3 a [19], kde bylo řešeno podrobné posouzení navrhované projektové dokumentace, při níž docházelo k opakovanému vytipování chybně řešených míst (např. odstranění překážek snižující komfort pohybu, změna členitosti dispozice, usměrnění návrhu dveří – jejich šířek a směru otvírání atd.), jejich optimalizaci a následnému přeprojektování v kooperaci s tvůrci projektu. Vybrané příklady konkrétních chybně řešených míst prvotního návrhu stadionu jsou blíže představeny v následujících studiích [19].

#### Umístění exitů mimo osu úniku

V rámci původního návrhu byly v několika místech navrženy koncové východy (exity) na volné prostranství, navazující na hlavní, komunikační, schodiškové tubusy mimo osu přirozeného úniku – blíže viz obr. 5.55.

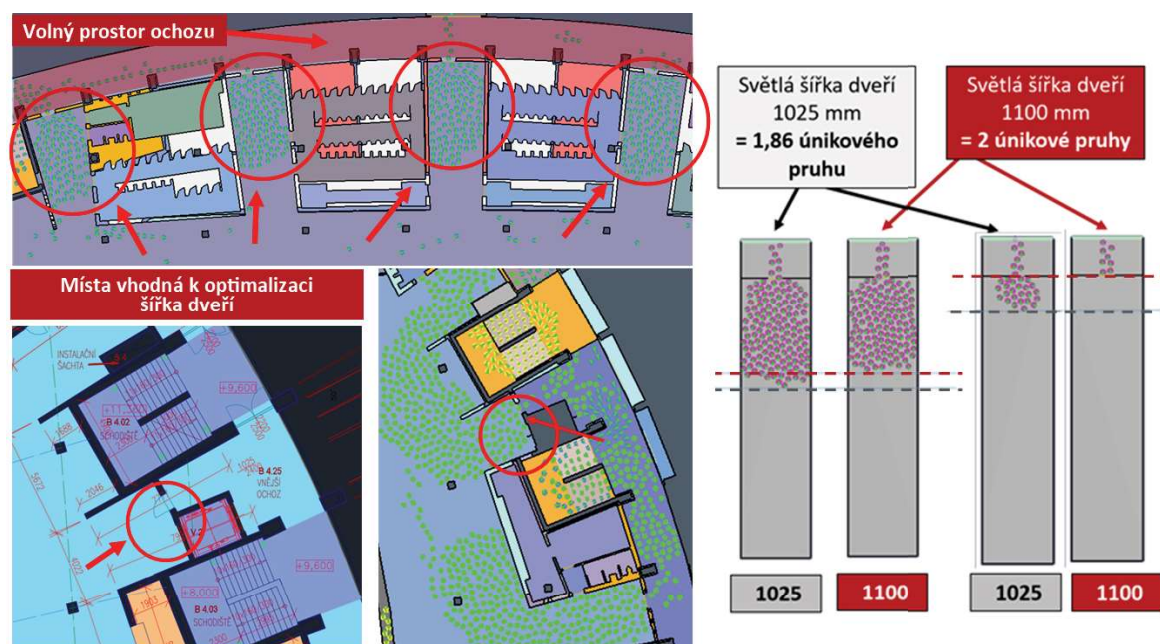


Obr. 5.55: Příklad optimalizace exitu, umístěného mimo osu úniku – geometrie prvotního návrhu dle PD (vlevo) a výsledné hustoty při proudění osob tímto prostorem (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno)

→ Vhodným optimalizovaným řešením je umístění dvoukřídlých dveří v ose výstupní čáry, jak je správně navrženo u zakončení vedlejšího schodiště (obr. 5.55). Díky navrhované úpravě dochází k zpřehlednění komunikačního koridoru, čímž se eliminuje pravděpodobnost vzniku kolizí a snižuje se čas, po který osoby v těchto prostorách setrvají.

### Šířka dveří

V původním návrhu stadionu byly na komunikačních koridorech umístěny jednokřídlé dveře šířek 800 mm (1,45 ÚP) nebo 1 025 mm (1,86 ÚP), které jsou svojí kapacitou na první pohled dle obr. 5.56 nedostatečné. Rozmístění dveří v rámci komunikačních koridorů vychází striktně z architektonické studie a jejího rytmu stavby. V těchto místech dochází ke kumulaci lidí a vzniku masivních kongescí u samostatných vstupů na ochoz i přes to, že prostory venkovního ochozu jsou volné.

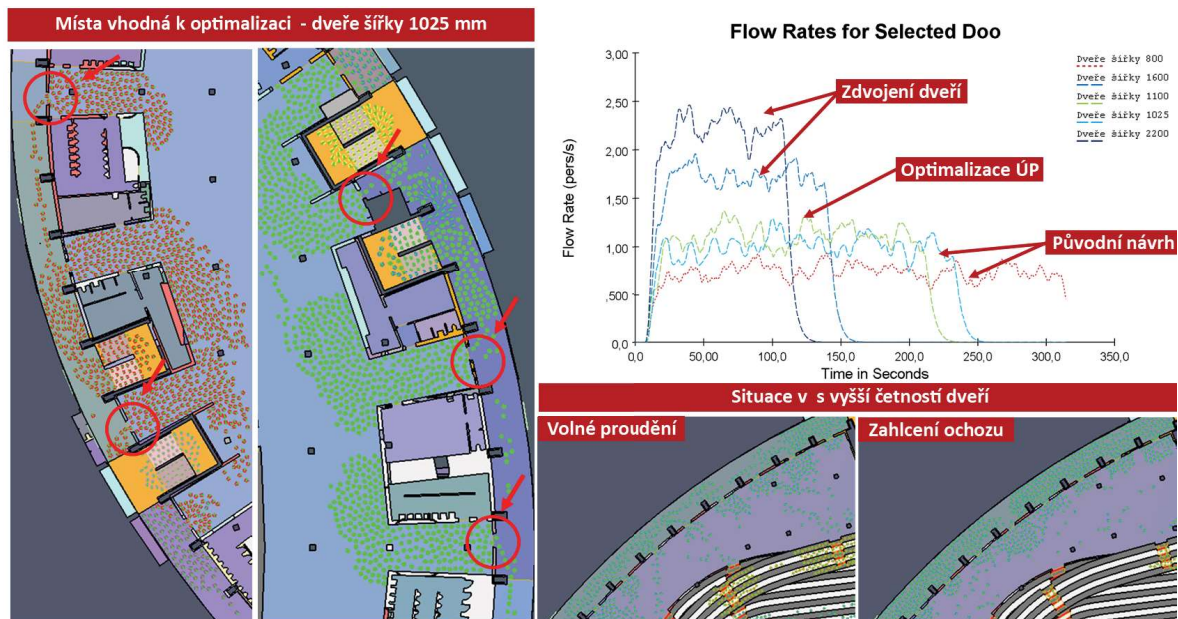


Obr. 5.56: Příklad míst vhodných pro optimalizaci a schéma srovnání vyklizení místnosti dveřmi šířky 1 025 mm a 1 100 mm (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno).

→ Vhodným optimalizovaným řešením je v obou případech, jak u dveří šířky 1 025 mm, tak i u 800 mm, tyto dveře nahradit širšími – min. šířka 1 100 mm (2 ÚP). Součástí optimalizace bylo vytipování míst, kde by bylo vhodné tyto dveře zdvojit – dvoje jednokřídlé dveře šířky 1 100 vedle sebe nebo jedny dvoukřídlé šířky 1 600 mm/2 200 mm) tak, aby došlo k zvýšení propustnosti ÚC (viz obr. 5.57).



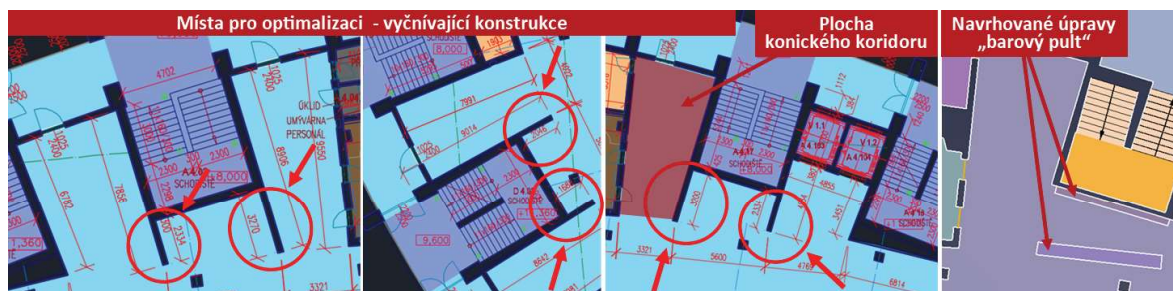
V některých místech na základě analýzy bylo doporučeno upřednostnit umístění dvoukřídlých dveří (než dvou jednokřídlých dveří) před architektonickým rytmem stavby (např. dveře ústící na ochoz a dále na evakuační lávku – viz kap. 5.4).



**Obr. 5.57:** Ukázka míst vhodných k optimalizaci – dveře šířky 1 025 mm (= 1,86 ÚP) s nedostatečnou kapacitou (vlevo), graf znázorňující průtok vybranými šířkami dveří (vpravo), (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno)

### Konstrukce stavby v prostoru

V rámci prvotního návrhu interiéru budovy byly navrženy stavební konstrukce čnicí do volného prostoru rozptylové plochy s cílem zachování linie elipsy po obvodu celého podlaží stadionu. Díky vyčnívajícím konstrukcím viz obr. 5.58 dochází ke zúžení prostoru před dveřmi ústícími na ochoz – tvar kónického koridoru. Vyčnívající konstrukce zabraňují proudění osob z jedné fronty do druhé, v důsledku toho zde dochází ke kongescím a osoby jsou tlačeny okolním davem do „slepého místa výklenku“.

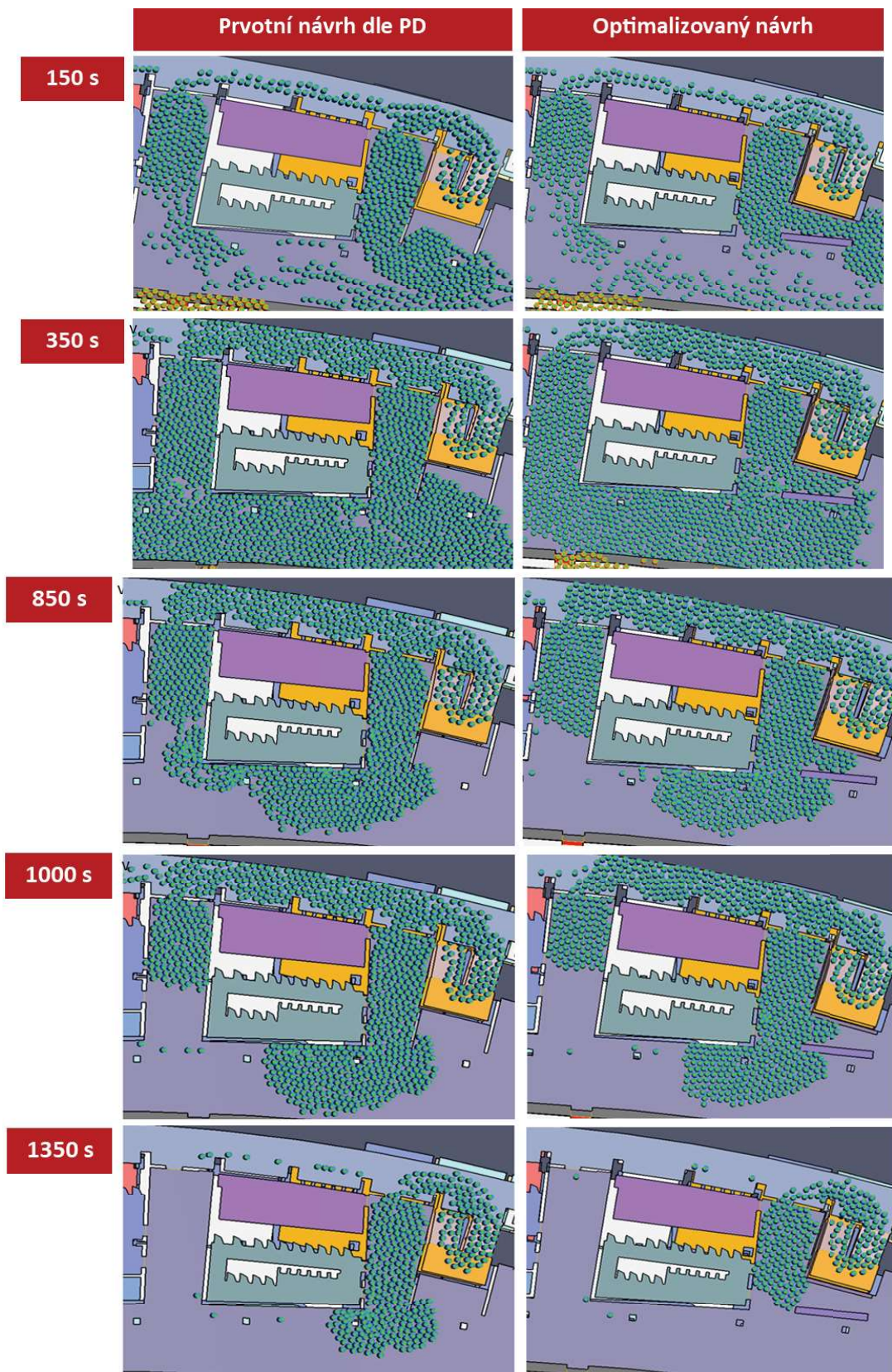


**Obr. 5.58:** Příklady míst pro optimalizaci s do prostoru vyčnívajícími konstrukcemi, tvořícími kónický koridor (vlevo) a navrhovaného řešení v rámci optimalizace (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno)

Návrh koridoru kónického tvaru, vyznačený na obr. 5.58, není pro evakuaci příliš vhodný z hlediska orientace osob (osoby na začátku koridoru mají užší zorný úhel) a možnému zvyšování tlaku v davu (osoby vstupují do prostoru užším místem, a vytváří tak tlak směrem k jednokřídlým dveřím s nedostatečnou kapacitou – osoby v předních řadách jsou tlačeny proti stěně bez možnosti změny směru).

→ Konstrukce čnicí do volného prostoru jsou po diskuzi s architekty nahrazeny „barovými pulty“ se zachováním myšlenky linie elipsy. Srovnání posouzení tohoto alternativního uspořádání s původním návrhem je vidět na obr. 5.59.





**Obr. 5.59:** Časoběrné srovnání proudícího davu konickým koridorem přes čnicí konstrukce dle prvotního návrhu (vlevo) a dle optimalizovaného alternativního návrhu s „barovými pulty“ (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno)



### Výsledné zhodnocení optimalizace stadionu

Výslednou optimalizací projektové dokumentace návrhu došlo k eliminaci míst snižujících plynulost provozu a celkově k značnému zvýšení propustnosti koridorů. Pro původní návrh s plnou obsazeností 30 tis. osob byla střední hodnota celkového času vyklizení 2 501 s (se směrodatnou odchylkou 11 s). Při simulaci optimalizované varianty geometrie se stejnou obsazeností bylo dosaženo výrazného snížení celkového času vyklizení – střední hodnota 2 063 s (se směrodatnou odchylkou 13 s). Po zanesení všech změn do projektové dokumentace byl celý návrh budovy znovu ověřen a dle výsledků došlo ke snížení celkové doby vyklizení stadionu přibližně o 20 %, viz obr. 5.60.



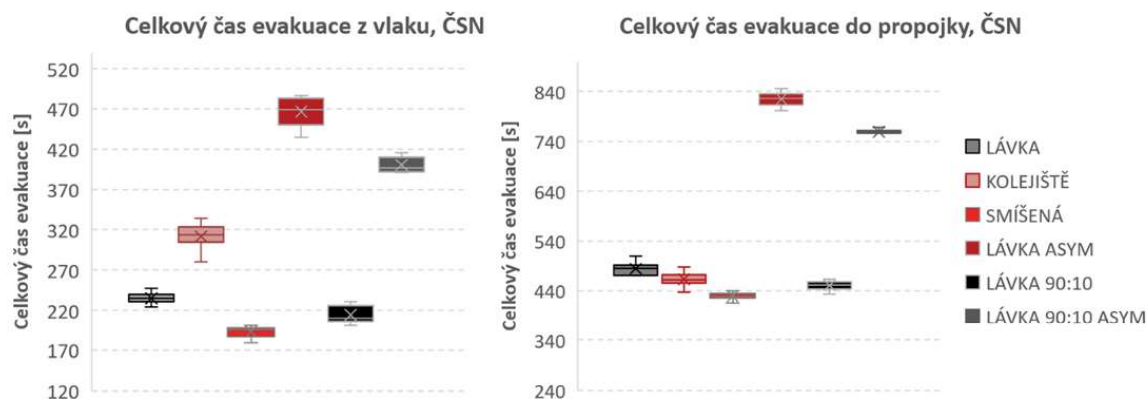
**Obr. 5.60:** Výsledné srovnání celkového času vyklizení původního návrhu bez aplikace změn (doba vyklizení 2 501 s) a optimalizované geometrie se zanesenými změnami (doba vyklizení 2 063 s) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19])

Jedním z nejzásadnějších zjištěných pochybení návrhu takto specifické stavby bylo nulové zanesení krizového managementu a plán organizace provozu proškoleným personálem. V rámci optimalizace návrhu došlo k architektonickým úpravám (např. reorganizace prostoru, nasměrování východů, sjednocení kapacity schodišť, zlepšení provozní návaznosti, koordinace interiérových dveří a jejich směru otevírání, optimalizace tvaru komunikací v hledišti, odstranění/přesunutí vybavení budovy jako potenciálních překážek apod.), ale také provozních opatření, jako je striktní přidělení určitých schodišťových tubusů pro konkrétní sekce na podlaží a řízení provozu personálem.

### 5.3.2 Studie výběru variantního řešení

#### Způsobu evakuace

Dalším příkladem ověření užití agentního modelu jako funkčního nástroje pro optimalizaci návrhu s ohledem na budoucí provoz a bezpečnostní opatření lze uvést studii výběru způsobu evakuace z metra v tunelu, který byl modelován v sedmi variantách evakuace (lávka, kolejiště, smíšená, lávka ASYM, kolejiště ASYM, lávka 90:10 a lávka 90:10 ASYM), blíže viz [24]. Jelikož v rámci návrhu tunelu byla nově uvažována variantní řešení, která v ČR nebyla ještě nikdy aplikována (např. vlaková souprava s otevíranými portálovými dveřmi v čele a evakuací do kolejiště, instalace evakuační lávky v úrovni podlahy vozu), vyvstal zde i požadavek ze strany GŘ HZS na jejich ověření. Na základě výsledků uvedených na obr. 5.61 této studie byl sestaven finální návrh uspořádání a vybavení geometrie tunelového tubusu nové trasy metra [391, 24].

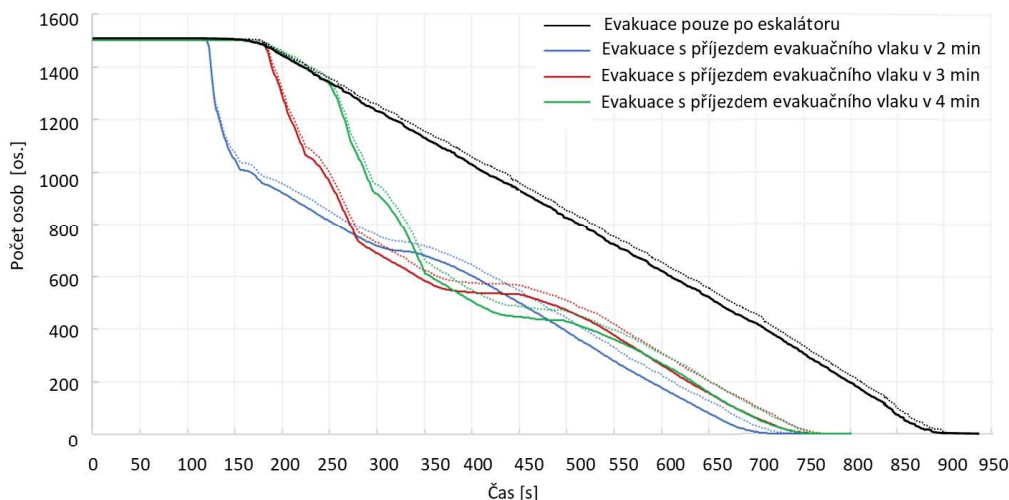


**Obr. 5.61:** Vyhodnocení celkového evakuačního času pro vybrané varianty – z vlaku (vlevo), z prostor tunelu až do propojky (vpravo), jako podklad pro optimalizaci provozu a tvaru tunelového profilu (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno)

→ Výsledky simulace lze užít i jako podklad při výběru (či k výběrovému řízení) – např. dopravního prostředku (vlaková souprava s jednotlivými neprůchozími vozy/vlaková souprava průchozí, příčné/podélné uspořádání sedadel, boční dveře/portálové dveře v čele), a zajistit tak širší návaznost na návrh a jeho efektivitu řešení. Tento model lze také použít k následnému ověření a optimalizaci samotného vnitřního uspořádání konkrétní vlakové soupravy (rozmístění sedadel, rozptylových ploch a vstupních/výstupních dveří) přímo s jejím výrobcem.

### Typu evakuace

Jak již bylo zmiňováno, pomocí numerického modelu je možné ověřit celou řadu scénářů – blíže viz kap. 5.1.1. Díky tomu lze i optimalizovat samotný proces evakuace a ověřit funkčnost krizového plánu – podobně jak tomu je u studie [136], kde byly porovnány různé varianty typů evakuace – např. samovolná pomocí ÚC a řízená s příjezdem pomocné evakuační vlakové soupravy na druhou kolej.



**Obr. 5.62:** Vyhodnocení řízené evakuace stanice metra s příjezdem vlaku ve srovnání s evakuací klasickou po eskalátoru (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [136])

Na obr. 5.62 jsou výsledky závislosti počtu osob na době evakuace – studie pro srovnání vybraných evakuačních scénářů – evakuace osob s využitím pouze ÚC (eskalátorů) a evakuace s příjezdem pomocného evakuačního vlaku v 2 min, 3 min a 4 min od započetí evakuace. Využití pomocné evakuační soupravy v 2 min zkracuje celkovou dobu evakuace oproti scénáři uvažující evakuaci osob pouze po eskalátorech cca o 206 s. U pozdějšího využití pomocné soupravy tento rozdíl klesá (pro varianty 3 a 4 min je rozdíl už jen cca 158 s). Pro tento

příklad vliv času příjezdu pomocné soupravy po uplynutí 3 min není pro celkový výsledek rozhodující, jelikož účinnost pozdějšího příjezdu je značně podobná. Zároveň lze konstatovat, že čím později je využito pomocné soupravy, tím dochází více ke snížení efektivity tohoto záměru krizového řízení, jelikož osoby směřující po ÚC k východům mají již vybranou cestu a jsou součástí masivní kongesce pod eskalátorem. Pro zvýšení efektivity tohoto záměru je nutné řídit evakuaci pomocí akustické informace.

→ **Celkové vyhodnocení optimalizace**

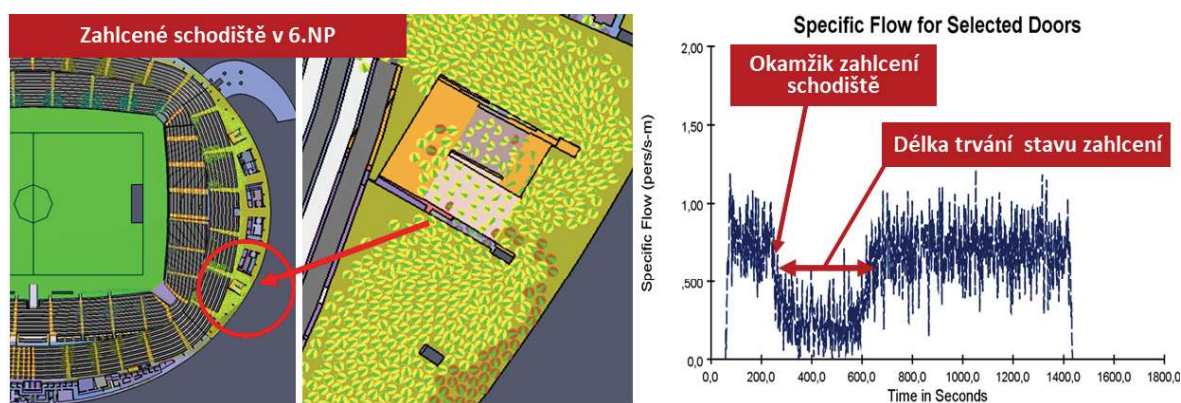
Numerický model evakuace je vhodné a nejefektivnější aplikovat již na počátku návrhu, ve fázi studie s cílem vytvoření optimalizovaného, bezpečného a funkčního konceptu provozu zamýšlené stavby. Projektant či architekt získává díky výstupům modelu základní představu/schéma, jak se osoby budou v budově pohybovat za běžného provozu či mimořádné události, a díky tomu může navrhnout přirozené členění prostoru a návaznosti koridorů vycházející přímo z dynamiky davu. Dále lze tyto nástroje také využít i k výběru nejlepšího variantního řešení návrhu – geometrie, provozního řešení, způsobu organizace, volby typu dopravního prostředku apod.

## 5.4 Identifikace kritických míst

Cílem kvalitní bezpečnostní analýzy je zvýšení bezpečnosti osob při evakuaci a její celkového zefektivnění na základě identifikace kritických míst, jejich analýzou a následným odstraněním z návrhu, což není běžnou součástí normového posouzení. Příkladem jsou uvedena vybraná kritická místa z realizovaných bezpečnostních analýz konkrétních staveb, uvedených viz kap. 3.3, u kterých bylo provedeno podrobné posouzení evakuačního procesu z hlediska kritických míst a úzkých hrdel. Na základě výsledků analýz byla pro tato místa navržena nová účinnější řešení, sestavena další doporučení pro úpravu kritických míst a ověřeny aplikované změny dle požadavků HZS. Pro lepší představu jsou níže uvedeny vybrané příklady kritických míst, jejich vliv na evakuaci a následné návrhy na jejich eliminaci či úplné odstranění.

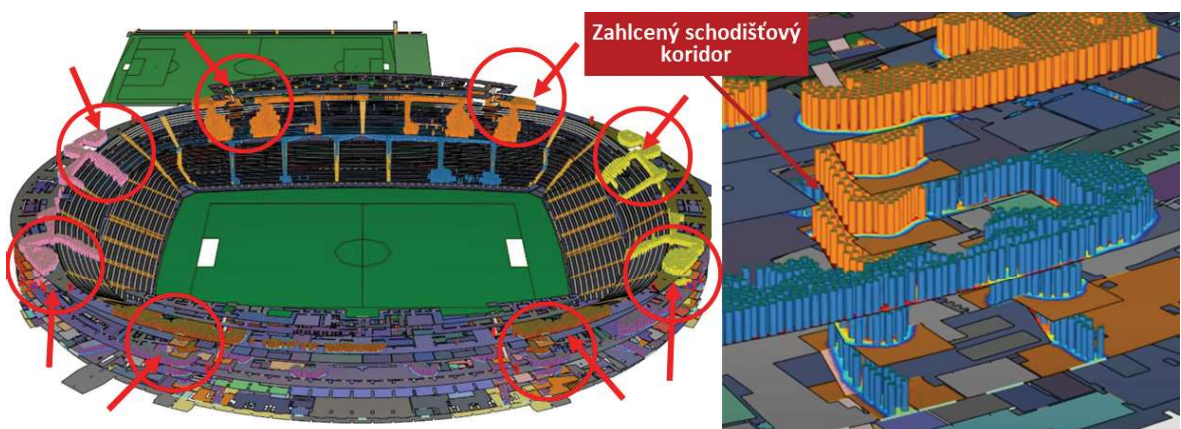
### Zahlčení schodišťových koridorů

Potencionálně nebezpečnými kritickými místy u specifických staveb s vysokou obsazeností jsou schodišťové tubusy a vliv otevřených dveří u těchto průběžných schodišťových koridorů při evakuaci, kde osoby ze všech podlaží mají stejnou (konečnou) ÚC, dochází tak k zahlčení schodišťových koridorů, což způsobuje dočasné odříznutí osob z vyšších podlaží (zastavení proudění), viz obr. 5.63 a 5.64.



Obr. 5.63: Příklad zahlčeného schodiště stadionu v 6. NP a vývoj specifického průtoku v čase na tomto schodišti (zdroj: vlastní, přepracováno, ve spolupráci s [19])

Jde o potenciálně značně rizikovou situaci, kdy je v tomto místě generováno velké časové zdržení, vytvoření situace se vzrůstajícím stresem návštěvníků i možnost zvýšené agrese fanoušků pod vlivem alkoholu.



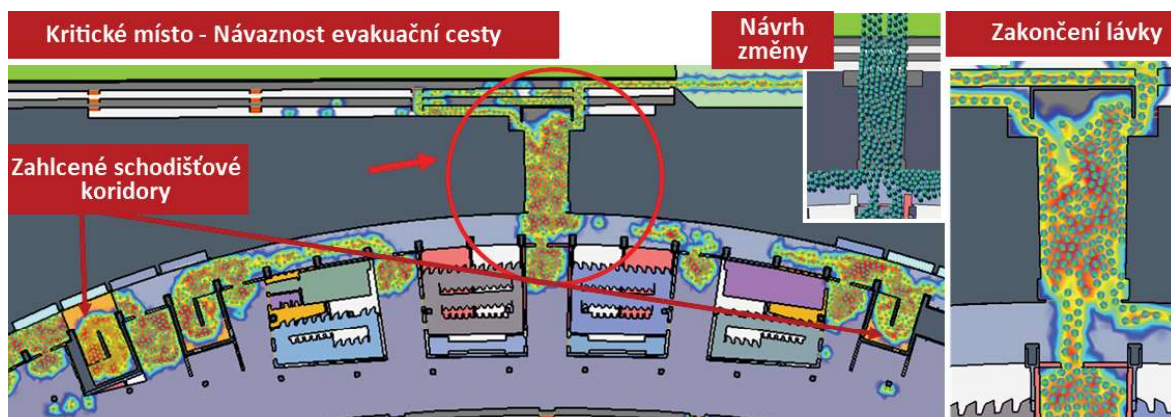
Obr. 5.64: Situace na schodišťových koridorech v čase 5 min (300 s) – vyznačená místa schodišť (vlevo) a ukázka zahlčeného schodiště, kde v 4. NP modrými diváky dochází k odříznutí oranžových ve vyšších podlažích (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19], přepracováno)



→ Pro tyto specifické stavby je nutné vypracovávat manuály pro řízenou evakuaci (k oddělení schodišťových tubusů a proudů osob), tak aby nedocházelo k mísení diváků, v tomto případě ze 4. NP a 6. NP. Manuál bude sloužit jako podklad bezpečnostnímu manažerovi objektu a spolupracujícím složkám IZS.

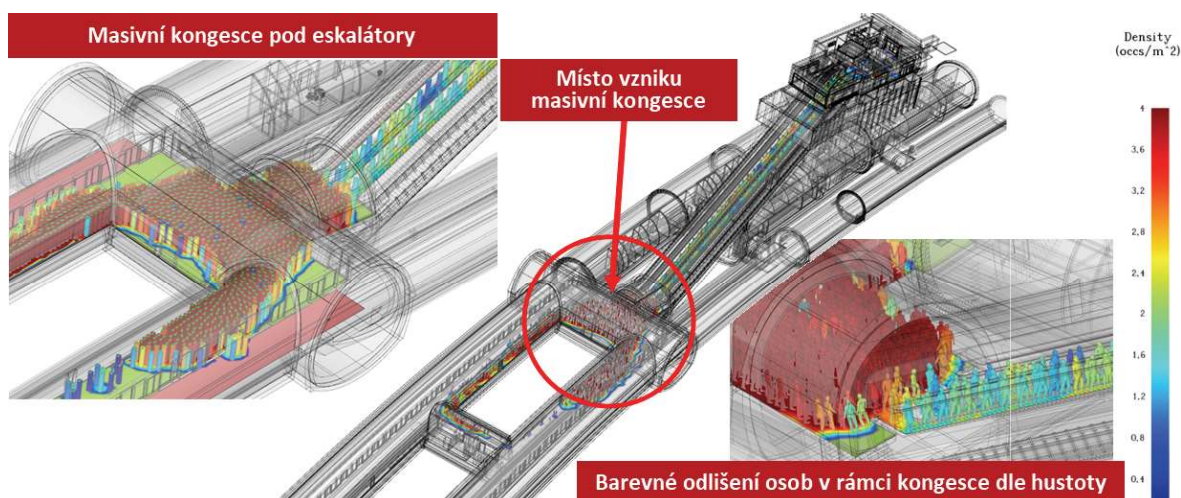
### Návaznost evakuačních cest

Příkladem dalšího kritického místa může být řešení návaznosti evakuační lávky ze stadionu a její zakončení ústící na „bezpečnou plochu“, které je v posuzovaném případě příliš geometricky komplikované, díky čemuž zde dochází kolizím. Kapacita posuzované lávky ze 7,27 ÚP přechází do dvou schodišťových koridorů o 2,18 ÚP (pokles kapacity o 4,36 ÚP) s evakuací přes tribuny, viz obr. 5.65. Kapacita a potenciál lávky je mnohonásobně větší, než jak jsou aktuálně využívány.



**Obr. 5.65:** Příklad kritického místa špatné návaznosti evakuačních cest – lávka (vlevo) a její aktuální zakončení s návrhem na změnu (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno)

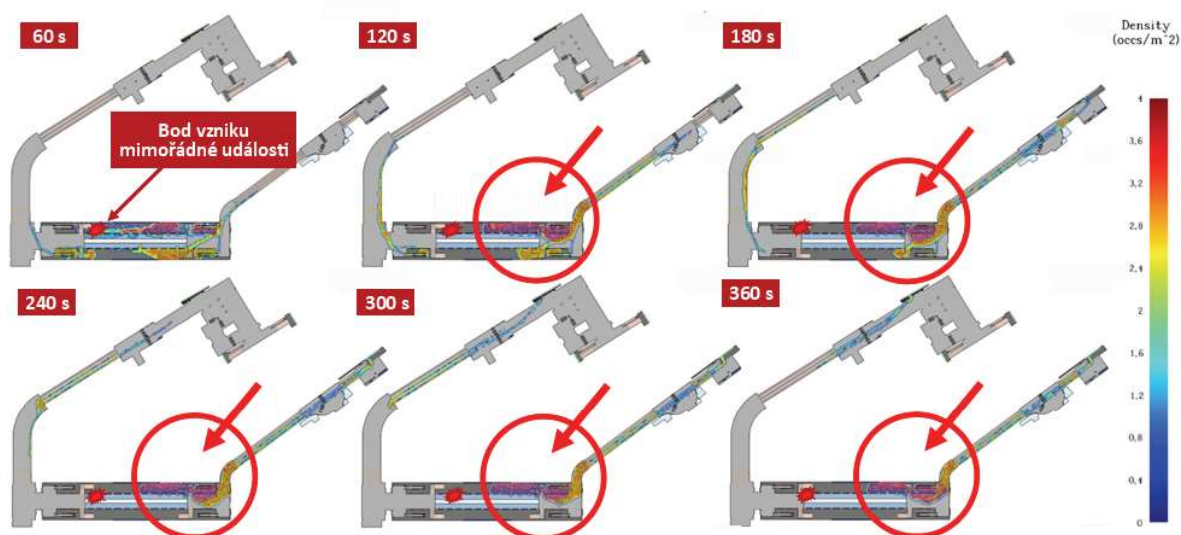
→ Vhodnějším řešením je například protažení lávky v ose, zakončené jedním širokým schodištěm až na plochu hřiště. Dále by bylo vhodné zvážit přesun umístění nebo přidání další lávky do míst mezi schodiště a stávající polohu lávky, aby došlo k odlehčení schodišťových tubusů. To je pro diváky neznámý prostor, díky čemuž tato ÚC obsáhne jen malou část osob. Studie P. Dickinson et al. [140] stanovila volbu trasy jako hlavní faktor přispívající k celkové době evakuace a ukázala, že ve většině případů (75 % případů) lidé volí k evakuaci známou cestu a převážně se jedná právě o cestu, kterou do budovy přišli. I z tohoto hlediska by se jako vhodnější varianta nabízelo umístění dvou evakuačních lávek přímo v návaznosti na přetížené schodišťové koridory.



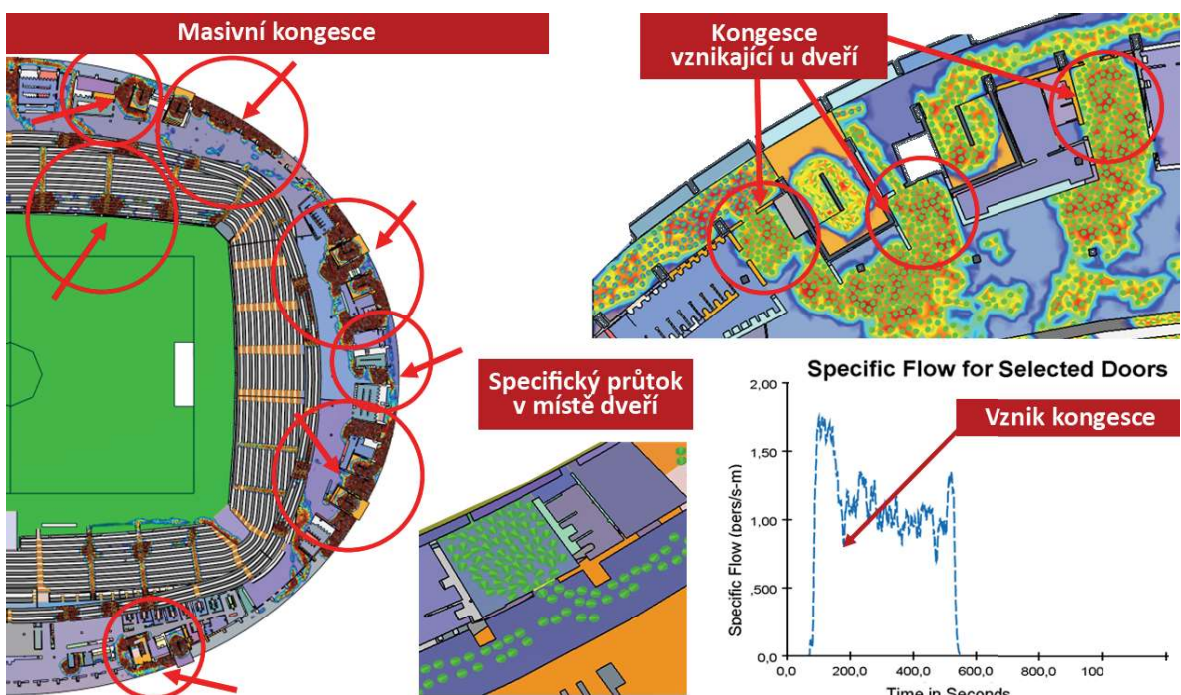
**Obr. 5.66:** Příklad vzniku masivní kongesce při procesu evakuace v místě pod eskalátorem ve stanici metra (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [23, 11] přepracováno)

### Vznik masivních kongescí

Dále se setkáváme s kritickými místy, kde při evakuačním procesu dochází k tvorbě dlouhotrvajících masivních kongescí. Tato místa bývají hodnocena jako pro osoby silně stresující – hustota osob a délka zdržení v těchto místech jsou považovány za sekundární nebezpečí s vysokým rizikem. Nejčastějšími chybami stojícími za vznikem masivních kongescí jsou nedostatečná kapacita ÚC, úzká hrdla (zúžení překážkou/konstrukcí, dveře apod.), poddimenzování rozptylových ploch a předsíní CHÚC atd., jak je názorně vidět na obr. 5.66, 5.67 a 5.68).



Obr. 5.67: Příklad časového vývoje vzniku masivní kongesce u převážně silně asymetrické varianty evakuace ve stanici metra (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11] přepracováno)



Obr. 5.68: Ukázka tvorby masivních kongescí na Zemském fotbalovém stadionu v místě dveří ústících na ochoz, snížení specifického průtoku dveří (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno)

Při analýze kritických míst je nutné věnovat zvýšenou pozornost kapacitě komunikačních koridorů a bezpečnosti, jelikož v dnešní době je nutné zohlednit i jiné možné hrozby mimo



PBŘ – např. z pohledu ochrany měkkého cíle, kdy by se místa se vznikajícími masivními kongescemi mohla stát jednoduchými cíli případného útoku, jak je vidět na obr. 5.67.

→ U kongescí lze docílit zmenšení pomocí změn v rámci projektové dokumentace – např. rozšířením ÚC (zejména v místech dveří – zvětšení, zdvojení), zvětšením předsíně CHÚC, přidáním nového evakuačního schodiště, zvýšením kapacit, nebo vytvořením plánu řízené evakuace. Díky procesům kontroly a zajištění stálé propustnosti evakuačních koridorů jsme schopni dosáhnout snížení počtu masivních kongescí, míst s dlouhým časovým zdržením a v konečném důsledku i snížení celkového evakuačního času.

### Zúžení evakuační cesty

Příkladem tohoto typu kritického místa může být vestibul u stanice metra, kde je navržen trychtýřový tvar schodiště, zakončený tupým rohem. Unikající osoby jsou nuceny jej obcházet, čímž dochází při úniku osob k vytvoření slepého únikového pruhu, který uvězní méně agilní jedince.



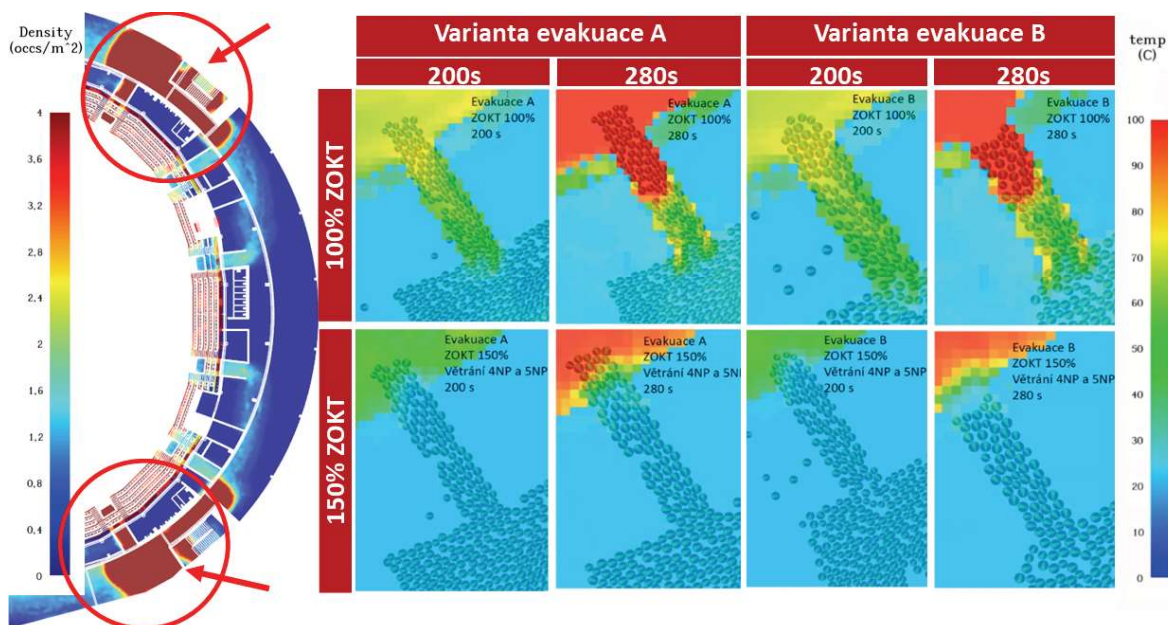
**Obr. 5.69:** Příklad kritického místa geometrie, kde kónický tvar ÚC způsobuje při úniku po schodišti odříznutí části evakuovaných osob masou okolních osob (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [403] přepracováno)

→ Kontrola tohoto typu kritických míst je analogií normového posouzení počtu ÚP na ÚC (je zohledněno v dle ČSN) v každém zúženém místě ÚC a nebo v místech souběhu proudů evakuovaných osob. V rámci návrhu i jeho posouzení je nutné vždy dodržet zásadu nesnižujícího se počtu ÚP a nezužujících se profilů koridoru ve směru úniku evakuujících se osob, čímž je eliminována možnost vzniku kritických davových jevů a nepříznivé samoorganizace.

### Místa ohrožená účinky požáru

Kritickým místem za vzniku mimořádné události (např. požáru) se může stát i místo potencionálně bezpečné. Na obr. 5.70 jsou uvedeny výsledky simulace požáru, konkrétně teplot v prostorách ÚC, provedené při návrhu MKSP Arény Brno [19, 10]. Jak je vidět, v ÚC navazující na schodišťový tubus vzniká masivní kongesce osob, která i přes 100 % účinnosti ZOKT je v 200 s ohrožena teplotními účinky požáru. Jak bylo uváděno v kap. 5.1.2, dlouhodobé (doba nad 10 min) vystavení osoby tepelným účinkům požáru může znemožnit její schopnost se evakuovat.

→ V tomto případě je možné zvýšit účinnost ZOKT na 150 % (jeho vliv je vidět na obr. 5.70), nebo zvětšit prostor předsíní CHÚC tak, aby bylo možné více lidí evakuovat do bezpečného prostoru. Komplexní posouzení evakuace, zahrnující posouzení vývoje vnitřních podmínek stavby, je velmi důležité jak pro evakuaci, tak i z hlediska zásahu IZS.



**Obr. 5.70:** Příklad kritických míst, kde mohou být osoby vystaveny účinkům požáru – při původním návrhu účinnosti ZOKT 100 % (nahore) a optimalizované účinnosti ZOKT pro 150 % – *MKSP Aréna Brno* (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19, 10] přepracováno)

#### → Celkové vyhodnocení identifikace kritických míst

Na základě analýzy výstupů z numerických modelů evakuace osob lze upravit části geometrie stavby, odstranit překážky a nevyhovující prvky návrh, případně navrhnout nová či upravit stávající funkční provozní schémata objektu apod. Díky identifikaci kritických míst jsme schopni zavčas zanést tyto změny do projektové dokumentace a aplikovat nová bezpečnostní opatření omezující vznik sekundárního nebezpečí při evakuaci. V rámci specifických staveb se setkáváme zejména s následujícími kritickými místy – nevhodným tvarem evakuačních cest, zužující se geometrií (konický tvar), tupými rohy, úzkými dveřmi na ÚC, umístěním koncových východů mimo osu směru úniku, špatnou návazností komunikačních koridorů, komplikovanou návazností ÚC, konstrukcemi vystupujícími do prostoru, špatně umístěným vybavením budovy (koš, nábytek, cedule apod.), místy s tvorbou masivních kongescí, nedostatečnou kapacitou předsíní CHÚC, nedostatečnou kapacitou evakuačních výtahů a bezpečných prostor, kde by se osoby mohly ukrýt před nebezpečím (účinky požáru) apod.

Opakovaným ověřováním staveb předcházíme vzniku možných kritických situací, které by mohly nastat nebo mohly přispět k negativním okolnostem (ověřované vstupní parametry/scénáře), čemuž se snažíme zcela předejít. Preventivně usilujeme i o eliminaci jejich rozsahu či případných dopadů. Identifikace kritických míst by měla být automaticky součástí výstupů každé kvalitní bezpečnostní analýzy evakuace osob s využitím NM. Jak již bylo zmiňováno v kap. 5.3, je možné u navrhovaných staveb pomocí bezpečnostní analýzy docílit snížení předpokládané doby evakuace až o 20 % [19].

## 5.5 Příklad validace simulačního experimentu

Praktickým příkladem statistické analýzy simulačního experimentu může být srovnání hodnot s laboratorním experimentem, konkrétně změření průměrného toku dveřmi vlaku, který se v našem případě pohybuje kolem hodnoty  $0,3 \text{ (os}\cdot\text{s)}\cdot\text{m}^{-1}$ . Příkladem může být zahraniční experiment K. Fridolf et al. [170], který se zaměřil na popis a potenciální dopady různých způsobů evakuace na průtok osob dveřmi vlaku při evakuaci do železničního tunelu. Pro experiment byl v laboratoři vytvořen model části vlaku odpovídající typické soupravě osobního vlaku používaného ve Stockholmu (vlak je svým uspořádáním i rozměrově velmi podobný typové soupravě užívané v našich modelech). Experiment byl také zaměřen na pozorování dalších aspektů, které by mohly ovlivnit tok, například interakce mezi lidmi a sociální faktor.

**Tab. 5.13:** Srovnání výsledků simulace studie evakuace z vozu metra s daty zahraničního experimentu (zdroj: vlastní z [391] a čerpáno z [170])

Model metra	Laboratorní experiment vlakového vozu
VUT V Brně (2016)	Lund University (2012)
Průtok ve dveřích vlaku	Průtok ve dveřích vlaku
0,499 os·s	0,5 os·s
0,383 os·(s·m) <sup>-1</sup>	0,3 os·(s·m) <sup>-1</sup>
Podmínky	Podmínky
Model simulovaný v nástroji Pathfinder	Laboratorní experiment v modelu části vlakové soupravy.
525 osob (genderové rozložení viz Tab. 3.)	84 figurantů (cca M – 60 %, Ž – 40 %)
16 variant scénářů	18 variant scénářů
Šířka východu 1,3 m (20 dveří na jedné straně)	Šířka východu 1,3 m
<b>Pozorované parametry</b> – průtoky lidí, hustoty osob, kongesce, rychlost vyklizení vagónu, přepad z lávky, celkový evakuační čas atd.	<b>Pozorované parametry</b> – účinky různých způsobů výstupu, aspekty ovlivňující tok, interakce mezi lidmi, průtoky lidí, hustota osob atd.

→ Finální srovnání výsledků simulace modelu s výsledky experimentu je uvedeno v tab. 5.13. Hodnoty získané z modelu vycházejí o něco málo příznivěji. Tato skutečnost je výsledkem užití vysoké evakuační lávky. Nižší hodnota průměrného průtoku kapacity dveří vlaku u experimentu je zapříčiněna nutností překonat výškový rozdíl mezi podlahou vozu a podlahou simulovaného tunelu (cca 1,4 m), a to konkrétními způsoby výsadku – vyskočení z vozu, sesunutí se, sednutí si na okraj a seskočení apod. dle zadání experimentu.



## Kapitola 6

# Přínosy práce pro praxi

### 6.1 Základní získané poznatky a jejich přínosy

Získané poznatky vycházejí z konkrétních analýz modelových studií a budov specifické povahy – zejména svým provozem, složitostí geometrie jejich prostoru (i drobných detailů, které se mohou jevit jako podružné, ale při evakuaci mohou působit jako významné překážky), obsazeností budov, počtu evakuačních východů a jejich přístupnosti, změnami provozu ve vazbě na nouzové situace a krizové řízení (organizace evakuovaných osob proškoleným personálem, změna směru pohybu eskalátoru apod.). Následně jsou uvedeny vybrané základní získané poznatky z výzkumné spolupráce a analýzy evakuačního procesu těchto objektů:

#### **Negativní vliv snížení dostupnosti běžných ÚC**

Simulované scénáře potvrzují, že u většiny uvažovaných mimořádných událostí je možné objekty evakuovat rychlostí, která se blíží evakuaci za standardních podmínek – tedy při dostupnosti všech evakuačních východů. Výrazný problém však nastává v situaci, kdy je osobám znemožněna evakuace v konkrétním směru. V tomto případě se doba evakuace, oproti evakuaci při standardní situaci, několikanásobně prodlužuje a rovněž dochází k vytváření kongescí masivního měřítka se zdržením v řádu desítek minut. V rámci kongescí vzniká vysoká hustota osob a s ní spojené vysoké riziko jejich úrazu nebo úmrtí, zejména v těchto extrémně stresujících situacích. Při omezení počtu evakuačních východů (např. z důvodu zatarasení schodišť, nepřístupnosti hlavního východu, znemožnění užití evakuačních východů v jednom/více směrech úniku) dochází k výraznému zhoršení kongescí, zvyšujícímu se stresu nebo dokonce k dočasnému či trvalému znemožnění evakuace.

#### **Negativní vliv krizových evakuačních scénářů**

Na základě simulovaných scénářů lze posoudit vliv celé řady evakuačních strategií, který se výrazně projevuje jak na délce trasy zvolené osobami (osoby jsou často nuceny absolvovat díky vlastnímu rozhodnutí či netrpělivosti delší trasy, což má vliv na celkovou únavu jedince), tak i na jeho celkovém časovém zdržení v objektu (s rostoucím časem, kdy je osoba nucena čekat ve frontě a kdy může dojít k ohrožení účinky požáru, lze očekávat nárůst stresu a pravděpodobnosti zkratového či jinak nebezpečného jednání).

Dle výsledků analýz je možné konstatovat, že při běžných evakuačních procesech s nízkou mírou paniky/stresu a s přístupnými evakuačním východy dochází pouze k lokální tvorbě kongescí, které jsou však časově omezené – v řádu od desítek sekund až po jednotky minut (s ohledem na typ provozu a stavby). Riziko vzniku stresových situací a s tím spojená rizika zranění či úmrtí osob jsou v těchto případech relativně nízká. Ve stavu nouzových situací lze komplikace předpokládat zejména v místech se sníženou kapacitou (před schodišti, dveřmi, eskalátory apod.), kde dochází ke vzniku masivních kongescí, které mohou blokovat i přístupové cesty pro HZS a IZS.



### **Negativní vliv průběžných schodišťových koridorů na evakuaci osob**

Dalším důležitým poznatkem je zjištění negativního vlivu otevřených průběžných schodišťových koridorů při evakuaci u budov s větším počtem podlaží a vysokou obsazeností (stadiony, administrativní budovy, nákupní centra atd.), kdy dochází k zahlcení schodišťových koridorů osobami z nižších podlaží a dočasnému zastavení proudění osob z vyšších podlaží do nižších (směrem k exitu). Jedná se o potenciálně vysoké riziko s nebezpečím velkého časového zdržení a vznikem stresující situace pro evakuované osoby. Tento fakt je nutné eliminovat nebo mu zcela předejít, např. návrhem oddělených schodišťových tubusů nebo oddělením pomocí organizace provozu.

### **Evakuace osob z hlediště**

V případě staveb, zahrnujících ve svých dispozicích hlediště, je cenným a simulací ověřeným poznatkem skutečnost, že řešení odchodu diváků z prostor hlediště po schodech nahoru je vhodnější, neboť předchází vzniku nebezpečných kongescí s rizikem zranění, odlišně od situací, kdy se dav pohybuje po tribuně směrem dolů. V rámci tribun nebo hlediště se ukázalo jako účinné navrhovat rozptylové plochy tak, aby nenavazovaly rovnou na evakuační schodiště (prostřednictvím odděleného koridoru nebo východu dochází k usměrnění tlaků v proudu osob).

### **Evakuace osob z dopravního prostředku v tunelových stavbách**

U simulací evakuace z dopravního prostředku v tunelových stavbách, zejména u vlaků a metra, kdy dochází k evakuaci do úzkých prostor mezi dopravní prostředek a stěnu tunelu, bylo potvrzeno, že evakuující se osoby z krajů soupravy jsou významně omezovány ostatními lidmi proudícími kolem vozu směrem k východu, a dochází tak ke značnému snížení efektivity vyklízení krajních vozů. Kritickými vozy se pak stávají většinou ty předposlední ve směru úniku, jejichž doba evakuace může být v porovnání s nejrychleji vyklízenými vozy až dvojnásobná. Simulace evakuací v důsledku požáru uvnitř dopravního prostředku identifikovaly jako problematický zejména prostor v bezprostředním okolí ohnisek a prostor uvnitř dopravního prostředku, hlavně u souprav s otevřenou dispozicí. Například v případě 30s prodlevy od vzniku požáru po zastavení a otevření soupravy se teploty a koncentrace CO v prostoru soupravy rychle zvýší, a snadno tak dochází k ochromení pomalejších a slabších jedinců. Jakmile se evakuovaní dostanou mimo dopravní prostředek, kde jsou koncentrace sledovaných veličin nízké, vzniká značná časová rezerva pro jejich evakuaci.

### **Pokles specifického toku na ÚC (vznik kongescí)**

U běžných staveb maximální hodnota specifického toku v místech koridorů, dveří, nebo jakýmkoliv zúžení např. překážkou, je cca 1,5 os./s·m (po rovině). Při složitém geometrickém proudění osob po trase či sloučení koridorů (např. v hledišti) dochází k poklesu specifického toku v důsledku srážek osob, zvyšující se hustotě v davu a následnému vzniku kongescí. Kapacita koridoru je naplněna až po maximální specifický tok. Většina kongescí a zdržení při evakuaci je způsobena těmito kongescemi. I z tohoto důvodu je při posuzování evakuace nutné provést detailní analýzu tvaru, návaznosti a identifikaci všech potenciálních kritických míst na ÚC.

## **6.2 Doporučení pro aplikaci v praxi**

Výsledná doporučení a poznatky práce přinášejí ověřené postupy aplikace numerických modelů v souladu s aktuální legislativou vycházející z řešených specifických staveb [32, 19, 15, 11, 20, 24, 23, 10] a uvedených parametrických a citlivostních studií. Při jejich sestavování byl brán zřetel jak na požadavky obsahové stránky PBŘ, předepsané ČSN 73 08XX, konkrétní požadavky a připomínky ze strany vykonávající SPD a IZS, tak i na postřehy ze strany samotných zpracovatelů z řad projektantů PBŘ i z celkového zhodnocení porovnávaných přístupů v Příloze F.

### 6.2.1 Doporučená aktualizace předpisů

Doporučení, plynoucí z této práce, mohou sloužit jako základ pro aktualizaci interních směrnic pro posuzování specifických staveb, které doplňují požární kodex ČSN 73 08XX, a zavést tak aktivně možnost celistvého přístupu posouzení s pomocí numerických modelů (metod požárního inženýrství) u specifických typů staveb. Poznatky mohou sloužit i jako podpůrný podklad uceleného přístupu posouzení specifických staveb pro aplikaci v praxi z pohledu PBŘ, obecné ochrany osob jako potencionálního měkkého cíle i pro zásah HZS a IZS.

#### Potřeba zohlednění aktuálního vývoje a nových poznatků

V rámci PBŘ a podkladů, kterým je podřízeno klasické posouzení (zejména požárnímu kodexu a ČSN 73 08XX), je nutné flexibilně reagovat a poskytnout nový vhled do PBŘ z hlediska vývoje materiálového řešení (lehčené materiály, hořlavé systémy, užití plastů a kompozitních materiálů, recyklovaných výrobků apod.), rostoucího věkového průměru (zvyšující se zastoupení lidí > 60 let a osob s pohybovým hendikepem), rostoucího počtu účastníků (s rostoucím počtem populace), ale i obezity (rostoucí procento obézních lidí a změna proporcí jejich postavy), vývoje a změny nových technologií, jak je uváděno i v *Koncepci požární prevence 2018–2021* [280]. Právě využití pokročilého modelování v oblasti PBŘ je jednou z účinných cest k zajištění spolehlivosti budov, která odráží aktuální situaci a pokrok ve stavebnictví, využívající možností současných materiálů a konstrukčních řešení.

Pro aktivní včlenění numerických modelů pro posuzování specifických staveb je nutné vytvoření nové podpůrné legislativy, případně i samostatné normy, obdobně jako je tomu aktuálně v rámci reakce na rozšiřování výroby elektromobilů, při které dochází k přípravě novelizace vyhl. 23/2008 Sb., úpravě ČSN 73 0804 (konkrétně zrušení Přílohy I) a vzniku nové samostatné ČSN pro PBŘ – Garáže.

#### Doporučení častější aktualizace legislativních změn

Oblast požární bezpečnosti staveb lze ve vztahu k jejich bezpečnému užívání označit za prioritní, proto by mělo docházet k pravidelné revizi/aktualizaci legislativních změn a bezpečnostních opatření PBŘ, která by nebyla prováděna jen v důsledku tragických událostí spojovaných se ztrátou lidských životů. S tímto přístupem se historicky opakovaně setkáváme při zavádění požadavků PBŘ i jiných bezpečnostních opatření zejména u specifických staveb a provozů – např. bezpečnostní opatření metra (ocelové eskalátory, dodatečné snížení hořlavosti vozů metra, odjistitelnost dveří apod.), důsledky útoků 11. září (protiteroristická opatření, nová provozní pravidla, nejen pro leteckou dopravu), „Vejprtská reforma“ (rekategorizace zařízení LZ, stanovení nových požadavků, 24hodinové připojení na pult centralizované ochrany), rozšíření elektromobility (vysoké požadavky na vybavení PBZ a zcela nová norma) atd. Odbor zjišťování příčin požáru (ZPP) pomocí analýz a zpětného vyhodnocování expertíz vytváří statistiky událostí, které vstupují následně do požární prevence právě ve formě úpravy předpisů, zaměřením kontrolních procesů, preventivní výchovné činnosti apod.

#### Doporučené specifické stavby vhodné pro posouzení numerickým modelem

Zavedení tohoto přístupu do inženýrské praxe se doporučuje pro posuzování specifických staveb nad 1000 os., u geometricky složitých budov, u výškově členitých staveb (velmi sporné hledisko pro zatřídění dle ČSN), u specifických provozů či u provozů, kde se objevují osoby se specifickými potřebami (zejména pohybovými, mentálními či jinými hendikepy), dále pak i u staveb silničních a železničních tunelů, u stanic a tunelů metra a staveb a provozů, kde se vyskytují vysoce hořlavé látky ve velkém množství. V návaznosti na nově vzniklou kategorizaci staveb z hlediska požární bezpečnosti a ochrany obyvatelstva zavedenou vyhl. č. 460/2021 Sb. [554] lze říci, že většina specifických staveb vhodných pro posouzení numerickými modely spadá do kategorie staveb III.

#### Doporučení pro obsah posudku dle odlišného přístupu

Při užití numerických metod k posouzení PBŘ je nutné zajistit správnost vybraného řešení a zpracovat PD PBŘ tak, aby byla kompletní, přehledná a snadno kontrolovatelná [135].

Užití odlišného přístupu musí být podrobně zdokumentováno, aby byla zajištěna možnost jeho zopakování. Je nutno podrobně popsat a objasnit, jaké metody byly zvoleny, jaké vstupní hodnoty byly podkladem, jaký byl postup a jakým způsobem byly vyhodnoceny finální výsledky. Návrh vzorové struktury PD (dat) posouzení numerickým modelem evakuace osob zpracovávaná projektantem PBR je uvedena v Příloze 6.3. Tento dokument může sloužit také jako check-list pro kontrolu náležitostí PD ze strany posuzovatele preventisty, který vydává stanovisko a rozhoduje o bezchybnosti zpracování. V případě pochybností si může posuzovatel od zpracovatele vyžádat doložení doplňujícího návrhového scénáře, výpočtu (V&V) nebo konkrétní citlivostní studie.

### **Posouzení evakuace ve vztahu k ochraně měkkých cílů**

Je nutné aktualizovat nastavení správného vnímání potřeby posouzení evakuace osob a jeho samotného rozsahu, jak v řadách projektantů PBR, tak i zástupců HZS. V dnešní době již není korektní nahlížet na posuzování evakuace pouze jako na proces spojený s ohrožením požárem, jak byla donedávna tato problematika v rámci PBR interpretována. Je nutné si uvědomit i rizika spojená s ochranou měkkých cílů a evakuací osob z pohledu dynamiky davu spjaté se sekundárními riziky – kritickými místy, vysokou hustotou a dlouhým časovým zdržením – spojenými s případy jiných typů ohrožení (útok útočnicka, únik toxické látky, výbuch, davová panika – případný pohyb davu a s ním spojené davové jevy apod.). I při posuzování měkkých cílů je nutné provedení detailní analýzy celé sady návrhových evakuačních scénářů.

Aplikace numerického modelu osob v procesu ochrany měkkých cílů je naplňována především ve fázi analýzy hrozeb a rizik. Vstupními údaji pro tuto fázi a aplikaci modelu je model útoku, který přímo definuje scénář napadení, a tedy okrajové podmínky modelu evakuace (např. úmyslné uzavření některé z únikových cest) [17]. V případě posouzení měkkých cílů vyvstává otázka, jestli by toto posouzení v rámci „Úseku prevence a civilní nouzové připravenosti“ mělo nadále spadat pod „Obor stavební prevence“ či by mělo být nově přesunuto do gesce „Oddělení ochrany obyvatelstva a krizového řízení“.

### **Potřeba zvýšení informovanosti odborné veřejnosti**

I přes fakt, že se nejedná o zcela úplně nový způsob projektování (posuzování), je v současné době největším úskalím stále malá informovanost, jak ze strany samotných zpracovatelů, tak i ze strany posuzovatelů. Celkově je třeba zvýšit informovanost a povědomí o těchto metodách mezi odbornou veřejnost, vytvořit jednotné a dobře dostupné úložiště informačních zdrojů, zajistit aktivní edukaci preventistů HZS a zvýšit jejich úroveň technického vybavení (minimálně pro spádová oddělení stavební prevence). Aktuálně se setkáváme se situací, kdy se samotní preventisté (posuzovatelé) nikdy nesetkali s možností si SW nástroj pro modelování evakuace osob či šíření požáru sami vyzkoušet, z důvodů nedostatečného technického vybavení, nutnosti financování licencí či přísného zabezpečení a s tím i spojenými uživatelskými omezeními na služebních PC. Díky tomu, že v ČR nejsou prozatím tyto modely nijak zvlášť užívané, není tvořen tlak na proškolení, informovanost, ani na technické vybavení, které je aktuálně v rámci HZS kanceláří výrazně poddimenzované. Pro samotné zavedení modelů do aktivní praxe je předpoklad zlepšení těchto podmínek velmi důležitý.

## **6.2.2 Doporučení pro užití v praxi**

Užití numerického modelu evakuace osob umožňuje získání zpětné vazby, jednoduchou kontrolu a efektivní koordinaci projektu a ověření funkčnosti navrhovaných řešení, jak pro samotné zpracovatele, tak i pro posuzovatele z řad HZS. Následně jsou uvedeny poznatky, doporučení a ověřená řešení pro aplikace numerických modelů evakuace osob – jejich výhody/nevýhody a jejich aspekty ovlivňující výsledky posouzení (blíže také viz Příloha F), stejně jako nástin korektní formy výstupů při zpracování a finálním předání PBR HZS (blíže také viz kap. 6.3).

### **Užití numerického modelu pro posouzení evakuace**

Užití numerického modelu pro posouzení evakuace je nutné chápat jako kvalitní, pokrokový a komplexní doplněk ke klasickému normovému posouzení, který však nesmí nahrazovat erudici inženýra, autorizovaného v oboru požární bezpečnosti nebo kontrolního orgánu ze strany HZS (IZS).

Nástroj, užívaný proškoleným erudovaným jedincem, je velmi efektivním řešením, pomocníkem, schopným obsáhnout klíčové aspekty lidského chování, geometrii studovaného prostoru (kombinací parametrů) a různé návrhové scénáře. Díky velmi kvalitním výstupům, nad rámec klasických postupů PBŘ, má posouzení velkou vypovídající hodnotu. Naopak v rukou neinformovaného uživatele, který není schopen doložit korektnost vstupních dat a nastavení modelu, se výstupy stávají silně nespolehlivými a pro interpretaci posouzení stávající situace/nových návrhů jsou takřka bezcenné. Každý evakuační model, reprezentující lidské chování, v sobě nevyhnutelně zahrnuje určitý stupeň nejistoty jak ve vstupních parametrech (nedostatek dat, špatně měřená data), tak i v produkovaných výsledcích (špatné statistické zpracování) a pro jejich řízení je nutné, aby modelář byl informovaný o jejich zdrojích. Uživatel modelu nicméně musí vždy ovládat výpočetní postupy PBŘ a používat je jako nenahraditelnou zpětnou vazbu.

### **Zastoupení osob se specifickými potřebami**

Zohlednění zastoupení osob se specifickými potřebami v rámci populace při posouzení evakuačního procesu je důležitým faktorem, který má významný dopad na prodloužení jeho výsledných evakuačních časů a na celkový charakter davu. Mobilitu lidí je nutné zohlednit zejména u staveb speciální povahy, kde je tato skupina masivně zastoupena (nemocnice, LDN, stacionáře, ústavy apod.), ale je třeba ji zohlednit procentuálním zastoupením populace i v rámci běžných veřejných provozů.

Díky užití numerického modelu je v rámci ověření staveb s velkým procentuálním zastoupením osob s omezenou schopností pohybu možné získat reálný pohled na evakuaci, nejen z hlediska evakuačního času, ale i z hlediska krizového managementu, což přináší i možnost optimalizace evakuačního procesu např. rozmístěním pacientů dle specifických potřeb s ohledem na vliv evakuačního procesu a strategie. U těchto typů staveb lze ověřit jednoduše i požadované kapacity oddělení pro případný evakuační přesun do těchto prostor (dle požadavku čl. 8.4.1.2 ČSN 73 0835 PÚ musí být plošně dimenzovány pro pobyt pacientů z daného PÚ i ze sousedního evakuovaného PÚ).

Díky získaným poznatkům z kap. 5.2.1 lze i v provozní fázi těchto specifických budov zavádět preventivní bezpečnostní opatření ve formě – např. proškolení personálu, plánované rozmístování pacientů s různými typy pohybového omezení (např. pacienti na lůžkách a osoby neschopné samostatného pohybu budou umísťováni v blízkosti výtahů nebo protipožárních předělů apod.).

### **Možnosti užití spřažených simulací**

Posouzení budovy s využitím modelu požáru a šíření kouře přináší zejména následující výhody – možnost srovnat aktivní vs. pasivní variantu ZOKT, otestovat pasivní variantu pro různé klimatické podmínky, ověřit umístění otvorů nebo ventilátorů pro ZOKT, ověřit kapacitu přívodu vzduchu, ověřit teplotu odtahovaného kouře a při propojení s modelem evakuace stanovit i míru intoxikace osob či dobu dostupnou pro evakuaci (ASET). Společná interpretace výstupů simulací v čase nabízí realističtější pohled na situaci s lepším porozuměním samotné události, a umožňuje tak i snáze rozpoznat, zda jsou splněny bezpečnostní cíle vnitřních podmínek budovy i pro evakuované osoby.

I přesto, že výsledky posudku (spřažených simulací) jsou vyhovující z pohledu vlivu produktů požáru na osoby, je nutné vždy v posuzovaném objektu provést komplexní analýzu ÚC (koridorů a schodišť) z pohledu kapacity – zvýšení komfortu a bezpečnosti těchto prostor (např. kapacitní řešení evakuačních předsíní, předejití masivním kongescím, zřizování tzv. safe room apod.) pro případy vzniku mimořádné události bez požáru.

### Ověření optimalizace vybavení PBZ

Konkrétní PBZ a množství tohoto vybavení, předepsaného dle normového posouzení, lze v konkrétních případech optimalizovat. Jedná se o případy, kdy z pohledu funkce a provozních nákladů se jedná o nesmyslné či neopodstatněné řešení. To však musí být prokázáno inženýrským přístupem (primárně numerickým modelem požáru a evakuace osob), na základě jehož výsledků je následně možno od předepsaného požadavku upustit. Smyslem je tak nalezení ekonomického návrhu, který současně vyhoví cílům a kritériím PBŘ.

Příkladem z praxe, kdy díky výsledkům numerického modelu požáru [10] bylo možno upustit od požadavku instalace SHZ, je posudek Arény Brno [19], kde výsledky studie prokázaly, že při vzniku požáru nedochází k nárůstu teplotního pole natolik, aby došlo k samotné aktivaci SHZ a zároveň dle modelu evakuace osob nedochází k jejich ohrožení účinky požáru. Náklady na zajištění bezpečnosti stavby a vybavení PBZ nejsou špatnou investicí, jen v některých případech by bylo vhodné mít možnost užít při návrhu „zdravého rozumu“ a s doložením funkčnosti návrhu pomocí numerického modelu tak moci optimalizovat vynaložené náklady bez snížení bezpečnosti.

### Využití výsledku z numerických modelů evakuace osob a šíření požáru

Analýzy vizuálních výsledků evakuace (jako jsou trajektorie osob, Level of Service (LoS), hustota osob na  $m^2$ , průměrná rychlost osob, doba zdržení), společně s porovnáváním výsledných křivek evakuačních časů, umožňují identifikovat faktory silně ovlivňující evakuaci a následně doporučit změny návrhu geometrie posuzované stavby tak, aby bylo docíleno bezpečné evakuace – např. optimalizaci počtu a umístění evakuačních východů, odstranění úzkých hrdel, zvýšení kapacity vybraných částí apod.



**Obr. 6.1:** Příklad bezpečnostní analýzy evakuace nádraží – detekce kritických míst, rozbor celého průběhu evakuace (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20] přepracováno)

Celkové výsledky modelu evakuace představují vstupní údaje pro ujasnění strategie i metod zabezpečení objektu a stanovení nezbytných protipatření (stavebního, technického a organizačního rázu, jako je např. počet evakuačních ÚC, umístění ostražky, navigační prvky, zásahový plán apod.), blíže viz kap. 5.3. Často se pak vracíme k verifikaci těchto opatření právě pomocí upraveného modelu, jeho okrajových podmínek a možnosti opakovaného ověření. V případě, že je studovaný objekt teprve ve fázi návrhu, přistupujeme rovněž k úpravám dílčích částí návrhu, které umožní další snížení evakuačního času a zejména snížení kongescí, které jsou velmi významným rizikovým faktorem [17]. Výsledky lze využít nejen pro ověre-



ní PBR, ale také pro identifikaci kritických míst a jejich následnou optimalizaci, plánování hromadných akcí, analýzu rizik při ochraně měkkých cílů, optimalizaci příp. zásahu apod.

#### **Užití numerických modelů evakuace jako nástroje pro její plánování**

Pro plánování evakuace je užití numerického modelu podstatnou přidanou hodnotou pro získání názorné představy vývoje evakuačního procesu např. při plánování řízené evakuace s následnou možností její optimalizace (celkového evakuačního procesu, změny evakuačního pořadí, úpravy evakuační trasy, změny umístění NÚC/CHÚC či jejich dimenzí apod.). Lze tak předejít možným kolizím a zbytečným časovým prodlevám. Numerický model umožňuje uživateli provést simulace a ověření celé řady navrhovaných variant (evakuačních strategií) a následně tak vybrat pro konkrétní krizový scénář tu nejpriznivější.

#### **Užití numerických modelů evakuace jako prevence sekundárního nebezpečí**

Při posuzování specifických staveb není vhodné se zaměřovat pouze na zhodnocení jejich preventivních ochranných opatření, jak tomu často bývá u klasického návrhu, ale je velmi důležité se také zaměřit na cílenou eliminaci následků případně vzniklých mimořádných událostí a zajištění maximální bezpečnosti u sekundárních procesů (za které lze považovat i samotnou evakuaci osob). Zejména u velkých specifických staveb je nutné při navrhování ověřit kapacity jednotlivých koridorů, propustnosti východů (počet) a eliminaci prvků, které mohou působit jako překážky při evakuačním procesu. Oproti klasickému přístupu umožňuje využití numerických modelů posouzení stavby ve větší podrobnosti detailu geometrie a ověření bezpečet různých krizových scénářů s celou řadou proměnných, což mnohdy může upozornit na případná bezpečnostní pochybení a opomenutí v návrhu.

#### **Přínosy pro proces navrhování staveb**

Přístup užití numerického modelu nicméně nabízí výhody v přehlednosti informací, zpětné vazbě vlivu zanesených změn a lepší koordinaci jednotlivých profesí, díky čemuž lze ve fázi realizace stavby snížit náklady na případné stavební úpravy.

### **6.2.3 Doporučené užití pro účely IZS**

Výsledky analýz evakuace, šíření požáru a toxicity mohou být velmi přínosné pro proces samotného plánování zásahu složek IZS a HZS. Díky výsledkům simulací a jejich 3D/VR vizualizacím je možné získat ucelený realistický náhled na analyzovanou situaci, a na jeho základě následně provést nácvik krizových scénářů a zdolávání požáru, zejména u specifických staveb (např. stadion, metro, tunelový úsek apod.), jak tomu je např. v zahraničí [214, 417, 596].



**Obr. 6.2:** Ukázka 3D vizualizace evakuace osob ze stanice Pražského metra se vstupem zásahové jednotky HZS – celkový pohled na masu evakuujících se osob v prostoru pod eskalátorem (vlevo), příchod zásahové jednotky (ve středu) a pohled na masu evakuovaných z pohledu zasahujícího HZS (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11] přepracováno)

Tyto poznatky vycházejí z analýzy zásahu při návrhu stanic metra [11], kde ač členové HZS DPP měli rámcovou představu o zásahu dle předepsaných pokynů ze směrnice „Dokumentace pro zdolávání požáru“, byly pro ně vizualizované výsledky simulace velkým přínosem

– viz obr. 6.2. Prostřednictvím nich si dokázali lépe představit situace při možném zásahu (např. mocnost masy lidí proudících proti nim v čase zásahu, množství lidí vyskytujících se v daných prostorách, které je nutno evakuovat, míru rozvoje požáru v daném čase apod.).

Pro zajištění maximálně činného zásahu u specifických staveb je nutné je vybavit doplňkovými bezpečnostními prvky (kamery, orientační systém, nucený poslech apod.), které umožní dostatečné zajištění informovanosti evakuovaných o směřování k východům či nutnosti uvolnění koridoru pro přístup HZS a jiných zásahových složek. Díky takto získaným informacím mohou evakuované osoby reagovat na vzniklou situaci a záchranné složky vyslat nejprůběžnější zásahovou cestou tak, aby nemusely překonávat velký dav evakuujících.

Tento způsob posouzení umožňuje analyzovat celou řadu scénářů (i těch krizových), predikovat jak vývoj situace a případná přetížení, tak i jejich dopady (dává možnost připravit se). Získané informace tak mohou sloužit jako podklady pro plánování krizového managementu v podobě kooperace záchranných složek, dispečinku a podpůrných procesů evakuace (např. průjezd vlakové soupravy, užití požárního výtahu apod.). Získané výsledky lze dále použít i pro efektivní ověření dimenzi návrhu evakuačních cest, jak z pohledu proudícího davu, tak i v pohledu možnosti ověření zásahu složek IZS a manipulaci např. s nosítky v případě nutnosti evakuace osob s omezenou schopností pohybu či zasažených jedinců.

### 6.3 Check-list pro užití modelu evakuace osob

Jelikož při posuzování specifických staveb neexistuje jednotný návod pro volbu modelu a jeho vstupů, je nutné, aby zpracovatel v roli uživatele pokročilých metod mohl poskytnout v PD detailní popis týkající se: samotného výběru numerického modelu, co jej ovlivnilo, jaký je očekávaný výstup, a jestli má model nějaká omezení a jak tato omezení byla zohledněna. Dále by měl být uveden podrobný popis řešeného problému, vstupních dat – stanovení cíle výpočtu a kritéria přijatelnosti výsledku, stanovení nejistot a popis jejich eliminace, čerpání vstupních dat. Vzorové nastínění struktury předávaného dokumentu ze strany zpracovatele (projektanta PBŘ) je uvedeno níže. Tato struktura může sloužit i jako podpůrný check-list posuzovatelům (preventistům HZS) při kontrole zpracovaného posudku evakuace osob zmiňovaným odlišným přístupem.

#### Struktura PD posudku evakuace osob

##### 1. Použitý nástroj

Název, verze, číslo licence, odůvodnění a popis vybraného modelu – jeho typu, typ sítě (u diskretní sítě velikost buňky a její zdůvodnění), velikost časového kroku, možnosti a omezení aplikace vybraného modelu, okrajové podmínky a nejistoty nástroje, odkaz/protokol o verifikaci a validaci modelu (případně doložení vlastní).

##### 2. Popis řešení stavby

Popis výškového a dispozičního členění, popis rozmístění ÚC a jejich dostupnosti, popis technického vybavení a jeho podmínek provozuschopnosti, popis jednotlivých provozů a jejich časových harmonogramů (časový rozvrh, špičkové časy apod.), celkové kapacity, zda poskytuje budova možnost multifunkčních variací – uvést, jakých a čeho se týkají (provoz, čas, geometrie), popis zásahových cest.

##### 3. Vstupy

- **Podklady** – seznam podkladů a dokumentů, ze kterých je vycházeno (nutno uvést zdroje dat a zda jsou empirická či tabelární)
- **Geometrie** – co je modelováno, do jakého detailu (obsahuje i překážky a menší předměty), kde bylo přistoupeno k případné aproximaci a do jaké míry v případě modelu se sítí popis procesu zjednodušení geometrie – zejména u míst ÚC a zúžení (dveře), zadání orientačního systému – ano/ne.

- **Populace**

- **Obsazenost** (počet osob – případné jejich variace, popis počátečního rozmístění osob v prostoru, jestli dochází v průběhu simulace k přílivu dalších osob (např. příjezd spoje, evakuace z jiných částí mezi PÚ)
- **Složení davu** (dle věku, genderu, procentuální zastoupení osob se sníženou schopností pohybu. Složení davu (dle věku, genderu, procentuální zastoupení osob se sníženou schopností pohybu, či zohlednění specifické složení populace dle modelovaného scénáře).
- **Zvolené charakteristiky osob** – rychlost, doba před pohybem, půdorysné rozměry apod.

#### 4. Scénáře (variantní řešení)

- **Počet zvolených scénářů**
- **Popis scénářů** (představení sady zvolených scénářů, popis jejich rozdílů a variantního řešení, schéma jednotlivých scénářů, uvedení charakteru chování osob v něm – tvorba skupin, zohlednění krizového řízení a konkrétních rolí osob, volba typu evakuace).

#### 5. Výstupy

- **Metodika simulace a vyhodnocení výstupů**
  - **Simulace** (počet variant, počet jejich spuštění – min. 10, proměnné parametry – při novém spuštění dochází/nedochází k redistribuci parametrů – rychlost, reakční doba, věk a pohlaví)
  - **Přehled metrik pro vyhodnocení simulací** – celková doba evakuace, doba evakuace (ASET, RSET), zatížení východů, doba zdržení (ve frontách), délka trajektorií, heat mapy („teplotní mapy“, vizuální výstupy) – maximální dosažená hustota, maximální čas k únikovému východu, maximální doba obsazenosti
- **Výstupy ze simulací** – (počet simulací), pro které je provedeno statistické zpracování. Uvádí se užité statistické ukazatele – střední hodnota, směrodatná odchylka, interval spolehlivosti (případně standardizované skóre – M2DS).
- **Výsledky jednotlivých metrik** – uvedených ve formě grafů, kvantitativních shrnutí, heat map a záznamu průběhu evakuace (ve formě videa nebo obrázků v různých časových sekvencích).

#### 6. Závěr

Celkové shrnutí výsledků a zhodnocení posuzovaného návrhu, případná doporučení pro úpravy a reorganizaci evakuačního procesu.

#### 7. Reference

Pozn.: v případě požárního scénáře (přítomnosti požáru v modelu)

#### Vstupní údaje

- Návrhového scénáře – průběh návrhového požáru (v čase a prostoru) – zdroj vznícení, množství materiálu, okolní vlivy rozvoje a dalšího šíření požáru (charakter budovy, vybavení PBZ, zejména rozmístění a typy prvků SHZ a EPS, větrání, požární a tepelné technické charakteristiky materiálů → návrhový požár, blíže viz kap. 5.1.1) [21].

**Výstupní údaje**

- Výsledky jednotlivých metrik – rychlost proudění, teploty plynu, tlak, intenzita tvorby kouře, pohyb kouře ve sledovaném prostoru, teplota na povrchu stavebních konstrukcí, toxicita a její koncentrace (CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) atd.
- Zhodnocení podmínek při evakuaci osob (v čase i prostoru) – dopad produktů hoření na osoby (kouř, viditelnost, toxicita, vysoké teploty, bilance úmrtí).

## Kapitola 7

### Závěr

Tuzemská komunita zabývající se problematikou požární bezpečnosti je zvyklá využívat analytických návrhových postupů, které jsou předepsány v aktuálně dostupných normách i přesto, že v poslední době jsou již k dispozici sofistikované numerické nástroje. Tyto nástroje bohužel prozatím nemají ve stávajících českých normách dostatečnou oporu, uživatelé mají stále velmi málo informací o tom, kdy je vhodné tyto postupy použít (kdy je to bezpečné, kdy je použití nevhodné a naopak kdy je jejich využití velmi přínosné). Z těchto důvodů si i tato práce kladla za cíl mj. přispět k představení právě možnosti využití numerických modelů evakuace osob a šíření požáru pro potřeby PBŘ, a to na osmi názorných aplikačních příkladech specifických staveb a dalších dílčích a pomocných studiích uváděných v kap. 3.3 a kap. 5.2. Dále práce poskytuje komplexní informace o současném stavu poznání a vlastní poznatky z užívání numerických modelů, jako podklad pro postupné akceptování numerických modelů odbornou veřejností a k jejich následné integraci do praxe jako plnohodnotného inovativního doplňku klasického normového přístupu při posuzování specifických staveb. Došlo by k zachování konzervativních ČSN postupů, které by byly doplněny o posouzení numerickým modelem, díky čemuž by bylo možné řešit mnohem obecnější zadání, jako např. geometrickou komplexitu, reálné scénáře, konkrétní výskyt a pohyb osob, posuzování účinku požáru, návaznost na VZT apod.), a získat tak důležitou rámcovou představu o vývoji procesů.

Historicky tento proces integrace numerických modelů do praxe není ve stavebnictví ojedinelý. Obdobným příkladem může být obor stavební mechaniky, kde cca před 20 lety panovala podobná situace. Ve stavebnictví byl užíván pouze užší výběr stavebních materiálů, odborníci na stavební mechaniku byli odkázáni pouze na analytické postupy dle starých norem, díky čemuž často dopředu dokázali odhadnout slabé místo řešení. Numerické metody neměly žádnou podporu v normách, ani zastání mezi samotnými odborníky. S postupem času došlo k výrazné modernizaci stavebních materiálů a s ní spojené zvýšení nároků na specifické posouzení. Nicméně systematickou prací několika generací výzkumníků se postupně numerické metody, které předpokládají globální bezpečnostní analýzu s užitím parciálních bezpečnostních faktorů, dostaly do norem stavební mechaniky. Díky tomu jsou dnes konstrukce bezpečnější a možnou optimalizací ceny i levnější. Podobně tomu bylo i v případě globální nelineární MKP analýzy oproti klasickému přístupu (parciální bezpečnostní součinitele), příkladem může být dokument *FIB MODEL CODE 2010 (2013)*. Ten ve svých postupech uvažuje mnohonásobně větší množství parametrů, než tomu bylo u původních postupů. Do posouzení vstupuje více parametrů, z nichž některé mohou být nejisté, a s touto nejistotou je nutné se umět také vyrovnat tak, jak je ukázáno i v této práci, kde je vyrovnání s nejistotou a rizikem přeurčitosti problému řešeno vyhodnocováním rozptylu a variability výsledků v závislosti na jednotlivých parametrech představených přímo v parametrických a citlivostních studiích.

Mimo uváděná doporučení a poznatky je jedním z hlavních přínosů této práce sestavení názorné sady devatenácti parametrických a citlivostních studií upozorňujících na konkrétní vlivy a dopady vybraných parametrů mající silný účinek na výsledky procesu evakuace (cel-



kový evakuační čas) ve srovnání s klasickým ČSN přístupem. Na základě získaných poznatků a výsledků těchto studií práce poukazuje na nedostatky a zjednodušení metod normového přístupu při posouzení evakuace osob, jako je například absence reakční doby, posuzování pouze jednoho obecného scénáře, minimální zohlednění osob se specifickými potřebami apod. (blíže viz kap. 5.2 a Příloha F, kde jsou uvedeny poznatky o možných výhodách, nevýhodách, nedostatcích a rizicích těchto dvou přístupů). Zmiňovaná zjednodušení zejména u staveb specifického charakteru by mohla v reálných situacích znamenat značné komplikace při evakuačním procesu či ohrožení evakuovaných osob. V dnešní době s novými možnostmi je také zcela nežádoucí stavby typizovat (tvarově, materiálově) a zbytečně prodražovat za účelem toho, že náhled aktuálních přístupů je omezený. V návaznosti na tato zjištění práce doporučuje začlenění numerických modelů v důsledku možnosti obsažení většího počtu klíčových parametrů pro reálnější popis (stavby, osob) a ztvárnění komplexní sady návrhových scénářů pro doplnění klasického požárně bezpečnostního posouzení u specifických staveb → je třeba uvažovat o stabilním funkčním přístupu, který bude využívat kombinaci dobře známých klasických analytických metod (normový přístup) i moderních simulačních nástrojů (odlišný přístup). Aktivní užívání simulačních nástrojů pro návrh PBR je dobrým směrem, ale je nutné, aby používaný nástroj byl uživatelem vždy perfektně pochopený, a postupy řešení byly podrobně popsány ve zprávě (konkrétně popis: nástroje, vstupních dat, počet simulací, zpracování dat, vyhodnocení výsledků a závěrů apod.) tak, aby postup i řešení bylo pro rozhodující orgán dostatečně průhledné.

### Další vývoj oboru a budoucí směřování výzkumu

Samotné ověření možnosti užití inženýrského přístupu, konkrétně numerických modelů evakuace a šíření požáru pro velké a specifické stavby v souladu s českými standardy, s cílem inovovat v současnosti užívané postupy požárně bezpečnostního posouzení v návrhové fázi a ověření bezpečného provozu při vzniku mimořádných událostí nejen požárního charakteru (např. útok na měkký cíl), hodnotí tento přístup více jak přínosný z pohledu možnosti komplexního reálného popisu evakuace a posouzení celkového vývoje situace. S ohledem na tato fakta byly numerické modely doporučeny jako efektivní nástroj a doplněk ke klasickému přístupu pro posouzení evakuace ze specifických staveb. V tomto kontextu se nabízí myšlenka samotného masivnějšího zakotvení numerických modelů přímo do ČSN 73 080XX s vymezením konkrétních požadavků a omezení tak, aby byla předepsána jednotná rámcová struktura tohoto přístupu (např. viz kap. 6.3) a stanovena přesná definice specifických staveb převyšující nároky klasického normového posouzení (ty vhodné pro posouzení požárním inženýrstvím). Této myšlence by mohly napomoci i změny Zák. č. 133/1985 Sb., o požární ochraně (ve znění zákona č. 425/1990 Sb.) [583], které uvedly novou vyhl. 460/2021 Sb., o kategorizaci staveb z hlediska požární bezpečnosti a ochrany obyvatelstva [554], zavádějící do PBR zcela novou kategorizaci staveb. Vyhláška stanovuje kritéria a charakteristiky staveb z hlediska požární bezpečnosti a ochrany obyvatelstva pro jejich třídění do kategorií 0–III, kde stavby kategorie III jsou definovány právě jako stavby specifické povahy s přihlédnutím k rizikovým faktorům evakuace – výška stavby, třída využití, stavby v podzemí, stavby pro více než 1000 os., přítomnost osob vyžadujících asistenci, tunelové stavby, stanice metra apod. Pro stavby kategorie III je zde přímo i konkrétní zmínka o připuštění užití odlišného posouzení dle § 99.

V návaznosti na skutečnost, že v českých poměrech nejsou dostupná ucelená vstupní data pro modely evakuace, jelikož hodnoty vystupující v ČSN 73 08XX nejsou jako vstupy pro numerické modely evakuace zcela vhodné (jedná se o tabelární hodnoty zohledňující pouze některé parametry procesu evakuace, díky čemuž nekorespondují v rámci modelu s realitou), měl by se budoucí výzkum zaměřit na sestavení databáze těchto vstupních dat. Aktuálně je v případě aplikace numerických modelů evakuace v českých podmínkách uživatel odkázán primárně na inženýrský odhad a při čerpání vstupních charakteristik populace pak na zahraniční zdroje,

např. ty uváděné v Příloze B. Proto by se i nabízelo jako vhodné sestavení vlastní sady základních charakteristik davu pro ČR po vzoru zahraničních zdrojů [522, 172, 562, 421, 206], s ohledem na aktuální vývoj demografické křivky populace a jejich globálních aspektů, jakými je dlouhověkost, procentuální zastoupení osob se specifickými potřebami, stres, obezita, rychlé životní tempo, větší hustota zalidnění a s tím spojená i vyšší koncentrace osob v budovách apod. Jednalo by se zejména o detailnější sběr údajů o návštěvnících staveb specifické povahy a jejich chování jako referenci, s cílem zajištění kvalitních vstupních dat pro tvorbu, validaci a kalibraci nových numerických modelů při posouzení podobných staveb a tím i získání reálnějších predikcí. Podobně jako tomu bylo u vstupních dat pro modely požáru a šíření toxicity v rámci projektu *VI20162019034*, kde byla vytvořena ucelená databáze materiálů, díky kterým je možné sestavovat návrhové scénáře (jak bylo popsáno v kap. 5.1.1) s ohledem na užívané materiály i aktuální trendy ve stavebnictví.

Dalším aspektem, který je třeba výhledově detailněji prozkoumat a více integrovat do PBŘ, je analýza evakuace osob se zdravotním postižením (specifickými potřebami). Jejich pohyb a chování jsou zcela odlišné od chování běžných osob [100, 291, 459], což je způsobeno vlivem specifických dopadů omezení na jejich chování. Pro zmapování této problematiky by bylo nutné provést nová pozorování a detailnější experimentální kampaně.

Pokročilé numerické modelování pohybu osob (evakuace) by mohlo sloužit současně i jako nástroj generativního designu při optimalizaci návrhů staveb i jejich PBŘ. Právě generativní design je jednou z myšlenek Stavebnictví 4.0. Z pohledu PBŘ by byly v rámci počáteční návrhové fáze sestaveny požadavky a okrajové podmínky (např. – počet ÚC, délka ÚC, šířka ÚC, maximální hustota při evakuaci apod.) od všech účastníků stavebního procesu (architekta, investora, realizační složky a dalších subjektů), na jejichž základě by pak byly generovány varianty optimálních řešení. Využití numerických modelů ve spojení s moderními technologiemi – AI, BIM, VR, MV a ML ve stavebnictví jako nástroje pro otevření nových komplexních možností optimalizace architektonických návrhů a studií (např. lepší využitelnost prostor, vhodnější úpravy dispozice, eliminace budoucích vícenákladů, efektivní rozmístění technického vybavení budovy atd.) povede k flexibilitě i zefektivnění procesu návrhu a celkové pojetí staveb bude směřovat ke komplexně ověřeným, bezpečnějším, individualizovaným a současně hospodárným stavbám.



# Přílohy

## A Historický vývoj normového přístupu v ČR

Tato příloha stručně nastiňuje rozvoj požární bezpečnosti a přístup k PBR staveb na území České republiky – od prvních zmínek z 13. stol., přes dobu normalizace (kolem roku 1975) až po dnešní podobu. Tuto přílohu je možné vnímat jako popis vývoje normového přístupu popisovaného v kap. 1.3.1.

### Požární předpisy v ČR (od 13. stol. po současnost)

Požární předpisy nejsou nic nového, jelikož první zmínky o nich byly nalezeny například už ve starém římském právu, následně i ve stavebních řádech. Na území České republiky byly dochovány první zmínky o požárních opatřeních v rámci stavebního práva z 13. století, které pojednávaly obecně o systému hašení požáru a plánování výstavby z pohledu požární bezpečnosti (urbanizace měst). V této době při nedodržení základních pravidel docházelo k vyhoření celých měst. Konkrétnější protipožární opatření pro stavby se objevují až v 18. stol. v požárních řádech za vlády Marie Terezie a Josefa II. Zde už tvůrci zavádějí některé myšlenky, které se v upravené podobě vyskytují v předpisech dodnes. Konkrétně se hovořilo o nutnosti výstavby meziobjektových zdí a štítů, potřeby rozlišování spalných, nespalných materiálů a jejich aplikace v rámci stavby (nehořlavé podlahy na půdách, nehořlavé střešní krytiny, zákaz dřevěných svislých konstrukcí, komíny) a předepisují stanovení bezpečných vzdáleností mezi objekty. Požární řády postupem let měly značný vývoj, který zapříčinil počátkem 19. stol., že byly rozděleny na požární řády (předpisy pro likvidaci požáru) a speciální stavební řády (požadavky na stavby tyto např. už stanovovaly požadavky na tloušťky meziobjektových zdí). Tento systém byl nadále průběžně aktualizován a dochoval se až do období konce první republiky [300, 298].

### Před obdobím normalizace (poválečné období před rokem 1977)

V 50. letech bylo vydáno hned několik zákonů a vyhlášek, které vedly ke značnému rozvoji požární bezpečnosti. Jedním z příkladů je Vyhl. 709/1950 Ú.I., o podrobnějších předpisech pro pozemní stavby vydaná Ministerstvem stavebního průmyslu, která obsahuje ustanovení požární bezpečnosti při projektování budov, které byly uváděny pouze jako dílčí součást stavebních předpisů [64]. Dále následovaly další zákony týkající se požární bezpečnosti:

- Zákon č. 62/1950 Sb., o ochraně před požáry a jinými živelními pohromami (účinnost od 9. 7. 1950, nahrazen 35/1953 Sb.),
- Zákon č. 35/1953 Sb., o státním požárním dozoru a požární ochraně (účinnost od 1. 1. 1951, nahrazen 18/1958 Sb.) – z ohledu normalizace PBR nejdůležitější, protože oddělovala od sebe zákony a technické požadavky (budoucí požadavky normy),
- Zákon č. 18/1958 Sb., o požární ochraně (účinnost od 30. 4. 1958, nahrazen zákonem č. 133/1985 Sb.).

## ČSN 73 0760

Výstavba po II. světové válce si vyžádala roku 1954 vydání dalších nových požárních předpisů a samostatné technické normy ČSN 73 0760 – Požární předpisy pro výstavbu průmyslových závodů a sídlišť. Norma platila pouze pro nově vznikající nebo nově rekonstruované stavby a volné sklady. Odvolávala se a byla provázaná s normami nesouvisejícími s požární bezpečností. Hodnocení budov bylo prováděno pomocí tzv. kategorizace, pro kterou byly požadavky předepsány taxativně dle příslušného provozu a počtu podlaží. Norma nově zavádí pojem tzv. stupně bezpečnosti objektu proti ohni, na jehož základě byly dimenzovány jednotlivé konstrukce na stupeň hořlavosti a nejmenší odolnosti proti ohni. Vycházela primárně z původních nároků na výstavbu (nízká zastavěnost, nízké budovy, tradiční materiály), což z ní brzy udělalo nevyhovující normu pro tehdejší nároky výstavby [102].

## ČSN 73 0760 novelizace

Vlivem zmiňovaných nedostatků si norma vyžádala v roce 1959 novelizaci a spolu s ní byla přijata i ČSN 73 0761 – „Požární předpisy pro výstavbu zemědělských závodů a objektů“. Norma byla rozšířena o nové předpisy týkající se ústředního vytápění, navrhování kotelen, skladů paliv a zařízení pro ukládání popela v průmyslových objektech a sídlištích.

I přesto následoval vznik dalších specializovaných norem pro konkrétní typy staveb, které měly obsáhnout nedostatky základní normy ČSN 73 0860 pro daný typ provozu. Díky těmto potřebám byl v roce 1967 vydán další doplňující specializovaný požární předpis pro projektování výškových budov. Jednalo se o budovy pro bydlení, občanské vybavení a průmysl, chladírny, mrazírny a ocelové konstrukce, které byly podníceny negativními zkušenostmi ve formě vzniklých požárů, při kterých se projeví nedostatky zejména s ohledem na možnosti evakuace osob, a to přes aplikaci všech doporučení ČSN 73 0760 [64, 102, 63]. Původní záměr postupného přizpůsobování ČSN 73 0760 se do budoucna ukázal jako nemožný postihnout všechny modernizační změny ve stavebnictví (navrhování subtilních ocelových konstrukcí, návrh předpjatých konstrukcí; celkově došlo ke zvyšování zástavby, návrhu otevřených dispozic bez dělení, návrhu velkokapacitních hal bez oken, využití nových materiálů – slitiny, sklo, plasty a organické materiály, které lehce hoří). Technologie stavby a materiálové inženýrství se dostaly do rozporu s tehdejšími požárními předpisy, což v roce 1975 vedlo ke zpracování koncepce rozvoje normalizace v oboru požární bezpečnosti staveb, s cílem snižování škod a ztrát na lidských životech.

## 1975 – období normalizace

Z klasických požárních předpisů, které pouze určovaly, co se smí, nebo nesmí, se vyvinul nový obor požárně bezpečnostního inženýrství, jehož vznik v České republice se datuje do 70. let minulého století, kdy byly vytvořeny první normy a určen směr dalšího vývoje tohoto oboru. Na tvorbě se podílel tým stavebních inženýrů v čele s Ing. Vladimírem Reichelem, DrSc., spolu s dalšími jeho kolegy – Ing. Romanem Zoufalem, Ing. Ivanou Karlovskou, CSc., Ing. Milanem Baumanem, CSc., a Ing. Janem Karpašem, CSc., a to v rámci Výzkumného ústavu pozemních staveb Praze (VÚPS).

V roce 1968 Reichel začal v rámci normalizačních úkolů vytvářet obor požární bezpečnost staveb a vnášet nové pokrokové metody, co se týče výpočtového zatížení, hustotu požárního zatížení, dělení objektu na PÚ a mnohá další opatření. To v té době nebylo v Evropě standardem a ani dnes tomu tak ve všech zemích není [83]. Při své tvorbě se inspiroval řadou zahraničních zdrojů z celého světa – USA [374], Indie [109], Nového Zélandu [159], Velké Británie [67], Německa [141], Švýcarska, Švédska a dalších [453]. V roce 1975 došlo ke vzniku nové normové řady s cílem sjednocení všech norem zabývajících se problematikou požární bezpečnosti do jednoho uceleného kodexu požárních norem (ČSN 73 08XX). Pro zachová-



ní aktuálnosti a kvality byla současně s normou ustavena i technická normalizační komise TNK 27, která průběžně revidovala, upravovala a zapracovávala případné připomínky (stejně, jako je tomu dnes). Před zavedením nové normy ČSN 73 0802 vycházely svazky (letech 1975–1977) [454, 455, 456], s cílem poskytnout v předstihu informace o širších souvislostech PBŘ a nově zaváděné koncepci (normy s modrým pruhem ČSN 73 0802: 1975), jelikož dřívější metodika PBŘ byla globální, mechanická a nepožadovala tvůrčí přístup a provádění empirických výpočtů [454].

### ČSN 73 0802

Roku 1977 vstoupila v účinnost kmenová ČSN 73 0802 – Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení jako první z řady chystaného kodexu. Norma ČSN 73 0802 se vztahuje na všechny druhy stavebních objektů, i když v některých případech existují specializované normy (jak jsou např. ČSN 73 0833, ČSN 73 0835, ČSN 73 0834 atd.), které obsahují pouze speciální požadavky doplňující normu ČSN 73 0802. V důsledku zvláštních požadavků došlo ke zrušení odvolávání se na řadu starších norem. Zachovány byly pouze normy řešící PBŘ u některých specifických objektů, které se od už začátku neodvolávaly na ČSN 73 0760 (např. důlní stavby).

Nová metodika požárně bezpečnostního posouzení vychází z technického hodnocení a obsahuje technické výpočty (zavádí nové značky a veličiny) [454]. Norma je přesnější ve svých požadavcích – příkladem mohou být požadavky pro stanovení požárního rizika, které vycházejí z výpočtového požárního zatížení a zahrnují nejen množství hořlavin, ale i jejich charakter, podmínky hoření (velikost otvorů, geometrie) a vliv požárně bezpečnostních zařízení (sprinklery, odvětrávání). Dále obsahuje konkrétní předpisy pro dělení objektů do PÚ, specifikuje podmínky současné a postupné evakuace, vybavení únikových cest a stanovení odstupů dle teorie sálání tepla [64]. V průběhu let normy procházely dalším vývojem v důsledku reakce na probíhající vývoj stavebnictví, který vyvolal připomínky a novelizace či případné změny od původního znění.

### Vznik současné podoby požárních předpisů v ČR

V roce 1995 došlo k postupnému nahrazení původní kmenové normy normami novými, a to:

- ČSN 73 0802 – Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty (upravená původní verze),
- ČSN 73 0802 – Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty (upravená původní verze).

Vznikly tedy dvě nové kmenové normy [123], [124], které se staly hlavním pilířem aktuálního požárního kodexu zahrnujícího:

- normy projektové (ČSN 73 0831, 73 0833, 73 0834, 73 0835, 73 0843) – určené pro specifické druhy objektů a provozů,
- normy předmětové (ČSN 73 0872, 73 0873, 73 0875) – pro požárně bezpečnostní zařízení, rozvody a zásobování požární vodou,
- normy zkušební (ČSN 73 0873, 73 0875) – pro zkoušení a kvalifikaci požárních vlastností,
- normy hodnotové (ČSN 73 0818, 73 0821, 73 0824) – pro obsazení objektu osobami, požární vlastnosti, požární odolnosti.

Další výrazné změny a novelizace probíhaly v letech 1997, 2000, 2004, 2009/5, kdy vyšlo nové vydání normy ČSN 73 0802 a 2010/2 nové vydání normy ČSN 73 0804.

V roce 2000 bylo v rámci EU nastaveno celoplošné fungování evropských návrhových norem, tzv. Eurokódů, s cílem sjednocení evropského trhu a odstranění překážek volného pohybu

zboží (výrobků). V roce 2010 vznikla povinnost zohlednění těchto předpisů i pro Českou republiku, a to v rámci požárního kodexu – zejména předpisy zkušební, zabývající se aplikací výsledků zkoušek a kvalifikací. V těchto směrech se Eurokódy staly platnými technickými normami, které byly zakotveny do soustavy ČSN doplněné o tzv. národní přílohy, které zajišťují plnou součinnost s ČSN 73 08XX i českou legislativou. Technické normy projektové podlely nejméně vlivu Eurokódů a zůstaly na úrovni národních technických norem, což vyplývá hlavně z důvodů místních podmínek v jednotlivých zemích (např. klimatické podmínky, orientace, věkový průměr, tělesné rozměry apod.) [480, 84]. Pro zajištění plné součinnosti mezi národními a evropskými normami byla v roce 2009 zavedena norma ČSN 73 0810 – Společná ustanovení.

Vzniklý soubor českých technických norem (v aktuální podobě) se díky předpisům a zákonům (to zejména – zákon č. 183/2006 Sb., zákon č. 133/1985 Sb., vyhl. č. 246/2001 Sb., vyhl. č. 23/2008 Sb., vyhl. 23/2008 Sb., zákon č. 415/2021 Sb. a vyhl. 460/2021 Sb., v platném znění) stává závazným nástrojem pro posouzení požárně bezpečnostního řešení včetně evakuace osob.

## B Podpůrné metodiky a zahraniční zdroje

Aktuálně hlavními zdroji informací využívanými jako podpůrné nástroje při specifickém posouzení staveb jsou speciální metodiky akceptované na území ČR, nebo jiné uznávané zahraniční zdroje, které jsou uvedené v přehledu níže:

### Podpůrné metodiky akceptované v ČR

Následující metodiky vznikly v rámci řešení souvisejících projektů (viz kap. 3.1) jako podpůrné dokumenty, které vymezují kdy, v jakých případech a jakým způsobem je vhodné aplikovat odlišný postup. Nenahrazují však manuál uživatelem preferovaného softwarového nástroje, slouží spíše jako pomocné vodítko poskytující základní náhled na inženýrské posouzení, zejména numerických modelů a možností jejich využití. Stanovují limity a potřeby vstupních parametrů i uživatelského nastavení a definují minimální standardy, které je třeba dodržovat při tomto způsobu posuzování. Odkazují rovněž na způsoby využívané v zahraničních standardech. Uvedené metodiky jsou určeny všem zpracovatelům a autorizovaným inženýrům v oboru PBR, projektantům návazných oblastí (oborů pozemní stavby, statika a dynamika staveb, TZB atd.), výrobcům materiálů PO a dalším odborníkům a expertům, kteří se podílejí na zpracování dokumentace požárně bezpečnostního řešení stavby a kteří mají k výkonu vybraných činností ve výstavbě oprávnění v roli zpracovatelů. Dále pak i příslušníkům Ministerstva vnitra, GŘ HZS České republiky a preventistům HZS, kteří hodnotí vypracování dokumentaci PBR (v roli posuzovatelů) a pracovníkům jednotek HZS a IZS.

- **Metodika – Aplikace pokročilých modelů pohybu osob a dynamiky požáru pro bezpečnou evakuaci osob a analýzu rizik**

Metodika vznikla jako subsidiární dokument *Koncepce požární prevence v ČR do roku 2016*, která byla zpracována GŘ HZS ČR, kde bylo již předpokládáno zavedení systému pro posuzování projektů řešených požárním inženýrstvím. Primárně je zaměřena na aplikaci modelů pohybu osob a šíření požáru při analýze evakuačního procesu. Zabývá se především zásadami evakuačního procesu a jeho dělením na jednotlivé fáze, vstupními údaji pro inženýrské posouzení (popisem charakteristik definujících budovu, osoby a požár v posuzovaných situacích) a ověřováním modelů pohybu a požáru (faktory ovlivňující aplikaci modelu, proces standardizace prostřednictvím pracovní skupiny ISO/TC 92/SC 4/WG 7 v rámci mezinárodní ISO normy a doporučené struktury prezentace výsledků) [25].

Dokument vznikl v rámci projektu *VG20132015120 Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru (SAFEVAC)* podpořeného MV ČR v rámci Programu bezpečnostního výzkumu ČR.

- **Metodika využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb**

Metodika stanovuje podmínky pro zavedení pokročilých výpočetních postupů v hodnocení požární bezpečnosti staveb a využití numerického modelování pro analýzy dílčích problémů staveb ve vazbě na platnou českou legislativu. Věnuje se problematice inženýrského přístupu, zejména definování vstupů do numerického modelu s ohledem na různé stupně jeho komplexity (např. definování zdroje hoření, tvorbu návrhových scénářů apod.). Stanovuje možnosti ověření jejich správné aplikace, relevantních vstupních a výstupních dat a spolehlivosti výsledků. Výsledky simulací šíření požáru a evakuace osob mohou být využitelné také v oblasti zjišťování příčin vzniku požáru a v oblasti plnění úkolů jednotek HZS a IZS [21].

Dokument vznikl v rámci řešení projektu *Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb (VI20162019034 – VERIFIRE WP3)* podpořeného MV České republiky.

- **Metodika využití detekce pěších pro městské plánování a analýzu rizik**

Předmětem této metodiky není přímo řešení požární bezpečnosti, i přesto může být užitečná při získávání a využití jak vstupních dat pro mikroskopické modely pohybu osob (evakuace osob), tak i dat k jejich ověřování. Metodika se zabývá pokročilými metodami analýzy obrazu pro extrakci dat o pohybu zejména pěších v urbánních oblastech. Zaměřuje se na aplikaci systémů pro detekci pěších prostřednictvím stereoskopických a monoskopických kamer a stanovuje obecné zásady měření dopravního proudu pěších pomocí systému analýzy obrazu (např. úroveň kvality pěší dopravy). Dále metodika definuje klíčové veličiny pěší dopravy, na které je nutno se v rámci detekce zaměřit, jelikož jsou zásadní ve vazbě na pozdější zpracování [14].

Dokument vznikl v rámci řešení projektu *TH02010372 Systém pro monitorování, vyhodnocování a řízení proudů chodců a cyklistů*, podpořeného TAČR v rámci programu na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON.

Spojení analýzy obrazu v podobě extrakce dat prostřednictvím strojového učení a informací o agentních modelech je dobrým základem pro kvalitní požární bezpečnostní posouzení, jehož využití je možné aplikovat v rámci přímo posuzovaných staveb nebo staveb podobného charakteru (v případě nově navrhovaných staveb).

- **Další certifikované metodiky a jiné zdroje**

Dalšími podpůrnými certifikovanými metodikami, které vznikly při společných výzkumných projektech (viz kap. 3.1), zabývajících se problematikou požární bezpečnosti (jako např. posouzením specifických tunelových staveb, dílčími požárně bezpečnostními posouzeními, volbou, upřesněním či ověřením vstupních dat pro numerické modelování), jsou:

- *Aplikace numerických modelů pro bezpečnou evakuaci vozidel při požárech v železničních tunelech (VG20132015120) – SAFEVAC* [136],
- *Vstupní data do modelů požáru (VI20162019034 – VERIFIRE WP1)* [205],
- *Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů (VI20162019034 – VERIFIRE WP2)* [135],
- *Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany (VI20162019034 – VERIFIRE WP2)* [302].
- Publikace *Ověřování modelů v požární bezpečnosti* [76].

Dalšími zdroji, zabývajících se inženýrským přístupem, numerickými modely evakuace osob a šíření požáru z pohledu PBŘ v podmínkách české legislativy, které vznikly mimo spolupráci a stojí za zmínku, jsou např. *Metodika pro specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství* [304].

## Zahraniční zdroje

Příkladem tohoto přístupu mohou být i jiné alternativní přístupy → zahraniční zdroje a postupy PBŘ. Zahraniční standardy jsou chápány jako postup odchýlný od českých technických norem a některé z těch nejužívanějších pro danou problematiku jsou uvedeny níže.

- **ISO/TR 13387-8 Fire safety engineering – Part 8: Life safety – Occupant behaviour, location and condition (ISO, 1999)**

Mezinárodní technická norma ISO stanovuje základní standardy pro inženýrské posouzení evakuačních procesů. Jedná se o jednu z osmi částí tohoto uceleného kodexu řešící požární bezpečnost. Nastihuje důležité aspekty, s kterými je potřeba uvažovat již při návrhu a zajištění požární bezpečnosti v budovách. Z pohledu evakuace se norma zabývá čtyřmi hlavními oblastmi – návrh budov ve vztahu ke krizovému řízení a zajištění bezpečnosti osob při mimořádných událostech, charakteristickými vlastnostmi

osob, dynamikou požáru a vlivem hašení. Dále jsou zde rozvedeny numerické modely, které je možno užít při řešení evakuace a šíření požáru. Tento přístup ignoruje omezení, která mohou platit jako důsledky účinných předpisů, z čehož vyplývá, že užití tohoto předpisu nemusí být v souladu s národními standardy. Norma je pravidelně revidována v pětiletém intervalu v rámci The International Organization for Standardization (ISO) [162].

- **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering** (SFPE, 2016)  
Celosvětově uznávaná referenční příručka požární ochrany, která je spolehlivým zdrojem základů požární bezpečnosti, dynamiky požáru, výpočtů nebezpečí, analýzy požárního rizika a modelování. Poskytuje důkladné posouzení současných osvědčených postupů požární bezpečnosti a požární bezpečnosti založené na výkonu. Na tvorbě knihy spolupracovalo více než 130 odborníků z řad hasičů a vědců z celého světa. Je vydávána organizací Society of Fire Protection Engineers (SFPE) aktuálně v pátém vydání ve třech svazcích [235]. Pro problematiku evakuace osob jsou přínosné zejména články o reakční době a před evakuačním časem [441]; tvorba evakuačních scénářů, vstupních údajů, charakteristik osob při numerickém modelování [294, 376]; o chování osob při požáru [295, 257]; o performance-based design [237]; o časech ASET a RSET [195] a mnoha dalších.
- **NFPA 101 Life Safety Code** (National Fire Protection Association, 2018)  
Konsensuální standard široce využívaný v USA (k dnešnímu datu ve 40 zemích z 50). Dokument stanovuje základní požadavky z hlediska konstrukčních, ochranných požadavků rozložení davu (obsazenost), tak aby docházelo k minimalizaci účinků požáru a souvisejících rizik. Zabývá se bezpečností evakuovaných osob s ohledem na vyvíjející se prostředí a s tím spojená rizika, a to jak v nově navrhovaných stavbách, tak i ve stavbách již realizovaných. NFPA je sponzorován pojišťovnami, jelikož je považován za cenný zdroj pro určování odpovědností při nehodách, hodnocení rizik a stanovení sazeb. Norma je publikována National Fire Protection Association a stejně jako mnoho dokumentů NFPA je systematicky revidována, a to v tříletém cyklu [108].
- **Hosser, D.: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes** (vfdb, 2013)  
Rakouská příručka zabývající se popisem postupů a metod při navrhování a posuzování staveb z pohledu požárního inženýrství. Zaměřuje se na vědecký, technický a organizační rozvoj v tomto oboru, s cílem zajištění vyšší bezpečnosti v oblasti požární ochrany, podpůrných technologií a záchranných složek. Dále uvádí postupy pro sestavení návrhových scénářů požáru, modelů a simulací evakuace a šíření požáru, návrh technických protipožárních opatření a opatření pro zajištění bezpečnosti únikových cest. Na posuzování evakuace osob je v publikaci nahlíženo jako na sousled jednotlivých fází ( fáze před zahájením evakuace – tato doba je stanovena v příručce tabelárně, fáze evakuace – průchod objektem – je zde odvozena od teorie pohybu proudu). Analyzuje specifické vlivy působící na evakuované osoby (např. snížená viditelnost, značení cesty, tepelný účinek, toxicita apod.). Příručka je vydávána asociací Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb) [315].
- **Fire Safety Engineerin – CIBSE Guide E.** (CIBSE, 2019)  
Příručka požárního inženýrství stanovující standardy pro bezpečnostní inženýrství a bezpečnostních opatření, s cílem snížit riziko újmy na zdraví, smrti a finančních majetkových ztrát na přijatelnou úroveň. Tato příručka stanovuje primárně standardy pro Velkou Británii. Vychází se základních požárních kódů a pokynů UK a je obohacena o další poznatky z jiných, často užívaných zahraničních zdrojů – kódy, standardy a požárně bezpečnostní pokyny (USA, Střední východ, Asie). Poslední vydání bylo doplněno také o nová opatření při navrhování fasád vysokých budov jako reakce na událost požáru bytového domu Grenfell v Kensingtonu v Londýně. Jedná se o čtvrté vydání této

publikace, která je vydávána pod záštitou Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) [149].

- **Evacuation Modelling Trends** (2016)  
Publikace shrnující nejnovější trendy v problematice modelování evakuace, která pokrývá hlavní aspekty modelování evakuace. Poskytuje tak úplné reference o tomto tématu – přehled definic a konceptů modelování, teorie lidského chování, přístupy jednotlivých nástrojů k simulacím, jejich vývoj a validace. Jsou zde uvedeny příklady simulací evakuace osob při různých pohledech a přístupech řešení. Mezi klíčová témata této publikace patří vliv a význam různých parametrů zapojených do ASET a RSET a jejich vzájemné interakce; nové scénáře a faktory pro budoucí vývoj modelů; problematika používání deterministických a stochastických přístupů; návrh využití evakuačních modelů pro podporu včasných rozhodnutí v reálném čase [132].
- **Egress Design Solutions: A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning** (Arup, 2007)  
Publikace obsahuje informace o správném návrhu evakuačních opatření pro zachování bezpečí všech osob i pro osoby se specifickými potřebami při nouzové situaci, plánování davového managementu, a to vše s důrazem na kvalitní návrh a funkční inženýrské řešení. Poskytuje řešení problémů s předepsanými funkčními požadavky dle norem a návrhů, s koordinací výstupních a nouzových systémů pro zajištění maximální bezpečnosti ve stavbách. Dále se věnuje historickým a nedávným tragickým požárům, kde došlo k úmrtí osob, a z těchto vyvozuje nová opatření. Příručka je primárně určená pro architekty, projektanty a byla sestavena inženýrskou společností Arup [540].
- **Introduction to Crowd Science** (G. Keith Still, 2014)  
Kniha není primárně zaměřena na proces evakuace, ale zkoumá rostoucí míru nehod a incidentů souvisejících s davem po celém světě. Nabízí materiály pro pochopení bezpečnosti davu ve formě příkladů získaných z více než dvaceti let zkušeností a stanovuje, jak může dojít k nehodám a incidentům v davu (konkrétně k hromadným úmrtím v přeplněných prostorech). Jsou zde představovány základní příčiny davových událostí, možnosti implementace techniky pro analýzu rizik davu a bezpečnostní opatření davu, která mohou pomoci minimalizovat, nebo dokonce eliminovat nežádoucí události úplně (→ disciplína a management davu) [522].
- **RIMEA** (RIMEA, 2016)  
Směrnice Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen je základním dokumentem pro evakuační analýzy aplikovaným v Německu. Směrnice vznikla v rámci výzkumného projektu RIMEA za účasti expertů z Německa, Rakouska a Švýcarska a je nadále podporována a vyvíjena stejnojmenným sdružením. Sdružení RIMEA zahrnuje na tři desítky členů, vedle univerzitních pracovišť také některé přední soukromé společnosti. Jedná se o velmi komplexní směrnici, která řeší proces tvorby modelů pěších a jeho simulace v celé šíři [465].
- **IMO Guidelines 1238** (International Marine Organization, 2016)  
Směrnice Revised Guidelines on Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships je britský předpis vydaný International Maritime Organization, který primárně slouží pro analýzu evakuace osob z velkých lodí. Obsah směrnice je podobný dokumentu RIMEA, je zde definována struktura evakuační analýzy a poskytuje rovněž informace o vstupních datech, reakční době a rychlosti pohybu osob. V další části předpisu jsou definovány základní evakuační scénáře pro ověření modelů, součástí jsou vzorové analýzy evakuace osob z lodí o více palubách a různých počátečních hustotách osob [241].
- **NIST Technical Note 1822** (NIST, 2013)  
Dokument The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models je aktuálně základním dokumentem pro vstupy, verifikaci a validaci modelů evakua-



ce osob v USA. Jeho autory jsou týmy z National Institute of Standards and Technology v USA a Lund University ve Švédsku. Tento materiál je oproti standardu RIMEA méně rozsáhlý a ne tak podrobný. Zaměřuje se spíše na obecnější doporučení a akceptační kritéria protokolu prokazujícího verifikaci a validaci modelu [474].

## C Dělení numerických modelů

### Dělení modelů evakuace osob

Numerické modely evakuace osob nabízejí v dnešní době možnost simulace pohybu evakovaných osob v prostoru a reálném čase, s ohledem i na specifické individuální charakteristiky osob. K dispozici je celá řada numerických modelů určených pro ztvárnění konkrétních scénářů nebo budov (účel – behaviorální chování, dopravní prostředky, nízkopodlažní budovy), ale také celá řada univerzálních modelů (bez omezení užití). Vše se odvíjí od možností modelu, jako je např. možná míra podrobnosti geometrie, měřítko, zohlednění různého chování osob a jejich pohybu, případně limity ztvárnění návrhových scénářů apod. Dle zmiňovaných faktorů uváděných již i v kap. 1.3.3 lze dělit modely do různých kategorií, které jsou vymezeny jmenovitě v práci Gwynne a Galea [196] či Kuligowski et al. [297], případně také ve zdrojích [483, 25, 303], z nichž je čerpáno. Jejich nejzákladnější dělení je uvedeno v následujících odstavcích, dle:

#### Dělení modelů dle nástroje a jeho metody modelování

Dělení s přihlédnutím k propracovanosti metod používaných pro výpočet evakuace osob.

- **Modely částečně behaviorální**

Model primárně vychází z principů modelu pohybu – lidé se pohybují z výchozího bodu do bodu cílového. Popisuje částečné chování lidí pomocí empirických údajů a jednoduchých rovnic (reakční dobu, specifické vlastnosti jedinců). Rovnice, kterými je model popsán, vycházejí z pozorování pohybu osob při běžných situacích. Nejčastěji se tyto modely užívají pro hodnocení doby evakuace v závislosti na předem stanovených parametrech a hypotézách [282, 283] – Software: FDS+EVAC [284], Simulex [505]

- **Modely pohybu (hydraulické)**

V modelech se osoby pohybují z jednoho místa na druhé zadané místo (východ), osoby automaticky reagují na okolní podmínky bez možnosti vlastní volby. Model neuvažuje s reakční dobou → reakce na vnější podněty (pokyn pro evakuaci) jsou okamžité. Volba směru a rychlosti osob se v modelu odvíjí od základních fyzikálních a geometrických parametrů, jako je dimenze prostoru a lokální hustota. Výsledkem bývají značně podhodnocené hodnoty času potřebného k evakuaci [202] – Software: Wayout[561].

- **Behaviorální**

Modely uvažující jednotlivé lidi jako entity s určitým individuálním chováním a fyzickou zdatností (věk, mobilita). Osoby v modelu mohou samovolně reagovat na podněty a překážky (ohrožení požárem, zatarasení východu, reakce na okolní osoby), nebo mohou osoby navzájem reagovat mezi sebou (předání informace, skupinové chování). Jedinci mají možnost samostatného rozhodování (reakční doba, volba únikového východu). Pomocí těchto modelů lze nejvěrohodněji poskytnout dobu evakuace nebo posuzovat rizika [450, 211, 175] – Software: VISSIM [442], Pathfinder [406], EXODUS [178], STEPS [519].

#### Dělení modelů dle reprezentace prostoru

Modely využívají různého ztvárnění prostoru pro pohyb osob v modelu a můžeme je rozdělit následovně [512]:

- **Model s hrubou sítí**

Ztvárňuje modelovaný prostor jako ucelené funkční celky nebo zóny (místnosti, koridory, schodiště atd.), pohyb osob je řešen jako přechod mezi těmito celky.

- **Model s jemnou sítí**

Rozdělení prostoru do relativně malých buněk (nody), které odpovídají průměrným reálným nárokům na prostor osoby (čtvercová síť s velikostí nodu cca  $0,5 \times 0,5$  m). Po této síti se osoby pohybují volně, jen s tím omezením, že v jedné buňce může být

vždy jen jedna osoba (stavy buňky – plná/prázdná). Síť svým tvarem kopíruje dispozici a vybavení stavby jen v takovém detailu, který pojme měřítko sítě – [86, 178, 98].

- **Model se spojitým prostorem**

V prostoru nedochází k diskretizaci a celá plocha je reálně ztvárněná triangulační spojitou 2D sítí. V modelu lze vytvářet věrohodnou interpretaci prostoru včetně menších objektů (nábytku), omezení a překážek. Osoby nejsou sítí nijak omezovány, mohou se přirozeně pohybovat a jejich poloha je aktualizována zcela přesně.

### Dělení modelů dle perspektivy

Dle hlediska jak model vnímá osoby v prostoru a v jaké míře podrobnosti:

- **Individuální perspektiva osoby** – vnímá každou osobu v modelu jako samostatné jedince/skupiny, o kterých jsme schopni získat individuální informace a analyzovat přesný dopad na konkrétní osoby (přesná lokace po dobu evakuace, dopad toxických látek v konkrétní části) [424].
- **Globální perspektiva osoby** – vnímá osoby v modelu jako ucelenou skupinu osob. V tomto měřítku je těžké zkoumat informace na úrovni jedinců, informace a dopady jsou zde průměrovány a zobecněny pro celou skupinu [593].

Dle hlediska, jak uživatel vnímá a v jaké míře podrobnosti zná prostor, ve kterém se nachází:

- **Individuální perspektiva prostoru** – jedná se o osobní zkušenost a znalost prostoru konkrétní osobou, která užívá prostor. Každý jedinec má svoje individuální informace a podle nich volí cestu k východu (např. znalost pouze hlavního východu, informace i o únikových cestách, informace i o služebních východech – zaměstnanec).
- **Globální perspektiva prostoru** – všechny osoby modelu mají komplexní informace a přehled o detailech prostoru, ve kterém se nacházejí (celkové délky evakuačních cest, rozložení všech východů), a podle těchto informací volí nejlepší možnou cestu [406].

### Dělení modelů dle behaviorálních vlastností

Modely užívají pro ztvárnění vlastností a chování evakuovaných osob konkrétních metod, které rozlišujeme následovně:

- **Bez modelu chování**

V modelu je simulován pouze pohyb osob bez chování, osoby jsou ovlivňovány základními fyzikálními a geometrickými parametry.

- **Implicitní chování**

Model je ovlivněn implicitně přiřazenými charakteristikami osob (např. reakční doba).

- **Podmíněné chování**

Osobám v modelu jsou přiřazeny schopnosti, díky kterým jsou schopny reagovat na měnící se situaci. Vznikající reakce osob jsou předem přesně dány předepsanými pravidly a jejich průběh je stanoven na základě vyhodnocení místní situace. Všechny osoby v modelu jsou ovlivněny stejně.

- **Pravděpodobnostní chování**

Model využívá principu podmíněného chování obohaceného o stochastický prvek, který umožňuje variovat chování osob v modelu. Velká část pravděpodobnostních modelů před začátkem simulace provede pravděpodobnostní rozdělení – reakční doby, rychlosti, reakce na kouř atd. Díky náhodným jevům dostáváme při opakovaném spuštění modelu odlišné výsledky blížící se reálným očekáváním [586].

- **Agentní technologie**

Modely popisují každého jedince individuálně, považují ho za samostatnou entitu (agenta) a definují přesně jeho vlastnosti. Jeho chování se odvíjí od interakcí s ostatními agenty (přirozená tendence se vyhnout srážce) a interakcí mezi nimi a okolím (vyhnout se nebezpečí, hledání nejbližšího východu) [500, 92]. Modely, simulující lidskou inteligenci během evakuace osob, jsou z velké části založené na principu umělé inteligence

(AI). V současnosti se jedná o nejvěrnější přiblížení modelu k realitě a zároveň i nejvíce využívaný přístup [470, 472].

### Dělení modelů dle ztvárnění pohybu

Většina modelů přiřazuje (automaticky/uživatelem) osobám základní rychlosti (jako konstantní hodnoty nebo rozložením), kterou se pohybují v rámci modelovaného prostoru. Tyto rychlosti se pak v průběhu simulace mění v závislosti na vznikajících okolnostech a geometrii – místa s vysokou hustotou, úzká místa, vznik kongescí, zdržení. U mnoha modelů se setkáváme s kombinací několika způsobů interpretace pohybu (potenciálová mapa + osobní vzdálenost, celulární automata + nejbližší volná buňka). Rozdělení metod a jejich přístupu k modelování pohybu a rychlosti osob je následné:

- **Korelace na základě hustoty osob**

Výpočet pohybu závisí na hustotě – rychlost a intenzita pohybu se odvíjí od hustoty osob v daném prostoru. Je-li hustota nízká, osoby se pohybují volně a jejich rychlosti se blíží maximu. Naopak s rostoucí hustotou dochází k poklesu rychlostí osob. Základní principy modelu byly stanoveny v pracích [173, 410, 408, 433].

- **Definice uživatelem**

Pohyb osob je definován přímo zadanými hodnotami rychlostí, které uživatel stanoví pro určité části geometrie (rychlost na schodech dolů, rychlost na schodech nahoru, rychlost pro rovinu).

- **Osobní vzdálenosti**

V modelu má každá osoba určený svůj vlastní osobní prostor a distanci od ostatních cestujících, překážek a stěn. Tyto vzdálenosti si modelované osoby snaží udržet po celou dobu pohybu, což má za výsledek změny rychlosti.

- **Potenciálová mapa**

Pohyb osob modelu je navigován přes mapu potenciálu tvořenou jednotlivými buňkami sítě. Každá buňka má přiřazený tzv. potenciál – atraktivitu místa pro pohyb (buňky s nižšími hodnotami potenciálu jsou pro pohyb výhodnější než ty s vysokými). Osoby vyhledávají cestu s nejnižším odporem (nejnižšími hodnotami buněk). Potenciál trasy lze změnit pomocí proměnných, např. trpělivost cestujícího, přitažlivost východu, známost cesty (obvykle jsou určeny uživatelem) [178].

- **Nejbližší volná buňka**

Osoba volí pro pohyb trasu vždy po nejbližší volné buňce. Je-li buňka obsazena jiným cestujícím, volí sousední volnou buňku. Není-li žádná ze sousedních buněk volná, nebo by byla náhradní „objízdná“ trasa příliš náročná, musí osoba vyčkat, než se vhodná sousední buňka uvolní [320].

- **Podmíněný přístup**

Pohyb osob závisí na podnětu od okolí nebo okolních osob (vznik požáru, osoba sdělující informaci, osoba poskytující pomoc). U těchto modelů není kladen velký důraz na přetížení prostoru.

- **Funkční analogie**

Pohyb osob v modelu je odvozen od analogie s jiným jevem (magnetické pole, pohyb tekutin) a je ztvárněn jejich pohybovými rovnicemi.

- **Propojení s dalším modelem**

Samotný pohyb je počítán externím nástrojem a vzniklé výstupy jsou následně využity jako vstupní data pro model evakuace osob.

- **Získávání znalostí**

Pohyb je založen pouze na obecných znalostech o evakuačním procesu a samotná doba evakuace se neuvažuje. Výpočet se zaměřuje pouze na oblasti přetížení, úzkých míst apod.

- **Neomezený tok**

Model pohybu je založen na výpočtu volného a neomezovaného proudu, díky kterému stanovujeme dobu evakuace; ihned poté je provedena korekce (zdržení a další parametry) s cílem získání konečné realistické doby evakuace.

- **Celulární automata (CA)**

Osoby v modelu se pohybují po síti buněk a jejich pohyb je řízen matematickou přechodovou tabulkou [578, 417].

## Dělení modelů požáru

Numerické modely řeší požární scénáře (úlohy) pomocí evolučních iteračních schémat, přičemž průběh požáru je popsán fyzikálními a chemickými ději [429]. Numerické modely dělíme podle jejich přístupu a možností výpočtu do třech základních kategorií:

### Zjednodušené výpočtové modely (algebraické modely)

Zjednodušené výpočtové modely jsou jednodušší modely realizované pomocí tabulkových procesorů nebo triviálních programů, pomocí kterých určujeme empiricky základní procesy dynamiky požáru (přenos tepla, hoření, velikost plamene, rychlost oblaku zplodin hoření atd.) [303] – Software: Fire Dynamics Tools (FDTs) [160].

### Pravděpodobnostní modely

Model nahlíží na požár jako na nahodilý jev (neznámý, rozvoj požáru je řada náhodných událostí) a užívá ve svých rovnicích stochastické prvky, které vnáší do simulace typickou nedostatečnou znalost počátečních podmínek. V případě, že opakujeme simulaci za zachování stejných počátečních podmínek několikrát po sobě, dostáváme vždy mírně odlišné výsledky. Výpočty probíhají zjednodušeným způsobem s omezenými možnostmi. Podle užívaných výpočetních principů je dále dělíme na [303] [558]:

- **Síťové modely** – model je tvořen ze samostatných uzlů, mezi kterými jsou vazby utvářející síť (ke každému uzlu jsou přiřazeny jednotlivé informace popisující požární stavy – účinnost požárního systému, detekce požáru atd.). Přejít z jedné do druhé buňky je dán pravděpodobností stanovenou na základě statistiky nebo dle odborného inženýrského úsudku.
- **Statistické modely** – model vyhodnocuje pravděpodobnost, s jakou se vyskytne událost (vznik požáru) na základě statistických dat a dále pokračuje ve vyhodnocování následujících událostí (vztahu vzniklého požáru k aktivaci samočinného hasícího systému). Při každém vyhodnocování události definujeme pravděpodobnostní rozdělení (normální rozdělení, Poissonovo rozdělení nebo exponenciální rozdělení).
- **Simulační modely** – model je kombinací pravděpodobnostního a deterministického modelu, který na požár nahlíží jako na jev se známým průběhem. Vstupní data jsou do modelu dodávána jako náhodné proměnné (otevřené/uzavřené okno, prvek geometrie hoří/nehoří). Tento model bývá využíván například k simulaci funkce požárně bezpečnostního zařízení a jeho vlivu na průběh požáru. Výsledky jsou vyhodnocovány z pohledu četnosti a rozsahu výskytu hodnot.

### Deterministické modely

Model stanovuje reálný průběh (nezabývá se pravděpodobností vzniku), a to pomocí předem nadefinovaných matematických rovnic, které popisují fyzikální a chemické děje. Modely pracují na principu rozdělení prostoru na výpočetní oblasti (tzv. kontrolní objemy), mezi kterými probíhají vzájemné výpočetní interakce. V modelu pracujeme s konkrétními podmínkami vzniku požáru – tzv. požární scénáře. Při zachování okrajových podmínek dospějeme při výpočtu vždy ke stejným výsledkům.

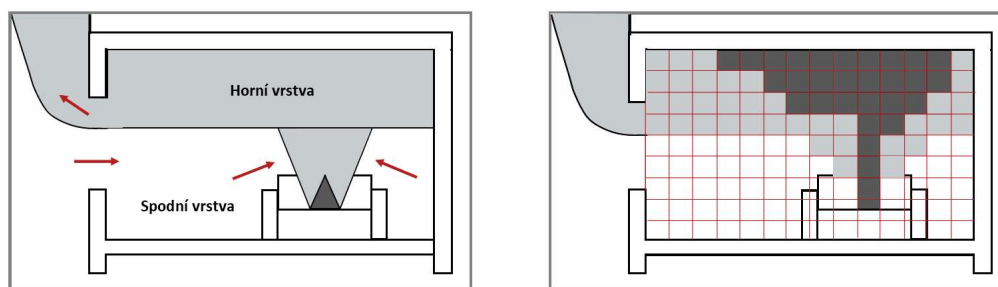
- **Zónové modely**

Jedná se o modely, které vyjadřují zjednodušeně ideální průběh požáru v uzavřené

místnosti. Pracují na principu rozdělení prostoru na tzv. homogenní zóny – vrstvy (viz obr. C.1 a)), kde každá vrstva má stejnou teplotu, hustotu a koncentraci plynů. Výpočetní interakce mezi zónami fungují na principu parciálních diferenciálních rovnic pro zachování hmoty a energie mezi jednotlivými vrstvami [303, 558, 87]. Zónové modely lze dále dělit na:

- **Dvouzónový model** užíváme pro popsání průběhu počátečního rozvoje požáru do doby flashoveru (model má dvě vrstvy – spodní studenou, kterou je přiváděn vzduch otvory, a horní horkou, která se pozvolna zahřívá stoupajícími zplodinami požáru).
- **Jednozónový model** je užíván pro popis fáze požáru po flashoveru, kdy se prostor dá považovat za jednu celistvou zónu.

Výhodou zónových modelů je jejich zjednodušení a díky němu i menší časová a hardwarová náročnost. Naopak nevhodnost použití zónových modelů je pro rozlehlé místnosti, prostory s jedním převládajícím rozměrem (tunely, chodby, šachty) a scénáře, u kterých je nutné zohlednit ohyb plynů (zdroj je zjednodušen na kužel zplodin hoření – tzv. fire plum, není zde uvažována rovnice zachování hybnosti) – Software: CFAST [411], ARGOS [34], OZONE [77], BRANZFIRE [556], CCFM[112]



Obr. C.1: Porovnání modelů – a) model typu zónový; b) model typu pole (zdroj: přepracováno dle [87])

#### • Modely typu pole (metoda CFD)

Výpočetní metody CFD (Computational Fluid Dynamic) jsou velmi účinným nástrojem využívaným v rámci různých vědních odvětví, jako jsou např. lékařství – proudění krve [360]; letectví – aerodynamika a design [481, 249]; urbanismus – proudění vzduchu mezi stavbami [356], mikroklima města [535]; stavebnictví – proudění na jezech [402], vnitřní prostředí budov [103], [363], VZT [328] apod. Pomocí metod CFD lze simulovat proudění tekutin, přenos tepla a hmoty (či působení látek mezi sebou), což se ukázalo i jako spolehlivé, robustní a nákladově efektivní metoda pro modelování požárních událostí [250, 42]. Základním principem CFD modelů je rozdělení výpočtové oblasti na velký, avšak konečný počet buněk (suboblastí), tzv. kontrolních objemů (viz obr. C.1 b) a C.2).



Obr. C.2: Ukázka ztvárnění modelu požáru a toxicity – tunelový úsek metra (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11, 392] přepracováno).

Pro tyto objemy jsou následně řešeny rovnice zachování hmoty, částicového složení, hybnosti a energie (vychází z Navier-Stokesových třídímenzionálních časově závislých neli-



neární parciální diferenciální rovnic – rovnice kontinuity a transportní rovnice [153, 3], dále jen jako N-S). Rovnice jsou řešeny samostatně pro každou buňku výpočetní oblasti a pro konkrétní časový krok, kde výsledkem je distribuce pozorovaných veličin v prostoru a čase (vývoj lze sledovat i lokálně). Metoda CFD při modelování požáru je součástí výpočetního jádra řešícího pouze základní mechanismy požáru v modelu typu pole, jako jsou přenos hmoty, energie a hybnosti [303]. Pomocí CFD nejsou řešena požární specifika, proto i pro modely typu pole existují rozšíření (tzv. požární submodely), které řeší specifické úlohy zaměřené na konkrétní problém požáru (např. submodel spalování – popis hoření, jako řetězové heterogenní chemické reakce při které dochází ke vzniku a zániku částic, submodel přenosu tepla sáláním – popisující přenos tepelného toku radiací [265] apod.) [558]. Dalším příkladem může být submodel turbulence využívající Reynolds-Averaged N-S (RANS, R-časové středování) [545], Direct Numerical Simulations (DNS) [312] či Large Eddy Simulation (LES) [452], který popisuje turbulentní směšování plynného paliva a produktů hoření s okolním prostředím, je např. i součástí Pyrosim, což je široce používaný open-source kód pro požární simulace [448] užitý i pro tuto práci. V rámci požárních submodelů lze simulovat pohyb kouře, teplotní, rychlostní či tlaková pole, šíření plamene, požární větrání, skrápěcí systémy apod. Do výpočtů lze také zahrnout i různé vlivy (teplotní gradienty, venkovní tlaky vzduchu, detekci kouře, prvky aktivního hašení aj.) [351], jedná se pak o spřaženou simulaci.

Celkovým výstupem požárních modelů jsou data o šíření požáru, kouře a toxických látek, včetně jejich základních parametrů, jako je rychlost uvolňovaného tepla, teplota, rychlost proudění, obsah spalin a viditelnost [136, 558]. Pomocí těchto modelů lze řešit bezpečnost únikových cest [10], optimalizace rozmístění detektorů kouře [350], větrání [384], ověřovat lze odolnost materiálu [324, 71] a vybrané aspekty evakuace osob [135, 11, 10] – Software: FDS (Fire Dynamics Simulator) [284], SmartFire, Fluent [9], Sofie [56], FLACS [415], Pyrosim [448].

## D Související výzkumné projekty a spolupráce

Související výzkumné projekty, na kterých autorka při svém studiu spolupracovala, jsou blíže popsány níže a samotné poznatky z nich se staly jedním ze základních východisek její práce.

### Související výzkumné projekty

- **VG20132015120 – Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru (SAFEVAC, 04/2013-12/2015)**

Projekt byl zaměřen na analýzu evakuačního procesu osob ze shromažďovacích prostorů v průběhu velkých sportovních a společenských událostí s využitím numerických simulací davu, šíření kouře a požáru. Cílem bylo navržení opatření vedoucích ke zvýšení bezpečnosti evakuovaných osob i zasahujících jednotek, k efektivnějšímu využití požární signalizace, únikových východů a dalších prvků bezpečnostního systému. Jedním z podpůrných výsledků byla aplikace SAFEVAC [30] určená pro multikriteriální parametrickou a citlivostní analýzu výsledků simulace modelu evakuačního procesu – [26, 12, 13].

- **TA03030491 – Optimalizace technologického vybavení tunelů pozemních komunikací se zřetelem na bezpečnost a cenu (HADES, 01/2013-12/2015)**

Projekt byl orientován na kvantitativní hodnocení míry rizik v tunelech pozemních komunikací s cílem optimalizace vybavení tunelů, minimalizace investičních a provozních nákladů při zachování přiměřené míry rizika pro uživatele, se zřetelem k obecným technickým podmínkám *TP229 – Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací*. Jedním z výstupů tohoto projektu byl program CAPITA [285], jehož základem byl numerický model evakuace osob. Tento model umožňoval uživateli variovat řadu vstupních parametrů evakuace, jako např. vzdálenost únikových východů mezi sebou nebo nemožnost využití vstupního portálu tunelu. Výsledkem pak bylo číselné zhodnocení míry rizika v ordinální stupnici nebo přímo vyčíslení počtu usmrcených osob pro konkrétně definovanou uživatelskou kombinaci (technické vybavení, počet zařízení, vzdálenosti východů, počty evakuovaných atd.).

– Spoluřešitelé: *ELTODO dopravní systémy, s. r. o., ELTODO, a. s., České vysoké učení technické v Praze/Fakulta dopravní*

- **VI20162019034 – Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb (VERIFIRE, 01/2016-12/2019)**

Projekt byl zaměřen na problematiku PBR staveb, návrhových modelů požáru, hašení a evakuace osob. Hlavními cíli bylo ověření konstrukční celistvosti, požární bezpečnosti (zlepšení zkušebních metod, zlepšení zkoušení požární ochrany, zavedení požární návrhu jako celku) a aplikace nových metod při tvorbě požárního návrhu. Stěžejní témata projektu byla vydána ve formě čtyř metodik (*Vstupní data do modelů požáru* [205], *Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů*, [135], *Metodika využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb*, [21], *Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany* [302]), které jsou primárně určeny pro uživatele z řad českých projektantů, výrobců stavebních konstrukcí a materiálů, preventistů a vyšetřovatelů požáru HZS. Popisují moderní softwarové nástroje, jejich využitelnost pro analýzu dílčích PBR staveb, ověření jejich spolehlivosti a návody na jejich praktickou aplikaci.

– Spoluřešitelé: *České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební (prof. Ing. František Wald, CSc.), Generální ředitelství HZS – Technický ústav požární ochrany (Ing. Ondřej Suchý, Ph.D.), Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství (doc. Ing. Petr Kučera, Ph.D.)*

- **TH02010372 – Systém pro monitorování, vyhodnocování a řízení proudů chodců a cyklistů (01/2017-12/2019)**

Cílem projektu byl vývoj systému pro sledování, vyhodnocování a řízení toků chodců a cyklistů s využitím matematické analýzy stereoskopického obrazu a pasivního sledování bezdrátových sítí. Výsledky mohou být využity k optimalizaci silně zatížených míst veřejné i neveřejné infrastruktury za běžných situací (dopravní uzly, sportovní a výstavní areály, pěší zóny, rozptylové plochy apod.), případně jejich nouzové evakuace při ohrožení. V rámci projektu vnikla metodika [14] na podporu zavedení těchto pokročilých metod analýzy obrazu pro extrakci dat o pohybu a následné využití těchto dat v mikroskopických modelech pohybu pěších.

– Spolupřítel: *RCE systems, s. r. o. (Ing. David Herman), Ing. Ivo Herman, CSc.*
- **TH04010377 – Vývoj metod identifikace a ochrany měkkých cílů dopravní infrastruktury pro zvýšení jejich bezpečnosti a odolnosti před teroristickým útokem (01/2019-12/2022)**

Projekt je zaměřen na vývoj metodiky a souvisejících nástrojů pro identifikaci měkkých cílů (MC) a zvýšení jejich ochrany v sektoru dopravy a vychází z „Koncepce ochrany MC pro roky 2017 až 2020“ schválené vládou 19. dubna 2017. Hlavním výstupem projektu je poskytnutí účinných nástrojů Ministerstvu dopravy ČR (MD ČR, aplikační garant) ve formě metodiky, SW aplikace a mapového podkladu. Díky těmto nástrojům budou moci podřízené složky MD ČR identifikovat, klasifikovat a případně i vytvářet nová bezpečnostní opatření pro ochranu MC ve své působnosti.

– Spolupřítel: *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky (Ing. Dora Lapková, Ph.D.)*
- **TL02000103 – Kognitivní psychologie a prostorová syntaxe ve virtuálním prostředí pro agentní modely (RAINCOAT, 01/2019-12/2022)**

Projekt se zaměřuje na ověření možnosti propojení formalizovaného popisu prostoru (tzv. space syntax) a zohlednění prostorového účinku na chování jedinců při užití navigačního systému v budovách pro účely tvorby a testování virtuální reality (VR) při simulaci. Tyto poznatky budou užity pro zpřesnění simulačních nástrojů (agentních modelů). Zaměření na VR jako nástroje pro testování vlastností návrhů stavebních objektů s věrohodnou reprezentací psychologických a sociálních faktorů individuálního i skupinového chování osob umožňuje efektivně analyzovat vzniklá omezení a tím velmi významně zvýšit kvalitu návrhu. Projekt je zaměřen na užití VR v budovách s velkým počtem osob (např. školy, stadiony, dopravní uzly).

– Spolupřítel: *Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta (doc. RNDr. Petr Kubíček, CSc.)*
- **TL02000352 – Klasifikace sociálně-psychologických parametrů osob prostřednictvím umělé inteligence a strojového vidění pro potřeby ochrany osob v reálném čase (01/2019-12/2021)**

Projekt je zaměřen na klasifikaci sociálních a psychologických parametrů osob vyskytujících se ve stavbách se slabou ochranou a vysokou návštěvností, jakožto potenciálních cílů možných útočníků (tzv. měkký cíl, (MC)). Zmiňované parametry budou získávány z běžných videozáznamů, pořízených pomocí stávající dohledové infrastruktury provozatelů dotčených objektů, a následně zpracovány pomocí metod strojového vidění (MV, machine vision), hlubokých neuronových sítí a psychologické analýzy. Těmito metodami je například možné stanovit statistické rozložení reakční doby osob, která je velmi důležitým faktorem pro bezpečnostní dohled jak při nouzové situaci, tak i při běžném provozu.

– Spolupřítel: *Univerzita Karlova/ Fakulta sociálních věd (JUDr. PhDr. Tomáš Karásek, Ph.D.), Policejní akademie České republiky v Praze (prof. Ing. Rudolf Urban, CSc.), RCE systems, s. r. o. (Ing. David Herman)*

- **VI20192022118 – Ochrana měkkých cílů v bezpečnostním prostředí ČR (07/2019-12/2022)**

Projekt je reakcí na zhoršenou bezpečnostní situaci z pohledu terorismu v Evropě. Zaměřuje se na komplexní výzkum a vývoj nástrojů, analytických metod a softwarové podpory pro vymezení ochrany MC, shromažďovacích prostor a objektů s výskytem vysokého počtu osob obecně. Výstupy projektu poskytnou metodické a analytické zázemí pro potřeby resortů, orgánů samosprávy nebo konkrétních provozovatelů, odpovědných za ochranu měkkých cílů.

– Spoluřešitelé: *T-SOFT, a. s. (Ing. Michaela Melicharová), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební (prof. Ing. František Wald, CSc.), Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky (doc. Ing. Martin Hromada, Ph.D.), Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství (doc. Ing. Petr Kučera, Ph.D.)*

- **TJ04000232 – Efektivní časoprostorové predikce s využitím metod strojového učení (ESPRED, 06/2020-05/2022)**

Projekt je zaměřen na řešení komplexních časoprostorových úloh pomocí metod strojového učení zejména v oblasti komfortu pohybu chodců. Pomocí agentních modelů je algoritmicky vytvořena obsáhlá trénovací množina dat (databáze), na základě které je možné vhodnou metodou strojového učení predikovat např. vysokou hustotu osob na m<sup>2</sup>, kvalitu pěší dopravy, tvorbu front, čekací časy, počty osob v budovách v reálném čase, a nahradit tak časově náročný výpočet agentních modelů. Cílem je vytvořit SW nástroj zefektivňující časoprostorové predikce pohybu osob, upozornit, ve kterých místech analyzované geometrie by mohlo docházet ke snižování komfortu budoucích uživatelů, a tím usnadnit návrhu budov. Využitím umělé inteligence (AI) dochází k okamžité analýze nově navrhovaných budov a k celkovému zefektivnění procesu návrhu ve stavebnictví. Výstupy projektu (databáze, SW nástroj i metodika doporučených postupů) budou uplatnitelné jak pro danou problematiku, tak i obecně v jakémkoli odvětví, které pracuje s časoprostorovými úlohami.

– Spoluřešitelé: *České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební (Ing. Jana Vacková), Vysoké učení Technické v Brně, Fakulta stavební (Ing. Martina Kratochvílová, Ing. Jiří Apeltauer, Ph.D., Ing. Ondřej Uhlík)*

## Spolupráce s centrem AdMaS

Jedná se o moderní centrum vědy a komplexní výzkumnou instituci v oblasti stavebnictví, která je součástí Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Zaměřuje se na výzkum, vývoj a aplikace pokročilých stavebních materiálů, konstrukcí a technologií nejen v oblasti stavebnictví, ale i dopravních systémů a infrastruktury měst a obcí.

Centrum AdMaS disponuje moderními technologiemi i pro oblast požární bezpečnosti, např. softwarovými nástroji pro numerické simulace evakuace osob, požáru a šíření toxických látek, celou řadou zařízení pro vykonávání zkušebních metod reakce stavebních výrobků na oheň. Konkrétně disponuje zařízeními, jako jsou: požární pec pro studium chování materiálů za vysoké teploty (umožňuje zatěžování vzorků různými teplotními křivkami např. podle ČSN EN 1363-1), pec pro testování nehořlavosti stavebních materiálů (zkouška nehořlavosti dle ČSN EN ISO 1182), pec pro testování spalného tepla (určení kalorických hodnot dle ČSN EN ISO 1716), pec pro zkoušení podlahových krytin (stanovení chování při hoření užitím zdroje sálavého tepla dle ČSN EN ISO 9239-1), pec pro zkoušení vystavení tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu (zkouška SBI – Single Burning Item – EN 13823), pec pro zkoušení zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene (zkouška malým zdrojem plamene dle ČSN EN ISO 11925-2).

Ve spolupráci s centrem AdMaS byla realizována celá řada našich projektů aplikovaného výzkumu a vývoje v požárně bezpečnostní a bezpečnostní oblasti, jako je např. *VG20132015120*

– *Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru, TA03030491 – Optimalizace technologického vybavení tunelů pozemních komunikací se zřetelem na bezpečnost a cenu (HADES)* aj. Dále v průběhu naší spolupráce s centrem Ad-MaS bylo zpracováno několik odborných analýz a posouzení staveb, jako jsou např. *pavilon EXPO 2015, Tunel Zvěrotice, Zemský stadion Brno* ad. (blíže rozvedeno v kap. 3.3), pro které byly využity agentní numerické modely evakuace (pohybu) osob a CFD modely šíření požáru a toxicity staveb.

## E Vstupní data pro numerický model evakuace osob

Pro účely aktivního zavedení a užívání NM v praxi je zde uvedena ověřená sada vstupních dat pro popis osob v NM. Tato základní sada byla postupně sestavena a testována v rámci dílčích modelů za účelem využití pro modely jednotlivých referenčních staveb. Uvedená data byla čerpána především ze zahraničních zdrojů uváděných v Příloze B, nebo přímo citovaných v textu. V souladu s normovými požadavky ČSN bylo pro uváděné parametry provedeno zhodnocení, že užitím těchto vstupních dat nedochází k nepřijatelnému ovlivnění výsledků na stranu nebezpečnou. Mezi ty nejzákladnější vstupní data pro NM evakuace osob patří zejména: rozměry lidského těla, individuální prostor, složení davu, rychlost osob, reakční doba, obsazenost a rozmístění osob.

### Rozměry lidského těla

Vzhledem ke skutečnosti, že v jednotlivých částech světa jsou proporce lidského těla rozdílné a každá osoba má individuální prostorové nároky na velikosti distancí (tzv. komfortní zóny – blíže viz odst. *Osobní prostor*), vznikla snaha rozměry lidského těla zobecnit a kategorizovat. Pro tuto práci byly primárně vybrány standardy rozměrů lidského těla pro evropské země. Z tab. E.1 vyplývá, že plocha elipsy těla se pohybuje v intervalu 0,20–0,26 m<sup>2</sup>, čemuž odpovídá hustota 4–5 os·m<sup>-2</sup> [521].

**Tab. E.1:** Rozměry lidského těla v evropských zemích s ohledem na pohlaví a původ jedince (zdroj: přepracováno z [521])

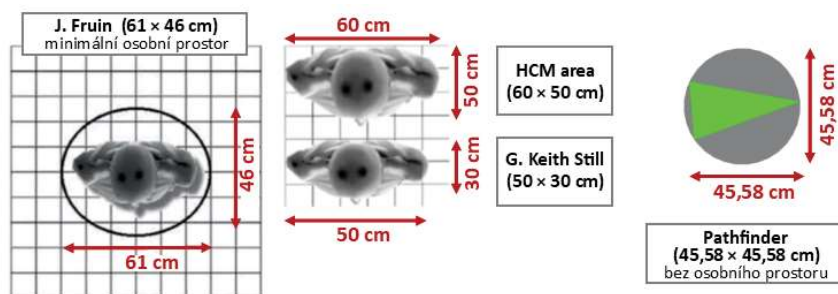
Země	Rozměry lidského těla (žena/muž)		
	Šířka ramen [cm]	Hloubka těla [cm]	Plocha [m <sup>2</sup> ]
Velká Británie	51,0/51,0	32,5/32,5	0,26/0,26
Polsko	41,0/47,5	28,5/27,5	0,21/0,18
Francie	47,0/51,5	29,5/28,0	0,23/0,22
Švédsko	42,5/51,0	30,0/25,5	0,20/0,21
Švýcarsko	47,0/51,5	29,5/28,0	0,22/0,23
<b>Průměr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

### Individuální prostor

Každý jedinec zaujímá určitý minimální prostor, který je popisován tzv. elipsou těla („body ellipse“), viz obr. E.1. Tento koncept byl poprvé zaveden v roce 1971 Johnem J. Fruinem [172], který ve své práci tuto elipsu popisuje jako eliptickou křivku znázorňující půdorysný rozměr dospělého oblečeného muže, s osobním prostorem zabraňujícím přímému kontaktu pro 95% percentil. Elipsa těla podle Fruinna má rozměry 46 cm (kratší osa), 61 cm (delší osa) a její plocha je 0,22 m<sup>2</sup>.

Dalšími studii, zabývajícími se rozměry těla osob, jsou práce S. Pheasantem [421] (osy elipsy – 50 cm, 60 cm) a G. Keith Stilla [521] (osy elipsy – 50 cm, 30 cm; plocha elipsy – 0,417 m<sup>2</sup>), které zohledňují i pohlaví osob a jejich národnost.





**Obr. E.1:** Porovnání elips těla v porovnání se ztvárněním osoby v nástroji (zdroj: vlastní, upraveno a přepracováno z [172, 521]).

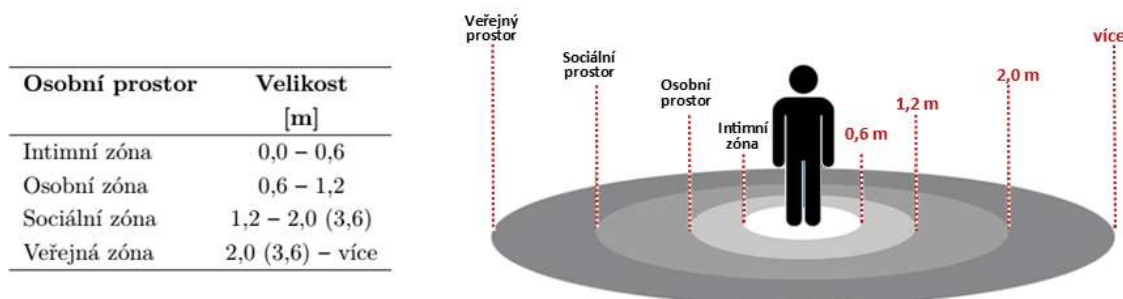
Uvedené hodnoty jsou široce akceptovány v inženýrské praxi, kde slouží nejen pro evakuační modely, ale i pro navrhování staveb, nebo jsou východiskem pro stanovení standardů (např. Pheasantova elipsa je východiskem pro standardy v USA, viz tab. E.2).

**Tab. E.2:** Porovnání elips těla dle uznávaných standardů (zdroj: [172, 521, 421])

Autor/ Zdroj	Země	Rozměry těla
Fruin (1987)	USA	0,33 m × 0,58 m
Still (2000)	UK	0,30 m × 0,50 m
US-HCM 2010	USA	0,45 m × 0,60 m
TCRP Report 165	USA	0,50 m × 0,60 m

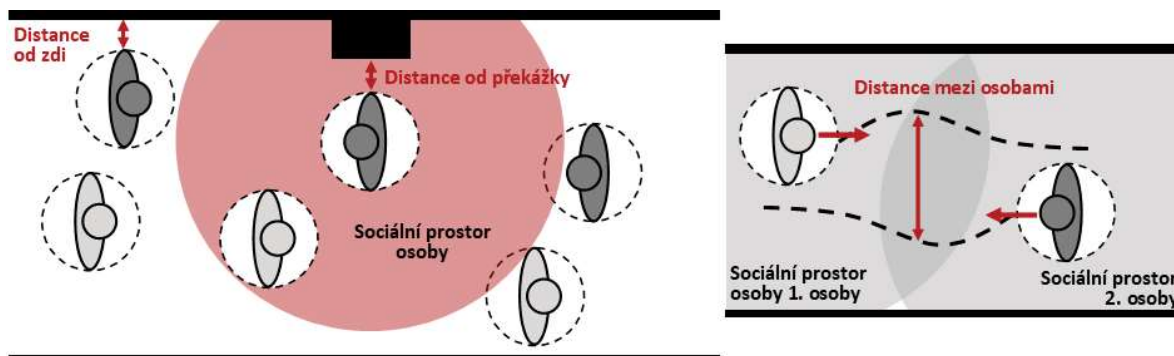
## Osobní prostor

Rozměry modelované osoby také velice úzce souvisí s jejím osobním prostorem, který si tato udržuje od překážek, zdí i ostatních osob (popisovaný v sociální psychologii jako proxemika). V rámci proxemiky rozlišujeme čtyři základní zóny [206, 306] uvedené v tab. E.2. Pro modelování pohybu s vzájemnými interakcemi osob jsou nejdůležitější první tři zóny (obr. E.2). Tyto vzdálenosti jsou u každého člověka individuální a odvíjejí se od celé řady faktorů – národnosti, pohlaví, typu prostoru (dopravní prostředek, ulice), povahy osoby apod.



**Obr. E.2:** Přehled zón osobního prostoru člověka a jejich znázornění dle definice Edward T. Hall [206] (zdroj: vlastní, přepracováno dle [206, 579])

Velikost osobní zóny jedince má velký vliv na samotnou dynamiku pohybu osob. Narušení osobních zón okolních cestujících (nebo naopak osobního prostoru jedince) vede často ke změně rychlosti či směru chůze → davem prochází neustálé posloupnosti reakcí chodců, kde jedinci reagují na osobní prostory druhých a přizpůsobují tomu svůj pohyb. Je nutno brát zřetel na skutečnost, že tyto rozměry jsou pro krizové situace, kde osobám hrozí nebezpečí, značně odlišné (statické čekání ve frontě/dynamické přechání v davu – obr. 1.6).



**Obr. E.3:** Schéma dodržování osobního prostoru a distancí od překážek (zdroj: vlastní, přepracováno dle [206, 579])

V nástrojích lze zohlednit i tyto skutečnosti, a to nastavením parametrů: vzdálenost od zdi (vzdálenost, kterou se osoby snaží udržet od stěn a překážek), komfortní vzdálenost (vzdálenost, kterou se osoby snaží udržet navzájem od ostatních osob) – např. viz tab. E.3.

**Tab. E.3:** Distance od překážek a ostatních lidí při evakuaci, dle defaultního nastavení (zdroj: z [406])

	Osobní prostor člověka (default) [m]
Vzdálenost od překážek a stěn	0,15
Vzdálenost od ostatních osob v rámci davu	0,08

Další možnosti distančních vzdáleností, které lze aplikovat do modelu, jsou uvedeny např. v [440], blíže viz tab. E.4.

**Tab. E.4:** Hodnoty distančních šířek využívané při výpočtu průtoků osob (zdroj: z [440])

Přirozená distance od překážky	
Prvek	Distance [m]
Židle, lavice (hlediště)	0,000
Zábradlí, madlo	0,089
Překážky	0,100
Schody, dveře	0,150
Koridory, rampy, zdi	0,200

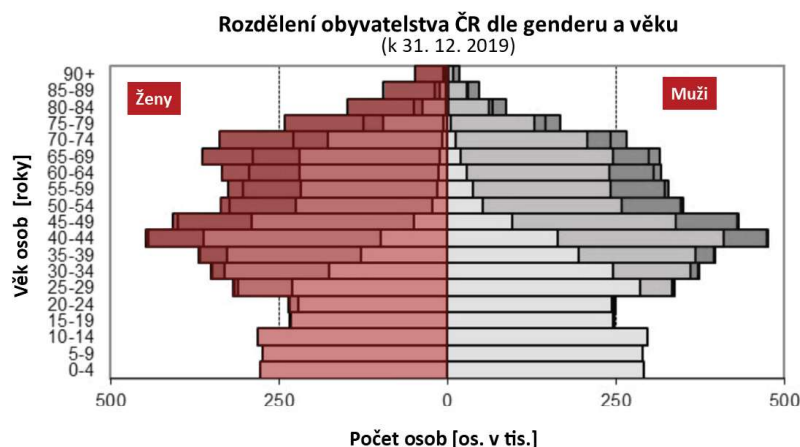
## Složení davu

Aby bylo možné docílit realistického popisu chování davu při evakuaci, je nutné v modelu zohlednit jeho různorodé složení a současně i jeho vliv na fungování davu jako celku. Ze složení osob, vyskytujících se v posuzované budově, se odvíjejí i jejich charakteristiky (např. rychlost, bodyspace, reakční doba fyzická zdatnost apod.). Hodnoty pro tyto parametry lze čerpat např. z [487]. Konkrétní složení populace posuzované budovy je stanoveno se zohledněním typu objektu, provozu, případné konané akce. Příkladem může být třída ZŠ – uvažujeme děti ve věku od 6 do 15 let, gender dle statistiky ročníku, hendikep 0–2 %; nebo oddělení LDN – zde uvažujeme seniory, gender dle statistik a silné procentuální zastoupení osob s pohybovým hendikepem či zcela imobilních osob apod. U velkých veřejných budov či dopravních uzlů je určení tohoto složení v současné době velmi problematické, z důvodu absence automatických zařízení, která by složení a obsazenost budov monitorovala. Při využití ručního sběru dat a jeho analýzy se jedná o finančně i organizačně náročný proces a pro získání relevantních výsledků je nutné, aby probíhal několik dní. Proto je v těchto případech často vycházeno

z kvalifikovaného odhadu, nebo čerpáno složení populace z dostupných dat stávající, referenční stavby obdobného charakteru. Základními pozorovanými charakteristikami pro složení davu je zejména složení dle věku, genderu a hendikepu, která jsou blíže rozvedena dále.

- **Složení dle genderu**

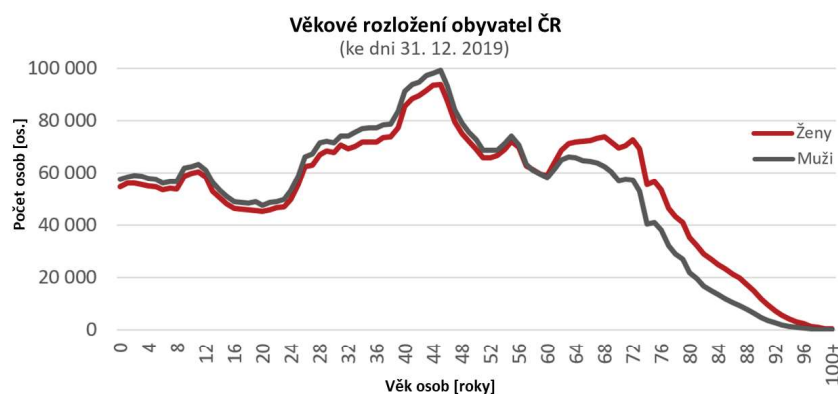
Zohlednění genderového složení davu je také jedním z klíčových ohledů při tvorbě populace modelu, jelikož se od něj odvíjí celá řada vstupních parametrů (odlišnost vstupních parametrů pro ženy a muže – např. rychlostní rozdělení, velikost těla apod.). Muži a ženy nejsou v populaci zastoupeni zcela rovnoměrně, dle zprávy ČSÚ [224] ze dne 31. 12. 2019 je v populaci ČR zastoupeno 51 % žen a 49 % mužů (blíže viz obr. E.4). Zastoupení žen a mužů v populaci se odvíjí od vývoje porodnosti a také od faktu, že v ČR se muži dožívají nižšího věku nežli ženy [224].



**Obr. E.4:** Genderové procentuální rozdělení mužů a žen na území ČR (zdroj: upraveno z [224])

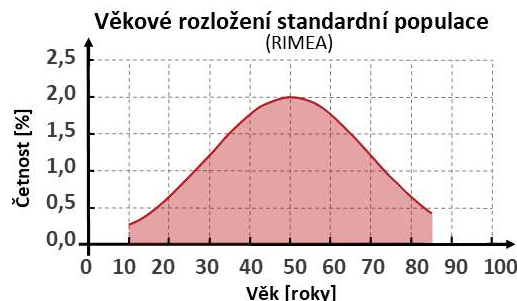
- **Složení dle věku**

Při posuzování evakuace stavby jsou základní informace o věkovém složení populace (davu) zpravidla poskytovány odpovědnými osobami (projektantem, pořadatelem, FM firmou, provozovatelem), kde tyto údaje vycházejí zejména z místních statistik provozu (věková skladba osob) či kvalifikovaného odhadu. Pro tyto účely lze využít i dat ze statistických průzkumů pro širší okruh – např. pro danou zemi/město (poskytovatelem těchto dat v České republice je Český statistický úřad (ČSÚ), ukázka dat viz obr. E.5). Dále je však nutno i přihlížet nejen k obecným statistikám, ale i k určitému typu stavby/provozu (např. v základní škole budeme předpokládat výskyt osob ve věku 6–15 let [372], naopak v případě stavby typu pečovatelský dům bude zastoupena primárně skupina osob ve věku 60+ let). Věkové složení davu je zaváděno do modelu jako obecný parametr vyšší úrovně, od kterého jsou následně odvozeny další parametry mající silný vliv na evakuační čas – např. rychlost osob, mobilita, rozměr lidského těla apod.



**Obr. E.5:** Věkové rozložení obyvatelstva v České republice, dle dat ČSÚ z 31. 12. 2019 (zdroj: vlastní – vypracováno z dat dle [212])

Pokud nejsou k dispozici přesnější údaje o věkovém rozložení davu, je možné čerpat z německé směrnice RIMEA [465], která využívá obecného rozložení populace ve stejném poměru (1:1) na muže a ženy, u kterých je uvažováno věkové rozpětí 10–85 let. Věkové rozložení má střední hodnotu 50 let a směrodatnou odchylku 20 let (grafické znázornění standardního složení populace viz obr. E.6).



**Obr. E.6:** Věkové rozložení standardní populace dle německé směrnice RIMEA (zdroj: přepracováno dle [465, 25] upraveno)

- **Složení dle zastoupení hendikepu**

Při volbě skladby modelovaného davu je třeba si uvědomit fakt, že 13 % obyvatel ČR nad 15 let trpí zdravotním hendikepem, což je takřka 1,2 mil. obyvatel (z toho 56 % žen a 44 % mužů) [347]. Tato skupina je velmi heterogenní. Dle Zák. č. 108/2006 Sb. [582] a Vyhl. č. 398/2009 [553] do ní spadají všechny osoby s postižením – tedy postižením tělesným, mentálním, duševním, smyslovým nebo kombinovaným, jehož dopady činí nebo mohou činit osobu závislou na pomoci jiné osoby; dále osoby pokročilého věku (tato skupina se v posledních letech značně rozrůstá [212]), těhotné ženy, osoby doprovázející dítě v kočárku nebo dítě do tří let a také osoby obézní či s velkými zavazadly.

## Rychlost osob

Rychlost pohybu osoby je velmi kritickým parametrem populace v modelu, neboť má významný vliv na finální výsledek evakuace. Pro její stanovení je k dispozici hned několik možných zdrojů, jako např. ČSN, zahraniční publikace – kde mezi nejvýznamnější řadíme ty od U. Weidmana [562, 563] a J. Fruina [173], případně lze využít i data získaná z experimentálních měření (kap. 1.2.2) či data extrahovaná z videosekvencí (Příloha G).

V tuzemském prostředí jsou využívány pro posuzování doby evakuace normové hodnoty dle ČSN 73 0802 *Požární bezpečnost staveb – nevýrobní objekty* [123]. Normové hodnoty pro rychlost osob při evakuaci zohledňují pouze směr pohybu a terén (rovina/schodiště). Není zde rozlišováno dělení rychlosti pohybu dle věku, pohlaví či schopnosti pohybu, jako je tomu u zahraničních zdrojů viz níže. Mobilita evakuovaných osob je ve výpočtu zohledněna pouze okrajově v minimální šířce únikového pruhu, blíže viz kap. 4.1.1. Hodnoty rychlostí dle ČSN 73 0802 [123] jsou blíže uvedené v tab. E.5.

**Tab. E.5:** Rychlosti osob dle ČSN 73 0802 (zdroj: z [123])

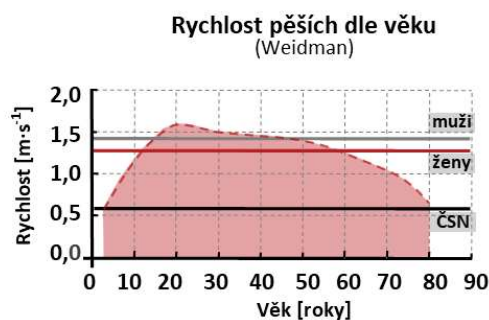
Směr pohybu	Rychlost [m·s <sup>-1</sup> ]
Po rovině	0,583
Po schodech dolů	0,500
Po schodech nahoru	0,417

Tyto hodnoty jsou ve srovnání se zahraničními zdroji i naměřenými hodnotami, které ve své práci využíval např. i W. Tobler [533], velmi nízké. Hodnoty uvedené v tab. E.5 odpovídají

spíše velmi pomalé chůzi a neodrážejí tedy reálnou situaci při evakuaci. Tobler ve svém výzkumu z r. 1993 uvádí hodnotu pro rychlost chůze po rovině cca  $1,389 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

- **Rychlost pohybu po rovině**

Příkladem možného alternativního zdroje dat rychlostí osob po rovině je práce Ulricha Weidmana *Transporttechnik der Fußgänge* [562]. Tato stanovuje orientační rozdělení rychlosti dle věku a pohlaví. Rozdělení je vyobrazeno na obr. E.7, na kterém je znázorněna i střední rychlost pohybu pro muže ( $1,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a ženy ( $1,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



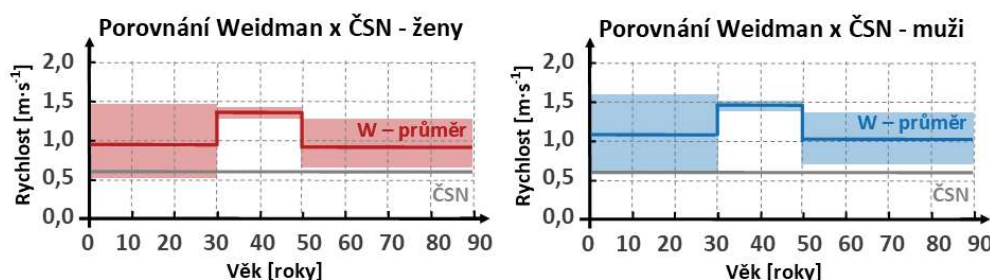
Obr. E.7: Rychlost chůze v závislosti na věku a pohlaví dle Weidmana (zdroj: přepracováno z [562, 25])

Z hodnot uvedených v tab. E.6 a následně i z grafického srovnání s hodnotami uvedenými v *ČSN 73 0802* (viz obr. E.8) je zřejmé, že rozptýlení rychlostí určených Weidmanem je ve věkovém pásmu 30–50 let pro obě pohlaví (ve srovnání s věkovými extrémami) relativně úzký.

Tab. E.6: Podrobné rozdělení rychlosti chůze v závislosti na věku dle Weidmana (zdroj: přepracováno z [562])

Osoby	Rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Osoby	Rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
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

Rovněž je patrné, že údaje podle *ČSN 73 0802* jsou v případě jejich aplikace v modelu posunuty na stranu bezpečnou, a představují tak spíše absolutní minimum z dostupného rychlostního spektra, viz obr. E.8.



Obr. E.8: Grafické srovnání rychlosti chůze po rovině v závislosti na věku dle Weidmana a ČSN (zobrazen rozptýlen, max. a min., průměr) (zdroj: přepracováno z [562, 123] [25])

- **Rychlost pohybu po schodech**

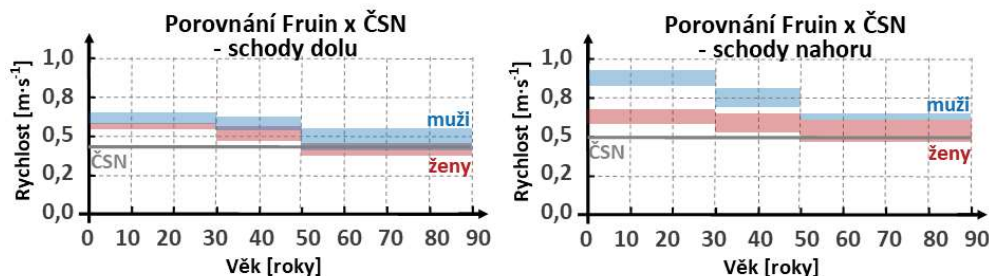
Zdrojem pro hodnoty rychlosti pohybu osob po schodech je např. práce Fruina [173], kde jsou (podobně jako v práci Weidmana) rozlišovány různé věkové skupiny a rychlost jejich chůze po schodech s různým sklonem a směry pohybu (nahoru i dolů). Výsledný soubor dat rychlostí dle Fruina pro jednotlivé varianty je blíže uveden v tab. E.7.



**Tab. E.7:** Rychlost po schodech dle Fruina v závislosti na sklonu (sklon  $27^\circ$  – výška nášlapu: 0,178 m, hloubka nášlapu: 0,286 m; sklon  $32^\circ$  – výška nášlapu: 0,152 m, hloubka nášlapu: 0,305 m) (zdroj: z [173])

Pohlaví a věková skupina osob	Rychlost pro schodiště se sklonem $27^\circ$ [m·s <sup>-1</sup> ]		Rychlost pro schodiště se sklonem $32^\circ$ [m·s <sup>-1</sup> ]	
	Nahoru	Dolů	Nahoru	Dolů
<b>Věk &lt;30 let [m·s<sup>-1</sup>]</b>				
Ženy	0,594	0,538	0,671	0,559
Muži	0,828	0,559	0,930	0,610
Průměr	0,757	0,549	0,813	0,584
<b>Věk 30–50 let [m·s<sup>-1</sup>]</b>				
Ženy	0,508	0,478	0,650	0,544
Muži	0,691	0,513	0,813	0,589
Průměr	0,645	0,503	0,777	0,579
<b>Věk &gt;50 let [m·s<sup>-1</sup>]</b>				
Ženy	0,472	0,391	0,564	0,452
Muži	0,569	0,432	0,599	0,411
Průměr	0,549	0,422	0,594	0,422
<b>Celkový průměr</b>	<b>0,671</b>	<b>0,508</b>	<b>0,772</b>	<b>0,574</b>

Pro lepší představu je na obr. E.9 grafické srovnání rychlosti chůze dle Fruina a dle ČSN 73 0802 pro varianty po schodech směrem nahoru i dolů. Grafy zobrazují rozdíl průměrných hodnot daný pro obě pohlaví v průřezu všech věkových skupin. Pro srovnání je zde vynesena i hodnota stanovená ČSN.

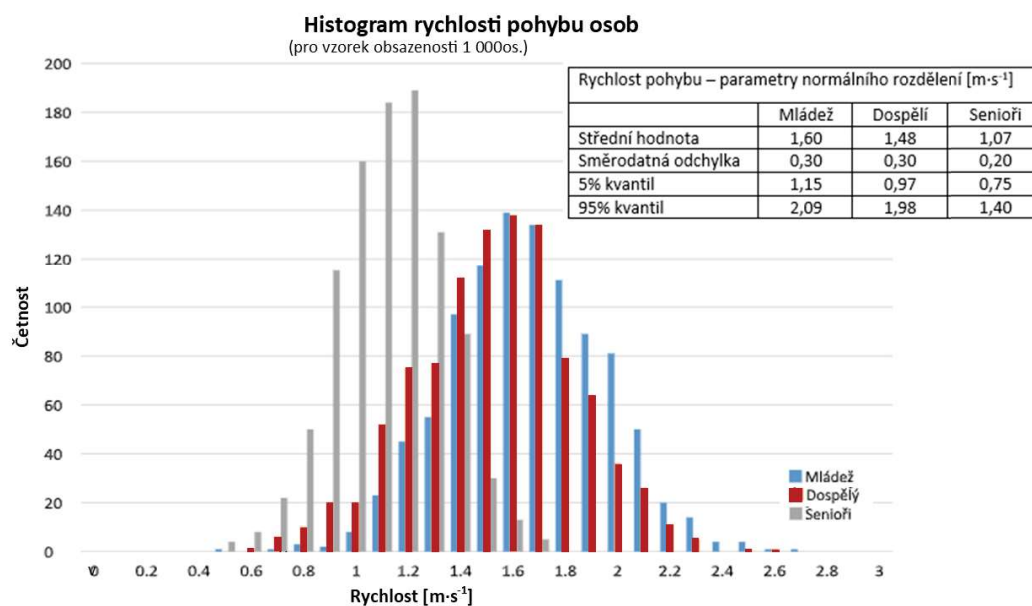


**Obr. E.9:** Grafické srovnání hodnot rychlosti chůze osob po schodech směrem nahoru a dolů dle Fruina a ČSN 73 0802 (zdroj: přepracováno z [173, 123, 25])

Vzhledem k rozdílné metodice měření a zpracování dat není vhodné porovnávat výsledky prací Weidmana a Fruina. Weidmann, jak už bylo zmiňováno, ve své práci stanovuje maximální a minimální hodnotu rychlosti pro chůzi po rovině. Naopak Fruin dává k dispozici data pro chůzi na schodech s různým sklonem jako průměrnou hodnotu rychlosti (nikoliv rozsah). Přesto je z výsledků patrné, že norma ČSN 73 0802 stanovuje hodnoty rychlosti posunuté velmi výrazně na stranu bezpečnou.

K samotné distribuci rychlosti pohybu osob mezi jednotlivé evakuované osoby je vhodné použít statistické rozdělení – např. normální, jak je uvedeno na obr. E.10.

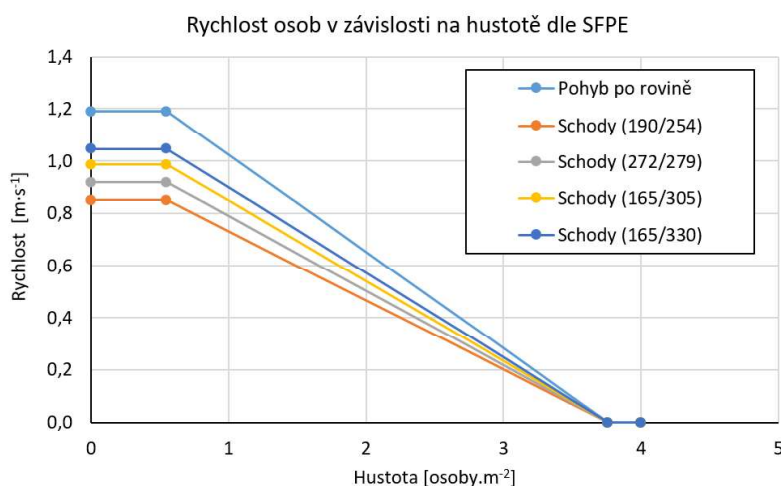




**Obr. E.10:** Příklad srovnání rychlostního normálního rozdělení v rámci jednotlivých věkových skupin – pro obsazenost modelu 1000 os. (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20] upraveno)

- **Rychlost pohybu osob dle SFPE**

Obecně platí, že rychlost osob není závislá pouze na věku, hybnosti a pohlaví, ale zejména na lokální hustotě osob ve vztahu ke konkrétnímu typu terénu. Vhodným zdrojem pro zjednodušený výpočet může být například SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [142], který vychází ze skutečnosti, že osoby se pohybují maximální rychlostí do lokální hustoty  $< 0,55 \text{ osob} \cdot \text{m}^{-2}$ , v závislosti na míře překročení této hodnoty pak dochází k redukci rychlosti. Dle standardu SFPE je maximální rychlost pohybu osoby po rovině ve volném, nezahuštěném prostoru  $1,19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (podrobněji viz obr. E.11 a kap. 4.1.2).



**Obr. E.11:** Rychlost osob v závislosti na jejich hustotě dle SFPE (zdroj: převzato z [142] [235])

- **Rychlost osob s hendikepem**

Jak je uvedeno v odst. *Složení dle hendikepu*, zohlednění osob s omezenou schopností pohybu a orientace při návrhu veřejných budov je v dnešní době zcela běžnou záležitostí. Výzkumem rychlosti a pohybu hendikepovaných osob s kompenzačními pomůckami se zabýval ve své práci D. Prolux [440], který z pozorování jednotlivých osob s rozličným hendikepem a v různých typech terénu/směru sestavil sadu dat, více viz tab. E.8.

**Tab. E.8:** Rychlosti pohybu osob s tělesným hendikepem (zdroj: přepracováno z [440])

Druh kompenzační pomůcky	Rychlost po rovině	Rychlost po schodišti	
	(stř. hodnota) [m·s <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	
		Nahoru	Dolů
Mechanický vozík	0,13–1,35 (0,69)	–	–
Mechanický vozík s asistentem	0,84–1,98 (1,30)	–	–
Elektrický vozík	0,85–0,93 (0,89)	–	–
Chodítka	0,12–1,02 (0,57)	–	–
Berle	0,63–1,35 (0,94)	0,22	0,22
Hůl	0,26–1,60 (0,81)	0,35	0,32
Bez pomůcky	0,24–1,68 (0,95)	0,14	0,13

Z hodnot uvedených v tab. E.8 vyplývá, že výskyt osoby s hendikepem v procesu evakuace znamená snížení rychlosti celého evakuačního proudu, jelikož okolní evakuované osoby musí přizpůsobit svoji rychlost pomalejšímu jedinci (např. osobě na vozíku), nebo se jej snaží obejít. Dochází tak ke vzniku úzkého místa se sníženým průtokem obdobně, jako tomu je při překonávání statických překážek (např. sloup, dveře atd.). Je nutno si uvědomit, že osoby s hendikepem bez kompenzačních pomůcek mají mnohdy horší stabilitu, jsou pomalejší a v rámci pohybu po schodech potřebují přestávky. Dále při svém pohybu používají madlo nebo zábradlí – cca 91 % osob bez kompenzační pomůcky při pohybu po schodišti nahoru a 94 % při pohybu po schodišti dolů [440].

### Reakční doba osob

Reakční doba (někdy také zaváděn termín „doba před pohybem“ nebo „předevakuační čas“) je interval mezi spuštěním signálu pro evakuaci (vyhlášením poplachu) a reakcí konkrétní modelované osoby na tento signál. Časový interval odezvy na nebezpečí trvá od okamžiku, kdy si osoby uvědomí vznik kritické situace, až do okamžiku, kdy se rozhodnou pro konkrétní způsob evakuace [198]. Během této doby většinou osoby dále pokračují v běžných činnostech, které vykonávaly před vyhlášením poplachu. Typickými činnostmi vykonávanými osobami v tomto časovém úseku jsou zejména rozpoznání nebezpečí, úschova cenných předmětů a zavazadel, vyhledání ostatních členů rodiny či skupiny, sdělení informace dalším osobám, hledání vhodné únikové cesty a samotná reakce na spuštěný poplach. Tyto aktivity jsou velmi subjektivní a jsou obtížně postizitelné výpočtem. Časová variabilita intervalu je velmi vysoká, obecně se pohybuje v rozmezí několika sekund až po mnoho minut a je u jednotlivých osob ve stejném prostoru různá. Reakční doba evakuovaných osob bývá často rozhodujícím faktorem úspěšné evakuace a jejich přežití.

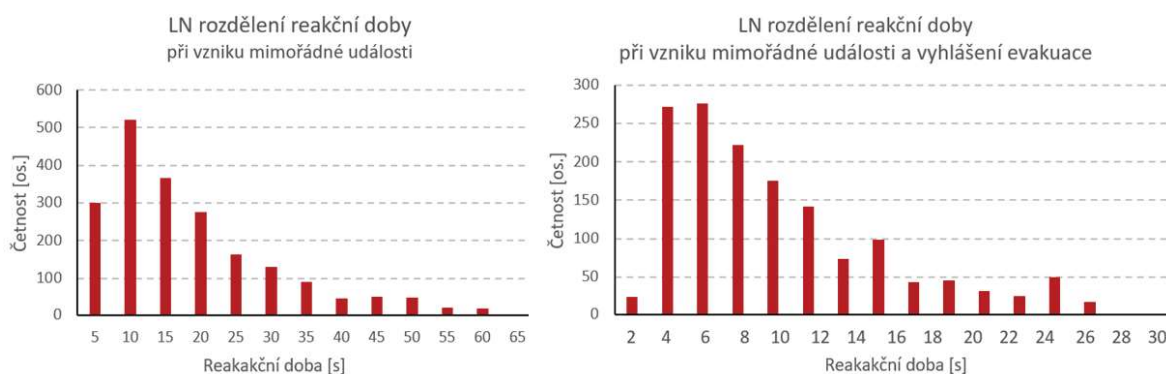
V případě, že nejsou k dispozici konkrétní informace o reakční době osob, lze využít jako zdroj směrnici RIMEA [465], která rozděluje evakuační scénáře dle reakční doby do níže uvedených skupin:

- **Rychlá evakuace** – všechny evakuované osoby mají reakční dobu nulovou. Jde o extrémní variantu, která mnohdy 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 a odráží přesněji reálné chování osob.
- **Pomalá evakuace** – osobám je přiřazena rovnoměrně rozložená reakční doba v intervalu stanoveném na základě komplexního hodnocení dle typu budovy a její komplexity (v případě vyšší komplexity se k reakčnímu času přičítá ještě konstantní hodnota 0,5 nebo 1,0 min), charakteristiky osob a jejich činností, požárního systému a požárně bezpečnostního managementu.

České normy uvažují ve svých výpočtech pouze okamžitou evakuaci, tedy reakci všech osob ve stejný okamžik, což není vzhledem ke skutečnostem uvedeným výše pro posuzování procesu evakuace adekvátní.

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. I proto je tato oblast v současné době předmětem intenzivního výzkumu (např. D. Purser et al. [445], M. Kobes et al. [278], N. C. McConnell et al. [349], R. Lovreglio et al. [339]). Analýza konkrétních incidentů ukazuje, že existuje korelace mezi délkou doby před pohybem osob a následky tohoto incidentu v podobě zraněných či usmrcených osob. Vzájemné vztahy mezi jednotlivými složkami doby evakuace jsou podrobně vysvětleny v kap. 5.1.2.

Další studie jsou zaměřeny na vlivy sociální a vlivy fyziky prostředí (externí faktory), stejně tak i na charakteristické vlastnosti osob (interní faktory) (P. J. DiNenno [142], M. F. Sherman et al. [499], Kuligowski et al. [296]). Dosud nicméně platí, že znalosti chování osob před pohybem jsou méně rozsáhlé než v případě samotného pohybu těchto osob během evakuace (G. Proulx [441], M. Kobes et al. [278]). Aktuálně většina existujících evakuačních modelů aplikuje jednoduché předpoklady o chování osob v době před pohybem, nejčastěji v podobě prosté reakční doby na alarm. V takovém případě je doporučeno použití statistického rozdělení reakční doby mezi jednotlivé evakuované osoby – nejčastěji je doporučeno a aplikováno rozdělení reakční doby jako rovnoměrné, normální nebo log-normální (LN) [445], blíže viz příklad na obr. E.12.



**Obr. E.12:** Příklad log-normálního rozdělení reakční doby – v případě vzniku mimořádné situace a samovolné reakce osob (vlevo) a v případě vzniku mimořádné události s bezprostředním vyhlášením evakuace (zdroj: přepracováno z [557] ve spolupráci s projektem VI20162019034)

Tyto skutečnosti je proto nutno 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 na posouzení evakuačního procesu jako celku fatální dopady, a může vést ke zcela nerealistickým předpokladům [16].

Analýza doby pohybu je zaměřena na posouzení doby potřebné pro evakuaci osob do bezpečného místa. Konkrétní výsledek je závislý na celé řadě vstupních údajů, mezi které patří zejména dispozice budovy, znalost budovy jejími uživateli, lokace požáru či požárně bezpečnostní opatření. Pro posouzení této doby je možno aplikovat modely pohybu osob na základě existujících informací a složitosti situace. Takto lze analyzovat proces evakuace i jeho časovou náročnost s dostatečnou přesností, studovat variantní řešení uspořádání prostoru, rozložení únikových východů apod. [17].

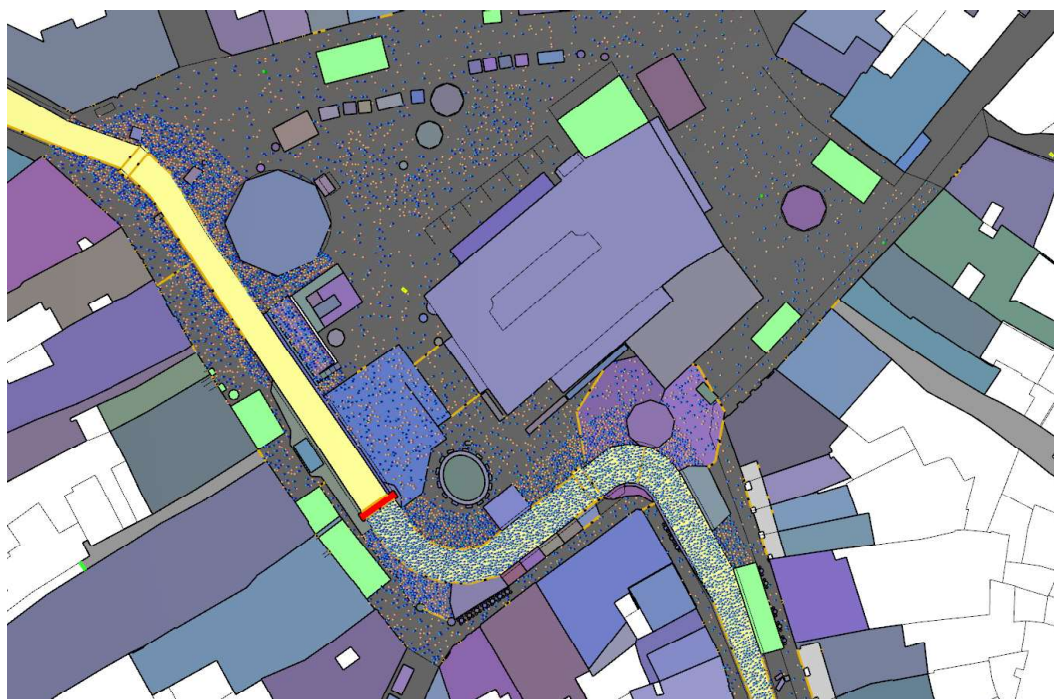
### Obsazenost a rozmístění

Při obsazování modelů (konkrétním počtem osob) je u již realizovaných staveb vycházeno z reálné obsazenosti objektů (např. třída pro třicet dětí a jednoho učitele, kancelář s dvaceti pracovními místy, pracovní směna čtyřiceti lidí, sál s kapacitou 300 míst apod.) s přihlédnu-

tím k bezpečnostní rezervě (ve formě osob navíc – návštěvy, mimořádné události), místních statistik provozu (vstupy osob do budovy), kvalifikovaného odhadu či statistik periodicky opakujících se událostí (u budov stávajících např. statistiky návštěvnosti, ranních a odpoledních špiček apod.). V případech, kdy tyto údaje nejsou známy (např. ve fázi návrhu), lze požit při obsazování podklady PBŘ, konkrétně dokument ČSN 73 0818 – Obsazení objektu osobami [118], kde jsou uvedeny konkrétní hodnoty dle příslušného provozu ( $m^2 \cdot os$ , součinitel pro přenásobení navrhovaného počtu).

Agenty není vhodné rozmísťovat po celém modelovaném prostoru bez ohledu na provozní návaznosti, jelikož jejich rozložení v prostoru může mít značný vliv na evakuační podmínky (nejsou volně obsazovány např. místnosti bez trvalé přítomnosti osob, neveřejné prostory apod.). Vhodnějším přístupem je rozmístění osob v modelu dle průzkumu nebo reálných zkušeností provozovatele/uživatelů budovy, s přihlédnutím k maximálním kapacitám či vytíženosti jednotlivých částí budovy (např. obsazení všech sedadel v hledišti; rozmístění osob dle navrhovaných pracovních míst; vytvoření provozních shluků osob – fronta, shluky na nástupišti, oblíbená provozovna/část objektu atd., jak je ně vidět i na obr. E.13. V komunikačních a volných čekacích plochách je možné pak osoby rozmístit náhodně s hustotou např.  $0-2 os \cdot m^{-2}$ .

Při obsazování objektu osobami je vždy nutné přehlédnout k různým kombinacím variant řešení tak, aby došlo k pokrytí všech relevantních stavů rozmístění a obsazenosti, které odrážejí jak denní (ranní/večerní špička), tak týdenní (pracovní den, víkendový provoz) a případně i roční (mimořádné akce, svátky) nejkritičtější variace jako součást návrhových scénářů (kap. 5.1.1).



**Obr. E.13:** Příklad nerovnoměrné obsazenosti modelu osobami v rámci studie řešení ochrany mekkých cílů, v rámci veřejného prostoru při konání maratónu (zdroj: vlastní ve spolupráci s projektem VI20192022118)

## F Celkové srovnání analytického a numerického přístupu

Normový (analytický) přístup je v ČR obecně dlouhodobě uznávaným postupem, který je kvalitním nástrojem při posuzování PBŘ běžných budov. V rámci nových, moderních specifických staveb se otvírá myšlenka dostatečné schopnosti reakce tohoto přístupu na současné trendy stavebnictví a vývoje života. Proto se i nabízí využití inženýrského přístupu jako funkčního doplňku při posuzování PBŘ specifických staveb. Ověřování evakuace pomocí numerických nástrojů je efektivním způsobem, jak nalézt nejhodnější unikové koncepty, a zvýšit tak bezpečnost posuzované budovy. V následující tab. F.1 je uvedeno srovnání a souhrn výhod a nevýhod analytického a numerického přístupu posuzování evakuace osob.

Tab. F.1: Srovnání analytického a numerického přístupu posouzení evakuace osob (zdroj: vlastní)

Normový analytický přístup		Numerický model (inženýrský přístup)	
+	-	+	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Český standard.</li> <li>• Silná legislativní opora.</li> <li>• Uznávaný přístup.</li> <li>• Konkrétně daný postup/metoda (stejný osvojený opakující se proces posouzení).</li> <li>• Dostačující pro získání stanoviska od HZS (splnění požadavku).</li> <li>• Standardizovaný přístup mezi veřejností (projektanty i preventisty).</li> <li>• Posouzení na „stranu bezpečnou“.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neprůhlednost postupů.</li> <li>• Prostor pro subjektivní výklad závazných předpisů, jak ze strany projektantů, tak i preventistů HZS.</li> <li>• Nejasnost původu některých konstant a parametrů analytických výpočtů.</li> <li>• Na první pohled neodráží věrohodně realitu – např. nízké rychlosti osob, osoby jsou uvažovány vždy jako mobilní (možná někde ve výpočtu zohledněno, ale nedostatečná průhlednost metody).</li> <li>• Uvažuje pouze rovnoměrné rozmístění osob v prostoru</li> <li>• Projekce „na stranu bezpečnou“ a prodražování stavby → předimenzování požadavků (masivnost konstrukcí, speciální opatření apod.). → nesoulad požadavků na stavební konstrukce, protipožární zařízení a technologie (např. požadavek požární odolnosti na rozvody je vyšší než samotné osvětlení). → doba funkčnosti zařízení převyšuje až 6 x dobu evakuace) → značné prodražení nákladů na bezpečnostní opatření stavby.</li> <li>• Neověřena korektnost zavedených metod → výsledná hodnota se bere, jako fakt vycházející z předepsaného postupu.</li> <li>• Požadavek na nákladné kouřové zkoušky + evakuační cvičení (nákladné a kontraproduktivní).</li> <li>• Výsledek jako jedna jediná číselná hodnota.</li> <li>• Nereflektuje aktuální vývoj a nové poznatky (omezené množství materiálů a charakteristik z dob vzniku norem)</li> <li>• Nedostatečné zhodnocení průběhu evakuace hendikepovaných osob → zohlednění jejich mobility a nutné asistence.</li> <li>• Pro ověření reality složité experimentální kampaně (drahé, těžce realizovatelné, ovlivnění instrukcí apod.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Přístup zohledňující individualitu stavby.</li> <li>• Komplexnost a detail posouzení.</li> <li>• Reálná interpretace osob (např. se skutečnými rozměry, rychlostí, vlastnostmi, dalšími proměnnými parametry a chováním).</li> <li>• Zohlednění heterogenity davu (např. osoby s omezenou schopností pohybu, dítě, maminka s kočárkem atd.).</li> <li>• Možnost zohlednění chování osob a sociálních vazeb (→ tvorba skupin – matka s dítětem, rodina, osoba na vozíku s doprovodem).</li> <li>• Ztvárnění reálné evakuace dle návrhových evakuačních scénářů (nerovnoměrné redistribuce prchajících osob, zohlednění vnějších vlivů a následné reakce na: masu davu, vnitřní podmínky budovy, znalost prostoru, značení apod.).</li> <li>• Možnost modelovat nesčetné množství scénářů a vytvoření velkého množství simulací (→ získání vypovídajícího vzorku dat o posuzované stavbě a vzniklých situacích), → možnost zpracování statistického vyhodnocení.</li> <li>• Zohlednění reálné obsazenosti budovy a nerovnoměrného rozmístění.</li> <li>• Zohlednění reálného procesu a evakuace osob se sníženou pohyblivostí (hendikepovaných osob), tak i imobilních lidí a asistence (prostorových nároků, možnosti užití/ neužití ÚČ – osoba na vozíku nemůže po schodech apod.).</li> <li>• Ztvárnění osob jako individuálních entit (jejich profilů, chování a jednání).</li> <li>• Vstup stochastického prvku do výpočetního procesu.</li> <li>• Výsledkem interpretace reálného procesu evakuace (→ jeho průběhu a vývoje v čase (počet dostupných ÚČ, směrování osob, drahové jevy, vznik kongescí, vliv produktů hoření apod.)</li> <li>• Možnost zvýšení bezpečnosti navrhovaných ÚČ díky analýze kritických míst → jejich eliminace.</li> <li>• zavádění standardizovaného přístupu při inženýrském posouzení – metodika jak užívat a na co si dát pozor při užití numerických modelů</li> <li>• Nalezení/ ověření optimálních řešení návrhu → zvýšení bezpečnosti a eliminace více nákladů.</li> <li>• Možnost opakovaného ověřování návrhu.</li> <li>• Možnost reflektovat i aktuální poznatky a výsledků vývoje (vývoj materiálového inženýrství, demografický vývoj, změny tělesných proporcí apod.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nedostatek vstupních dat (z evakuací) a velká citlivost na jejich kvalitu.</li> <li>• Neúvěra v užití tohoto přístupu – „black box“, → neinformovaná společnost vnímá výstupy jako „pěkné, pohyblivé video“.</li> <li>• Velká citlivost na změny v rámci životního cyklu posuzované stavby.</li> <li>• Nedostatečné povědomí o této možnosti alternativního přístupu posouzení.</li> <li>• Časová náročnost.</li> <li>• Nepoškozenost uživatelů (jak z řad projektantů, tak i preventistů).</li> <li>• Nutnost vysoké úrovně odbornosti modeláře a s přehledem z mnoha oblastí.</li> <li>• Aktuálně nedostatečná správní podpora pro aktivní zavedení NM přístupu do každodenní praxe (pramenící z nedůvěry a nedostatečného seznámení s těmito metodami).</li> <li>• Neexistence dostatků podpůrných materiálů pro zavedení NM přístupu do praxe v českém jazyce (metodiky/ ověřené postupy/referenční příklady apod.).</li> </ul>

Pozn. – zcela jistě tím ale nechci říci, že by náklady na zajištění bezpečnosti a bezpečnostních opatření byly prázdou investicí, ba naopak, jen v některých případech by bylo vhodné mít možnost užití „zdravého rozumu“ s doložením funkčnosti numerickým modelem a moci tak optimalizovat vynaložené náklady, samozřejmě bez snížení bezpečnosti.

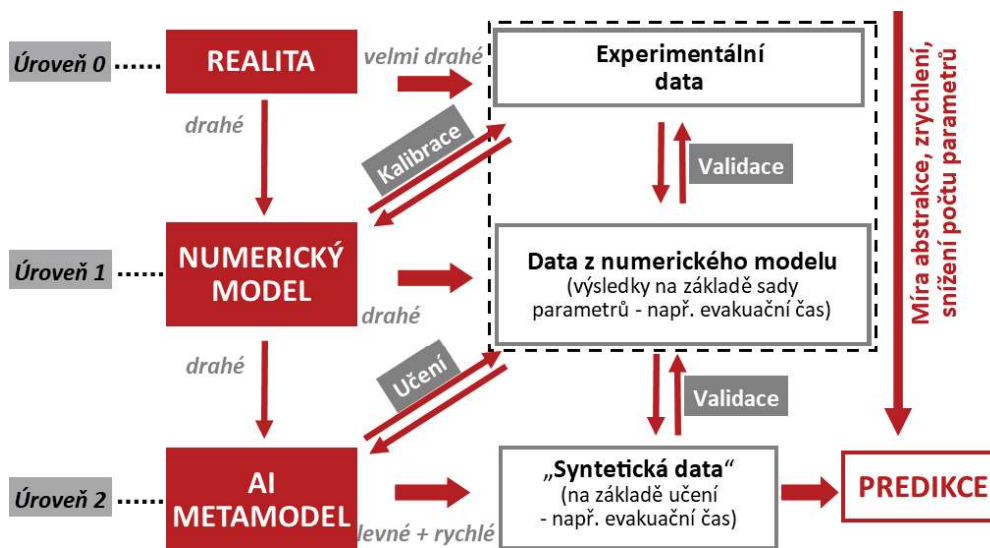


## G Moderní metody umělé inteligence a virtuální reality

### Umělá inteligence (AI, Artificial intelligence)

Numerické modely evakuace osob se staly v jiných zemích již běžně používanou metodou posuzování, jak již bylo uvedeno v kap. 1.2.2. Díky nim je možné pro konkrétní stavbu a její vstupní data (geometrii stavby, parametry osob, chování osob) předurčit reálné chování osob a jeho přímý dopad na chování okolních jedinců, stejně jako přizpůsobení nově vyvstalým podmínkám v jednotlivých časových krocích [343], kdy dochází k záznamu, měření konkrétních výsledků a analýz v čase. Velkou nevýhodou těchto časoprostorových modelů je však vysoká časová i výpočetní náročnost (v řádu desítek minut až několika hodin) a v reálném čase jsou výstupy modelu prakticky nedostupné. Vzhledem k tomu je znemožněna i rychlá a efektivní odezva, která by mohla sloužit jako podpůrný materiál krizového řízení při vzniku nebezpečí v posuzované stavbě.

V současnosti se v důsledku rostoucích požadavků na rychlost zpracování dat a získání odpovědí AI stává již standardní součástí většiny moderních softwarů. I v rámci výzkumných prací se již setkáváme s příklady využití AI, které se zabývají predikcí pohybu uplatňující například princip Markovova řetězce [36] či umělých neuronových sítí [420, 4, 188]. Dalším příkladem je práce Duives et. al, která řeší makroskopickou predikci pohybu davu na základě algoritmičky upravených dat z GPS v reálném čase [148]. Ve výzkumu Torrens et al. jsou predikovány trajektorie chodců během několika desítek minut díky nácviku algoritmu „k-nejbližších sousedů“, využívajícímu kombinaci geografických dat z informačního systému a umělých dat o pohybu osob z numerických simulací [537]. Proto se i zde nabízí progresivní myšlenka využití AI pro predikci pohybu osob při evakuaci za podpory tzv. absolutního metamodelu (tj. opak fyzikálního modelu), který by zefektivnil proces výpočtu a analýzy dat v reálném čase. To by ve skutečnosti znamenalo validaci výsledků (syntetických dat) tohoto modelu s daty z vytvořené databáze konkrétního posuzovaného objektu – viz obr. G.1.



**Obr. G.1:** Schéma principu vztahů validace mezi realitou, numerickým modelem a AI metamodelem – proces zjednodušení a zrychlení (zdroj: vlastní)

Pro získání statistik surogátního modelu coby spolehlivosti (přesnost) správné predikce nebo pravděpodobnost záměny v rámci klasifikace (kde je spojitá proměnná diskretizována) jsou využívány techniky tzv. resamplingu – obecně pomocí „křížové validace“ a „bootstrappingu“ [286]. Obvykle je užíváno typického splitu 80:20. Tento způsob je užitečný zejména pokud je k dispozici pouze malé množství dat a zároveň slouží jako validace AI. V rámci AI se nedělá běžná kalibrace (jako u metody FEM), spíše je optimalizována architektura AI jako výběr

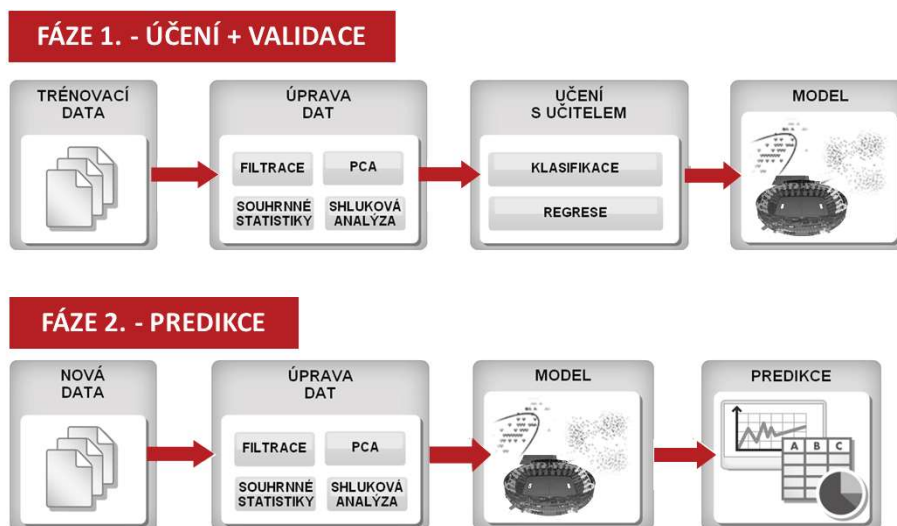


typu a použití vrstev u ANN, CNN apod. Parametry AI modelu (metamodulu) se ladí ve fázi učení a je jich typicky řádově mnohem více než u FEM.

### Využití AI – Predikce evakuace v reálném čase

Výsledky numerických modelů lze užít pro trénování AI za účelem predikce pohybu osob při evakuaci v reálném čase, s cílem minimalizace výpočetního času a tvorby metamodulu. Strojové učení (ML) je jedním z odvětví umělé inteligence, které umožňuje počítači (stroji) učit se z trénovací množiny, a na základě takto získaných znalostí vyhodnocovat nová data. Metody strojového učení vycházejí ze statistiky a nacházejí uplatnění takřka ve všech oblastech, kde je třeba zpracovávat velká množství dat. Jednotlivé metody ML jsou různorodé jak z pohledu složitosti, nároku na čas a paměť zařízení, tak i z hlediska jejich vhodnosti jejich užití pro konkrétní řešení různých typů úloh. Základními úlohami pro sestavení algoritmu ML je klasifikace (zařazení prvku do některé z předem definovaných skupin), regrese (predikce vybraného údaje – většinou číselné hodnoty) a shlukování (seskupuje objekty s podobnými vlastnostmi, které AI sama vyhodnotí jako důležité). Pro sestavení algoritmu ML je z výsledků numerických simulací provedených na dílčích validačních modelech evakuace vytvořena tzv. trénovací množina. Následně jsou definovány parametry jednotlivých modelových scénářů a výstupy simulací jsou za účelem co nejjednodušší datové struktury, která však dostatečně přesně popisuje daný model, podrobeny citlivostní analýze.

Pomocí dat ze simulací numerických modelů evakuace osob je pro posuzovanou stavbu algoritmicky vytvořena obsáhlá databáze výsledků simulací celé řady návrhových scénářů tzv. metamodel. Následně metamodel na základě těchto dat je schopen v řádu několika minut predikovat vybrané ukazatele (např. evakuační čas z budovy, časy posledních osob v konkrétních sekcích, odhalit kritická místa, vysokou hustotu osob na  $m^2$  v kritických místech objektu – ÚC, kapacity koridoru – pro jednosměrný/obousměrný proud atd.), analyzovat nově vznikající scénáře (zatarasení ÚC, vznik požáru v konkrétní části budovy atd.) a poskytováním výsledků v reálném čase tak nahradit časově náročný výpočet numerických modelů (založených na fyzikálních principech), názorně viz obr. G.2.



Obr. G.2: Schéma principu strojového učení (zdroj: upraveno a přepracováno z [259]).

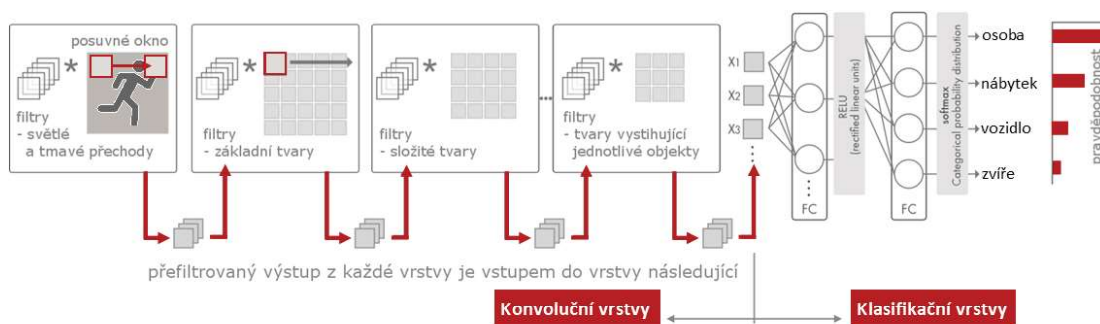
Díky takto získaným informacím by mohlo být možné efektivněji řídit jak samotnou evakuaci osob, tak i zásah IZS (např. vhodným příkladem užití by mohla být stanice metra Pankrác [11]). Pomocí nově definovaných postupů a metod pak lze upravit stávající simulační nástroje, případně vyvinout nové, které budou schopné efektivněji vyhodnocovat zadané úkoly. Tento záměr je předmětem výzkumného projektu *TJ04000232 – Efektivní časoprostorové predikce s využitím metod strojového učení*, kde dochází k návrhu nové výpočetní strategie s využitím

AI pro rychlou a levnou predikci (např. míry komfortu ve veřejných budovách), blíže viz kap. 3.1. S pomocí nově definovaných postupů a metod bude pak možná integrace výsledků projektu do stávajících nástrojů, případně lze vyvinout i nové, které budou schopné efektivněji vyhodnocovat zadané úkoly.

Nedostatek podrobných empirických údajů, zejména údajů v nouzových situacích, velmi ztěžuje nebo dokonce znemožňuje validaci matematických modelů během nouzové evakuace. S vývojem nových datových technologií (videokamery, chytré mobilní telefony) v posledních letech se naskytla příležitost vyvinout nová řešení, jak získat více reálných údajů o pohybu osob, díky nimž je možné čerpat informace i z nepřehledných a kritických scén, pořízené např. i z bezpečnostních a dohledových kamer. Nové metody měření pěšího proudu využívající MV vycházejí z původních metod dopravního měření a automatických systémů pro měření dopravního proudu vozidel. Díky nim je možné přímo měřit konkrétní veličiny popisující pěší proud, případně i interakce mezi jednotlivými osobami. Aktuálně jsou pokročilé metody analýzy obrazu využívány pro extrakci dat pěší dopravy [597], s cílem využití získaných dat jako vstupů pro mikroskopické modely dopravy sledovaných oblastí.

V rámci analýzy dynamiky davu MV využívá obrazu a videa k rozpoznání, identifikaci a sledování osob či detekci situací (chování), které by se mohly stát krizovými, za účelem získání dat, pochopení reálného popisu davu a predikce nebezpečí. Úlohy MV lze řešit různými přístupy, od porovnávání vzoru se snímkem [209], až po metodu deep learning [567], která nabízí vysokou přesnost a spolehlivost. Při analýze video obrazu pomocí MV dochází k detekci, klasifikaci a sledování osob na základě předem definovaných charakteristických rysů. Úlohy MV lze dělit do jednotlivých fází procesu, které se vždy učí na vzorových datech a následně jsou aplikovány na nový snímek [258]:

- **Hledání objektů** – definice obecného referenčního objektu na snímku (videosekvenci) a na základě algoritmu následné vyhledání objektu ve srovnání s referenčním. Na snímku dochází k hledání umístění objektu nebo sledování změn.
- **Detekce objektů** – jedná se o konkrétní hledání vzorového objektu pomocí definování detektoru s přesnější kategorizací objektů, obsahujících určitou diverzitu.
- **Klasifikace snímaných objektů** – při klasifikaci přiřazujeme celému snímku jednu klasifikační kategorii, která charakterizuje snímaný objekt (tzv. vizuální slovník), na základě čehož dochází k rozeznání vybraného objektu z dané detekované skupiny objektů (např. chodec, kolo, vozidlo, strom apod.).



**Obr. G.3:** Schéma principu detekce CNN specifických objektů ve snímané scéně (zdroj: převzato a upraveno z [259])

Samotnou detekci a klasifikaci objektů na snímcích lze provádět i metodami hlubokého učení (DL, Deep Learning). Mezi jedny z nejspolehlivějších metod DL pro klasifikaci snímků se řadí metoda konvoluční neuronové sítě (CNN, Convolutional neural network) uspořádané do mnoha vrstev obsahujících sady propojených uzlů. Výpočetní algoritmus CNN je založen na konvoluci mezi vstupními daty (snímky) a 2D filtry, které definují hledané charakteristické rysy, na jejichž základě dochází ke klasifikaci, viz obr. G.3. Jelikož hledané objekty na snímcích zaujímají pouze malé části zkoumaných snímků, je

pro redukci výpočetního času vhodné obraz snímku rozdělit do menších regionů, na což lze užít např. R-CNN (Regions with CNN). Ta aplikuje konvoluční teorii pomocí plovcového rámečku detektoru, který kategorizuje jen vybrané regiony s pravděpodobným výskytem detekovaných objektů.

- **Sledování objektů** – nejedná se pouze o opakovanou detekci objektů na jednotlivých snímcích videosekvence, ale dochází zde ke sledování souvislostí a změn na několika po sobě jdoucích snímcích (např. výpočet změny na pixelech, analýza histogramu).

Spolu s vývojem techniky pro zpracování obrazu a algoritmů pro rozpoznávání vzorců je snadnější získávat a shromažďovat data související s davem, což nám umožňuje analyzovat vzorce běžného pohybu a chování davu, abnormální chování [354], tvorbu a strukturu skupin [510] či další davové jevy (o nichž bylo již hovořeno viz kap. 1.2.1), jako je tvorba pruhů, blokování a reakce na zúžená místa [511]. Díky tomu se do oblasti výzkumu dynamiky davu a evakuace osob dostávají nové nápady a poznatky, které dále podporují jeho další vývoj (jako je sběr dat, extrakce behaviorálních charakteristik osob pro účely modelování pohybu davu, kalibrace a validace numerických modelů a výsledků simulací evakuace jak kvalitativně, tak i kvantitativně). Ukázka sběru dat dronem viz obr. G.4.



**Obr. G.4:** Příklad sběru dat – letecký snímek z videosekvence zachytávající dav, s následným anonymním přiřazením ID (zdroj: převzato ze spolupráce s RCE, Systems DFS)

### Využití AI – Extrahování dat z obrazu pomocí k MV Technologie snímání

Metody snímání pro MV jsou poměrně nenáročné na hardwarové vybavení, neboť je možné využít i stávajících digitálních kamerových systémů. V praxi se setkáváme především se dvěma základními systémy – stereoskopickými a monoskopickými.

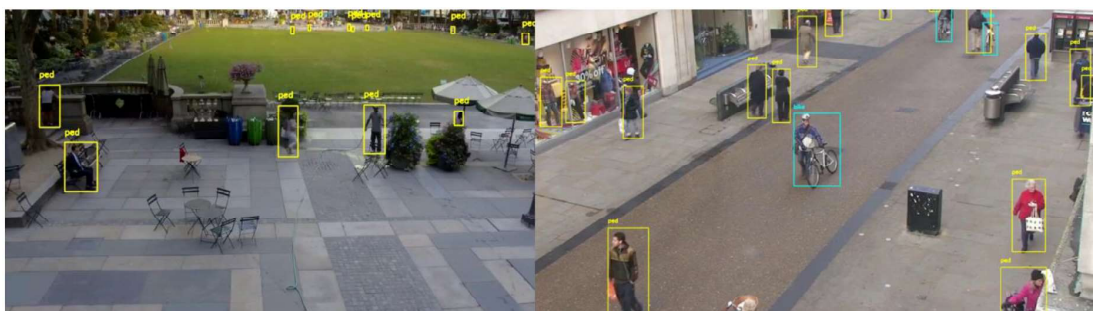
- **Stereoskopické systémy** využívají speciální zařízení – synchronizovaných kamer, pomocí kterých je sestavována tzv. hloubková mapa scény (osoby na snímku jsou vnímány jako výstupky v reliéfu, viz obr. G.5). Instalují se stabilně tak, aby optická osa kamer byla kolmá ke sledovanému povrchu (přípustná odchylka je obvykle několik jednotek stupňů). Instalační výška je závislá na použitém objektivu a požadované šířce záběru (např. pro plochu  $4,5 \times 3,5$  m je při instalační výšce 5 m docíleno ohniskové vzdálenosti 5,3 m) a zorném poli zařízení (FOV, Field of View). Lze je instalovat i do nižších profilů a jejich měření, např. určení rychlosti osoby, jsou velmi přesná.





Obr. G.5: Příklady záběrů stereoskopického detekčního systému a rektifikovaného obrazu scény ze dvou kamer – vodorovné čáry kontrolních linií pro rektifikaci obrazu (vpravo) (zdroj: převzato a upraveno ze spolupráce s a [14])

- **Monoskopické systémy** jsou naopak schopny k detekci využívat i standardních dohledových kamer, umístěných na ulicích, ve dveřích vozů, nad vstupy do budov apod. za předpokladu splnění minimálních požadavků na rozlišení a snímkovací frekvenci (dle konkrétního výrobce, široké spektrum možností). Detekce osob funguje na přímém rozpoznání a přiřazení tzv. ID univerzálně, jak tomu je třeba při dopravních průzkumech. Optimální úhel umístění kamery je dobře názorný na obr. G.6 (vpravo). Kamera je umístěna tak, aby v pohledu nedocházelo k překrývání objektů a odchylna od svislé osy byla v rozmezí  $0^{\circ}$ – $90^{\circ}$ , což umožňuje relativně volnou instalaci kamer. Tyto systémy lze užít jako čítače nebo k záznamu veličin, pro které je nutné kalibrovat, aby systém mohl transformovat pixelové souřadnice do reálných souřadnic. Oproti stereotypickému systému je celkové měření méně přesné – zejména u dynamických veličin, jelikož systém není jednoznačně schopen určit referenční bod pro stanovení jejich detekce.

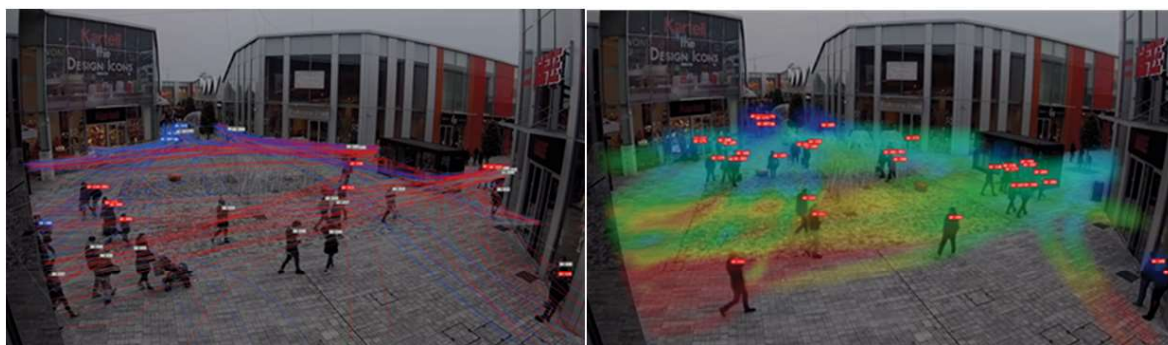


Obr. G.6: Příklad záběru z monoskopického systému, kde detekce je prováděna přímo z obrazu (zdroj: převzato ze spolupráce s RCE, Systems a [14])

Samotné zpracování dat probíhá buď centrálně na expertních výpočetních serverech, nebo součástí zařízení může být i výpočetní jednotka. Pro počítačové vidění je klíčový pohled na scénu, ale pro samotné snímkování jsou důležité doba měření i povětrnostní a světelné podmínky.

### Odhad počtu a hustoty davu

Díky rozšířené instalaci dohledových kamer zejména na veřejných místech, jako jsou dopravní uzly, ulice, koncertní haly, stadiony a obchodní centra, je využíváno MV zejména k počítání davu a stanovování jeho hustoty. Příkladem může být práce Yang et al. [572], která aplikuje odhad hustoty davu pomocí MV, definovaný řídkým, lokálním časoprostorovým popisem binárních vzorů k extrahování dynamické textury pohybujícího se davu. MV je dále užito v práci Sheng et al. [498], kde byly zlepšeny rozlišovací schopnosti detekce definovaných lokalit obrazu s cílem přesného počítání davu. Dalšími pracemi, které se zabývají využitím MV pro odhad počtu chodců v davu nebo stanovením hustoty, jsou např. [144, 281, 44], nebo i náš spoluřešitel RCE Systems, jehož práce (extrahování dat) je uvedena na obr. G.7.



**Obr. G.7:** Ukázka extrakce dat z videozáznamu pomocí DFS – treckování osob dle ID a vykreslení jejich trajektorií (vlevo) a vyhodnocení kumulativního využití ploch v pozorovaném prostoru (vpravo) (zdroj: převzato ze spolupráce s RCE Systems [220])

### Detekce nebezpečí

Využití MV (ML) ve spojení s agentními modely pěší dopravy může sloužit i k analýze a zefektivnění provozu a predikci nebezpečí nejen z pohledu PB, ale i dynamiky davu a ochrany měkkých cílů (detekce kritických hustot, detekce útočníka či osamocené zavazadla apod.) – aktivní vizuální kontrola hrozícího nebezpečí pro krizový management [496, 594].

### Sběr dat

MV se v dnešní době prosazuje zejména v podobě extrakce dat prostřednictvím strojového učení, která jsou následně využívána pro inicializaci nových davových simulačních (agentních) modelů, ke kalibraci stávajících simulačních nástrojů (modelů), nebo také pro ověřování výsledků samotné simulace. Z videoanalýzy davu při provozu (při evakuaci) jsme schopni detekovat omezené množství veličin, nebo je možné tyto získat nepřímo – příklad analýzy viz obr. G.8.



**Obr. G.8:** Ukázka videosekvence provozu vakcinačního centra na BVV analyzované v reálném čase pomocí z FLOW RCE – ID – trajektorie na zkoumaném koridoru (vlevo), vtyčení zájmových oblastí a označení ID vstupujících osob (střed), georeferencing obrazu (vpravo) (zdroj: vlastní ve spolupráci s RCE Systems)

V rámci analýzy videa pomocí MV jsou primárně pro popis pěšího proudu (davu) sledovány následující proměnné [392, 14]:

- intenzita pěšího proudu (na profilu),
- hustota pěšího proudu – statická/dynamická,
- individuální prostor (půdorysný průmět jedince),
- rychlost pohybu,
- trajektorie (tvar, délka),
- čas strávený v pozorovaném prostoru,
- věkové či genderové složení,
- typ detekované osoby (cyklista, osoba se zavazadlem, skupina) apod.

Další veličiny lze detekovat pouze nepřímo nebo je není možné detekovat vůbec (zejména ty spojené se stochastickou povahou behaviorální stránky pohybu davu). Získaná data jsou následně zpracovávána jako vstupy pro případné kalibrace či simulace modelu, ať už analytického nebo prediktivního. Na obr. G.9 je uveden příklad datové sady získané z analýzy videa pomocí MV.

```

MV_Extrakce dat BVV- vakcinacni centrum.txt - Poznámkový blok
Soubor Úpravy Formát Zobrazení Nápověda
# A tibble: 147 x 11
  ID      `license plate` Category  Color  `Trajectory start` `Trajectory end`
  <chr>   <lg1>              <chr>   <chr>  <chr>              <chr>
1 3092445 NA                pedestrian undefined 1621850671720    1621850671920
2 3093269 NA                pedestrian undefined 1621850684360    1621850686800
3 3093393 NA                pedestrian undefined 1621850735120    1621850753440
4 3093858 NA                pedestrian undefined 1621850802720    1621851143080
5 3093891 NA                pedestrian undefined 1621850827440    1621850827720
6 3094004 NA                pedestrian undefined 1621850867360    1621850895480
7 3094208 NA                pedestrian undefined 1621850853240    1621850854080
8 3094633 NA                pedestrian undefined 1621850915880    1621850939360
9 3094775 NA                pedestrian undefined 1621850929000    1621850949920
10 3094841 NA                pedestrian undefined 1621850950760    1621850967800
# ... with 137 more rows
`Average speed` `Minimum speed` `Maximum speed` `Duration of occurrence` `Stationary duration`
<chr>           <chr>           <chr>           <chr>           <chr>
0.43            0.43            0.43            0.20            0.20
0.81            0.71            0.91            2.44            1.12
1.31            0.08            3.33            18.32           6.80
5.50            0.37            8.31            179.12          15.12
1.06            1.06            1.06            0.28            0.00
2.13            0.16            8.62            19.77           4.12
2.86            2.74            2.94            0.32            0.00
1.49            0.08            3.94            23.48           7.72
1.39            1.39            1.39            20.92           0.00
2.00            0.94            2.26            17.04           2.28

```

**Obr. G.9:** Ukázka extrakce části základního setu dat z videozáznamu provozu vakcinačního centra na BVV, extrahovaného pomocí FLOW RCE – ID, kategorie objektu, trajektorie od–do, průměrná, min. a max. rychlost, doba výskytu a doba bez pohybu (zdroj: vlastní ve spolupráci s RCE Systems)

## Virtuální realita (VR, Virtual Reality)

Jak už bylo zmiňováno v kap. 1.2.3, VR je technologie umožňující uživateli ocitnout se v simulovaném prostředí, mít tak možnost interakce s prostředím a reagovat na podněty v reálném čase. VR umožňuje vytvoření iluze skutečného (evakuace, řízení automobilu, boj) či fiktivního světa (počítačové hry). Jde o vytváření zejména vizuálního, sluchového či jiného prožitku, budícího subjektivní dojem skutečnosti pomocí různých zařízení připojených k výpočetní jednotce, která dané vjemy realisticky generuje. Digitální (grafické) znázornění uživatele ve VR se děje prostřednictvím virtuální postavy (tzv. Avatar), která utváří interakce na vnější podněty uživatele a poskytuje zpětnou vazbu v reálném čase. Tyto systémy dovolují uživateli vyzkoušet v reálném světě situace, které by byly velmi problematicky realizovatelné. Vhodným příkladem může být i evakuace. Lze ztvárnit celou řadu scénářů, při kterých technologie VR poskytují maximum experimentální kontroly, snadný sběr dat a rekapitulaci.



**Obr. G.10:** Schéma vztahů mezi skutečností a virtuální realitou (zdroj: vlastní, přepracováno dle [331])



VR systémy jsou rozšířeným nástrojem pro simulaci, nácvik, výuku a optimalizaci procesů, např. při dopravě balíků, školení personálu, simulované operaci, virtuálním nakupování, bezpečnostním výcviku, sportu atd. Jak je vidět, jejich využití je v rámci široké škály multispektrálních odvětví – lékařství, vojenství, doprava, funkční design, architektura, výroba i služby. Zejména případy, kdy je třeba ztvárnit mimořádné situace (např. zemětřesení, výbuch, požár, únik nebezpečných látek, evakuace osob apod.), spojuje problém obtížného simulování/nacvičování v reálném světě, bez ohrožení lidských životů i negativních následků pro okolí. VR přináší nejen možnost, jak si „nanečisto“ vyzkoušet jinak život ohrožující situace, ale zejména možnost jak tyto situace evaluovat, analyzovat chování uživatelů a díky tomu i zvyšovat bezpečnost a optimalizaci řešení.

Z těchto důvodů se stala VR efektivním nástrojem v rámci výzkumu evakuace osob a zároveň účinným zdrojem tolik ceněných experimentálních evakuačních dat, jak z konkrétních VR evakuačních experimentů, tak přímo z VR cvičení a VR výcviků. Tato získaná data je pak následně možné užít v rámci validace a kalibrace samotného modelu.

### Technologie VR

Pro evakuační výzkum jsou využívány různé experimentální nástroje a vybavení pro VR od těch značně nákladných, ale sofistikovaných a vysoce pohltivých systémů, jako jsou např. systémy Cave Automatic Virtual Environments (CAVE), až po běžně dostupnější systémy Head-mounted display (HMD). Systémy CAVE využívají tři až šest směrů projekce v promítacím boxu velikosti místnosti (pozorovatel stojí uvnitř boxu), čímž vytvářejí takřka dokonalou iluzi. Příklad instalace a vizuální stránky blíže viz obr. G.11.



**Obr. G.11:** Schéma principu VR systém CAVE (vlevo), 3D multisenzorická laboratoř na univerzitě ve Würzburgu v Německu, systém CAVE (uprostřed), Screenshot simulace sociálních vlivu při evakuaci z tunelu realizované v systému CAVE (vpravo) (zdroj: převzato z [547, 380])

U běžnějších systémů HMD je zobrazovací zařízení (stereoskopický display) součástí audiovizuálního Head setu, který má uživatel umístěn na hlavě jako helmu, se senzory sledování pohybu hlavy (pokročilejší provedení často zahrnuje i gyroskopy, akcelerometry i snímače očí), senzory pro snímání pozice osoby a ovladače pro interakci s prostředím – obr. G.12. Velkým výzkumným potenciálem pro evakuační studie jsou zejména právě HMD sety s promítacím zařízením v podobě vlastního mobilního zařízení, které jsou účinné a finančně dostupné.



**Obr. G.12:** Schéma principu VR systém HMD (vlevo), příklad výcviku stevarda při simulaci požáru letadla (uprostřed), nácvik hašení požáru – figurant s headsetem vs. pohled do VR (vpravo) (zdroj: převzato z [543, 41, 541])

Pro výukové programy a interaktivní evakuační plány bývají využívány i technologie rozšířené reality (AR = augmented reality). AR funguje na principu snímání reality pomocí vlastního mobilního telefonu (kamery počítače), kde pomocí speciální aplikace detekuje snímanou scénu, umístění i orientaci kamery v prostoru, a na základě toho jsou do obrazu na displeji renderovány doplňující informace, jako jsou např. text, pokyny, šipky směru evakuace, předměty a animace (např. návod k obsluze hasicího přístroje), vše probíhá v reálném čase. Mezi největší výhody, které nám užívání zmiňovaných VR nástrojů přináší, patří zajištění bezpečnosti uživatelů, možnost neomezeného opakování simulace, zajištění souboru reálných optických a akustických vjemů, možnost analýzy procesů, interaktivní výuka a evaluace uživatelů, snížení finanční náročnosti experimentů, simulací i tréninků.

I přes rychlý pokrok technologií však ve VR nemizí problém z pocitu simulace. I když je tato značně přesvědčivá, jedná se stále pouze o iluzi. Těžko je možné napodobit stres, kontakt, stísněné prostory, gravitaci, teplo, prach, kouř a mnoho dalších vlivů, se kterými je nucen se jedinec při reálné situaci v případě vzniku mimořádné události vypořádat a které často také vedou i k jeho selhání (byť vybrané vlivy lze omezeně napodobovat doplňkovými technologiemi mimo VR – např. teplo požáru u výcvikových obleků pro HZS). Při simulaci je nutné dbát na dostatečnou přesnost ztvárnění mimořádné situace, které však s rostoucí komplexností simulace přináší i rostoucí požadavky na výkonnost používané sestavy. Toto si často vyžádá zvýšené nároky na výkonnost PC sestavy, které se následně promítají do relativně vysoké pořizovací ceny. Dalšími úskalími VR jsou ergonomické a implementační problémy. V průběhu simulace je nutné umožnit uživateli pohyb v takové míře, která jej neomezuje a současně mu poskytuje maximální splynutí se simulací. Dostupná zařízení HMD na trhu nedisponují většinou možností pro individuální přizpůsobení (headset uživateli špatně sedí), často jsou zařízení těžká a omezují uživatele v pohybu, zejména kabeláží. S rychlým vývojem technologií HMD však zmiňovaná negativa postupně mizí. Problémy se samotnou implementací VR tkví v tom, že ne každý uživatel tyto technologie dokáže plně využít a velká část jedinců se nezvládá na VR adaptovat (např. u nich dochází k závratím a nevolnosti).

## Využití VR a AR

V rámci bezpečnosti je jednou z nejdůležitějších otázek samotná evakuace osob, ať už v případě krizové situace často související s i terorismem, v případě požáru, úniku nebezpečných látek apod. Obzvláště důležitá je dobrá připravenost osob, kvalitně vypracované krizové plány a ověřená řešení. Tyto jsou nezbytnými prvky, které v krizových situacích zachraňují životy. Výše zmiňované pokročilé technologie lze s výhodou využít zejména v následujících oblastech:

### Zlepšení bezpečnostního návrhu

V tomto případě dochází k tvorbě VR studií za účelem vylepšení nebo otestování aplikovaných bezpečnostních systémů či řešení, jako je např. nouzové osvětlení (viz obr. G.13), značení evakuačních cest, navigačních systémů, testování systémů pro vyhledávání cest a také pro optimalizaci tvaru a uspořádání evakuačních koridorů.



**Obr. G.13:** Příklad studie E. Ronchi et. al, testování osvětlení exitových portálů v tunelových stavbách (zdroj: převzato z [476])

## Výuka a trénink osob

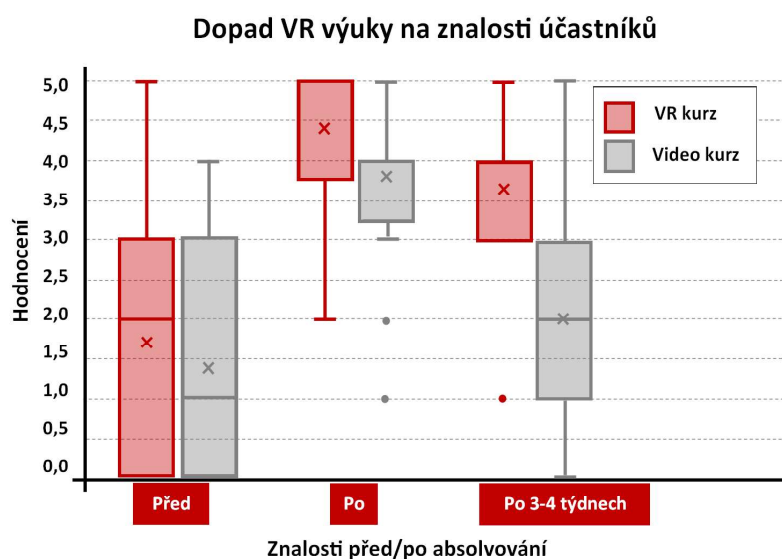
Jedná se o rozšířenější použití VR ve vztahu k evakuaci osob za vzniku mimořádné situace, ať již trénink pracovníků v prostředí či výukový nástroj. Slouží uživatelům k nácvičení evakuačních procesů (osvojení evakuačních cest, informací o nebezpečných místech nebo ovládnání technického vybavení – viz obr. G.14), zejména za nepříznivých podmínek, které se v reálných podmínkách běžně trénovat nedají, jako jsou např. ohrožení požárem, zakouření prostoru, teroristický útok, únik nebezpečných látek, nouzové přistání letadla či evakuace osob s potřebou asistence (děti, pacienti v nemocnici, osoby se sníženou pohyblivostí).



Obr. G.14: Použití VR pro nácvičení zdolávání požáru pro zaměstnance jako součást školení BOZP (zdroj: převzato z [436, 151])

Tyto výukové programy nejčastěji vznikají jako obecné výukové nástroje aplikované na referenční budovu (neznámou), nebo vytvořené přímo zákazníkovi na míru – např. konkrétní prostor (pracoviště, provoz, budova) jako součást BOZP a PO školení, při kterém lze daleko lépe evakuovat každého účastníka a zajistit tak, že jeho připravenost je optimální [490]. Další výhodou těchto programů je možnost realizace požárního cvičení za provozu, bez nutnosti odstávky výroby nebo přerušení provozu, což za normální situace znamená značnou finanční zátěž.

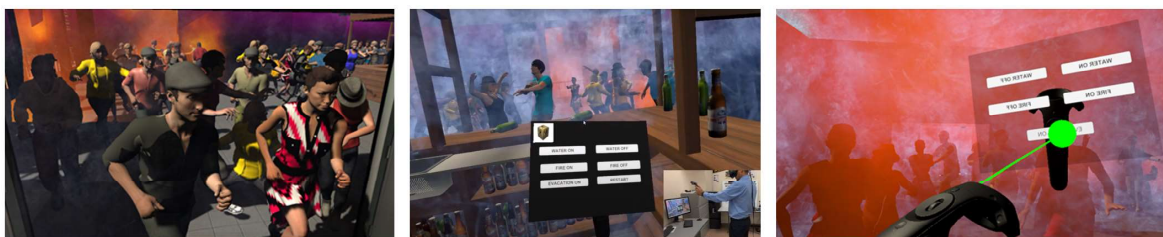
Podle dostupných zdrojů [331, 457, 359, 274, 35] efektivita a dopad nácvičení evakuačních procesů prostřednictvím VR nástroje se v maximální možné míře odvíjí od konkrétních detailů výukového programu, jako je znalost prostoru (model konkrétní budovy/pracoviště), sady reálných scénářů a postupů (požár, napadení útočníkem, osvojení si bezpečnostních zásad a vybavení) atd. Konkrétní dopady účinků VR výcviků a učení uvádí ve své práci R. Lovreglio, která je i interpretována na obr. G.15.



Obr. G.15: Vyhodnocení dopadů výukových programů na znalosti účastníka (zdroj: vlastní, přepracováno dle [331])



Konkrétním příkladem VR výcvikového nástroje pro evakuaci je Collaborative Virtual Reality Environment (CVE) z produkce Virtual Reality Laboratory, Bowie State University, jehož základem se stalo přepracování skutečného incidentu požáru v nočním klubu ve městě Santa Maria v Brazílii, při kterém v roce 2013 zemřelo celkem 234 lidí a dalších 622 bylo zraněno. V tomto případě byl vytvořen model celého prostoru klubu a jeho přilehlého okolí, který byl následně obsazen účastníky. Model umožňuje reálnou simulaci jedinců (konkrétního počtu), tak i davové jednání, interakce, evakuaci či davovou psychózu, viz obr. G.16. Bylo využito experimentálního návrhového přístupu, kdy uživatel má možnost volit ze sady scénářů a sledů událostí. V rámci simulace bylo využito nástavby Photon Unity Networking, aby se výukového programu ve VR mohlo účastnit více uživatelů současně. Výukové programy, založené na případových studiích vzniklých katastrof, fungují na principu získání ponaučení a přípravě na případné podobné události.

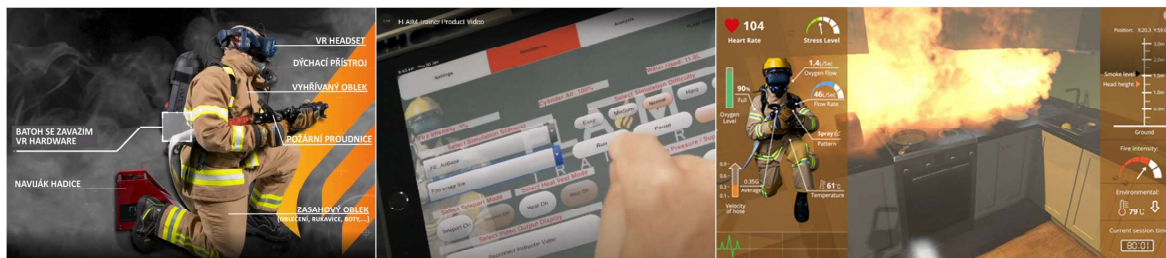


**Obr. G.16:** Příklad výukového VR vytvořeného dle skutečné události – požár brazilského nočního klubu v roce 2013 – davové šílenství (vlevo) a ukázka ovládání simulace (uprostřed, vpravo) (zdroj: převzato z [357])

### Výcvik IZS

Povolání profesionálního člena HZS patří mezi jedno z nejnebezpečnějších povolání. Proto zahrnuje i náročný trénink, sestávající nejen z fyzické a mentální přípravy, ale i z nácviku nejrůznějších činností zaměřených na vlastní hašení požáru, lezení po žebříku, pohyb ve ztíženém prostředí, přípravu a přesun těžké techniky apod. Přípravenost je základním kamenem úspěšného zásahu a eliminace ztrát na životech a zdraví zúčastněných osob.

VR pro případy zdolávání požáru je využívána primárně v souvislosti s výukou profesionálních hasičských jednotek a slouží k relativně velmi efektivní přípravě členů HZS na různé situace. To je možné vidět například na obr. G.17. Zde je představen specializovaný software FLAIM Trainer od firmy FLAIM Systems [165], doplněný o ergonomické nástroje pro zásah, díky kterému uživateli zprostředkuje nejvyšší integraci s VR. Jak díky svojí sofistikovanosti integrace s uživatelem, tak i naprostou kontrolou operátora nad simulací, kdy může náhodně měnit úkoly, ztížit průběh nebo přidat různou nečekanou událost, se řadí mezi nejpokročilejší výcvikové nástroje [317].



**Obr. G.17:** Ukázka nástrojů pro VR výcviku HZS – ergonomické vybavení (vlevo) a uživatelské rozhraní operátora simulace (uprostřed, vpravo) (zdroj: převzato z [317, 165])

Technologie VR začínají být hojně využívány, a to nejen v oblasti zdolávání požáru, ale také například při širším výcviku jednotek IZS, jak je uvedeno na následujícím obr. G.18. Využít je možné například těchto nástrojů: VRSENSE Fire Safety [549], EHS VR Fire Protection Training [150], PASS Fire VR [401] atd.



**Obr. G.18:** Použití VR při výcviku složek IZS – simulace resuscitace zraněné osoby (vlevo) a ozbrojený zásah bezpečnostní jednotky při ohrožení útočníkem (zdroj: převzato z [263, 1])

### Analýza chování během mimořádných událostí

V této oblasti VR umožňuje nejen sledovat dav jako celek, ale současně i zkoumat jednotlivé detaily, příčiny a chování jednotlivců. Využitím VR lze získat informace o individuální reakční době, rychlosti jeho pohybu, síle úzkosti a pocitech jedince, přehled o tom, kam se evakuovaná osoba dívá, na základě čeho se rozhoduje atd. VR nabízí jedinečnou příležitost, jak potřebná data získat i v případech, kdy je řešená budova nebo lokalita v projekční fázi nebo reálné provedení evakuačního experimentu není z bezpečnostních nebo organizačních důvodů možné. Získáváme tak souhrnné informace o vzorcích chování osob, které umožní efektivněji sestavovat numerické simulace a napomáhají lepšímu pochopení dějů evakuačního procesu při propuknutí mimořádné události – ukázka ztvárnění VR evakuačního procesu, viz obr. G.19.



**Obr. G.19:** Ukázka evakuace na koridorech ÚC ve VR prostředí (zdroj: vlastní, ze spolupráce s [19])

Kvalita výstupů numerické simulace evakuace osob se odvíjí od kvality vstupních dat. Jako vstupní hodnoty lze využít nejrůznějších zdrojů, např. zahraničních odborných prací, experimentů, technických standardů či dat, získaných z analýzy obrazu nebo VR experimentů. Celkově provádění evakuačních experimentů nebo shromažďování dat ze skutečných evakuací je velmi obtížné. VR může pomoci tento problém vyřešit tím, že umožňuje provádět systematické studie, které jsou bezpečné, spolehlivé a lze z nich čerpat celou řadu výstupních dat, z kterých je možné mimo jiné sledovat i chování osob, jejich reakci na viditelnost, orientaci v prostoru apod. Vybrané scény ohrožení z VR experimentů jsou uvedeny na obr. G.20.



**Obr. G.20:** Příklady záběrů z výcvikových programů a virtuálních požárních cvičení (zdroj: převzato z [437])



Právě možnost využití získaných dat z VR evakuačních experimentů jako vstupů pro kalibraci a validaci numerických modelů se zabývají práce [368, 274, 279, 468, 140, 101] a zároveň i aktuálně řešený projekt *TL02000103 – Kognitivní psychologie a prostorová syntaxe ve virtuálním prostředí pro agentní modely (CANAVERAL)*.

**Tab. G.1:** Srovnání metod sběru dat pro kalibraci a validaci evakuačních modelů – jejich výhody, nevýhody a efektivnost (zdroj: přepracováno z [341])

	Hypotetická studie	„Klasický“ laboratorní experiment	VR experiment	Měření v terénu	Cvičení	Reálné mimořádné události
Prostředí experimentu	laboratorní	laboratorní	laboratorní	reálný svět	reálný svět	reálný svět
Kontrola experimentu	ano	ano (ale menší než VR)	ano	omezeně	ne	ne
Typ výstupů	subjektivní (prohlášení od participantů nebo expertů)	subjektivně i objektivně (chování i psycho-fyziologické projevy)	subjektivně i objektivně (chování i psycho-fyziologické projevy)	subjektivní i objektivní (chování)	subjektivní i objektivní (chování)	subjektivní i objektivní (chování)
Možnost užití stresfaktoru	ne (pouze hypoteticky)	omezeně	omezeně	omezeně	omezeně	ano
Možnost úprav nastavení experimentu	ano	ano	ano	omezeně	ne	ne
Možnost přesného opakování	ano	ano	ano	omezeně	ne	ne
Časová a finanční náročnost sběru dat	velice málo	málo	málo	hodně	středně	
Možnost automatického sběru dat	ano	ano (ale menší než VR)	ano	omezeně	omezeně	ne

Dále je možné vybrané nástroje VR i propojit s výsledky simulací konkrétních numerických modelů požáru a evakuace, jako je tomu u výstupů Pathfinder a Pyrosim [548], viz obr. G.21. Takto prezentované výstupy mohou sloužit jako reálná představa o mimořádné situaci, jejím vývoji jak z hlediska požáru a s ním souvisejících zakouřením prostor, tak i následném průběhu evakuace osob či zásahu IZS.

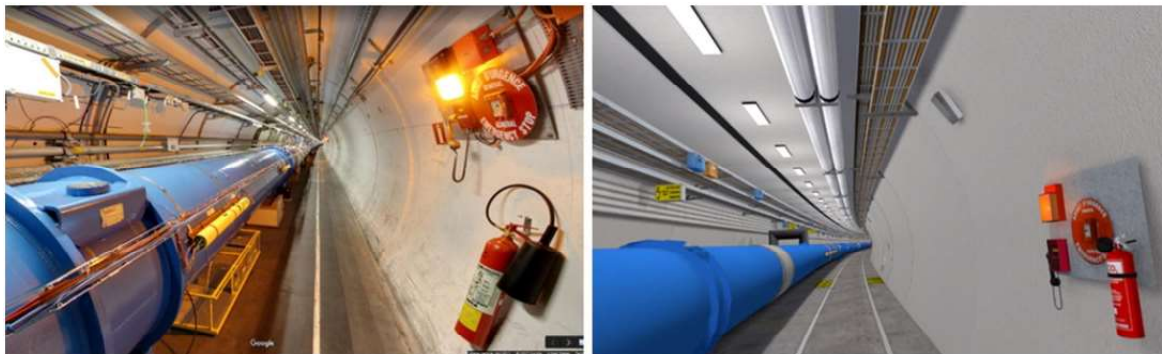


**Obr. G.21:** Příklad prezentace výsledků modelu evakuace osob ze stadionu ve VR – z nástroje Pathfinder (zdroj: převzato z [548])

Jak dokazuje množství odborně zaměřených prací a článků, jedná se o velmi rozšířené a vědecky zajímavé téma [527, 478, 471, 358, 334, 8, 78, 275]. Využití VR v oboru požární bezpečnosti či pro scénáře mimořádných událostí je přínosem, který slouží k významnému snížení bezpečnostního rizika a osvojení základních postupů při vzniku nouzové situace uživateli, ať už se jedná o záchranu života jiných lidí, hašení požáru nebo bezpečnou evakuaci. VR umožňuje vyzkoušet problematiku či nákladně realizovatelné nebo nebezpečné situace, které je následně možné detailně analyzovat. To vede k vysokému zájmu odborných organizací, které tak



mohou informace, produkované výzkumy ve VR, zakomponovat do nových technologií, technických standardů, norem, a vytvářet tak efektivnější výrobky, nové technologie a celkově bezpečnější stavby.



**Obr. G.22:** Příklad ztvárnění reálného prostředí pro účely VR simulace evakuace CERN – reálný prostor (vlevo) a VR prostor (vpravo) (zdroj: převzato z [35])

## H Postup sestavení návrhového požáru

Jak už bylo nastíněno v kap. 5.1.1, při sestavování návrhového požárního scénáře je nutné definovat tzv. návrhový požár (zjednodušeně jeho požární křivku), který úzce souvisí s charakteristikami budovy, jako je typ budovy a jeho uspořádání (např. provoz, velké otevřené prostory, užití materiály), požární zatížení, vybavení systémem detekce nebo jinými aktivními PBZ. Jde zejména o faktory, které mohou výrazně ovlivnit rozvoj a šíření požáru, nicméně tím zásadním je model primárního požáru jako takový, a jeho stanovení hustoty požárního zatížení (následně i křivky rychlosti uvolňovaného tepla).

Data, která užíváme pro popis návrhového požáru jako vstupní hodnoty numerických modelů, mohou být čerpána z expertíz nebo experimentálních kampaní, které udávají skutečné hodnoty návrhového požáru v [MW] pro konkrétní typy provozu a hořlavých látek (jejich množství a kombinace) [164, 413]. Je nutné definovat rámec požárního scénáře – potencionální sled událostí, který by v dané situaci mohl nastat – např. vznik požáru v konkrétním místě (vozu metra, zázemí stages, rozvodná skříň, sklad zavazadel apod.), následně je nutné co nejpodrobněji popsat materiálové charakteristiky a jejich množství vyskytující se v daném prostoru (ideálně přepočty vyskytující se materiálů na množství [m<sup>2</sup>], [m<sup>3</sup>], [kg] či [l]. Příkladem může být návrhový požár hranice dřeva vycházející z požární zkoušky, která zjednodušeně demonstruje vyskytující se materiál jako ekvivalent požárního zatížení od tzv. hranice dřevěných latí (o rozměrech 50 × 50 × 1000) [267]. Nebo konkrétní přepočet vyskytujícího se materiálu dle konkrétního dějového scénáře – např. sestavení křivky návrhového požáru, který byl užit při posuzování metra, kdy byl uvažován požární scénář narušeného jedinice, který polije sedačku z nylonu dvěma litry hořlavé kapaliny (benzin) – tento scénář byl inspirován skutečnou událostí požáru metra v Daegu z Jižní Koreje, kde žhář zapálil donesenou hořlavinou soupravu metra [252].

V případech, kdy ke konkrétnímu posouzení nejsou dostupná data, přistupuje se při stanovování návrhového požáru ve výpočtu konkrétního požáru dle návrhu PD. Aktuálně nejpoužívanějším přístupem pro stanovení návrhového požáru je postup dle ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí, Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru (73 0035) [131] nebo v její Příloze E.

Příloha E odst. 2 uvádí, že návrhovou hodnotu lze určit dvěma způsoby:

- **dle národní klasifikace provozů z hlediska požárního zatížení**
  - dochází k volbě obecného požárního zatížení dané ČSN 73 08XX (zejména ČSN 73 0802 a ČSN 73 0804) jako konkrétní hodnota s ohledem na provoz,
  - je stanoveno na základě výpočtu nebo výběru tabelární hodnoty, je nutné zkontrolovat míru jejího zjednodušení (vycházející z obecného normového řešení a jeho typizace) s reálným posuzovaným návrhem.
- **ze speciálně provedeného rozboru požárního zatížení po jednotlivé konkrétní případy**
  - kde návrhová hodnota požárního zatížení  $q_{f,d}$  je definována jako:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot q_1 \cdot q_2 \cdot q_n \quad [\text{MJ}/\text{m}^2], \quad (\text{H.1})$$

kde:

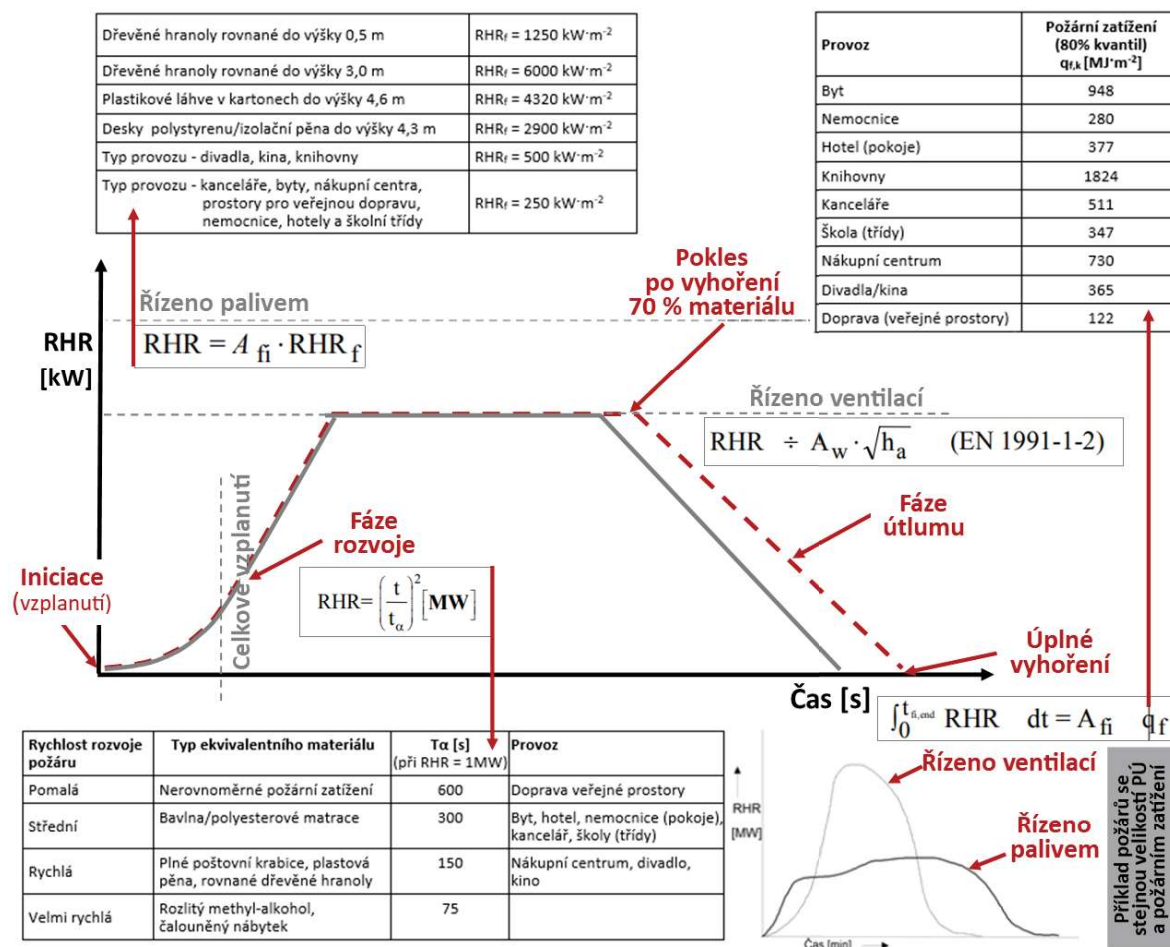
$m$  ... je součinitel hoření (dle ČSN EN 1991-1-2, tab. E.2),

$q_1$  ... součinitel vyjadřující nebezpečí vzniku požáru v závislosti na velikosti PÚ (dle ČSN EN 1991-1-2, tab. E.1),

$q_2$  ... součinitel vyjadřující nebezpečí vzniku požáru vlivem druhu provozu (dle ČSN EN 1991-1-2, tab. E.1),

- $q_n$  ... součinitel zohledňující aktivní protipožární zařízení,
- $q_{f,k}$  ... hustota charakteristického požárního zatížení na jednotku podlahové plochy (např. dle ČSN EN 1991-1-2, tab. E.4) [MJ/m<sup>2</sup>].

Následně je stanovována rychlost uvolňovaného tepla  $Q$  dle ČSN EN 1991-1-2 Příloha E pro jednotlivé fáze požáru, které byly již uvedeny v kap. 5.1.1. Fáze rozvoje je omezena vodorovnou rovinou ustáleného stavu a hodnotou  $Q$  (dané RHR<sub>f</sub> a  $A_{fi}$ ), kde  $A_{fi}$  je maximální plocha požáru [m<sup>2</sup>], kterou je požární usek rovnoměrně rozděleného požárního zatížení, která však může být menší v případě lokálního požáru a RHR<sub>f</sub> maximální rychlost uvolňování tepla uvolňovaná 1 m<sup>2</sup> požáru řízeného palivem [kW/m<sup>2</sup>]. Následně vodorovná rovina je omezena fází útlumu (dohořívání) a přechodem do klesající lineární fáze, která začíná při shoření 70 % celkového požárního zatížení (paliva) a končí při jeho úplném vyhoření. Pro názornost popisu je uvedeno na obr. H.1 schéma postupu sestavování křivky návrhového požáru se všemi potřebnými vztahy.



Obr. H.1: Schéma sestavování požární křivky návrhového požáru (zdroj: přepracováno z [395, 130])



# Literatura

- [1] 4 HELP VR. 2019.  
URL <https://4helpvr.com/>
- [2] Abdelghany, A.; Abdelghany, K.; Mahmassani, H.; aj.: Modeling framework for optimal evacuation of large-scale crowded pedestrian facilities. *European Journal of Operational Research*, ročník 237, č. 3, 2014: s. 1105–1118.
- [3] Acheson, D. J.: Elementary fluid dynamics. 1991.
- [4] Alahi, A.; Goel, K.; Ramanathan, V.; aj.: Social lstm: Human trajectory prediction in crowded spaces. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, s. 961–971.
- [5] Alluhaidan, A.: Location Analysis of Mina Site: One of the Most Crowded Areas at Hajj. In *Proceedings of the Conference on Information Systems Applied Research ISSN*, ročník 2167, 2016, str. 1508.
- [6] Amor, H. B.; Murray, J.; Obst, O.; aj.: Fast, neat, and under control: Arbitrating between steering behaviors. *AI Game Programming Wisdom*, ročník 3, 2006: s. 221–232.
- [7] Andersen, K.; Gaab, S. J.; Sattarvand, J.; aj.: METS VR: Mining evacuation training simulator in virtual reality for underground mines. In *17th International Conference on Information Technology–New Generations (ITNG 2020)*, Springer, 2020, s. 325–332.
- [8] Andréé, K.; Nilsson, D.; Eriksson, J.: Evacuation experiments in a virtual reality high-rise building: exit choice and waiting time for evacuation elevators. *Fire and Materials*, ročník 40, č. 4, 2016: s. 554–567.
- [9] Ansys Fluent. Fluid Simulation Software. 2021.  
URL <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- [10] Apeltauer, J.: Závěrečná zpráva – Aréna Brno, 2020.
- [11] Apeltauer, J.; Apeltauer, T.; Okřinová, P.: Závěrečná technická zpráva – Posouzení Pražského metra trasy D (zadavatel: METROPROJEKT Praha a.s.), 2019.
- [12] Apeltauer, T.; Apeltauer, J.; Beneš, P.; aj.: Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru, 2014.
- [13] Apeltauer, T.; Apeltauer, J.; Beneš, P.; aj.: Závěrečná zpráva – SAFEVAC, 2015.
- [14] Apeltauer, T.; Apeltauer, J.; Okřinová, P.: Certifikovaná metodika – Metodika využití detekce pěších pro městské plánování a analýzu rizik, 2019.
- [15] Apeltauer, T.; Apeltauer, J.; Okřinová, P.; aj.: Závěrečná zpráva – Zemský stadion Brno, 2017.
- [16] Apeltauer, T.; Apeltauer, J.; Okřinová, P.; aj.: Aktuální trendy v oblasti modelování pohybu osob ve vazbě na ochranu měkkých cílů a hromadnou dopravu. In *Veřejný prostor – návrh, obnova, využití a revitalizace, včetně dopravně inženýrských opatření.*, Mikulov, 2018, ISBN 978-80-270-3445-1, s. 62–69.
- [17] Apeltauer, T.; Apeltauer, J.; Okřinová, P.; aj.: Evakuace osob z tunelů železnice a metra v kontextu ochrany měkkých cílů. In *Zborník abstraktov – Tunely a podzemné stavby 2018*, Žilina: Iliana: Slovenská tunelárska asociácia, Podunajská24, 82106, Bratislava, 2018, 2018, ISBN 978-80-973073-9-4., s. 1–8.
- [18] Apeltauer, T.; Apeltauer, J.; Okřinová, P.; aj.: Využití simulačních nástrojů při ochraně měkkých cílů dopravní infrastruktury. In *Konference dopravní infrastruktura 2017 – sborník příspěvků a sborník firem*, Litomyšl: Jan Vopička, Ing. Jindřich Volf. Litomyšl: Agentura VIACO, 2018, s. 107–112.
- [19] Apeltauer, T.; Apeltauer, J.; Okřinová, P.; aj.: Závěrečná zpráva – Aréna Brno, 2020.
- [20] Apeltauer, T.; Apeltauer, J.; Okřinová, P.; aj.: Závěrečná zpráva – Matematický model simulace pohybu lidí ve veřejném prostoru ŽST Praha hl. n.(zadavatel: Správa železnic, státní organizace), 2020.
- [21] Apeltauer, T.; Beneš, P.; Apeltauer, J.; aj.: *Metodika využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb*. Metodika, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2019.  
URL <http://fire.fsv.cvut.cz/overene-modely/N-metC-3.pdf>



- [22] Apeltauer, T.; Beneš, P.; Okřinová, P.: Modelování pěší dopravy a příklady z praxe. In *Zklidnění dopravy ve městech a obcích*, Brno: Brněnské komunikace, a.s, 2016, ISSN 978-80-260-9662- 7, s. 1–8.
- [23] Apeltauer, T.; Beneš, P.; Okřinová, P.; aj.: Závěrečná prezentace výsledků – Stanice metra Olbrachtova, 2016.
- [24] Apeltauer, T.; Beneš, P.; Okřinová, P.; aj.: Závěrečná prezentace výsledků – Tunelový úsek metra I.D, 2016.
- [25] Apeltauer, T.; Beneš, P.; Vrána, L.: *Aplikace pokročilých modelů pohybu osob a dynamiky požáru pro bezpečnou evakuaci osob a analýzu rizik*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební., 2015.
- [26] Apeltauer, T.; Krčmová, I.; Beneš, P.; aj.: Roční zpráva 2013, 2013.
- [27] Apeltauer, T.; Okřinová, P.: Modelování pěší dopravy jako nástroj analýzy rizik a dopravního plánování. In *Konference dopravní infrastruktura*, Praha: AF-CITYPLAN s.r.o., 2016, s. 1–8.
- [28] Apeltauer, T.; Okřinová, P.; Apeltauer, J.: Závěrečná zpráva r. 2017, 2018.
- [29] Apeltauer, T.; Okřinová, P.; Beneš, P.: Model evakuace osob ze železničního tunelu. *Silnice a Železnice*, ročník 2016, 2016: s. s. 20–23., ISSN 1801-822X.
- [30] Apeltauer, T.; Podroužek, J.; Bříza, M.; aj.: Aplikace SAFEVAC, 2015.  
URL <http://www.modelyevakuace.cz>
- [31] Apeltauer, T.; Podroužek, J.; Bříza, M.; aj.: Aplikace SAFEVAC je určena pro multikriteriální parametrickou a citlivostní analýzu výsledků simulace modelu evakuačního procesu., 2015.  
URL <http://www.modelyevakuace.cz>
- [32] Apeltauer, T.; Podroužek, J.; Okřinová, P.; aj.: Závěrečná zpráva – Zvěrotický tunel, 2016.
- [33] Aréna Brno. 2020.  
URL <https://arenabrno.cz/o-hale>
- [34] ARGOS® – SIMULATION SOFTWARE. 2021.  
URL <https://brandogsikring.dk/en/argos/>
- [35] Arias, S.; La Mendola, S.; Wahlqvist, J.; aj.: Virtual reality evacuation experiments on way-finding systems for the future circular collider. *Fire Technology*, ročník 55, č. 6, 2019: s. 2319–2340.
- [36] Asahara, A.; Maruyama, K.; Sato, A.; aj.: Pedestrian-movement prediction based on mixed Markov-chain model. In *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems*, 2011, s. 25–33.
- [37] Ashe, B.; Shields, T.: Analysis and modelling of the unannounced evacuation of a large retail store. *Fire and materials*, ročník 23, č. 6, 1999: s. 333–336.
- [38] Atiyeh, B.: Brazilian kiss nightclub disaster. *Annals of burns and fire disasters*, ročník 26, č. 1, 2013: str. 3.
- [39] Atwell, E.; Khanlou, P.: Baku's Metro Accident. A Challenge to Strategize. 1995.  
URL [http://www.azer.com/aiweb/categories/magazine/34\\_folder/34\\_articles/34\\_metro.html](http://www.azer.com/aiweb/categories/magazine/34_folder/34_articles/34_metro.html)
- [40] Averill, J. D.: Five grand challenges in pedestrian and evacuation dynamics. In *Pedestrian and evacuation dynamics*, Springer, 2011, s. 1–11.
- [41] AVIETRA Srl. 2017-2020.  
URL <https://www.avietra.com/>
- [42] Baalisampang, T.; Abbassi, R.; Garaniya, V.; aj.: Fire impact assessment in FLNG processing facilities using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Fire Safety Journal*, ročník 92, 2017: s. 42–52.
- [43] Babrauskas, V.; Peacock, R. D.: Heat release rate: the single most important variable in fire hazard. *Fire safety journal*, ročník 18, č. 3, 1992: s. 255–272.
- [44] Babu Sam, D.; Surya, S.; Venkatesh Babu, R.: Switching convolutional neural network for crowd counting. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, s. 5744–5752.
- [45] Bakar, N. A. A.; Majid, M. A.; Adam, K.; aj.: Social Force as a Microscopic Simulation Model for Pedestrian Behavior in Crowd Evacuation. *Advanced Science Letters*, ročník 24, č. 10, 2018: s. 7611–7616.
- [46] Bates, P.; Stewart, M.; Desitter, A.; aj.: Numerical simulation of floodplain hydrology. *Water Resources Research*, ročník 36, č. 9, 2000: s. 2517–2529.
- [47] Bayer, K.; Rejnö, T.: Optimizing genom fullskaleförsök [Evacuation alarm—Optimizing through full-scale experiments](No. 5053). *Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, Sweden*, 1999.
- [48] Beard, A.; Carvel, R.: *Handbook of tunnel fire safety*. ICE publishing, 2012.

- [49] Bellomo, N.; Dogbe, C.: On the modeling of traffic and crowds: A survey of models, speculations, and perspectives. *SIAM review*, ročník 53, č. 3, 2011: s. 409–463.
- [50] Benda, O.: *Decision tree design based on evolutionary algorithms*. Masters thesis, Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication Department of Telecommunications, Brno, 2012.
- [51] Bennett, S.: Demonisation as explanation – A systems theory-informed analysis of the origins of, and reaction to the 1946 Burnden Park and 1989 Hillsborough football stadium disasters. *International journal of disaster risk reduction*, ročník 21, 2017: s. 405–418.
- [52] Bersini, H.; Detours, V.: Asynchrony induces stability in cellular automata based models. In *Artificial life IV*, MIT Press, MA, 1994, s. 382–387.
- [53] BIMfire 2019. 2019.  
URL <https://www.bimfire.cz/>
- [54] Bin Obaid, H.: Fair Resource Allocation in Macroscopic Evacuation Planning Using Mathematical Programming: Modeling and Optimization. 2020.
- [55] Biteau, H.; Steinhaus, T.; Simeoni, A.; aj.: Calculation methods for the heat release rate of materials of unknown composition. 2008.
- [56] Björkman, J.; Keski-Rahkonen, O.: *Simulation of the Steckler room fire experiment by using SOFIE CFD-model*. VTT Technical Research Centre of Finland, 1996.
- [57] Björkqvist, M.; Broholm, A.: Evacuation under the influence of alcohol: A laboratory experiment. 2017.
- [58] Blue, V. J.; Adler, J. L.: Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways. *Transportation Research Part B: Methodological*, ročník 35, č. 3, 2001: s. 293–312.
- [59] Boltz, M.; Zhang, J.; Seyfried, A.; aj.: T-junction: Experiments, trajectory collection, and analysis. In *2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, IEEE, 2011, s. 158–165.
- [60] Bourhim, E. M.; Cherkaoui, A.: Efficacy of virtual reality for studying people’s pre-evacuation behavior under fire. *International Journal of Human-Computer Studies*, ročník 142, 2020: str. 102484.
- [61] Bovy, P. H.; Stern, E.: *Route Choice: Wayfinding in Transport Networks: Wayfinding in Transport Networks*, ročník 9. Springer Science & Business Media, 2012.
- [62] Boyer, L.; Leguerney, I.; Thomas, S. R.; aj.: Study of the reliability of quantification methods of dynamic contrast-enhanced ultrasonography: numerical modeling of blood flow in tumor microvascularization. *Physics in Medicine & Biology*, ročník 63, č. 17, 2018: str. 17NT01.
- [63] Bradáčová, I.: Požární bezpečnost panelových bytových domů. 2006: s. 1–9.  
URL <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/3321-pozarni-bezpecnost-panelovych-bytovych-domu>
- [64] Bradáčová, I.: *Požární bezpečnost staveb*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, první vydání, 2007, ISBN 978-80-7385-023-4.  
URL <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:3f077d20-c5fd-11e3-b110-005056827e51>
- [65] Brajčić, H.; Šitum, M.: Virtual Reality in Medicine. *Rad Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti. Medicinske znanosti*, , č. 543= 50-51, 2020: s. 33–38.
- [66] Brilon, W.: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). *Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Köln, Germany*, 2009.
- [67] *British Standard Specification for Fire Test on Building Materials and Structures*.
- [68] Brunner, U.; Kirchberger, H.; Lebeda, C.; aj.: RiMEA–Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungs-Analysen. *Initiatoren des RiMEA-Projekts: M. Schwendimann, N. Waldau, P. Gattermann, C. Moroge, T. Meyer-König, and M. Schreckenber*, ročník 2, č. 1.
- [69] Bryan, J.: Behavioral response to fire and smoke, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. *Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association, Section*, ročník 1, 1995.
- [70] Bryan, J. L.: A selected historical review of human behavior in fire. *Fire Protection Engineering*, ročník 16, 2002: s. 4–10.
- [71] Buchanan, A.; Ostman, B.; Frangi, A.: *Fire resistance of timber structures*. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 2014.
- [72] Buchmüller, S.: Pedestrian and Transport Facility Attributes as Input Parameters for Microscopic Pedestrian Simulations. 2006.
- [73] Burghardt, S.; Seyfried, A.; Klingsch, W.: Performance of stairs–fundamental diagram and topographical measurements. *Transportation research part C: emerging technologies*, ročník 37, 2013: s. 268–278.

- [74] Burstedde, C.; Klauck, K.; Schadschneider, A.; aj.: Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 295, č. 3-4, 2001: s. 507–525.
- [75] Cabová, K.; Wald, F.: Verification and validation of numerical model of fire and smoke development in railway tunnel. *Acta Polytechnica*, ročník 56, č. 6, 2016: s. 432–439.
- [76] Cabová, K.; kol.: *Ověřování modelů v požární bezpečnosti*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, ve spolupráci s Vysokým učeníem technickým v Brně, Vysokou školou báňskou – Technickou univerzitou Ostrava a Technickým ústavem požární ochrany, první vydání, 2019, ISBN 978-80-01-06616-4.
- [77] Cadorin, J.-F.; Franssen, J.-M.: A tool to design steel elements submitted to compartment fires—OZone V2. Part 1: pre-and post-flashover compartment fire model. *Fire Safety Journal*, ročník 38, č. 5, 2003: s. 395–427.
- [78] Cai, L.; Yang, R.; Tao, Z.: A new method of evaluating signage system using mixed reality and eye tracking. In *Proceedings of the 4th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Safety and Resilience*, 2018, s. 1–6.
- [79] Caliendo, C.; Ciambelli, P.; Del Regno, R.; aj.: Modelling and numerical simulation of pedestrian flow evacuation from a multi-storey historical building in the event of fire applying safety engineering tools. *Journal of Cultural Heritage*, ročník 41, 2020: s. 188–199.
- [80] Canter, D.; aj.: Fires and human behaviour. 1981.
- [81] Cao, L.; Lin, J.; Li, N.: A virtual reality based study of indoor fire evacuation after active or passive spatial exploration. *Computers in Human Behavior*, ročník 90, 2019: s. 37–45.
- [82] Carvel, R.; Beard, A. N.; Jowitt, P.; aj.: Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels. *Fire Safety Journal*, ročník 36, č. 6, 2001: s. 569–596.
- [83] Časopis 112. 2016.  
URL <https://www.hzscr.cz/clanek/casopis-112-rocnik-xv-cislo-1-2016.aspx?q=Y2hudW09NA%3D%3D>
- [84] Časopis 112. 2016.  
URL <https://www.hzscr.cz/clanek/casopis-112-rocnik-xv-cislo-1-2016.aspx?q=Y2hudW09NA%3D%3D>
- [85] Castelli, L.; Corazzini, L. L.; Geminiani, G. C.: Spatial navigation in large-scale virtual environments: Gender differences in survey tasks. *Computers in Human Behavior*, ročník 24, č. 4, 2008: s. 1643–1667.
- [86] Castle, C.; Waterson, N.; Pellissier, E.; aj.: A comparison of grid-based and continuous space pedestrian modelling software: analysis of two UK train stations. In *Pedestrian and evacuation dynamics*, Springer, 2011, s. 433–446.
- [87] Černý, O.; Senovský, P.: Nekonvenční metody modelování rozvoje požáru. 2010: s. 23–30.
- [88] Plánek stanice Praha hlavní nádraží. 2018.  
URL <https://m.cd.cz/>
- [89] Challenger, R.; Clegg, C. W.; Robinson, M. A.: Understanding crowd behaviours: Supporting evidence. *Understanding Crowd Behaviours* (Crown, 2009), 2009: s. 1–326.
- [90] Chattaraj, U.; Seyfried, A.; Chakraborty, P.: Comparison of pedestrian fundamental diagram across cultures. *Advances in complex systems*, ročník 12, č. 03, 2009: s. 393–405.
- [91] Chen, X.; Ye, J.; Jian, N.: Relationships and characteristics of pedestrian traffic flow in confined passageways. *Transportation research record*, ročník 2198, č. 1, 2010: s. 32–40.
- [92] Chen, X.; Zhan, F. B.: Agent-based modeling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies. In *Agent-Based Modeling and Simulation*, Springer, 2014, s. 78–96.
- [93] Cheng, J. C.; Tan, Y.; Song, Y.; aj.: Developing an evacuation evaluation model for offshore oil and gas platforms using BIM and agent-based model. *Automation in Construction*, ročník 89, 2018: s. 214–224.
- [94] Cheong, H.-i.; Xian, K. L. C.; Majumdar, A.; aj.: Coupling of Evacuation and Fire Modelling through Soot Level Analysis. 2020.
- [95] Chiam, B. H.: Numerical simulation of a metro train fire. 2005.
- [96] Chittaro, L.; Buttussi, F.: Assessing knowledge retention of an immersive serious game vs. a traditional education method in aviation safety. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, ročník 21, č. 4, 2015: s. 529–538.
- [97] Chizari, H.; Malekinezhad, F.; Embi, M. R.; aj.: Agent-based approach for modeling evacuee uncertainty behavior using game theory model. *Life Science Journal*, ročník 10, č. 3, 2013: s. 1350–1355.

- [98] Chooramun, N.; Lawrence, P. J.; Galea, E. R.: An agent based evacuation model utilising hybrid space discretisation. *Safety science*, ročník 50, č. 8, 2012: s. 1685–1694.
- [99] Chraïbi, M.; Seyfried, A.; Schadschneider, A.: Generalized centrifugal-force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, ročník 82, č. 4, 2010: str. 046111.
- [100] Christensen, K.; Sasaki, Y.: Agent-based emergency evacuation simulation with individuals with disabilities in the population. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, ročník 11, č. 3, 2008: str. 9.
- [101] Chu, J. C.; Chen, A. Y.; Lin, Y.-F.: Variable guidance for pedestrian evacuation considering congestion, hazard, and compliance behavior. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, ročník 85, 2017: s. 664–683.
- [102] Chytrý, P.: ČSN 73 0802 – stručná historie a zavádění do praxe. *Technický zpravodaj*, č. 42, 2012: s. 1–5.
- [103] Ciocan, V.; ?urcanu, E.; Verde?, M.; aj.: Thermal comfort assessment for different heating system using CFD-modelling inside of an orthodox church. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, ročník 586, IOP Publishing, 2019, str. 012042.
- [104] Cirillo, E. N.; Muntean, A.: Dynamics of pedestrians in regions with no visibility—A lattice model without exclusion. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 392, č. 17, 2013: s. 3578–3588.
- [105] Clarke, H.; Ilyushina, M.: Fire exits blocked in Russian shopping mall devastated by blaze. *article published on the website: <https://edition.cnn.com/2018/03/26/europe/russia-kemerovo-shopping-center-fire-intl/index.html>*, 2018.
- [106] Cocking, C.; Drury, J.: Talking about Hillsborough: ‘Panic’ as discourse in survivors’ accounts of the 1989 football stadium disaster. *Journal of Community & Applied Social Psychology*, ročník 24, č. 2, 2014: s. 86–99.
- [107] Cocking, C.; Drury, J.; Reicher, S.: The psychology of crowd behaviour in emergency evacuations: Results from two interview studies and implications for the Fire and Rescue Services. *The Irish Journal of Psychology*, ročník 30, č. 1-2, 2009: s. 59–73.
- [108] Code, L. S.: NFPA 101®. *National Fire Protection Assn, Quincy, MA*, ročník 5, č. 1, 2018.
- [109] *Code of Practise for Fire Safety of Buildings*. India.
- [110] Connell, R.: Collective behavior in the September 11, 2001 evacuation of the World Trade Center. 2001.
- [111] Conway, J.: The game of life. *Scientific American*, ročník 223, č. 4, 1970: str. 4.
- [112] Cooper, L. Y.; Forney, G. P.: Consolidated Compartment Fire Model (CCFM) Computer Code Application CCFM. VENTS. Part 1. Physical Basis (NISTIR 4342). 1990.
- [113] Cornforth, D.; Green, D. G.; Newth, D.: Ordered asynchronous processes in multi-agent systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, ročník 204, č. 1-2, 2005: s. 70–82.
- [114] Cote, A. E.: *Fire protection handbook*, ročník 2. NationalFireProtectionAssoc, 2008.
- [115] Cristianini, N.; Shawe-Taylor, J.; aj.: *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge university press, 2000.
- [116] ČSN 73 0824 – *Výhřevnost hořlavých látek*. Praha: Český normalizační institut, 1992.
- [117] ČSN 73 0872 – *Ochrana staveb proti šíření požáru vzduchotechnickým zařízením*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [118] ČSN 73 0818 – *Obsazení objektů osobami*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [119] ČSN 73 0843 – *Objekty spojů a poštovních provozů*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [120] ČSN 73 0873 – *Zásobování požární vodou*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [121] ČSN 73 0835 – *Budovy zdravotnických zařízení a sociální péče*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [122] ČSN 73 0821 – *Požární odolnost stavebních konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [123] ČSN 73 0802 – *Nevýrobní objekty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [124] ČSN 73 0804 – *Výrobní objekty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [125] ČSN 73 0833 – *Budovy pro bydlení a ubytování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [126] ČSN 73 0831 – *Shromažďovací prostory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

- [127] ČSN 73 0834 – *Změny staveb*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [128] ČSN 73 0875 – *Stanovení podmínek pro navrhování elektrické požární signalizace v rámci požárně bezpečnostního řešení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [129] ČSN 73 0810 – *Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [130] ČSN EN 1991-1-2 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí*. 2004.
- [131] ČSN EN 1991-1-2 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [132] Cuesta, A.; Abreu, O.; Alvear, D.: *Evacuation modeling trends*. Springer, 2015.
- [133] Cábová, K.: Požární zatížení po roce 2021, 2021.  
URL [http://fire.fsv.cvut.cz/LOCAFI/180919\\_Cabova\\_14-05.pdf](http://fire.fsv.cvut.cz/LOCAFI/180919_Cabova_14-05.pdf)
- [134] Cábová, K.; Apeltauer, T.; Okřínová, P.; aj.: Application of fire and evacuation models in evaluation of fire safety in railway tunnels. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Bristol, 2017, ISSN 1757-8981, s. 1–8.
- [135] Cábová, K.; Kožich, M.; Apeltauer, T.: *Certifikovaná metodika – Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů*. Metodika, Praha, 2019.  
URL <http://fire.fsv.cvut.cz/overene-modely/N-metC-2.pdf>
- [136] Cábová, K.; Wald, F.; Bernas, M.; aj.: *Aplikace numerických modelů pro bezpečnou evakuaci vozidel při požárech v železničních tunelech*. Certifikovaná metodika 2017, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Praha, Brno, 2017.  
URL <http://www.cesti.cz/index.php?page=cer-metod>
- [137] Daamen, W.; Hoogendoorn, S.: Calibration of pedestrian simulation model for emergency doors by pedestrian type. *Transportation Research Record*, ročník 2316, č. 1, 2012: s. 69–75.
- [138] Daamen, W.; Hoogendoorn, S. P.: Experimental research of pedestrian walking behavior. *Transportation research record*, ročník 1828, č. 1, 2003: s. 20–30.
- [139] Daud Khan, S.; Saqib, M.; Blumenstein, M.: Towards a Dedicated Computer Vision Tool set for Crowd Simulation Models. *arXiv e-prints*, 2017: s. arXiv–1709.
- [140] Dickinson, P.; Gerling, K.; Hicks, K.; aj.: Virtual reality crowd simulation: effects of agent density on user experience and behaviour. *Virtual Reality*, ročník 23, č. 1, 2019: s. 19–32.
- [141] *DIN 18320 – Baulicher Brandschutz im Industriebau*. Deutschland, Entwuef, Juni, Juni 1968.
- [142] DiNenno, P. J.: *SFPE handbook of fire protection engineering*. 2008.
- [143] Dolezal, F.; Neusser, M.; Teibinger, M.; aj.: *Akustik Center Austria-new research and testing competence for timber constructions*. 2016.
- [144] Dong, H.; Zhou, M.; Wang, Q.; aj.: State-of-the-Art Pedestrian and Evacuation Dynamics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019.
- [145] Drury, J.; Cocking, C.: *The mass psychology of disasters and emergency evacuations: A research report and implications for practice*. University of Sussex Brighton, 2007.
- [146] Drysdale, D.: *An introduction to fire dynamics*. John Wiley & Sons, 2011.
- [147] Duarte, E.; Rebelo, F.; Teles, J.; aj.: Behavioral compliance for dynamic versus static signs in an immersive virtual environment. *Applied ergonomics*, ročník 45, č. 5, 2014: s. 1367–1375.
- [148] Duives, D. C.; Wang, G.; Kim, J.: Forecasting pedestrian movements using recurrent neural networks: An application of crowd monitoring data. *Sensors*, ročník 19, č. 2, 2019: str. 382.
- [149] E., C. G.: *GVE2019 CIBSE Guide E: Fire Safety Engineering*. UK: CIBSE, Čtvrté vydání, Jun 2019, ISBN 9781912034291.
- [150] EHS VR. 2020.  
URL <https://ehsvr.com/contact-us/>
- [151] ELS. 2018.  
URL <https://www.e-learningstudios.com/>
- [152] Fabian, F.; Kluibler, Z.: *Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění*. Praha: Prospektrum, první vydání, 1998, ISBN 80-7175-058-1.
- [153] Fefferman, C. L.: Existence and smoothness of the Navier-Stokes equation. *The millennium prize problems*, ročník 57, 2006: str. 67.
- [154] Feliciani, C.; Nishinari, K.: Empirical analysis of the lane formation process in bidirectional pedestrian flow. *Physical Review E*, ročník 94, č. 3, 2016: str. 032304.

- [155] Feliciani, C.; Nishinari, K.: An improved Cellular Automata model to simulate the behavior of high density crowd and validation by experimental data. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 451, 2016: s. 135–148.
- [156] Feng, Z.; González, V. A.; Amor, R.; aj.: Immersive virtual reality serious games for evacuation training and research: A systematic literature review. *Computers & Education*, ročník 127, 2018: s. 252–266.
- [157] Fennell, D.: Investigation into the King's Cross underground fire. 1988.
- [158] Fennell, D.: *Investigation into the King's Cross Underground Fire*. London: HMSO books, 1988, ISBN 0-10-104992-7.
- [159] *Fire Resisting Construction and Means of Egress*. New Zealand, 1990.
- [160] Fire Dynamics Tools (FDTs). 2020.  
URL <https://fdstutorial.com/contact/>
- [161] Fire Protection. 2021.  
URL <https://www.pelcfrantisek.cz/>
- [162] *Fire safety engineering*. Case Postale 56, CH-1211 Geneve 20, Switzerland, 1999.
- [163] *Fire safety engineering — Assessment, verification and validation of calculation methods*. 2008.
- [164] Fires, I.: Lund University, Sweden. Institute of Fire Safety Engineering. ISSN 1102-8246. Technická zpráva, ISRN LUTVDG/TVBB-3070-SE, 1993.
- [165] FLAIM. 2020.  
URL <https://flaimsyste.ms.com/>
- [166] Forschungszentrum Jülich. 2015.  
URL <https://www.fz-juelich.de/>
- [167] Frank, G. A.; Dorso, C. O.: Room evacuation in the presence of an obstacle. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 390, č. 11, 2011: s. 2135–2145.
- [168] Frantzieh, H.; Nilsson, D.; Eriksson, O.: Utvärdering och validering av utrymningsprogram [Evaluation and validation of evacuation programs](No. 3143). *Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Lund, Sweden*, 2007.
- [169] Frantzieh, H.; Nilsson, D.; Eriksson, O.: Evaluation and validation of evacuation programs. 2008.
- [170] Fridolf, K.: *Rail tunnel evacuation*. Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, 2015.
- [171] Fridolf, K.; Nilsson, D.; Frantzieh, H.: Fire evacuation in underground transportation systems: a review of accidents and empirical research. *Fire technology*, ročník 49, č. 2, 2013: s. 451–475.
- [172] Fruin, J. J.: Pedestrian planning and design. Technická zpráva, 1971.
- [173] Fruin, J. J.: *Pedestrian Planning and Design*, Mobile, AL: Elevator World. 1987.
- [174] Fu, L.; Cao, S.; Song, W.; aj.: The influence of emergency signage on building evacuation behavior: An experimental study. *Fire and materials*, ročník 43, č. 1, 2019: s. 22–33.
- [175] Fu, L.; Song, W.; Lo, S.: A fuzzy-theory-based behavioral model for studying pedestrian evacuation from a single-exit room. *Physics Letters A*, ročník 380, č. 34, 2016: s. 2619–2627.
- [176] Galea, E.: *Validation of evacuation models*, ročník 9. CMS Press, 1997.
- [177] Galea, E.: *SFPE Engineering Guide to Human Behavior in Fire*. 2003.
- [178] Galea, E.; et al.: EXODUS. 2019.  
URL <https://fseg.gre.ac.uk/exodus/index.html>
- [179] Galea, E.; Owen, M.; Lawrence, P.: The role of evacuation modelling in the development of safer air travel. 1997.
- [180] Galea, E. R.; Wang, Z.; Veeraswamy, A.; aj.: Coupled fire/evacuation analysis of the Station Nightclub fire. *Fire Safety Science*, ročník 9, 2008: s. 465–476.
- [181] Gamberini, L.; Chittaro, L.; Spagnoli, A.; aj.: Psychological response to an emergency in virtual reality: Effects of victim ethnicity and emergency type on helping behavior and navigation. *Computers in Human Behavior*, ročník 48, 2015: s. 104–113.
- [182] Ganjeh, M.; Einollahi, B.: Mass fatalities in Hajj in 2015. *Trauma monthly*, ročník 21, č. 5, 2016.
- [183] Gao, J.; Gong, J.; Qing, Q.: Coupling evacuation model of air-supported membrane buildings subjected to air-leakage based on multi-velocity cellular automaton. *Simulation Modelling Practice and Theory*, ročník 108, 2021: str. 102257.
- [184] Garcimartín, A.; Parisi, D. R.; Pastor, J. M.; aj.: Flow of pedestrians through narrow doors with different competitiveness. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, ročník 2016, č. 4, 2016: str. 043402.



- [185] Garcimartín, A.; Pastor, J.; Ferrer, L.; aj.: Flow and clogging of a sheep herd passing through a bottleneck. *Physical Review E*, ročník 91, č. 2, 2015: str. 022808.
- [186] Gardner, J.: Building design and human behaviour in fires. *Fire Engineers Journal*, ročník 56, 1996: s. 18–20.
- [187] Gayathri, H.; Gulhare, S.; Verma, A.: Characteristics of Stop and Go Wave in One Dimensional Interrupted Pedestrian Flow Through Narrow Channel. *Collective Dynamics*, ročník 3, 2019: s. 1–14.
- [188] Goldhammer, M.; Doll, K.; Brunsmann, U.; aj.: Pedestrian's trajectory forecast in public traffic with artificial neural networks. In *2014 22nd International Conference on Pattern Recognition, IEEE*, 2014, s. 4110–4115.
- [189] Gould, R. A.: Looking Back: 10 Years After “the Station” Nightclub Fire, West Warwick, Rhode Island. In *Forensic Archaeology*, Springer, 2019, s. 281–297.
- [190] Grewolls, G.; Grewolls, K.: Sensitivity analysis of evacuation simulations. *Proc Engin*, ročník 2, 2014: s. 22–6.
- [191] Grosshandler, W.; Bryner, N.; Madrzykowski, D.; aj.: Report of the technical investigation of The Station Nightclub fire: appendices. *NIST NCSTAR*, ročník 2, 2005.
- [192] Guo, N.; Hao, Q.-Y.; Jiang, R.; aj.: Uni-and bi-directional pedestrian flow in the view-limited condition: experiments and modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, ročník 71, 2016: s. 63–85.
- [193] Guo, R.-Y.; Huang, H.-J.; Wong, S.: Route choice in pedestrian evacuation under conditions of good and zero visibility: Experimental and simulation results. *Transportation research part B: methodological*, ročník 46, č. 6, 2012: s. 669–686.
- [194] Guo, X.; Chen, J.; You, S.; aj.: Modeling of pedestrian evacuation under fire emergency based on an extended heterogeneous lattice gas model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 392, č. 9, 2013: s. 1994–2006.
- [195] Gwynne, S.; Boyce, K.: Engineering data. In *SFPE handbook of fire protection engineering*, Springer, 2016, s. 2429–2551.
- [196] Gwynne, S.; Galea, E.: *A review of the methodologies and critical appraisal of computer models used in the simulation of evacuation from built environment*, ročník 9. CMS Press (University of Greenwich), 1997.
- [197] Gwynne, S.; Galea, E.; Lawrence, P. J.; aj.: Modelling occupant interaction with fire conditions using the buildingEXODUS evacuation model. *Fire Safety Journal*, ročník 36, č. 4, 2001: s. 327–357.
- [198] Gwynne, S.; Galea, E.; Parke, J.; aj.: The collection and analysis of pre-evacuation times derived from evacuation trials and their application to evacuation modelling. *Fire Technology*, ročník 39, č. 2, 2003: s. 173–195.
- [199] Gwynne, S.; Kuligowski, E.; Nilsson, D.: Representing evacuation behavior in engineering terms. *Journal of fire protection engineering*, ročník 22, č. 2, 2012: s. 133–150.
- [200] Gwynne, S.; Kuligowski, E.; Spearpoint, M.: More thoughts on defaults. 2012.
- [201] Gwynne, S. M.; Boyce, K. E.; Kuligowski, E. D.; aj.: Pros and cons of egress drills. *Interflam 2016*, 2016: s. 1657–1670.
- [202] Gwynne, S. M.; Rosenbaum, E. R.: Employing the hydraulic model in assessing emergency movement. In *SFPE handbook of fire protection engineering*, Springer, 2016, s. 2115–2151.
- [203] Ha, V.; Lykotrafitis, G.: Agent-based modeling of a multi-room multi-floor building emergency evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 391, č. 8, 2012: s. 2740–2751.
- [204] Hajjem, M.; Bouziri, H.; Talbi, E.-G.; aj.: Intelligent Indoor Evacuation Guidance System Based on Ant Colony Algorithm. In *2017 IEEE/ACS 14th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, IEEE, 2017, s. 1035–1042.
- [205] Halasová, L.; Hejtmánek, P.: *Certifikovaná metodika – Vstupní data do modelů požáru*. Metodika, Praha, 2019.  
URL <http://fire.fsv.cvut.cz/overene-modely/N-metC-1.pdf>
- [206] Hall, E. T.: *The Hidden Dimension*. Boston: Anchor Books, první vydání, 1966, ISBN 0-385-08476-5.
- [207] Hamzeh, M.; Sykes, H.: Egyptian football Ultras and the January 25 revolution: anti-colonial masculinities and patriarchal state terrorism. In *The Sexual and Gender Politics of Sport Mega-Events*, Routledge, 2016, s. 140–164.
- [208] Hankin, B.; Wright, R. A.: Passenger flow in subways. *Journal of the Operational Research Society*, ročník 9, č. 2, 1958: s. 81–88.
- [209] Hao, Y.; Xu, Z.-J.; Liu, Y.; aj.: Effective crowd anomaly detection through spatio-temporal texture analysis. *International Journal of Automation and Computing*, ročník 16, č. 1, 2019: s. 27–39.

- [210] Hart, P. E.; Nilsson, N. J.; Raphael, B.: A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, ročník 4, č. 2, 1968: s. 100–107.
- [211] Hasan, S.; Ukkusuri, S.; Gladwin, H.; aj.: Behavioral model to understand household-level hurricane evacuation decision making. *Journal of Transportation Engineering*, ročník 137, č. 5, 2011: s. 341–348.
- [212] Havel, R.: Věkové složení obyvatelstva – 2019. 2020.  
URL <https://www.czso.cz/csu/czso/vekove-slozeni-obyvatelstva-2019>
- [213] Helbing, D.; Farkas, I.; Vicsek, T.: Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, ročník 407, č. 6803, 2000: s. 487–490.
- [214] Helbing, D.; Farkas, I. J.; Molnar, P.; aj.: Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and evacuation dynamics*, ročník 21, č. 2, 2002: s. 21–58.
- [215] Helbing, D.; Isobe, M.; Nagatani, T.; aj.: Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics. *Physical review E*, ročník 67, č. 6, 2003: str. 067101.
- [216] Helbing, D.; Johansson, A.; Al-Abideen, H. Z.: Dynamics of crowd disasters: An empirical study. *Physical review E*, ročník 75, č. 4, 2007: str. 046109.
- [217] Helbing, D.; Molnar, P.: Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, ročník 51, č. 5, 1995: str. 4282.
- [218] Helbing, D.; Molnar, P.: Self-organization phenomena in pedestrian crowds. *arXiv preprint cond-mat/9806152*, 1998.
- [219] Helbing, D.; Mukerji, P.: Crowd disasters as systemic failures: analysis of the Love Parade disaster. *EPJ Data Science*, ročník 1, č. 1, 2012: str. 7.
- [220] Herman, D.: Retail Analytics Solutions by DataFromSky – Counts, Heatmaps, Distancing. 2021.  
URL <https://vimeo.com/503005883>
- [221] Hietaniemi, J.; Mikkola, E.: Design fires for fire safety engineering. *Technical Research Centre, Helsinki, Finland*, 2010.
- [222] Hill, M. R.: Spatial structure and decision-making aspects of pedestrian route selection through an urban environment. 1982.
- [223] Hirai, K.; Tarui, K.: A simulation of the behavior of a crowd in panic. In *Proceedings of the 1975 International Conference on Cybernetics and Society*, 1975, s. 409–411.
- [224] Holý, D.: Ženy a muži v datech 2020. Statistická data Česká republika. 2020.  
URL <https://www.czso.cz/documents/10180/151439704/30000420.pdf/5f24abfc-dbb8-4be6-98f6-1d9acff33e56?version=1.3>
- [225] Hongfei, J.; Lili, Y.; Ming, T.: Pedestrian flow characteristics analysis and model parameter calibration in comprehensive transport terminal. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, ročník 9, č. 5, 2009: s. 117–123.
- [226] Hoogendoorn, S. P.; Bovy, P. H.: Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. *Transportation Research Part B: Methodological*, ročník 38, č. 2, 2004: s. 169–190.
- [227] Hoogendoorn, S. P.; Daamen, W.: Pedestrian behavior at bottlenecks. *Transportation science*, ročník 39, č. 2, 2005: s. 147–159.
- [228] Hoogendoorn, S. P.; Daamen, W.: Microscopic parameter identification of pedestrian models and implications for pedestrian flow modeling. *Transportation research record*, ročník 1982, č. 1, 2006: s. 57–64.
- [229] Horiuchi, S.; Murozaki, Y.; Hukugo, A.: A case study of fire and evacuation in a multi-purpose office building, Osaka, Japan. *Fire Safety Science*, ročník 1, 1986: s. 523–532.
- [230] Hrabák, P.; Bukáček, M.: Influence of agents heterogeneity in cellular model of evacuation. *Journal of computational science*, ročník 21, 2017: s. 486–493.
- [231] Hu, J.; You, L.; Zhang, H.; aj.: Study on queueing behavior in pedestrian evacuation by extended cellular automata model. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, ročník 489, 2018: s. 112–127.
- [232] Huang, L.; Chen, T.; Wang, Y.; aj.: Congestion detection of pedestrians using the velocity entropy: A case study of Love Parade 2010 disaster. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 440, 2015: s. 200–209.
- [233] Huang, Y.; Xu, T.; Sun, W.: Public health lesson from Shanghai New Year's Eve stampede. *Iranian journal of public health*, ročník 44, č. 7, 2015: s. 1021–1022.
- [234] Hughes, R. L.: A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological*, ročník 36, č. 6, 2002: s. 507–535.

- [235] Hurley, M. J.; Gottuk, D. T.; Hall Jr, J. R.; aj.: *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer, 2015.
- [236] Hurley, M. J.; Rosenbaum, E. R.: *Performance-based fire safety design*. CRC Press, 2015.
- [237] Hurley, M. J.; Rosenbaum, E. R.: Performance-based design. In *SFPE handbook of fire protection engineering*, Springer, 2016, s. 1233–1261.
- [238] Hyatt, N.: *Guidelines for process hazards analysis (PHA, HAZOP), hazards identification, and risk analysis*. CRC press, 2018.
- [239] Ministerstvo vnitra generální ředitelství HZS ČR, O. s. t. p.: Metodický návod pro navrhování a posuzování požárně bezpečnostního řešení. 2018.
- [240] Ibrahim, A. M.; Venkat, I.; De Wilde, P.: Uncertainty in a spatial evacuation model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 479, 2017: s. 485–497.
- [241] *IMO Guidelines 1238*. London, 2016.
- [242] India stampede death toll rises. 2008.
- [243] Intini, P.; Ronchi, E.; Gwynne, S.; aj.: Traffic modeling for wildland–urban interface fire evacuation. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, ročník 145, č. 3, 2019: str. 04019002.
- [244] *ISO 13571:2012 Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires*. ISO/TC 92/SC 3 Fire threat to people and environment, druhé vydání, 2012.
- [245] *ISO 16730:2008 Fire safety engineering – assessment, verification and validation of calculation methods*. První vydání, 2008.
- [246] *ISO 20414:2020 Fire safety engineering — Verification and validation protocol for building fire evacuation models*. France, první vydání, 2020.
- [247] Isobe, M.; Helbing, D.; Nagatani, T.: Experiment, theory, and simulation of the evacuation of a room without visibility. *Physical Review E*, ročník 69, č. 6, 2004: str. 066132.
- [248] Ivorra, S.; Brotons, V.; Foti, D.; aj.: A preliminary approach of dynamic identification of slender buildings by neuronal networks. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, ročník 80, 2016: s. 183–189.
- [249] Jameson, A.: Optimum aerodynamic design using CFD and control theory. In *12th computational fluid dynamics conference*, 1995, str. 1729.
- [250] Janardhan, R. K.; Hostikka, S.: Predictive computational fluid dynamics simulation of fire spread on wood cribs. *Fire Technology*, ročník 55, č. 6, 2019: s. 2245–2268.
- [251] Jebrane, A.; Argoul, P.; Hakim, A.; aj.: Estimating contact forces and pressure in a dense crowd: Microscopic and macroscopic models. *Applied Mathematical Modelling*, ročník 74, 2019: s. 409–421.
- [252] Jeon, G.; Hong, W.: Characteristic features of the behavior and perception of evacuees from the Daegu subway fire and safety measures in an underground fire. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, ročník 8, č. 2, 2009: s. 415–422.
- [253] Jiang, L.; Li, J.; Shen, C.; aj.: Obstacle optimization for panic flow-reducing the tangential momentum increases the escape speed. *PloS one*, ročník 9, č. 12, 2014.
- [254] Jiang, Y.-q.; Zhang, P.; Wong, S.; aj.: A higher-order macroscopic model for pedestrian flows. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 389, č. 21, 2010: s. 4623–4635.
- [255] Jiang, Y.-Q.; Zhou, S.-G.; Tian, F.-B.: A higher-order macroscopic model for bi-direction pedestrian flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 425, 2015: s. 69–78.
- [256] Jin, T.: Visibility through fire smoke (I). *Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering*, ročník 19, č. 2, 1970: s. 1–8.
- [257] Jin, T.: Visibility and human behavior in fire smoke. *the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., (Di Nanno, PJ Ed.)*, ročník 2, 2002: s. 42–53.
- [258] Jirkovský, J.: Počítačové vidění a prostředí MATLAB. Od hledání vzoru po deep learning. 2018. URL <https://www.humusoft.cz/blog/20180824-pocitacove-videni/>
- [259] Jirkovský, J.: Strojové učení. 2018. URL <https://www.humusoft.cz/blog/20180817-strojove-uceni/>
- [260] Johnson, G.: Smoothing a navigation mesh path. *AI Game Programming Wisdom*, ročník 3, 2006: s. 129–139.
- [261] Johnson, N. R.: Panic at “The Who concert stampede”: an empirical assessment. *Social Problems*, ročník 34, č. 4, 1987: s. 362–373.
- [262] Joo, J.; Kim, N.; Wysk, R. A.; aj.: Agent-based simulation of affordance-based human behaviors in emergency evacuation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, ročník 32, 2013: s. 99–115.

- [263] Kanowitz, S.: Virtual reality helps police train for active-shooter scenarios. 2019.  
URL <https://gcn.com/articles/2019/07/24/vr-active-shooter-training.aspx>
- [264] Karamouzas, I.; Heil, P.; Van Beek, P.; aj.: A predictive collision avoidance model for pedestrian simulation. In *International workshop on motion in games*, Springer, 2009, s. 41–52.
- [265] Karlsson, B.; Quintiere, J.: *Enclosure fire dynamics*. CRC press, 1999.
- [266] Karra, S.; Painter, S.; Lichtner, P.: Three-phase numerical model for subsurface hydrology in permafrost-affected regions (PFLOTRAN-ICE v1. 0). *The Cryosphere (Online)*, ročník 8, č. 5, 2014.
- [267] Kellerová, P.; Chlouba, J.; Wald, F.: Požární zkouška v Mokrsku. *Konstrukce*, ročník 8, č. 1, 2009: s. 8–13, ISSN 1803-8433.  
URL <http://old.konstrukce.cz/clanek/modelovani-teploty-pri-pozarni-zkousce-v-mokrsku/>
- [268] Kenjereš, S.; Zwinkels, S.: Numerical Modeling of the Macroscopic Behavior of a Crowd of People under Emergency Conditions Triggered by an Incidental Release of a Heavy Gas: an Integrated Approach. *Flow, Turbulence and Combustion*, ročník 103, č. 4, 2019: s. 1081–1107.
- [269] Khan, S. D.: Congestion detection in pedestrian crowds using oscillation in motion trajectories. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, ročník 85, 2019: s. 429–443.
- [270] Khan, S. D.; Saqib, M.; Blumenstein, M.: Towards a dedicated computer vision tool set for crowd simulation models. *arXiv preprint arXiv:1709.02243*, 2017.
- [271] Kim, D.-s.; Ohe, H.-s.; Jeon, G.; aj.: An analysis of survivor's egress route classified by each train during Daegu Subway Fire. *Fire Safety Science*, ročník 6, 2004: s. 7b–3.
- [272] Kimmerle, G.; Bayer-Aktiengesellschaft, L.: *Aspects and methodology for the evaluation of toxicological parameters during fire exposure*. na, 1974.
- [273] Kinateder, M.; Müller, M.; Jost, M.; aj.: Social influence in a virtual tunnel fire—influence of conflicting information on evacuation behavior. *Applied ergonomics*, ročník 45, č. 6, 2014: s. 1649–1659.
- [274] Kinateder, M.; Ronchi, E.; Nilsson, D.; aj.: Virtual reality for fire evacuation research. In *2014 federated conference on computer science and information systems*, IEEE, 2014, s. 313–321.
- [275] Kinateder, M.; Warren, W. H.: Social influence on evacuation behavior in real and virtual environments. *Frontiers in Robotics and AI*, ročník 3, 2016: str. 43.
- [276] Klüpfel, H.: The simulation of crowds at very large events. In *Traffic and Granular Flow'05*, Springer, 2007, s. 341–346.
- [277] Ko, M.; Kim, T.; Sohn, K.: Calibrating a social-force-based pedestrian walking model based on maximum likelihood estimation. *Transportation*, ročník 40, č. 1, 2013: s. 91–107.
- [278] Kobes, M.; Helsloot, I.; De Vries, B.; aj.: Building safety and human behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal*, ročník 45, č. 1, 2010: s. 1–11.
- [279] Kobes, M.; Helsloot, I.; de Vries, B.; aj.: Exit choice.(pre-) movement time and (pre-) evacuation behaviour in hotel fire evacuation—Behavioural analysis and validation of the use of serious gaming in experimental research. *Procedia Engineering*, ročník 3, 2010: s. 37–51.
- [280] Koncepce požární prevence 2018–2021.  
URL <https://www.hzscr.cz/clanek/koncepce-pozarni-prevence-2018-2021.aspx>
- [281] Kong, D.; Gray, D.; Tao, H.: A viewpoint invariant approach for crowd counting. In *18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*, ročník 3, IEEE, 2006, s. 1187–1190.
- [282] Korhonen, T.; Hostikka, S.: Fire dynamics simulator with evacuation: FDS+ Evac: Technical reference and user's guide. 2009.
- [283] Korhonen, T.; Hostikka, S.; Heliövaara, S.; aj.: FDS+ Evac: an agent based fire evacuation model. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, Springer, 2010, s. 109–120.
- [284] Korhonen, T.; Hostikka, S.; Heliövaara, S.; aj.: FDS + Evac: model evakuace požáru agenta. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, Springer, 2010, s. 109–120.
- [285] Koukol, M.; Příbyl, P.; Apeltauer, T.: Výzkumná zpráva "programový nástroj pro analýzu rizik capita", 2014.  
URL <https://www.isvavai.cz/riv?s=jednoduche-vyhledavani&ss=detail&h=RIV\%2F68407700\%3A21260\%2F14\%3A00226557\%21RIV15-TA0-21260>
- [286] Krč, R.; Kratochvílová, M.; Podroužek, J.; aj.: Machine learning-based node characterization for smart grid demand response flexibility assessment. *Sustainability*, ročník 13, č. 5, 2021: str. 2954.
- [287] Kretz, T.; Grünebohm, A.; Kessel, A.; aj.: Upstairs walking speed distributions on a long stairway. *Safety Science*, ročník 46, č. 1, 2008: s. 72–78.
- [288] Kretz, T.; Grünebohm, A.; Schreckenberg, M.: Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, ročník 2006, č. 10, 2006: str. P10014.

- [289] Kuang, H.; Li, X.; Song, T.; aj.: Analysis of pedestrian dynamics in counter flow via an extended lattice gas model. *Physical Review E*, ročník 78, č. 6, 2008: str. 066117.
- [290] Kuligowski, E.: Predicting human behavior during fires. *Fire technology*, ročník 49, č. 1, 2013: s. 101–120.
- [291] Kuligowski, E.; Peacock, R.; Wiess, E.; aj.: Stair evacuation of older adults and people with mobility impairments. *Fire Safety Journal*, ročník 62, 2013: s. 230–237.
- [292] Kuligowski, E. D.: *The process of human behavior in fires*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology ..., 2009.
- [293] Kuligowski, E. D.: Terror defeated: occupant sensemaking, decision-making and protective action in the 2001 World Trade Center disaster. 2011.
- [294] Kuligowski, E. D.: Computer evacuation models for buildings. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Springer, 2016, s. 2152–2180.
- [295] Kuligowski, E. D.: Human behavior in fire. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Springer, 2016, s. 2070–2114.
- [296] Kuligowski, E. D.; Mileti, D. S.: Modeling 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.
- [297] Kuligowski, E. D.; Peacock, R. D.; Hoskins, B. L.: *A review of building evacuation models*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [298] Kupilík, V.: *Protipožární ochrana budov*. Praha: České vysoké učení technické, první vydání, 1988.
- [299] Kupilík, V.: *Konstrukce pozemních staveb 80*. Praha: Vydavatelství ČVUT, vyd. 1 vydání, 2004, ISBN 80-01-03056-3.
- [300] Kupilík, V.: *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha: Grada, první vydání, 2006, ISBN 80-247-1329-2.
- [301] Kučera, P.: *Metodický postup při odlišném způsobu splnění technických podmínek požární ochrany*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, první vydání, 2008, ISBN 978-80-7385-044-9.  
URL <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:75868e70-bfe7-11e3-aec3-005056827e52>
- [302] Kučera, P.; Chudová, D.; Thomitzek, A.; aj.: *Certifikovaná metodika – Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany*. Metodika, Fakulta stavební ČVUT v Praze, Technický ústav požární ochrany, Vysoké učení technické v Brně VŠB – TUO Fakulta bezpečnostního inženýrství, Praha, 2019.  
URL [http://fire.fsv.cvut.cz/overene\\_modely/N\\_metC\\_4.pdf](http://fire.fsv.cvut.cz/overene_modely/N_metC_4.pdf)
- [303] Kučera, P.; Pezdová, Z.: *Základy matematického modelování požáru*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, první vydání, 2010, ISBN 978-80-7385-095-1.
- [304] Kučera, P.; Pokorný, J.: *Metodika pro specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství*. Metodika, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2014.  
URL <https://www.researchgate.net/publication/293885800-Metodika-pro-specificke-posouzeni-vysoce-rizikovych-podminek-pozarni-bezpecnosti-s-vyuzitim-postupu-pozarniho-inzenyrstvi>
- [305] Kwaśniewski, L.: On practical problems with verification and validation of computational models. *Archives of Civil Engineering*, ročník 55, č. 3, 2009: s. 323–346.
- [306] Křivohlavý, J.: *Jak si navzájem lépe porozumíme*. Praha: Členská knižnice nakl. Svoboda, první vydání, 1988, ISBN 80-902482-4-1.
- [307] Lam, W. H.; Lee, J. Y.; Chan, K.; aj.: A generalised function for modeling bi-directional flow effects on indoor walkways in Hong Kong. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, ročník 37, č. 9, 2003: s. 789–810.
- [308] Lao, A.; Teknomo, K.: Multi exit configuration of mesoscopic pedestrian simulation. *arXiv preprint arXiv:1609.01475*, 2016.
- [309] Last victims of Soleimani: 56 killed in funeral crush. *ARAB NEWS*, 2020.  
URL <https://www.arabnews.com/node/1609381/middle-east>
- [310] Le Bon, G.: *Lois psychologiques de l'évolution des peuples*. Félix Alcan, 1907.
- [311] Le Bon, G.; Hofman, L.; Ullrich, Z.: *Psychologie davu*. Kra, 1994.
- [312] Lebas, R.; Menard, T.; Beau, P.-A.; aj.: Numerical simulation of primary break-up and atomization: DNS and modelling study. *International Journal of Multiphase Flow*, ročník 35, č. 3, 2009: s. 247–260.

- [313] Legion, simulator. 2020.  
URL <https://www.bentley.com/en/products/product-line/building-design-software/legion-simulator>
- [314] Lei, W.; Li, A.; Gao, R.; aj.: Influences of exit and stair conditions on human evacuation in a dormitory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 391, č. 24, 2012: s. 6279–6286.
- [315] *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. Altenberge, třetí vydání, 2013.
- [316] Lemercier, S.; Jelic, A.; Kulpa, R.; aj.: Realistic following behaviors for crowd simulation. In *Computer Graphics Forum*, ročník 31, Wiley Online Library, 2012, s. 489–498.
- [317] Levin, T.; Chessum, S.; Mullins, J.; aj.: Ensuring Greater Safety for Our Firefighters and Our Communities: Integrating FLAIM Trainer™ and hitoe™. *NTT Technical Review*, ročník 17, č. 2, 2019: s. 24–31.
- [318] Li, D.; Cova, T. J.; Dennison, P. E.: Setting wildfire evacuation triggers by coupling fire and traffic simulation models: a spatiotemporal GIS approach. *Fire technology*, ročník 55, č. 2, 2019: s. 617–642.
- [319] Li, M.; Zhao, Y.; He, L.; aj.: The parameter calibration and optimization of social force model for the real-life 2013 Ya'an earthquake evacuation in China. *Safety science*, ročník 79, 2015: s. 243–253.
- [320] Li, Y.; Chen, M.; Dou, Z.; aj.: A review of cellular automata models for crowd evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 526, 2019: str. 120752.
- [321] Lian, L.; Song, W.; Richard, Y. K. K.; aj.: Experimental study of high-density pedestrian flow field characteristics at a crossing. In *Traffic and Granular Flow'15*, Springer, 2016, s. 57–64.
- [322] Liao, Y.; Vemuri, V. R.: Use of k-nearest neighbor classifier for intrusion detection. *Computers & security*, ročník 21, č. 5, 2002: s. 439–448.
- [323] Liddle, J.; Seyfried, A.; Klingsch, W.; aj.: An experimental study of pedestrian congestions: influence of bottleneck width and length. *arXiv preprint arXiv:0911.4350*, 2009.
- [324] Liew, J. R.: Survivability of steel frame structures subject to blast and fire. *Journal of Constructional Steel Research*, ročník 64, č. 7-8, 2008: s. 854–866.
- [325] *Life-threatening components of fire — Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires*. 2012.
- [326] Liu, B.; Han, Y.; Zhang, H.; aj.: Research of Crowd Evacuation Simulation Based on the Machine Learning. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, ročník 14, č. 1, 2017: s. 815–820.
- [327] Liu, B.; Liu, H.; Zhang, H.; aj.: A social force evacuation model driven by video data. *Simulation Modelling Practice and Theory*, ročník 84, 2018: s. 190–203.
- [328] Liu, P.-C.; Lin, H.-T.; Chou, J.-H.: Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model. *Building and Environment*, ročník 44, č. 9, 2009: s. 1970–1979.
- [329] Liu, S.; Liu, J.; Wei, W.: Simulation of crowd evacuation behaviour in outdoor public places: A model based on Shanghai stampede. *International Journal of Simulation Modelling*, ročník 18, č. 1, 2019: s. 86–99.
- [330] Lord, J.; Meacham, B.; Moore, A.; aj.: Guide for evaluating the predictive capabilities of computer egress models. *National Institute of Standards and Technology, NIST GCR*, 2005: s. 06–886.
- [331] Lovreglio, R.: Virtual and augmented reality for human behaviour in disasters: A review. In *Proc. Fire and Evacuation Modeling Technical Conference*, 2020, s. 1–14.
- [332] Lovreglio, R.; Borri, D.; dell'Olio, L.; aj.: A discrete choice model based on random utilities for exit choice in emergency evacuations. *Safety science*, ročník 62, 2014: s. 418–426.
- [333] Lovreglio, R.; Fonzone, A.; dell'Olio, L.; aj.: A study of herding behaviour in exit choice during emergencies based on random utility theory. *Safety science*, ročník 82, 2016: s. 421–431.
- [334] Lovreglio, R.; Gonzalez, V.; Feng, Z.; aj.: Prototyping virtual reality serious games for building earthquake preparedness: The Auckland City Hospital case study. *Advanced Engineering Informatics*, ročník 38, 2018: s. 670–682.
- [335] Lovreglio, R.; Kuligowski, E.; Gwynne, S.; aj.: A pre-evacuation database for use in egress simulations. *Fire safety journal*, ročník 105, 2019: s. 107–128.
- [336] Lovreglio, R.; Ronchi, E.; Borri, D.: The validation of evacuation simulation models through the analysis of behavioural uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, ročník 131, 2014: s. 166–174.
- [337] Lovreglio, R.; Ronchi, E.; Kinsey, M. J.: An Online Survey of Pedestrian Evacuation Model Usage and Users. *Fire Technology*, 2019: s. 1–21.



- [338] Lovreglio, R.; Ronchi, E.; Nilsson, D.: Calibrating floor field cellular automaton models for pedestrian dynamics by using likelihood function optimization. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 438, 2015: s. 308–320.
- [339] 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.
- [340] Lu, P.; Yang, H.; Li, H.; aj.: Swarm intelligence, social force and multi-agent modeling of heroic altruism behaviors under collective risks. *Knowledge-Based Systems*, ročník 214, 2021: str. 106725.
- [341] Lu, X.; Luh, P. B.; Tucker, A.; aj.: Impacts of anxiety in building fire and smoke evacuation: modeling and validation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, ročník 2, č. 1, 2016: s. 255–260.
- [342] Ma, P.; Wang, B.: The escape of pedestrians with view radius. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 392, č. 1, 2013: s. 215–220.
- [343] Ma, W.-C.; Huang, D.-A.; Lee, N.; aj.: Forecasting interactive dynamics of pedestrians with fictitious play. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, s. 774–782.
- [344] Ma, Y.; Lee, E. W. M.; Yuen, R. K. K.: An artificial intelligence-based approach for simulating pedestrian movement. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, ročník 17, č. 11, 2016: s. 3159–3170.
- [345] Makmul, J.: A pedestrians flow model during propagation of smoke: Microscopic and macroscopic approaches. *Safety Science*, ročník 133, 2021: str. 105006.
- [346] Malodushev, S. V.; Rogov, A. A.; Voronov, R. V.: Mathematical model for evacuation people from corridor-type buildings. 2019.
- [347] Mana, M.; Choudovská, H.: Výběrové šetření osob se zdravotním postižením. E. j.: CSU-04412/2019-63. 2019.
- [348] Martinez-Gil, F.; Lozano, M.; García-Fernández, I.; aj.: Modeling, evaluation, and scale on artificial pedestrians: a literature review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, ročník 50, č. 5, 2017: s. 1–35.
- [349] McConnell, N.; Boyce, K.; Shields, J.; aj.: The UK 9/11 evacuation study: Analysis of survivors' recognition and response phase in WTC1. *Fire Safety Journal*, ročník 45, č. 1, 2010: s. 21–34.
- [350] McGrattan, K.; Hostikka, S.; McDermott, R.; aj.: Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model. *NIST special publication*, ročník 1018, č. 1, 2013: str. 175.
- [351] McGrattan, K. B.; Baum, H. R.; Rehm, R. G.; aj.: *Fire dynamics simulator—Technical reference guide*. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research ..., 2000.
- [352] McPhail, C.: The crowd and collective behavior: Bringing symbolic interaction back in. *Symbolic interaction*, ročník 29, č. 4, 2006: s. 433–463.
- [353] McPhail, C.; TUCKER, C.: *Handbook of symbolic interactionism*. Rowman Altamira, 2003, 721–741 s.
- [354] Mehran, R.; Oyama, A.; Shah, M.: Abnormal crowd behavior detection using social force model. In *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2009, s. 935–942.
- [355] Mercadal, B.; Arena, C. B.; Davalos, R. V.; aj.: Avoiding nerve stimulation in irreversible electroporation: a numerical modeling study. *Physics in Medicine & Biology*, ročník 62, č. 20, 2017: str. 8060.
- [356] Meroney, R. N.: CFD prediction of airflow in buildings for natural ventilation. In *Proceedings of the Eleventh Americas Conference on Wind Engineering, Puerto Rico*, 2009.
- [357] Miller, A.; Baskar, R.: *Real-time Emergency Disaster of Kiss Nightclub Fire at Santa Maria, Brazil in Collaborative Virtual Reality Environment (CVE)*. Diplomová práce, Bowie State University, Virtual Reality Laboratory, Bowie State University, 2018.  
URL <http://cs.bowiestate.edu/sharad/vr/nightclub.html>
- [358] Mitsuhashi, H.; Shishibori, M.: Comparative Experiments on Simulated Tornado Experience via Virtual Reality and Augmented Reality. *The Journal of Information and Systems in Education*, ročník 19, č. 1, 2020: s. 21–31.
- [359] Mitsuhashi, H.; Tanimura, C.; Nemoto, J.; aj.: Failure-enhanced evacuation training using a VR-based disaster simulator: A comparative experiment with simulated evacuees. *Procedia Computer Science*, ročník 159, 2019: s. 1670–1679.
- [360] Morris, P. D.; Narracott, A.; von Tengg-Koblick, H.; aj.: Computational fluid dynamics modelling in cardiovascular medicine. *Heart*, ročník 102, č. 1, 2016: s. 18–28.
- [361] Mossberg, A.; Nilsson, D.; Wahlqvist, J.: Evacuation elevators in an underground metro station: A Virtual Reality evacuation experiment. *Fire Safety Journal*, ročník 120, 2021: str. 103091.

- [362] Moussaïd, M.; Helbing, D.; Garnier, S.; aj.: Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, ročník 276, č. 1668, 2009: s. 2755–2762.
- [363] Muhiedeen, M.; Kuang, Y.: Saving Energy Costs by Combining Air-Conditioning and AirCirculation using CFD to Achieve Thermal Comfort in the Building. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, ročník 58, č. 1, 2019: s. 84–99.
- [364] Muir, H. C.; Bottomley, D. M.; Marrison, C.: Effects of motivation and cabin configuration on emergency aircraft evacuation behavior and rates of egress. *The International Journal of Aviation Psychology*, ročník 6, č. 1, 1996: s. 57–77.
- [365] Muramatsu, M.; Irie, T.; Nagatani, T.: Jamming transition in pedestrian counter flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 267, č. 3-4, 1999: s. 487–498.
- [366] Muramatsu, M.; Nagatani, T.: Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 275, č. 1-2, 2000: s. 281–291.
- [367] Musse, S. R.; Jung, C. R.; Jacques Jr, J. C.; aj.: Using computer vision to simulate the motion of virtual agents. *Computer Animation and Virtual Worlds*, ročník 18, č. 2, 2007: s. 83–93.
- [368] Mustafa, M. H.: *Using Immersive Video Environment simulations for calibration of evacuation models*. Disertační práce, 2020.
- [369] Mustapha, S.; Kassir, A.; Hassoun, K.; aj.: Estimation of crowd flow and load on pedestrian bridges using machine learning with sensor fusion. *Automation in Construction*, ročník 112, 2020: str. 103092.
- [370] Mydans, S.: Scores killed in crowd stampede at Cambodia water festival. , č. Nov. 22, 2010, 2010: s. 1–5.
- [371] Nagai, R.; Fukamachi, M.; Nagatani, T.: Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 367, 2006: s. 449–460.
- [372] Najmanová, H.; Ronchi, E.: An experimental data-set on pre-school children evacuation. *Fire technology*, ročník 53, č. 4, 2017: s. 1509–1533.
- [373] Narang, S.; Best, A.; Manocha, D.: Interactive simulation of local interactions in dense crowds using elliptical agents. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, ročník 2017, č. 3, 2017: str. 033403.
- [374] *National Fire Codes*. USA, New York, volume 4, 9 vydání, 1967.
- [375] Nehaniv, C. L.: Asynchronous automata networks can emulate any synchronous automata network. *International Journal of Algebra and Computation*, ročník 14, č. 05n06, 2004: s. 719–739.
- [376] Nelson, H. E.; Mowrer, F. W.: Emergency movement., SFPE handbook of fire protection engineering. *Massachusetts: NFPA*, 2002.
- [377] NFPA, N.: 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. *National Fire Protection Association, Quincy, MA*, 2007.
- [378] Nikolov, D.: *Modelování pohybu osob při konání hromadných akcí*. Bakaláoská práce, Vysoké učené technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2019.
- [379] 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.
- [380] Nilsson, D.; Kinater, M.: Virtual Reality Experiments—The future or a dead end. In *6th International Symposium Human Behaviour in Fire Interscience Communications*. Cambridge, 2015, s. 13–22.
- [381] No Way Out!: A Sudden Life-and-Death Struggle at a Houston Concert. 2021.  
URL <https://www.nytimes.com/2021/11/06/us/travis-scott-crowd-surge.html>
- [382] Novák, D.; Vořechovský, M.; Teplý, B.: FReET: Software for the statistical and reliability analysis of engineering problems and FReET-D: Degradation module. *Advances in Engineering Software*, ročník 72, 2014: s. 179–192.
- [383] Oeding, D.: *Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs*. Bundesminister Verkehr, Abt. Strassenbau, 1963.
- [384] Okřinová, P.; Pilný, O.: Use of Engineering Methods in Assessment Ventilation of Protected Fire Escape Routes. In *Advances in Science and Technology*, ročník 109, Trans Tech Publ, 2021, s. 67–72.
- [385] Okřinová, P.: *Bezbariérový bytovým dům s rehabilitačním centrem*. Diplomová práce, 2015.
- [386] Okřinová, P.: Use to a numerical model to simulate the evacuation of railcar. In *Young Scientist 2017*, Bílovice nad Svitavou: Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2017, ISBN 978-80-553-3136-2, s. 1–11.
- [387] Okřinová, P.: *Analýza bezpečnosti metra s využitím modelu evakuace osob a šíření požáru*. Teze – disertační práce, Vysoké učené technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2018.

- [388] Okřinová, P.; Apeltauer, T.: Neurčitost při pokročilém modelování evakuace, 14.05.2018.
- [389] Okřinová, P.; Apeltauer, T.: Nalýza pěší dopravy u náhradního uzlu Brno-Dolní nádraží. *Silniční obzor*, č. 79, 2018: s. 272–275, ISSN 0322-7154.
- [390] Okřinová, P.; Apeltauer, T.; Apeltauer, J.: Aplikace inženýrského přístupu v rámci požární bezpečnosti. In *Sborník příspěvků – Juniorstav 2021–23 odborná konference doktorského studia*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2021, ISBN 978-80-86433-75-2, s. 1–6.
- [391] Okřinová, P.; Apeltauer, T.; Beneš, P.: Model evakuace tunelu metra I.D. In *Sborník abstraktů při 19. odborné konferenci doktorského studia, Juniorstav 2017*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017, ISBN 978-80-214-5473-6, s. 1–14.
- [392] Okřinová, P.; Apeltauer, T.; Beneš, P.: Užití numerických modelů v dopravním systému pražského metra D. In *Sborník příspěvků – JUNIORSTAV 2018*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018, ISBN 978-80-86433-69-1, s. 1–10.
- [393] Okřinová, P.; Pilný, O.: Bezpečnostní analýza dopravního uzlu. In *Sborník konference ŽELVA*, Příbram: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra železničních staveb, 2020, ISBN 978-80-01-06765-9, s. 64–73.
- [394] of Fire Protection Engineers+ 113017182910 info@ sfpe. org, S.; of Fire Protection Engineers, S.: Integrating Human Behavior Factors into Design. *SFPE Guide to Human Behavior in Fire*, 2019: s. 3–11.
- [395] OVassart, O.; Cajot, L.; Strejček, M.: Tepelná a mechanická zatížení. ČVUT v Praze: Difisek+, 2008.
- [396] Ověřené požárně technické charakteristiky materiálů. Materiálová databáze projektu VERIFIRE (VI20162019034 – Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb). 2017-2019.  
URL <https://ptch.fce.vutbr.cz/>
- [397] Paciorek, P.; Wisniewski, K.; Oleszak, F.; aj.: An a analysis of the tragic events which occurred at an inauguration party organized by the student government of the University of Science and Technology in Bydgoszcz during the 2015/2016 academic year. *Disaster and Emergency Medicine Journal*, ročník 2, č. 2, 2017: s. 84–90.
- [398] Pan, X.; Han, C. S.; Dauber, K.; aj.: Human and social behavior in computational modeling and analysis of egress. *Automation in construction*, ročník 15, č. 4, 2006: s. 448–461.
- [399] Pan, Z.; Wei, Q.; Torp, O.; aj.: Influence of evacuation walkway design parameters on passenger evacuation time along elevated rail transit lines using a multi-agent simulation. *Sustainability*, ročník 11, č. 21, 2019: str. 6049.
- [400] Parisi, D. R.; Patterson, G. A.: Influence of bottleneck lengths and position on simulated pedestrian egress. 2017.
- [401] PASS. 2020.  
URL <https://passfirevr.com/>
- [402] Pathan, K. A.; Khan, S. A.; Dabeer, P.: CFD analysis of effect of area ratio on suddenly expanded flows. In *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, IEEE, 2017, s. 1192–1198.
- [403] *Pathfinder Results User Manual*. 403 Poyntz Avenue, Suite B, Manhattan, KS 66502, USA: Thunderhead Engineering, 2020.  
URL <https://docs.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/results-user-manual/pdf/pathfinder-results-user-manual.pdf>
- [404] *Pathfinder User Manual*, ročník 2020. 403 Poyntz Avenue, Suite B, Manhattan KS 665 02, USA: Thunderhead Engineering, 2020.  
URL <https://docs.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/user-manual/pdf/pathfinder-user-manual.pdf>
- [405] *Pathfinder Monte Carlo User Manual*. 403 Poyntz Avenue, Suite B, Manhattan KS 665 02, USA: Thunderhead Engineering, 2021 vydání, 2021.  
URL <https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pathfinder-monte-carlo-user-manual-2021-1.pdf>
- [406] *Pathfinder Technical Reference*. 403 Poyntz Avenue, Suite B, Manhattan, KS 66502, USA: Thunderhead Engineering, 2020.  
URL <https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm-uploads/2011/07/tech-ref-6.pdf>
- [407] *Pathfinder Verification and Validation*. 403 Poyntz Avenue, Suite B, Manhattan, KS 66502, USA: Thunderhead Engineering: Thunderhead Engineering, 12 vydání, 2020.  
URL <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder-verification-validation-archive/>

- [408] Pauls, J.: Effective-width model for evacuation flow in buildings. In *Proceedings, Engineering Applications Workshop*, 1980, s. 215–232.
- [409] Pauls, J.: Calculating evacuation times for tall buildings. *Fire Safety Journal*, ročník 12, č. 3, 1987: s. 213–236.
- [410] Pauls, J.: Movement of people. *SFPE handbook of fire protection engineering*, 1995: s. 3–263.
- [411] Peacock, R. D.: CFAST, Fire Growth and Smoke Transport Modeling. 2010.
- [412] Peacock, R. D.; Averill, J. D.; aj.: *Pedestrian and evacuation dynamics*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [413] Peacock, R. D.; Jones, W. W.; Bukowski, R. W.; aj.: *Technical Reference Guide for the HAZARD I Fire Hazard Assessment Method*. United States Department of Commerce, National Institute of Standards and ..., 1991.
- [414] Peacock, R. D.; Kuligowski, E. D.: Building Occupant Egress Data. 2010.
- [415] Pedersen, N.: *Modeling of jet and pool fires and validation of the fire model in the CFD code FLACS*. Diplomová práce, The University of Bergen, 2012.
- [416] Pelechano, N.; Allbeck, J. M.; Badler, N. I.: Controlling individual agents in high-density crowd simulation. 2007.
- [417] Pelechano, N.; Allbeck, J. M.; Badler, N. I.: Virtual crowds: Methods, simulation, and control. *Synthesis lectures on computer graphics and animation*, ročník 3, č. 1, 2008: s. 1–176.
- [418] Pelechano, N.; Badler, N. I.: Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation. *IEEE computer graphics and applications*, ročník 26, č. 6, 2006: s. 80–86.
- [419] Peng, Y.; Li, S.-W.; Hu, Z.-Z.: A self-learning dynamic path planning method for evacuation in large public buildings based on neural networks. *Neurocomputing*, ročník 365, 2019: s. 71–85.
- [420] Phark, C.; Kim, W.; Yoon, Y.-S.; aj.: Prediction of issuance of emergency evacuation orders for chemical accidents using machine learning algorithm. *Journal of loss prevention in the process industries*, ročník 56, 2018: s. 162–169.
- [421] Pheasant, S.; Haslegrave, C. M.: *Bodyspace: Anthropometry, ergonomics and the design of work*. CRC press, 1996.
- [422] Philippe, J.-M.; Brahic, O.; Carli, P.; aj.: French Ministry of Health's response to Paris attacks of 13 November 2015. *Critical Care*, ročník 20, č. 1, 2016: str. 85.
- [423] Pierdicca, A.; Clementi, F.; Isidori, D.; aj.: Numerical model upgrading of a historical masonry palace monitored with a wireless sensor network. *International Journal of Masonry Research and Innovation*, ročník 1, č. 1, 2016: s. 74–98.
- [424] Ping, P.; Wang, K.; Kong, D.: Analysis of emergency evacuation in an offshore platform using evacuation simulation modeling. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 505, 2018: s. 601–612.
- [425] Podroužek, J.; Marcon, M.; Ninčević, K.; aj.: Bio-inspired 3D infill patterns for additive manufacturing and structural applications. *Materials*, ročník 12, č. 3, 2019: str. 499.
- [426] Podroužek, J.; Marcon, M.; Vorel, J.; aj.: Response scatter control for discrete element models. In *Computational Modelling of Concrete Structures*, CRC Press, 2018, s. 517–524.
- [427] Podroužek, J.; Wan-Wendner, R.: Uncertainty analysis of the power law extrapolation techniques for adhesive anchors. *Structural Concrete*, ročník 19, č. 6, 2018: s. 1760–1770.
- [428] Pokorný, J.: Zásady stanovení priority při uvedení zařízení pro odvod kouře a tepla a dalších aktivních požárně bezpečnostních zařízení do činnosti. *Časopis Vytápění, větrání, instalace*, 2016: s. 1–5, ISSN 1210-1389.  
URL <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/14237-zasady-stanoveni-priority-pri-uvvedeni-zarizeni-pro-odvod-koure-a-tepla-a-dalsich-aktivnich-pozarne-bezpecnostnich-zarizeni-do-cinnosti>
- [429] Pokorný, J.; Kučera, P.: FIRESAFE – Principles of the Evacuation Procedures and Evacuation Models. In *Conference: XXIV. ročník mezinárodní konference Požární ochrana 2015*, Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, ve spolupráci s Českou asociací, 2015, ISBN 978-80-7385-163-7, ISSN 1803-1803, str. 265267.
- [430] Portz, A.; Seyfried, A.: Analyzing stop-and-go waves by experiment and modeling. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, 2011, s. 577–586.
- [431] Posner, J.; Buchanan, C.; Dunn-Rankin, D.: Measurement and prediction of indoor air flow in a model room. *Energy and buildings*, ročník 35, č. 5, 2003: s. 515–526.
- [432] Predtechenskii, V.; Milinskii, A.: Planning for foot traffic in buildings. *Amerind, New Dehli*, 1978.

- [433] Predtechenskii, V. M.; Milinskiĭ, A. I.: *Planning for foot traffic flow in buildings*. National Bureau of Standards, US Department of Commerce, and the National ..., 1978.
- [434] Predtetschenski, W. M.; Milinski, A. I.: *Personenströme in Gebäuden*. 1971.
- [435] Predtečenskij, V. M.; Milinskij, A. I.: *Evakuace osob z budov*. Praha: Československý svaz požární ochrany, první vydání, 1972.
- [436] Premier-partnership.co.uk. 2018.  
URL <https://www.premier-partnership.co.uk/fire-drill-vr-training/>
- [437] Premier Partneship. 2018.  
URL <https://premier-courses.co.uk/product/fire-drill-vr-training/>
- [438] Preston, J.: *Grenfell Tower: Preparedness, Race and Disaster Capitalism*. Springer, 2018.
- [439] Proulx, G.: High-rise evacuation: a questionable concept. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire*, 2001, s. 221–230.
- [440] Proulx, G.: Movement of people: the evacuation timing. *SFPE handbook of fire protection engineering*, 2002: s. 342–366.
- [441] Proulx, G.: Evacuation Time, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Editors: Philip J DiNenno, et al. In *Library of Congress*, ročník 2007940503, 2008, s. 3–355.
- [442] PTV Vissim. 2020.  
URL <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim/>
- [443] Purser, D.: Application of human behaviour and toxic hazard analysis to the validation of CFD modelling for the Mont Blanc Tunnel fire incident. In *Proceedings of the Advanced Research Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems*, 2009, s. 23–57.
- [444] Purser, D. A.: Toxicity assessment of combustion products. *The SFPE handbook of fire protection engineering*, ročník 2, 2002: s. 83–171.
- [445] Purser, D. A.; Bensilum, M.: Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations. *Safety science*, ročník 38, č. 2, 2001: s. 157–182.
- [446] Purser, D. A.; Grimshaw, P.; Berrill, K. R.: Intoxication by cyanide in fires: a study in monkeys using polyacrylonitrile. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, ročník 39, č. 6, 1984: s. 394–400.
- [447] Purser, D. A.; McAllister, J. L.: Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat. In *SFPE handbook of fire protection engineering*, Springer, 2016, s. 2308–2428.
- [448] Pyrosim. Fire Dynamics and Smoke Control. 2019.  
URL <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>
- [449] Qian-Ling, W.; Yao, C.; Hai-Rong, D.; aj.: A new collision avoidance model for pedestrian dynamics. *Chinese Physics B*, ročník 24, č. 3, 2015: str. 038901.
- [450] Quarantelli, E. L.: *Evacuation Behavior and Problems: Findings and Implications from the Research Literature*. Technická zpráva, OHIO State Univ Columbus Disaster Research Center, 1980.
- [451] Rahman, K.; Ghani, N. A.; Kamil, A. A.; aj.: Modelling pedestrian travel time and the design of facilities: A queuing approach. *PloS one*, ročník 8, č. 5, 2013.
- [452] Razak, M. F.; Salehi, F.; Chishty, M. A.: An analysis of turbulent mixing effects on the soot formation in high pressure n-dodecane sprays. *Flow, Turbulence and Combustion*, ročník 103, č. 3, 2019: s. 605–624.
- [453] Reichel, V.: *Navrhování staveb z hlediska požární bezpečnosti*. Praha: Výzkumný ústav pozemních staveb, 1969.
- [454] Reichel, V.: *Navrhování požární bezpečnosti staveb, Díl I. (Zabraňujeme škodám)*. Praha: SNTL, 1978.
- [455] Reichel, V.: *Navrhování požární bezpečnosti staveb, Díl II. (Zabraňujeme škodám)*. Praha: SNTL, 1979.
- [456] Reichel, V.: *Navrhování požární bezpečnosti staveb, Díl III. (Zabraňujeme škodám)*. Praha: SNTL, 1980.
- [457] Ren, A.; Chen, C.; Luo, Y.: Simulation of emergency evacuation in virtual reality. *Tsinghua Science and Technology*, ročník 13, č. 5, 2008: s. 674–680.
- [458] Ren, C.; Yang, C.; Jin, S.: Agent-based modeling and simulation on emergency evacuation. In *International Conference on Complex Sciences*, Springer, 2009, s. 1451–1461.
- [459] Renne, J. L.; Sanchez, T. W.; Litman, T.: Carless and special needs evacuation planning: a literature review. *Journal of Planning Literature*, ročník 26, č. 4, 2011: s. 420–431.
- [460] Repast. 2020.  
URL <https://repast.github.io/>
- [461] Resigns, U. C.; Scandals, A.: HIGH-RISK MATERIALS BLAMED FOR LONDON BLAZE.

- [462] Reynolds, C. W.: Steering behaviors for autonomous characters. In *Game developers conference*, ročník 1999, Citeseer, 1999, s. 763–782.
- [463] Rh, P.; Green, D.: Perry's chemical engineers' handbook. *McGraw-Hill*, 1997.
- [464] Richardson, O.; Jalba, A.; Muntean, A.: Effects of environment knowledge in evacuation scenarios involving fire and smoke: a multiscale modelling and simulation approach. *Fire technology*, ročník 55, č. 2, 2019: s. 415–436.
- [465] *RIMEA*. Wien, třetí vydání, 2016.
- [466] Robin, T.; Antonini, G.; Bierlaire, M.; aj.: Specification, estimation and validation of a pedestrian walking behavior model. *Transportation Research Part B: Methodological*, ročník 43, č. 1, 2009: s. 36–56.
- [467] Rogsch, C.; Schreckenberg, M.; Tribble, E.; aj.: Was it panic? An overview about mass-emergencies and their origins all over the world for recent years. In *Pedestrian and evacuation dynamics 2008*, Springer, 2010, s. 743–755.
- [468] Rojas, F. A.; Yang, H. S.: Immersive human-in-the-loop hmd evaluation of dynamic group behavior in a pedestrian crowd simulation that uses group agent-based steering. In *Proceedings of the 12th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, 2013, s. 31–40.
- [469] Ronchi, E.: Evacuation modelling in road tunnel fires. *Politecnico di Bari*, 2012.
- [470] Ronchi, E.; Gwynne, S. M.; 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.
- [471] Ronchi, E.; Kinatader, M.; Müller, M.; aj.: Evacuation travel paths in virtual reality experiments for tunnel safety analysis. *Fire Safety Journal*, ročník 71, 2015: s. 257–267.
- [472] Ronchi, E.; Kinsey, M.: Evacuation models of the future: insights from an online survey of user's experiences and needs. *emergency*, ročník 3, 2011: str. 4.
- [473] Ronchi, E.; Kuligowski, E. D.; Nilsson, D.; aj.: Assessing the verification and validation of building fire evacuation models. *Fire technology*, ročník 52, č. 1, 2016: s. 197–219.
- [474] Ronchi, E.; Kuligowski, E. D.; Reneke, P. A.; aj.: NIST Technical Note 1822, The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models. *National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD*, 2013.
- [475] Ronchi, E.; Kuligowski, E. D.; Reneke, P. A.; aj.: *The process of verification and validation of building fire evacuation models*. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology ..., 2013.
- [476] Ronchi, E.; Mayorga, D.; Lovreglio, R.; aj.: Mobile-powered head-mounted displays versus cave automatic virtual environment experiments for evacuation research. *Computer Animation and Virtual Worlds*, ročník 30, č. 6, 2019: str. e1873.
- [477] Ronchi, E.; Nilsson, D.: Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research. *Fire science reviews*, ročník 2, č. 1, 2013: s. 1–21.
- [478] Ronchi, E.; Nilsson, D.; Modig, H.; aj.: Variable Message Signs for road tunnel emergency evacuations. *Applied ergonomics*, ročník 52, 2016: s. 253–264.
- [479] Ronchi, E.; Nilsson, D.; Zechlin, O.; aj.: Employing validation and verification tests as an integral part of evacuation model development. In *International Interflam Conference, Interflam 2013*, Interscience Communications, 2013, s. 979–990.
- [480] Ronešová, J.: Vývoj v oblasti technických norem. *Časopis 112*, , č. 8, 2006, ISSN 1801-0334.
- [481] Rubbert, P. E.: CFD and the changing world of airplane design. In *ICAS PROCEEDINGS*, ročník 19, AMERICAN INST OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, 1994, s. LVII–LVII.
- [482] Saltelli, A.; Ratto, M.; Andres, T.; aj.: *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons, 2008.
- [483] Santos, G.; Aguirre, B. E.: A critical review of emergency evacuation simulation models. 2004.
- [484] Schadschneider, A.; Chraïbi, M.; Seyfried, A.; aj.: Pedestrian dynamics: From empirical results to modeling. In *Crowd Dynamics, Volume 1*, Springer, 2018, s. 63–102.
- [485] Schadschneider, A.; Seyfried, A.: Validation of CA models of pedestrian dynamics with fundamental diagrams. *Cybernetics and systems*, ročník 40, č. 5, 2009: s. 367–389.
- [486] Schadschneider, A.; Seyfried, A.: Empirical results for pedestrian dynamics and their implications for modeling. *Networks & heterogeneous media*, ročník 6, č. 3, 2011: str. 545.
- [487] Schröder, B.: *Multivariate Methods for Life Safety Analysis in Case of Fire*. Disertační práce, Universität Wuppertal, Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen, 2018.



- [488] Schupfer, H.: Fire disaster in the tunnel of the Kitzsteinhorn funicular in Kaprun on 11 Nov. 2000. In *PROCEEDINGS OF THE FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SAFETY IN ROAD AND RAIL TUNNELS, HELD MADRID, SPAIN, 2-6 APRIL 2001*, 2001.
- [489] Schutz, G.: Exactly solvable models for many-body systems far from equilibrium. *Phase transitions and critical phenomena*, 2000.
- [490] Sencom.com. 2020.  
URL <http://sencom.com.au/>
- [491] Seyfried, A.; Boltjes, M.; Kähler, J.; aj.: Enhanced empirical data for the fundamental diagram and the flow through bottlenecks. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, Springer, 2010, s. 145–156.
- [492] Seyfried, A.; Passon, O.; Steffen, B.; aj.: New insights into pedestrian flow through bottlenecks. *Transportation Science*, ročník 43, č. 3, 2009: s. 395–406.
- [493] Seyfried, A.; Portz, A.; Schadschneider, A.: Phase coexistence in congested states of pedestrian dynamics. In *International Conference on Cellular Automata*, Springer, 2010, s. 496–505.
- [494] Seyfried, A.; Rupperecht, T.; Winkens, A.; aj.: Capacity estimation for emergency exits and bottlenecks. *Interflam 2007*, 2007: s. 247–258.
- [495] Seyfried, A.; Steffen, B.; Klingsch, W.; aj.: The fundamental diagram of pedestrian movement revisited. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, ročník 2005, č. 10, 2005: str. P10002.
- [496] Shalash, W. M.; AlZahrani, A. A.; Al-Nufaii, S. H.: Crowd Detection Management System. In *2019 2nd International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*, IEEE, 2019, s. 1–8.
- [497] Sharma, S.; Singh, H.; Prakash, A.: Multi-agent modeling and simulation of human behavior in aircraft evacuations. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, ročník 44, č. 4, 2008: s. 1477–1488.
- [498] Sheng, B.; Shen, C.; Lin, G.; aj.: Crowd counting via weighted VLAD on a dense attribute feature map. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, ročník 28, č. 8, 2016: s. 1788–1797.
- [499] Sherman, M.; Peyrot, M.; Magda, L.; aj.: Modeling 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.
- [500] Shi, J.; Ren, A.; Chen, C.: Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions. *Automation in Construction*, ročník 18, č. 3, 2009: s. 338–347.
- [501] Shi, M.; Lee, E. W. M.; Ma, Y.: A newly developed mesoscopic model on simulating pedestrian flow. *Procedia engineering*, ročník 211, 2018: s. 614–620.
- [502] Shi, M.; Lee, E. W. M.; Ma, Y.: A novel grid-based mesoscopic model for evacuation dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 497, 2018: s. 198–210.
- [503] Shi, M.; Lee, E. W. M.; Ma, Y.; aj.: The density-speed correlated mesoscopic model for the study of pedestrian flow. *Safety Science*, ročník 133, 2021: str. 105019.
- [504] Šimonek, J.; Šimonek, J.; Horský, M.: Kvantová psychologie. 2009.  
URL <http://www.kvantovapsychologie.cz>
- [505] Simulex. VE Application. 2020.  
URL <https://www.iesve.com/software/virtual-environment/applications/egress/simulex>
- [506] Sisiopiku, V. P.; Akin, D.: Pedestrian behaviors at and perceptions towards various pedestrian facilities: an examination based on observation and survey data. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, ročník 6, č. 4, 2003: s. 249–274.
- [507] Smith, D. A.; Wilson, R. E.: Dynamical pair approximation for cellular automata with shuffle update. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, ročník 40, č. 11, 2007: str. 2651.
- [508] Snopková, D.; Ugwitz, P.; Stachoň, Z.; aj.: Retracing evacuation strategy: A virtual reality game-based investigation into the influence of building's spatial configuration in an emergency. *Spatial Cognition & Computation*, 2021: s. 1–21.
- [509] Sokol, Z.: Teplota ocelového sloupu vystaveného lokálnímu požáru, 2018.  
URL [http://fire.fsv.cvut.cz/LOCAFI/180919\\_Sokol\\_16-40.pdf](http://fire.fsv.cvut.cz/LOCAFI/180919_Sokol_16-40.pdf)
- [510] Solera, F.; Calderara, S.; Cucchiara, R.: Socially constrained structural learning for groups detection in crowd. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, ročník 38, č. 5, 2015: s. 995–1008.
- [511] Solmaz, B.; Moore, B. E.; Shah, M.: Identifying behaviors in crowd scenes using stability analysis for dynamical systems. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, ročník 34, č. 10, 2012: s. 2064–2070.

- [512] Song, W.; Xu, X.; Wang, B.-H.; aj.: Simulation of evacuation processes using a multi-grid model for pedestrian dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 363, č. 2, 2006: s. 492–500.
- [513] Song, X.; Han, D.; Sun, J.; aj.: A data-driven neural network approach to simulate pedestrian movement. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 509, 2018: s. 827–844.
- [514] Song, X.; Ma, L.; Ma, Y.; aj.: Selfishness-and selflessness-based models of pedestrian room evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 447, 2016: s. 455–466.
- [515] Souček, V.; Staňová, E.; Linhart, M.: Vnitřní bezpečnost a veřejný pořádek, 2005.  
URL <https://www.mvcr.cz/soubor/bezpecnost-pdf.aspx>
- [516] Stadtbaudirektion, G.: *Barrierefreies Bauen für alle Menschen. Planungsgrundlagen*. Graz: Medienfabrik Graz, 2006, ISBN 3-9502081-0-0.
- [517] Stamatis, D. H.: *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. Quality Press, 2003.
- [518] Steffen, B.; Seyfried, A.: Methods for measuring pedestrian density, flow, speed and direction with minimal scatter. *Physica A: Statistical mechanics and its applications*, ročník 389, č. 9, 2010: s. 1902–1910.
- [519] STEPS. 2020.
- [520] Still, G. K.: Crowd Safety and Crowd Risk Analysis.  
URL <http://www.gkstill.com/Courses/elearning>
- [521] Still, G. K.: *Crowd dynamics*. Disertační práce, University of Warwick, 2000.
- [522] Still, G. K.: *Introduction to crowd science*. CRC Press, 2014.
- [523] Stratus, J.: Prodloužení reakční doby v závislosti na hladině alkoholu. 2010.  
URL <https://www.mvcr.cz/clanek/prodlouzeni-reakcni-doby-v-zavislosti-na-hladine-alkoholu.aspx>
- [524] Šubrt, V.: *Zákon o požární ochraně s komentářem*. Praha: Rego, první vydání, 2002, ISBN 80-86648-03-6.
- [525] Sun, L.; Luo, W.; Yao, L.; aj.: A comparative study of funnel shape bottlenecks in subway stations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, ročník 98, 2017: s. 14–27.
- [526] Tan, V.; Au, C.: Simulation of herding behaviour in panic evacuation from a room with two exits. *International Journal of the Digital Human*, ročník 1, č. 3, 2016: s. 295–304.
- [527] Tang, C.-H.; Wu, W.-T.; Lin, C.-Y.: Using virtual reality to determine how emergency signs facilitate way-finding. *Applied ergonomics*, ročník 40, č. 4, 2009: s. 722–730.
- [528] Teknomo, K.; Gerilla, G. P.; Inweldi, P.: Mesoscopic multi-agent pedestrian simulation. *Transportation Research Trends*, ročník 1, 2008: str. 14.
- [529] Thomitzek, A.; Trčka, M.: *Požáry a dopravní nehody v silniční dopravě se zaměřením na tunelové stavby*. Ostrava: Vydáno za podpory ESF v rámci projektu: „Inovace studia v oblasti bezpečnosti dopravy – SAFETEACH“, číslo projektu CZ.1.07/2.2.00/15.0476, první vydání vydání, 2014, ISBN 978-80-248-3493-1.
- [530] Thompson, P.; Nilsson, D.; Boyce, K.; aj.: Evacuation models are running out of time. *Fire Safety Journal*, ročník 78, 2015: s. 251–261.
- [531] Thornton, C.; O’Konski, R.; Klein, B.; aj.: New wayfinding techniques in pathfinder and supporting research. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, Springer, 2014, s. 1315–1322.
- [532] Tichon, J.; Burgess-Limerick, R.: A review of virtual reality as a medium for safety related training in mining. *Journal of Health & Safety Research & Practice*, ročník 3, č. 1, 2011: s. 33–40.
- [533] Tobler, W.: Three presentations on geographical analysis and modeling. 1993.
- [534] Togawa, K.: Study on Fire Escapes basing on the Observations of Multitude Current. 1955.
- [535] Toparlar, Y.; Blocken, B.; Maiheu, B.; aj.: A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ročník 80, 2017: s. 1613–1640.
- [536] Tordeux, A.; Schadschneider, A.: White and relaxed noises in optimal velocity models for pedestrian flow with stop-and-go waves. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, ročník 49, č. 18, 2016: str. 185101.
- [537] Torrens, P.; Li, X.; Griffin, W. A.: Building agent-based walking models by machine-learning on diverse databases of space-time trajectory samples. *Transactions in GIS*, ročník 15, 2011: s. 67–94.
- [538] Trouve, A.: Building item database. 2009.  
URL <http://www.firebid.umd.edu>

- [539] Tsai, J.; Fridman, N.; Bowring, E.; aj.: Escapes: evacuation simulation with children, authorities, parents, emotions, and social comparison. In *The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2*, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2011, s. 457–464.
- [540] Tubbs, J.; Meacham, B.: *Egress design solutions: A guide to evacuation and crowd management planning*. John Wiley & Sons, 2007.
- [541] TUCG lab. VR – Fire Fighting Simulation. 20115.  
URL <https://www.youtube.com/watch?v=JQhrW8g6G5s\&ab-channel=TUCGlab>
- [542] Twarogowska, M.; Goatin, P.; Duvigneau, R.: Macroscopic modeling and simulations of room evacuation. *Applied Mathematical Modelling*, ročník 38, č. 24, 2014: s. 5781–5795.
- [543] Uchiya, T.; Takumi, I.: Development of Indoor Evacuation Training System Using VR HMD. In *International Conference on Network-Based Information Systems*, Springer, 2020, s. 528–537.
- [544] VADARE. Crowd Simulation. 2016.  
URL <http://www.vadere.org/>
- [545] Van Maele, K.; Merci, B.: Application of RANS and LES field simulations to predict the critical ventilation velocity in longitudinally ventilated horizontal tunnels. *Fire Safety Journal*, ročník 43, č. 8, 2008: s. 598–609.
- [546] Varas, A.; Cornejo, M.; Mainemer, D.; aj.: Cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 382, č. 2, 2007: s. 631–642.
- [547] Visbox, Inc. 2020.  
URL <http://www.visbox.com/products/cave/viscube-c4-4ku/>
- [548] VR in Pathfinder and PyroSim. 2020.  
URL <https://support.thunderheadeng.com/>
- [549] Vrsense.com. 2016.  
URL <https://www.vrsense.com/en/>
- [550] Vyhláška č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb.
- [551] Vyhláška č. 246/2001 Sb. Vyhláška Ministerstva vnitra o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci).
- [552] Vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby.
- [553] Vyhláška č. 398/2009 Sb., o obecných technických požadavcích zabezpečujících bezbariérové užívání staveb.
- [554] Vyhláška č. 460/2021 Sb., o kategorizaci staveb z hlediska požární bezpečnosti a ochrany obyvatelstva. 2021.  
URL <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-460?text=o+kategorizaci+staveb+z+hlediska+pozarni+bezpecnosti+a+ochrany>
- [555] Wachs, M.; Samuels, J. M.; Skinner, R. E.: *Highway Capacity Manual*. USA: National Research Council, 2000 vydání, 2000, ISBN 0-309-06681-6.
- [556] Wade, C.; Spearpoint, M.; Bittern, A.; aj.: Assessing the sprinkler activation predictive capability of the BRANZFIRE fire model. *Fire technology*, ročník 43, č. 3, 2007: s. 175–193.
- [557] Wald, F.; Cábová, K.; Bernas, M.; aj.: Postupy pro strategie bezpečné evakuace lidí při požárech v metru, 2019.
- [558] Wald, F.; Pokorný, M.; Cábová, K.; aj.: *Modelování dynamiky požáru v budovách*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017, ISBN 978-80-01-05633-2.
- [559] Wang, K.; Shi, X.; Goh, A. P. X.; aj.: A machine learning based study on pedestrian movement dynamics under emergency evacuation. *Fire safety journal*, ročník 106, 2019: s. 163–176.
- [560] Wang, Z.; Jia, F.; Galea, E. R.; aj.: A forensic analysis of a fatal fire in an indoor shooting range using coupled fire and evacuation modelling tools. *Fire Safety Journal*, ročník 91, 2017: s. 892–900.
- [561] WAYOUT. 2020.  
URL <https://www.wayout.com.au/>
- [562] Weidmann, U.: Transporttechnik der fussgänger. *Strasse und Verkehr*, ročník 78, č. 3, 1992: s. 161–169.
- [563] Weidmann, U.; Kirsch, U.; Schreckenberg, M.: *Pedestrian and evacuation dynamics 2012*. Springer Science & Business, 2014.
- [564] Wetterberg, N.: A virtual reality experiment on driving speed in smoke during a wildfire evacuation. *LUTVDG/TVBB*, 2020.
- [565] Witter, R. E.: Guidelines for hazard evaluation procedures. *Plant/Operations Progress;(United States)*, ročník 11, č. 2, 1992.

- [566] Wolf, D. E.; Grassberger, P.: Friction, arching, contact dynamics. In *Friction, Arching, Contact Dynamics*, World Scientific, 1997, s. 1–366.
- [567] Wong, P. K.-Y.; Luo, H.; Wang, M.; aj.: Recognition of pedestrian trajectories and attributes with computer vision and deep learning techniques. *Advanced Engineering Informatics*, ročník 49, 2021: str. 101356.
- [568] Xue, Y.; Tian, H.-H.; He, H.-D.; aj.: Exploring jamming transitions and density waves in bidirectional pedestrian traffic. *The European Physical Journal B*, ročník 69, č. 2, 2009: s. 289–295.
- [569] Yamori, K.: Going with the flow: Micro–macro dynamics in the macrobehavioral patterns of pedestrian crowds. *Psychological review*, ročník 105, č. 3, 1998: str. 530.
- [570] Yanagisawa, D.; Kimura, A.; Tomoeda, A.; aj.: Introduction of frictional and turning function for pedestrian outflow with an obstacle. *Physical Review E*, ročník 80, č. 3, 2009: str. 036110.
- [571] Yang, B.; Ren, B.; Wu, Y.-g.: The research of multi-resolution modeling and simulation of the emergency evacuation. *Procedia Engineering*, ročník 29, 2012: s. 3110–3116.
- [572] Yang, H.; Su, H.; Zheng, S.; aj.: The large-scale crowd density estimation based on sparse spatiotemporal local binary pattern. In *2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, IEEE, 2011, s. 1–6.
- [573] Yang, X.; Dong, H.; Wang, Q.; aj.: Guided crowd dynamics via modified social force model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 411, 2014: s. 63–73.
- [574] Yang, X.-X.; Dong, H.-R.; Yao, X.-M.; aj.: Pedestrian evacuation at the subway station under fire. *Chinese Physics B*, ročník 25, č. 4, 2016: str. 048902.
- [575] Yi, S.; Li, H.; Wang, X.: Understanding pedestrian behaviors from stationary crowd groups. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015, s. 3488–3496.
- [576] Yogameena, B.; Nagananthini, C.: Computer vision based crowd disaster avoidance system: A survey. *International journal of disaster risk reduction*, ročník 22, 2017: s. 95–129.
- [577] Yosinski, J.; Clune, J.; Nguyen, A.; aj.: Understanding neural networks through deep visualization. *arXiv preprint arXiv:1506.06579*, 2015.
- [578] Yuan, W.; Tan, K. H.: An evacuation model using cellular automata. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 384, č. 2, 2007: s. 549–566.
- [579] Yuan, Z.; Jia, H.; Liao, M.; aj.: Simulation model of self-organizing pedestrian movement considering following behavior. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, ročník 18, č. 8, 2017: s. 1142–1150.
- [580] Yuen, J.; Lee, E.: The effect of overtaking behavior on unidirectional pedestrian flow. *Safety Science*, ročník 50, č. 8, 2012: s. 1704–1714.
- [581] Yuksel, M. E.: Agent-based evacuation modeling with multiple exits using NeuroEvolution of Augmenting Topologies. *Advanced Engineering Informatics*, ročník 35, 2018: s. 30–55.
- [582] Zákon č. 108/2006 Sb., o sociálních službách.
- [583] Zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně.
- [584] Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) ve znění pozdějších předpisů.
- [585] Zákon č. 415/2021 Sb., kterým se mění zákon č. 133/1985 Sb., o požární ochraně, ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 239/2000 Sb., o integrovaném záchranném systému a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů. 2021.  
URL <https://www.zakonyprolidi.cz/print/cs/2021-415/zneni-20211201.htm?sil=1>
- [586] Zhang, G.; Huang, D.; Zhu, G.; aj.: Probabilistic model for safe evacuation under the effect of uncertain factors in fire. *Safety science*, ročník 93, 2017: s. 222–229.
- [587] Zhang, J.; Klingsch, W.; Rupperecht, T.; aj.: Empirical study of turning and merging of pedestrian streams in T-junction. *arXiv preprint arXiv:1112.5299*, 2011.
- [588] Zhang, J.; Klingsch, W.; Schadschneider, A.; aj.: Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, ročník 2011, č. 06, 2011: str. P06004.
- [589] Zhang, J.; Klingsch, W.; Schadschneider, A.; aj.: Ordering in bidirectional pedestrian flows and its influence on the fundamental diagram. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, ročník 2012, č. 02, 2012: str. P02002.
- [590] Zhang, Y.; Zhou, D.; Chen, S.; aj.: Single-image crowd counting via multi-column convolutional neural network. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, s. 589–597.

- [591] Zhao, B.; Zhang, Y.; Li, X.; aj.: Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method. *Building and Environment*, ročník 39, č. 1, 2004: s. 1–8.
- [592] Zhao, D.; Yang, L.; Li, J.: Occupants' behavior of going with the crowd based on cellular automata occupant evacuation model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, ročník 387, č. 14, 2008: s. 3708–3718.
- [593] Zhao, H.; Winter, S.; Tomko, M.: Integrating decentralized indoor evacuation with information depositories in the field. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, ročník 6, č. 7, 2017: str. 213.
- [594] Zhao, R.; Dong, D.; Li, C.; aj.: Video based crowd stability analysis used in emergency evacuation. In *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, IEEE, 2019, s. 354–357.
- [595] Zhao, Y.: *Verification and validation of the evacuation model*. Diplomová práce, 2018.
- [596] Zheng, X.; Zhong, T.; Liu, M.: Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and environment*, ročník 44, č. 3, 2009: s. 437–445.
- [597] Zhong, J.; Cai, W.; Luo, L.; aj.: Learning behavior patterns from video for agent-based crowd modeling and simulation. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, ročník 30, č. 5, 2016: s. 990–1019.
- [598] Zhou, M.; Dong, H.; Wen, D.; aj.: Modeling of crowd evacuation with assailants via a fuzzy logic approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, ročník 17, č. 9, 2016: s. 2395–2407.
- [599] Zhu, J.; Li, W.; Li, H.; aj.: A novel swarm intelligence algorithm for the evacuation routing optimization problem. *computational complexity*, ročník 1, č. 1, 2017: str. 2.
- [600] Zhu, K.-j.; Shi, Q.: Experimental study on choice behavior of pedestrians during building evacuation. *Procedia Engineering*, ročník 135, 2016: s. 207–216.
- [601] Zhu, Z.; Zhou, L.; Zhang, C.; aj.: Modeling of macroscopic building evacuation using IFC data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, ročník 7, č. 8, 2018: str. 302.
- [602] Zong, X.; Xiong, S.; Fang, Z.; aj.: Multi-ant colony system for evacuation routing problem with mixed traffic flow. In *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, IEEE, 2010, s. 1–6.
- [603] Zou, H.; Li, N.; Cao, L.: Emotional response-based approach for assessing the sense of presence of subjects in virtual building evacuation studies. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ročník 31, č. 5, 2017: str. 04017028.
- [604] Zuriguel, I.; Parisi, D. R.; Hidalgo, R. C.; aj.: Clogging transition of many-particle systems flowing through bottlenecks. *Scientific reports*, ročník 4, 2014: str. 7324.
- [605] Žálská, K.: *Modelování pohybu při konání hromadných akcí*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno, 2021.

## Seznam zkratek

- .dwg** DraWinG, (nativní formát souborů – výkresů z programu AutoCAD)
- .fbx** Filmbox
- .ifc** Industry Foundation Classes
- 1D** One-dimensional
- 2D** Two-dimensional
- 3D** Three-dimensional
- ACO** Ant Colony Optimization, (optimalizace mravenčí kolonií)
- AdMaS** Advanced Materials Structures and Technologies, (Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie, je vědecké centrum a komplexní výzkumná instituce v oblasti stavebnictví)
- AG** Augmented Reality, (rozšířená realita)
- AI** Artificial intelligence, (umělá inteligence, UI)
- ANN** Artificial Neural Network, (umělé neuronové sítě)
- AR** Augmented Reality, (rozšířená realita)
- Arup** Arup Group Limited, britská nadnárodní inženýrská společnost
- ASET** Available Safe Egress Time (doba dostupná pro evakuaci)
- AV** Augmented Virtuality, (rozšířená virtualita)
- BIM** Building Information Modeling, (technologie informačního modelu budovy)
- BIMFIRE** požární informační model budovy
- BOZP** Bezpečnost a ochrana při práci
- BUS** sběrnice, autobus
- CA** celulární automata
- CANAVERAL** TL02000103 – Kognitivní psychologie a prostorová syntaxe ve virtuálním prostředí pro agentní modely
- CAVE** Cave Automatic Virtual Environments, (vysoce poltivý promítací systém)
- CFD** Computational Fluid Dynamic
- CIBSE** Chartered Institution of Building Services Engineers
- CNN** Convolutional neural network, (konvoluční neuronovou síť)
- CV** Computer vision, (počítačové vidění)
- CVE** Collaborative Virtual Reality Environment (výcvikový nástroj s VR)
- ČCHÚC** částečně chráněná úniková cesta
- ČKAIT** Česká komora architektů inženýru a techniků
- ČR** Česká republika
- ČSN 73 08XX** soubor norem požárního kodexu
- ČSN EN** česká verze evropské normy
- ČSN EN ISO** česká verze mezinárodní normy (převzaté evropskou komisí pro normalizaci)
- ČSN** českých technických norem
- ČSÚ** Český statistický úřad
- ČVUT** České vysoké učení technické v Praze
- DFS** Dart from Sky, (software pro analýzu video dat)
- DHZ** Doplnkové hasicí zařízení (nejčastěji sprinklerové napojené na vodovod)
- DL** Deep Learning (hluboké učení)
- DNS** Direct Numerical Simulations, (přímá numerická simulace)
- DPP** Dopravní podnik hl. m. Prahy, akciová společnost
- DT** Decision Tree, (rozhodovací stromy)



- EPS** Elektrická požární signalizace
- ESPRED** projekt TJ04000232 – Efektivní časoprostorové predikce s využitím metod strojového učení
- EU** Evropský unie
- EXPO** Světová výstava
- FAST** Fakulta stavební
- FBG** Fiber Bragg Grating, (typ optického senzoru nahrazující tenzometr)
- FDS** Fire Dynamics Simulator
- FDS** Fire Dynamic Simulation
- FDTs** Fire Dynamics Tools
- FED** Fractional Effective Dosage (frakční účinná dávka)
- FEM** Finite element method, (metoda konečných prvků, MKP)
- FIC** Fractional Irritant Concentration (frakční koncentrace dráždivých látek)
- FIFA** Fédération Internationale de Football Association, (Mezinárodní federace fotbalových asociací)
- FIH** an individual's cumulative exposure to radiative and convective heat (kumulativní expozice jednotlivce radiačnímu a konvekčnímu teplu)
- FIN** an individual's cumulative exposure to narcotic gases (kumulativní expozice jednotlivce toxickým plynům)
- FLAIM** Trainer od firmy FLAIM Systems
- FOV** Field of View (zorné pole)
- GA** genetické algoritmy
- GIS** Geografický informační systém
- GPS** Global Positioning System, (globální polohový systém)
- GŘ HZS** Generální ředitelství hasičského záchranného sboru
- HADES** TA03030491 – Optimalizace technologického vybavení tunelů pozemních komunikací se zřetelem na bezpečnost a cenu
- HBS** Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
- HCl** chlorovodík
- HCM** Hight Capacity Manual
- HCN** kyanovodík
- HMD** Head-mounted display, (systém promítacích boxů)
- HRR** Heat Release Rate
- HZS DPP** Hasičský záchranný sbor Dopravního podniku hl. m. Prahy, akciové společnosti
- HZS** hasičský záchranný sbor
- CHÚC** chráněná úniková cesta
- ID** IDentification – nuber (technické označení)
- INTACT** TH04010377 – Vývoj metod identifikace a ochrany měkkých cílů dopravní infrastruktury pro zvýšení jejich bezpečnosti a odolnosti před teroristickým útokem
- IMO** Revised Guidelines on Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships
- IP** Internet Protocol, (jednoznačná identifikace zařízení v počítačové síti)
- IQ** Inteligenční kvocient
- ISO** International Organization for Standardization, Mezinárodní organizace pro normalizaci
- ISO/TR** technická zpráva – International Organization for Standardization
- IT** Informační Technologie, (Information technology)
- IZS** integrovaný záchranný systém
- JIP** jednotka intenzivní péče

- JKC** Janáčkovo kulturní centrum  
**KNN** K-Nearest Neighbor, (algoritmus K-nejbližších sousedů)  
**LDN** léčebna dlouhodobě nemocných  
**LDP** lokální detekce požáru  
**LES** Large Eddy Simulation, (metoda pro výpočet turbulentního proudění)  
**LN** log-normální  
**LoS** Level of Service, (úroveň pěší dopravy)  
**LZ** lékařská zařízení  
**M2SD** Mean + 2× Standard Deviation (standardizované skóre)  
**MC** měkký cíl, metoda Monte Carlo  
**MC LHS** metoda Monte Carlo Latin Hypercube Sampling  
**MD ČR** Ministerstvo dopravy ČR  
**MKO** metoda konečných objemů  
**MKP** metoda konečných prvků, (FEM = Finite element method)  
**ML** Mashine learning, (strojové učení)  
**MLM** Multinomial Logit Model  
**MR** Mmixed Reality, (smíšená realita)  
**MSKP** Multifunkční sportovní a kulturní pavilon  
**MV** Machine vision, (strojové vidění)  
**N<sub>2</sub>** dusík  
**NFPA 101** National Fire Protection Association  
**NIST** National Institute of Standards and Technology  
**NM** numerický model, numerické modelování  
**NP** nadzemní podlaží  
**NS** Návrhový scénář  
**NÚC** nechráněná úniková cesta  
**Obr.** obrázek  
**OC** obchodní centrum  
**os.** osoba/ osob  
**PBŘ** požárně bezpečnostní řešení (součást projektové dokumentace, zpravidla ozn. D.3)  
**PBZ** požárně bezpečnostní zařízení  
**PC** personal computer, (osobní počítač)  
**PD** projektová dokumentace  
**PET** Personal Evacuation Time (doba osobní evakuace)  
**PHP** Přenosný hasicí přístroj  
**PNP** požárně nebezpečný prostor  
**PO** Požární ochrana  
**POP** požárně otevřená plocha  
**PP** podzemní podlaží  
**Průmysl 4.0** čtvrtá průmyslová revoluce  
**PSO** Particle swarm optimization, (optimalizace částicového roje)  
**PTH** Pathfinder, simulační nástroj  
**PTCH** požárně technické charakteristiky (materiálů)  
**PÚ** požární úsek  
**QT** multiplatformní aplikační rámec, aplikace pro tvorbu grafického uživatelského prostředí

- RAINCOAT** projekt TL02000352 – Klasifikace sociálně-psychologických parametrů osob prostřednictvím umělé inteligence a strojového vidění pro potřeby ochrany osob v reálném čase
- RANS** Reynolds Averaged Navier Stokes, (R-časové středování)
- RCE systems** robotics, computer vision, and embedded systems, firma spolupracující
- R-CNN** Regions with CNN
- REI** mezní stav požární odolnosti (R = únosnost, stabilita, E = celistvost, I = izolační schopnost)
- Revit** BIM software
- RHR** Rate of Heat Release
- RIMEA** Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen
- RSET** Required Safe Egress Time (doby potřebné pro evakuaci)
- SA** Sensitive analysis
- SAFEVAC** projekt VG20132015120 – Bezpečná hromadná evakuace osob s využitím pokročilých simulací davové dynamiky a požáru
- SBI** Single Burning Item, (typ požární zkoušky dle EN 13823)
- SFPE** Society of Fire Protection Engineers
- SHZ** samočinný hasicí zařízení (vodní – nejčastěji sprinklerové, napojené na velkokapacitní nádrže)
- SI** Swarm intelligence, (inteligence rojů)
- SOTA** State of the art
- SPB** stupeň požární bezpečnosti
- SPD** státní požární dozor
- Steering** režim inverzního řízení
- SVM** Support Vector, (metoda podpurných vektorů)
- SW** Software
- TCRP Report 165** Transit Cooperative Research Program – Transit Capacity and Quality of Service Manual
- TET** Total Evacuation Time (celková doba evakuace)
- TNK** Technická normalizační komora
- TUPO** Technický ústav požární ochrany
- Ú.I.** (Vyhl. 709/1950 Ú.I., o podrobnějších předpisech pro pozemní stavby)
- ÚC** úniková cesta
- UI** umělá inteligence, (AI, Artificial Intelligence)
- ÚP** únikový pruh
- US-HCM** USA Hight Capacity Manual, standard
- V&V** verifikace a validace
- VERIFIRE** projekt VI20162019034 – Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb
- Vfdb** Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V.
- VR** Virtual Reality, (virtuální realita)
- VZT** Vzduchotechnika a klimatizace
- WiFi** Wirelles Fidelity, (označení bezdrátových sítí)
- WF** U. Weidman a J. J. Fruin (data)
- WTC** World Trade Center, (budova světového obchodního centra, zasažená 11. září)
- ZOKT** zařízení na odvod kouře a tepla
- ZPP** zjišťování příčin požáru
- ZŠ** základní škola

## Seznam veličin a jednotek

% procento

$\bar{x}$  střední hodnota sledované veličiny

$\varphi$  průměrná koncentrace příslušné dráždivé látky [ppm]

° stupně

°C stupně Celsia

$a$  součinitel vyjadřující rychlost odhořívání [-]

$a$  koeficient vycházející z půdorysného průmětu osoby [-]

$a_{b\max}$  tangenciální složka zrychlení

$a_{f\max}$  dopředná složka zrychlení

$a_{r\max}$  radiální složka zrychlení

$c$  součinitel vyjadřující vliv požárně bezpečnostních zařízení [-]

$(C \cdot t) \cdot i$  součin koncentrace toxikantu  $i$  a expoziční doby  $t$  [ppm·min]

$C_{ao}$  náklady na vyhnutí se osobám

$C_{aw}$  náklady na vyhnutí se stěně

$C_{cnr}$  náklady na obejití rohu

$C_{ds}$  cena cesty s nejnižšími náklady

$C_i$  koncentrace toxické složky  $i$  ve zplodinách hoření [ppm]

$C_{isep}$  náklady na proces nečinného oddělení se od ostatních osob

$C_{lanes}$  náklady na držení se v pruzích

**cm** centimetr

$C_{pass}$  náklady na průchod

$C_{seek}$  náklady na hledání cesty

$C_{sep}$  náklady na odstup od ostatních osob

$C_{swsep}$  náklady na odstup od stěny

**D** hustota osob v prostoru [os·m<sup>2</sup>]

**E** počet evakuovaných osob z posuzovaného místa [os.]

**F** koncentrace dráždivého plynu ohrožující schopnost osoby uskutečnit evakuaci [ppm]

**ft<sup>2</sup>/os.** počet čtverečních stop na osobu

$H_1$  výškový rozdíl mezi nástupní a výstupní plochou [m]

$h_s$  světlá výška posuzovaného prostoru [m]

$k$  koeficient typu terénu

$K$  počet evakuovaných osob v posuzovaném kritickém místě (určováno v závislosti úniku osob – po rovině, po schodech dolů, po schodech nahoru) [os.]

**kW/m<sup>2</sup>** kilowatt na metr čtvereční

$L$  počet evakuovaných osob (lůžek) z posuzovaného podlaží [-]

$l_u$  skutečná délka únikové cesty [m]

**m·s<sup>-1</sup>** počet metrů za sekundu

**m·min<sup>-1</sup>** počet metrů za minutu

**m<sup>-1</sup>** (jednotka optické hustoty vyjádřená) na metr délky

**m<sup>2</sup>** metr čtvereční

$N$  celkový počet opakování (simulací)

$N$  počet simulací

**os·s<sup>-1</sup>** počet osob za sekundu

**os·m<sup>-2</sup>** počet osob na metr čtvereční

**os·min<sup>-1</sup>** počet osob za minutu

$p_f$  pravděpodobnost

**person·ft<sup>-2</sup>** person per square feet

**person/s** osob za sekundu

**ppm** parts per million

**r** poloměr

**s** sekunda

$S$  lineálně vyjádřená rychlost v závislosti na hustotě [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$s$  součinitel podmínek evakuace [-]

$t_d$  doba detekce [min]

$t_m$  časová ztráta rozjezdem [s]

$t_n$  časová ztráta otevření a zavření dveří [s]

$t_p$  doba, po kterou je zajištěn provoz výtahu [min]

$t_r$  doba evakuace [min]

$t_r$  doba rozhodnutí [min]

$t_u$  doba pohybu [min]

$t_v$  doba vyhlášení poplachu [min]

$t_{vz}$  doba před pohybem [min]

$t_{vz}$  doba před pohybem [min]

$t_z$  doba odezvy [min]

$t_z$  doba před pohybem [min]

$t_{\text{accel}}$  čas akcelerace

$t_e$  doba zakouření akumulární vrstvy

$u$  mezní šířka

$u$  počet únikových pruhů [-]

$u_{\text{min}}$  minimální mezní šířka

$v$  rychlost

$v$  jmenovitá rychlost výtahu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$v_u$  rychlost pohybu osob [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]

$v_{f(D)}$  rychlost osoby v aktuálním výpočetním kroku dle hustotou osob

$v_{ft}$  rychlost osoby v aktuálním výpočetním kroku ovlivněná terénem

$v_{\text{max}}$  maximální rychlost osoby

$v_{pf}$  variační koeficient

$w_{ao}$  míra váhy parametru vyhnutí se osobě

$w_{aw}$  míra váhy parametru vyhnutí se stěně

$w_{cnr}$  míra váhy parametru obejití rohu

$w_{isep}$  míra váhy procesu nečinného oddělení se od ostatních osob

$w_{lanes}$  míra váhy držení pruhu

$w_{pass}$  míra váhy průchodu

$w_{ssep}$  míra váhy držení odstupu od ostatních osob

$w_{swsep}$  míra váhy držení odstupu od stěn

$X$  počet evakuačních výtahů

$x_i$  hodnota konkrétní sledované veličiny s pořadovým číslem  $i$

# Seznam obrázků

1.1	Porovnání klasického normového přístupu a odlišného přístupu k vypracování a schválení požárně bezpečnostního posouzení (zdroj: vlastní) . . . . .	2
1.2	Statistika tragických davových událostí spojených s vysokou koncentrací počtu osob či požárem v letech 1900–2020 v intervalu 5 let (zdroj: vlastní přepracováno z [520]). . . . .	4
1.3	Schéma dynamiky davu a evakuace chodců se vztahy mezi jednotlivými fázemi (zdroj: vlastní, přepracováno z [144]) . . . . .	6
1.4	Vybrané davové jevy – efekt následování, efekt stop-and-go a efekt klenutí (zdroj: vlastní) . . . . .	8
1.5	Názorná ukázka rozdílu působení osob navzájem – v jednosměrném proudu (nahore) a protisměrném proudu (dole) (zdroj: upraveno a převzato z [166]) .	9
1.6	Půdorysné srovnání statického a dynamického davu (zdroj: převzato z [522]) .	10
1.7	Schéma narušení rovnováhy v davu s vysokou hustotou a následné propuknutí davového kolapsu (zdroj: upraveno a převzato z [522]) . . . . .	10
1.8	Dělení základních experimentálních metod pro výzkum a získávání dat o dynamice davu (zdroj: vlastní, přepracováno dle [101]) . . . . .	11
1.9	Vybrané příklady metod strojového učení – a) metoda rozhodovací strom; b) metoda podpurných vektorů; c) algoritmus K-nejbližších sousedů; d) umělé neuronové sítě (zdroj: vlastní, přepracováno dle [559]) . . . . .	15
1.10	Schéma přístupů k požárně bezpečnostnímu posouzení a jejich vzájemné vztahy (zdroj: vlastní, přepracováno z [304]) . . . . .	19
1.11	Schéma principu spřažené simulace modelu evakuace, požáru a šíření toxických látek (zdroj: vlastní, přepracováno dle [183, 94]) . . . . .	23
3.1	Schéma modelovaných variant a jejich celková obsazenost návštěvníky pro stavbu Aréna Brno (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19][33]) . . . . .	33
3.2	Ukázka modelu požáru Aréna Brno, kdy v 80 s dochází k aktivaci ZOKT (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [10]) . . . . .	33
3.3	Schéma geometrie nové odbavovací haly budovy Hlavního vlakového nádraží pro analýzu bezpečnosti (zdroj: upraveno a převzato z [88]) . . . . .	34
3.4	Ukázka práce využití numerického modelu k posouzení evakuace osob ze Zemského stadionu Brno (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [15]) . . . . .	34
3.5	Ukázka práce využití numerického modelu evakuace a šíření požáru k posouzení stanice metra – Pankrác (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11, 392]) . . . . .	35
3.6	Ukázka numerického modelu požáru a jednoho z jeho výstupů (vizualizace šíření kouře) pro dvoulodní stanici metra Olbrachtova (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11] přepracováno) . . . . .	36



3.7	Ukázka analýzy evakuace Českého pavilonu EXPO, Milano 2015 – Agentní model s diskrétní sítí a výstupní data Level of Service – LOS (vlevo), 3D vizualizace pavilonu (vpravo); (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [13] přepracováno)	37
3.8	Ukázka extrakce dat z videozáznamu pomocí DFS – detekce osob s id a jejich vzdálenosti vůči překážkám/osobám (vlevo) a aplikace profilového měření do extrakce dat z videozáznamu (vpravo) (zdroj: převzato od RCE Systems [220])	37
4.1	Příklad dvou stejných skupin osob ve stejném čase, kde první skupina reprodukuje reálné vzorce chování (nahore) a druhá se řídí pravidly normového přístupu (dole) (zdroj: vlastní, z [388]) . . . . .	43
4.2	Proces identifikace nejvýznamnějších parametrů (zdroj: vlastní) . . . . .	46
4.3	Ukázka prostorového ztvárnění maximální hustoty – model se spojitou sítí (vlevo), model s diskrétní sítí (vpravo), (zdroj: vlastní) . . . . .	47
4.4	Schéma principu pohybu agentů v modelu – pohyb agenta k cíli a statická překážka (vlevo), pohyb agenta k cíli a vliv rádiusu zájmu s výskytem mobilních překážek v podobě okolních agentů, kde lze rychlost vyjádřit $r = 2 \times  v $ , (zdroj: vlastní, přepracováno z [537]) . . . . .	47
4.5	Základní diagramy závislosti rychlosti na hustotě (vlevo) a specifickém toku na hustotě (vpravo) pro režim SFPE (zdroj: přepracováno z [235], [407]) . . . . .	48
4.6	Příklad vývoje podélných a bočních rozestupů mezi osobami jednosměrného proudu v závislosti na hustotě osob v prostoru ( $2,32-1,85 \text{ m}^2 \cdot \text{os}^{-1}$ ; $1,39$ až $0,93 \text{ m}^2 \cdot \text{os}^{-1}$ ; $0,467 \text{ m}^2 \cdot \text{os}^{-1}$ ) (zdroj: vlastní, přepracováno z [172]) . . . . .	49
4.7	Schéma výpočetního principu Steering – výpočet procesu pohybu osoby k cíli (zdroj: vlastní, přepracováno z [399]) . . . . .	50
4.8	Příklad ztvárnění trajektorie chodců v režimu SFPE (vlevo) a Steering (vpravo) (zdroj: vlastní) . . . . .	51
4.9	Příklad jednoduché geometrie – plocha je na první pohled reprezentovaná jako jeden celek (vlevo), ale ve skutečnosti je dělena pomocí navigační mřížky – triangulační sítě (vpravo) (zdroj: vlastní) . . . . .	52
4.10	Srovnání reprezentace prostoru v modelu s diskrétní sítí (EXODUS) a v modelu se spojitou sítí (Pathfinder) – příklad evakuačního chodníku v železničním tunelu (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [32]) . . . . .	52
4.11	Schéma ztvárnění reálné osoby v modelu – A – osoba, B – parametrizace lidského těla do elipsy, C – ztvárnění v rámci modelu (zdroj: vlastní, přepracováno dle [373]) . . . . .	53
4.12	Názorné schéma redukce dimenzí lidského těla na úkor osobního prostoru a prostoru okolních osob (zdroj: vlastní, přepracováno dle [172]) . . . . .	54
4.13	Ztvárnění osoby s omezenou schopností pohybu v nástroji (zdroj: vlastní) . . . . .	54
4.14	Reprezentace prostorových nároků osob s omezenou schopností pohybu a orientace dle Vyhl. č. 398/2009 (zdroj: upraveno a převzato z [516, 553, 72]) . . . . .	55
4.15	Ukázka chování osob při asistované evakuaci (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [388]) . . . . .	55
4.16	Ukázka mapy vzdáleností, kterou se řídí osoby při výběru trasy (vlevo), ukázka inverzních směrů řízení po $30^\circ$ a jejich míru atraktivity dle kritérií – délka trasy, množství kolizí a překážek (vpravo), (zdroj: vlastní, přepracováno dle [6]) . . . . .	56
4.17	Schéma principu chování a pohybu osob v modelu – osoby míří k protilehlým bodům zájmu, dochází k redukci rozměrů těla (kompresi) a vzdálenosti od stěny (vlevo), osoby směřují v podobném bodu zájmu – dveře (ve středu), plánování cesty s ohledem na okolní pohyb osob – stlačení těla, vyhýbání se a pohyb kolem rohu (vpravo) (zdroj: vlastní) . . . . .	57

4.18	Ukázka komplexní tvorby geometrie OC – interiér specifické stavby ve formátu .fbx (vlevo), příklad aproximace geometrie pro model požáru (vpravo) (zdroj: převzato z [21] a ve spolupráci s [21]) . . . . .	61
4.19	Příklad geometrie modelu požáru v tunelu, kde je důležité zvážit míru aproximace, aby nedošlo k deficitu/přebytku místa, díky kterému by mohlo dojít k silnému zkreslení výsledků – průběh požáru a postup produktů hoření v prostorách klenby se budou chovat jinak než např. v případě obdélníkového průřezu (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [136, 134]) . . . . .	62
4.20	Znázornění možných trajektorií jedince při evakuaci k východu – a) nejkratší trasa, b) účelná trasa (obhlídka), c) trasa s přidanou zastávkou (zdroj: vlastní, věnováno od [378]) . . . . .	63
4.21	Příklad vlivu stochastických parametrů modelu při pokročilém modelování evakuace (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [391]) . . . . .	66
4.22	Gaussovo normální rozdělení s vyznačenými pásy směrodatné odchylky $\sigma$ (zdroj: vlastní, přepracováno dle [25]) . . . . .	66
4.23	Schéma procesu ověřování modelu při vývoji a v praxi (zdroj: vlastní) . . . . .	68
4.24	Ukázka vzorové verifikační karty – zadání verifikačního příkladu (vlevo), výsledek verifikačního příkladu ve formě videa (vpravo), (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [135]) . . . . .	70
5.1	Schéma procesu sestavování a výběru evakuačního návrhového scénáře (zdroj: vlastní) . . . . .	75
5.2	Ukázka sestavené sady návrhových scénářů evakuace při analýze ÚC pro tunel (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11]) . . . . .	76
5.3	Názorná ukázka schémat evakuačních scénářů s dostupností tras (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20]) . . . . .	77
5.4	Výsledné schéma návrhového scénáře evakuace stanice metra pro – a) nenouzovou variantu („studená varianta“, vlevo) a b) nouzovou variantu („horká varianta“, vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [392, 11] přepracováno) . . . . .	78
5.5	Schéma sestavování požárních scénářů (zdroj: vlastní, přepracováno dle [304]) . . . . .	79
5.6	Příklady návrhových HHR křivek výkonu požáru s různými průběhy – konstruovaný průběh (vlevo nahoře), kvadratický (vpravo nahoře), průběh stanovený komplexní křivkou (vlevo dole) a průběh definovaný hodnotami z tabulky (vpravo dole) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [25] přepracováno) . . . . .	80
5.7	Působení zpětné radiace na rozvoj požáru (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [21] upraveno) . . . . .	81
5.8	Schéma popisu jednotlivých fází návrhového požáru (zdroj: vlastní, zpracováno dle [235, 133, 509]) . . . . .	81
5.9	HRR požárních zkoušek osobních automobilů (zdroj: převzato z [95, 221]) . . . . .	82
5.10	Ukázka databáze ověřených požárně technických charakteristik materiálů, projektu VERIFIRE (vlevo) a příklad vstupních dat pro návrhový požár (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s projektem <i>VI20162019034</i> [396]) . . . . .	83
5.11	Struktura jednotlivých časových úseků evakuačního procesu pro nouzovou a nenouzovou evakuaci (zdroj: vlastní, přepracováno dle [235]) . . . . .	84
5.12	Přibližný vztah mezi intenzitou proudu pohybujících se osob a jejich hustotou (vlevo) a přibližný vztah mezi rychlostí proudu pohybujících se osob a jejich hustotou (vpravo) (zdroj: vlastní, přepracováno dle [25]) . . . . .	87
5.13	Znázornění statické hustoty davu – od nízkých hodnot hustoty $1,0 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ až po ty kritické $5,0 \text{ os}\cdot\text{m}^{-2}$ (zdroj: vlastní, věnováno od [605], přepracováno dle [521]) . . . . .	87

5.14	Schéma výpočtu hustoty osob na plochu (zdroj: vlastní, přepracováno dle [403])	88
5.15	Schéma průniku měřicí oblasti a plochy pro pohyb osob rozdělené do Voronoiho buněk (vlevo), barevné schéma lokání hustoty proudícího davu – reálný experiment (zdroj: vlastní, přepracováno dle [406, 166])	88
5.16	Příklad interpretace výsledků hustotní mapy – výřez posuzované stavby (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20])	89
5.17	Grafické znázornění Level of Service (LOS) se slovním popisem (zdroj: vlastní, přepracováno dle [173])	89
5.18	Úroveň kvality pěší dopravy pro různé typy komunikací – čekací plochy, schody, chodníky dle Fruina (zdroj: převzato z [173])	89
5.19	Příklad kvalitativního posouzení vlivu obsazenosti objektu na LOS v průběhu evakuace, v čase 120 s, pro obsazenost 1000 os., 1500 os., 2000 os. (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [557] přepracováno)	90
5.20	Rozdělení úrovní kvality pěší dopravy podle typu komunikace a hustoty osob dle [555] (HCM), [66] (HBS) a J. Fruina [173] (vlevo), grafické vyjádření prostorových nároků pro jednotlivé úrovně kvality pěší dopravy stojící osoby – od úrovně A (modrá) po úroveň F (červená) – rozměry odpovídají úrovním kvality pěší dopravy pro chodník (vpravo) (zdroj: upraveno a převzato z [173, 555, 66])	91
5.21	Ukázka vizualizace spřažené simulace evakuace osob a rozvoje požáru (vpravo) a zobrazení roviny řezu znázorňující viditelnost pro evakuované osoby v čase (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19, 10] a upraveno a převzato z [403])	91
5.22	Grafické vyhodnocení dostupné doby evakuace – překrytí výsledků vývoje teplotního pole z modelu požáru a s výsledky modelu evakuace pro obsazenost 1050 os. a 2050 os. (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11] upraveno)	92
5.23	Příklad grafického vyhodnocení dostupné doby evakuace v kontrolním profilu – z pohledu množství toxických zplodin hoření – konkrétně pro obsah CO (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11])	94
5.24	Příklad expozice rozvinutého požáru, radiací od POP na unikající osobu – celkový pohled (vlevo), ve vzdálenosti 275 mm od POP (ve středu) a ve vzdálenosti 1200 mm od POP (vpravo), (zdroj: vlastní ve spolupráci s [390, 21] přepracováno)	95
5.25	Příklad šíření kouře ve stanici metra (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11])	95
5.26	Schéma posuzované studie vlakové soupravy se šesti vozy (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [32])	98
5.27	Rozdílný rozptyl v průběhu času evakuace vozů č. 1 a č. 3 pro variantu modelu s označením $n_6$ $t_0$ $v_{WF}$ z hlediska počtu osob ve voze, kdy v prvním případě (vlevo) vychází pro čas 110 s počet osob ve voze 0 až 20 zatímco v druhém případě (vpravo) je tato variabilita minimální, (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [32])	98
5.28	Porovnání časového průběhu nouzové evakuace tunelu – varianta asymetrické evakuace „LAVKA ASYM“ (nahore) a varianta symetrické evakuace „LAVKA“ (dole) – rozdíly průměrných časů vyklizení mezi variantami jsou pro vlakovou soupravu 9,02 min (541,0 s) a pro celkové vyklizení tunelové části 11,48 min (689,7 s) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [24, 391])	99
5.29	Výsledný celkový čas evakuace z vlakové soupravy (vlevo) a výsledný celkový čas evakuace z tunelu (vpravo) pro ukázkou silně asymetrické varianty evakuace na lávku („LAVKA ASYM“) tunelového úseku (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [24, 391])	99
5.30	Srovnání principu odlišné reprezentace chování davu dle ČSN 73 0802 (vlevo) a dle modelu SFPE (vpravo) na schodišti (zdroj: vlastní ve spolupráci s [15])	100

5.31	Ukázka vlivu složení osob na čas zdržení v posuzovaných prostorách – na první pohled je znatelné kratší zdržení osob ve variantě ČSN oproti obsazení modelu populací starších osob, které v posuzovaných prostorách setrvávají přibližně o 60 s déle (nad hodnoty normového přístupu), což může být pro samotnou evakuaci značně rozhodující (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [24]) . . . . .	101
5.32	Studie vlivu kvantitativních a kvalitativních charakteristik osob pro koridor délky 20 m a šířky 2 m – počáteční stav – geometrické schéma modelu (vlevo), reálný půdorysný pohled v 30 s (na středu) a hustota davu v 30 s (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [14]) . . . . .	102
5.33	Srovnání efektivity vyklizení z pohledu doby evakuace osob jednotlivých modelovaných scénářů budovy – M2SD (zdroj: vlastní z [20]) . . . . .	102
5.34	Schéma geometrie scénáře posuzovaného LDN oddělení (zdroj: vlastní z [21, 390])	103
5.35	Schéma obsazenosti dle míry samostatnosti pohybu, posuzovaného LDN oddělení – varianta „V1“ (vlevo) a varianta „V2“ (vpravo) (zdroj: vlastní z [21, 390])	103
5.36	Průběh nouzové evakuace ve složení „V1“ (vlevo) a „V2“ (vpravo) – názorná demonstrace vlivu zastoupení osob vyžadující různou míru asistence v posuzovaném objektu může mít vliv na celkovou účinnost evakuace – ve stejném čase 150 s setrvává ve „V1“ 23 osob (z toho 4 čekajících na asistenci) a ve „V2“ 31 osob (z toho čekajících na asistenci 26) (zdroj: vlastní z [21, 390]) . . . . .	104
5.37	Schéma studie ověřující vliv bodových překážek na celkový evakuační čas a vznik kritických míst při evakuačním procesu (zdroj: vlastní z [14]) . . . . .	105
5.38	Výsledné hustoty studie vlivu umístění bodových překážek do koridoru ÚC (zdroj: vlastní z [14]) . . . . .	105
5.39	Schéma studie ověřující vliv liniových překážek na celkový evakuační čas a vznik kritických míst při evakuačním procesu (zdroj: vlastní z [14]) . . . . .	106
5.40	Výsledné hustoty studie vlivu umístění bodových překážek do koridoru ÚC (zdroj: vlastní z [14]) . . . . .	106
5.41	Srovnání vývoje evakuace osob typizované jednodlní stanice metra – schéma počátečního stavu v čase 0 s (nahore), symetrická evakuace – v případě dostupnosti všech únikových cest (uprostřed) a asymetrická evakuace v případě uzavření levého horního schodiště (dole) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11, 17])	107
5.42	Porovnání výsledků průběhu evakuace v čase – 50 s a 100 s u modelů evakuace se zohledněním reakční doby/doby přípravy – samovolná evakuace (vlevo) a řízená evakuace (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [21]) . . . . .	108
5.43	Ukázka malé citlivosti modelu tunelových staveb na reakční dobu osob (rychlost pohybu osob) a jejich vlivu na celkovou dobu evakuace v důsledku vzniku kongesce v místě úzkého evakuačního chodníku podél šestivozové vlakové soupravy – výsledky modelů s okamžitou reakční dobou $t=0$ s (vlevo) a výsledky modelů s intervalovým zadáním reakční dobou $t=0-30$ s (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [32]) . . . . .	109
5.44	Statistické vyhodnocení průběhu evakuace pro soupravu s 11 vozy. Vodorovná osa zobrazuje výsledky vozů č. 4, č. 9 a celkový výsledek pro tunel. – Ukázka změny citlivosti modelu tunelových staveb na rychlosti pohybu osob a jejich vliv statistickou odchylku celkové doby evakuace jedenáctivozové vlakové soupravy – výsledky modelů s rychlostí dle ČSN (nahore) a výsledky modelů s rychlostí dle WF (dole) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [32]) . . . . .	110
5.45	Příklad výstupů z numerického modelu nouzová evakuace (nahore), nenouzová evakuace – vyklizení (dole) a jejich identifikace zohledněných vstupních parametrů na výsledcích absolvované vzdálenosti a kumulovaného zdržení (zdroj: vlastní, přepracováno z [15]) . . . . .	111

5.46 Schéma vztahů návrhové fáze při projektování instalace PBZ (zdroj: přepracováno z [428]) . . . . .	112
5.47 Graf vývoje výšky kouřové vrstvy v průběhu požáru (zdroj: ve spolupráci s [21])	112
5.48 Ukázka vlivu SHZ na kouřovou vrstvu požáru (zdroj: převzato z [161]) . . . . .	113
5.49 Vizuální porovnání rozvoje teplotního pole v 1 500 s pro variantu pasivní (vlevo) a aktivní ZOKT (vpravo), měřeno v referenční výšce 1,6 m (výška průměrného člověka) nad podlahou (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [21]) . . . . .	113
5.50 Vystavení unikající osoby účinkům radiace z POP v blízkosti ÚC po plném rozvinutí požáru – ve vzdálenosti osy úniku od POP 275 mm, 550 mm a 1 200 mm (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [21, 390]) . . . . .	114
5.51 Srovnání průběhu evakuace základní úlohy pro – výpočetní model chování Steering (vlevo) a výpočetní model chování SFPE (vpravo) (zdroj: vlastní) . . . . .	116
5.52 Aplikace SAFEVAC – analýzou dat – 10 opakování pro zadanou kombinaci parametrů – výsledný graf průběhu evakuace (vlevo), vizualizace simulace na videu (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s projektem <i>VG20132015120</i> [30])	122
5.53 Ukázka citlivostní analýzy pro parametr počet osob – graf znázorňující závislost evakuačního času na parametru počtu osob (zdroj: vlastní, ve spolupráci s <i>VG20132015120</i> [30]) . . . . .	122
5.54 Ukázka možnosti zpracování výsledků citlivostních analýz evakuace osob z posuzované budovy ve formě uživatelsky nastavitelné aplikace (zdroj: ve spolupráci s projektem <i>TL02000103</i> ) . . . . .	123
5.55 Příklad optimalizace exitu, umístěného mimo osu úniku – geometrie prvotního návrhu dle PD (vlevo) a výsledné hustoty při proudění osob tímto prostorem (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno) . . . . .	124
5.56 Příklad míst vhodných pro optimalizaci a schéma srovnání vyklizení místnosti dveřmi šířky 1 025 mm a 1000 mm (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno). . . . .	124
5.57 Ukázka míst vhodných k optimalizaci – dveře šířky 1 025 mm (= 1,86 ÚP) s nedostatečnou kapacitou (vlevo), graf znázorňující průtok vybranými šířkami dveří (vpravo), (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno) . . . . .	125
5.58 Příklady míst pro optimalizaci s do prostoru vyčnívajícími konstrukcemi, tvořícími kónický koridor (vlevo) a navrhovaného řešení v rámci optimalizace (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno) . . . . .	125
5.59 Časoběrné srovnání proudícího davu kónickým koridorem přes čnicí konstrukce dle prvotního návrhu (vlevo) a dle optimalizovaného alternativního návrhu s „barovými pulty“ (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno)	126
5.60 Výsledné srovnání celkového času vyklizení původního návrhu bez aplikace změn (doba vyklizení 2 501 s) a optimalizované geometrie se zanesenými změnami (doba vyklizení 2 063 s) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19]) . . . . .	127
5.61 Vyhodnocení celkového evakuačního času pro vybrané varianty – z vlaku (vlevo), z prostor tunelu až do propojky (vpravo), jako podklad pro optimalizaci provozu a tvaru tunelového profilu (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno) . . . . .	128
5.62 Vyhodnocení řízené evakuace stanice metra s příjezdem vlaku ve srovnání s evakuací klasickou po eskalátoru (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [136]) . . . . .	128
5.63 Příklad zahlceného schodiště stadionu v 6. NP a vývoj specifického průtoku v čase na tomto schodišti (zdroj: vlastní, přepracováno, ve spolupráci s [19]) .	130

5.64	Situace na schodištvých koridorech v čase 5 min (300 s) – vyznačená místa schodišť (vlevo) a ukázka zahlceného schodiště, kde v 4. NP modrými diváky dochází k odříznutí oranžových ve vyšších podlažích (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19], přepracováno) . . . . .	130
5.65	Příklad kritického místa špatné návaznosti evakuačních cest – lávka (vlevo) a její aktuální zakončení s návrhem na změnu (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno) . . . . .	131
5.66	Příklad vzniku masivní kongesce při procesu evakuace v místě pod eskalátorem ve stanici metra (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [23, 11] přepracováno) . . . . .	131
5.67	Příklad časového vývoje vzniku masivní kongesce u převážně silně asymetrické varianty evakuace ve stanici metra (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11] přepracováno) . . . . .	132
5.68	Ukázka tvorby masivních kongescí na <i>Zemském fotbalovém stadionu</i> v místě dveří ústících na ochoz, snížení specifického průtoku dveří (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19] přepracováno) . . . . .	132
5.69	Příklad kritického místa geometrie, kde kónický tvar ÚC způsobuje při úniku po schodišti odříznutí části evakuovaných osob masou okolních osob (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [403] přepracováno) . . . . .	133
5.70	Příklad kritických míst, kde mohou být osoby vystaveny účinkům požáru – při původním návrhu účinnosti ZOKT 100 % (nahore) a optimalizované účinnosti ZOKT pro 150 % – <i>MKSP Aréna Brno</i> (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [19, 10] přepracováno) . . . . .	134
6.1	Příklad bezpečnostní analýzy evakuace nádraží – detekce kritických míst, rozbor celého průběhu evakuace (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20] přepracováno)	142
6.2	Ukázka 3D vizualizace evakuace osob ze stanice Pražského metra se vstupem zásahové jednotky HZS – celkový pohled na masu evakuujících se osob v prostoru pod eskalátorem (vlevo), příchod zásahové jednotky (ve středu) a pohled na masu evakuovaných z pohledu zasahujícího HZS (vpravo) (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11] přepracováno) . . . . .	143
C.1	Porovnání modelů – a) model typu zónový; b) model typu pole (zdroj: přepracováno dle [87]) . . . . .	164
C.2	Ukázka ztvárnění modelu požáru a toxicity – tunelový úsek metra (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11, 392] přepracováno). . . . .	164
E.1	Porovnání elips těla v porovnání se ztvárněním osoby v nástroji (zdroj: vlastní, upraveno a přepracováno z [172, 521]). . . . .	171
E.2	Přehled zón osobního prostoru člověka a jejich znázornění dle definice Edward T. Hall [206] (zdroj: vlastní, přepracováno dle [206, 579]) . . . . .	171
E.3	Schéma dodržování osobního prostoru a distancí od překážek (zdroj: vlastní, přepracováno dle [206, 579]) . . . . .	172
E.4	Genderové procentuální rozdělení mužů a žen na území ČR (zdroj: upraveno z [224]) . . . . .	173
E.5	Věkové rozložení obyvatelstva v České republice, dle dat ČSÚ z 31. 12. 2019 (zdroj: vlastní – vypracováno z dat dle [212]) . . . . .	173
E.6	Věkové rozložení standardní populace dle německé směrnice RIMEA (zdroj: přepracováno dle [465, 25] upraveno) . . . . .	174
E.7	Rychlost chůze v závislosti na věku a pohlaví dle Weidmana (zdroj: přepracováno z [562, 25]) . . . . .	175



E.8	Grafické srovnání rychlosti chůze po rovině v závislosti na věku dle Weidmana a ČSN (zobrazen rozptyl, max. a min., průměr) (zdroj: přepracováno z [562, 123] [25]) . . . . .	175
E.9	Grafické srovnání hodnot rychlosti chůze osob po schodech směrem nahoru a dolů dle Fruina a ČSN 73 0802 (zdroj: přepracováno z [173, 123, 25]) . . . . .	176
E.10	Příklad srovnání rychlostního normálního rozdělení v rámci jednotlivých věkových skupin – pro obsazenost modelu 1000 os. (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20] upraveno) . . . . .	177
E.11	Rychlost osob v závislosti na jejich hustotě dle SFPE (zdroj: převzato z [142] [235]) . . . . .	177
E.12	Příklad log-normálního rozdělení reakční doby – v případě vzniku mimořádné situace a samovolné reakce osob (vlevo) a v případě vzniku mimořádné události s bezprostředním vyhlášením evakuace (zdroj: přepracováno z [557] ve spolupráci s projektem <i>VI20162019034</i> ) . . . . .	179
E.13	Příklad nerovnoměrné obsazenosti modelu osobami v rámci studie řešící ochranu mekkých cílů, v rámci veřejného prostoru při konání maratónu (zdroj: vlastní ve spolupráci s projektem <i>VI20192022118</i> ) . . . . .	180
G.1	Schéma principu vztahů validace mezi realitou, numerickým modelem a AI metamodelem – proces zjednodušení a zrychlení (zdroj: vlastní) . . . . .	182
G.2	Schéma principu strojového učení (zdroj: upraveno a přepracováno z [259]). . . . .	183
G.3	Schéma principu detekce CNN specifických objektů ve snímané scéně (zdroj: převzato a upraveno z [259]) . . . . .	184
G.4	Příklad sběru dat – letecký snímek z videosekvence zachytávající dav, s následným anonymním přiřazením ID (zdroj: převzato ze spolupráce s RCE, Systems DFS) . . . . .	185
G.5	Příklady záběrů stereoskopického detekčního systému a rektifikovaného obrazu scény ze dvou kamer – vodorovné čáry kontrolních linií pro rektifikaci obrazu (vpravo) (zdroj: převzato a upraveno ze spolupráce s a [14]) . . . . .	186
G.6	Příklad záběru z monoskopického systému, kde detekce je prováděna přímo z obrazu (zdroj: převzato ze spolupráce s RCE, Systems a [14]) . . . . .	186
G.7	Ukázka extrakce dat z videozáznamu pomocí DFS – treckování osob dle ID a vykreslení jejich trajektorií (vlevo) a vyhodnocení kumulativního využití ploch v pozorovaném prostoru (vpravo) (zdroj: převzato ze spolupráce s RCE Systems [220]) . . . . .	187
G.8	Ukázka videosekvence provozu vakcinačního centra na BVV analyzované v reálném čase pomocí z FLOW RCE – ID – trajektorie na zkoumaném koridoru (vlevo), vytyčení zájmových oblastí a označení ID vstupujících osob (střed), georeferencing obrazu (vpravo) (zdroj: vlastní ve spolupráci s RCE Systems) . . . . .	187
G.9	Ukázka extrakce části základního setu dat z videozáznamu provozu vakcinačního centra na BVV, extrahovaného pomocí FLOW RCE – ID, kategorie objektu, trajektorie od-do, průměrná, min. a max. rychlost, doba výskytu a doba bez pohybu (zdroj: vlastní ve spolupráci s RCE Systems) . . . . .	188
G.10	Schéma vztahů mezi skutečností a virtuální realitou (zdroj: vlastní, přepracováno dle [331]) . . . . .	188
G.11	Schéma principu VR systém CAVE (vlevo), 3D multisenzorická laboratoř na univerzitě ve Würzburgu v Německu, systém CAVE (uprostřed), Screenshot simulace sociálních vlivu při evakuaci z tunelu realizované v systému CAVE (vpravo) (zdroj: převzato z [547, 380]) . . . . .	189

G.12 Schéma principu VR systém HMD (vlevo), příklad výcviku stevarda při simulaci požáru letadla (uprostřed), nácvik hašení požáru – figurant s headsetem vs. pohled do VR (vpravo) (zdroj: převzato z [543, 41, 541]) . . . . .	189
G.13 Příklad studie E. Ronchi et. al, testování osvětlení exitových portálů v tunelových stavbách (zdroj: převzato z [476]) . . . . .	190
G.14 Použití VR pro nácvik zdolávání požáru pro zaměstnance jako součást školení BOZP (zdroj: převzato z [436, 151]) . . . . .	191
G.15 Vyhodnocení dopadů výukových programů na znalosti účastníka (zdroj: vlastní, přepracováno dle [331]) . . . . .	191
G.16 Příklad výukového VR vytvořeného dle skutečné události – požár brazilského nočního klubu v roce 2013 – davové šílenství (vlevo) a ukázka ovládnutí simulace (uprostřed, vpravo) (zdroj: převzato z [357]) . . . . .	192
G.17 Ukázka nástrojů pro VR výcviku HZS – ergonomické vybavení (vlevo) a uživatelské rozhraní operátora simulace (uprostřed, vpravo) (zdroj: převzato z [317, 165]) . . . . .	192
G.18 Použití VR při výcviku složek IZS – simulace resuscitace zraněné osoby (vlevo) a ozbrojený zásah bezpečnostní jednotky při ohrožení útočníkem (zdroj: převzato z [263, 1]) . . . . .	193
G.19 Ukázka evakuace na koridorech ÚC ve VR prostředí (zdroj: vlastní, ze spolupráce s [19]) . . . . .	193
G.20 Příklady záběrů z výukových programů a virtuálních požárních cvičení (zdroj: převzato z [437]) . . . . .	193
G.21 Příklad prezentace výsledků modelu evakuace osob ze stadionu ve VR – z nástroje Pathfinder (zdroj: převzato z [548]) . . . . .	194
G.22 Příklad ztvárnění reálného prostředí pro účely VR simulace evakuace CERN – reálný prostor (vlevo) a VR prostor (vpravo) (zdroj: převzato z [35]) . . . . .	195
H.1 Schéma sestavování požární křivky návrhového požáru (zdroj: přepracováno z [395, 130]) . . . . .	197

# Seznam tabulek

4.1	Příklady prací uvádějících vhodné dílčí data sety pro validaci modelu (zdroj: [479]) . . . . .	71
5.1	Příklad výběru materiálů pro požární návrhové požáry konkrétních specifických staveb (zdroj: vlastní, jejich PTCH čerpán z [396]) . . . . .	82
5.2	Číselná vyjádření úrovně kvality pěší dopravy pro různé typy komunikace dle Fruina (zdroj: přepracováno z [173]) . . . . .	90
5.3	Limitní hodnoty pro toxické produkty hoření při stanovování RSET (zdroj: [446, 272, 377]) . . . . .	92
5.4	Kritické hodnoty dávek CO a doby expozice touto koncentrací, následné dopady na evakuované osoby (zdroj: [446, 272, 377]) . . . . .	93
5.5	Kritické hodnoty dávek HCN a doby expozice těmito koncentracím – následné dopady na evakuované osoby (zdroj: přepracováno z [446, 272, 377]) . . . . .	94
5.6	Kritické hodnoty teplot a dob expozice těmito teplotami, následné dopady na evakuované osoby (je-li vzduch nasycený vodní párou, např. z hašení požáru, je limitní již teplota 60 °C) (zdroj: přepracováno z [149]) . . . . .	95
5.7	Předpokládaná doba evakuace výpočtem dle [123] (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20]) . . . . .	115
5.8	Doba evakuace simulovaná pro modelované varianty (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [20]) . . . . .	115
5.9	Srovnání výsledných časů evakuace při posouzení stavby se specifickou geometrií při užití modelů chování Steering a SFPE, kde dochází při silně asymetrické variantě s dvojnásobnou obsazeností k rozdílu výsledných hodnot modelů o více jak 40 % (zdroj: vlastní, ve spolupráci s [11]) . . . . .	116
5.10	Souhrnný přehled srovnání normového ČSN přístupu a užití numerického modelu v rámci uvedených vzorových parametrických studií z kap. 5.2.1 (zdroj: vlastní) . . . . .	118
5.11	Škála hodnocení vlivu parametrů na evakuační proces (zdroj: vlastní) . . . . .	121
5.12	Škála hodnocení vlivu parametrů na evakuační proces (zdroj: vlastní) . . . . .	121
5.13	Srovnání výsledků simulace studie evakuace z vozu metra s daty zahraničního experimentu (zdroj: vlastní z [391] a čerpáno z [170]) . . . . .	135
E.1	Rozměry lidského těla v evropských zemích s ohledem na pohlaví a původ jedince (zdroj: přepracováno z [521]) . . . . .	170
E.2	Porovnání elips těla dle uznávaných standardů (zdroj: [172, 521, 421]) . . . . .	171
E.3	Distance od překážek a ostatních lidí při evakuaci, dle defaultního nastavení (zdroj: z [406]) . . . . .	172
E.4	Hodnoty distančních šířek využívané při výpočtu průtoků osob (zdroj: z [440])	172
E.5	Rychlosti osob dle ČSN 73 0802 (zdroj: z [123]) . . . . .	174

E.6	Podrobné rozdělení rychlosti chůze v závislosti na věku dle Weidmana (zdroj: přepracováno z [562]) . . . . .	175
E.7	Rychlost po schodech dle Fruina v závislosti na sklonu (sklon 27° – výška nášlapu: 0,178 m, hloubka nášlapu: 0,286 m; sklon 32° – výška nášlapu: 0,152 m, hloubka nášlapu: 0,305 m) (zdroj: z [173]) . . . . .	176
E.8	Rychlosti pohybu osob s tělesným hendikepem (zdroj: přepracováno z [440]) .	178
F.1	Srovnání analytického a numerického přístupu posouzení evakuace osob (zdroj: vlastní) . . . . .	181
G.1	Srovnání metod sběru dat pro kalibraci a validaci evakuačních modelů – jejich výhody, nevýhody a efektivnost (zdroj: přepracováno z [341]) . . . . .	194

## O autorce

Petra Okřinová se narodila 7. dubna 1990 v Brně. Vystudovala na naší alma mater – Vysokém učení technickém v Brně, na Fakultě stavební obor Pozemní stavby, úspěšně obhájila jak bakalářskou práci s názvem *Rodinný dům pro singles*, tak i diplomovou práci s názvem *Bezbariérový bytový dům s rehabilitačním centrem*, která získala ocenění děkana a ocenění ČKAIT. Následně v roce 2015 nastoupila do doktorského studia oboru Konstrukce a dopravní stavby na Fakultě stavební vysokého učení technického v Brně. V roce 2017 byla za svoji dosavadní vědeckou práci oceněna Cenou Josefa Hlávky a medailí *Signum Prosperitatis*. V roce 2018 úspěšně vykonala Státní doktorskou zkoušku (doktorské teze na téma *Studie pohybu osob s využitím moderních simulačních nástrojů*).

V současnosti působí na Ústavu automatizace inženýrských úloh a informatiky (AIU) jako asistent. Po odborné stránce se specializuje zejména na numerické modelování dynamiky davu, zejména pak modelování krizových situací – evakuace a šíření požáru v uzavřených objektech. Dále pak tato témata doplňuje o specializace zabývající se požárně bezpečnostním řešením staveb a bezbariérovostí.

Pod jejím vedením bylo obhájeno šest bakalářských prací, dvě diplomové práce a je autorkou nebo spoluautorkou dvaceti pěti odborných publikací. Od roku 2015 aktivně spolupracuje v roli řešitele, spoluřešitele nebo člena vědeckého týmu na více než čtrnácti výzkumných projektech od různých poskytovatelů.