

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



**Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb**

**Diplomová práce**

**EVAKUACE OSOB Z PROSTORŮ S ŘADAMI SEDADEL**

EVACUATION IN NARROW SEAT AISLES

Bc. Klára Velechová

Vedoucí práce: Ing. Hana Najmanová, Ph.D.

2024

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Velechová** Jméno: **Klára** Osobní číslo: **477178**  
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra konstrukcí pozemních staveb**  
Studijní program: **Integrální bezpečnost staveb**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Evakuace osob z prostorů s řadami sedadel**

Název diplomové práce anglicky:

**Evacuation in narrow seat aisles**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s aktuálním stavem poznání a terminologií problematiky evakuace osob se zaměřením na evakuaci osob z prostorů s řadami sedadel (zejména posluchárny, dopravní prostředky, případně jiné shromažďovací prostory). Provedte literární rešerši uskutečněných experimentálních a simulačních studií zabývajících se evakuací z těchto prostor včetně shrnutí legislativních požadavků pro tuto problematiku v ČR. Na základě teoretických znalostí uskutečňte a vyhodnoťte řízený evakuační experiment v prostoru přednáškové místnosti. Pomocí získaných experimentálních dat validujte matematický model vytvořený v softwaru Pathfinder. S využitím matematického modelu vyhodnoťte podmínky evakuace v případové studii zvoleného prostoru přednáškové místnosti.

Seznam doporučené literatury:

C. Delcea and L.-A. Cotfas, "Increasing awareness in classroom evacuation situations using agent-based modeling," Phys. Stat. Mech. Its Appl., vol. 523, pp. 1400–1418, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.physa.2019.04.137.  
C. Delcea, L.-A. Cotfas, and R. Paun, "Agent-Based Optimization of the Emergency Exits and Desks Placement in Classrooms," in Computational Collective Intelligence, 2018, pp. 340–348. doi: 10.1007/978-3-319-98443-8\_31.  
S. Huang, S. Lu, S. Lo, C. Li, and Y. Guo, "Experimental study on occupant evacuation in narrow seat aisle," Phys. Stat. Mech. Its Appl., vol. 502, pp. 506–517, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.physa.2018.02.032.  
S. Huang, T. Zhang, S. Lo, S. Lu, and C. Li, "Experimental study of individual and single-file pedestrian movement in narrow seat aisle," Phys. Stat. Mech. Its Appl., vol. 509, pp. 1023–1033, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.physa.2018.06.079.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Hana Najmanová, Ph.D. katedra konstrukcí pozemních staveb FSv**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.09.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **8.1.2024**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Hana Najmanová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Petr Hájek, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

**17.9.2023**

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem pracovala na této diplomové práci samostatně s využitím uvedené literatury a pramenů. Dále deklaruji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla v souladu s § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících a právem autorským, a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 5.1.2024

.....

Bc. Klára Velechová

## Poděkování

Ráda bych vyjádřila upřímné díky Ing. Haně Najmanové, Ph.D., vedoucí této diplomové práce, za její odborné vedení, konstruktivní připomínky, vstřícný přístup a nápomoc při realizaci a organizaci evakuačního experimentu.

Velice děkuji doc. Ing. Pavlu Hrabákovi, Ph.D., a Bc. Vítu Pospíšilovi, kteří působí na Fakultě informačních technologií ČVUT v Praze, za jejich významný přínos při organizaci evakuačního experimentu a následné analýze výsledků. Podrobnější analýza této studie bude uvedena v diplomové práci, jejímž autorem je Bc. Vít Pospíšil. Velké díky také směřuji k Ing. Jakubu Novákovi a Bc. Aleksandru Bazkovi z Laboratoře zpracování obrazu (ImproLab) Fakulty informačních technologií ČVUT v Praze za technickou podporu během celého experimentu a za zpracování dat k následnému vyhodnocení. Za zpracování dat z doplňkových měření děkuji Ing. Danielu Vašatovi, Ph.D., rovněž působícímu na Fakultě informačních technologií ČVUT v Praze. Velké díky si také zaslouží Ing. Juraj Kmec, který mi poskytl cenné informace a podporu při modelování v programu Pathfinder.

Nakonec bych chtěla vyjádřit vděk všem dobrovolníkům, kteří se účastnili evakuačního experimentu, a to jak v roli účastníků, tak členů organizačního týmu, za jejich neocenitelnou pomoc při plynulém průběhu evakuačního cvičení. Zvláštní poděkování směřuji k mé rodině, především rodičům a bratrům, za jejich nepřetržitou podporu po celou dobu mého studia.



## Obsah

<b>Obsah</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abstrakt</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XV</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratek</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>19</b>
1.1 Motivace .....	19
1.2 Cíle práce.....	19
1.3 Struktura práce.....	20
<b>2 Současný stav poznání</b> .....	<b>21</b>
2.1 Vysvětlení základních pojmů .....	21
2.2 Dosavadní výzkumy evakuace osob z prostorů s řadami sedadel .....	22
2.2.1 Experimentální výzkumy v budovách .....	23
2.2.2 Simulační studie .....	26
2.2.3 Dopravní prostředky .....	28
2.2.4 Souhrn.....	35
2.3 Legislativní požadavky v České republice.....	35
<b>3 Experiment evakuace osob z prostorů s řadami sedadel</b> .....	<b>37</b>
3.1 Cíle experimentu.....	37
3.2 Popis experimentu .....	37
3.2.1 Popis hlavního evakuačního cvičení .....	37
3.2.2 Popis doplňkových měření.....	38
3.3 Účastníci experimentu.....	38
3.3.1 Výběr účastníků.....	38
3.3.2 Rozdělení účastníků do skupin.....	39
3.3.3 Informace o účastnících.....	40
3.4 Experimentální plán .....	40
3.4.1 Technické vybavení.....	40
3.4.2 Průběh hlavního experimentu.....	41
3.4.3 Průběh doplňujících měření .....	43
3.5 Příprava experimentu.....	44
3.5.1 Etické schválení, GDPR a ochrana osobních údajů.....	44
3.5.2 Nábor účastníků .....	44
3.5.3 Výroba identifikátorů.....	44
3.5.4 Příprava přednáškové místnosti .....	45
3.5.5 Příprava koridoru pro měření běžné rychlosti osob.....	45
3.6 Nežádoucí vlivy ovlivňující výsledky experimentu .....	46
3.6.1 Nepříznivě umístěné kamery.....	46
3.6.2 Vliv učení .....	47

3.6.3	Vliv únavy a časová náročnost experimentu .....	47
3.6.4	Motivace účastníků.....	47
3.7	Sledované parametry a způsob vyhodnocení .....	48
3.7.1	Celková doba evakuace (TET) .....	48
3.7.2	Chování osob v průběhu experimentu .....	48
3.7.3	Tok osob.....	48
3.7.4	Doplňková měření .....	48
3.8	Výsledky experimentu.....	49
3.8.1	Celková doba evakuace (TET) .....	49
3.8.2	Chování osob v průběhu experimentu .....	53
3.8.3	Průměrný tok osob.....	56
3.8.4	Doplňková měření .....	58
3.9	Shrnutí.....	59
<b>4</b>	<b>Modelování v programu Pathfinder.....</b>	<b>61</b>
4.1	Základní informace o evakuačním programu Pathfinder .....	61
4.2	Vstupní data.....	61
4.2.1	Geometrie modelovaného prostoru .....	61
4.2.2	Charakteristika agentů .....	62
4.2.3	Modelové evakuační scénáře .....	62
4.3	Porovnání experimentálních a modelových výsledků .....	62
4.3.1	Validace základního modelu.....	63
4.3.2	Validace upraveného modelu.....	66
4.4	Případová studie .....	71
4.4.1	Základní model.....	72
4.4.2	Upravený model .....	74
<b>5</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>78</b>
5.1	Závěry vyplývající z experimentu .....	78
5.2	Závěry vyplývající ze simulační studie .....	79
5.3	Budoucí výzkum.....	79
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>80</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>82</b>
	<b>Seznam obrázků z příloh.....</b>	<b>82</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>85</b>
	<b>Příloha 1 – Rozsazení účastníků.....</b>	<b>87</b>
	<b>Příloha 2 – Ukázka náborového plakátu .....</b>	<b>92</b>
	<b>Příloha 3 – Grafy celkové doby evakuace jednotlivých běhů.....</b>	<b>93</b>
	<b>Příloha 4 – Schématické zobrazení formací .....</b>	<b>98</b>
	<b>Příloha 5 – Směr výstupu z prostoru uliček .....</b>	<b>99</b>
	<b>Příloha 6 – Trasy pohybu .....</b>	<b>101</b>
	<b>Příloha 7 – Toky osob v čase jednotlivých běhů (hodnocené ve východu) .....</b>	<b>102</b>

---

<b>Příloha 8 - Tabulka šířky ramen a běžné rychlosti účastníků .....</b>	<b>107</b>
<b>Příloha 9 - Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků celkové doby evakuace jednotlivých běhů (validace základního modelu).....</b>	<b>109</b>
<b>Příloha 10 - Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků toků osob v čase jednotlivých běhů (validace základního modelu).....</b>	<b>114</b>
<b>Příloha 11 - Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků celkové doby evakuace jednotlivých běhů (validace upraveného modelu).....</b>	<b>119</b>
<b>Příloha 12 - Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků toků osob v čase jednotlivých běhů (validace upraveného modelu).....</b>	<b>124</b>

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá analýzou evakuace osob z prostorů s řadami sedadel. V teoretické části je zvláštní důraz kladen na současný stav poznání a literární rešerši dostupné literatury zaměřené na tuto problematiku. Jsou zde uvedeny definice evakuace a základních pojmů souvisejících s evakuací. V této části jsou také prezentovány vybrané vědecké studie a legislativní požadavky aplikované v České republice. Praktická část se věnuje přípravě, realizaci a vyhodnocení evakuačního experimentu. Experiment je proveden s cílem získat nové poznatky a experimentální data v oblasti dynamiky a evakuace osob v omezených prostorech s uspořádanými řadami sedadel. Hlavními sledovanými parametry jsou celkové doby evakuace, toky osob, volby únikových tras a chování osob při různém rozsazení účastníků s odlišnými pohybovými schopnostmi a evakuačními strategiemi. Důležitým aspektem této práce je také využití experimentálních dat v matematickém modelování evakuace z prostor s řadami sedadel. Získaná experimentální data jsou použita pro validaci evakuačního modelu Pathfinder. Využití zvoleného modelu pro modelování evakuace osob z prostor s řadami sedadel je dále zhodnocen v případové studii, která analyzuje vliv umístění východu na průběh simulace.

### **Klíčová slova**

Požár; požární bezpečnost; evakuace; sedadla; únik osob; experiment; řada sedadel; chodec; místa k sezení.

## **Abstract**

This diploma thesis focuses on the analysis of evacuation from spaces with rows of seats. The theoretical part emphasizes the current state-of-the-art and presents a comprehensive review of the existing literature related to this subject. It provides definitions of evacuation and basic concepts associated with this process, along with relevant research studies and legislative requirements applied in the Czech Republic. The practical part involves the preparation, execution, and evaluation of an evacuation experiment. The experiment aims at acquiring new insights and experimental data on the dynamics and evacuation of individuals in cramped spaces with rows of seats. The main parameters observed include overall evacuation times, flows of persons, escape route choices, and movement behaviour of individuals with varying seating positions, mobility capabilities, and evacuation strategies. Another important aspect of this thesis is the employment of experimental data in mathematical modelling of evacuation from spaces with rows of seats. The experimental data obtained are used to validate the Pathfinder evacuation model. The application of the selected model for simulating evacuation from cramped spaces with rows of seats is further evaluated in a case study that analyses the impact of exit placement on the simulation results.

## **Keywords**

Fire; fire safety; evacuation; seat; escape of persons; experiment; seat aisle; pedestrian; seated space.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

### Latinské symboly

$D$	os/m <sup>2</sup>	Hustota osob
$v$	m/s	Rychlost pohybu osob
$Q$	os/s/m	Propustnost osob
$q$	m/s	Intenzita pohybu
$t$	s	Čas
$l$	m	Délka
$a$	-	Součinitel požárního úseku

### Zkratky

PIP	Požárně inženýrský přístup
ASET	Doba dostupná pro evakuaci [Available Safe Egress]
RSET	Doba potřebná pro evakuaci [Required Safe Egress Time]
ImproLab	Laboratoř zpracování obrazu
SFPE	[Society of Fire Protection Engineers]
SHZ	Stabilní hasicí zařízení
SDZ	Sprinklerová doplňková zařízení
FSv ČVUT v Praze	Fakulta stavební ČVUT v Praze
FIT ČVUT v Praze	Fakulta informačních technologií ČVUT v Praze

# 1 Úvod

## 1.1 Motivace

Motivace pro tuto diplomovou práci vychází z průběhu celého mého studia, kdy jsem postupem získala povědomí o důležitosti problematiky při ochraně života, zdraví a majetku, a to zejména v požární ochraně. Požáry mohou způsobit velké škody na majetku a ohrozit životy osob, které se v dané budově nacházejí. Správná požární ochrana a prevence může minimalizovat rizika požáru a snížit následné škody. Proto je nutné této problematice věnovat dostatečnou pozornost a při návrhu budov postupovat dle platného zákona, který je v České republice vydán.

Samotný zákon č. 133/1985 Sb. [1], o požární ochraně, obsahuje obecná ustanovení týkající se požární ochrany a bezpečnosti, ale neobsahuje přesné technické normy a podrobné postupy pro návrh požární bezpečnosti budov. Konkrétní technické postupy jsou obsaženy v normativních řadách ČSN 73 08xx, které jsou tedy nástrojem, jak konkrétně aplikovat zákonné požadavky na navrhování požární bezpečnosti budov. Dalším způsobem, jakým se v České republice navrhuje budovy z hlediska požární bezpečnosti, je použití tzv. „požárně inženýrského přístupu“ dle § 99 tohoto zákona [1], který umožňuje, aby navrhování požární bezpečnosti budov probíhalo i na základě jiných než normativních dokumentů. Tato metoda je ale používána méně často a při použití této metody musí být prokázáno, že návrhy budov byly provedeny v souladu s požadavky stanovenými v zákoně. Oba tyto způsoby jsou v České republice používány a mají za cíl zajistit, aby budovy byly co nejvíce odolné vůči požáru a aby bylo možné v případě nouze bezpečně a efektivně evakuovat osoby z budovy.

Správnost návrhu budovy z hlediska požární ochrany lze ověřit pomocí různých metod a nástrojů. Jedním z těchto nástrojů jsou například počítačové simulace, díky kterým lze vytvořit 3D modely budov a simulovat scénáře požáru a evakuace osob. Tyto programy umožňují otestovat různé návrhy a optimalizovat požární ochranu budov. Dalším způsobem ověření návrhu jsou fyzické experimenty, které mohou poskytnout užitečné informace o chování budov v případě požáru a o účinnosti různých požárních ochranných opatření. Během experimentů se testují různé aspekty evakuace, jako jsou rychlost evakuace, optimalizace evakuačních tras, umístění nouzových východů, použití varovných systémů a komunikace s osobami v nouzi. Cílem je identifikovat slabá místa a možná rizika v procesu evakuace a navrhnout zlepšení, která zvýší rychlost, efektivitu a bezpečnost evakuace osob.

## 1.2 Cíle práce

Evakuace z úzkých uliček může být velmi složitá, protože prostor je omezený a může bránit pohybu osob. Pokud se v uličce nachází velké množství osob, může být situace ještě složitější. Předmětem této práce je získání nových poznatků a experimentálních dat v oblasti dynamiky a evakuace osob v limitovaných prostorech s řadami sedadel. Pro získání takových poznatků je nejprve využita literární rešerše dostupné literatury, ve které je hlavní pozornost věnována studiu již uskutečněných experimentů zaměřených na evakuaci osob z prostor s řadami sedadel.

Hlavním cílem výzkumu je pak uskutečnění a vyhodnocení řízeného pohybového (evakuačního) experimentu, v rámci kterého se participující účastníci při různém rozsazení evakuují z prostoru posluchárny. Během experimentu jsou vyhodnoceny parametry, jimiž jsou:

- vliv vstupních podmínek na celkovou dobu evakuace (rozsazení osob do sektorů, šířka vstupních dveří);
- průběh opouštění řad sedadel;
- použité trajektorie osob pro opuštění sledovaného prostoru;
- chování osob při evakuačním experimentu;
- půdorysný průmět osob;
- běžná rychlost osob.

Navazujícím cílem je srovnání získaných dat z experimentu s výsledky simulací uskutečněných v evakuačním modelu Pathfinder. Díky provedené validaci je možné využít počítačový program k analýze východů, v rámci rozšiřující případové studie.

### 1.3 Struktura práce

Úvodní část teoretické části diplomové práce představuje základní pojmy spojené s evakuací osob v obecné rovině. Následující kapitola této sekce je zaměřena na specifika evakuace osob z prostorů s řadami sedadel. Jsou zde představeny předešlé experimentální výzkumy provedené v budovách a simulační studie a experimentální analýzy v kontextu dopravních prostředků. Závěr této teoretické části obsahuje také přehled českých legislativních požadavků týkajících se návrhu prostorů s řadami sedadel.

Praktická část se zaměřuje na podrobný popis provedeného experimentu, kde byly osoby evakuovány z prostoru s řadami sedadel. Tato sekce popisuje proces výběru účastníků, technické zabezpečení pro sběr dat, přípravu prostorů pro průběh experimentu a identifikaci možných negativních vlivů. Následuje analýza experimentálních dat zahrnující celkovou dobu evakuace, průměrné toky osob, toky osob v čase, trajektorie a chování jednotlivců. Závěrečná část práce hodnotí srovnání vybraných experimentálních dat s výsledky matematických modelů a rozšiřuje zkoumanou oblast o další případovou studii simulovanou v evakuačním modelu Pathfinder.



## 2 Současný stav poznání

V této části jsou prezentovány informace týkající se současného stavu poznání v oblasti evakuace osob, zejména se zaměřením na pohyb osob v prostorách s řadami sedadel. Dále jsou v této části popsány vybrané vědecké studie, které se této problematice věnují a také legislativní požadavky využívané v České republice.

### 2.1 Vysvětlení základních pojmů

#### Evakuace

Pojmem evakuace se rozumí organizované a plánované opuštění prostoru z důvodu mimořádné situace. Evakuace může být dočasná nebo trvalá a může se týkat jednotlivců, skupin nebo celých komunit. Cílem evakuace je minimalizovat riziko ztrát na životech a majetku a zajistit bezpečí lidí v ohrožené oblasti.

#### Rychlost osob

Rychlost osob  $v$  se uvádí v jednotkách metry za sekundu [m/s]. Rychlost osob při evakuaci je ovlivněna mnoha faktory, jako je například věk, fyzická kondice, geometrie prostoru a místo, kde se rychlost měří (rovná plocha, schodiště nebo úzký průchod). Rychlost osob není konstantní a závisí na hustotě osob v daném prostoru. Čím více osob se nachází na dané ploše, tím nižší je pravděpodobnost rychlého pohybu, a proto rychlost osob je funkcí hustoty osob.

#### Hustota osob

Hustota osob [2] je veličina  $D$ , která představuje míru obsazenosti prostoru lidmi a je definována jako počet osob na jednotku plochy [os/m<sup>2</sup>]. V kontextu evakuace je hustota osob důležitým faktorem, který ovlivňuje rychlost evakuace a bezpečnost osob. V hojně obsazených prostorách, kde osoby nejsou rovnoměrně rozptýleny, může hustota osob nejvíce narůst právě v zúžených bodech únikových cest, což může vést k potenciálním bezpečnostním rizikům.

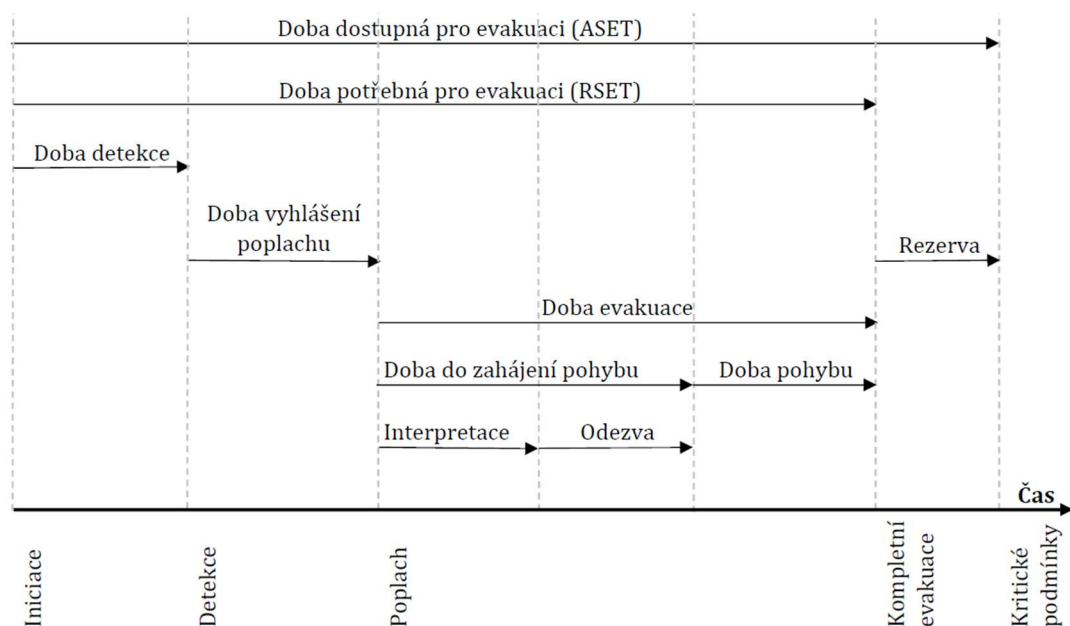
#### Tok proudu osob

Tok proudu osob [2], či propustnost  $Q$  [os/s/m] a též "intenzita pohybu  $q$ " [m/s], představuje ukazatel vyjadřující počet osob, které projdou určitým bodem za jednotku času. Tento parametr je ovlivněn hustotou osob - při nižší hustotě probíhá evakuace plynule, ale jakmile se začne v kritickém bodě hromadit více osob, hustota stoupá a propustnost se snižuje.

#### Doba evakuace

Evakuace musí být provedena co nejrychleji a bezpečně, aby se minimalizovala možná ztráta na životech a majetku. Ochrana se považuje za dostatečnou za předpokladu, že doba dostupná pro evakuaci (Available Safe Egress Time – ASET) je delší než doba potřebná pro evakuaci (Required Safe Egress Time – RSET) [2]. Časová osa evakuace, ukazující faktory doby dostupné a potřebné pro evakuaci, je znázorněna na Obr. 1.

Celková doba evakuace zahrnuje čas potřebný k detekci požáru, aktivaci požárního poplachu, informování všech osob o situaci a spuštění evakuačních postupů. Dále zahrnuje čas na vedení lidí k nejbližším východům, průchod únikovými cestami a konečný odchod z objektu do bezpečí.



Obr. 1 Časová osa evakuace [2]

- Doba dostupná pro evakuaci (ASET) vyjadřuje čas, kdy je umožněn bezpečný pohyb osob, než budou překročeny určité hranice (např. kolaps konstrukcí) a tzv. kritéria přijatelnosti (schopnost osob odolat vystavení účinkům požáru a zplodin hoření, tepelným účinkům, špatné viditelnosti a toxicitě kouře).
- Doba potřebná pro evakuaci (RSET) je časový interval nutný pro přesun všech osob na bezpečné místo. Nejčastějším místem trvalého bezpečí je volné prostranství.

Pokud je doba potřebná pro evakuaci (RSET) delší než doba dostupná pro evakuaci (ASET), může to vést k situaci, kdy někteří lidé nebudou mít dostatek času na únik z ohrožené oblasti.

### Trajektorie

Trajektorie pohybu osob v oblasti požární bezpečnosti se obvykle odkazuje na směr a rychlost pohybu osob během evakuace z ohrožené oblasti. Tyto trajektorie jsou důležité pro plánování evakuace a návrh požárních bezpečnostních opatření [3]. Při plánování evakuace je důležité zvážit různé faktory, které mohou ovlivnit trajektorii osob, jako jsou tvar a velikost místnosti, umístění východů, překážky v cestě úniku, počet a zdravotní stav evakuovaných osob atd. Je také důležité zohlednit různé typy osob, jako jsou dospělí, děti, osoby s omezenou schopností pohybu, nebo senioři, a jejich specifické potřeby během evakuace. Pro určení trajektorie osob během evakuace se používají různé metody, včetně počítačových simulací, fyzických modelů a pozorování skutečných evakuací. Tyto metody umožňují vytvořit bezpečné plány evakuace a optimalizovat návrh budov a zařízení pro maximální požární bezpečnost.

## **2.2 Dosavadní výzkumy evakuace osob z prostorů s řadami sedadel**

Tato kapitola se soustředí na rešerši již provedených experimentů, výzkumů a studií v oblasti evakuace prostorů s řadami sedadel. V jednotlivých podkapitolách jsou rozděleny experimentální a simulační studie v budovách, zvláštní kapitola je věnována vědeckým studiím zabývajících se řešenou problematikou v dopravních prostředcích.

## 2.2.1 Experimentální výzkumy v budovách

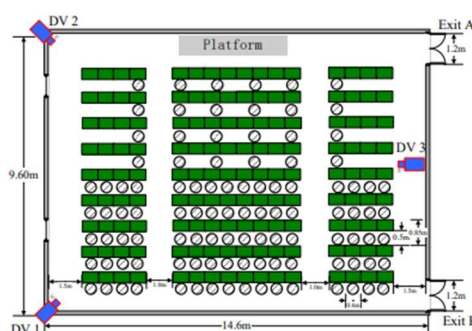
Experimentální výzkumy jsou užitečným nástrojem pro zlepšení a optimalizaci evakuačních postupů, pochopení lidského chování v případě požáru a identifikaci efektivních opatření pro zvýšení bezpečnosti.

### 2.2.1.1 Experimentální studie o volbě chování chodců během evakuace posluchárny v budově

Evakuační experiment proběhl v roce 2016 ve spolupráci dvou univerzit v Číně, a to konkrétně University of Science and Technology of China a Hefei University of Technology [4]. Vědci prozkoumali typické chování chodců při evakuaci posluchárny a navazujících částí budovy v sérii experimentů s účastí univerzitních studentů (dále je pozornost věnována zejména evakuaci posluchárny).

#### Experimentální nastavení

Posluchárna, ve které proběhl experiment, disponovala 144 sedadly rozdělenými do 9 řad po 16 místech k sezení a dvěma východy označenými „Exit A“ a „Exit B“ o stejné šířce 1,2 m. Sedadla byla příčně rozdělena čtyřmi průchody vedoucími na podélné koridory a dále k východům, jak zobrazuje Obr. 2. Experimenty zahrnovaly 102 studentů (87 mužů a 15 žen) ve věku od 18 do 24 let. Bylo provedeno 8 experimentálních běhů, v rámci kterých se měnily následující proměnné: rovnoměrné a nerovnoměrné rozsazení osob v posluchárně, aktivace alarmu a dostupnost navazujících schodišť. V prvních pěti bězích byli účastníci usazeni nerovnoměrně, přičemž v zadní části třídy bylo výrazně více osob než v přední části. Všichni studenti se měli evakuovat jako samostatní jedinci. Při dalších třech bězích byli studenti rozloženi téměř rovnoměrně, bez výrazného nerovnoměrného rozložení mezi přední a zadní částí třídy. V těchto posledních třech experimentech bylo vybráno několik jedinců, kteří měli za úkol tvořit konkrétní skupiny a sejít se na určitém místě. Každý účastník měl při každém experimentu jinou výchozí pozici. Účastníkům bylo řečeno, aby se při experimentu pohybovali co nejrychleji.

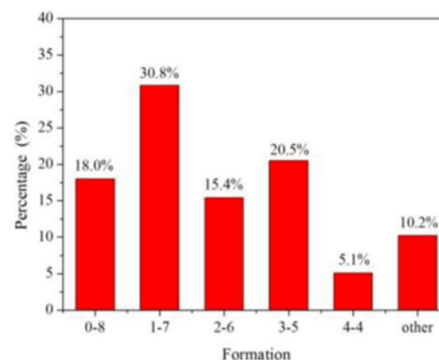
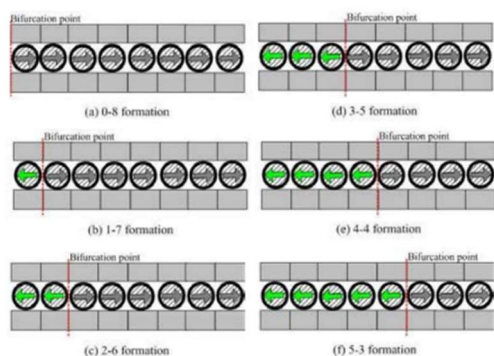


Obr. 2 Schématické znázornění posluchárny včetně rozmístění tří kamer, které experiment zaznamenávaly z výšky 2,0 m nad zemí [4]

#### Závěry studie

Chování účastníků při výstupu z řad sedadel bylo zkoumáno v prostředním sektoru osmi sedadel v každé řadě odděleného příčnými uličkami. Na začátku evakuace museli účastníci nejprve zvolit směr, jakým opustili řadu sedadel. Jejich volba byla v zásadě omezena směrem pohybu dvou sousedních osob, neboť pokud se levý i pravý soused pohybovali jedním směrem, musel jedinec zvolit stejný směr. Chodci se vzájemně koordinovali a spolupracovali, aby se úspěšně dostali pryč ze svých sedadel tím, že upravovali směr pohybu, aby vyhovoval okolním chodcům. Obr. 3 zobrazuje formace, kterými mohli účastníci opustit řadu sedadel. Ideální situací je, aby bod

bifurkace tvořil symetrickou formaci (formace 4-4). Avšak výzkumníci zjistili, že poloha bodu rozvětvení byla více posunuta na stranu dále od východů z místnosti, což mohlo být ovlivněno dvěma faktory: informací o cíli a prostředím pohybu (včetně vzdálenosti a obtížnosti pohybu). U jedinců blíže k uličce s východem z učebny znamenal výběr levého směru zátěžovou okliku, zatímco pravého směru znamenal náročnost pohybu mezi dvěma řadami sedadel. Údaje z Obr. 4 naznačují, že zúčastnění studenti preferovali náročnější pohyb mezi sedadly zátěž před přesunem oklikou.



Obr. 3 Schématické zobrazení formací, kterými mohly osoby opustit řadu sedadel [4]

Obr. 4 Frekvence pozorovaných formací při výstupu z řad sedadel [4]

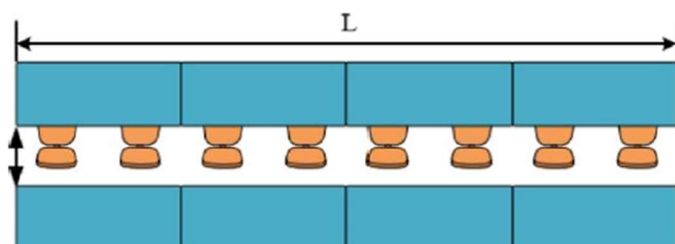
Pod výzkumníky z univerzit University of Science and Technology of China a Hefei University of Technology také vznikla přidružená práce Studie o evakuaci osob z místnosti s více překážkami [5], jež je součástí nastudovaných zdrojů literatury.

### 2.2.1.2 Hodnocení evakuace chodců v úzkých prostorách pro sezení

Evakuační experiment proběhl v roce 2022 ve spolupráci dvou univerzit v Číně, a to konkrétně University of Science and Technology of China a Hefei University of Technology [6]. Cílem tohoto experimentu bylo prozkoumání vlivu šířky uličky a uspořádání sedadel na dynamiku pohybu jednotlivců a skupin osob v úzkém prostoru pro sezení.

#### Experimentální nastavení

Experiment byl rozdělen na 2 části. V první části byl zkoumán pohyb a rychlost jednotlivců při různé konfiguraci židlí v experimentální uličce (Obr. 7), ve druhé části byl sledován skupinový experiment, kdy byla obsazena všechna místa v experimentální uličce. Prostor k experimentu byl proveden pomocí dvou řad stolů o celkové délce 7,2 m (Obr. 5), mezi které byly umístěny pohyblivé židle o ploše 0,44 m x 0,4 m (Obr. 6). Šířka experimentální uličky byla měněna dle šesti hodnot po intervalu 0,1 m (0,35 m – 0,85 m). Výstup z uličky byl předem určen z pravé strany, tudíž účastníci procházeli uličkou zleva doprava.

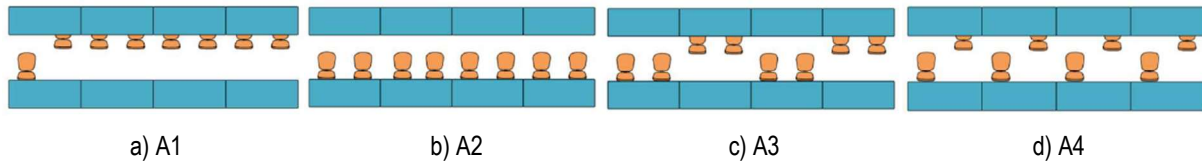


Obr. 5 Schématické uspořádání experimentální uličky [6]



Obr. 6 Schéma pohyblivé židle [6]

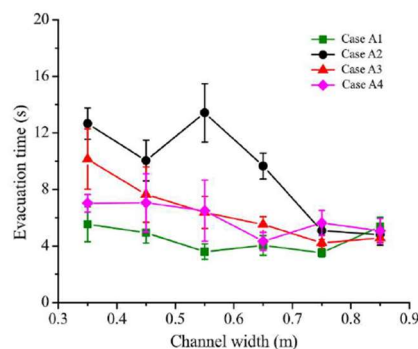
Pro účely této literární rešerše budou popsány pouze výsledky rozmístění židlí dle scénáře A2, který znázorňuje Obr. 7. Při první sadě experimentů byla sledována individuální evakuace jedince. Tento chodec byl usazen na nejvzdálenějším místě od výstupu, což znamená na levé židli s číslem 8. Skupinový experiment proběhl ve třech bězích, při kterém unikalo pokaždé osm různých osob. Účastníci byli požádáni, aby po pokynu ke vstání z místa přistrčili židle k zadnímu stolu tak, aby v přední části vznikl prostor pro opuštění uličky. Také byli poučeni, že se z uličky nemohou dostat přeazením stolů a že se v řadě nesmějí předbíhat.



Obr. 7 Scénáře rozmístění židlí v první části experimentu zaměřené na pohyb jednotlivců [6]

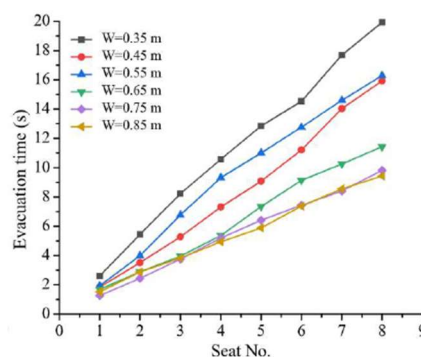
### Závěry studie

Na Obr. 8 nás zajímá individuální doba výstupu především u rozmístění sedaček A2, který je na grafu znázorněn černou barvou. Z grafu je patrné, že se zvyšující se šířkou uličky doba výstupu klesá. Vliv rozmístění sedadel má velký vliv, jestliže je ulička menší než 0,7 m. V této šířce má sledované rozvržení A2 nejdelší dobu výstupu. Když je ulička širší než 0,7 m, různé rozmístění sedadel nehraje velkou roli.



Obr. 8 Graf individuální doby výstupu při různých šířkách uličky a uspořádání sedadel [6]

Obr. 9 ukazuje, že čas potřebný k individuální evakuaci při skupinovém experimentu se zvyšuje přibližně lineárně s rostoucí vzdáleností od evakuačního východu. S rostoucí evakuační vzdáleností se zvyšuje i čas, který jednotlivci potřebují k evakuaci.



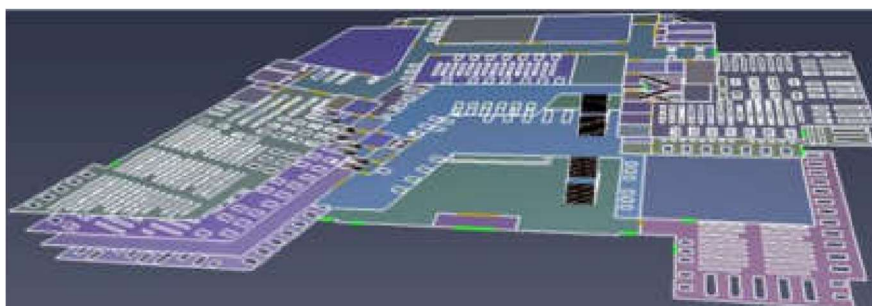
Obr. 9 Graf individuální doby výstupu při skupinovém experimentu [6]

## 2.2.2 Simulační studie

Simulační studie je výzkumná metoda, která využívá počítačové simulace a modelování k analýze a hodnocení různých aspektů souvisejících s požární bezpečností budov a prostředí. Tato metoda umožňuje provádět virtuální experimenty a zkoumat chování požárů, šíření dýmu, evakuaci osob a další související faktory.

### 2.2.2.1 Výzkum evakuace v univerzitní knihovně v Nanjingu

Tento výzkum byl proveden v roce 2018 ve spolupráci Jiangu Key Laboratory of Hazardous Chemicals Safety and Control a College of Safety Science and Engineering v Číně [7] a jeho cílem bylo zhodnotit evakuaci v univerzitní knihovně v Nanjingu. Výzkum se obecně zabýval posouzením bezpečné evakuace osob z celého objektu při vybraném požárním scénáři pomocí simulací v softwaru Pyrosim a Pathfinder. Tato studie je zahrnuta do přehledu simulačních studií v této práci pouze ilustračně, protože její součástí simulací byly prostory s řadami sedadel a využit software Pathfinder (Obr. 10).



Obr. 10 Model knihovny v programu Pathfinder [7]

Knihovna byla simulována s maximální obsazeností 2 344 osob s pohybovou rychlostí za normálních podmínek  $1,19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a to v módech SFPE i Steering. Autoři výzkumu se domnívají, že skutečná evakuace osob v knihovně je bližší výsledkům modelu Steering, který byl pro simulaci evakuace dotčeného objektu vyhodnocen jako vhodnější. Hlavním problémem bezpečné evakuace bylo označeno přetížení způsobené velkou hustotou obsazení a úzkými evakuačními koridory.

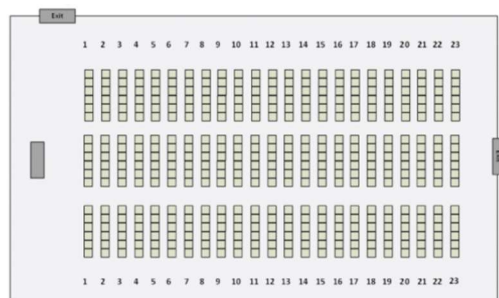
### 2.2.2.2 Studie uspořádání sedadel ve vyvýšených přednáškových sálech

Tato simulační studie byla provedena na Bucharest University of Economic Studies v Rumunsku pod vedením Camilie Delcea [8], sledovány byly faktory, jako je chování jednotlivců, jejich znalost prostředí, věk, pohlaví a další. Kromě těchto aspektů byla také věnována pozornost návrhu prostoru v sálech, včetně šířky uliček, počtu uliček, množství východů a podobně. V rámci této studie bylo hlavním cílem analyzovat optimální uspořádání sedadel v přednáškové místnosti, aby se dosáhlo co nejefektivnější evakuace. Tato studie vyniká tím, že agentní modelování v prostředí NetLogo je provedeno na základě kritérií získaných v průběhu reálného experimentu.

#### Experimentální nastavení

Prostor, kde experiment proběhl, disponuje 23 řadami, přičemž v každé z nich se nachází 18 sedadel uspořádaných do skupin po 6 místech. Skupiny sedadel jsou rozděleny 4 vertikálními uličkami. Přednáškový sál má 2 východy, hlavní východ ve spodní části místnosti a druhý východ nacházející se na horní stěně uprostřed (Obr. 11).





a) Schématické zobrazení přednáškového sálu



b) Pohled ze zadní části přednáškového sálu

Obr. 11 Zobrazení přednáškového sálu [8]

Experimentu se zúčastnilo 97 studentů ve věku od 18 do 23 let, kteří dali souhlas být součástí této studie. Pro vědecké účely studenti vyplnili formulář, kde uvedli své jméno, pohlaví, věk, výšku, váhu a na přiloženém pláncu zaškrtnli místo, kam se posadili. Po signálu účastníci opustili přednáškovou místnost, přičemž byli požádáni, aby tak učinili co nejrychleji a nejpřirozeněji. Jakmile poslední student opustil místnost, experiment byl ukončen a všichni se vrátili na svá původní místa. Jejich dalším úkolem bylo znázornit trasu, kterou se evakovali, a tuto volbu zdůvodnit.

#### Získaná data z reálného experimentu

Rychlost jednotlivců v uličkách byla získána pomocí videozáznamů. Průměrná rychlost jedinců se zkoumala na náhodných 6 mužích a 6 ženách. Výsledky tohoto měření jsou zapsány v Tab. 1.

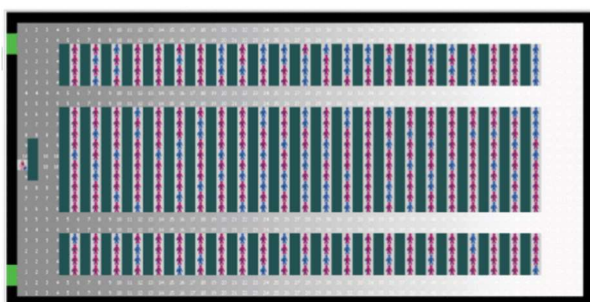
Tab. 1 Naměřená rychlost chůze účastníků [8]

Účastník	Směr	Průměrná rychlost chůze	Účastník	Směr	Průměrná rychlost chůze
Muži	Stoupání	0,99 m/s	Ženy	Stoupání	0,97 m/s
	Klesání	1,06 m/s		Klesání	1,02 m/s

Jedním z klíčových zjištění této studie je, že 56,7 % účastníků se rozhodlo opustit místnost použitím východu umístěného v přední (dolní) části učebny. Tuto volbu lze přičíst hlavně tomu, že tento východ je umístěn ve vizuálním poli účastníků a je označován jako hlavní vstup do přednáškového sálu. Celková doba evakuace byla 53 sekund a poslední účastník opustil místnost východem v přední části místnosti.

#### Modelové nastavení

Přednáškový sál je rozdělen na čtvercovou síť o rozměrech čtverců 0,4 x 0,4 m (Obr. 12). Vzdálenost mezi dvěma řadami sedadel jsou 2 pomyslné čtverce (tzn. 0,8 m), což umožnilo agentům opouštět prostor paralelně (Obr. 13).

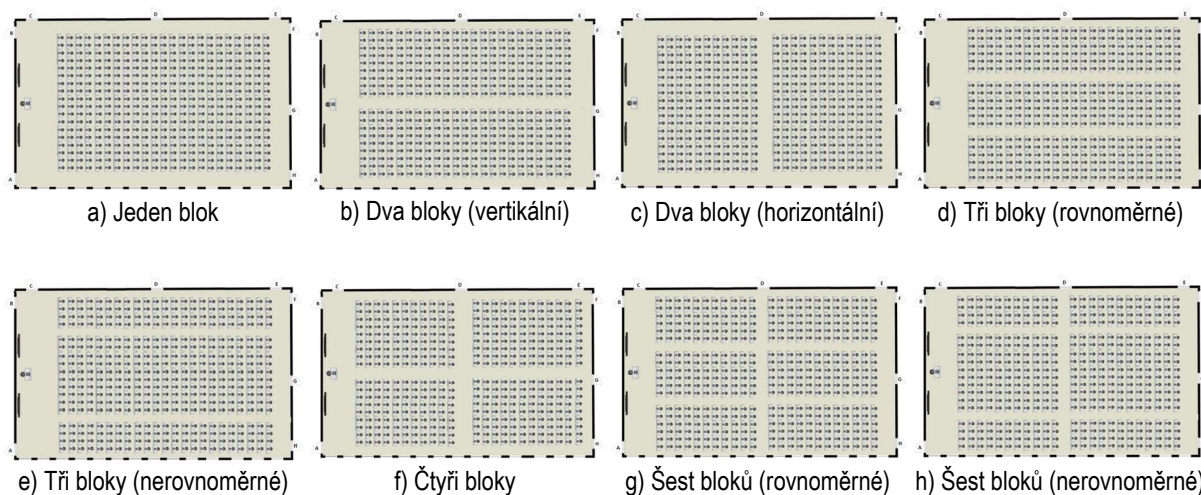


Obr. 12 Ukázka modelového rozvržení [8]



Obr. 13 Paralelní evakuace na uličce [8]

K provedení simulace byla využita stejná přednášková místnost jako v reálném experimentu. Scénáře byly upraveny na základě různých konfigurací uspořádání sedadel a umístění východů. V každé simulaci bylo možné použít pouze 2 východy, které byly vybrány z celkem 8 možných pozic. Rozložení sedadel a umístění východů je znázorněno na Obr. 14. Simulace vždy proběhla v plném obsazení, což je s využitím 414 agentů.



Obr. 14 Uspořádání sedadel pro simulaci [8]

### Závěry studie

Reálný experiment se od modelové simulace v určitých aspektech lišil, což bylo zapříčiněno tím, že rychlost agentů byla nastavena průměrnou rychlostí 12 náhodných osob. Autoři se domnívají, že kdyby každému agentu byla nastavena příslušná rychlost každé osoby z reálného experimentu, výsledky by byly téměř totožné. Na základě provedených simulací vyplývá, že nejrychlejší evakuace nastala při uspořádání sedadel do tří rovnoměrných sloupců (Obr. 14 g)). Při této geometrii, u níž nastala nejrychlejší doba evakuace, byly východy umístěny v rozích diagonálně. Druhým nejpříznivějším uspořádáním sedadel je uskupení do tří sloupců s nerovnoměrným rozdělením sedadel (Obr. 14 h)), kde východy byly navrženy rovněž v rozích diagonálně. Závěrem také je, že rovnoměrné rozložení sedadel do tří sloupců vždy vytváří výhodnější situaci než nerovnoměrné rozdělení sloupců a nejméně vhodné rozvržení sedadel je jednoblokové uspořádání (Obr. 14 a)).

Dalšími studiemi, jež jsou doprovodnými články doplňující informace popsaných studií výše, jsou Experiment a simulační studie nouzové evakuace při násilném útoku ve třídách [9], Experiment a modelování evakuace z učebny [10] a Zvýšení vnímání evakuačních situací ve třídě prostřednictvím modelování s využitím agentů [11].

### **2.2.3 Dopravní prostředky**

Evakuace osob z prostorů s řadami sedadel, jako jsou letadla, vlaky, kina atd., představuje specifickou výzvu z hlediska požární ochrany. Souvislost evakuace osob z prostorů s řadami sedadel s dopravními prostředky spočívá v jejich společném cíli – zajištění bezpečné evakuace osob v případě požáru nebo jiné mimořádné události.

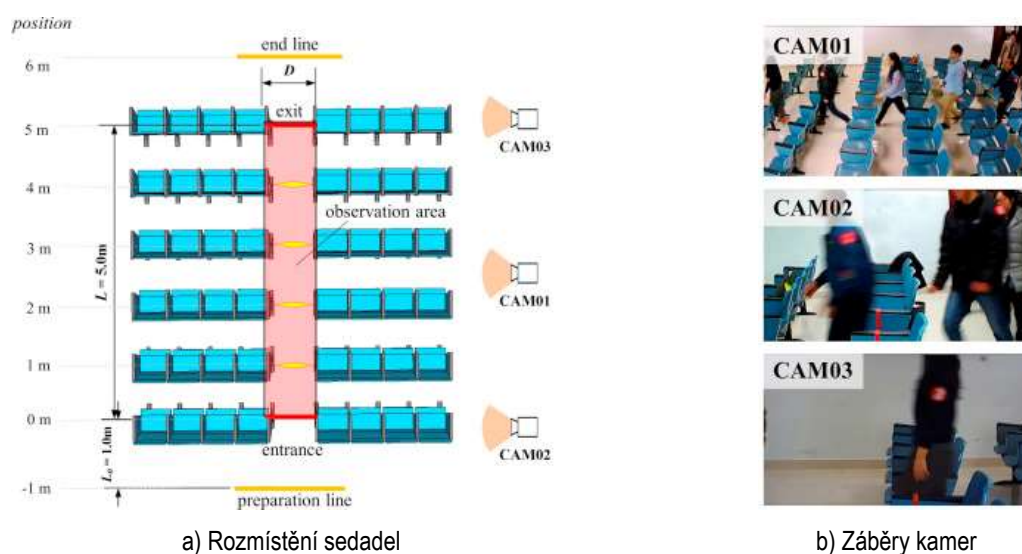


### 2.2.3.1 Experimentální studie pohybu chodců v úzké uličce sedadel

Evakuační experiment proběhl v roce 2018 ve spolupráci dvou univerzit v Číně, a to konkrétně University of Science and Technology of China a City University of Hong Kong [12]. Výzkum reagoval na v současnosti časté využití dopravních prostředků jako jsou vlaky, autobusy nebo letadla a snahu dopravních společností o umístění co nejvíce sedadel na relativně malé prostory. Například interiér vlakového vozu se skládá z mnoha sedadel a úzké uličky uprostřed, jejíž šířka není dostatečná, aby umožňovala dvěma cestujícím jít vedle sebe. Takovéto prostory omezují osobám směr i rychlost pohybu a představují rizika při nouzové evakuaci.

#### Experimentální nastavení

Experimentální prostor je znázorněn na Obr. 15. Sedadla byla rozmístěna do šesti řad po osmi místech k sezení, uprostřed byla vytvořena ulička. Hlavním zkoumaným prostorem byla právě středová ulička o délce 5 m (vstup na pozici 0 m a výstup na pozici 5 m; označeny červenými čarami). Stabilní rychlost v uličce byla docílena připraveností účastníků v řadě na linii přípravy (žlutá čára na pozici -1 m) před zahájením experimentu. Účastníci následovali osobu před sebou a při výstupu z pozorovaného prostoru měli za úkol plynule pokračovat rovně. Při každém následujícím pokusu se účastníci znovu připravili do řady na linii přípravy. Celý experiment zaznamenávaly 3 kamery umístěné na pozicích 0 m, 2,5 m a 5 m. Účastníci byli označeni červenými nálepkami umístěnými na paži. Jednotlivé nálepky byly rozpoznatelné pomocí softwaru PeTrack a extrahovaná data byla ověřována ručně.



Obr. 15 Ilustrace experimentálního uspořádání [12]

Experiment se skládal ze dvou částí. Série A byla zaměřena na individuální chůzi chodců v uličce proměnné šířky (0,2 m – 0,6 m) a její vliv na zpomalení rychlosti pohybu. Série B představovala single-file experiment (pohyb chodců v řadě) při šířce uličky 0,4 m – 0,6 m. V tomto případě byly předmětem zkoumání časové rozestupy mezi účastníky a fundamentální diagramy (závislosti rychlosti a toku osob na jejich hustotě). Experimentu se zúčastnilo 25 vysokoškolských studentů ve věku 22 – 26 let, z toho bylo 15 mužů a 10 žen. Účastníci byli vyzváni k tomu, aby uličkou procházeli ve dvou rychlostních úrovních (normální a rychlá chůze). Přehled jednotlivých experimentálních běhů je uveden v Tab. 2.

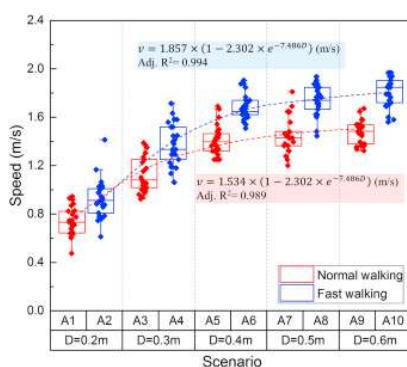
Tab. 2 Experimentální podmínky pohybu chodců [12]

Číslo případu	Šířka uličky [m]	Rychlost chůze	Číslo případu	Šířka uličky [m]	Rychlost chůze
A1	0,2	Normální	B1	0,4	Normální
A2	0,2	Rychlá	B2	0,4	Rychlá
A3	0,3	Normální	B3	0,4	Rychlá
A4	0,3	Rychlá	B4	0,5	Normální
A5	0,4	Normální	B5	0,5	Rychlá
A6	0,4	Rychlá	B6	0,5	Rychlá
A7	0,5	Normální	B7	0,6	Normální
A8	0,5	Rychlá	B8	0,6	Rychlá
A9	0,6	Normální	B9	0,6	Rychlá
A10	0,6	Rychlá			

V experimentu byly analyzovány základní veličiny pohybu chodců v prostoru jako je rychlost osob, hustota osob a délka kroku. Rychlost chodce byla definována jako délka uličky nepřímo úměrná trvání průchodu zkoumané oblasti. Velikost kroku chodce byla odvozena pomocí délky uličky ku počtu kroků účastníka experimentu. Frekvence kroku byla stanovena jako počet kroků dělený trváním průchodu zkoumané oblasti. V tomto experimentu byly dále zkoumány rozdíly v rychlosti chůze mezi muži a ženami.

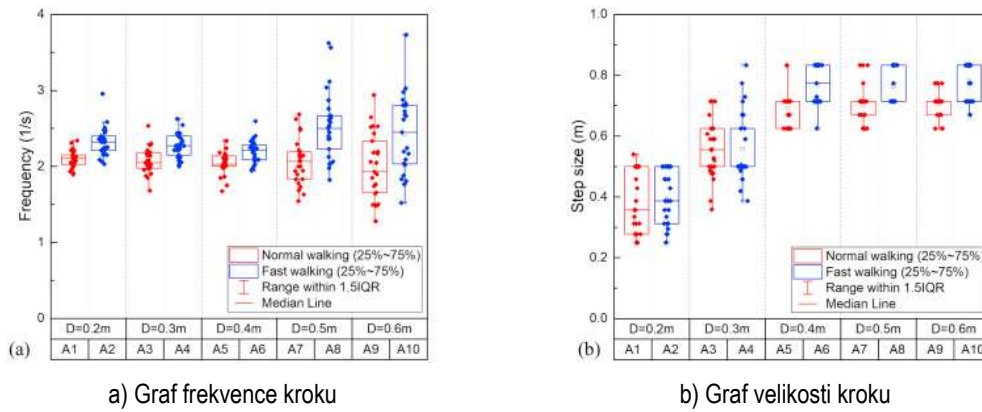
#### Závěry studie

Při individuální chůzi (Série A) vykazuje závislost rychlosti pohybu osob na šířce uličky (0,2 m – 0,6 m) u pomalé i rychlé chůze velmi podobné trendy (Obr. 16). Při šířce uličky 0,2 m, která je pro plynulý průchod příliš úzká, se mohli chodci pohybovat velmi nízkou rychlostí (0,15 m/s – 0,2 m/s). Při zvětšení uličky na 0,4 m se rychlost chodců rapidně zvyšovala. Jestliže byla ulička dostatečně široká (0,4 m) a chodec mohl plynule projít, pak se růst rychlosti chůze postupně zpomaloval. Při zvyšování šířky uličky (> 0,4 m) se rychlost chůze přibližovala k rychlosti chůze v otevřeném prostoru.



Obr. 16 Krabicový graf středních hodnot rychlostí chodců [12]

Na rychlost jednotlivých chodců může mít vliv také frekvence a velikost kroku. Dle krabicových grafů (Obr. 17) je zřejmé, že frekvence a velikost kroku vykazují s rostoucí šířkou uličky odlišné trendy. Frekvence kroku měly při rozdílných šířkách podobnou střední hodnotu, ale rozptyl jejich hodnot s rostoucí šířkou uličky výrazně rostl. Nižší frekvence kroku byly pozorovány u chodců za normální rychlosti chůze než při rychlé chůzi. Naopak, střední hodnoty délky kroku se s rostoucí šířkou uličky zvyšovaly a rozptyl hodnot klesal. Bylo rovněž zjištěno, že během rychlé chůze jsou velikosti kroků větší než za normální rychlosti.

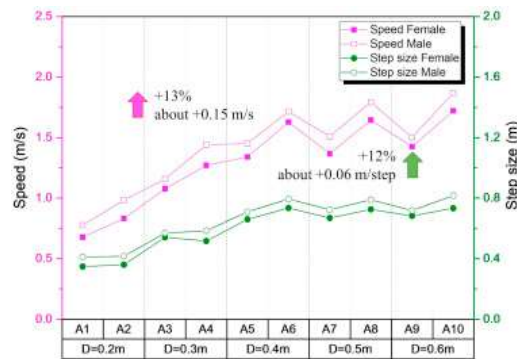


a) Graf frekvence kroku

b) Graf velikosti kroku

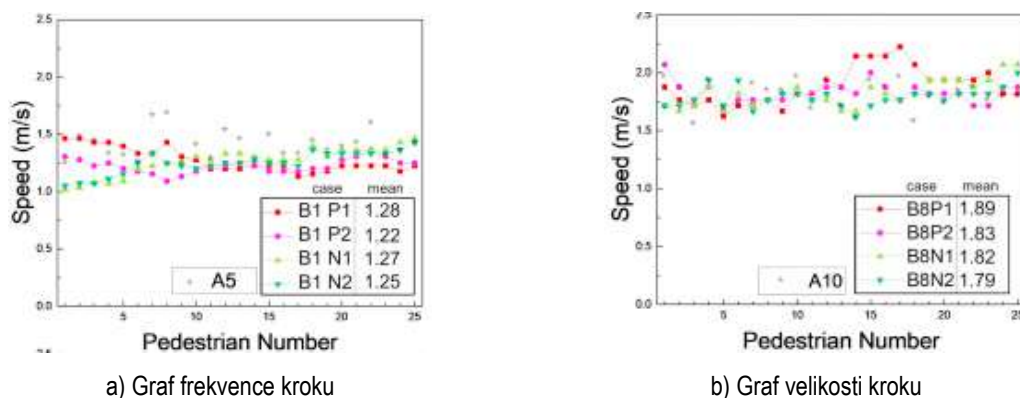
Obr. 17 Krabicové grafy frekvence a velikosti kroku [12]

Obr. 17 ukazuje, že rychlost pohybu i velikost kroku byla pozorována větší u mužů než u žen. Rychlost chůze mužů byla zhruba o 13% vyšší a velikost jejich kroků byla průměrně o 12% větší než u žen. Tyto výsledky odpovídaly rozdílu v individuální velikosti kroku (muži mají v průměru větší kroky než ženy), což mělo v tomto experimentu přímý vliv na schopnost chůze.



Obr. 18 Graf průměrných hodnot rychlosti a velikosti kroku mužů a žen [12]

Skupinový pohyb osob v řadě za sebou lze do určité míry vnímat jako sekvenci individuální chůze, neboť chodci procházející úzkou uličkou postupují jednotlivě, jeden za druhým. Jejich chování může být ale značně ovlivněno vzájemnými interakcemi. V experimentu museli účastníci přizpůsobovat svou rychlost tak, aby se vyhnuli srážkám s lidmi před sebou a blokování lidí za sebou. Obr. 19 popisuje průměrnou rychlost každého chodce pohybujícího se ve skupinovém experimentu (Série B) ve srovnání s rychlostí s jeho individuální chůzí (Série A). Je patrné, že s výjimkou prvního chodce se další chodci pohybovali pomaleji než jejich předchůdci. V případě rychlé chůze, mohou interakce mezi chodci v řadě způsobovat větší nervozitu nebo úzkost, což může ovlivňovat i jejich rychlost chůze. V takovém případě jsou pozorovatelná výraznější kolísání rychlosti pohybu, což ukazuje na zesílení interakcí mezi chodci.



Obr. 19 Rychlost chůze chodců při individuálním pohybu a skupinovém pohybu v řadě [12].

Grafy obsahují čtyři opakování: P1, P2, N1 a N2, což znamená dvě pozitivní sekvence (s rostoucím počtem chodců od 1 do 25) a dvě negativní sekvence (s klesajícím počtem chodců od 25 do 1).

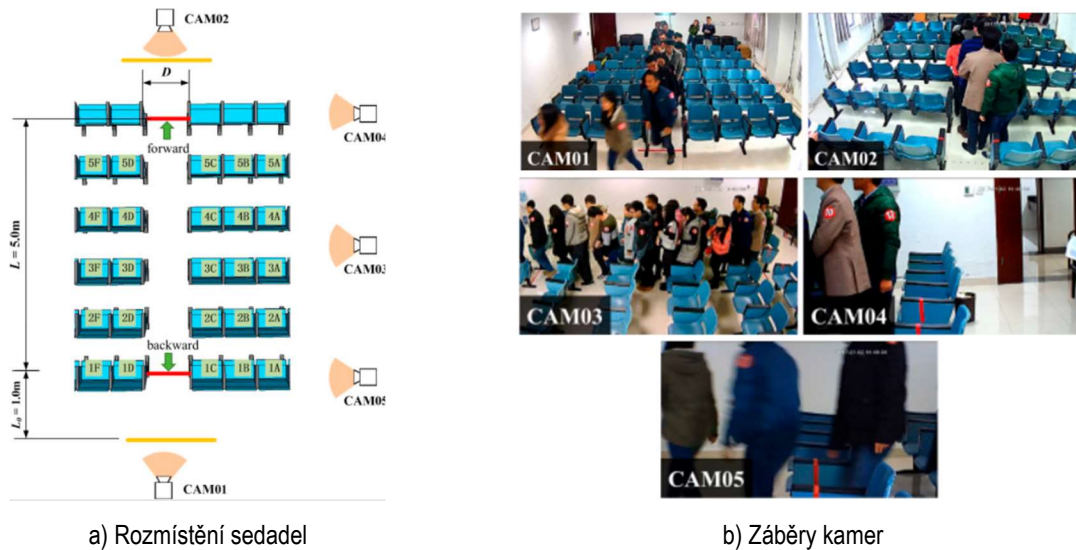
### 2.2.3.2 Experimentální studie evakuace cestujících v úzké uličce se sedadly

V roce 2018 byl proveden evakuační experiment, který se uskutečnil ve spolupráci mezi dvěma čínskými univerzitami – University of Science and Technology of China a City University of Hong Kong [13]. Jeho cílem bylo pomocí laboratorního experimentu získat data popisující evakuaci ze sedadlového prostoru vlaku.

#### Experimentální nastavení

Prostor vlaku byl nasimulován sedadly v šesti řadách (1 – 5) v osové vzdálenosti 1,0 m a po pěti místech k sezení (A – F). Řady sedadel byly rozděleny průchozí uličkou, kde vlevo zůstala sedadla dvě a vpravo tři, jak je patrné z Obr. 20 a). Experiment zaznamenávalo pět kamer, jejichž poloha je patrná z Obr. 20 b). Experimentu se zúčastnilo 25 vysokoškolských studentů s průměrným věkem 24 let a s průměrnou výškou 1,67 m. Experiment zahrnoval šest evakuačních scénářů, kde byly zkoumány tři různé šířky uliček (0,4 m, 0,5 m, 0,6 m) a dva různé směry výstupu (přední a zadní). Každý evakuační scénář byl proveden v pěti bězích s různým počátečním rozsazením osob. Evakuační scénáře byly realizovány v následujících krocích:

- přidělení každému účastníkovi číslo sedadla a následné usazení;
- po obdržení pokynu ke spuštění začali účastníci ihned opouštět svá sedadla;
- účastníci se co nejrychleji snažili dostat k východu;
- experiment byl ukončen po výstupu posledního účastníka z měřené zóny.



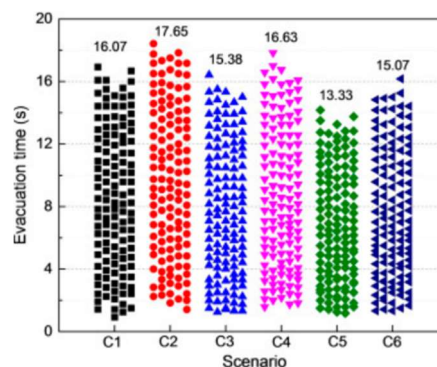
Obr. 20 Ilustrace experimentálního uspořádání [13]

Tab. 3 Scénáře evakuačního experimentu [13]

Scénář	Šířka uličky [m]	Směr evakuace
C1	0,4	Vpřed
C2	0,4	Vzad
C3	0,5	Vpřed
C4	0,5	Vzad
C5	0,6	Vpřed
C6	0,6	Vzad

### Výsledky studie

Obr. 21 obsahuje evakuační časy opakovaných experimentů podle různých scénářů, popsaných v Tab. 3. Průměrné doby evakuace se pohybovaly v rozmezí 13,33 s – 17,65 s. Doba evakuace se snižovala se zvyšující se šířkou uličky, což mohlo být způsobeno dvěma faktory. Na jedné straně větší šířka uličky mohla zmírnit tvoření front a zrychlit evakuaci, na druhé straně větší průřez uličky pro sedadla mohl umožnit větší tok osob. Také se zjistilo, že směr evakuace ovlivňuje dobu evakuace, přičemž evakuace do zadního traktu trvala déle než evakuace směrem dopředu. Při evakuaci směrem vzad se účastník musel při vstupu do středové uličky otočit, což mohlo způsobit zpoždění a případné srážky s ostatními osobami.



Obr. 21 Doba evakuace jednotlivých osob ve všech scénářích v pěti opakováních [13]

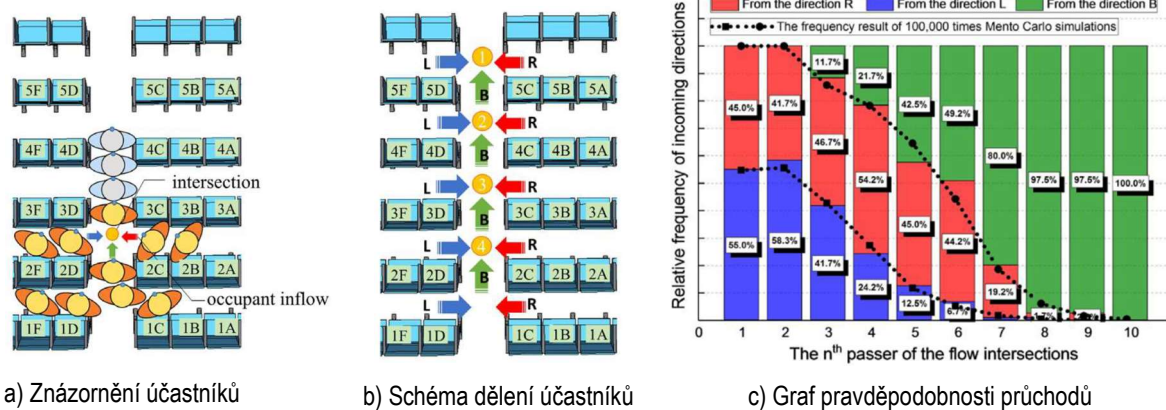


Účinnost evakuace byla také ovlivněna faktorem přeplnění (koncentrací osob) a vznikem front. V průběhu evakuace byly pozorovány výrazné změny v přeplnění uličky, jak můžeme vidět z Obr. 22. V počáteční fázi se rychle vytvořila fronta v uličce, ale vzhledem k přeplnění prostoru se většina účastníků zablokovala a nemohla projít vpřed. Tuto situaci bylo možné pozorovat určitou dobu, kdy se pouze několik prvních osob ve frontě dokázalo posunout dopředu.



Obr. 22 Fotky přeplněné uličky v určitých časech [13]

Dalším jevem, který byl při tomto experimentu zkoumán, je konflikt účastníků v uličkách, jak znázorňuje Obr. 23 a). K těmto konfliktům docházelo, když osoby opouštěly řadu sedadel do středové uličky. Označení R připadá účastníkům na sedadlech A, B, C, osoby na místech D, F mají označení L, B značí účastníky již procházející středovou uličkou a žluté kroužky s čísly znamenají pozorované křižovatky (toto dělení je patrné z Obr. 23 b)). Pravděpodobnost průchodů je řešena metodou četností u prvních 10 účastníků opouštějících svá místa, jak ukazuje graf na Obr. 23 c). Z grafu je patrné, že první dva účastníci, kteří opustí prostor sedadla jsou ze skupiny L nebo R, přičemž jsou jejich podíly skoro totožné. Po přechodu třetího chodce se postupně snižuje relativní četnost směrů R a L, zatímco četnost směru B se zvyšuje. Vzhledem k uspořádání sedadel „trojímu a dvojímu“ nedosahují výsledky počítání směrů R a L rovnoměrnému opouštění řad sedadel: mezi prvními deseti chodci mohli účastníci ze směru L projít mezi prvními sedm, zatímco účastníci ze směru R mohli být až devátí. Kromě toho počet konfliktů mezi účastníky na konkrétním pořadí mohl oscilovat, zejména ve sloupcích 3 až 7. To naznačuje, že pravděpodobnost vítězství v konfliktu mezi osobami není stabilní, neboť nezávisí pouze na směru příchodu sledovaného chodce, ale také na směru příchodu předchozích účastníků.



Obr. 23 Ilustrace konfliktu v uličce [13]

Další literárním zdrojem, který byl během rešerše zkoumán je Studie evakuace Boeing 777 pomocí modelu evakuace [14], v němž je zkoumána celková doba evakuace, volba směru výstupu z uliček a volba trasy. Další studií, která se zaměřuje na dané téma z prostředí dopravních prostředků je Experimentální studie o chování osob ve vícepodlažním autobusu [15].

## 2.2.4 Souhrn

Tato kapitola se zaměřovala na přehled již provedených studií v oblasti evakuace osob z prostorů s řadami sedadel. Tab. 4 shrnuje klíčové informace o těchto studiích včetně sledovaných parametrů a také slouží jako ucelený přehled výzkumů, které jsou relevantní pro dané téma.

Tab. 4 Shrnutí již provedených experimentů

Sledované výstupy Experiment	Individuální doba evakuace	Celková doba evakuace	Modelace v softwaru	Frekvence a velikost kroku	Genderové rozdíly
Studie o volbě chování chodců [4]	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne
Hodnocení evakuace chodců [6]	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne
Výzkum evakuace v knihovně [7]	Ne	Ano	Ano	Ne	Ne
Simulace uspořádání sedadel [8]	Ne	Ano	Ano	Ne	Ano
Studie pohybu chodců [12]	Ano	Ano	Ne	Ano	Ano
Studie evakuace cestujících [13]	Ano	Ano	Ne	Ne	Ne

Z vybraných výzkumů a studií vyplývá, že informace o evakuaci z prostorů s řadami sedadel jsou omezené a je potřeba tato data nadále získávat. Také bylo zjištěno, že dosavadní experimenty probíhaly v zastoupení homogenního davu, což nemusí vždy věrně odrážet reálnou situaci. Z tohoto důvodu se jako příhodné pro experiment realizovaný v praktické části práce jeví obsazení heterogenní. Takovému rozdělení účastníků navíc umožní prozkoumání možnosti sektorového rozsazení, které se v dnešní době při návrhu nových prostor objevuje čím dál tím častěji a v žádném nalezeném výzkumu nebylo řešeno.

## 2.3 Legislativní požadavky v České republice

V České republice se prostory s řadami sedadel, které jsou současně shromažďovacími prostory, navrhuje dle ČSN 73 0831 Požární bezpečnost staveb – Shromažďovací prostory [16] a souvisejících norem z řady ČSN 73 08xx. Tato norma specifikuje požadavky na uspořádání sedadel, rozměry prostoru, výšku sedadel, vzdálenost mezi řadami sedadel a další technické požadavky pro zajištění pohodlí a bezpečnosti návštěvníků.

Dle normy ČSN 73 0831, čl. 5.2.8. musí být konstrukce zabudovaných sedadel v prostorech, které spadají do shromažďovacích prostorů nejméně z výrobků třídy reakce na oheň D, aniž by šlo o termoplasty. U zabudovaných sedadel se nemusí stanovit třída reakce na oheň, jestliže je v místnosti instalováno samočinné stabilní hasicí zařízení nebo sprinklerová doplňková zařízení. Stanovená třída reakce na oheň se netýká povrchových úprav sedadel.

Ulička, kterou tvoří pevně zabudovaná sedadla, je považována jako nechráněná úniková cesta a její vzdálenost je měřena v ose cesty po skutečné trase úniku od nejvzdálenějšího místa k východu na volné prostranství nebo do chráněné únikové cesty. Délka cesty vedoucí v dílčí části shromažďovacího prostoru k východu pouze jedním směrem nesmí být delší než stanovená mezní délka pro jednu únikovou cestu, jak je uvedeno v tabulce 18 ČSN 73 0802 [17]. V této tabulce je mezní délka únikové cesty závislá na součiniteli požárního úseku  $a$  na počtu únikových cest.

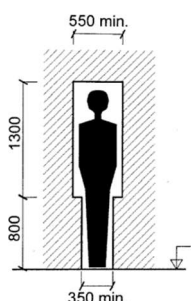
Při stanovení počtu osob evakuovaných z uličky se vychází z předpokladu, že každá část prostoru mezi dvěma uličkami obsahuje polovinu osob. Tento předpoklad je odvozen z parametrů, jako je počet míst a půdorysná plocha mezi osami uliček.

Ulička mezi vnitřním zařízením shromažďovacího prostoru je měřena od nejvýraznějších bodů tohoto zařízení, které slouží k vymezení uličky, a hodnotí se jako šířka nechráněné únikové cesty v souladu s ČSN 73 0802. Nicméně minimální šířka musí být rovna dvěma únikovým pruhům a jestliže se v prostoru nacházejí osoby s omezenou schopností pohybu a orientace nebo neschopné samostatného pohybu musí být šířka uličky minimálně tři únikové pruhy.

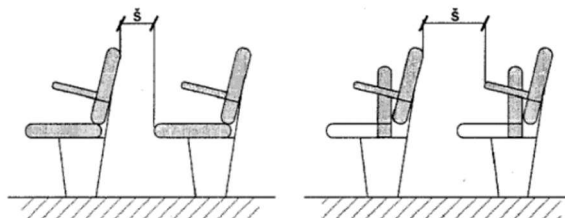
Pro každý východ ze shromažďovacího prostoru musí být zajištěna kapacita odpovídající počtu osob, které používají uličky vedoucí k tomuto východu.

Rozměry dveřního křídla musí být omezeny na maximální šířku 1100 mm a výšku 2100 mm, a jeho hmotnost nesmí překročit 100 kg.

Volný průchod mezi dvěma řadami sedadel musí být větší, než jsou mezní rozměry zobrazené na Obr. 24. Šířka volného průchodu mezi řadami se měří mezi nejvýraznějšími body obou řad bez zohlednění pohyblivých částí zařízení, které se mohou v důsledku pohybu osob uvolnit (např. sklopením, otočením, zasunutím), což je patrné z Obr. 25. Sedadla jsou považována za připevněná, pokud při působení vodorovné síly 1 kN nedochází k jejich posunutí ani převrácení.



Obr. 24 Schéma minimálních rozměrů [16]



Obr. 25 Minimální šířka mezi sedadly [16]

Počet sedadel v souvislých řadách se stanovuje na základě několika faktorů, mezi něž patří šířka volného průchodu mezi řadami, umístění uliček a hodnota součinitele  $a$  požárního úseku. Maximální povolený počet sedadel lze určit podle následující Tab. 5, a to:

- pro připevněná sedadla platí určitý počet podle hodnoty součinitele  $a$  požárního úseku;
- pro nepřipevněná sedadla je maximální počet také dán hodnotou součinitele  $a$  požárního úseku, ale snižuje se o polovinu.

Místa k sezení s neoddělenými nebo nečleněnými sedadly, jako jsou lavice, stupně apod., mají stanovenou šířku 0,5 m na jednu osobu. Pokud je ve shromažďovacím prostoru instalováno požární samočinné odvětrávací zařízení, může být maximální počet osob zvýšen o 50 % oproti Tab. 5 a pokud jsou nainstalována samočinná stabilní hasicí zařízení nebo sprinklerová doplňková zařízení, tak dokonce o 100 %.

Tab. 5 Největší dovolený počet sedadel v jedné řadě [17]

Součin. $a$	Největší dovolený počet sedadel									
	Při uličce z jedné strany					Při uličkách z obou stran				
	Při šířce volného průchodu mezi řadami sedadel v mm									
	do 449	450-499	500-549	550-599	600 <	do 449	450-499	500-549	550-599	600 <
< 0,8	9	10	11	12	13	18	20	22	24	26
0,8 - 1,1	8	9	10	11	12	16	18	20	22	24
> 1,1	7	8	9	10	11	14	16	18	20	22



### 3 Experiment evakuace osob z prostorů s řadami sedadel

Tato kapitola je zaměřena na realizaci praktické části diplomové práce, konkrétně na provedení evakuačního experimentu, který probíhal ve spolupráci s FIT ČVUT v Praze. Tato oblast byla předmětem zájmu několika výzkumů, dostupných dat je ovšem velmi málo. Prostřednictvím vhodně navrženého experimentu lze přinést další, detailnější poznatky a upřesnit existující data.

#### 3.1 Cíle experimentu

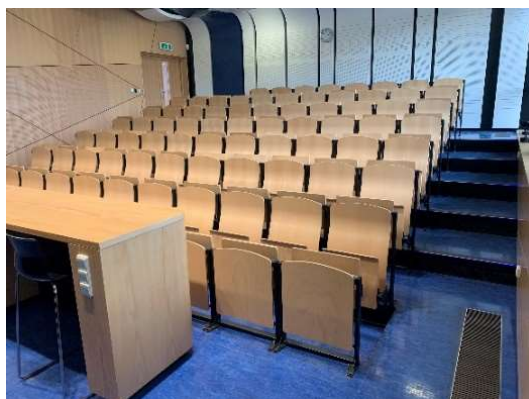
Evakuace je klíčovým prvkem při požáru nebo jiných mimořádných událostech v těchto prostorách, a proto je důležité provádět experimenty, které zkoumají efektivitu evakuačních strategií a přispívají k vytvoření bezpečnějšího prostředí pro osoby v ohrožení. Cílem provedeného experimentu bylo získání nových poznatků a experimentálních dat v oblasti dynamiky a evakuace osob v limitovaných prostorech s řadami sedadel. Sledována byla zejména celková doba evakuace, volba únikových tras a chování osob při různém rozsazení účastníků s různými předpokládanými pohybovými schopnostmi a evakuačními strategiemi. Tato experimentální data byla zároveň získána jakožto cenný podklad pro matematické modelování pohybu osob ve stísněných podmínkách prostorů s řadami sedadel.

#### 3.2 Popis experimentu

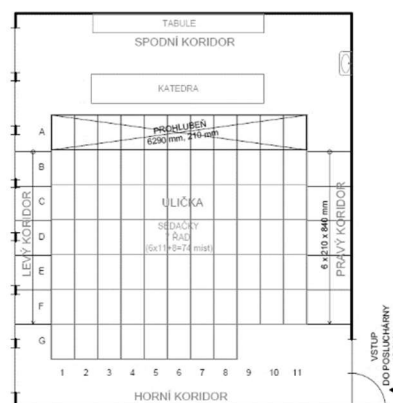
Evakuační experiment probíhal ve dvou částech. První částí evakuačního experimentu bylo hlavní evakuační cvičení a druhou doplňková měření.

##### 3.2.1 Popis hlavního evakuačního cvičení

Hlavní experiment, který probíhal v přednáškové místnosti, byl zaměřen na pozorování a analýzu klíčových parametrů, které nám poskytly informace o pohybu a evakuaci osob během simulované situace. Těmito sledovanými parametry byla celková doba, kterou účastníkům trvalo opustit místnost, trajektorie, které ukázaly, jakým způsobem se účastníci pohybovali v prostoru, a také chování účastníků v průběhu celé evakuace. Experiment proběhl v budově C FSv ČVUT v Praze v posluchárně C-219, která je zobrazena na Obr. 26. Místnost disponuje 74 pevně zabudovanými dřevěnými sedadly se sklopnými stolečky. Tyto stolečky byly po celou dobu evakuace ve svislé poloze (uzavřené) a účastníci byli instruováni, aby s nimi nijak nemanipulovali. Z Obr. 27 je zřejmé, jak jsou sedadla rozmístěna. Prvních 6 řad obsahuje 11 míst k sezení a poslední 7. řada má pouze 8 míst. Řady jsou vzestupně označeny písmeny A – G a sedadla očíslována od 1 do 11. Evakuace byla možná dvěma uličkami po stranách, které vedou k jednomu východu.



Obr. 26 Foto zvoleného prostoru pro experiment



Obr. 27 Schéma zvoleného prostoru pro experiment

### 3.2.2 Popis doplňkových měření

Hlavní experiment byl rozšířen o doplňková měření zaměřená na sledování dvou klíčových parametrů: běžné rychlosti jednotlivých osob a půdorysného průmětu těchto osob. Tato dodatečná měření proběhla v prostoru atria (Obr. 28), který je součástí budovy C FSv ČVUT v Praze a byla koncipována s cílem získat podrobnější informace o každém jednotlivém účastníkovi. Tato data jsou zásadním prvkem pro následnou validaci prostorových simulací v rámci softwaru Pathfinder (kapitola 4 Modelování v programu Pathfinder).



Obr. 28 Foto atria

### 3.3 Účastníci experimentu

Výběr vhodných účastníků pro experiment byl klíčovým prvkem pro zajištění kvality a relevantnosti získaných dat. Následující odstavce poskytnou informace o nutném procesu výběru a charakteristice těchto účastníků.

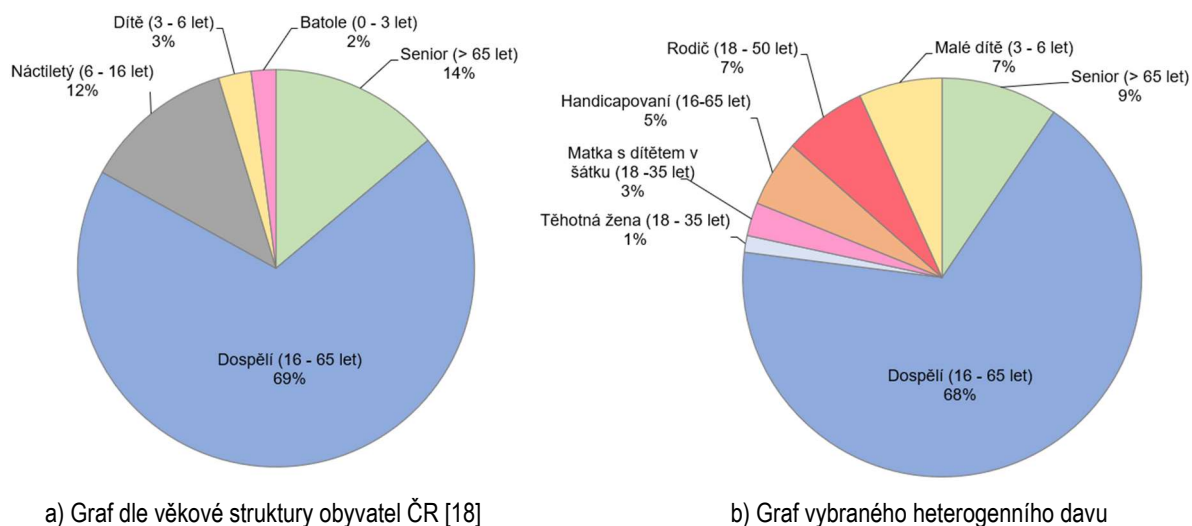
#### 3.3.1 Výběr účastníků

Pro účast v experimentu byli účastníci vybráni dle jejich charakteristik tak, aby bylo možné vytvořit heterogenní obsazení posluchárny. Tato volba byla motivována poznatky z rešerše, která ukázala, že většina předchozích studií se soustředila pouze na dav homogenní, jenž představuje skupinu osob s podobnými charakteristikami. Heterogenní dav znamená, že v této skupině lidí najdeme jak osoby se samostatnou schopností pohybu, tak i osoby s omezenou schopností pohybu.

Cílem bylo vytvořit heterogenní dav. Inspirací pro výběr této heterogenní skupiny byla analýza věkové struktury obyvatel České republiky z roku 2021 [18]. V této analýze byla populace rozdělena do věkových skupin, jak je zobrazeno na Obr. 29a). Na základě těchto statistických údajů, byly pro účely experimentu definovány následující kategorie osob:

- dospělí (16 – 65 let);
- senior (> 65 let);
- těhotná žena (18 – 35 let);
- matka s dítětem v šátku (18 – 35 let);
- handicapovaní (16 – 65 let);
- rodič (18 – 50 let);
- malé dítě (3 – 6 let).

Důležité bylo zahrnout do experimentu zejména zástupce osob s omezenou schopností pohybu (Těhotná žena, Matka s dítětem v šátku, Handicapovaní). Tito účastníci byli z bezpečnostních důvodů vybráni z věkové skupiny 16-65 let jako dobrovolníci simulující jednotlivá omezení. Celkový výběr kategorií pro experiment je patrný z obrázku Obr. 29b). Tímto způsobem byli zahrnuti účastníci se specifickými potřebami a různými schopnostmi, což přispělo k pestrosti experimentálního prostředí.



Obr. 29 Procentuální zastoupení skupin

### 3.3.2 Rozdělení účastníků do skupin

Jak již bylo uvedeno, účastníci byli rozděleni do sedmi různých kategorií (Tab. 6), které tvořily požadovaný heterogenní dav. Na základě jejich předpokládaných pohybových schopností a specifík osob v těchto kategoriích, byli účastníci barevně odlišeni a rozděleni do dvou skupin:

1. První skupina, označená červenými páskami, zahrnovala účastníky bez předpokládaných pohybových omezení (kategorie Dospělí).
2. Druhá skupina, identifikována modrými páskami, zahrnovala účastníky, u nichž se předpokládala pohybová omezení, jako jsou senioři, rodiče s malými dětmi ve věku 3 – 6 let, těhotné ženy, matky s dětmi v šátku a osoby s fyzickým handicapem.

Rozdělení účastníků do těchto dvou skupin bylo motivováno získáním dat z hlediska rozsazení účastníků do tzv. sektorů. Volba sektorů byla podmíněna častějším trendem umístování osob s omezenou schopností pohybu, jako jsou rodiny, handicapovaní nebo senioři, do lépe přístupných oblastí v místnosti. Rozdělení dvou odlišně pohybově schopných skupin do sektorů umožňuje sledovat, jak dané umístění skupin osob s limitujícími vlastnostmi při evakuaci (modrá skupina) ovlivňuje průběh evakuace. Zkoumané sektory jsou popsány v kapitole 3.4.2 Průběh hlavního experimentu a podrobnosti těchto sektorů představuje Příloha 1. Tento přístup byl zvolen s cílem pochopit, jakým způsobem lze nejefektivněji uspořádat osoby s omezenou schopností pohybu tak, aby evakuace probíhala co nejplynuleji a nejrychleji.

Celkový počet účastníků téměř dosáhl plné kapacity místnosti, což bylo důležité pro dosažení co nejvěrnější simulace evakuační situace. Plánovaný a konečný počet účastníků je uveden v Tab. 6.

Tab. 6 Typ účastníků

Kategorie účastníka	Charakter účastníka	Předpokládaný počet účastníků	Zúčastněný počet účastníků	Skupina
Dospělí	16 – 65 let	50 osob	43 osob	Červená
Senioři	65 let a více	7 osob	5 osob	Modrá
Těhotná žena	18 – 35 let	1 osoba	1 osoba	Modrá
Matka s dítětem v šátku	18 – 35 let	2 osoby	2 osoby	Modrá
Handicapovaní	16 – 65 let	4 osoby	7 osob	Modrá
Rodič	18 – 50 let	5 osob	3 osoby	Modrá
Malé dítě	3 – 6 let	5 osob	4 osoby	Modrá
		74 osob	65 osob	

### 3.3.3 Informace o účastnících

Registrace účastníků byla zajištěna online prostřednictvím webového portálu. Součástí registračního procesu byl stručný dotazník, který obsahoval základní informace jako je věk, výška a hmotnost účastníka, které jsou důležitými informacemi pro získání experimentálních dat. Dále byl v dotazníku vymezen prostor, kde měli účastníci možnost popsat svá omezení v oblasti pohybu. Toto bylo důležité pro lepší porozumění fyzickým schopnostem účastníků a jejich chování v průběhu evakuačního experimentu. Informace také přispěla k vhodnému zařazení účastníků do skupin popsaných výše.

## 3.4 Experimentální plán

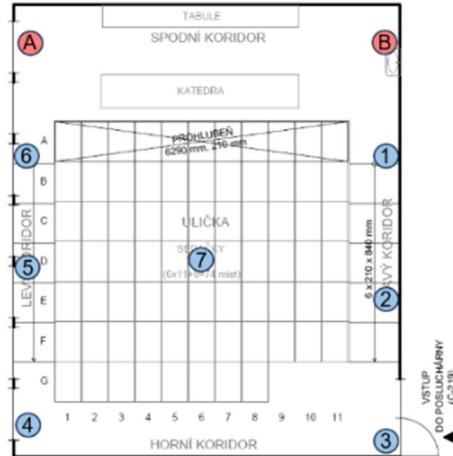
Experimentální plán je strukturovaný přístup k provedení vědeckého experimentu nebo studie. Jedná se o promyšlený plán, který určuje, jakým způsobem budou data sbírána, jaké proměnné budou zkoumány, jaké postupy budou použity a jak budou výsledky analyzovány. Tento dokument slouží především pro organizátory, jelikož také obsahuje podrobný harmonogram průběhu experimentu.

### 3.4.1 Technické vybavení

Experiment byl realizován ve spolupráci s Laboratoří zpracování obrazu (ImproLab) FIT ČVUT v Praze, která zajišťovala technické zabezpečení experimentu pro analýzu dat. Jednalo se především o zaznamenání celého experimentu a následnou extrakci surových výstupních dat. Pro přesné získání těchto záznamů bylo instalováno 7 kamer (Obr. 30) číselně označených 1 až 7, rozmístěných dle schématu na Obr. 31 (modré body). Každá tato kamera byla připojena na vlastní počítač, který umožňoval data ukládat (Obr. 32).



Obr. 30 Použité kamery



Obr. 31 Schéma rozmístění kamery;

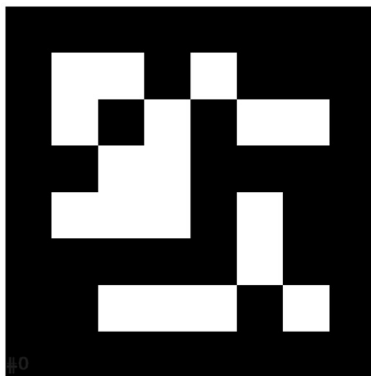
modrý bod = záznamová kamera;  
červený bod = kamera pro analýzu chování osob



Obr. 32 Použité počítače

Tyto kamery byly primárně určeny ke sledování průběhu experimentu a získání dat pro zhodnocení celkové doby evakuace a trajektorií pohybu osob. Dále byly v přední části přednáškové místnosti instalovány další dvě kamery umístěné přibližně 1,5 metru nad zemí určené pro další analýzu chování osob. Na Obr. 31 jsou tyto dvě kamery vizuálně odlišeny červenou barvou a označeny písmeny A a B.

Pro identifikaci účastníků byly použity ArUco kódy (Obr. 33). ArUco kódy mohou mít stovky kombinací a díky jejich jedinečnosti, jsou kamerami lehce rozpoznatelné. Aby byly kódy dobře čitelné pro kamery, byly přidělovány na bílé čepičky, které měli účastníci na hlavě po celou dobu experimentu (více o přípravě identifikátorů v kapitole 3.5.3. Výroba identifikátorů).



a) Ukázka ArUco kódu



b) ArUco kódy připevněné na čepičkách

Obr. 33 Identifikátory účastníků

### 3.4.2 Průběh hlavního experimentu

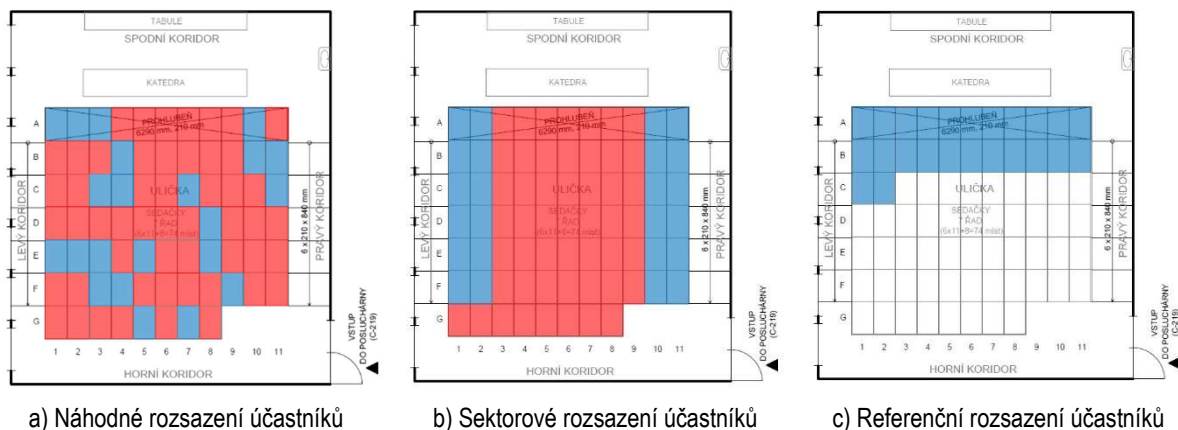
Hlavní experiment v přednáškové místnosti probíhal v takzvaných bězích. Běh lze definovat jako čas od signálu k opuštění místnosti až po okamžik, kdy poslední účastník opustí prostor přednáškové místnosti. Parametry jednotlivých běhů jsou zřejmé z Tab. 7.



Tab. 7 Typy běhů

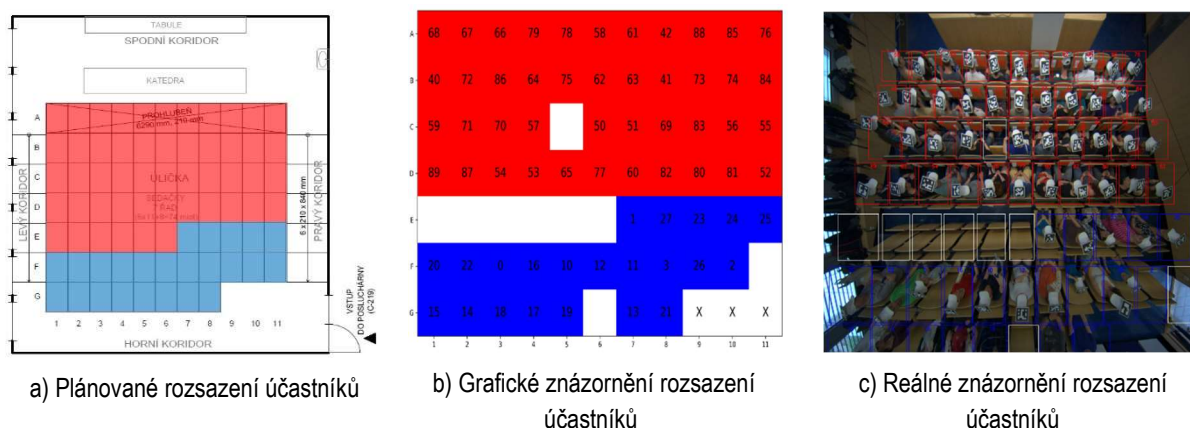
Ozn. běhů	Umístění modrého sektoru	Popis běhů	Šířka východu
T1	Náhodný	Neorganizované usazení dle vůle účastníka	1600 mm
T2	Náhodný	Neorganizované usazení dle vůle účastníka	1600 mm
T3	Dolní část místnosti	Organizované usazení do sektorů dle skupin; volné usazení v rámci sektoru	1600 mm
T4	Dolní část místnosti	Organizované usazení dle předchozího běhu	800 mm
T5	Horní část místnosti	Organizované usazení do sektorů dle skupin; volné usazení v rámci sektoru	1600 mm
T6	Horní část místnosti	Organizované usazení dle předchozího běhu	800 mm
T7	Po stranách u koridorů	Organizované usazení do sektorů dle skupin; volné usazení v rámci sektoru	1600 mm
T8	Ve středu	Organizované usazení do sektorů dle skupin; volné usazení v rámci sektoru	1600 mm
T9	U koridoru vpravo	Organizované usazení do sektorů dle skupin; volné usazení v rámci sektoru	1600 mm
T10	U koridoru vlevo	Organizované usazení do sektorů dle skupin; volné usazení v rámci sektoru	1600 mm
TTB1	Dolní část místnosti	Organizované usazení do sektorů dle skupin; volné usazení v rámci sektoru	1600 mm
TTB2	Horní část místnosti	Organizované usazení do sektorů dle skupin; volné usazení v rámci sektoru	1600 mm
TTR1	Dolní část místnosti	Organizované usazení do sektorů dle skupin; volné usazení v rámci sektoru	1600 mm
TTR2	Horní část místnosti	Organizované usazení do sektorů dle skupin; volné usazení v rámci sektoru	1600 mm

První dva běhy T1 a T2 se účastníci mohli sami rozhodnout, kde se usadí (Obr. 34a)). Organizované rozsazení do sektorů bylo použito až od třetího běhu (T3 – T10). Ukázka takového sektorového rozvržení je patrná z Obr. 34b). Účastníci měli za úkol sedat si do předem vyznačených sektorů, ale v rámci sektoru se mohli dobrovolně rozhodnout, na které místo se usadí. Poslední typ rozsazení je tzv. referenční běh (Obr. 34c)), kde se každá skupina evakovala zvlášť (TT). Tento referenční běh absolvovala každá skupina dvakrát, jednou z nejbližších míst od východu a jednou z míst v blízkosti východu. Všechny varianty rozsazení, které byly v rámci tohoto experimentu použity, jsou k dispozici v Příloze 1 této diplomové práce.



Obr. 34 Ukázka rozsazení účastníků

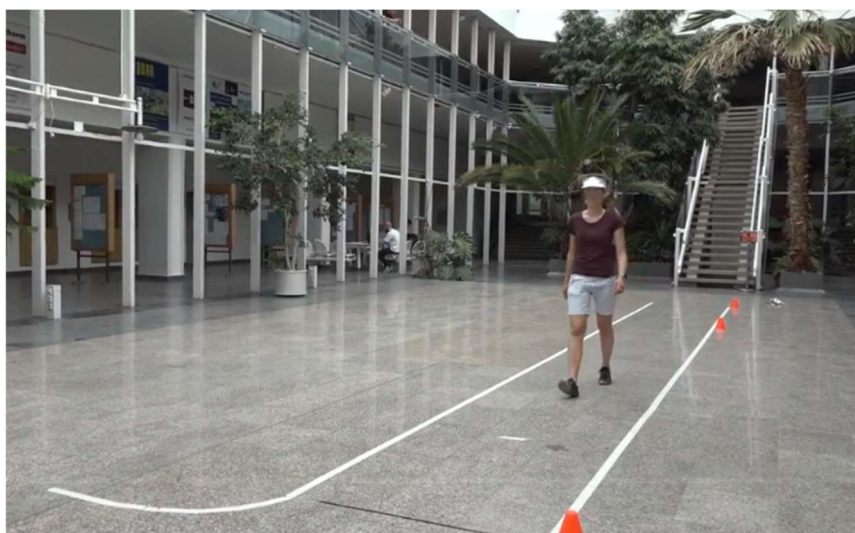
V Příloze 1 jsou k dispozici grafická znázornění rozložení účastníků a záběry z kamery č. 7 pro každý běh. Obr. 35 poskytuje příklad plánovaného, grafického a reálného rozložení pro běh T5.



Obr. 35 Ukázka rozsazení účastníků z přílohy 1 pro běh T5

### 3.4.3 Průběh doplňujících měření

Kromě hlavního experimentu byla provedena doplňková měření, jež měla dvě části. První sledovaný parametr, v rámci doplňkového měření, je půdorysný průmět osob. Tato veličina byla zaznamenávána na začátku hlavního experimentu, kdy každý účastník byl požádán, aby stanul pod kamerou, která snímala jeho postavení shora. Druhý z parametrů, který byl sledován v rámci doplňkového měření, je běžná rychlost osob. Tento parametr odkazuje na rychlost, kterou účastník považuje za přirozenou a nezávislou na vnějších vlivech. Pro sběr dat byli účastníci požádáni, aby jednotlivě prošli sledovaným koridorem, přičemž jejich pohyb byl zaznamenáván pomocí kamer. Průchod náhodně vybraného účastníka je zobrazen na Obr. 36.



Obr. 36 Ilustrační záběr z měření běžné rychlosti

### 3.5 Příprava experimentu

Před samotným uskutečněním experimentu byla nezbytná příprava a plánování. Celý experiment byl realizován týmem, který byl složen na základě spolupráce FSv a FIT ČVUT v Praze.

#### 3.5.1 Etické schválení, GDPR a ochrana osobních údajů

Experiment byl schválen Etickou komisí ČVUT v Praze, č.j. 0000-04/23/51903/EKČVUT. Všichni účastníci byli předem seznámeni s cíli a průběhem experimentu a svou dobrovolnou účast potvrdili na základě informovaného souhlasu. Všechny pořízené videozáznamy byly shromažďovány jako anonymní. Osobní údaje poskytnuté účastníky v přihlašovacím dotazníku byly po ukončení experimentu zcela anonymizovány (propojeny s anonymním ID účastníka).

#### 3.5.2 Nábor účastníků

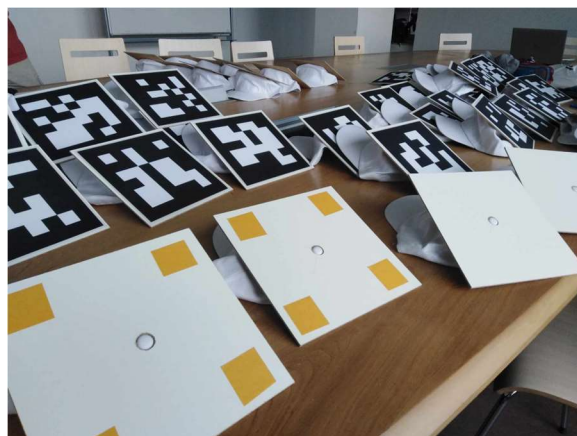
Vzhledem k maximální kapacitě řešené přednáškové místnosti bylo cílem získat 74 účastníků. Vzhledem k vysokému počtu účastníků a potřebě dosažení jejich rozmanitosti byla iniciována kampaň pro nábor účastníků. Pro účast na experimentu byly osloveny osoby z blízkého okolí organizačního týmu, akademická obec ČVUT v Praze i široká veřejnost. Propagační materiály byly zveřejněny formou plakátů (Příloha 2) v kampusu ČVUT v Praze i na webových stránkách a sociálních platformách, a to ve spolupráci s PR oddělením FSv a FIT ČVUT v Praze. Dále proběhla aktivní prezentace výzkumu mezi studenty FSv ČVUT v Praze v rámci předem domluvených přednášek.

#### 3.5.3 Výroba identifikátorů

Identifikace účastníků během celého evakuačního experimentu byla umožněna díky ARUCO kódům umístěným na bílých čepicích na hlavách, jakožto na nejvyšším bodě na těle každého účastníka. Tyto čepice byly vyrobeny několik týdnů před samotným experimentem (Obr. 37), a to s ohledem na nejvhodnější umístění kódu. Vzhledem k tomu, že nebylo možné přesně předvídat natočení hlav účastníků, byly ARUCO kódy umístěny na vrcholu čepice, a nikoliv na jejím kšiltu.



a) Řezání podkladních čtverců na CNC stroji



b) Lepení ARUCO kódů na podkladní čtverce

Obr. 37 Výroba identifikátorů

Proces výroby čepic s ARUCO kódy začal nákupem bavlněných čepic a sololitových podkladních čtverců o rozměrech 20 x 20 cm, které měly být pro výrobu identifikátorů použity. Před samotným spojováním těchto komponentů byly sololitové čtverce zbroušeny, aby se předešlo možným zraněním účastníků. Následným krokem bylo vytvoření otvoru uprostřed každého čtverce, což



bylo nezbytné pro jejich připevnění na vršek čepic. Nakonec byly ArUco kódy opatrně přilepeny na tyto podkladní čtverce.

### 3.5.4 Příprava přednáškové místnosti

Před samotným experimentem bylo nezbytné provést důkladnou přípravu přednáškové místnosti na Obr. 38a). Hlavním úkolem spojeným s touto přípravou bylo správné zkalibrování kamer (Obr. 38b)) a jejich připojení (Obr. 38c)).



a) Rozmísťování kamer

b) Kalibrace kamer

c) Připojené kamery

Obr. 38 Příprava technického vybavení

Dále bylo nutné stanovit časově efektivní označení sedadel do požadovaných sektorů, které mělo usnadnit rychlé a jednoduché přeuspořádání těchto sektorů během experimentu, aby účastníci věděli, kam přesně se mají při jednotlivých bězích usadit (Obr. 39). Vymezení specifického prostoru pro plynulý odchod účastníků z přednáškové místnosti je patrné na Obr. 40.



Obr. 39 Ukázka rozvržení náhodného sektoru



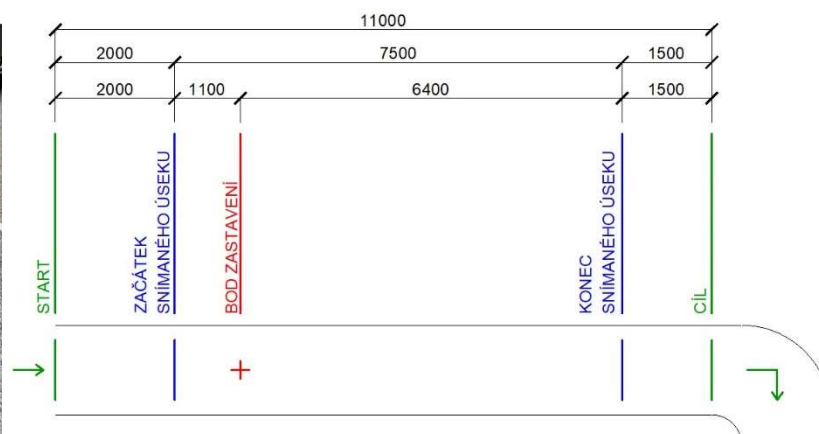
Obr. 40 Prostor určený pro účastníky mezi běhy

### 3.5.5 Příprava koridoru pro měření běžné rychlosti osob

Doplňkové měření běžných rychlostí jednotlivých účastníků probíhalo v přilehlém atriu FSv ČVUT v Praze. V tomto prostoru byly rozmístěny kamery na sloupech tak, aby zachycovaly připravený koridor. Koridor byl vyznačen na podlaze pomocí barevných linií (Obr. 41), schéma tohoto koridoru je znázorněno na Obr. 42. Účastníci zahájili měření na startu a postupně se pohybovali směrem k cíli, kde se na krátkou chvíli zastavili, a následně pokračovali až na konec snímaného úseku.



Obr. 41 Obrázek koridoru



Obr. 42 Schéma koridoru

### 3.6 Nežádoucí vlivy ovlivňující výsledky experimentu

Tato kapitola je zaměřena na identifikaci faktorů, které mohly mít nepříznivý vliv na výsledky experimentu.

#### 3.6.1 Nepříznivě umístěné kamery

Příprava kamer pro záznam experimentu proběhla těsně před samotným dnem experimentu. Během instalace byly kamery řádně vyčištěny, zkalibrovány a umístěny na přesně stanovená místa zvolená na základě předchozího testování.

Kamera č. 7, která byla umístěna uprostřed řad sedadel, měla za úkol pokrýt všechny relevantní části přednáškové místnosti. Při instalaci nebyla nicméně zohledněna okolnost, že kamera nemohla dostatečně zachytit identifikátor účastníků sedících v poslední řadě, který byl z důvodu deformace obrazu a výšce nad úroveň sedadla posunut mimo její záběr. Zorné pole této kamery č. 7 je patrné z Obr. 43a). Dále nebylo předpokládáno, že někteří účastníci se mohou během experimentu sklonit nebo zaklonit, což způsobilo nedostatečnou čitelnost identifikátorů. Tento problém byl vyřešen ruční kontrolou všech záznamů a mapováním jednotlivých účastníků, kteří nebyli kamerami rozpoznáni.

Kamera č.3 byla umístěna u východu z přednáškové místnosti v pravém horním rohu při pohledu na vstupní dveře. Záběr kamery nicméně neumožnil přesné stanovení výstupu účastníků z pozorovaného prostoru. Pro ilustraci je na Obr. 43b) zachycen poslední známý bod, který byl kamerou zaznamenán. Tento obrázek naznačuje, že účastník ještě zůstává v pozorovaném prostoru, což bylo nepřesné. Nežádoucí zkreslení výstupu kamery bylo nutné zpřesnit pomocí dodatečného mapování a ruční úpravy dat (viz také kapitolu 3.7.1 Celková doba evakuace (TET)).

Z analýzy záznamů dále vyplynulo, že některé prostory přednáškové místnosti nebyly kontinuálně pokryty. Jednalo se zejména o oblast za katedrou, která zůstala zcela nepopsaná. Tento nedostatek byl kompenzován prostřednictvím současného sledování dvou kamer, neboť platí pravidlo, že pokud účastník zmizí z pohledu kamery č. 1, měl by být stále zachycen kamerou č. 6 nebo naopak (Obr. 43c) d)). Ačkoliv uvedené nežádoucí okolnosti představovaly výzvu, nebyly fatální.



a) Kamera č. 7



b) Kamera č. 3



c) Kamera č. 1



d) Kamera č. 6

Obr. 43 Zorná pole kamer

### 3.6.2 Vliv učení

V kontextu evakuačního cvičení lze vliv učení chápat jako schopnost jednotlivců nebo skupin získávat nové znalosti, dovednosti nebo chování na základě zkušeností a interakcí s prostředím během evakuačního procesu. Vzhledem k opakování podobných běhů během experimentu, mohla být efektivita evakuace v posledních bězích zvýšena v důsledku učení.

### 3.6.3 Vliv únavy a časová náročnost experimentu

Vliv únavy je stav, kdy dochází k postupnému poklesu fyzické anebo psychické výkonnosti jedince v důsledku vyčerpání jeho energetických zdrojů. Tento stav může být způsoben opakovaným fyzickým výkonem. Únava může mít negativní dopad na schopnost jedince plnit úkoly, reagovat na podněty, udržovat pozornost a uchovávat optimální úroveň výkonu. Během experimentu byli účastníci nuceni udržet svou pozornost a aktivní účast po delší dobu, což mohlo ovlivnit nejen jejich pohybové schopnosti, ale také průběh evakuace. Zajištění minimalizace negativních dopadů únavy během průběhu experimentu bylo dosaženo systematickým zařazováním přestávek. V rámci těchto odpočinkových intervalů bylo účastníkům umožněno relaxovat a obnovit své síly za doprovodu dostupného občerstvení. Navzdory těmto snahám je nutné vzít v úvahu, že délka experimentu mohla mít vliv na výsledky. Tyto aspekty mohou představovat výzvy při interpretaci získaných dat a vyžadují pozornost při analýze experimentálních výsledků.

### 3.6.4 Motivace účastníků

Výsledky naměřených běžných rychlostí potvrzují, že rozdíl mezi rychlostmi modré a červené skupiny nebyl tolik výrazný, jak mohlo být očekáváno (kap.3.8.4.2 Běžná rychlost osob). Tento výsledek může být způsoben tím, že část modré skupiny tvořily osoby, které z bezpečnostních důvodů své pohybové omezení pouze předstíraly.



### 3.7 Sledované parametry a způsob vyhodnocení

Tato kapitola se zaměřuje na představení sledovaných parametrů a na způsob, jakým byly vyhodnoceny. Jednalo se zejména o celkovou dobu evakuace, rychlost osob, tok osob a také chování účastníků během celého průběhu experimentu. Podrobná analýza výsledků každého ze sledovaných parametrů je uvedena v samostatné kapitole 3.8 Výsledky experimentu.

#### 3.7.1 Celková doba evakuace (TET)

Celková doba evakuace (TET z angl. Total Evacuation Time) zahrnuje v této studii čas od zaznění signálu k evakuaci až po okamžik, kdy poslední účastník opustí předmětnou místnost. Čas opuštění místnosti byl detekován automaticky, případně byl manuálně korigován (viz 3.6 Nežádoucí vlivy ovlivňující výsledky experimentu). Účastník byl považován, že opustil místnost v okamžiku, kdy jeho těžiště překročilo hraniční čáru (Obr. 44).



a) Účastník je v místnosti

b) Účastník na hraniční čáře

c) Účastník opustil místnost

Obr. 44 Ukázka posouzení výstupu náhodného účastníka

#### 3.7.2 Chování osob v průběhu experimentu

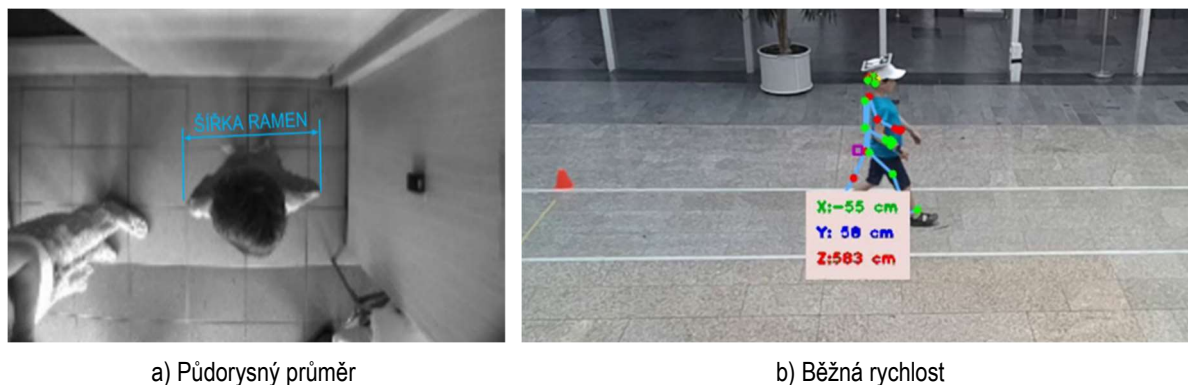
Dalším sledovaným parametrem bylo chování osob během evakuace. To zahrnovalo různé aspekty jako je volba směru při opuštění prostoru úzkých uliček, mapování tras jednotlivých účastníků, dodržování pokynů, spolupráce mezi účastníky a také identifikace případných chyb nebo chování, které by mohlo ohrozit bezpečí ostatních. Volba směru při opuštění prostoru z úzkých uliček a mapování tras bylo zkoumáno pomocí kamerových záznamů z hlavních sedmi kamer. Doplnkové kamery A a B sloužily ke sledování chování účastníků během celého experimentu.

#### 3.7.3 Tok osob

Tok osob byl zkoumán u východu z přednáškové místnosti a vyjadřuje počet osob, jež projdou kontrolním bodem za jednotku času [osob·s<sup>-1</sup>]. Počátek sledovaného intervalu byl definován od chvíle, kdy první účastník opustil přednáškovou místnost, a konec intervalu byl stanoven na dobu, kdy poslední účastník opustil sledovaný prostor.

#### 3.7.4 Doplnková měření

První z parametrů, který byl v doplňkových měřeních zkoumán je půdorysný průmět jednotlivých účastníků (Obr. 45a)). Na základě analýzy pořízených záznamů byl zjišťován nejširší rozměr každého účastníka (šířka ramen). Běžná rychlost jednotlivých účastníků byla uvažována jako odhadovaná ustálená rychlost při průchodu měřeným koridorem (Obr. 45b)).



a) Půdorysný průměr

b) Běžná rychlost

Obr. 45 Záběr kamer při doplňkových měřeních

### 3.8 Výsledky experimentu

Tato kapitola vyhodnocuje data, která byla získána z evakuačního experimentu. Extrakce dat z pořízených záznamů (automatická, poloautomatická, ruční detekce) byla provedena v úzké spolupráci s FIT ČVUT v Praze, podrobné informace o procesu zpracování dat bude publikována v samostatné diplomové práci [19].

#### 3.8.1 Celková doba evakuace (TET)

Celková doba evakuace pro jednotlivé běhy je patrná z Tab. 8. Nejkratší celková doba evakuace proběhla při běhu T8, kde poslední účastník prošel východem v čase 33,3 s od zahájení evakuace. Na druhou stranu při běhu T6 byla celková doba evakuace nejdelší (55,3 s). Referenční běhy do nejkratší/nejdelší celkové doby evakuace nejsou zahrnuty. Tyto běhy jsou vyhodnoceny zvlášť, v kapitole 3.8.1.2 Výsledky referenčních běhů.

Tab. 8 Celková doba evakuace jednotlivých běhů

Označení běhu	Celková doba evakuace [s]	Označení běhu	Celková doba evakuace [s]
T1	34,55	T8	33,30
T2	35,50	T9	35,95
T3	35,95	T10	36,25
T4	53,40	TTR1	22,35
T5	36,65	TTR2	20,20
T6	55,30	TTB1	25,55
T7	38,10	TTB2	19,15

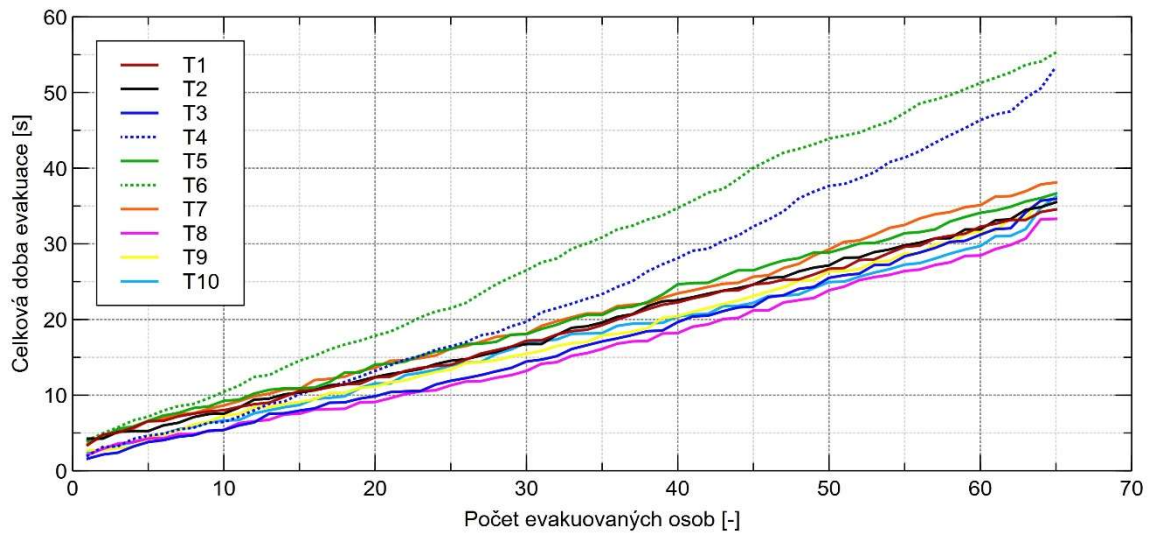
##### 3.8.1.1 Výsledky evakuačních běhů

Evakuační křivky na Obr. 46 ukazují, kolik účastníků opustilo předmětnou místnost v daný okamžik. Z grafu je patrné, že všechna rozsazení mají podobnou křivku výstupu vyjma běhů T4 a T6, kde byla zmenšena šířka východu na polovinu. Všechny grafy popisující křivky celkové doby evakuace jednotlivých běhů jsou zobrazeny v Příloze 3.

Rozdílové hodnoty v procentech, pro běhy s šířkou východu 1600 mm, jsou vždy vztaženy k nejpomalejšímu běhu:

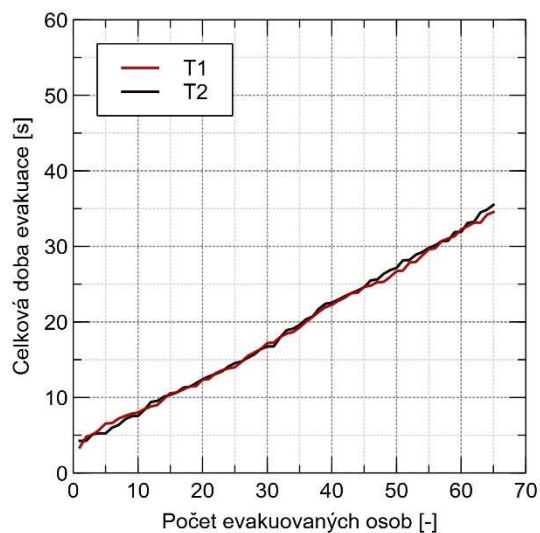
- Běh T7;
- TET = 38,1 s;
- 100 %.

Při běhu T4, kde modrá skupina je usazena v přední části místnosti, je celková doba evakuace kratší o 1,9 s než při běhu T6, kde je modrá skupina usazena v horní části místnosti blíže u východu. Nejpomalejší křivku výstupu při šířce východu 1600 mm má běh T7, což je rozsazení, kde osoby s limitujícími vlastnostmi pohybu (modrá skupina) jsou usazeny na krajních sedadlech sousedících s koridory. Nejrychlejší křivku výstupu a celkový čas evakuace má běh T8. Při tomto rozsazení je modrá skupina usazena ve středové části sedadel.

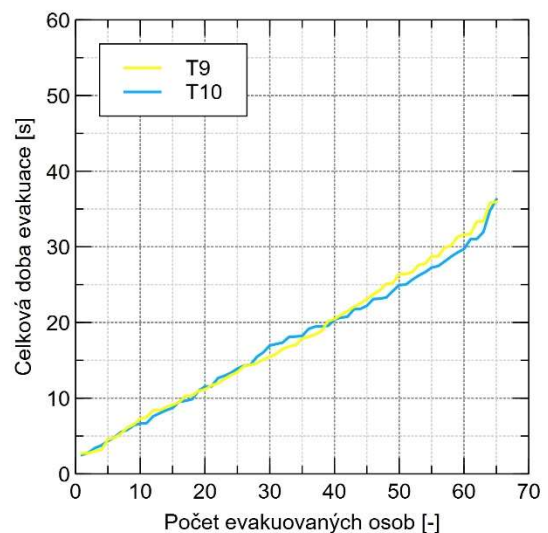


Obr. 46 Graf celkové doby evakuace T1 – T10

Při rozsazení T1 a T2 (Obr. 47) účastníci seděli náhodně dle své vlastní vůle a šířka východu (1600 mm) byla stejná. Křivka těchto běhů je téměř totožná a celková doba evakuace je při běhu T1 o 0,95 s (90,68 %) kratší než při běhu T2 (93,18 %).



Obr. 47 Graf celkové doby evakuace pro běh T1 a T2

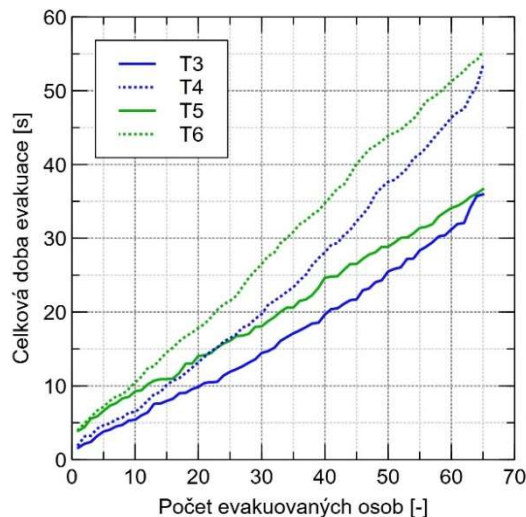


Obr. 48 Graf celkové doby evakuace pro běh T9 a T10

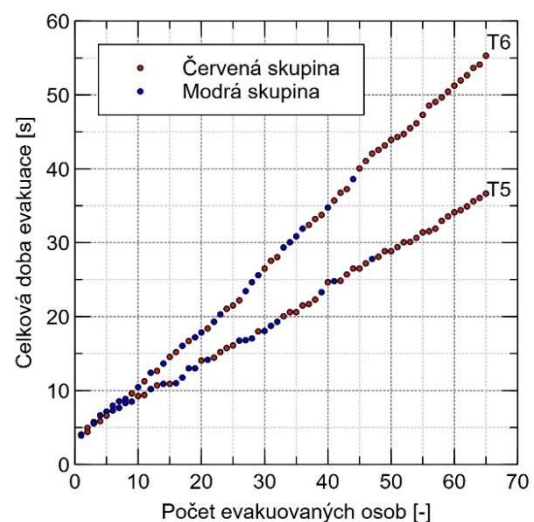
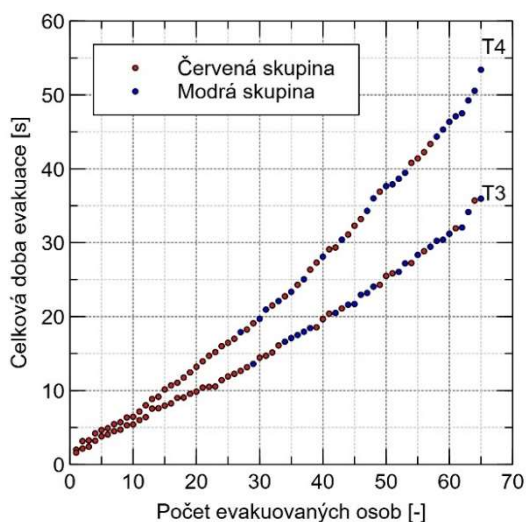
Obr. 48 zobrazuje rozdíl celkové doby evakuace mezi případy umístění modrého sektoru na stranu k pravému koridoru, tedy blíže k východu, (T9) a na stranu k levému koridoru, dále od východu (T10). Při běhu T9 byla celková doba evakuace o 0,3 s kratší (94,36 %) než při běhu T10 (95,14 %).

Obr. 49 ukazuje rozdíl celkové doby evakuace při změně šířky dveří. Při bězích T3 a T5 byl východ široký 1600 mm a při bězích T4 a T6 800 mm. Ostatní charakteristiky jako je usazení účastníků do sektorů a výběr konkrétního místa k sezení zůstaly beze změny. Kratší celková doba evakuace proběhla u umístění sektorů pro modrou skupinu do spodní části místnosti (T3 a T4), a to konkrétně o 0,7 s (94,36 %) při šířce dveří 1600 mm a o 1,9 s u běhů s poloviční šířkou východu.

Díky těmto běhům lze demonstrovat, že šířka východu stále představuje klíčový faktor během evakuace. Rozmístění účastníků do sektorů podle pohybových předpokladů nemá na celkový čas evakuace tak markantní vliv jako rozšíření šířky východových dveří. V tomto případě zvětšení dveří na dvojnásobek zkracuje celkovou dobu evakuace v průměru o 18,2 s (95,28 %).



Obr. 49 Graf celkové doby evakuace T3, T4, T5 a T6; Plná čára = šíře dveří 1600 mm, Tečkovaná čára = šíře dveří 800 mm  
Následující dva grafy (Obr. 50) zobrazují stejné průběhy běhů jako znázorňuje Obr. 49, tedy běhy T3, T4, T5 a T6, ovšem s barevným označením evakuovaných osob dle skupin. Díky tomuto zobrazení může být posouzeno, zda účastníci vystupovali ve stejném, podobném či odlišném pořadí.



a) Graf celkové doby evakuace pro běh T3 a T4

b) Graf celkové doby evakuace pro běh T5 a T6

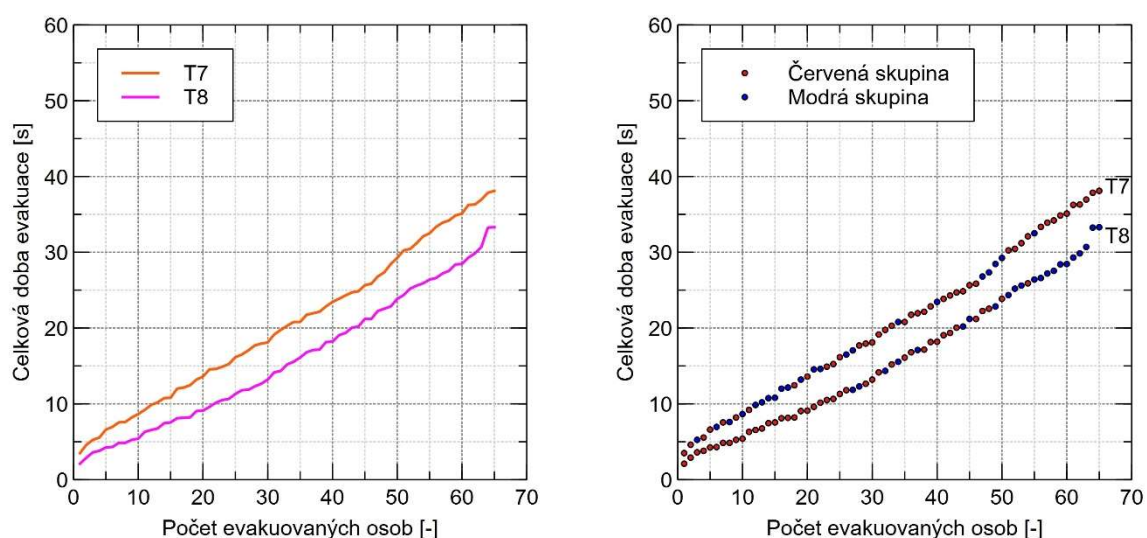
Obr. 50 Graf celkové doby evakuace běhů T3; T4; T5 a T6 (účastníci barevně odlišeni dle skupin)



U usazení modré skupiny ve spodní části místnosti (běhy T3 a T4 na Obr. 50a)) začali opouštět zástupci modré skupiny sledovaný prostor až na začátku druhé třetiny evakuace. Při běhu T4 opustil první člen modré skupiny přednáškovou místnost v čase 17,9 s (celková doba evakuace 53,4 s) jako 27. v pořadí. První účastník z modré skupiny při běhu T3 opustil sledovaný prostor ve 13,6 s (celková doba evakuace 35,95 s) jako 29. v pořadí.

Na Obr. 50b) jsou znázorněny grafy T5 a T6, ve kterých byli modří účastníci usazeni v horní části místnosti. Evakuace těchto dvou běhů byla zahájena členy modré skupiny, a poslední modří účastníci opustili sledovaný prostor ve stanoveném pořadí ke konci druhé třetiny. V případě běhu T6 opustil poslední zástupce této skupiny sledovaný prostor jako 44. v pořadí v čase 38,6 s (celková doba evakuace 55,3 s). V běhu T5 opustil poslední zástupce modré skupiny sledovaný prostor ve 27,8 s (celková doba evakuace 36,65 s) jako 47. v pořadí.

Následující graf na Obr. 51 ukazuje rozdíl celkové doby evakuace u rozsazení modré skupiny na krajních sedadlech u výstupu z uliček (T7) a ve středu uliček (T8). Při běhu T8 byla celková doba evakuace o 4,8 s kratší (87,40 %). Výsledky ukazují, že z provedených sektorových rozsazení mělo umístění modré skupiny na krajních místech v porovnání s jejich usazením uprostřed uliček nejvýraznější vliv na odlišnou dobu evakuace.



a) Graf celkové doby evakuace pro běh T7 a T8

b) Graf celkové doby evakuace pro běh T7 a T8 (účastníci barevně odlišení dle skupin)

Obr. 51 Graf celkové doby evakuace běhů T7 a T8

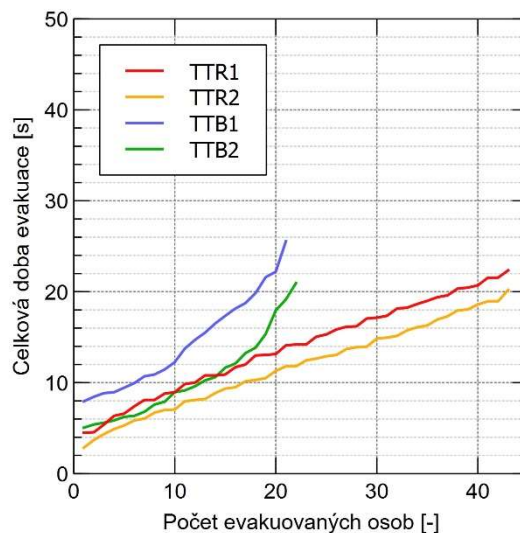
### 3.8.1.2 Výsledky referenčních běhů

Účastníci byli vybráni na základě populace ČR jak bylo popsáno v kapitole 3.3 Účastníci experimentu. Toto rozhodnutí ale zapříčinilo rozdílné zastoupení skupin. Skupinu červených (osoby bez předpokládaných pohybových omezení) tvořilo 43 účastníků a skupinu modrých (osoby s limitujícími vlastnostmi při evakuaci) zastupovalo 22 účastníků.

Obr. 52 ukazuje výsledné křivky referenčních běhů. Křivky pro jednotlivé skupiny jsou si velice podobné, liší se zejména v časech, kdy první a poslední účastník opustí místnost. Jak



u referenčních běhů pro červenou skupinu, tak i pro modrou skupinu jsou běhy, kde účastníci seděli v přední části místnosti, delší. Celková doba evakuace je pro účastníky červené skupiny, kteří jsou usazeni ve vrchní části přednáškové místnosti (TTR2), o 2,15 s kratší. Celková doba evakuace je o 6,4 s kratší pro účastníky modré skupiny, jež jsou usazeni ve vrchní části přednáškové místnosti (TTB2). Odlišnost mezi skupinami, která je z grafu patrná, je při závěru evakuace, kde se skupina červených evakuuje více lineárně. Během evakuace bylo pozorováno vzájemné ovlivňování účastníků modré skupiny, což potvrzuje předpoklad, že evakuace osob s limitujícími schopnostmi pohybu může probíhat pomaleji, což potvrzují i výsledky referenčních běhů TTB1 a TTB2.



Obr. 52 Graf celkové doby evakuace referenčních běhů

### 3.8.2 Chování osob v průběhu experimentu

Tato část se věnuje dvěma klíčovými aspekty. Za prvé zkoumá, jak účastníci volí směr při opouštění uliček, a za druhé se zaměřuje na volbu trasy, kterou účastníci preferují při evakuaci.

#### 3.8.2.1 Volba směru při opuštění uliček

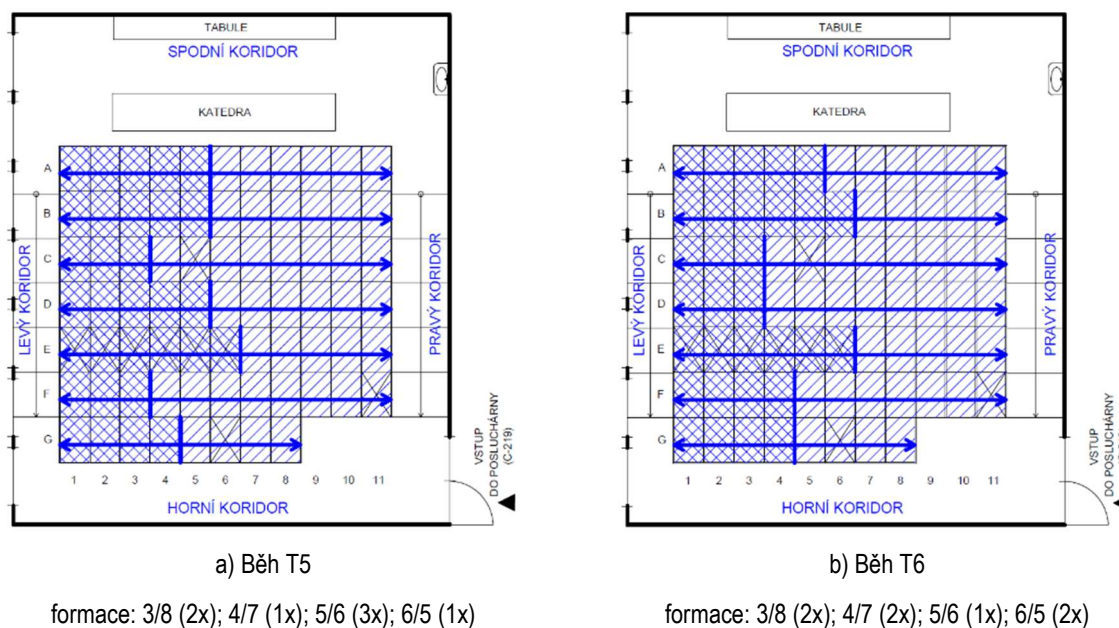
Účastníci měli možnost opustit uličku dvěma směry, konkrétně směrem na levý a pravý koridor. Vzhledem k tomu, že v uličce bylo k dispozici 11 míst k sezení, existovalo celkem 12 možností výstupů. V této práci jsou tyto možnosti označovány jako tzv. formace. Jednotlivé formace jsou identifikovány čísly od 0/11 po 11/0, přičemž každá formace popisuje, kolik účastníků opustilo prostor uličky směrem na levý a pravý koridor. Například formace 2/9 znamená, že 2 účastníci opustili uličku na levý koridor a 9 účastníků na koridor pravý. Všechny formace jsou vyobrazeny v Příloze 4.

V Tab. 9 je vyhodnoceno jakými formacemi účastníci opustili prostor uliček ve všech bězích. Formace 1/10 a 7/4 až 11/0 nebyly během experimentu využity. Při bězích T2 a T3 nastala situace, kdy celá řada opustila prostor uliček pravým směrem. Tento jev nastal v horních řadách, kdy levý koridor byl zaplněn účastníky ze spodní strany a účastníci byli nuceni využít pravý výstup. Ze získaných dat je možné tvrdit, že účastníci volí složitější cestu uličkou, která vede k východu nežli delší cestu, při které je nutné celý prostor sedadel obejít.

Tab. 9 Využití formace všech běhů

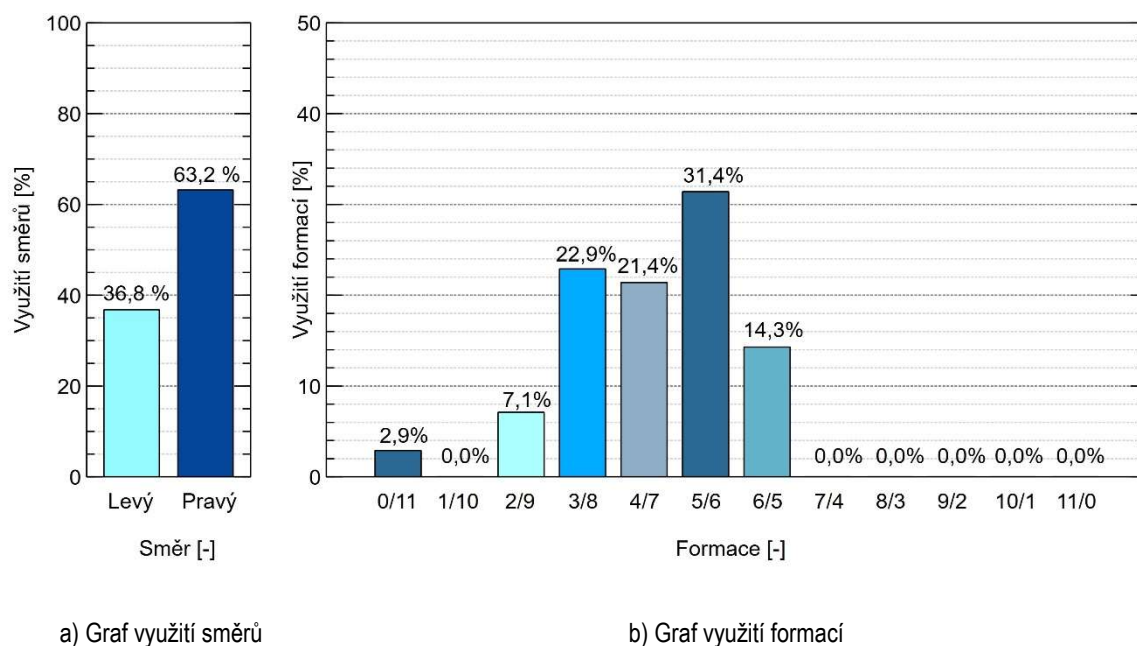
Označení formace	Počet nastalých formací (procentuální využití formací v procentech)									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
0/11	-	1 (14)	1 (14)	-	-	-	-	-	-	-
1/10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2/9	-	-	1 (14)	1 (14)	-	-	-	-	2 (29)	1 (14)
3/8	3 (43)	1 (14)	-	2 (29)	2 (29)	2 (29)	3 (43)	2 (29)	-	1 (14)
4/7	4 (57)	2 (29)	1 (14)	1 (14)	1 (14)	2 (29)	-	-	-	4 (57)
5/6	-	1 (14)	4 (57)	3 (43)	3 (43)	1 (14)	3 (43)	4 (57)	2 (29)	1 (14)
6/5	-	2 (29)	-	-	1 (14)	2 (29)	1 (14)	1 (14)	3 (43)	-
7/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8/3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10/1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Ukázka použitých formací výstupu z uliček při běhu T5 a T6 je zobrazena na Obr. 53. Zbylé formace jsou přiloženy v Příloze 5.



Obr. 53 Ukázka použitých formací běhu T5 a T6

Na Obr. 54 je převedena Tab. 9 do grafické podoby. Z grafu je patrné, že nejčastější využívanou formací je formace 5/6, s procentem využitelnosti 31,4 %, kdy pět účastníků opustilo prostor levým výstupem. Druhá nejvyužívanější formace je s 22,9 % formace 3/8 a hned za ní se drží formace 4/7 (21,4 %).



Obr. 54 Sloupcové grafy využití směrů a formací všech běhů

Ze získaných dat je možné určit, jaký směr výstupu účastníci preferují. Z Tab. 10 vyplývá, že více využívanou stranou výstupu je ve směru na pravý koridor (63,2 % účastníků), který se nachází blíže k východu z místnosti. Graf na Obr. 54a) ukazuje tento fakt v procentuálním zastoupení.

Tab. 10 Směr výstupu z uliček všech běhů

Směr výstup z uliček	Počet účastníků (procentuální využití směru výstupu z uliček v procentech)									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Pravý	44 (68)	44 (68)	41 (63)	41 (63)	40 (62)	40 (62)	41 (63)	41 (63)	38 (58)	41 (63)
Levý	21 (32)	21 (32)	24 (37)	24 (37)	25 (38)	25 (38)	24 (37)	24 (37)	27 (42)	24 (37)

Účastníci častěji preferovali směr k pravému koridoru, který se nacházel na straně místnosti s východem, i přesto, že tento směr zahrnoval delší průchod úzkým prostorem uliček. Naopak účastníci, kteří se rozhodli pro levý směr, se vyhnuli stísněnému průchodu, avšak za předpokladu, že museli projít levým a horním koridorem směřujícím k východu.

### 3.8.2.2 Volba trasy

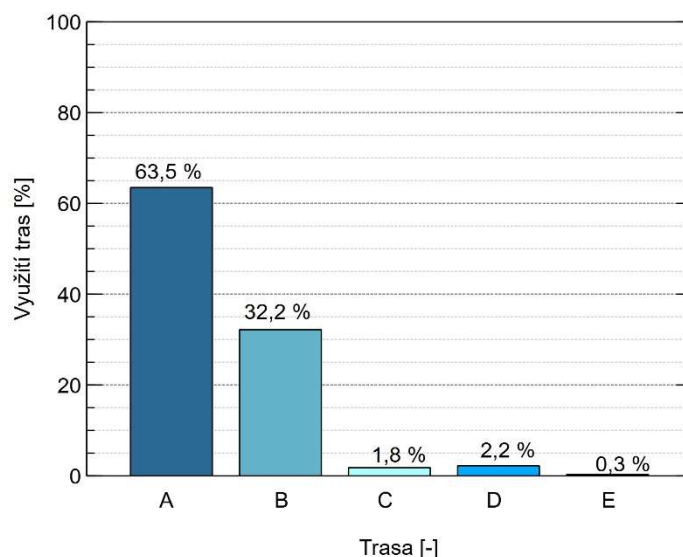
Využití tras všech běhů je shrnuto v Tab. 11. V experimentu bylo využito celkem 5 tras (graficky znázorněné v Příloze 6) pomocí kterých se účastníci rozhodli evakuovat přednáškovou místnost, a to konkrétně:

- trasa A – výstup na pravý koridor vedoucí k východu;
- trasa B – výstup na levý koridor a následné projití horním koridorem vedoucím k východu;
- trasa C – výstup na levý koridor, projití spodním koridorem na pravý koridor vedoucí k východu;
- trasa D – výstup na levý koridor, průchod uličkou na koridor pravý vedoucí k východu;
- trasa E – výstup na pravý koridor, průchod uličkou na koridor levý a následné vstoupení na horní koridor vedoucí k východu.

Tab. 11 Použité trasy všech běhů

Označení trasy	Počet účastníků (procentuální využití tras v procentech)									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
A	45 (69)	44 (68)	41 (63)	41 (63)	40 (62)	40 (62)	41 (63)	41 (63)	38 (59)	42 (65)
B	17 (26)	18 (28)	17 (26)	19 (29)	24 (36)	23 (35)	22 (34)	24 (37)	25 (38)	20 (30)
C	3 (5)	-	3 (5)	4 (6)	-	-	-	-	-	2 (3)
D	-	5 (6)	4 (6)	1 (2)	1 (2)	-	2 (3)	-	2 (3)	1 (2)
E	-	-	-	-	-	2 (3)	-	-	-	-

Grafické znázornění používaných tras zobrazuje Obr. 55. Nejvyužívanější trasou je trasa A, která umožňuje výstup na pravý koridor, který přímo vede k východu. Tuto cestu se rozhodlo použít 63,5 % účastníků v průběhu celého experimentu. Výstup na levý koridor a následné projití koridorem horním, který vede k východu (trasa B) preferovalo 32,2 % účastníků, a tímto využitím obsadila trasa B druhou příčku využitelnosti. Zbylí účastníci (4,3 %) se rozhodli projít složitějšími trasami C, D a E.



Obr. 55 Sloupcový graf vyžití tras

Nejméně využitou trasou je trasa E, kterou využili pouze 2 účastníci při běhu T6. Ze získaných videozáznamů je zřejmé, že tito účastníci byli usazeni ve spodní části místnosti a při výstupu na pravý koridor se dostali do fronty, která se v náporu evakuace nezmenšovala, tudíž jim přišlo efektivnějším řešením projití uličkou na koridor levý a zařazení do fronty na horním koridoru. Toto rozhodnutí jim rychlejší evakuaci nezajistilo, jelikož poslední evakuovaný z pravého koridoru, kde se předtím nacházeli tito dva zmiňovaní účastníci, evakuoval v čase 51,25 s. Účastníci, kteří zvolili trasu E opustili místnost v čase 53,65 s a 54,1 s.

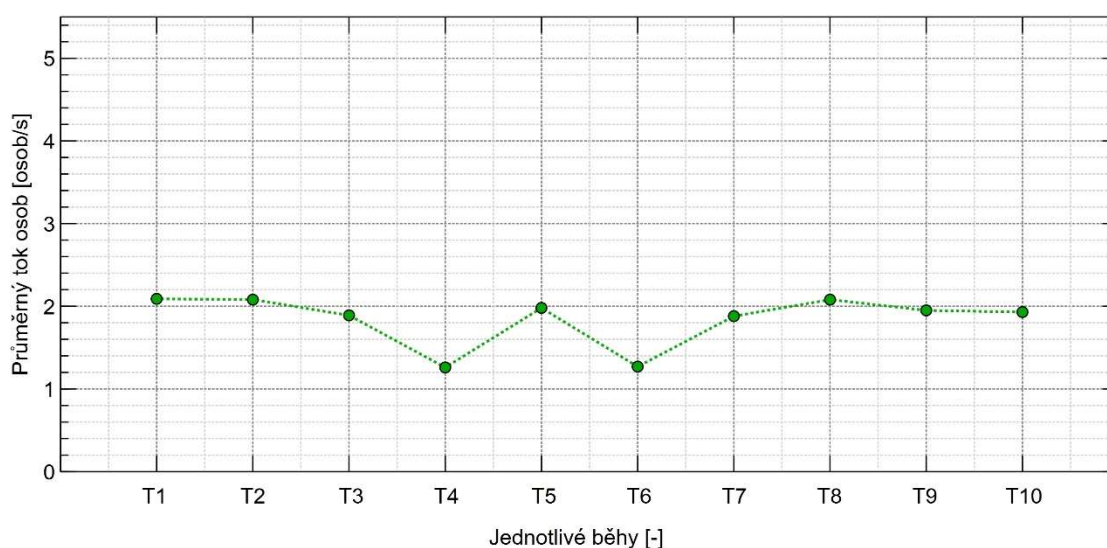
### 3.8.3 Průměrný tok osob

Při určování průměrného toku osob na úrovni východu byla zohledněna průměrná hodnota pro průměrný tok celé skupiny, tedy pro celkový počet účastníků – 65 osob. V Tab. 12 jsou vypsány toky osob pro jednotlivé běhy.

Tab. 12 Průměrný tok osob

Označení běhu	Průměrný tok osob [osob/s ; osob/min]	Označení běhu	Průměrný tok osob [osob/s ; osob/min]
T1	2,09 ; 125,40	T6	1,27 ; 76,20
T2	2,08 ; 124,80	T7	1,88 ; 112,80
T3	1,89 ; 113,40	T8	2,08 ; 124,80
T4	1,26 ; 75,60	T9	1,95 ; 117,00
T5	1,98 ; 118,80	T10	1,93 ; 115,80

Tab. 12 je pro přehlednost převedena do grafické podoby, kde je průměrný tok osob uveden v jednotkách osoby za sekundu.



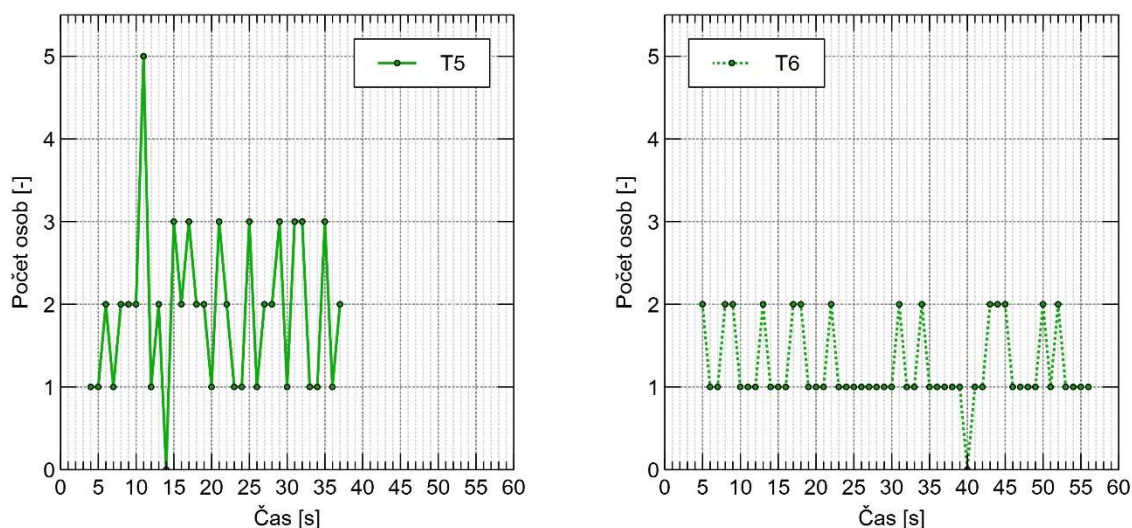
Obr. 56 Graf průměrného toku osob

Z grafu na Obr. 56 je patrné, že průměrný tok osob se při šířce východu 1600 mm drží v rozmezí 1,93 – 2,09 osob/s. Viditelný rozdíl je při bězích T4 a T6, kde šířka východu je zmenšena na polovinu. V tomto případě je průměrný tok osob 1,26 a 1,27 osob/s. Díky průměrnému toku osob je patrné, že sektorové rozsazení nemá na výsledný evakuační čas tak velký vliv jako šířka východu. Toky osob při stejných šířkách dveří se drží na stejné úrovni.

### 3.8.3.1 Tok osob v čase

Tok osob v čase je vyjádřen počtem účastníků, kteří opustili zkoumaný prostor za jednu vteřinu. Kompletní soubor grafů toků osob v čase pro všechny provedené běhy je k dispozici v Příloze 6. V následujícím textu jsou prezentovány grafy pro běhy T5 a T6, kde jsou všechny vstupní podmínky identické, s jedinou výjimkou – šířkou východu. U běhu T6 byla šířka východu zmenšena o polovinu. V obou těchto bězích byla modrá skupina umístěna v horní části místnosti.





a) Běh T5; šířka východu 1600 mm

b) Běh T6; šířka východu 800 mm

Obr. 57 Grafy toku osob v čase pro běh T5 a T6

Analýza grafů na Obr. 57 názorně ukazuje, že při šířce východu 1600 mm dosahuje tok osob vyšší hodnoty. Tato pozorování potvrzují předpoklad, že s větší šířkou východu klesá celková doba evakuace. Během běhu T5 bylo možné zaznamenat, že 5 osob dokázalo opustit místnost během jedné vteřiny, na rozdíl od běhu T6 (šířka východu 800 mm), kde maximální počet evakuovaných za sekundu nepřesáhl 2 osoby.

### 3.8.4 Doplnková měření

V tomto odstavci jsou představeny výsledky doplňkového měření. Doplňkové měření obsahovala zjištění půdorysného průmětu osob a běžné rychlosti osob.

#### 3.8.4.1 Půdorysný průmět osob

Půdorysný průmět je definován jako kruh s průměrem. Díky tomu, že máme změřeny všechny šířky ramen účastníků, je možno získat směrodatné odchylky, střední, minimální a maximální hodnoty každé kategorie (Tab. 13) a skupiny (Tab. 14). Získané šířky ramen všech účastníků jsou shrnuty v Příloze 8.

Tab. 13 Půdorysné rozměry dle kategorií

Kategorie účastníka	Skupina účastníka	Počet [-]	Střední hodnota [m]	Směrodatná odchylka [m]	Min. [m]	Max. [m]
dospělí	červená	43	0,432	0,037	0,369	0,499
senior	modrá	5	0,435	0,018	0,414	0,453
těhotná žena	modrá	1	0,390	-	-	-
matka s dítětem v šátku	modrá	2	0,434	0,013	0,425	0,443
handicapovaní	modrá	7	0,415	0,038	0,362	0,463
rodič	modrá	3	0,429	0,039	0,384	0,452
malé dítě	modrá	4	0,285	0,023	0,254	0,303

Tab. 14 Půdorysné rozměry dle skupin

Skupina účastníka	Počet [-]	Střední hodnota [m]	Směrodatná odchylka [m]	Min. [m]	Max. [m]
červená	43	0,432	0,037	0,369	0,499
modrá	22	0,399	0,062	0,254	0,463

### 3.8.4.2 Běžná rychlost osob

Běžná rychlost účastníků, což znamená rychlost neovlivněná vnějšími vlivy, byla měřena pomocí kamer umístěných k monitorování průchodu účastníků zkoumaným koridorem. Konkrétní hodnoty těchto rychlostí jsou prezentovány v Příloze 8. V následující Tab. 15 jsou tyto hodnoty shrnuty dle jednotlivých kategorií. Tab. 16 popisuje tyto hodnoty pro jednotlivé skupiny.

Tab. 15 Běžné rychlosti dle kategorií

Kategorie účastníka	Skupina účastníka	Počet [-]	Střední hodnota [m/s]	Směrodatná odchylka [m/s]	Min. [m/s]	Max. [m/s]
dospělí	červená	43	1,653	0,214	1,202	2,310
senior	modrá	5	1,389	0,144	1,199	1,531
těhotná žena	modrá	1	1,480	-	-	-
matka s dítětem v šátku	modrá	2	1,515	0,118	1,432	1,598
handicapovaní	modrá	7	1,314	0,228	0,991	1,598
rodič	modrá	3	1,672	0,040	1,642	1,718
malé dítě	modrá	4	1,310	0,215	1,026	1,542

Tab. 16 Běžné rychlosti dle skupin

Skupina účastníka	Počet [-]	Střední hodnota [m/s]	Směrodatná odchylka [m/s]	Min. [m/s]	Max. [m/s]
červená	43	1,653	0,214	1,202	2,310
modrá	22	1,405	0,206	0,991	1,718

## 3.9 Shrnutí

Následující odstavec představuje souhrn získaných poznatků a dat. Pro každý sledovaný parametr jsou identifikovány klíčové informace, které vyplynuly z experimentu:

- **Celková doba evakuace** v průběhu běhů s šířkou východu 1600 mm se pohybovala v intervalu 33,30 s až 38,10 s. V případě dvou běhů s redukovanou šířkou východu na polovinu (800 mm) byly naměřeny celkové časy evakuace (TET) 53,40 s a 55,30 s. Nejkratší doba evakuace byla zaznamenána při sektorovém usazení modré skupiny uprostřed uliček, naopak nejdelší trvání bylo zjištěno, když modrá skupina seděla na krajích u koridorů. Experiment jednoznačně prokázal, že umístění osob s omezenou schopností pohybu u výstupu z prostoru významně zpomalí celý proces evakuace.
- **Průměrný tok osob** při šířce východu 1600 mm se udržoval v rozmezí 1,93 až 2,09 osob/s. Zřetelný rozdíl se projevoval v bězích T4 a T6, kde byla šířka východu redukována na polovinu. V těchto případech byl průměrný tok osob 1,26 a 1,27 osob/s. Experiment ukázal, že snížení šířky východu na polovinu vedlo ke snížení průměrného toku osob o 37,1 %.



- **Chování osob** bylo hodnoceno z hlediska dvou aspektů: směru, kterým účastníci opouštěli uličky, a trajektorie, kterou následovali. V prvním běhu byl převažujícím směrem výstupu pravý směr, který si zvolilo 63,2 % účastníků. Celkem bylo identifikováno pět různých tras během provedeného experimentu. Nejfrekventovanější trasou byl výstup pravým koridorem směrem k východu, který zvolilo 63,5 % účastníků. Naopak nejméně využívanou trasou byl výstup na pravý koridor, průchod uličkou na koridor levý a následné vstoupení na horní koridor vedoucí k východu, který zvolilo pouze 0,3 % účastníků.
- **Tok osob v čase** potvrdil, že se s větší šířkou východu zvyšuje počet jednotlivců, kteří dokážou zkoumaný prostor opustit. V bězích s šířkou východu 1600 mm bylo možné za jednu vteřinu evakuovat až 5 osob, což je výrazný rozdíl oproti běhům s šířkou východu 800 mm. V těchto případech opustily prostor pouze 2 osoby za vteřinu.
- **Půdorysný rozměr osob** byl jedním z parametrů získaných během doplňkového měření. Na základě naměřených hodnot bylo možné analyzovat rozmezí šířky ramen, střední hodnoty a směrodatné odchytky pro každou skupinu účastníků. Členové červené skupiny vykazovali šířku ramen v rozmezí od 0,369 m do 0,499 m. Střední hodnota byla stanovena na 0,432 m s odchytkou 0,037 m. Šířka ramen účastníků modré skupiny se pohybovala v rozmezí od 0,254 m do 0,463 m, přičemž střední hodnota byla určena jako 0,399 m/s odchytkou 0,062 m.
- **Běžná rychlost osob** představovala druhý z parametrů získaných během doplňkového měření. Na základě naměřených hodnot bylo možné analyzovat rozmezí rychlostí, střední hodnoty a směrodatné odchytky pro každou skupinu účastníků. Členové červené skupiny vykazovali rychlosti v rozmezí od 1,202 m/s do 2,310 m/s. Střední hodnota byla stanovena na 1,653 m/s s odchytkou 0,214 m/s. Účastníci modré skupiny dosahovali rychlostí v rozmezí od 0,991 m/s do 1,718 m/s, přičemž střední hodnota byla určena jako 1,405 m/s s odchytkou 0,206 m/s.

## 4 Modelování v programu Pathfinder

Jak bylo naznačeno v úvodu, jedním ne méně důležitým zaměřením této diplomové práce je využití získaných experimentálních dat popsanych v předchozí kapitole v matematickém modelování evakuace osob. V kontextu modelování evakuace v prostoru s řadami sedadel, který je omezený a geometricky složitý, mohou tato omezení významně ovlivnit výsledky.

V této kapitole je podrobně popsáno provedení simulace několika modelových evakuačních scénářů v určeném výpočetním programu. Obsahuje jak popis modelovaných evakuačních scénářů, geometrických a polohových vstupních parametrů, rozmístění a charakteristiky účastníků, tak validaci zvoleného modelu a prezentaci dosažených výsledků. Pro vytvoření modelu evakuace byl použit evakuační program Pathfinder.

### 4.1 Základní informace o evakuačním programu Pathfinder

Pathfinder je softwarový nástroj, který slouží k simulaci evakuace osob z budov a dalších uzavřených prostor na základě agentního modelování [20]. Program byl vyvinut společností Thunderhead Engineering, která se specializuje na vývoj softwarových aplikací pro simulace v oblasti požární bezpečnosti a evakuace.

Pro simulaci pohybu osob nabízí program Pathfinder dva módy: SFPE mód a Steering mód. SFPE mód vychází z průzkumů uvedených v SFPE Handbook [21], kde agenti mají přednastavené chování, což znamená, že existuje vzájemná závislost mezi rychlostí, hustotou osob a specifickým tokem osob. Steering mód [22] je založen na nezávislém pohybu agentů k jejich cíli, přičemž se současně vyhýbají ostatním agentům a překážkám na své trase. Specifické toky nejsou explicitně definovány, ale vznikají z interakce mezi agentem a okolím, ve kterém se pohybuje.

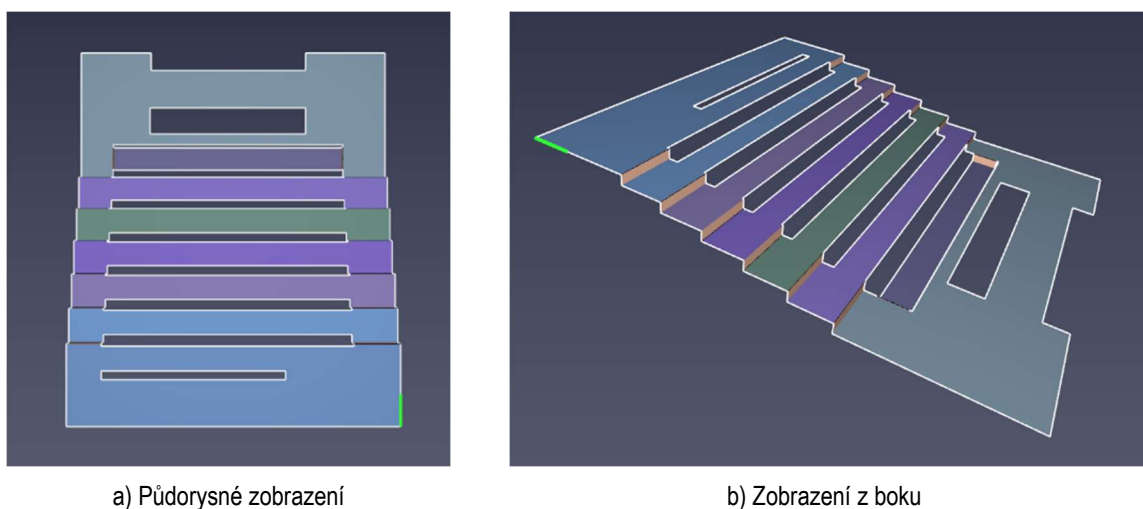
Tento program je využíván v oblasti požárního inženýrství a bezpečnosti budov k posouzení a vylepšení evakuačních plánů a návrhů. Je vhodný pro použití v různých typech budov, od komerčních až po průmyslové a veřejné prostory. Pathfinder poskytuje uživatelům prostředky k simulaci a analýze evakuačních procesů, což pomáhá zlepšit bezpečnost a efektivitu evakuace v případě nebezpečných situací.

Pro vytvoření modelů v této diplomové práci byla využita aplikace Pathfinder ve verzi 2023, vyvinutá již zmíněnou firmou Thunderhead Engineering, prostřednictvím poskytnuté studentské licence. Volba tohoto programu byla založena na jeho dostupnosti, schopnosti reprezentace geometrie prostoru a rozsáhlé nabídce měnitelných vstupních parametrů ve stávající verzi softwaru.

### 4.2 Vstupní data

#### 4.2.1 Geometrie modelovaného prostoru

Pro dosažení výsledků odpovídajících provedenému evakuačnímu experimentu byl pečlivě vytvořen model přednáškové místnosti, který věrně reprodukuje prostor a jeho dispozici. Geometrie modelového prostoru byla získána prostřednictvím přesného zaměření místnosti a následného vytvoření půdorysného výkresu, což umožnilo detailní zachycení rozmístění sedadel, koridorů, schodišť a únikových východů. Vizualizace modelovaného prostoru je vidět na Obr. 58.



Obr. 58 Vizualizace modelovaného prostoru v programu Pathfinder

Tento model přesně odráží topografii skutečné místnosti, což zajišťuje věrné simulační prostředí pro provádění evakuačních scénářů. Při vytváření modelu byly zachovány klíčové charakteristiky prostoru, které mohou ovlivnit chování osob během evakuace. Detailní přístup k reprodukci dispozice místnosti poskytuje důvěryhodný základ pro následné analýzy a vyhodnocení evakuačních situací, které jsou klíčové pro validaci modelu v rámci experimentálních dat.

#### 4.2.2 Charakteristika agentů

Nastavení agentů vychází z provedeného experimentu. Charakteristiky každého agenta, jako je půdorysný průmět a rychlost chůze, odpovídají naměřeným údajům z doplňkového měření popsaného v kapitole 3.8.4 Doplňková měření. Tyto specifikace jsou uvedeny v Příloze 8. Usazení agentů kopíruje rozsazení účastníků proběhlého experimentu.

#### 4.2.3 Modelové evakuační scénáře

V praktické části této diplomové práce je přistoupeno ke dvěma validacím. První z nich ověřuje základní model, zatímco druhá je zaměřena na validaci upraveného modelu. K provedení validace upraveného modelu došlo vzhledem k tomu, že základní model nedostatečně splnil všechny parametry, jak je popsáno v kapitole 4.4.1 Základní model.

Při validaci základního modelu bylo provedeno porovnání 20 identických simulací, a z těchto simulací byl pro kontrolní účely získán průměr. Během tohoto ověření bylo zjištěno, že simulace vykazují výraznou podobnost a po průběhu 10 simulací se opakují. Z tohoto důvodu byl při následném srovnání použit pouze průměr z 10 simulací.

### 4.3 Porovnání experimentálních a modelových výsledků

Pro srovnání experimentálních a modelových výsledků jsou využity čtyři parametry, jež byly získány v rámci experimentu: celková doba evakuace (TET), průměrný tok osob, tok osob v čase a chování osob, konkrétně volba trasy.

Grafy v této kapitole obsahují šedé křivky reprezentující jednotlivá opakování simulačního modelu, modrá/červená křivka odpovídá průměrným hodnotám provedených opakování simulace a černá křivka představuje data naměřená během reálného experimentu. Křivky průměrných hodnot simulace jsou barevně rozlišeny dle druhu validace:

- **modrá křivka** je použita pro průměrné hodnoty simulace při validaci **základního** modelu;
- **červená křivka** odpovídá průměrným hodnotám simulace při validaci **upraveného** modelu.

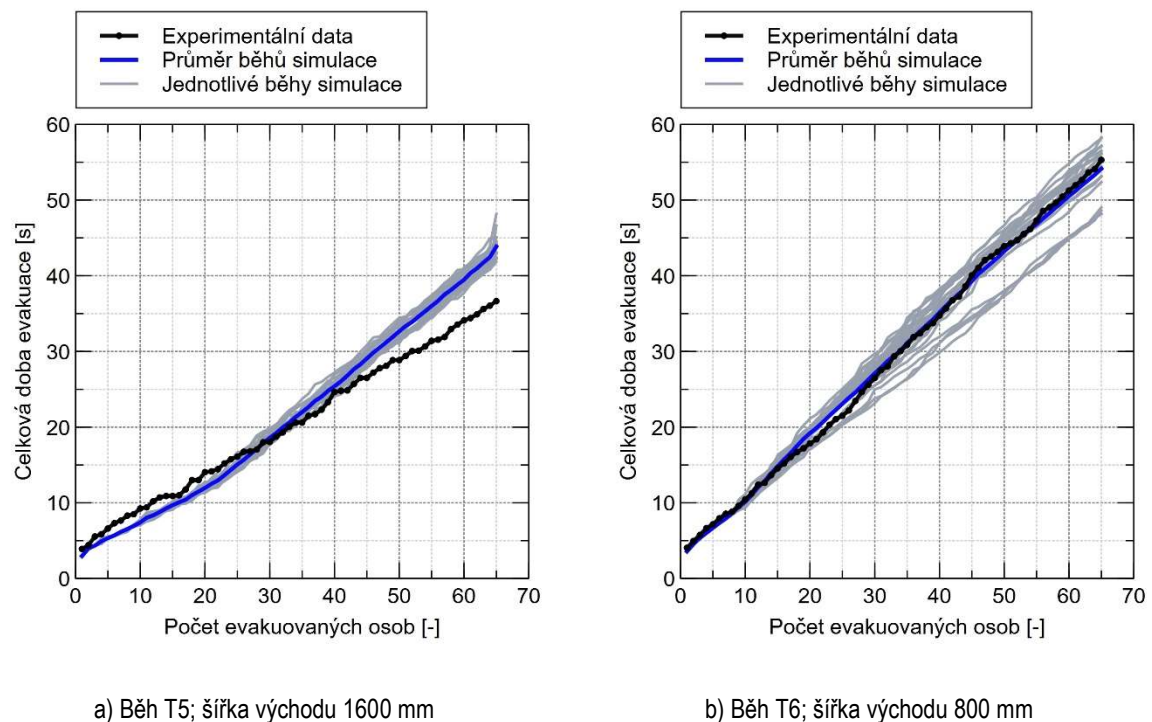
V této kapitole jsou porovnány běhy T5 a T6, jelikož při těchto dvou bězích byli účastníci usazeni do stejných sektorů na ta samá místa. Rozdíl nastal v tom, že při běhu T6 byla šířka východu snížena na polovinu (800 mm). Výsledky všech běhů jsou k uvidění v Příloze 9, 10, 11 a 12.

#### 4.3.1 Validace základního modelu

Základní model byl vytvořen dle vstupních dat popsaných v kapitole 4.2 Vstupní data bez dalších uživatelských nastaveních (jako je volba trasy). Sektorové rozdělení je zachováno ve stejném stavu jako během experimentu pro každý běh a osoby jsou usazeni na táž místa. Také rychlosti a rozměry jednotlivých osob jsou nastaveny dle získaných dat z experimentu.

##### 4.3.1.1 Porovnání křivek TET

Na Obr. 59 jsou zvýrazněny běhy, u kterých jsou prezentovány výsledky porovnání pro běh T5 se šířkou východu 1600 mm (Obr. 59a)) a pro běh T6 se šířkou východu 800 mm (Obr. 59b)). Veškerá srovnání křivek pro všechny běhy jsou znázorněna v Příloze 9.

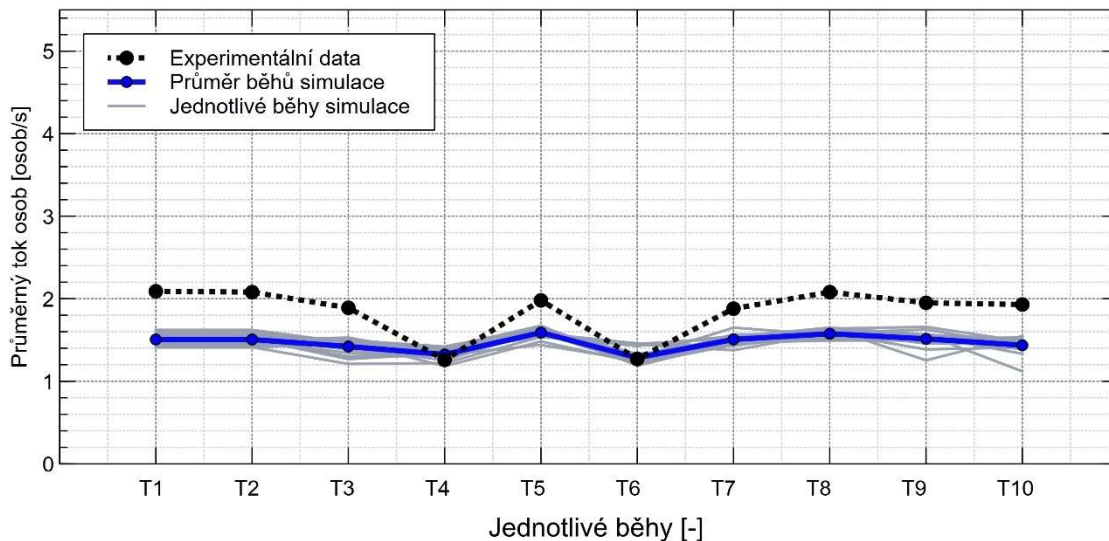


Obr. 59 Grafy porovnání křivek TET pro běh T5 a T6; základní validace

Ve většině případů jsou naměřené celkové doby evakuace během experimentu srovnatelné nebo dokonce nižší než průměrné hodnoty z dvaceti provedených simulačních opakování, jak je patrné z grafů na Obr. 59 a v Příloze 9.

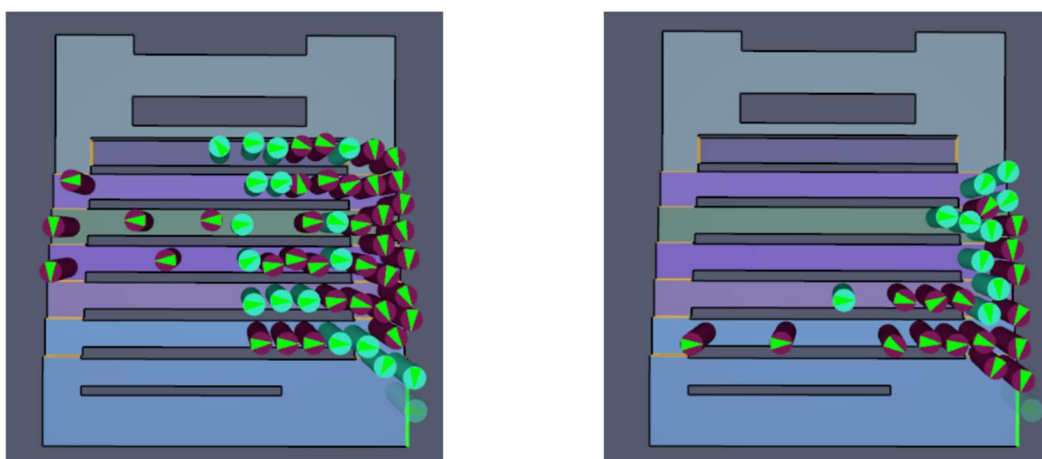
### 4.3.1.2 Porovnání průměrného toku osob

Černá čárkovaná křivka znázorňuje průměrný tok osob, který nastal během reálného experimentu. Jak je vidět z Obr. 60, tak pokles byl zjištěn při bězích, kde byla zmenšena šířka východu na polovinu (800 mm). Průměrný tok osob se při simulacích držel na stejných či nižších hranicích.



Obr. 60 Graf porovnání průměrného toku osob při základní validaci

Modrá křivka znázorňující průměr všech běhů simulace nevykazuje takový rozdíl průměrného toku osob při změnách šířky východu. Tento fakt je zapříčiněn tím, že agenti při simulacích nevyužívají plnou šíři dveří, tudíž prochází stejnou frekvencí jako agenti při bězích s polovičním východem. Při validaci základního modelu agenti neměli možnost využít plnou šíři, jelikož se nevytvořila fronta na horním koridoru, jak popisuje kapitola 4.3.1.4 Volba trasy a Obr. 61.



a) Běh T1; šířka východu 1600 mm; zobrazení v 18,1 s

b) Běh T1; šířka východu 1600 mm; zobrazení v 44,0 s

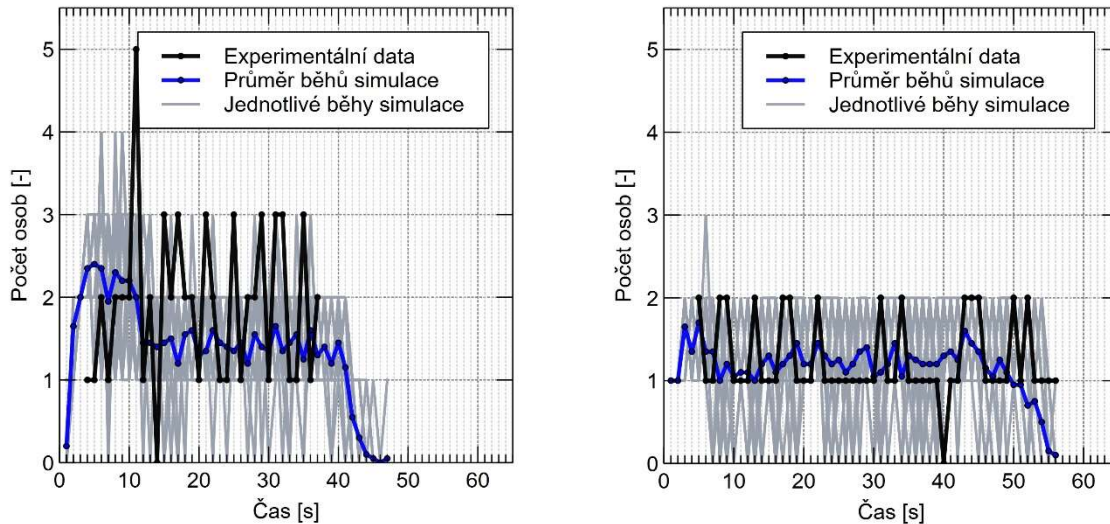
Obr. 61 Vizualizace způsobu odchodu agentů ze sledovaného prostoru; základní validace

### 4.3.1.3 Porovnání toků osob v čase

Na Obr. 62 jsou vybrány grafy běhů T5 (Obr. 62a)) a T6 (Obr. 62b)). Z grafů je patrné, že tok osob v čase při bězích se šířkou východu 800 mm se u reálného experimentu drží v úrovni toků osob



v simulacích. Při bězích se šířkou východu 1600 mm jsou toky osob během reálného experimentu vyšší. Tyto výsledky odpovídají průměrnému toku osob, jež je popsán v kapitole 4.3.1.2 Porovnání průměrného toku osob. Všechny grafy porovnání toků osob v čase jednotlivých běhů jsou vidět v Příloze 10.



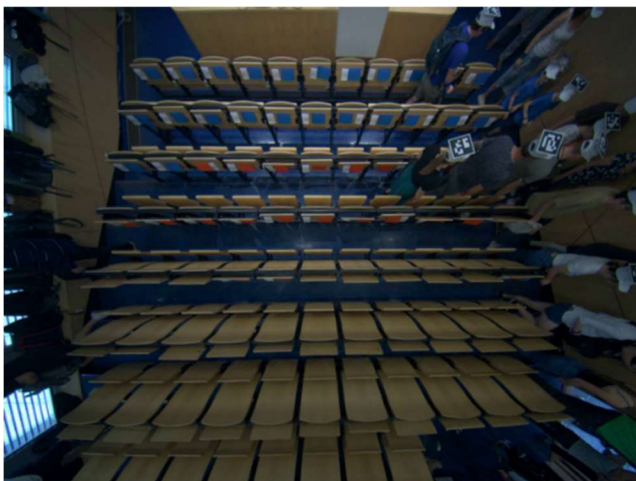
a) Běh T5; šířka východu 1600 mm

b) Běh T6; šířka východu 800 mm

Obr. 62 Grafy porovnání toků osob při základní validaci v čase pro běh T5 a T6

#### 4.3.1.4 Volba trasy

Volba trasy je posouzena vizuálním způsobem. Účastníci při reálném experimentu, opouštěli sledovaný prostor ve vzniklých dvou frontách před východem. Jedna z front je tvořena na pravém koridoru a druhá na koridoru horním. Toto tvrzení je ilustrováno na Obr. 63.



a) Půdorysné zobrazení (kamera č. 7)

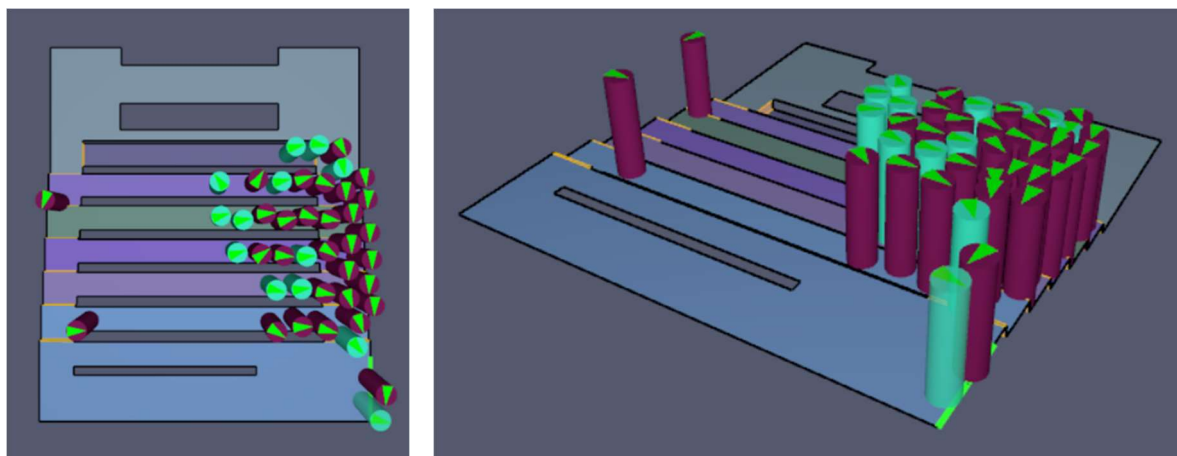


b) Zobrazení z boku (kamera č. 3)

Obr. 63 Záběr evakuace z reálného experimentu

Během simulací se fronta vytvořila pouze na pravém koridoru, jak je znázorněno na Obr. 64. Tento jev při simulaci nesouhlasí se situací ve skutečném experimentu, což mělo dopad jak na celkový průběh evakuace, tak výsledné evakuační časy.





a) Půdorysné zobrazení

b) Zobrazení z boku

Obr. 64 Vizualizace evakuace při otevřené validaci v programu Pathfinder; zobrazení v 16 s

#### 4.3.1.5 Shrnutí

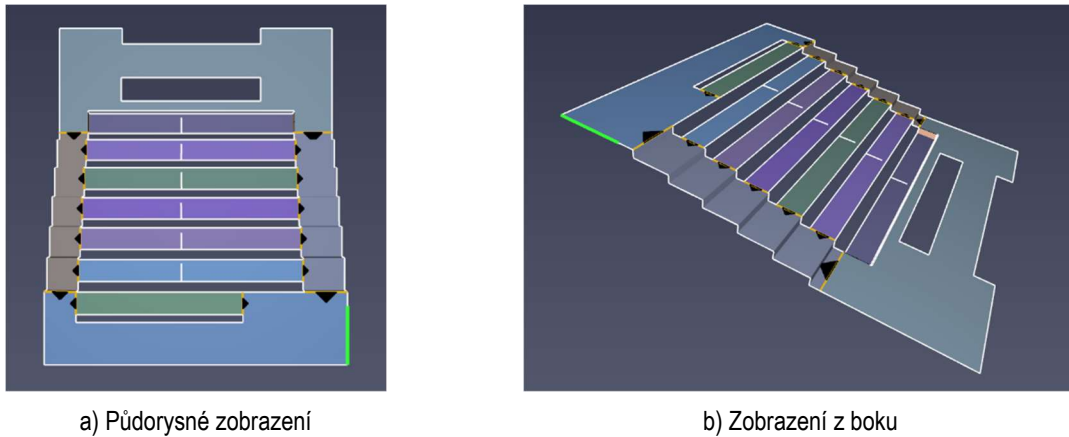
Následující odstavec prezentuje souhrn porovnání mezi experimentálními a modelovými simulačními výsledky základního modelu. Čtyři klíčové aspekty zahrnují celkovou dobu evakuace, průměrný tok osob, tok osob v čase a volbu trasy.

- **Celková doba evakuace;** křivky celkové doby evakuace v simulacích, zejména při šířce východu 1600 mm, vykazují strmější průběh, což vede k delším celkovým dobám evakuace. Tato situace pravděpodobně vychází z absence fronty na horním koridoru, tudíž šířka dveří nebyla využívána v plné šíři.
- **Průměrný tok osob;** průměrné toky osob v simulacích s šířkou východu 800 mm odpovídají průměrnému toku osob z proběhlého experimentu. V případě simulací s východem šířky 1600 mm jsou průměrné toky osob nižší, jelikož není využívána plná šíře dveří. Tuto skutečnost také způsobuje chybějící fronta na horním koridoru.
- **Tok osob v čase;** množství osob evakuovaných za jednotku času reflektuje průměrný tok osob. V případě běhů s šířkou východu 800 mm jsou simulované a experimentální toky osob v čase podobné. Simulované toky osob v čase při šířce východu 1600 mm jsou nižší kvůli absenci fronty na horním koridoru, což způsobuje nevyužití celkové šíře dveří.
- **Volba trasy;** chování agentů při volbě trasy v simulacích neodpovídá situaci ve skutečném experimentu, zejména vytváření dvou front před východem. Tato situace nepříznivě ovlivnila předchozí parametry a díky tomu je nutné provést podrobnější validaci a přizpůsobení modelu.

#### 4.3.2 Validace upraveného modelu

Vzhledem k tomu, že základní validace neposkytuje dostatečně přesné výsledky, je nezbytné přejít k podrobnější validaci, která představuje rozšíření základního modelu o další opatření. Tyto dodatečné kroky mají za cíl simulovat situace vytváření front i na horním koridoru, což odpovídá reálným podmínkám experimentu. Mezi tato opatření, která jsou vidět na Obr. 65 patří:

- přetvoření levého a pravého koridoru na ucelené místnosti;
- nastavení výstupu z uliček a z koridorů jako jednosměrné;
- rozdělení uliček na formaci 5/6.



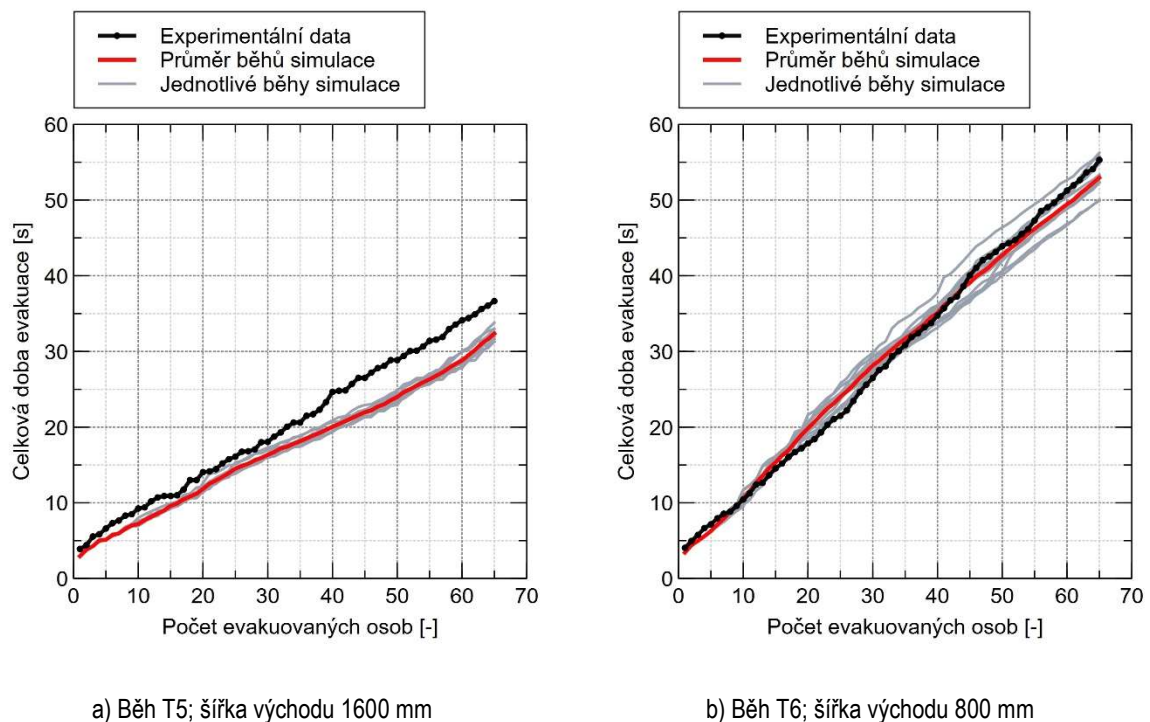
a) Půdorysné zobrazení

b) Zobrazení z boku

Obr. 65 Vizualizace modelovaného prostředí pro podrobnější validaci v programu Pathfinder

#### 4.3.2.1 Porovnání křivek TET

Na Obr. 66 jsou zvýrazněny běhy, pro které jsou prezentovány výsledky porovnání. Pro zachování přehlednosti byly vybrány stejné běhy jako při základní validaci, konkrétně pro běh T5 se šířkou východu 1600 mm (Obr. 66a) a pro běh T6 se šířkou východu 800 mm (Obr. 66b)). Kompletní srovnání křivek pro všechny běhy je dostupné v Příloze 11.



a) Běh T5; šířka východu 1600 mm

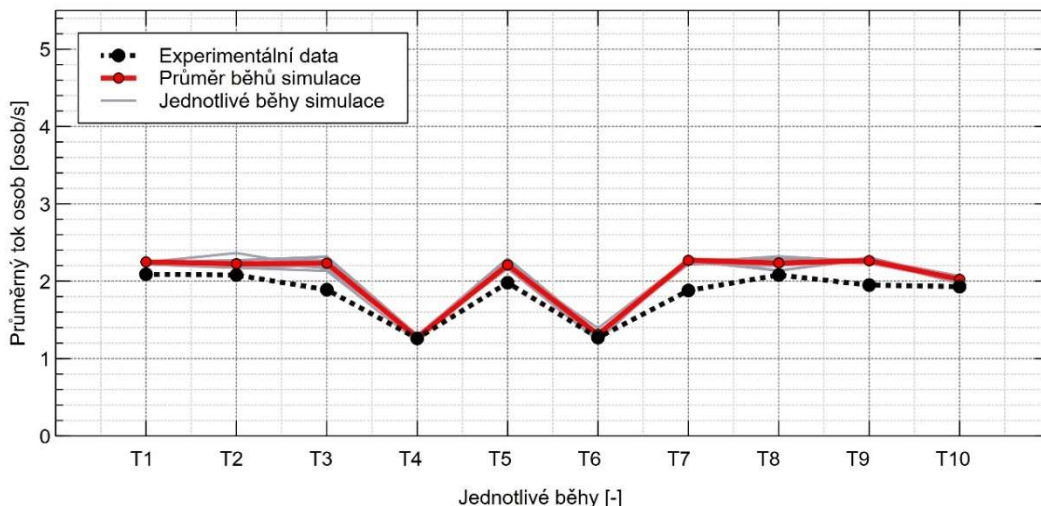
b) Běh T6; šířka východu 800 mm

Obr. 66 Grafy porovnání křivek TET pro běh T5 a T6; podrobnější validace

Na základě podrobnějšího uživatelského nastavení v upraveném modelu jsou naměřené celkové doby evakuace během experimentu s šířkou východu 800 mm srovnatelné s provedenými simulacemi. V případě běhů s šířkou východu 1600 mm jsou křivky celkových dob evakuace ve většině případů srovnatelné s proběhlým experimentem. V některých případech provedená opatření v simulacích výrazně zrychlila celkovou dobu evakuace, což vedlo k tomu, že simulace byla rychlejší než skutečný experiment, konkrétně při bězích T1, T2, T5 a T7. Grafy celkových dob evakuace všech běhů jsou zobrazeny v Příloze 11.

### 4.3.2.2 Porovnání průměrného toku osob

Černá čárkovaná křivka znázorňuje průměrný tok osob, který nastal během reálného experimentu. Jak je vidět z Obr. 67, tak pokles byl zjištěn při bězích, kde byla zmenšena šířka východu na polovinu (800 mm). Průměrný tok osob se při simulacích držel vyšších hranic, což potvrzuje fakt, že celková doba během experimentu je pomalejší, než nastala při simulacích.

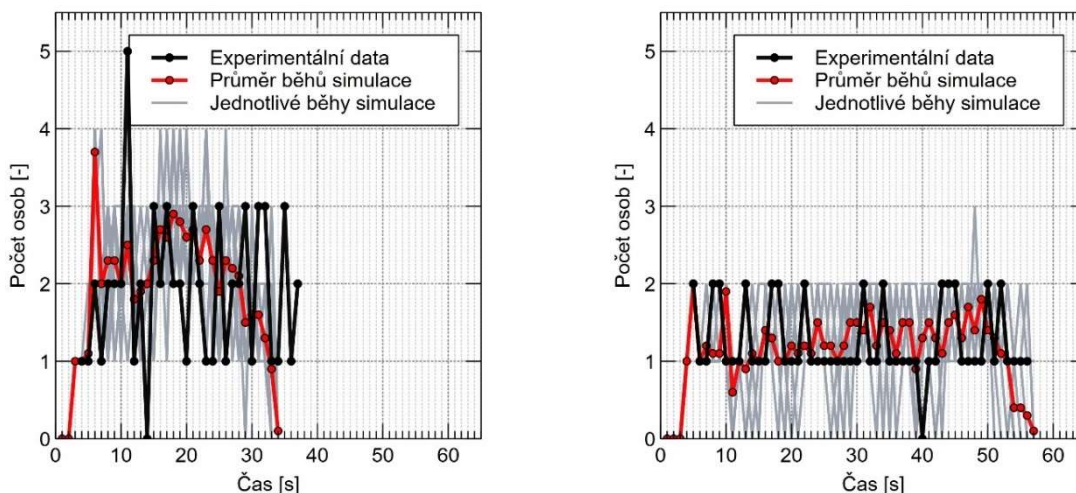


Obr. 67 Graf porovnání průměrného toku osob při podrobnější validaci

Oproti simulacím průměrného toku osob základního modelu agenti opouštěli v upraveném modelu místnost ve stejných frekvencích. Díky podrobnějšímu uživatelskému nastavení modelu odpovídá průměrný tok osob upraveného modelu více reálné situaci.

### 4.3.2.3 Porovnání toků osob v čase

Na Obr. 68 jsou vybrány grafy běhů T5 (Obr. 68a)) a T6 (Obr. 68b)). Z grafů je patrné, že tok osob v čase reálného experimentu se udržuje na srovnatelné úrovni s toky osob simulací, což představuje vylepšení ve srovnání se základním modelem. Grafy porovnání toků osob v čase všech běhů jsou vidět v Příloze 12.



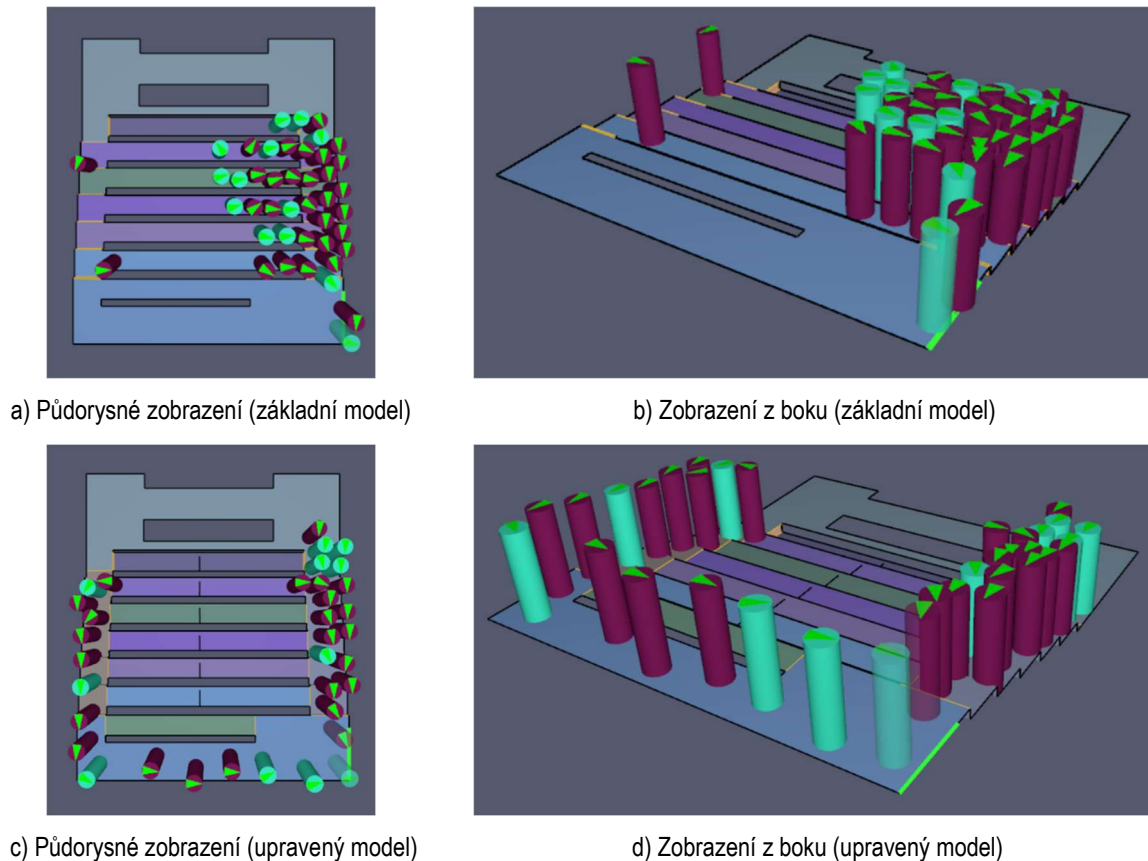
a) Běh T5; šířka východu 1600 mm

b) Běh T6; šířka východu 800 mm

Obr. 68 Grafy porovnání toků osob při podrobnější validaci v čase pro běh T5 a T6

#### 4.3.2.4 Volba trasy

Během skutečného experimentu se objevuje situace, kdy před východem vznikají dvě fronty. Jedna z front se tvoří na pravém koridoru a druhá na horním koridoru. Vytvoření obou front bylo dosaženo prostřednictvím podrobnějšího uživatelského nastavení modelu. Rozdíl ve volbě tras při validaci základního a upraveného modelu je patrný na Obr. 69, kde obrázky a) a b) jsou převzaty z kap. 4.3.1.4 Volba trasy pro lepší ilustraci rozdílů.



Obr. 69 Porovnání volby tras při validaci základního a upraveného modelu; zobrazení v 16 s

#### 4.3.2.5 Shrnutí

Následující odstavec poskytuje shrnutí srovnání mezi experimentálními a simulačními výsledky upraveného modelu. Čtyři klíčové aspekty zahrnují celkovou dobu evakuace, průměrný tok osob, tok osob v čase a volbu trasy.

- **Celková doba evakuace;** křivky celkové doby evakuace během experimentů s šířkou východu 800 mm jsou srovnatelné s výsledky provedených simulací. Naopak, v případě běhů s šířkou východu 1600 mm jsou křivky celkových dob evakuace v některých případech mírnější. Přijatá opatření v simulacích výrazně zrychlila celkovou dobu evakuace, což vedlo k tomu, že simulace byla rychlejší než skutečné experimenty.
- **Průměrný tok osob;** průměrný tok osob v simulacích dosahuje vyšších hodnot než jsou experimentální hodnoty, což koresponduje s rychlejšími celkovými dobami evakuace při simulacích. Avšak tyto výsledky výrazněji odpovídají experimentálním datům než v případě základního modelu.
- **Tok osob v čase;** množství osob evakuovaných za jednotku času v simulacích, se pohybuje na srovnatelné (u běhů s šířkou východu 800 mm) či vyšší (u běhů s šířkou východu

1600 mm) úrovni s provedeným experimentem. Zlepšení této situace oproti základnímu modelu bylo dosaženo vytvořením fronty na horním koridoru, což umožnilo plné využití šíře dveří.

- **Volba trasy;** chování agentů při volbě tras v simulacích odpovídá situaci ve skutečném experimentu, zejména co se týče vytváření dvou front před východem; jedna na levém koridoru a druhá na horním koridoru.

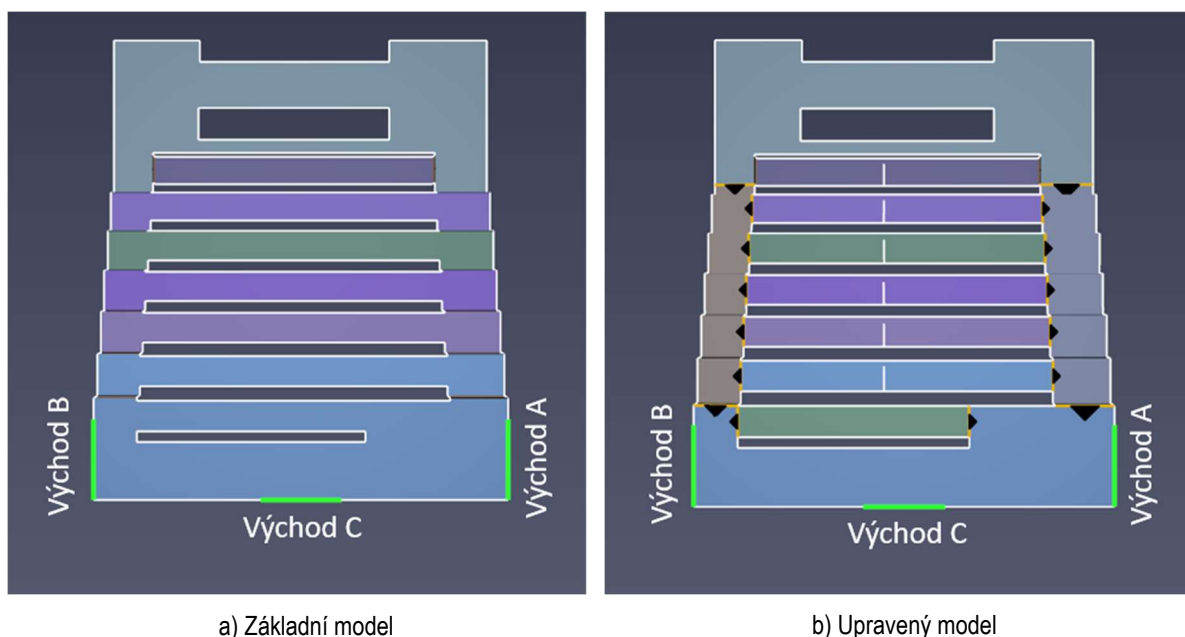
Upravený model prokázal větší podobnost s reálným experimentem, zejména co se týče celkových dob evakuace, toků osob v čase a volby tras. Tato shoda byla dosažena prostřednictvím detailnějšího uživatelského nastavení, které umožnilo vznik fronty na horním koridoru, čímž bylo docíleno využití plné šíře dveří. Nicméně, tato vylepšení vyžadují zásah do konfigurace programu Pathfinder, což představuje náročnější proces pro uživatele. Celkově lze konstatovat, že upravený model poskytuje přesnější simulaci evakuace, avšak s dodatečnými nároky na konfiguraci.

#### 4.4 Případová studie

Následující kapitola se zabývá případovou studií, která hodnotí vliv umístění východu, popř. dvou východů na evakuaci a samotný evakuační model. Cílem této studie je zjištění, jak má být model nadefinován, aby co nejvěrněji odpovídal reálné situaci. A také ověření tohoto modelu, zda ho je možné použít pouze pro tento zkoumaný prostor nebo pro místnosti různé geometrie.

Geometrie místnosti je v rámci této studie zachována tak, jak byla při skutečném experimentu. Nastavení modelu zůstane dle validací ve dvou formách:

- základní model (Obr. 70a)) – geometrie bez opatření (viz kap. 4.3.1 Validace základního modelu);
- upravený model (Obr. 70b)) – geometrie s opatřeními (viz kap. 4.3.2 Validace upraveného modelu).



Obr. 70 Nastavení modelů pro případovou studii

Tato studie se zaměřuje výhradně na analýzu běhu T1, jehož konkrétní nastavení je podrobně popsáno v části 3.4.2 Průběh hlavního experimentu. Hodnocení modelů probíhá na základě dvou parametrů:

- celkové doby evakuace;
- toků osob v čase na úrovni východu ze zkoumané místnosti.

Pro každý model jsou zkoumány 3 scénáře, jež jsou odlišeny počtem a rozmístěním východů. V následující Tab. 17 jsou tyto scénáře popsány.

Tab. 17 Detail scénářů pro případovou studii

Označení	Počet východů [-]	Druh východů [-]	Šířka východů [m]
scénář 1	1	Východ A	1,6
scénář 2	1	Východ C	1,6
scénář 3	2	Východ A, Východ B	0,8

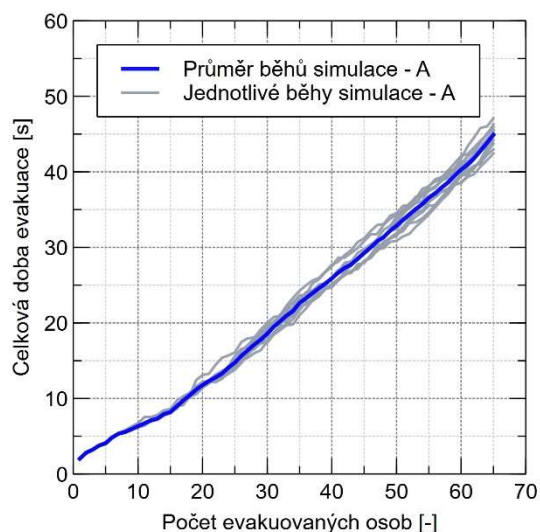


#### 4.4.1 Základní model

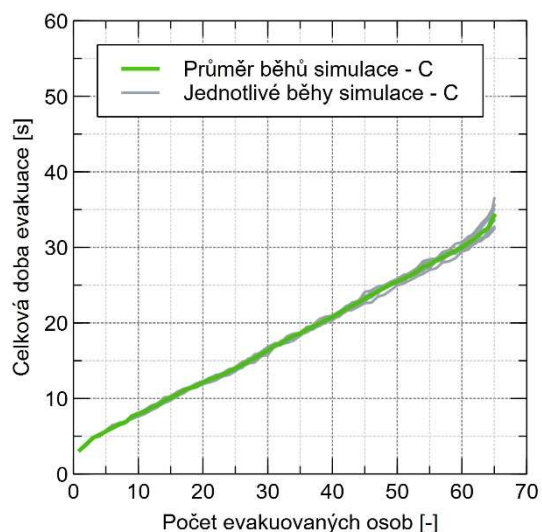
Nastavení modelu, včetně geometrie místnosti, konfigurace agentů a jejich umístění, zůstává totožné s nastavením použitým při validaci základního modelu. Proměnný faktor je pouze umístění východu. Nastavení modelu je popsáno v kapitole 4.3.1 Validace základního modelu.

##### 4.4.1.1 Porovnání křivek TET

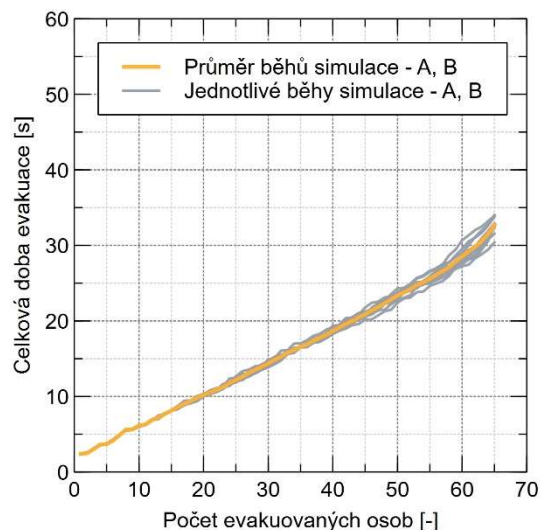
Obr. 71 zobrazuje grafy celkové doby evakuace pro jednotlivé scénáře. Na Obr. 71d) je prezentováno srovnání všech scénářů, kde je evidentní, že nejrychlejší evakuace byla dosažena ve scénáři 3 (dva východy po stranách o šířce 800 mm). O něco pomalejší evakuace proběhla ve scénáři 2 (jeden východ uprostřed o šířce 1600 mm). Nejdelší doba evakuace byla zaznamenána ve scénáři 1 (jeden východ na straně o šířce 1600 mm).



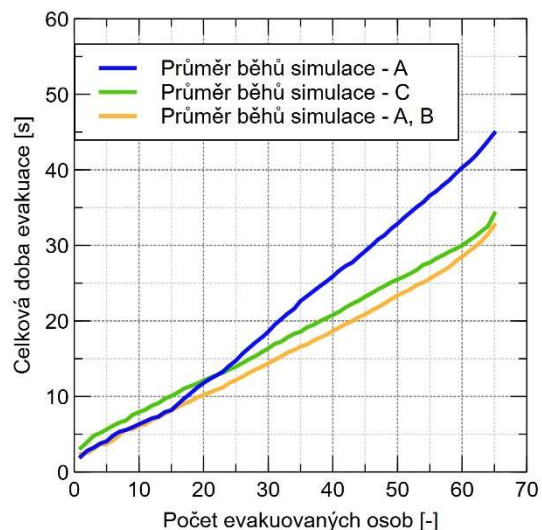
a) Celková doba evakuace běhu T1; Scénář 1



b) Celková doba evakuace běhu T1; Scénář 2



c) Celková doba evakuace běhu T1; Scénář 3

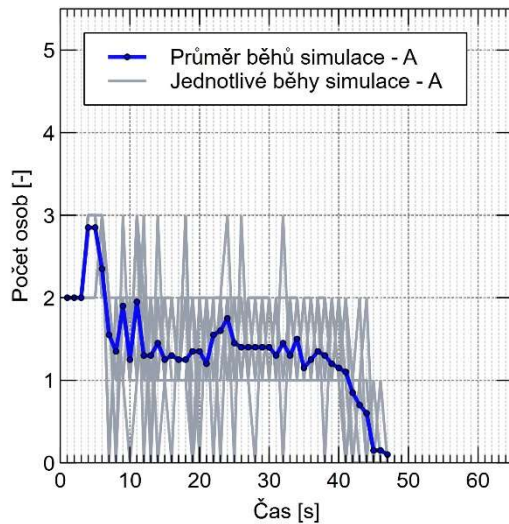


d) Celková doba evakuace běhu T1; Porovnání

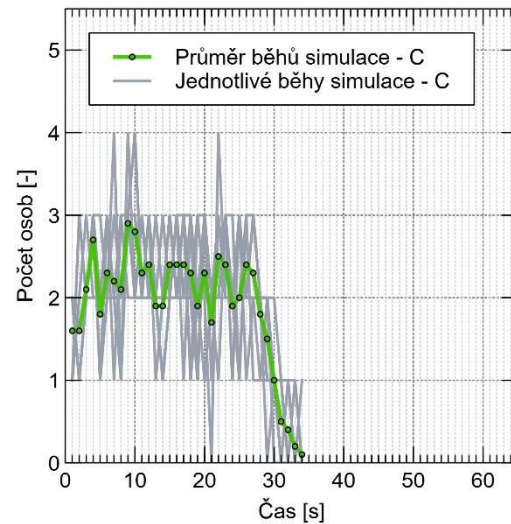
Obr. 71 Celkové doby evakuace základních modelů

#### 4.4.1.2 Porovnání toků osob v čase

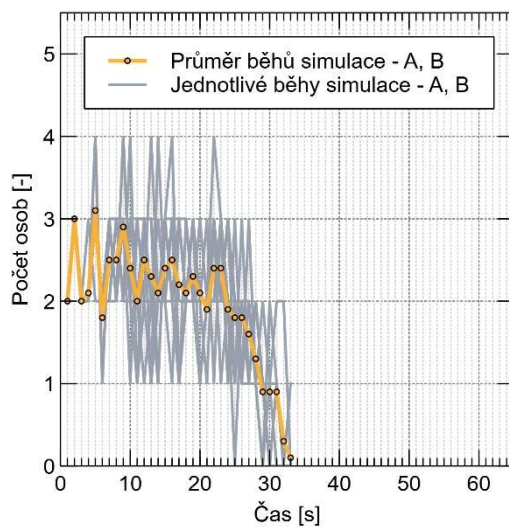
Obr. 72 prezentuje grafy toků osob v čase. Grafy a), b) a c) ukazují toky jednotlivých scénářů a graf d) jejich porovnání. Z grafů je patrné, že osoby při scénářích 2 a 3 opouštěly místnost v podobných frekvencích. Nejvíce se odlišuje křivka scénáře 1, což potvrzuje fakt, že evakuace s jedním východem na straně je nejpomalejší.



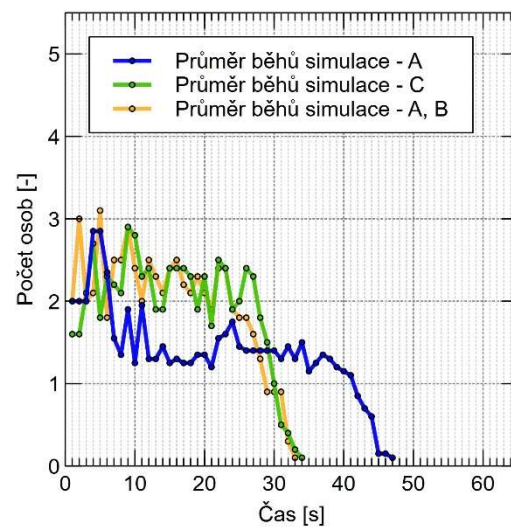
a) Tok osob v čase T1; Scénář 1



b) Tok osob v čase T1; Scénář 2



c) Tok osob v čase T1; Scénář 3



d) Tok osob v čase T1; Porovnání

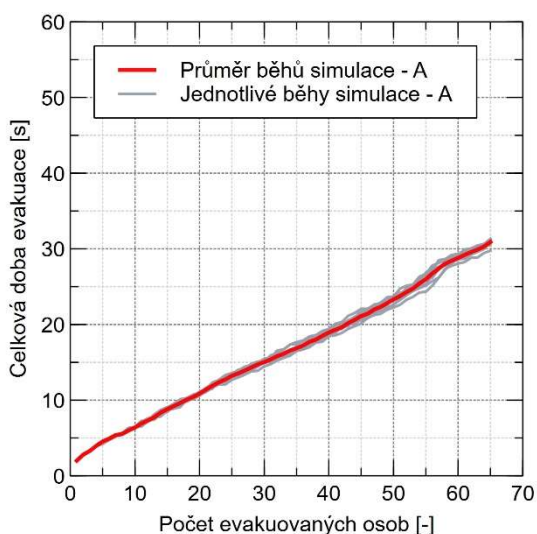
Obr. 72 Tok osob v čase základních modelů

### 4.4.2 Upravený model

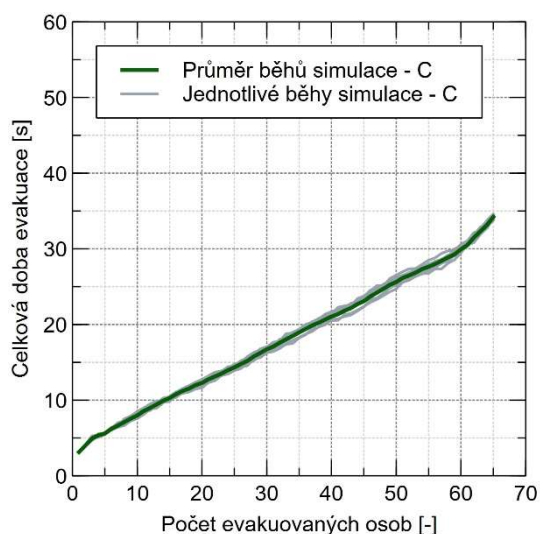
V této části jsou zkoumány dopady umístění východu na průběh evakuace, podobně jako v případě základního modelu. Nastavení modelu, včetně geometrie místnosti, konfigurace agentů a jejich umístění, zůstává totožné s nastavením použitým při validaci upraveného modelu. Jedním z proměnných faktorů je pouze poloha východu. Nastavení modelu je popsáno v kapitole 4.3.2 Validace upraveného modelu.

#### 4.4.2.1 Porovnání křivek TET

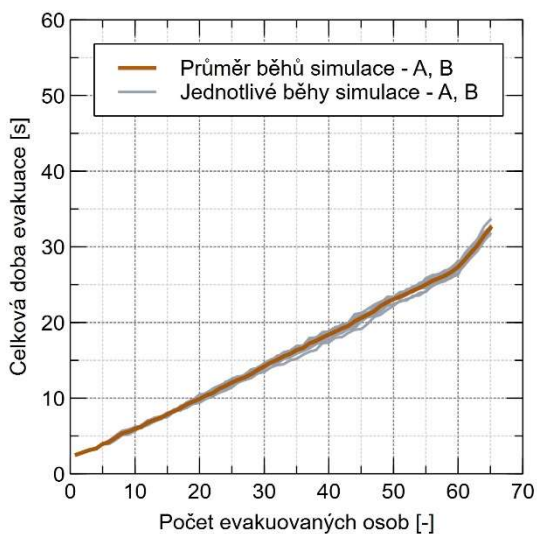
Obr. 73 zobrazuje grafy celkové doby evakuace pro jednotlivé scénáře. Na Obr. 73d) je prezentováno srovnání všech scénářů, kde je evidentní, že v upraveném modelu jsou si celkové doby evakuace velice podobné. Nejpomalejší evakuace proběhla při scénáři 2, v němž se východ nachází ve středu místnosti.



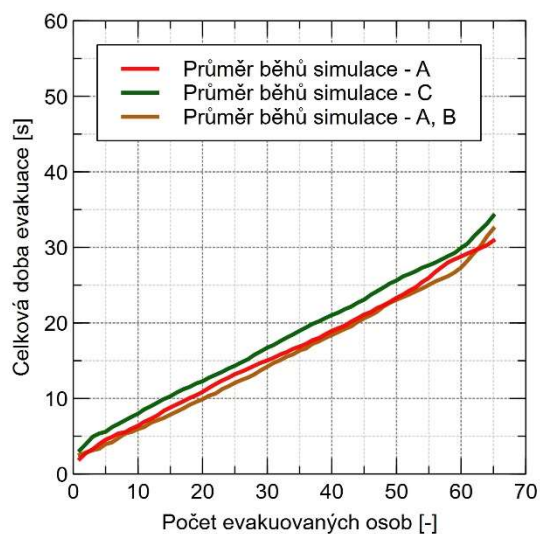
a) Celková doba evakuace běhu T1; Scénář 1



b) Celková doba evakuace běhu T1; Scénář 2



c) Celková doba evakuace běhu T1; Scénář 3



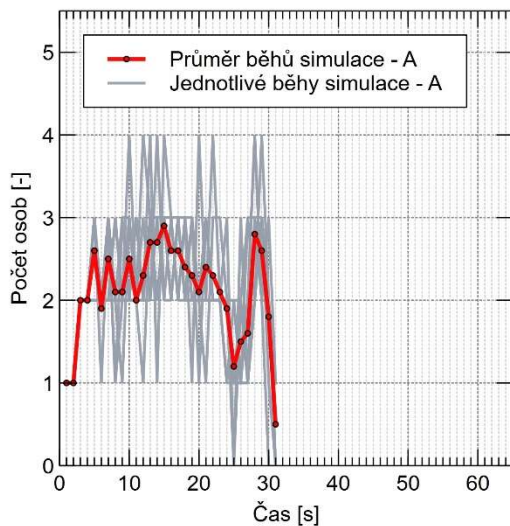
d) Celková doba evakuace běhu T1; Porovnání

Obr. 73 Celkové doby evakuace upravených modelů

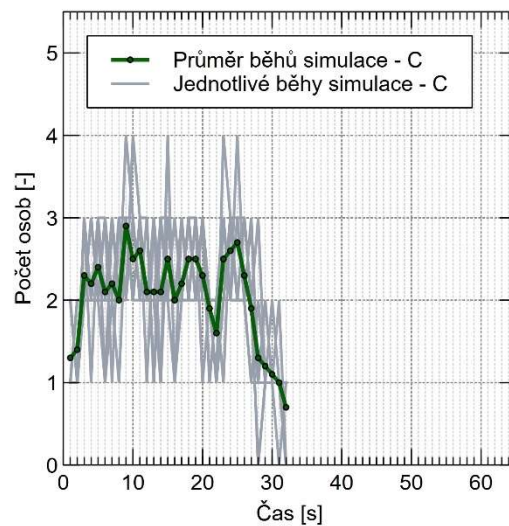


#### 4.4.2.2 Porovnání toků osob v čase

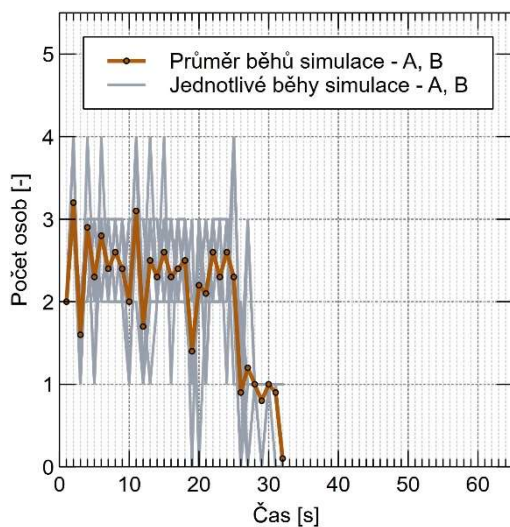
Grafy na Obr. 74 zobrazují toky osob v čase. Při porovnání grafu je zřejmé, že křivky toků osob v čase vykazují výraznou podobnost, a jednotliví agenti opouštějí sledovaný prostor srovnatelným tempem. Tyto grafy také potvrzují podobnost s křivkami celkové doby evakuace, jak bylo popsáno v předchozí kapitole.



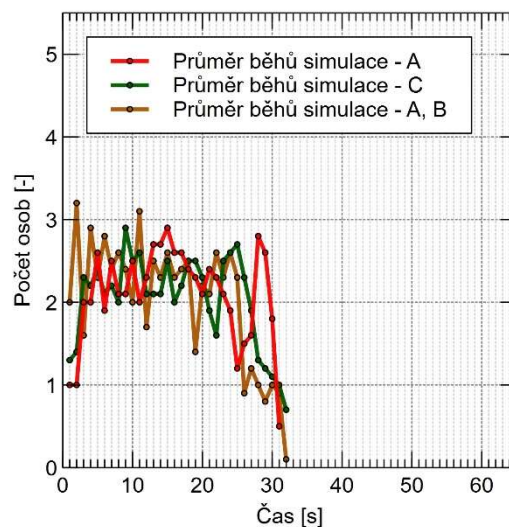
a) Tok osob v čase T1; Scénář 1



b) Tok osob v čase T1; Scénář 2



c) Tok osob v čase T1; Scénář 3



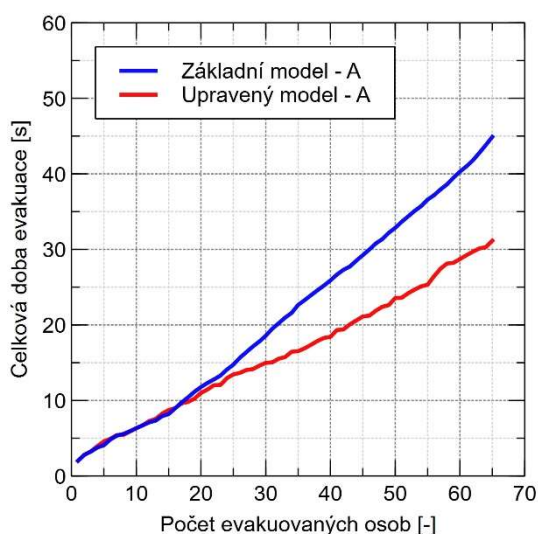
d) Tok osob v čase T1; Porovnání

Obr. 74 Tok osob v čase upravených modelů

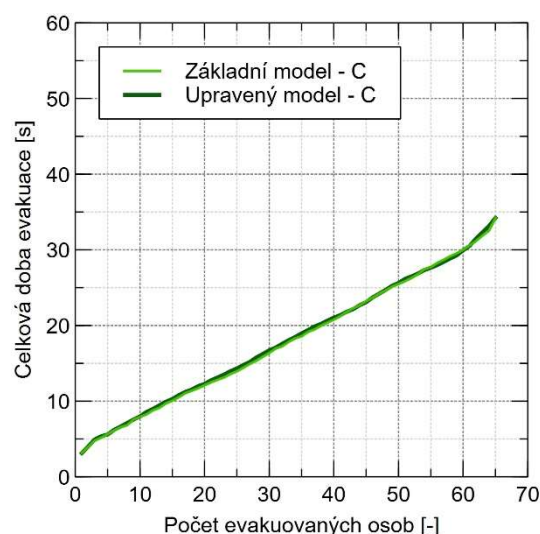
#### 4.4.2.3 Shrnutí

Následující odstavec poskytuje shrnutí srovnání mezi základním a upraveným modelem, s důrazem na změnu umístění východu. Klíčové aspekty zahrnují celkovou dobu evakuace a tok osob v čase.

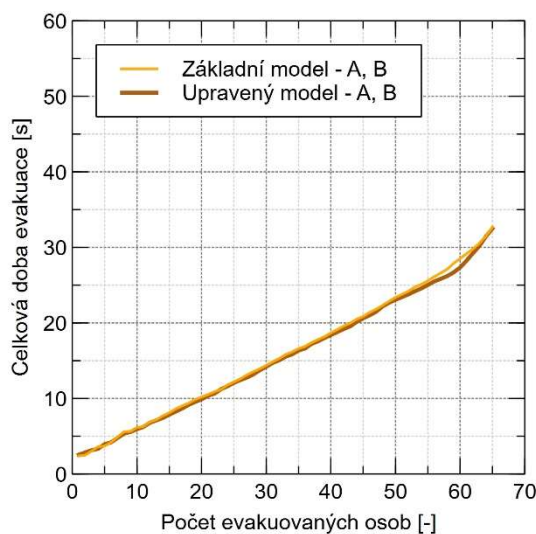
- **Celková doba evakuace;** následující grafy na Obr. 75 prezentují porovnání celkové doby evakuace mezi základním a upraveným modelem. Nejvýraznější rozdíl je patrný ve scénáři 1, kde je východ umístěn na straně místnosti. Tato odlišnost je způsobena efektivnějším využíváním východu v upraveném modelu, na rozdíl od základního modelu, kde nedocházelo k plnému využití východu z důvodu nesprávného využívání koridorů. Tento fakt je podrobně popsán v kapitole 4.3.1.4 Volba trasy. V ostatních scénářích nemá upravený model výrazný vliv na celkovou dobu evakuace.



a) Celková doba evakuace během T1; Scénář 1



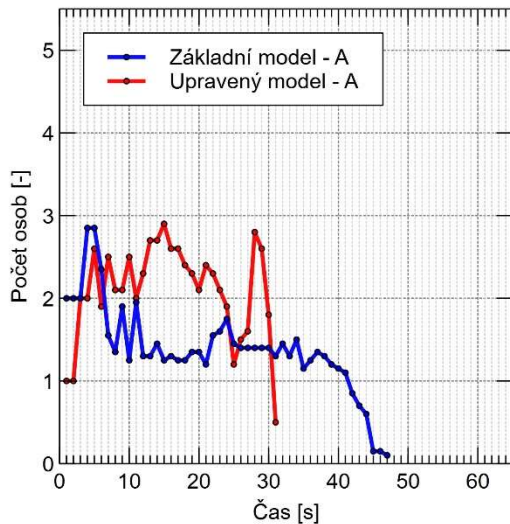
b) Celková doba evakuace během T1; Scénář 2



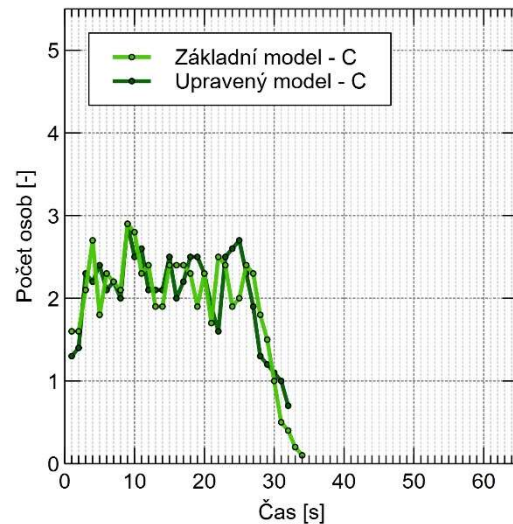
c) Celková doba evakuace během T1; Scénář 3

Obr. 75 Porovnání celkové doby evakuace základních a upravených modelů

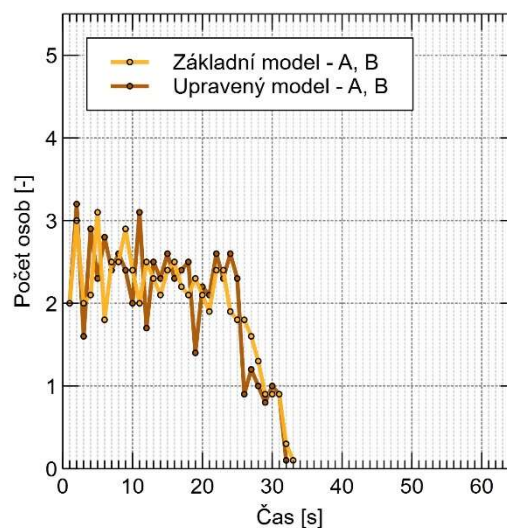
- **Tok osob v čase;** grafy na Obr. 76 zobrazují porovnání křivek toků osob v čase. Toky osob ve všech scénářích, jak v základním, tak v upraveném modelu, vykazují výraznou podobnost, s výjimkou scénáře 1 v základním modelu. V tomto scénáři je pozorovatelný odchyl od ostatních křivek, neboť doba evakuace byla podstatně delší než u ostatních scénářů.



a) Tok osob v čase T1; Scénář 1



b) Tok osob v čase T1; Scénář 2



c) Tok osob v čase T1; Scénář 3

Obr. 76 Porovnání toku osob v čase základních a upravených modelů

Závěrem lze říci, že nejrychlejší evakuaci umožňuje scénář 3, kde jsou umístěny dva východy po stranách, každý široký 800 mm. Také je zřejmé, že upravený model měl na evakuaci vliv pouze při scénáři 1 (jeden východ na straně). Jestliže je východ, či východy, umístěn symetricky, není nutné zřizovat v evakuačním programu dodatečná opatření.



## 5 Závěr

Tato diplomová práce se věnovala analýze procesu evakuace osob z prostorů s řadami sedadel. Teoretická část byla zaměřena zejména na literární rešerši dostupné literatury týkající se této problematiky. Praktická část práce se zabývala přípravou, realizací a následným vyhodnocením evakuačního experimentu. Klíčovým aspektem bylo také využití experimentálních dat pro matematické modelování evakuace z prostorů s řadami sedadel. Získaná experimentální data byla následně použita k validaci evakuačního modelu Pathfinder. Jeho vyhodnocení bylo aplikováno v rámci případové studie, která zkoumala vliv umístění východu na průběh simulace evakuace.

### 5.1 Závěry vyplývající z experimentu

Následující odstavec je zaměřen na závěry vyplývající z experimentu. Během experimentu bylo sledováno několik parametrů:

- **Celková doba evakuace;** Nejkratší doba evakuace byla dosažena, když byla modrá skupina umístěna uprostřed uliček (61,3 % - hodnota vztažena k nejpomalejšímu běhu), naopak nejdelší trvání bylo zaznamenáno, když byla modrá skupina umístěna na krajích u koridorů (70,0 % - hodnota vztažena k nejpomalejšímu běhu). Tento experiment jasně ukázal, že umístění osob s limitujícími vlastnostmi pohybu u východu z uliček zpomalilo celý proces evakuace.

Kromě toho experiment potvrdil, že rozdělení účastníků do sektorů podle pohybových vlastností nemá tak zásadní vliv na celkovou dobu evakuace jako šířka východu. Dvojnásobné zvětšení šířky východu v průměru urychlilo evakuaci o 34,5 %.

- **Průměrný tok osob;** Experiment ukázal, že snížení šířky východu na polovinu vede ke 37,1% snížení průměrného toku osob. Průměrný tok osob při stejné šířce východu zůstává konstantní. Tento jev dále potvrzuje skutečnost, že širší východ znamená vyšší frekvenci průchodu a tím pádem i efektivnější evakuaci.
- **Chování osob;** Z výsledků experimentu vyplývá, že účastníci preferovali delší průchod stísněným prostorem v uličce vedoucí na pravý koridor oproti výstupu na bližší levý koridor, kde by následně museli projít horním koridorem. Pravý směr výstupu si ve skutečném experimentu zvolilo 63,2 % účastníků. Z experimentálních dat rovněž vyplývá, že rozdělení účastníků do sektorů podle pohybových vlastností nemá na volbu směru tak značný vliv. Účastníci v průběhu experimentu nejčastěji opouštěli prostor uliček ve formacích 3/8 až 6/5, bez ohledu na rozsazení účastníků dle pohybových vlastností.

Pokud jde o volbu trasy při opuštění sledovaného experimentu, převládal výstup účastníků na pravý koridor, vedoucí přímo k východu. Tuto trasu A si zvolilo 63,5 % účastníků. Druhou nejčastěji využívanou trasou byla trasa B (výstup na levý koridor a následné projití horním koridorem směrem k východu), kterou využilo 32,2 % účastníků. Experiment rovněž prokázal, že umístění osob s omezenými pohybovými schopnostmi do sektorů nemělo výrazný vliv na volbu směru a trasy, protože procenta využití tras během jednotlivých běhů zůstávala podobná.

- **Doplňková měření – běžná rychlost osob;** výsledky naměřených běžných rychlostí potvrzují, že rozdíl mezi rychlostmi modré a červené skupiny není tak výrazný, jak se očekávalo. Tento výsledek mohl být způsoben tím, že modrou skupinu částečně tvořili účastníci bez skutečných pohybových omezení.

## 5.2 Závěry vyplývající ze simulační studie

Získaná experimentální data byla využita při matematickém modelování evakuace z prostorů s řadami sedadel, a to zejména k ověření a validaci správnosti evakuačního modelu Pathfinder. Pro tento účel byl vytvořen základní model, který však nedokázal přesně reprodukovat skutečný průběh evakuace. Tento jev mohl být způsoben základním algoritmem evakuačního programu Pathfinder, ve kterém se agenti rozhodují o volbě trasy s velmi rychlou frekvencí. Hlavním problémem bylo využití pouze jedné strany místnosti směřující k nesymetricky umístěnému východu. Z tohoto důvodu bylo nutné upravit model prostřednictvím specifických opatření. Upravený model prokázal větší shodu s reálným experimentem, zejména v oblasti celkových dob evakuace, toků osob v čase a volby tras. Tato srovnatelnost byla dosažena díky detailnějšímu uživatelskému nastavení, které umožnilo vytvoření fronty na horním koridoru, což vedlo k efektivnímu využívání plně šíře dveří. Nicméně tato vylepšení vyžadují zásah do konfigurace programu Pathfinder, což přináší náročnější proces pro uživatele. Celkově lze konstatovat, že upravený model poskytuje přesnější simulaci evakuace, avšak s dodatečnými nároky na konfiguraci.

V návaznosti na uvedená zjištění ohledně nutnosti uživatelského nastavení byla provedena studie zkoumající vliv umístění východu na modelové výsledky, neboť existoval předpoklad, že základní model nebyl funkční zejména z důvodu nesymetrického umístění dveří. Výsledky případové studie tento předpoklad potvrdily. Jestliže byl východ, či východy, umístěn v modelovaném prostoru symetricky, poskytoval základní model stejné výsledky jako model upravené a nebylo tudíž nutné zřizovat v evakuačním programu dodatečná opatření.

## 5.3 Budoucí výzkum

Závěrem lze shrnout, že evakuovat prostory s řadami sedadel je považováno za obtížné, a to kvůli omezené možnosti úniku způsobené limitovanou šířkou únikových cest. Je důležité se touto problematikou zabývat a shromáždit dostatek dat, abychom mohli tyto prostory, jako jsou např. přednáškové místnosti, ale i dopravní prostředky s řadami sedadel, správně navrhovat.

V následujícím výzkumu by bylo vhodné provést experiment s reálným heterogenním davem. Tato doporučení vychází z pozorování, že účastníci imitující omezené pohybové schopnosti se chovali odlišně od očekávání, a rychlosti, které dosahovali, se příliš nelišily od osob bez omezení.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Časová osa evakuace [2] .....	22
Obr. 2 Schématické znázornění posluchárny včetně rozmístění tří kamer, které experiment zaznamenávaly z výšky 2,0 m nad zemí [4] .....	23
Obr. 3 Schématické zobrazení formací, kterými mohly osoby opustit řadu sedadel [4].....	24
Obr. 4 Frekvence pozorovaných formací při výstupu z řad sedadel [4] .....	24
Obr. 5 Schématické uspořádání experimentální uličky [6] .....	24
Obr. 6 Schéma pohyblivé židle [6] .....	24
Obr. 7 Scénáře rozmístění židlí v první části experimentu zaměřené na pohyb jednotlivců [6]...	25
Obr. 8 Graf individuální doby výstupu při různých šířkách uličky a uspořádání sedadel [6].....	25
Obr. 9 Graf individuální doby výstupu při skupinovém experimentu [6] .....	25
Obr. 10 Model knihovny v programu Pathfinder [7].....	26
Obr. 11 Zobrazení přednáškového sálu [8].....	27
Obr. 12 Ukázka modelového rozvržení [8].....	27
Obr. 13 Paralelní evakuace na uličce [8] .....	27
Obr. 14 Uspořádání sedadel pro simulaci [8].....	28
Obr. 15 Ilustrace experimentálního uspořádání [12] .....	29
Obr. 16 Krabicový graf středních hodnot rychlostí chodců [12].....	30
Obr. 17 Krabicové grafy frekvence a velikosti kroku [12] .....	31
Obr. 18 Graf průměrných hodnot rychlosti a velikosti kroku mužů a žen [12] .....	31
Obr. 19 Rychlost chůze chodců při individuálním pohybu a skupinovém pohybu v řadě [12]. ....	32
Obr. 20 Ilustrace experimentálního uspořádání [13] .....	33
Obr. 21 Doba evakuace jednotlivých osob ve všech scénářích v pěti opakováních [13].....	33
Obr. 22 Fotky přeplněné uličky v určitých časech [13].....	34
Obr. 23 Ilustrace konfliktu v uličce [13] .....	34
Obr. 24 Schéma minimálních rozměrů [16].....	36
Obr. 25 Minimální šířka mezi sedadly [16].....	36
Obr. 26 Foto zvoleného prostoru pro experiment .....	37
Obr. 27 Schéma zvoleného prostoru pro experiment.....	37
Obr. 28 Foto atria .....	38
Obr. 29 Procentuální zastoupení skupin .....	39
Obr. 30 Použité kamery.....	41
Obr. 31 Schéma rozmístění kamery; .....	41
Obr. 32 Použité počítače.....	41
Obr. 33 Identifikátory účastníků .....	41
Obr. 34 Ukázka rozsazení účastníků .....	42
Obr. 35 Ukázka rozsazení účastníků z přílohy 1 pro běh T5 .....	43
Obr. 36 Ilustrační záběr z měření běžné rychlosti .....	43
Obr. 37 Výroba identifikátorů.....	44
Obr. 38 Příprava technického vybavení .....	45
Obr. 39 Ukázka rozvržení náhodného sektoru .....	45
Obr. 40 Prostor určený pro účastníky mezi běhy .....	45
Obr. 41 Obrázek koridoru.....	46
Obr. 42 Schéma koridoru.....	46
Obr. 43 Zorná pole kamer.....	47
Obr. 44 Ukázka posouzení výstupu náhodného účastníka .....	48

Obr. 45 Záběr kamer při doplňkových měřeních.....	49
Obr. 46 Graf celkové doby evakuace T1 – T10.....	50
Obr. 47 Graf celkové doby evakuace pro běh T1 a T2 .....	50
Obr. 48 Graf celkové doby evakuace pro běh T9 a T10.....	50
Obr. 49 Graf celkové doby evakuace T3, T4, T5 a T6; Plná čára = šíře dveří 1600 mm, Tečkovaná čára = šíře dveří 800 mm.....	51
Obr. 50 Graf celkové doby evakuace běhů T3; T4; T5 a T6 (účastníci barevně odlišeni dle skupin) .....	51
Obr. 51 Graf celkové doby evakuace běhů T7 a T8.....	52
Obr. 52 Graf celkové doby evakuace referenčních běhů .....	53
Obr. 53 Ukázka použitých formací běhu T5 a T6.....	54
Obr. 54 Sloupcové grafy využití směrů a formací všech běhů.....	55
Obr. 55 Sloupcový graf využití tras.....	56
Obr. 56 Graf průměrného toku osob.....	57
Obr. 57 Grafy toku osob v čase pro běh T5 a T6.....	58
Obr. 58 Vizualizace modelovaného prostoru v programu Pathfinder .....	62
Obr. 59 Grafy porovnání křivek TET pro běh T5 a T6; základní validace .....	63
Obr. 60 Graf porovnání průměrného toku osob při základní validaci .....	64
Obr. 61 Vizualizace způsobu odchodu agentů ze sledovaného prostoru; základní validace.....	64
Obr. 62 Grafy porovnání toků osob při základní validaci v čase pro běh T5 a T6.....	65
Obr. 63 Záběr evakuace z reálného experimentu.....	65
Obr. 64 Vizualizace evakuace při otevřené validaci v programu Pathfinder; zobrazení v 16 s ....	66
Obr. 65 Vizualizace modelovaného prostředí pro podrobnější validaci v programu Pathfinder..	67
Obr. 66 Grafy porovnání křivek TET pro běh T5 a T6; podrobnější validace.....	67
Obr. 67 Graf porovnání průměrného toku osob při podrobnější validaci.....	68
Obr. 68 Grafy porovnání toků osob při podrobnější validaci v čase pro běh T5 a T6.....	68
Obr. 69 Porovnání volby tras při validaci základního a upraveného modelu; zobrazení v 16 s....	69
Obr. 70 Nastavení modelů pro případovou studii.....	71
Obr. 71 Celkové doby evakuace základních modelů .....	72
Obr. 72 Tok osob v čase základních modelů.....	73
Obr. 73 Celkové doby evakuace upravených modelů .....	74
Obr. 74 Tok osob v čase upravených modelů.....	75
Obr. 75 Porovnání celkové doby evakuace základních a upravených modelů.....	76
Obr. 76 Porovnání toku osob v čase základních a upravených modelů.....	77

## Seznam tabulek

Tab. 1 Naměřená rychlost chůze účastníků [8].....	27
Tab. 2 Experimentální podmínky pohybu chodců [12].....	30
Tab. 3 Scénáře evakuačního experimentu [13].....	33
Tab. 4 Shrnutí již provedených experimentů.....	35
Tab. 5 Největší dovolený počet sedadel v jedné řadě [17].....	36
Tab. 6 Typ účastníků.....	40
Tab. 7 Typy běhů.....	42
Tab. 8 Celková doba evakuace jednotlivých běhů.....	49
Tab. 9 Využití formace všech běhů .....	54
Tab. 10 Směr výstupu z uliček všech běhů.....	55

Tab. 11 Použité trasy všech běhů.....	56
Tab. 12 Průměrný tok osob.....	57
Tab. 13 Půdorysné rozměry dle kategorií .....	58
Tab. 14 Půdorysné rozměry dle skupin.....	59
Tab. 15 Běžné rychlosti dle kategorií .....	59
Tab. 16 Běžné rychlosti dle skupin.....	59
Tab. 17 Detail scénářů pro případovou studii .....	71

## Seznam příloh

Příloha 1 – Rozsazení účastníků	
Příloha 2 – Ukázka náborových plakátů	
Příloha 3 – Grafy celkové doby evakuace jednotlivých běhů	
Příloha 4 – Schématické zobrazení formací	
Příloha 5 – Směr výstupu z prostoru uliček	
Příloha 6 – Trasy pohybu	
Příloha 7 – Toky osob v čase jednotlivých běhů (hodnoceny ve východu)	
Příloha 8 – Tabulka šířky ramen a běžné rychlosti účastníků	
Příloha 9 – Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků celkové doby evakuace jednotlivých běhů (validace základního modelu)	
Příloha 10 – Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků toků osob v čase jednotlivých běhů (validace základního modelu)	
Příloha 11 – Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků celkové doby evakuace jednotlivých běhů (validace upraveného modelu)	
Příloha 12 – Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků toků osob v čase jednotlivých běhů (validace upraveného modelu)	

## Seznam obrázků z příloh

Obr. 1. 1 Rozsazení účastníků při běhu T1.....	87
Obr. 1. 2 Rozsazení účastníků při běhu T2.....	87
Obr. 1. 3 Rozsazení účastníků při běhu T3.....	87
Obr. 1. 4 Rozsazení účastníků při běhu T4.....	88
Obr. 1. 5 Rozsazení účastníků při běhu T5.....	88
Obr. 1. 6 Rozsazení účastníků při běhu T6.....	88
Obr. 1. 7 Rozsazení účastníků při běhu T7.....	89
Obr. 1. 8 Rozsazení účastníků při běhu T8.....	89
Obr. 1. 9 Rozsazení účastníků při běhu T9.....	89
Obr. 1. 10 Rozsazení účastníků při běhu T10.....	90
Obr. 1. 11 Rozsazení účastníků při běhu TTB 1.....	90
Obr. 1. 12 Rozsazení účastníků při běhu TTB 2.....	90
Obr. 1. 13 Rozsazení účastníků při běhu TTR 1.....	91
Obr. 1. 14 Rozsazení účastníků při běhu TTR 2.....	91
Obr. 2. 1 Náborový plakát.....	92

---

Obr. 3. 1 Graf celkové doby evakuace běhu T1 .....	93
Obr. 3. 2 Graf celkové doby evakuace běhu T2 .....	93
Obr. 3. 3 Graf celkové doby evakuace běhu T3 .....	94
Obr. 3. 4 Graf celkové doby evakuace běhu T4 .....	94
Obr. 3. 5 Graf celkové doby evakuace běhu T5 .....	95
Obr. 3. 6 Graf celkové doby evakuace běhu T6 .....	95
Obr. 3. 7 Graf celkové doby evakuace běhu T7 .....	96
Obr. 3. 8 Graf celkové doby evakuace běhu T8 .....	96
Obr. 3. 9 Graf celkové doby evakuace běhu T9 .....	97
Obr. 3. 10 Graf celkové doby evakuace běhu T10.....	97
Obr. 4. 1 Zobrazení formací, kterými mohli účastníci opustit řadu sedadel .....	98
Obr. 5. 1 Směr výstupu z prostoru uliček.....	100
Obr. 6. 1 Využité průběhy tras .....	101
Obr. 7. 1 Graf toku osob v čase pro běh T1 .....	102
Obr. 7. 2 Graf toku osob v čase pro běh T2 .....	102
Obr. 7. 3 Graf toku osob v čase pro běh T3 .....	103
Obr. 7. 4 Graf toku osob v čase pro běh T4 .....	103
Obr. 7. 5 Graf toku osob v čase pro běh T5 .....	104
Obr. 7. 6 Graf toku osob v čase pro běh T6 .....	104
Obr. 7. 7 Graf toku osob v čase pro běh T7 .....	105
Obr. 7. 8 Graf toku osob v čase pro běh T8 .....	105
Obr. 7. 9 Graf toku osob v čase pro běh T9 .....	106
Obr. 7. 10 Graf toku osob v čase pro běh T10.....	106
Obr. 9. 1 Graf porovnání TET běhu T1 .....	109
Obr. 9. 2 Graf porovnání TET běhu T2 .....	109
Obr. 9. 3 Graf porovnání TET běhu T3 .....	110
Obr. 9. 4 Graf porovnání TET běhu T4 .....	110
Obr. 9. 5 Graf porovnání TET běhu T5 .....	111
Obr. 9. 6 Graf porovnání TET běhu T6 .....	111
Obr. 9. 7 Graf porovnání TET běhu T7 .....	112
Obr. 9. 8 Graf porovnání TET běhu T8 .....	112
Obr. 9. 9 Graf porovnání TET běhu T9 .....	113
Obr. 9. 10 Graf porovnání TET běhu T10 .....	113
Obr. 10. 1 Graf porovnání toku osob v čase běhu T1.....	114
Obr. 10. 2 Graf porovnání toku osob v čase běhu T2.....	114
Obr. 10. 3 Graf porovnaní toku osob v čase běhu T3.....	115
Obr. 10. 4 Graf porovnaní toku osob v čase běhu T4.....	115
Obr. 10. 5 Graf porovnaní toku osob v čase běhu T5.....	116
Obr. 10. 6 Graf porovnaní toku osob v čase běhu T6.....	116
Obr. 10. 7 Graf porovnaní toku osob v čase běhu T7.....	117
Obr. 10. 8 Graf porovnaní toku osob v čase běhu T8.....	117

---



Obr. 10. 9 Graf porovnání toku osob v čase běhu T9.....	118
Obr. 10. 10 Graf porovnání toku osob v čase běhu T10 .....	118
Obr. 11. 1 Graf porovnání TET běhu T1.....	119
Obr. 11. 2 Graf porovnání TET běhu T2.....	119
Obr. 11. 3 Graf porovnání TET běhu T3.....	120
Obr. 11. 4 Graf porovnání TET běhu T4.....	120
Obr. 11. 5 Graf porovnání TET běhu T5.....	121
Obr. 11. 6 Graf porovnání TET běhu T6.....	121
Obr. 11. 7 Graf porovnání TET běhu T7.....	122
Obr. 11. 8 Graf porovnání TET běhu T8.....	122
Obr. 11. 9 Graf porovnání TET běhu T9.....	123
Obr. 11. 10 Graf porovnání TET běhu T10 .....	123
Obr. 12. 1 Graf porovnání toku osob v čase běhu T1.....	124
Obr. 12. 2 Graf porovnání toku osob v čase běhu T2.....	124
Obr. 12. 3 Graf porovnaní toku osob v čase běhu T3.....	125
Obr. 12. 4 Graf porovnání toku osob v čase běhu T4.....	125
Obr. 12. 5 Graf porovnání toku osob v čase běhu T5.....	126
Obr. 12. 6 Graf porovnání toku osob v čase běhu T6.....	126
Obr. 12. 7 Graf porovnání toku osob v čase běhu T7.....	127
Obr. 12. 8 Graf porovnání toku osob v čase běhu T8.....	127
Obr. 12. 9 Graf porovnání toku osob v čase běhu T9.....	128
Obr. 12. 10 Graf porovnání toku osob v čase běhu T10 .....	128

## Seznam tabulek z příloh

Tab. 8. 1 Šířky ramen a běžné rychlosti účastníků.....	108
--	-----

---

## Literatura

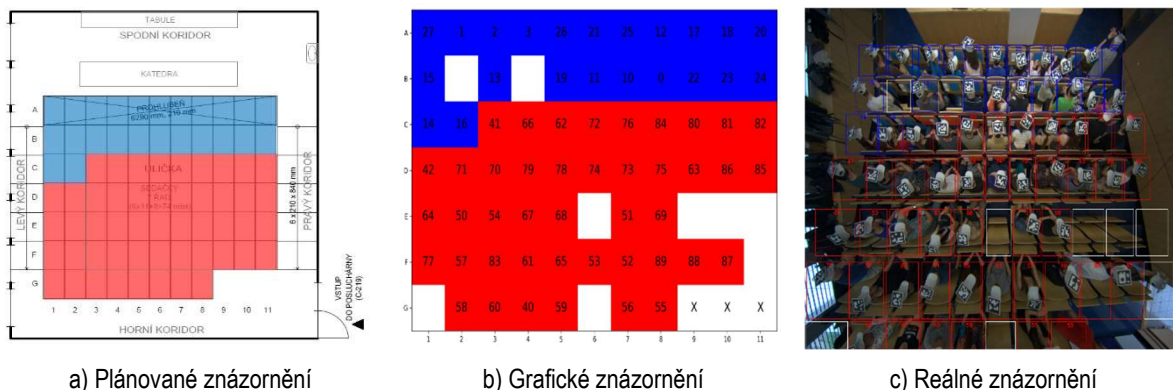
- [1] *Zákon č. 133/1985 Sb. o požární ochraně ve znění pozdějších předpisů.*
- [2] PREDTEČENSKIJ, Vsevolod Michajlovič a Anatolij Ivanovič MILINSKIJ. *Evakuace osob z budov: výpočetní metody pro projektování.* B.m.: Československý svaz požární ochrany, 1972.
- [3] FOLWARCZNY, Libor a Jiří POKORNÝ. *Evakuace osob.* B.m.: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, Čestina. EdiceSPBI Spektrum.
- [4] ZHU, Kong-jin a Qin SHI. Experimental Study on Choice Behavior of Pedestrians During Building Evacuation. *Procedia Engineering* [online]. 2016, **135**, 207–216. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.01.110
- [5] ZHU, Kongjin, Yue YANG a Qin SHI. Study on evacuation of pedestrians from a room with multi-obstacles considering the effect of aisles. *Simulation Modelling Practice and Theory* [online]. 2016, **69**, 31–42. ISSN 1569190X. Dostupné z: doi:10.1016/j.simpat.2016.09.002
- [6] ZHU, Kongjin, Zongcai ZHOU, Feifei CHEN, Ning GUO a Xiang LING. Assessing evacuation performance of pedestrians within narrow seated spaces. *Safety Science* [online]. 2023, **160**, 106046. ISSN 09257535. Dostupné z: doi:10.1016/j.ssci.2022.106046
- [7] LI, Ming-xin, Shun-bing ZHU, Jing-hong WANG a Zheng ZHOU. Research on Fire Safety Evacuation in a University Library in Nanjing. *Procedia Engineering* [online]. 2018, **211**, 372–378. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.12.025
- [8] DELCEA, Camelia, Liviu-Adrian COTFAS, Liliana CRACIUN a Anca Gabriela MOLANESCU. Establishing the Proper Seating Arrangement in Elevated Lecture Halls for a Faster Evacuation Process. *IEEE Access* [online]. 2019, **7**, 48500–48513. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2019.2909637
- [9] DING, Ning, Yihang MA, Dapeng DONG a Yadi WANG. Experiment and simulation study of emergency evacuation during violent attack in classrooms. *Journal of Safety Science and Resilience* [online]. 2021, **2**(4), 208–221. ISSN 26664496. Dostupné z: doi:10.1016/j.jnlssr.2021.09.002
- [10] ZHANG, Jun, Weiguo SONG a Xuan XU. Experiment and multi-grid modeling of evacuation from a classroom. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2008, **387**(23), 5901–5909. ISSN 03784371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2008.06.030
- [11] DELCEA, Camelia a Liviu-Adrian COTFAS. Increasing awareness in classroom evacuation situations using agent-based modeling. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2019, **523**, 1400–1418. ISSN 03784371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2019.04.137
- [12] HUANG, Shenshi, Teng ZHANG, Siuming LO, Shouxiang LU a Changhai LI. Experimental study of individual and single-file pedestrian movement in narrow seat aisle. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2018, **509**, 1023–1033. ISSN 03784371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2018.06.079
- [13] HUANG, Shenshi, Shouxiang LU, Siuming LO, Changhai LI a Yafei GUO. Experimental study on occupant evacuation in narrow seat aisle. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2018, **502**, 506–517. ISSN 03784371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2018.02.032

- [14] ZHI-MING, Fang, Lv WEI, Liu XIAO-DONG a Song WEI-GUO. Study of Boeing 777 Evacuation Using a Finer-grid Civil Aircraft Evacuation Model. *Transportation Research Procedia* [online]. 2014, **2**, 246–254. ISSN 23521465. Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2014.09.044
- [15] HUANG, Rong, Xuan ZHAO, Yufei YUAN, Qiang YU, Chenyu ZHOU a Winnie DAAMEN. Experimental study on evacuation behaviour of passengers in a high-deck coach: A Chinese case study. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2021, **579**, 126120. ISSN 03784371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2021.126120
- [16] ČSN 73 0831 *Požární bezpečnost staveb - Shromažďovací prostory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [17] ČSN 73 0802 *Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [18] Český statistický úřad. *Věková struktura - Sčítání 2021* [online]. 2022 [vid. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://scitani.gov.cz/vekova-struktura>.
- [19] POSPÍŠIL, Vít. *Automatic data extraction from evacuation experiments*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, diplomová práce bude odevzdána v r. 2024.
- [20] Pathfinder User Manual. *Thunderhead Engineering* [online]. 2022 [vid. 2023-11-21]. Dostupné z: <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/docs/latest/>
- [21] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION a SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 2002. 3rd ed. Quincy, Mass.: Bethesda, Md: National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers. ISBN 978-0-87765-451-3.
- [22] REYNOLDS, Craig W. *Steering Behaviors For Autonomous Characters*. 1999. Game developers conference.



**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu T4**

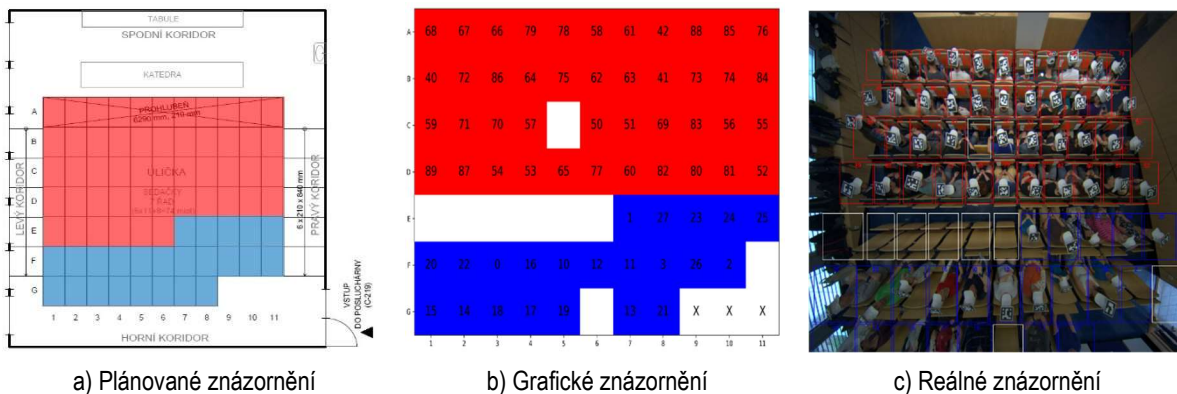
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm



Obr. 1. 4 Rozsazení účastníků při běhu T4

**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu T5**

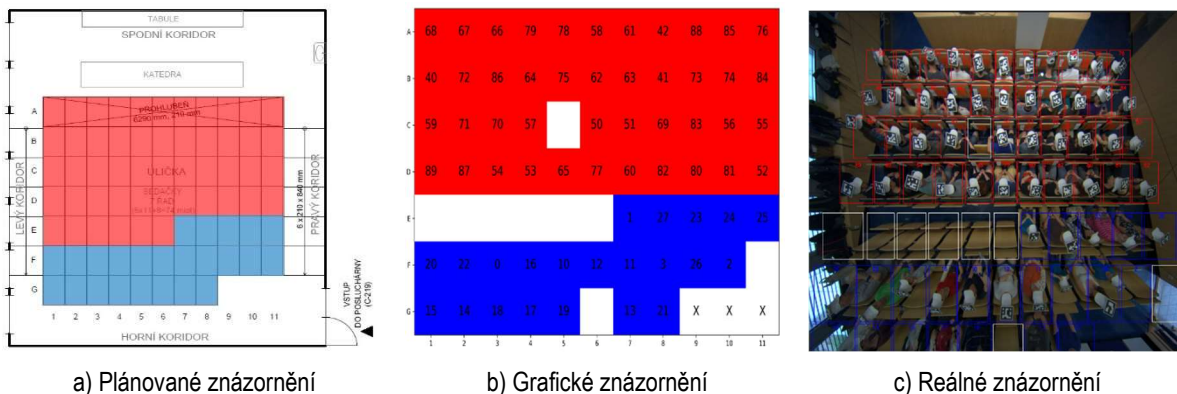
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 1. 5 Rozsazení účastníků při běhu T5

**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu T6**

- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm

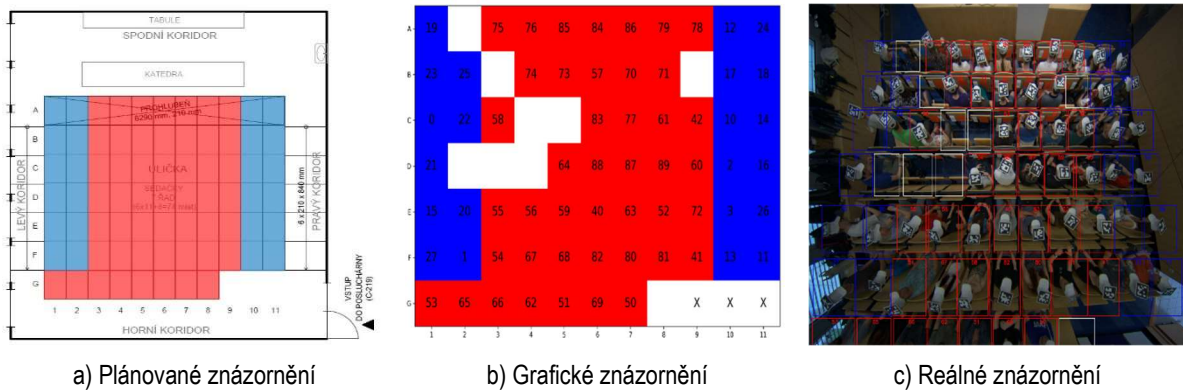


Obr. 1. 6 Rozsazení účastníků při běhu T6



**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu T7**

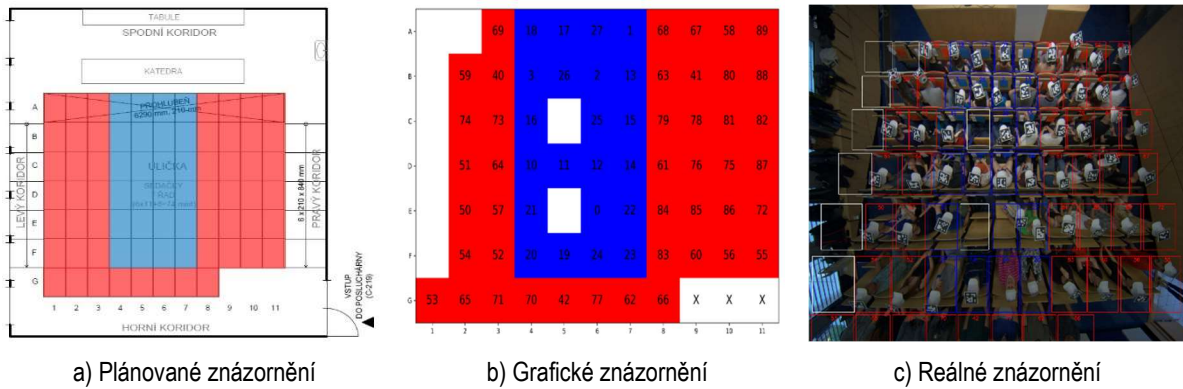
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 1. 7 Rozsazení účastníků při běhu T7

**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu T8**

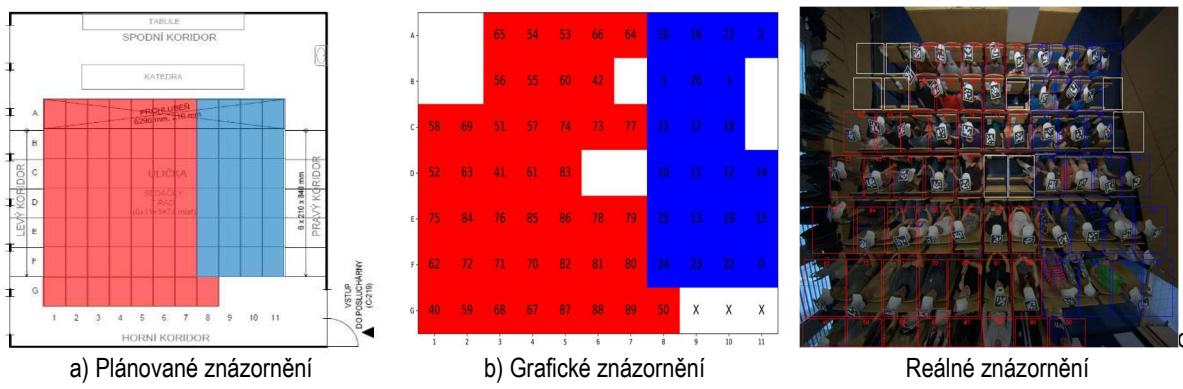
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 1. 8 Rozsazení účastníků při běhu T8

**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu T9**

- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm

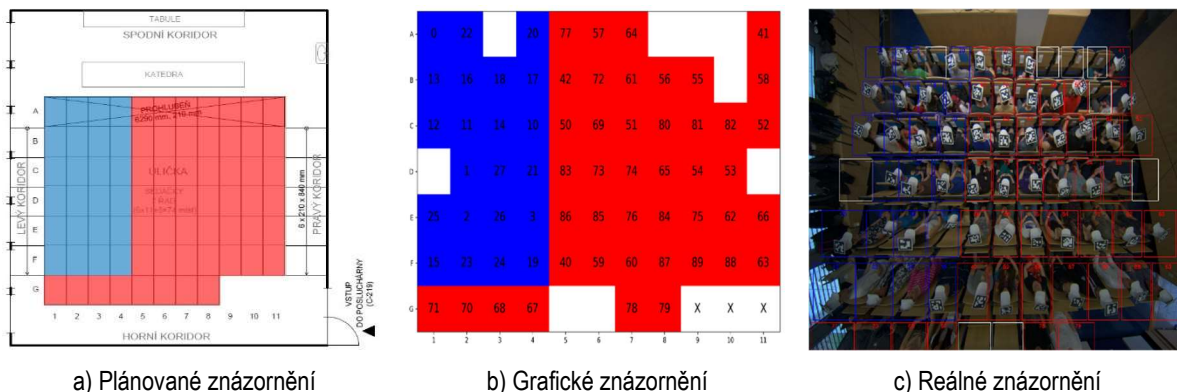


Obr. 1. 9 Rozsazení účastníků při běhu T9



**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu T10**

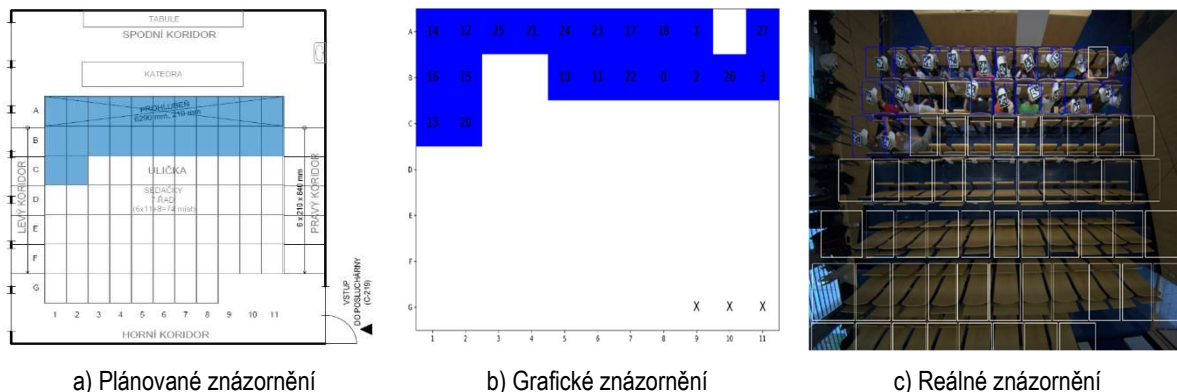
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 1. 10 Rozsazení účastníků při běhu T10

**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu TTB 1**

- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 1. 11 Rozsazení účastníků při běhu TTB 1

**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu TTB 2**

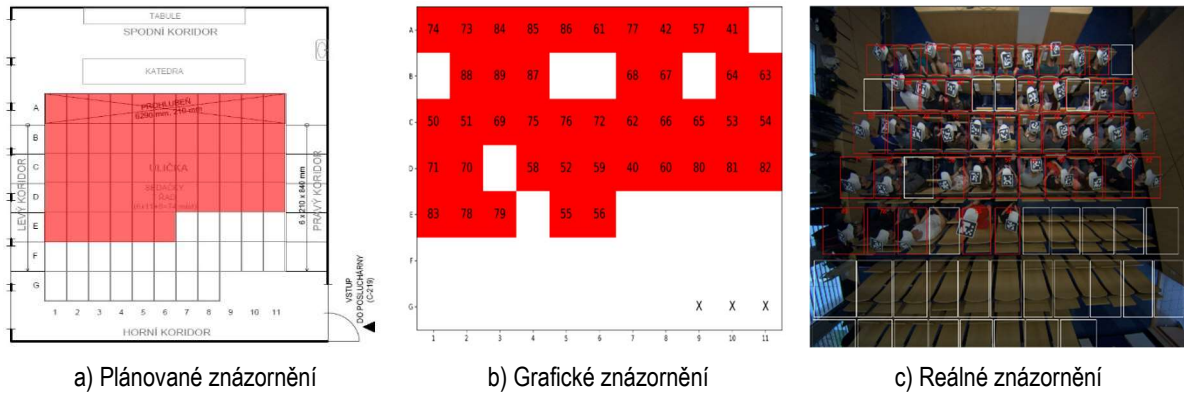
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 1. 12 Rozsazení účastníků při běhu TTB 2

**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu TTR 1**

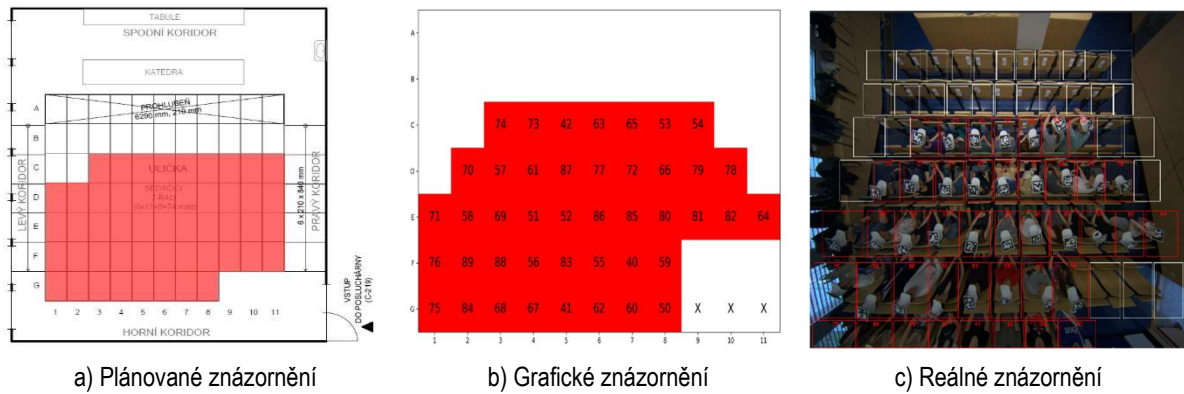
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 1. 13 Rozsazení účastníků při běhu TTR 1

**Zobrazení rozsazení účastníků při běhu TTR 2**

- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 1. 14 Rozsazení účastníků při běhu TTR 2

## Příloha 2 – Ukázka náborového plakátu

**Přijď si vyzkoušet únik z přednáškové místnosti!**

# **EVAKUAČNÍ CVIČENÍ**

**posluchárna C-219  
FSV ČVUT v Praze**

**5.6.2023**

**13:00 - 16:00**

Pro více informací:  
[pozar.fsv.cvut.cz](http://pozar.fsv.cvut.cz)

**PŘIHLAŠUJ SE**

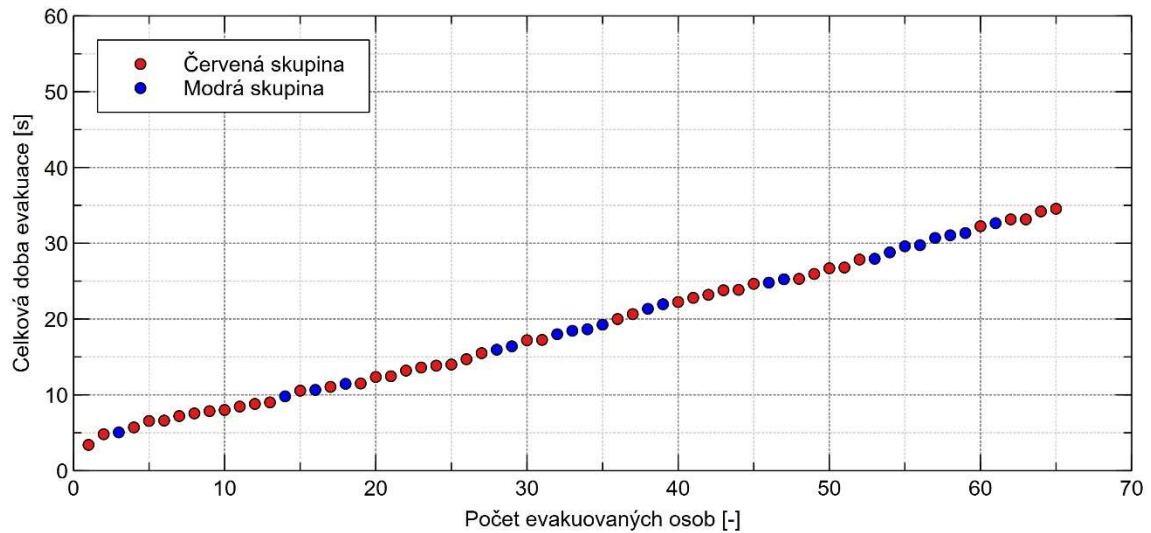
**ČVUT FIT** **ČVUT FSV**

Obr. 2. 1 Náborový plakát

## Příloha 3 – Grafy celkové doby evakuace jednotlivých běhů

### Graf celkové doby evakuace běhu T1

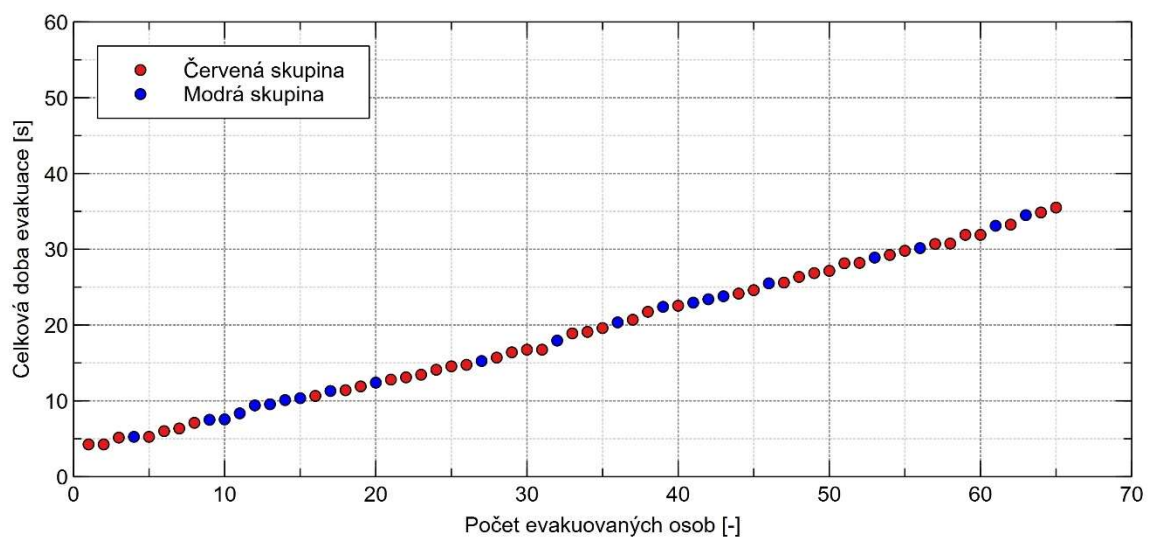
- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 34,55 s



Obr. 3. 1 Graf celkové doby evakuace běhu T1

### Graf celkové doby evakuace běhu T2

- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 35,50 s

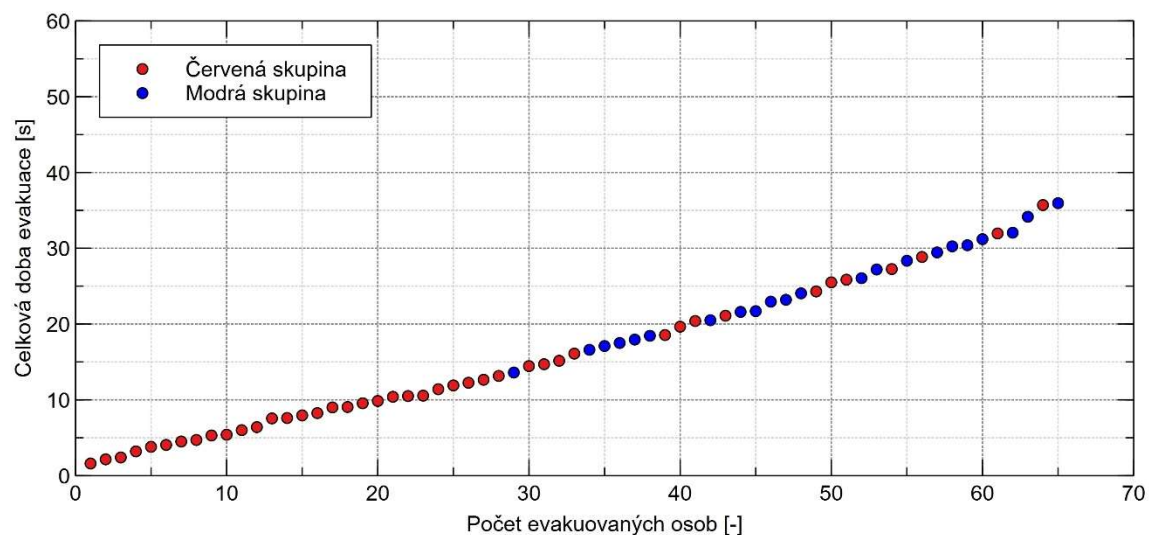


Obr. 3. 2 Graf celkové doby evakuace běhu T2



### Graf celkové doby evakuace běhu T3

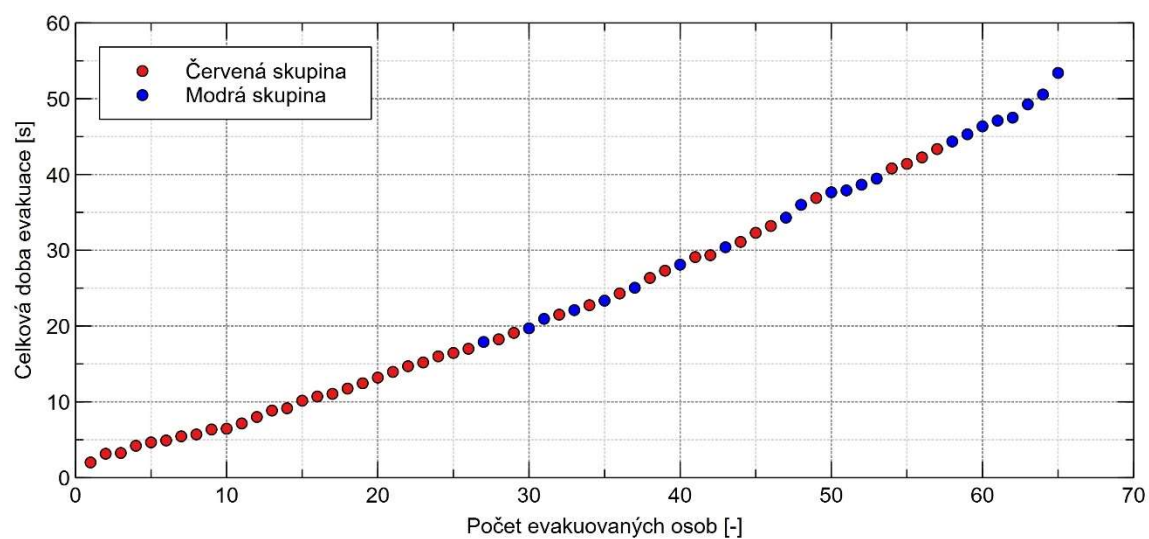
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 35,95 s



Obr. 3. 3 Graf celkové doby evakuace běhu T3

### Graf celkové doby evakuace běhu T4

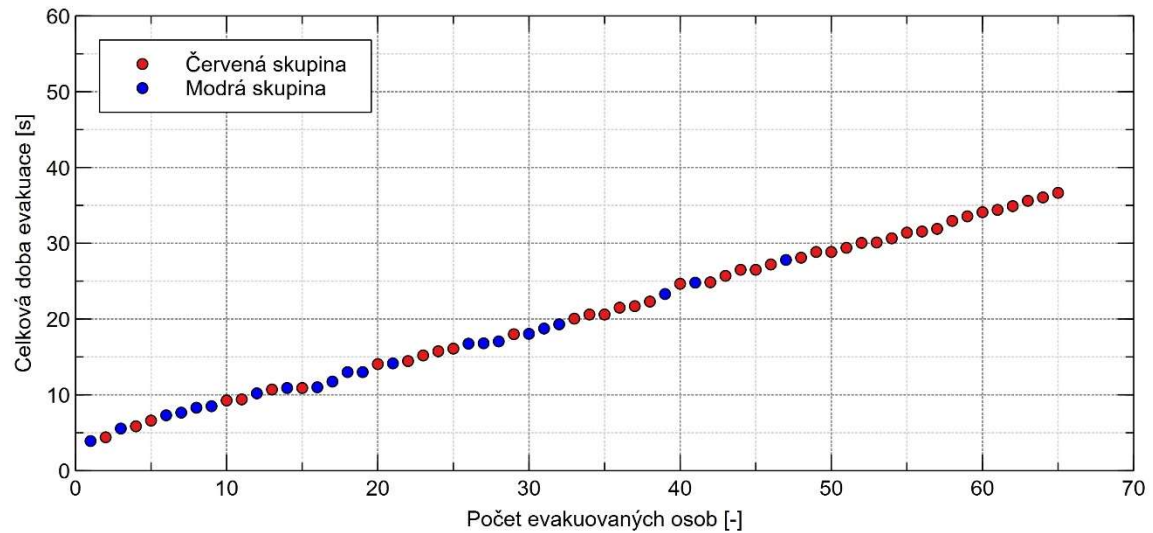
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm
- celková doba evakuace 53,40 s



Obr. 3. 4 Graf celkové doby evakuace běhu T4

Graf celkové doby evakuace běhu T5

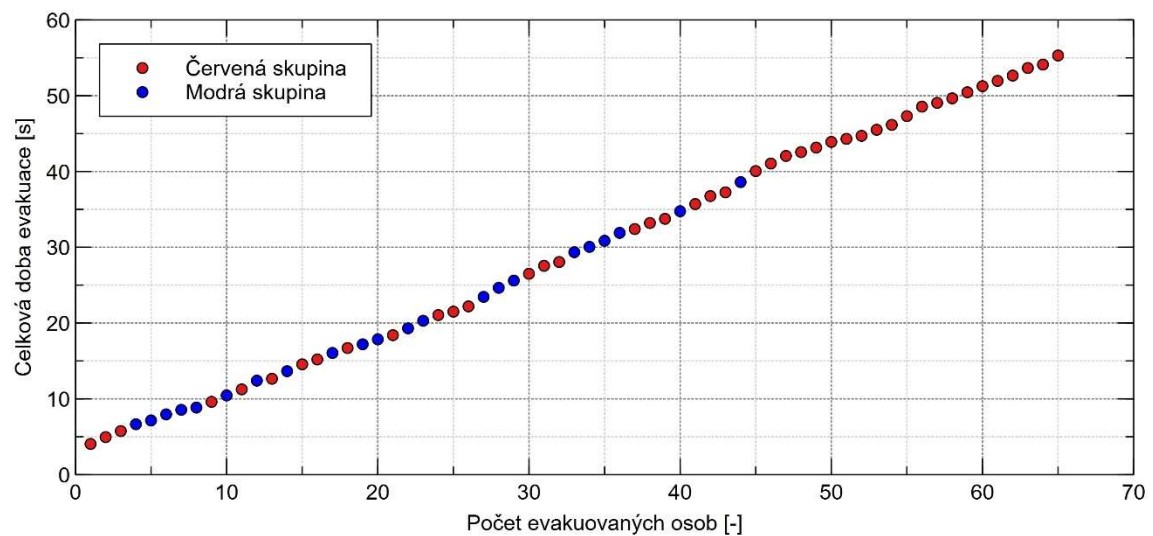
- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 36,65 s



Obr. 3. 5 Graf celkové doby evakuace běhu T5

Graf celkové doby evakuace běhu T6

- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm
- celková doba evakuace 55,30 s

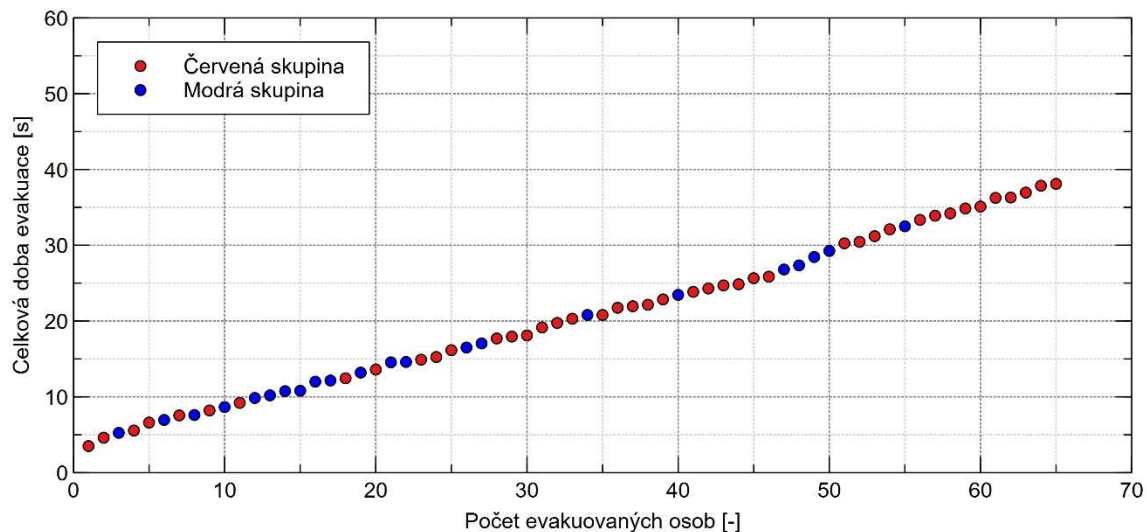


Obr. 3. 6 Graf celkové doby evakuace běhu T6



### Graf celkové doby evakuace běhu T7

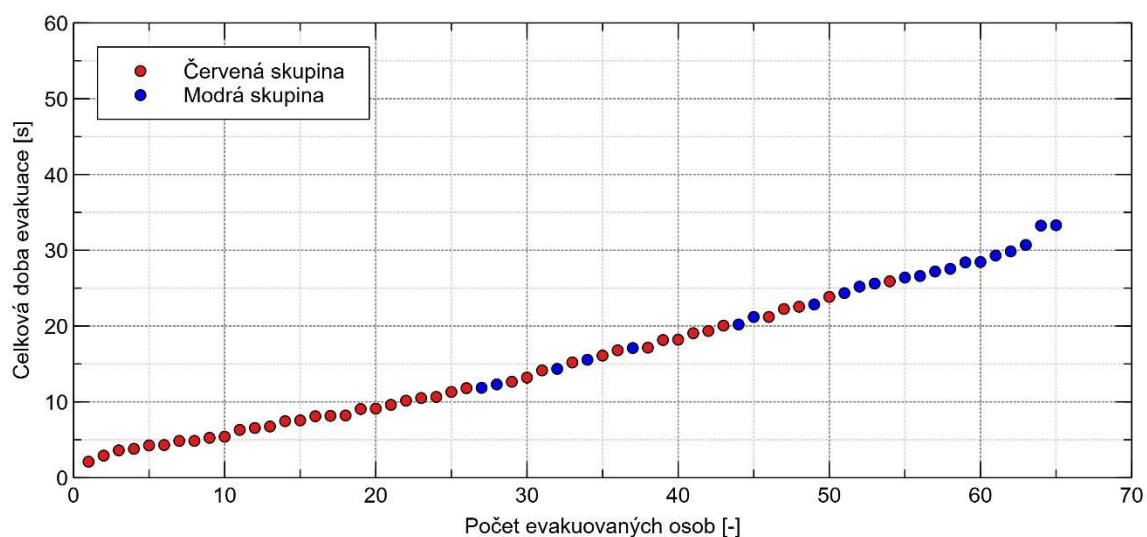
- modrá skupina usazena po strannách u koridorů
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 38,10 s



Obr. 3. 7 Graf celkové doby evakuace běhu T7

### Graf celkové doby evakuace běhu T8

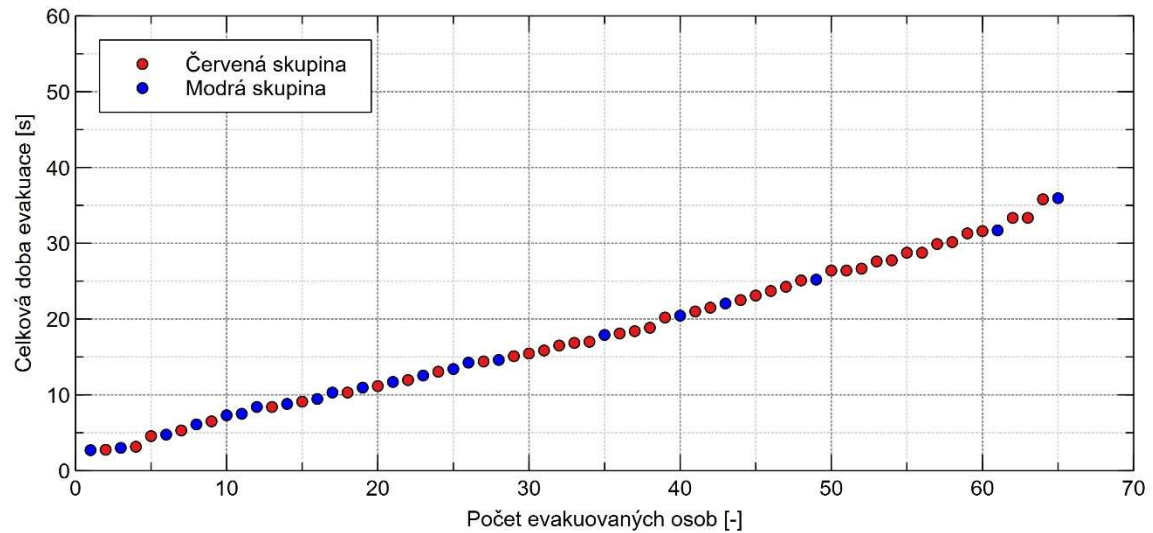
- modrá skupina usazena ve středu
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 33,30 s



Obr. 3. 8 Graf celkové doby evakuace běhu T8

Graf celkové doby evakuace běhu T9

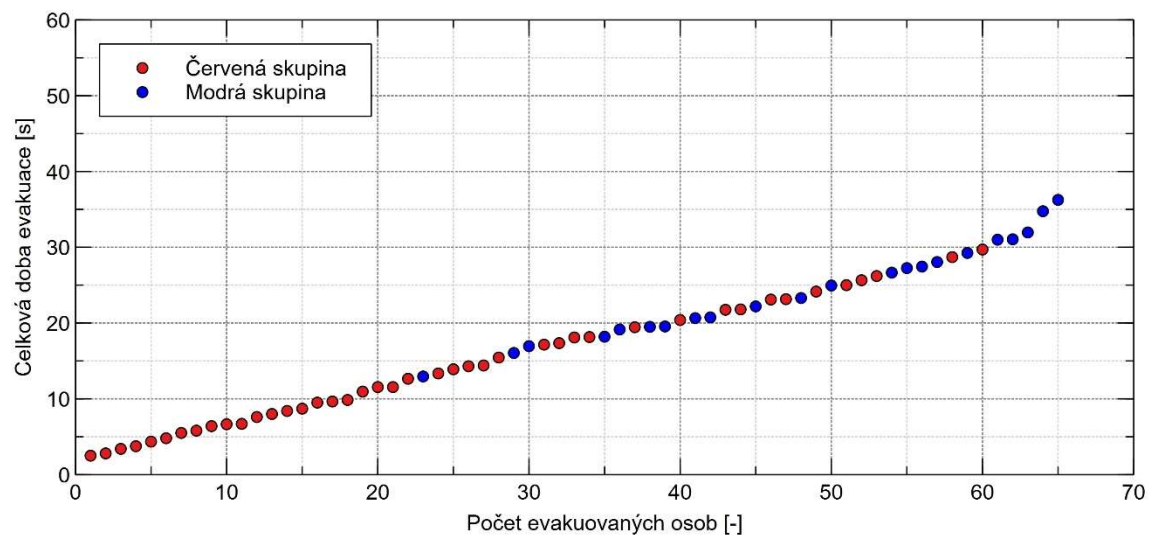
- modrá skupina usazena u pravého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 35,95 s



Obr. 3. 9 Graf celkové doby evakuace běhu T9

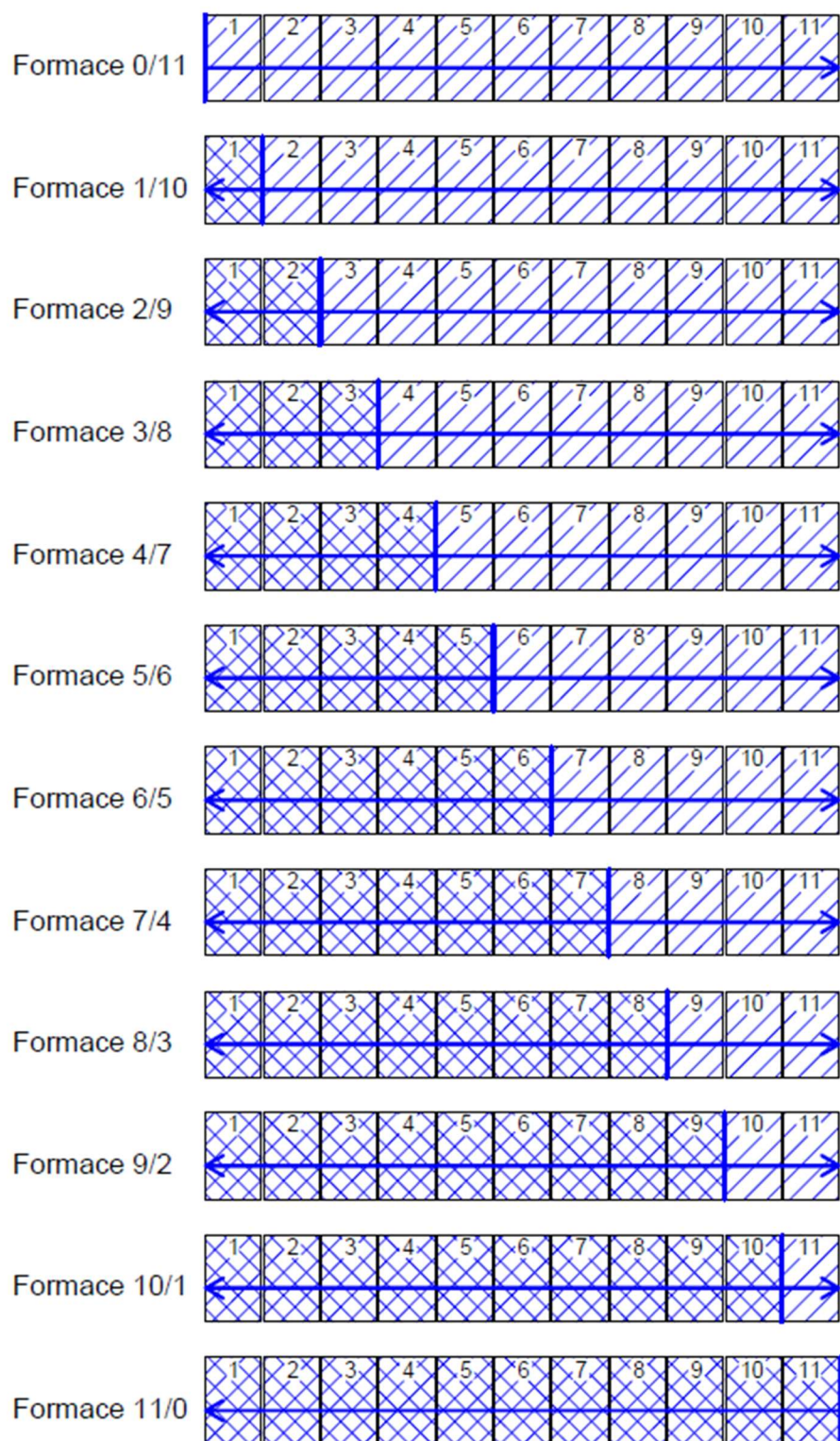
Graf celkové doby evakuace běhu T10

- modrá skupina usazena u levého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 36,25 s



Obr. 3. 10 Graf celkové doby evakuace běhu T10

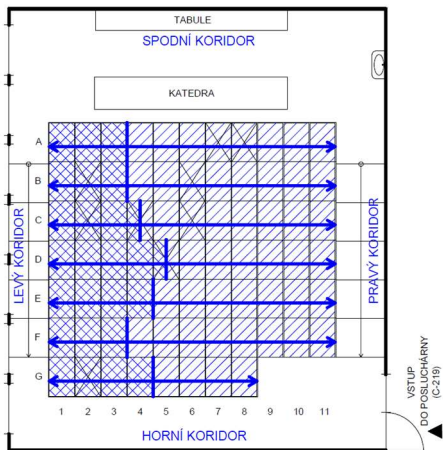
## Příloha 4 – Schématické zobrazení formací



Obr. 4. 1 Zobrazení formací, kterými mohli účastníci opustit řadu sedadel

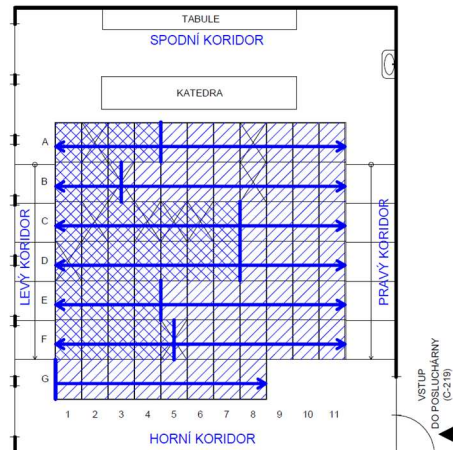


## Příloha 5 – Směr výstupu z prostoru uliček



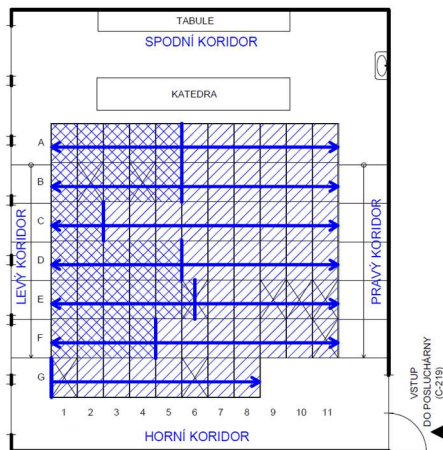
a) Běh T1;

formace: 3/8 (3x); 4/7 (4x)



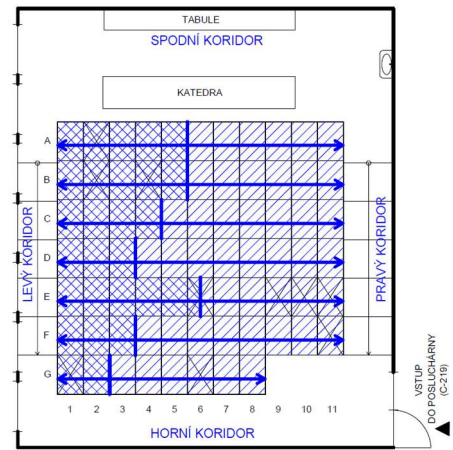
b) Běh T2

formace: 0/11 (1x); 3/8 (1x); 4/7 (2x); 5/6 (1x); 6/5 (2x)



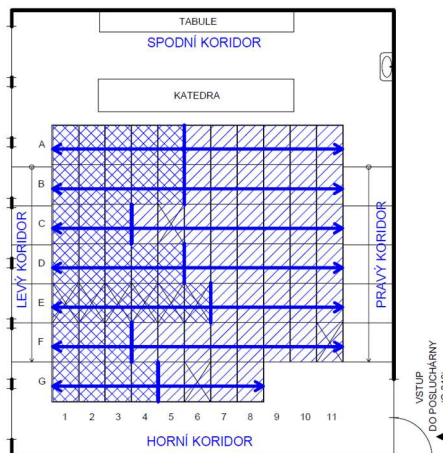
c) Běh T3

formace: 0/11 (1x); 2/9 (1x); 4/7 (1x); 5/6 (4x)



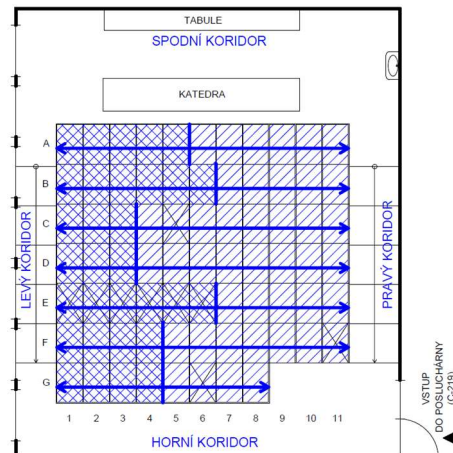
d) Běh T4

formace: 2/9 (1x); 3/8 (2x); 4/7 (1x); 5/6 (3x)



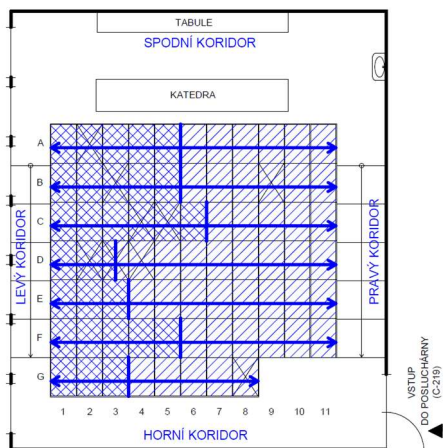
e) Běh T5

formace: 3/8 (2x); 4/7 (1x); 5/6 (3x); 6/5 (1x)



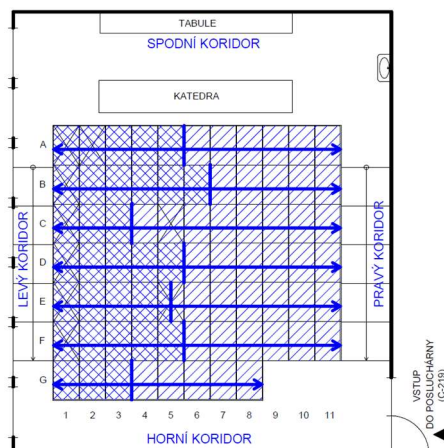
f) Běh T6

formace: 3/8 (2x); 4/7 (2x); 5/6 (1x); 6/5 (2x)



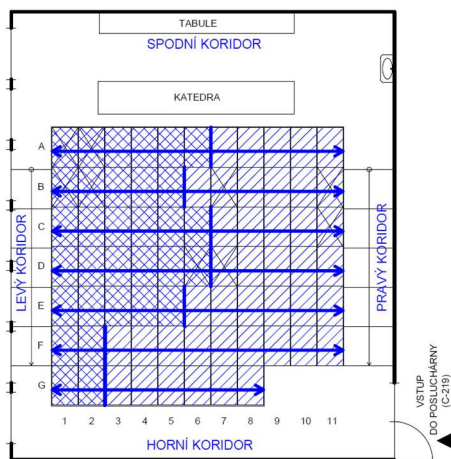
g) Běh T7

formace: 3/8 (3x); 5/6 (3x); 6/5 (1x)



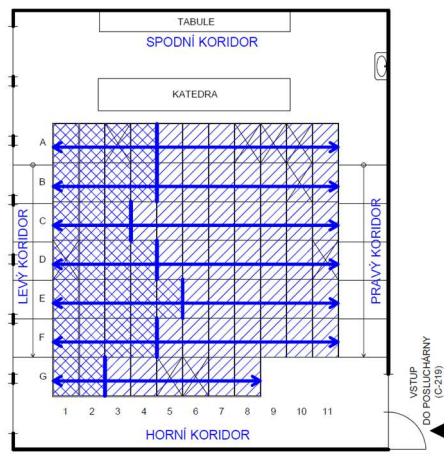
h) Běh T8

formace: 3/8 (2x); 5/6 (4x); 6/5 (1x)



i) Běh T9

formace: 2/9 (3x); 5/6 (2x); 6/5 (3x)

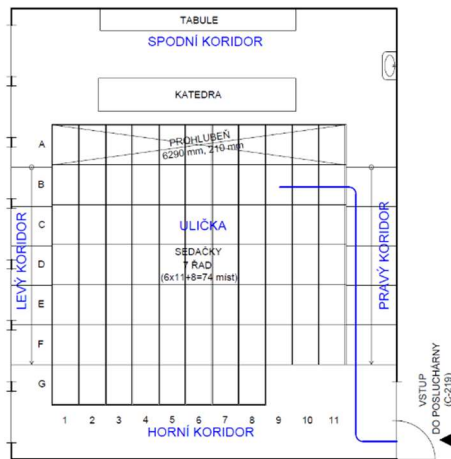


j) Běh T10

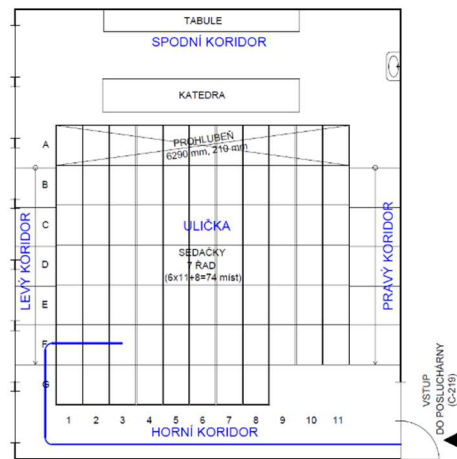
formace: 2/9 (1x); 3/8 (1x); 4/7 (4x); 5/6 (1x)

Obr. 5. 1 Směr výstupu z prostoru uliček

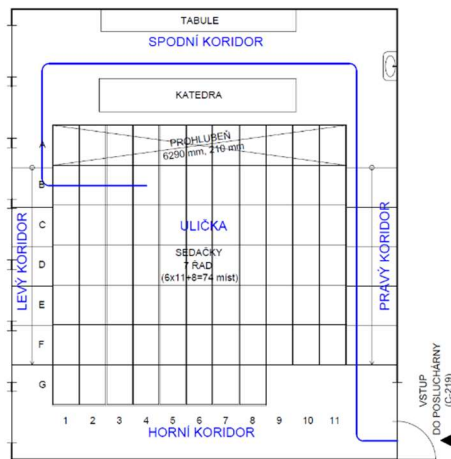
## Příloha 6 – Trasy pohybu



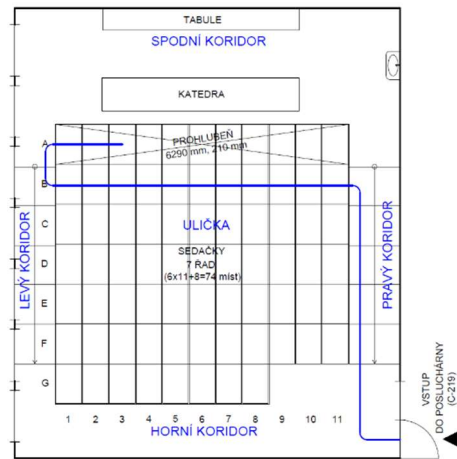
a) Trasa A



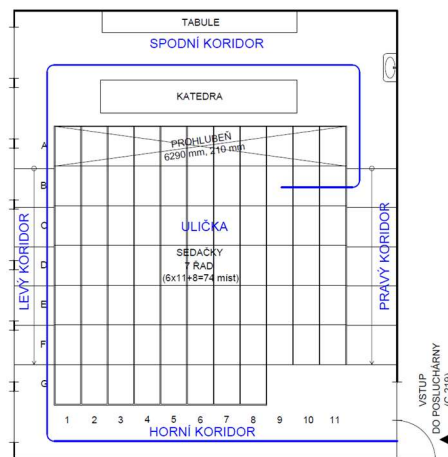
b) Trasa B



c) Trasa C



d) Trasa D



e) Trasa E

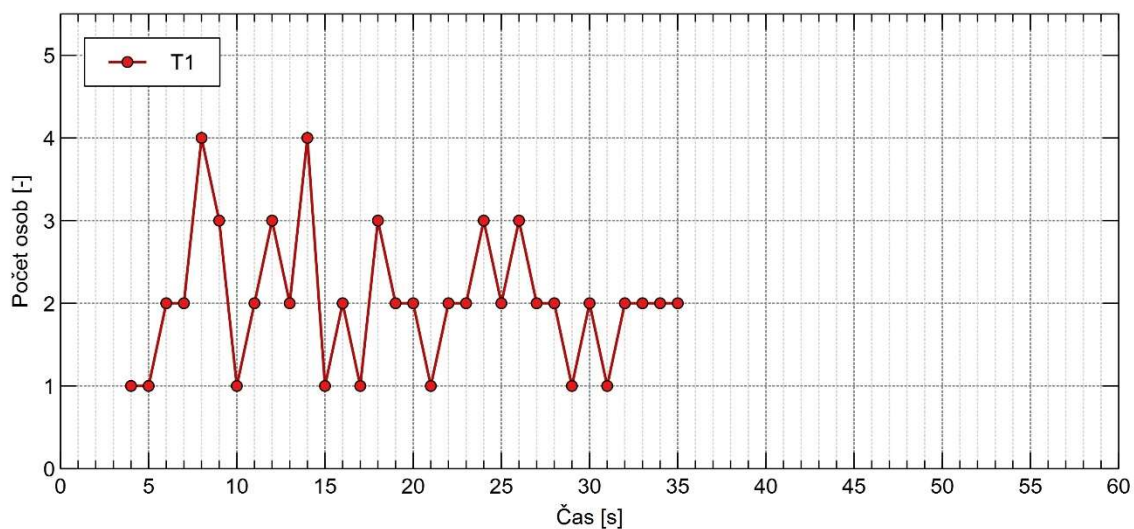
Obr. 6. 1 Využití průběhy tras



## Příloha 7 – Toky osob v čase jednotlivých běhů (hodnocené ve východu)

### Graf toku osob v čase při běhu T1

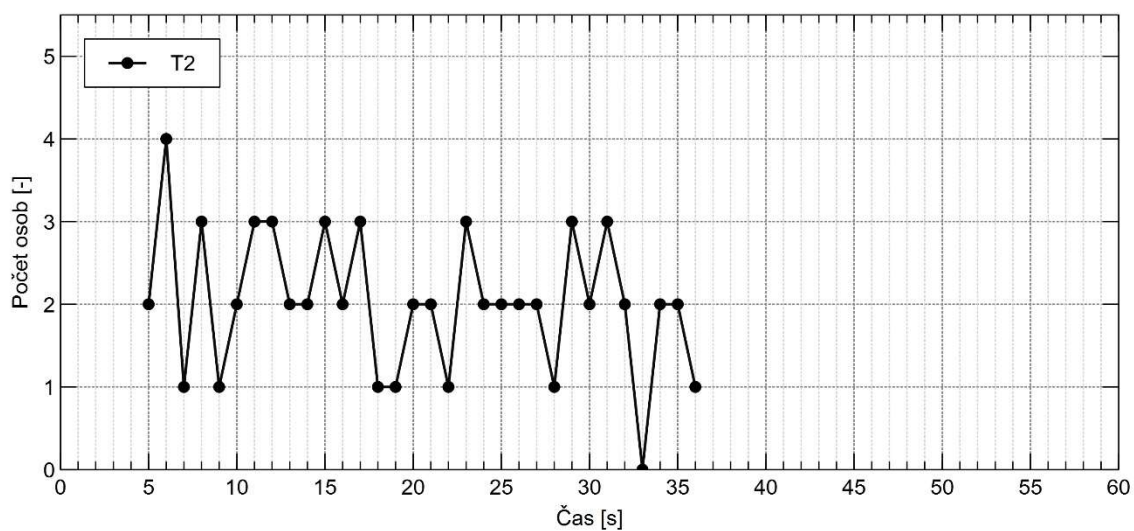
- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 34,55 s



Obr. 7.1 Graf toku osob v čase pro běh T1

### Graf toku osob v čase při běhu T2

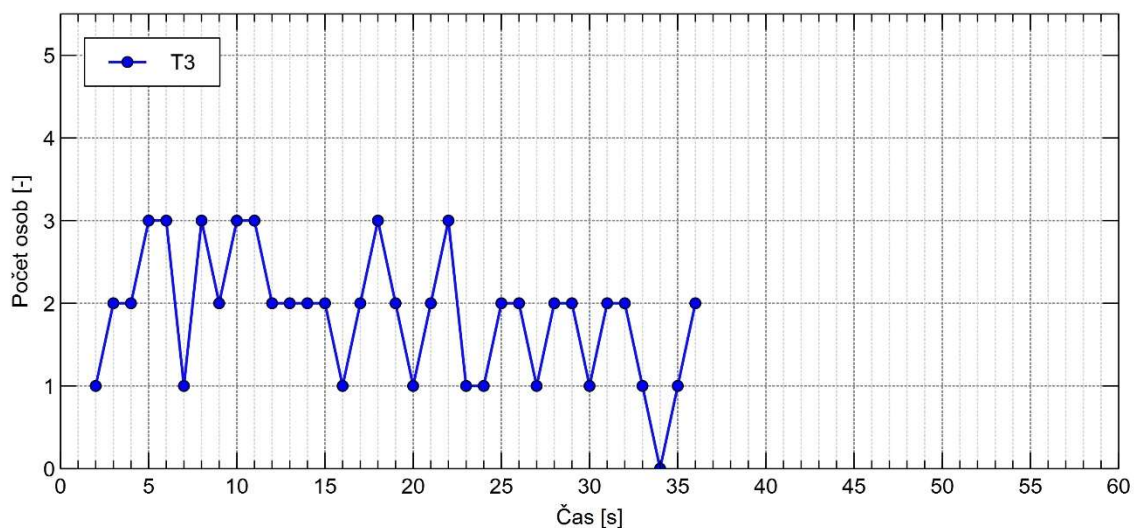
- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 35,50 s



Obr. 7.2 Graf toku osob v čase pro běh T2

Graf toku osob v čase při běhu T3

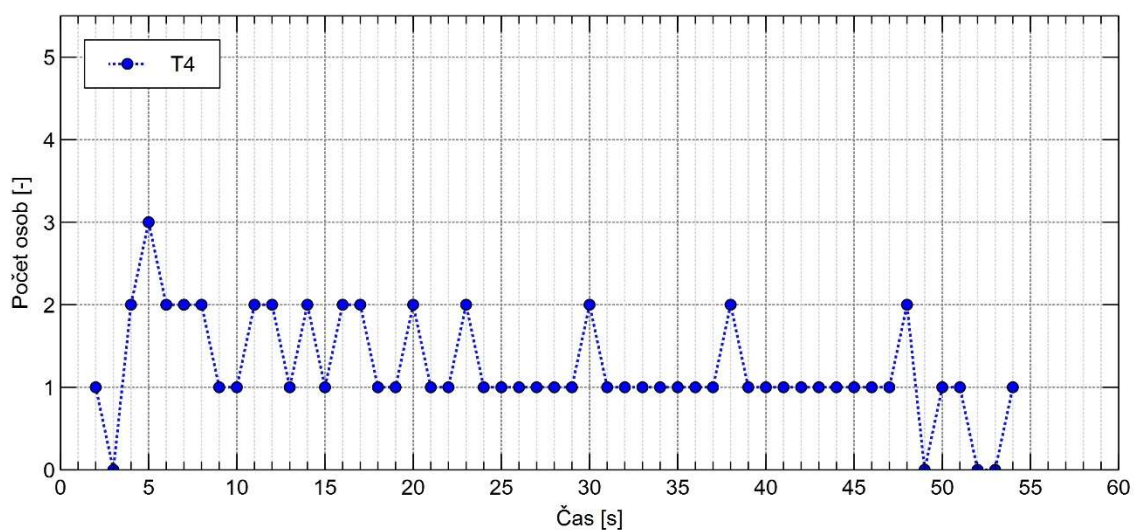
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 35,95 s



Obr. 7. 3 Graf toku osob v čase pro běh T3

Graf toku osob v čase při běhu T4

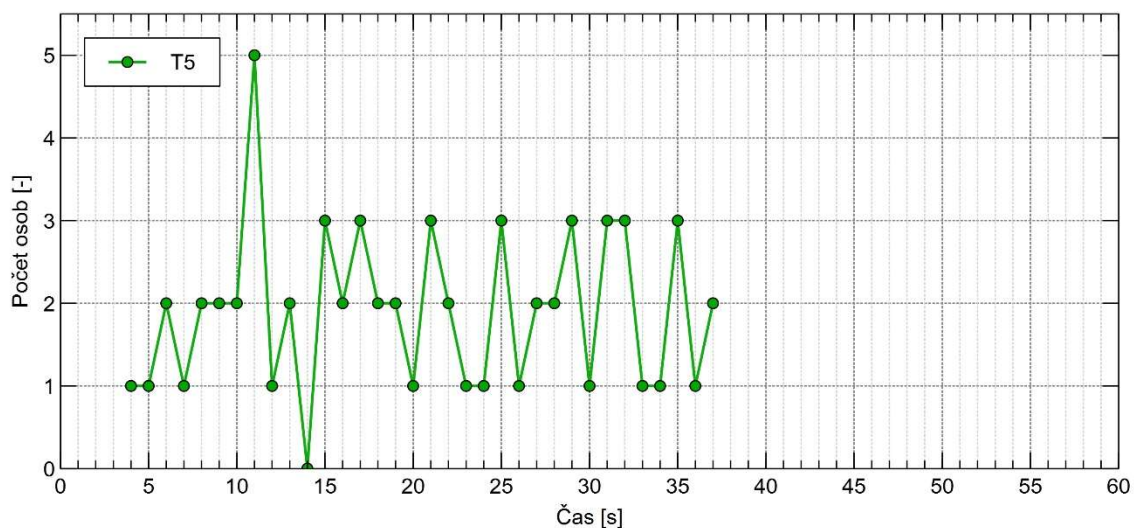
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm
- celková doba evakuace 53,40 s



Obr. 7. 4 Graf toku osob v čase pro běh T4

### Graf toku osob v čase při běhu T5

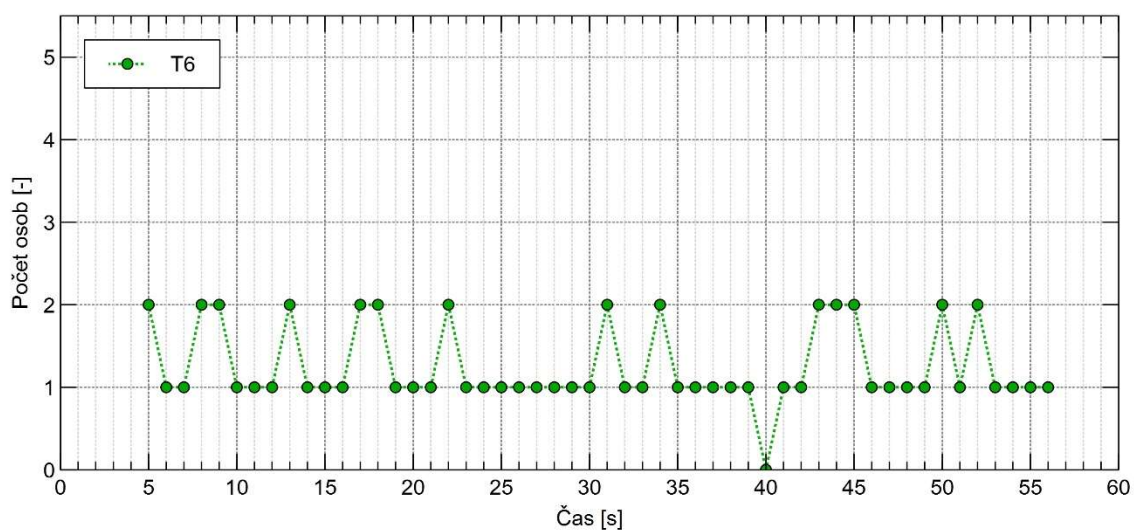
- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 36,65 s



Obr. 7. 5 Graf toku osob v čase pro běh T5

### Graf toku osob v čase při běhu T6

- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm
- celková doba evakuace 55,30 s

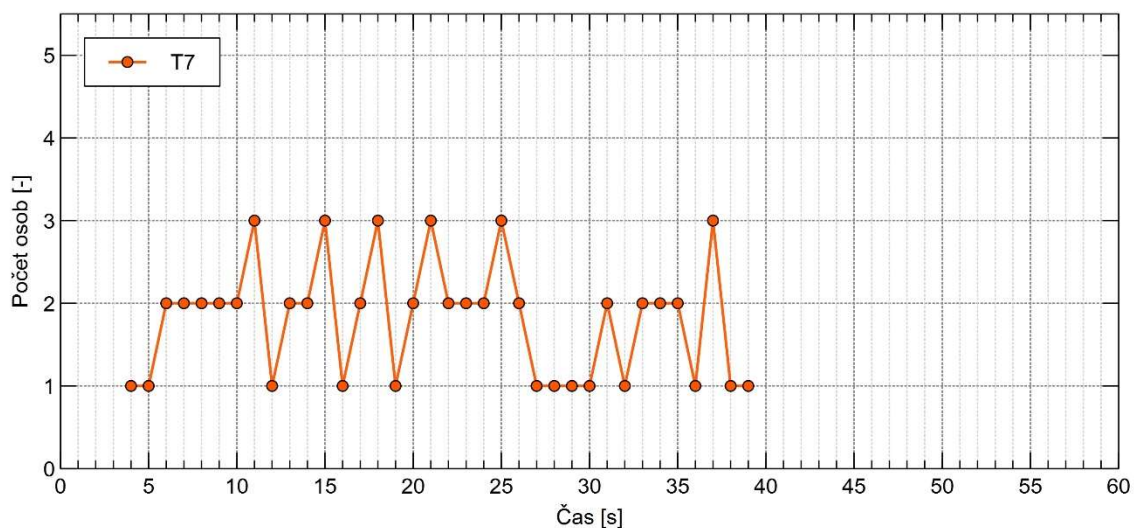


Obr. 7. 6 Graf toku osob v čase pro běh T6



Graf toku osob v čase při běhu T7

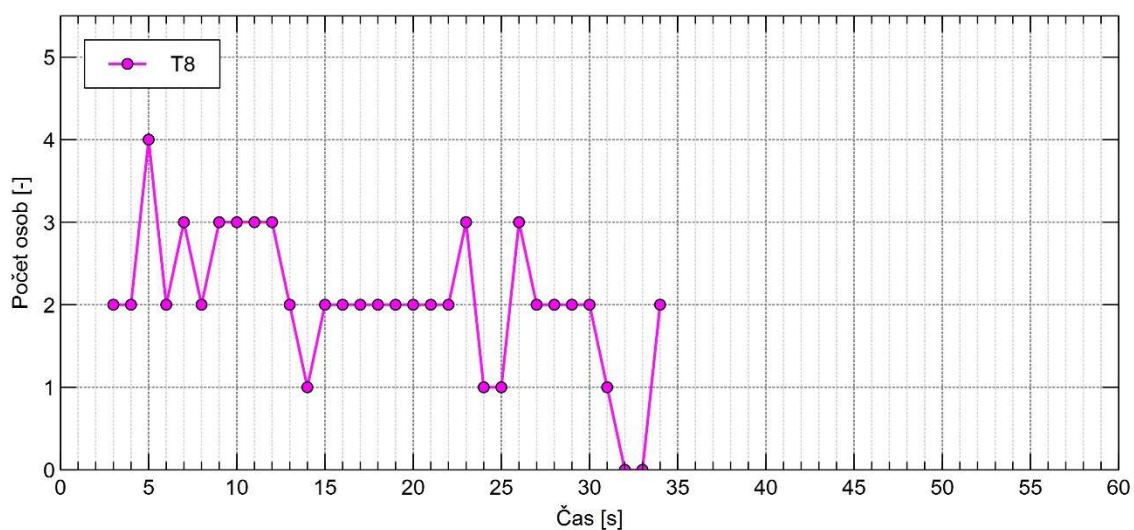
- modrá skupina usazena po strannách u koridorů
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 38,10 s



Obr. 7. 7 Graf toku osob v čase pro běh T7

Graf toku osob v čase při běhu T8

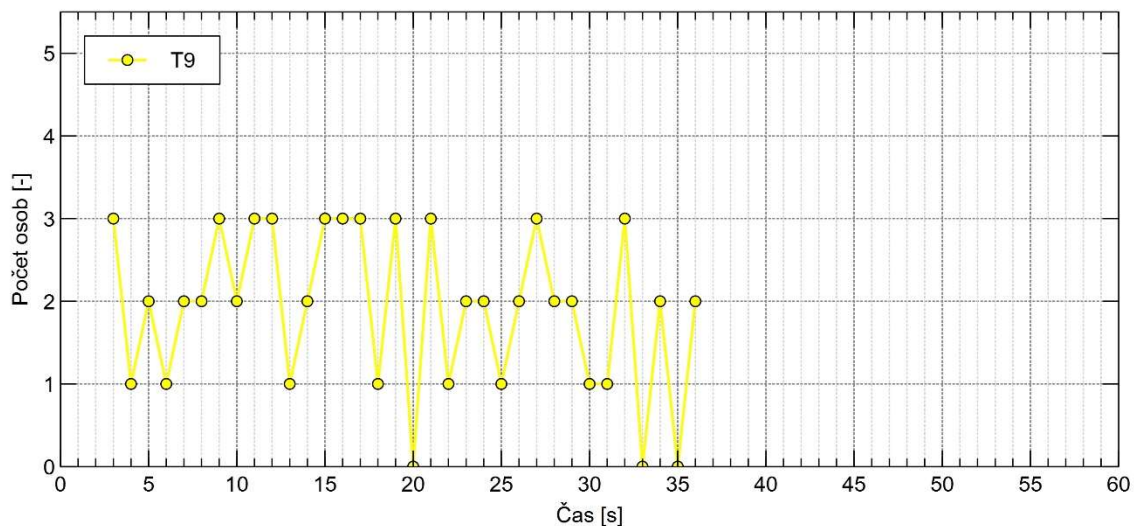
- modrá skupina usazena ve středu
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 33,30 s



Obr. 7. 8 Graf toku osob v čase pro běh T8

Graf toku osob v čase při běhu T9

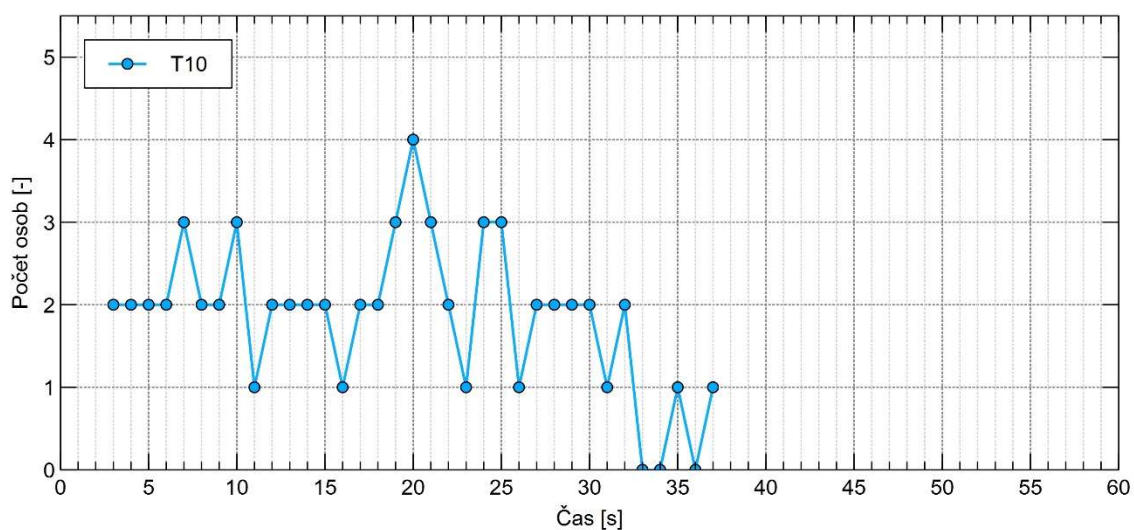
- modrá skupina usazena u pravého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 35,95 s



Obr. 7. 9 Graf toku osob v čase pro běh T9

Graf toku osob v čase při běhu T10

- modrá skupina usazena u levého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm
- celková doba evakuace 36,25 s



Obr. 7. 10 Graf toku osob v čase pro běh T10



**Příloha 8 – Tabulka šířky ramen a běžné rychlosti účastníků**

ID	Skupina účastníka	Kategorie účastníka	Šířka ramen účastníka [m]	Běžná rychlost účastníka [m/s]
0	modrá	malé dítě (3 – 6 let)	0,281	1,026
1	modrá	malé dítě (3 – 6 let)	0,302	1,542
2	modrá	malé dítě (3 – 6 let)	0,303	1,374
3	modrá	malé dítě (3 – 6 let)	0,254	1,300
10	modrá	handicapovaní (16 – 65 let)	0,458	1,304
11	modrá	matka s dítětem v šátku (18 – 35 let)	0,425	1,432
12	modrá	těhotná žena (18 – 35 let)	0,390	1,480
13	modrá	senior (65 let a více)	0,438	1,391
14	modrá	handicapovaní (16 – 65 let)	0,383	1,466
15	modrá	handicapovaní (16 – 65 let)	0,463	1,312
16	modrá	handicapovaní (16 – 65 let)	0,393	1,487
17	modrá	matka s dítětem v šátku (18 – 35 let)	0,443	1,598
18	modrá	handicapovaní (16 – 65 let)	0,428	1,598
19	modrá	senior (65 let a více)	0,453	1,300
20	modrá	senior (65 let a více)	0,451	1,531
21	modrá	handicapovaní (16 – 65 let)	0,421	0,991
22	modrá	rodič (18 – 50 let)	0,452	1,642
23	modrá	senior (65 let a více)	0,420	1,199
24	modrá	senior (65 let a více)	0,362	1,042
25	modrá	senior (65 let a více)	0,414	1,524
26	modrá	rodič (18 – 50 let)	0,384	1,718
27	modrá	rodič (18 – 50 let)	0,450	1,657
40	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,498	2,008
41	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,418	1,824
42	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,455	1,516
50	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,452	1,838
51	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,437	1,890
52	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,416	1,861
53	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,429	1,571
54	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,499	1,506
55	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,444	1,570
56	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,376	1,617
57	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,432	1,672
58	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,435	1,803
59	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,421	1,781
60	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,395	1,780
61	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,382	1,859
62	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,450	1,552
63	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,480	1,512
64	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,374	1,527
65	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,434	1,515

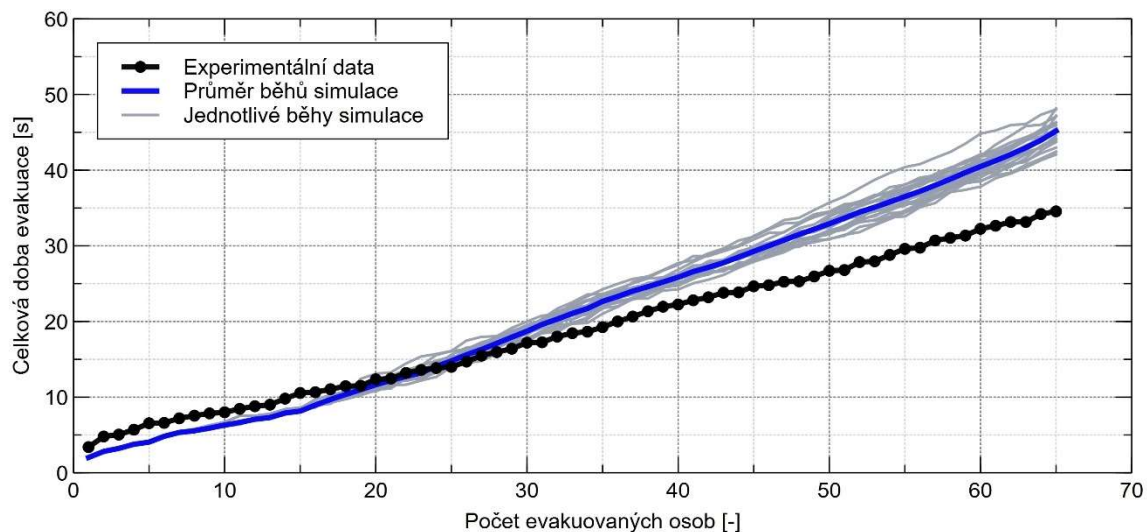
ID	Skupina účastníka	Kategorie účastníka	Šířka ramen účastníka [m]	Běžná rychlost účastníka [m/s]
66	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,451	1,524
67	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,369	1,627
68	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,446	1,611
69	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,438	1,737
70	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,442	1,660
71	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,482	1,752
72	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,476	2,034
73	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,373	1,319
74	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,446	1,302
75	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,412	1,412
76	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,394	1,786
77	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,434	1,648
78	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,440	1,787
79	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,480	1,718
80	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,430	1,577
81	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,395	1,550
82	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,492	1,529
83	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,416	1,706
84	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,390	1,343
85	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,399	1,586
86	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,393	1,337
87	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,401	1,825
88	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,479	1,202
89	červená	dospělí (16 – 65 let)	0,492	2,310

Tab. 8. 1 Šířky ramen a běžné rychlosti účastníků

## Příloha 9 – Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků celkové doby evakuace jednotlivých běhů (validace základního modelu)

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T1

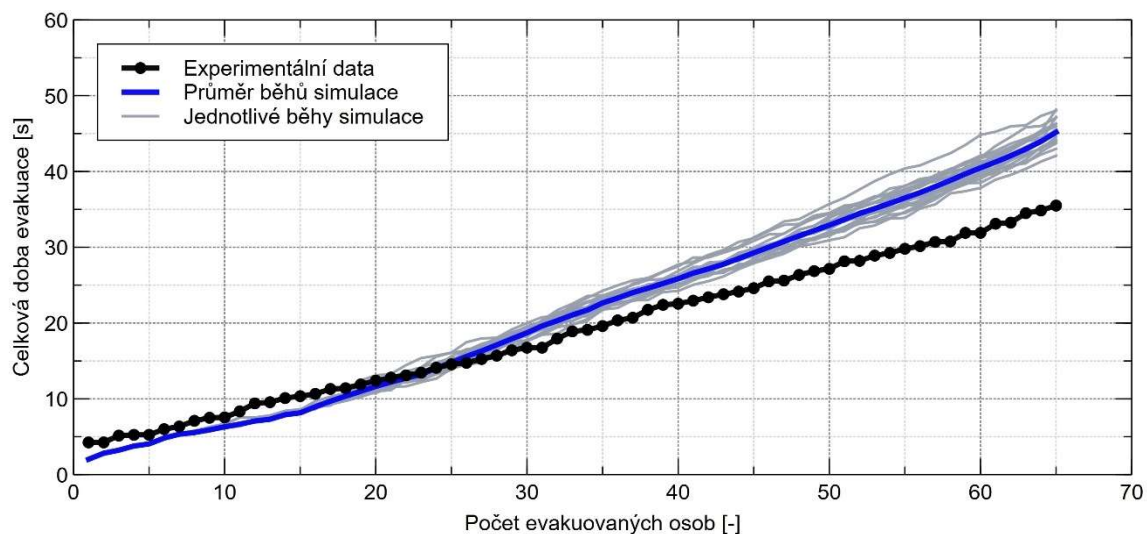
- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 9. 1 Graf porovnání TET běhu T1

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T2

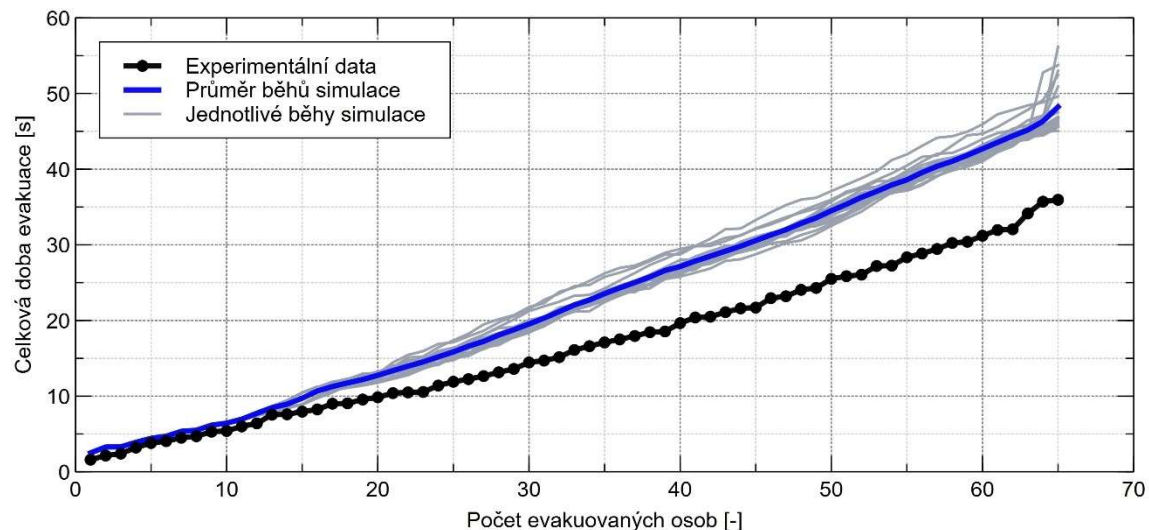
- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 9. 2 Graf porovnání TET běhu T2

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T3

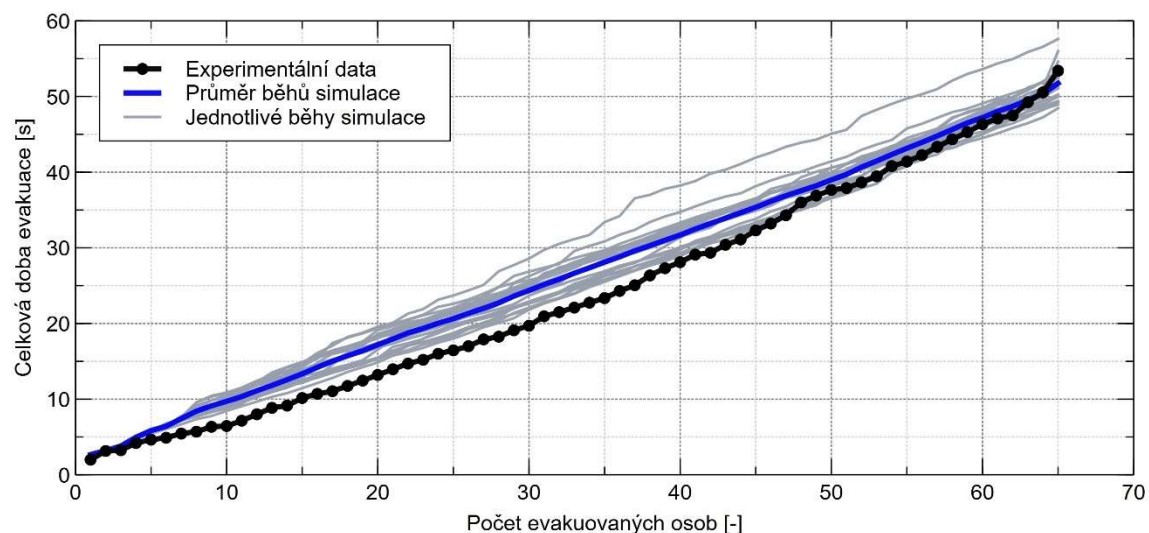
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 9. 3 Graf porovnání TET běhu T3

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T4

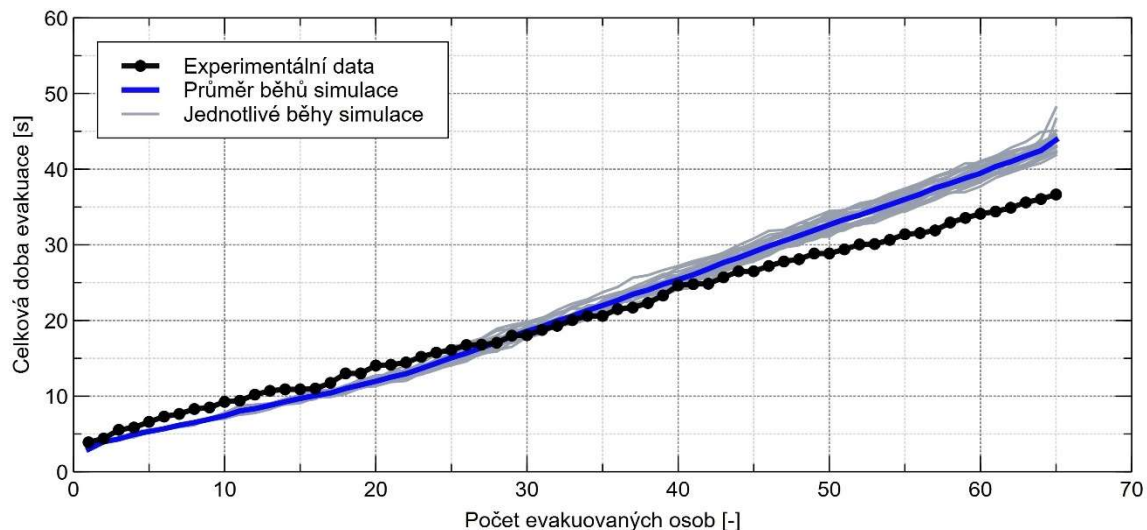
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm



Obr. 9. 4 Graf porovnání TET běhu T4

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T5

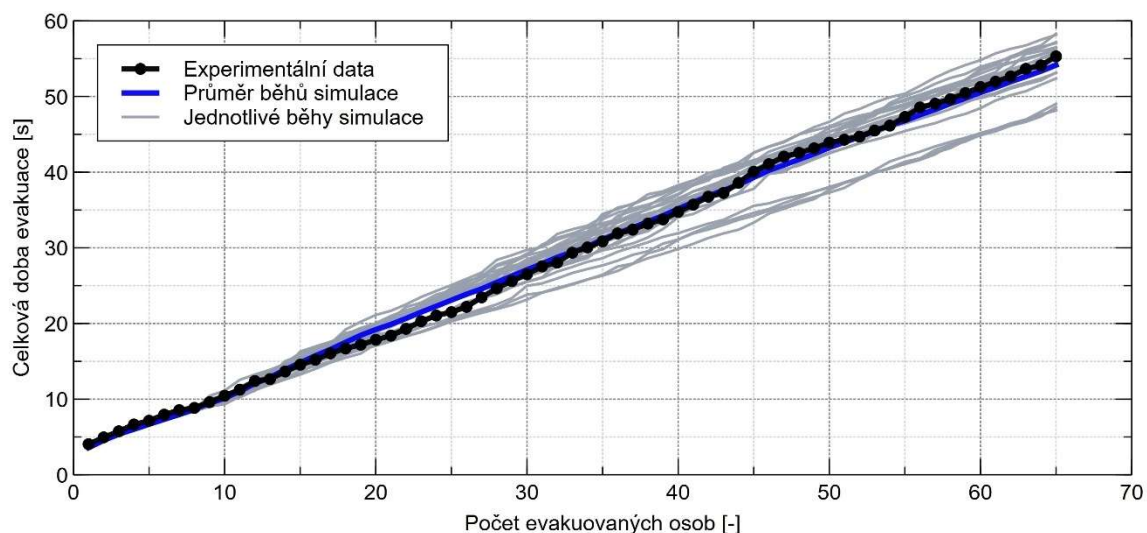
- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 9. 5 Graf porovnání TET běhu T5

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T6

- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm

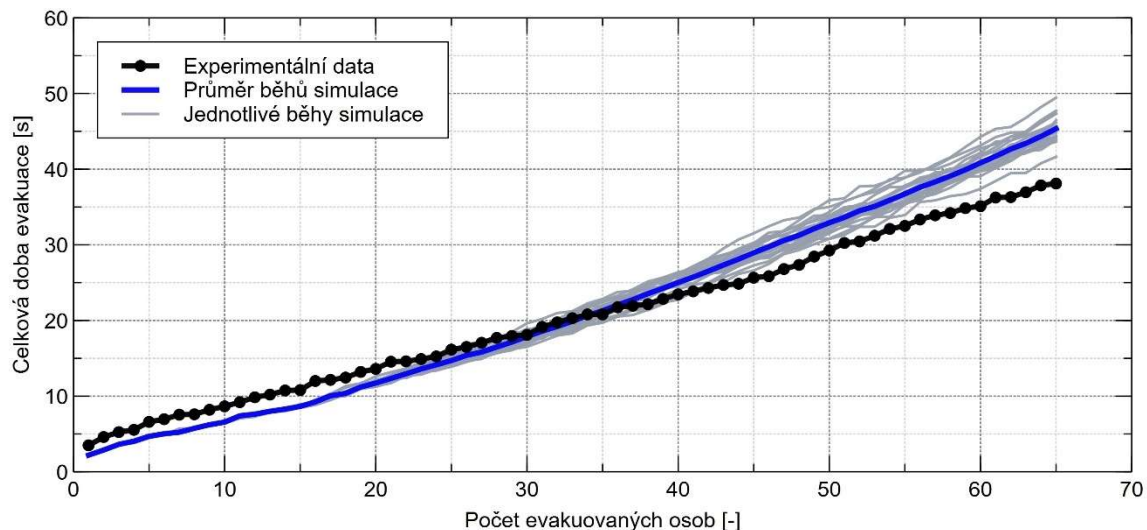


Obr. 9. 6 Graf porovnání TET běhu T6



### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T7

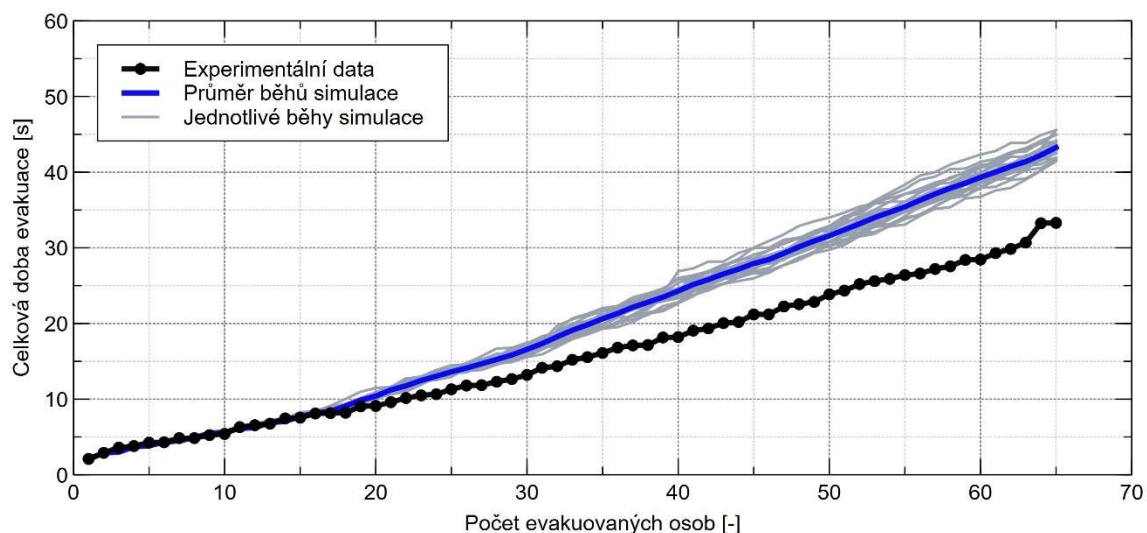
- modrá skupina usazena po strannách u koridorů
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 9. 7 Graf porovnání TET běhu T7

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T8

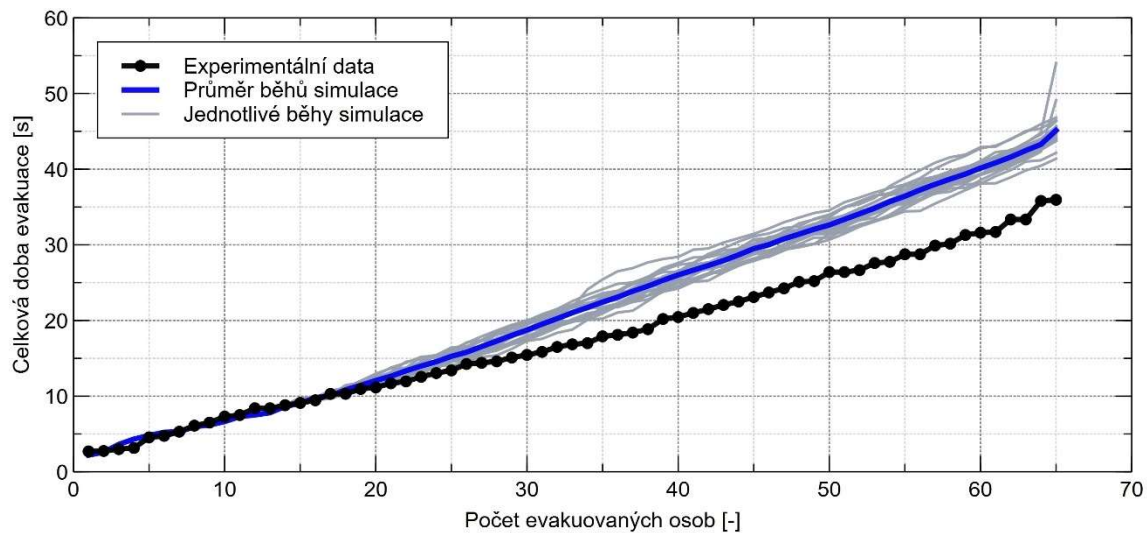
- modrá skupina usazena ve středu
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 9. 8 Graf porovnání TET běhu T8

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T9

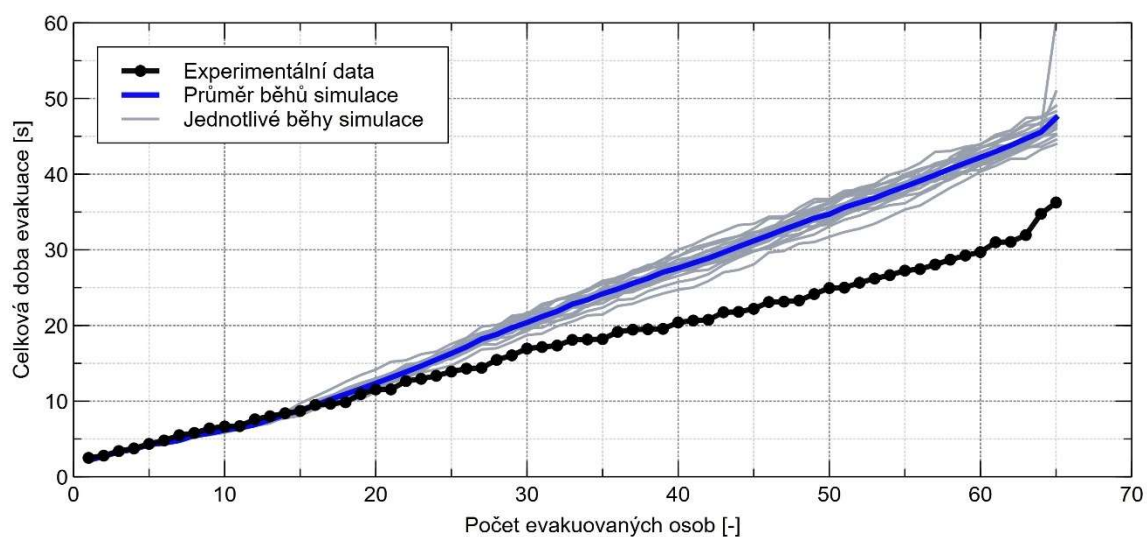
- modrá skupina usazena u pravého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 9. 9 Graf porovnání TET běhu T9

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T10

- modrá skupina usazena u levého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka

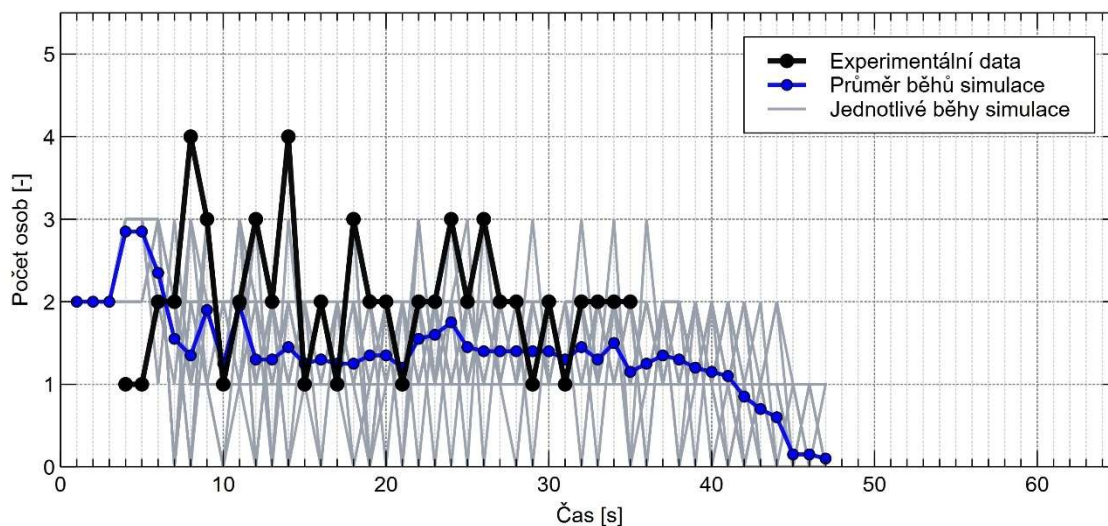


Obr. 9. 10 Graf porovnání TET běhu T10

## Příloha 10 – Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků toků osob v čase jednotlivých běhů (validace základního modelu)

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T1

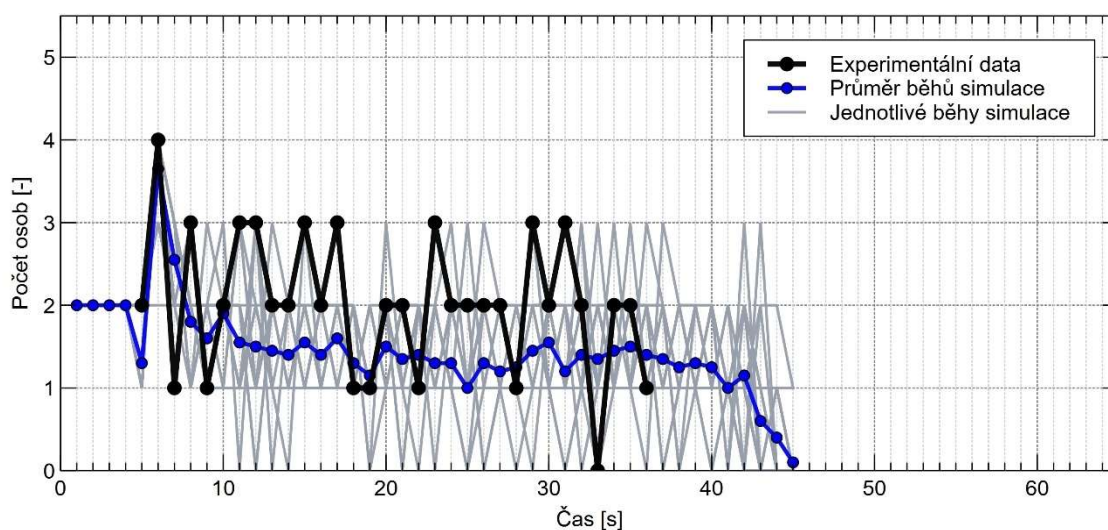
- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 10. 1 Graf porovnání toku osob v čase běhu T1

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T2

- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm

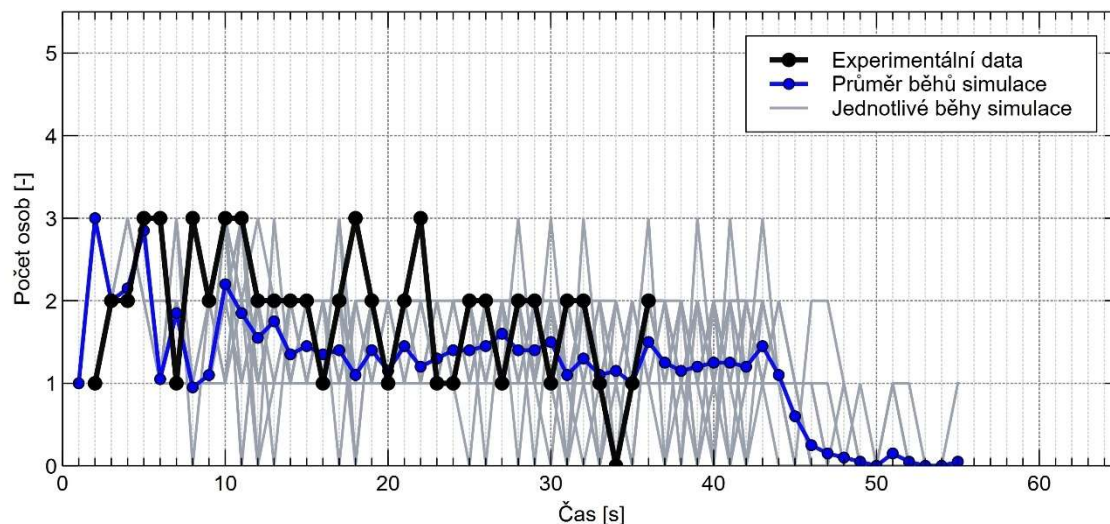


Obr. 10. 2 Graf porovnání toku osob v čase běhu T2



### Graf porovnání toku osob v čase běhu T3

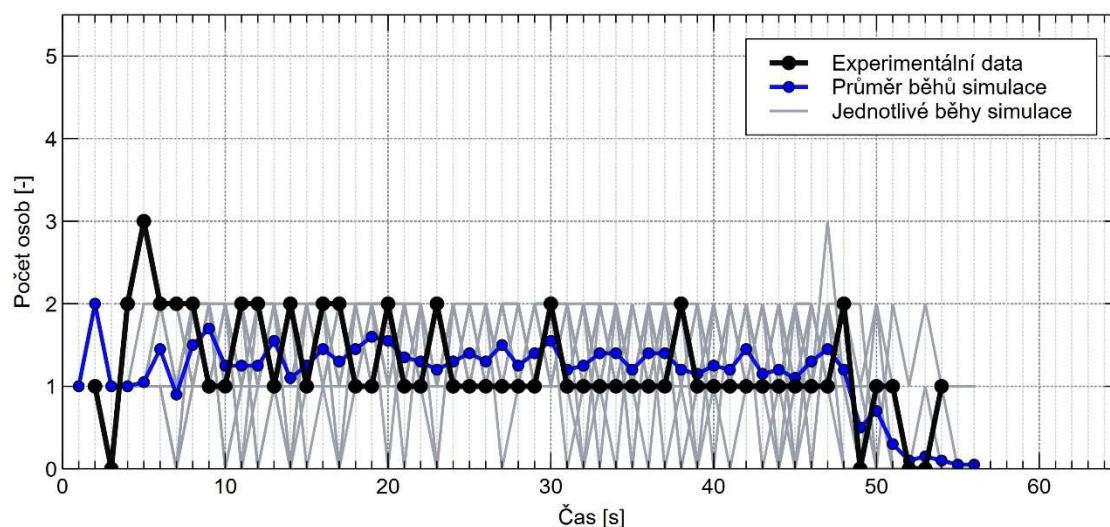
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 10. 3 Graf porovnání toku osob v čase běhu T3

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T4

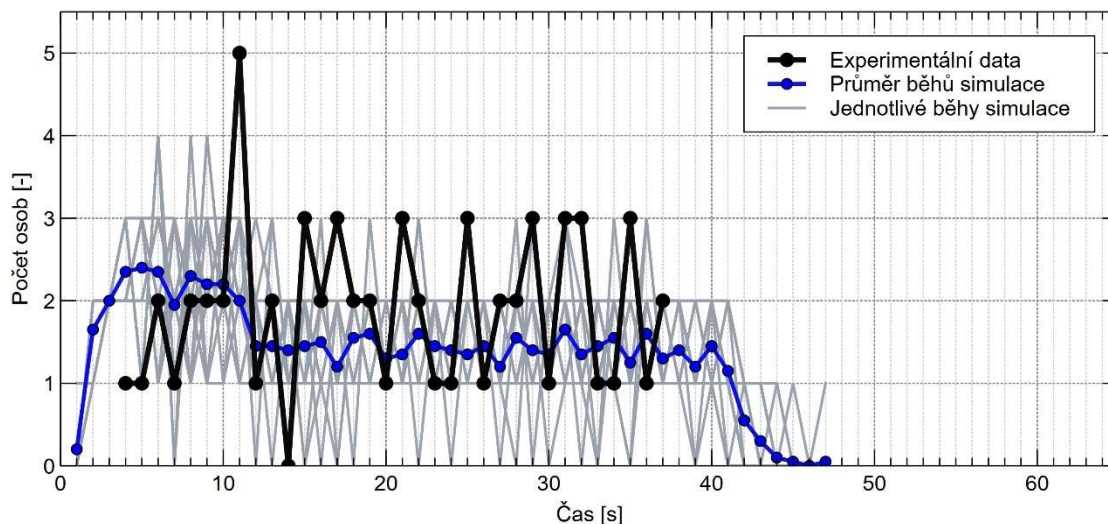
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm



Obr. 10. 4 Graf porovnání toku osob v čase běhu T4

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T5

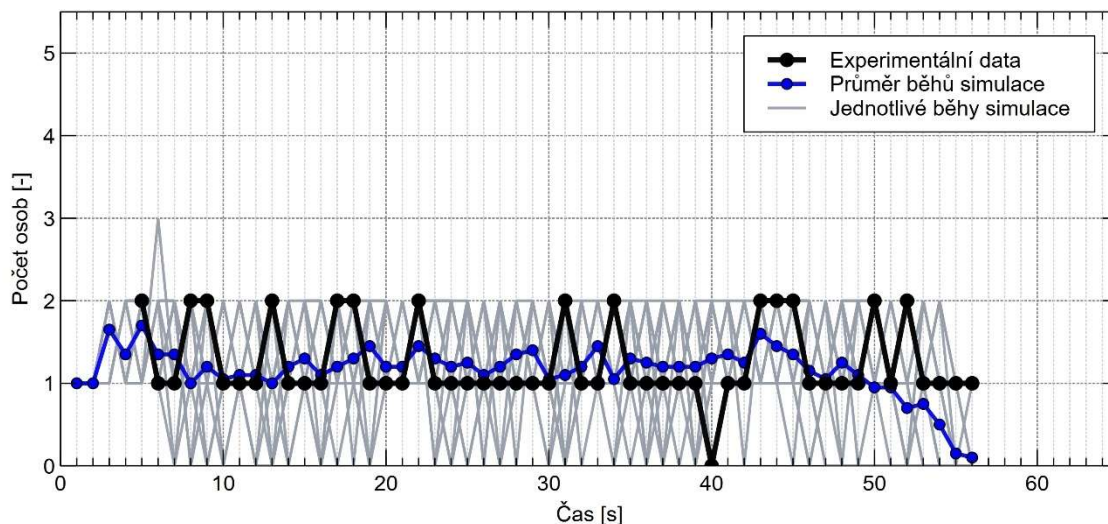
- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 10. 5 Graf porovnání toku osob v čase běhu T5

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T6

- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm

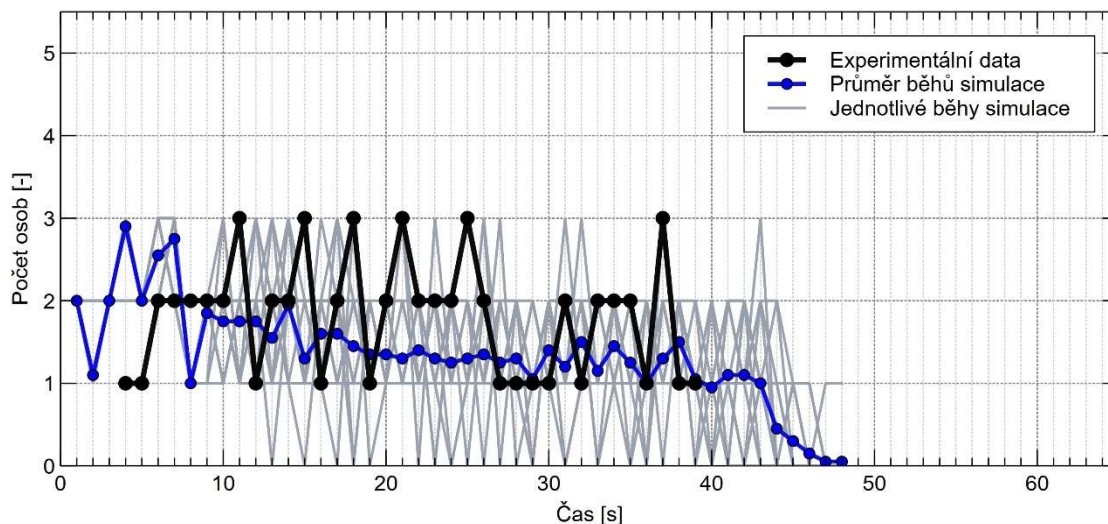


Obr. 10. 6 Graf porovnání toku osob v čase běhu T6



### Graf porovnání toku osob v čase běhu T7

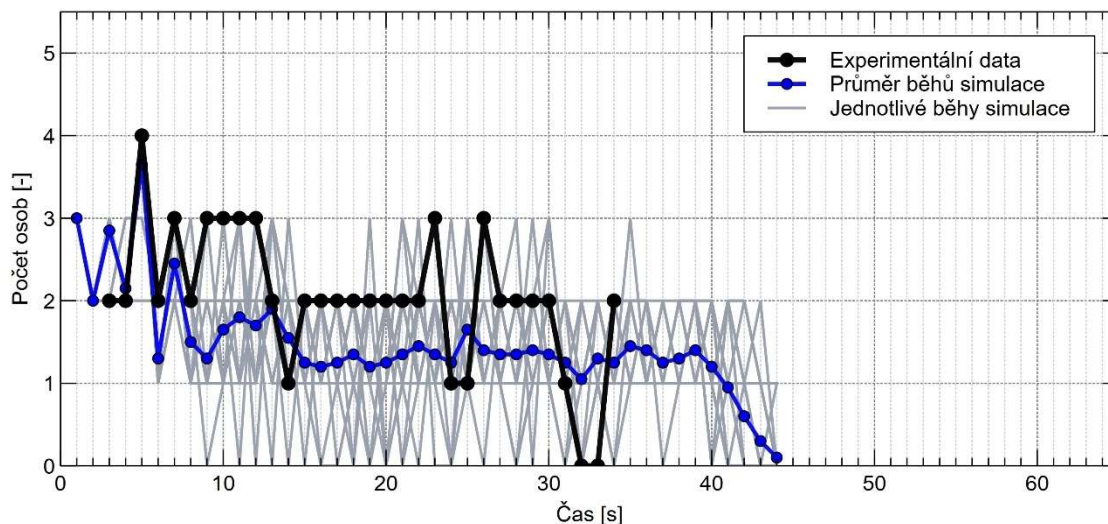
- modrá skupina usazena po strannách u koridorů
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 10. 7 Graf porovnání toku osob v čase běhu T7

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T8

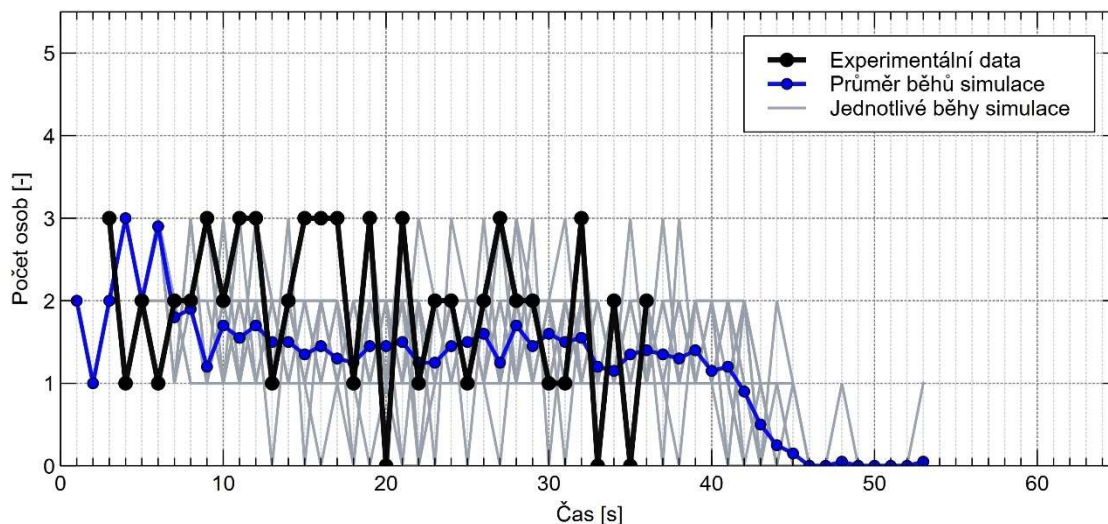
- modrá skupina usazena ve středu
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 10. 8 Graf porovnání toku osob v čase běhu T8

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T9

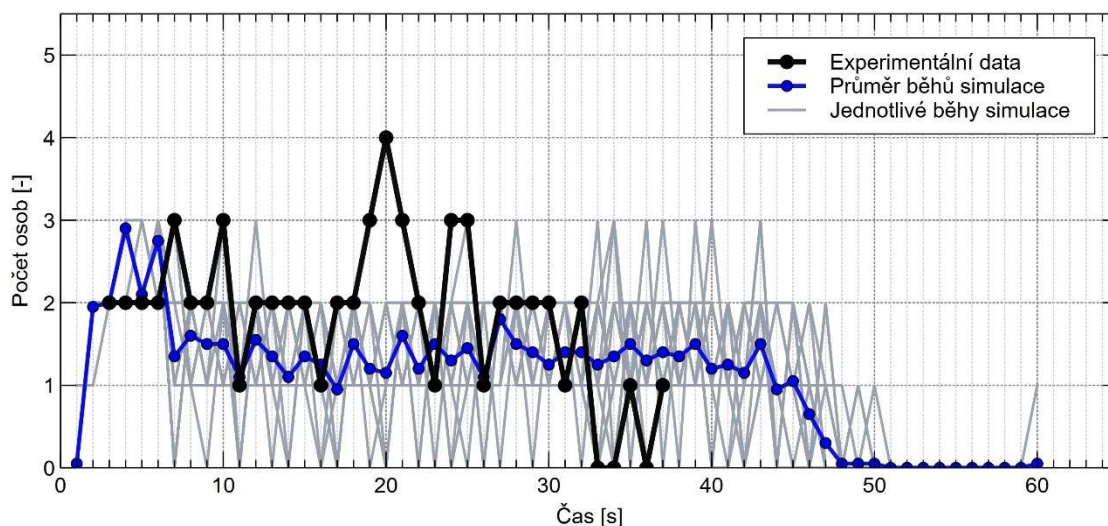
- modrá skupina usazena u pravého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 10. 9 Graf porovnání toku osob v čase běhu T9

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T10

- modrá skupina usazena u levého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka

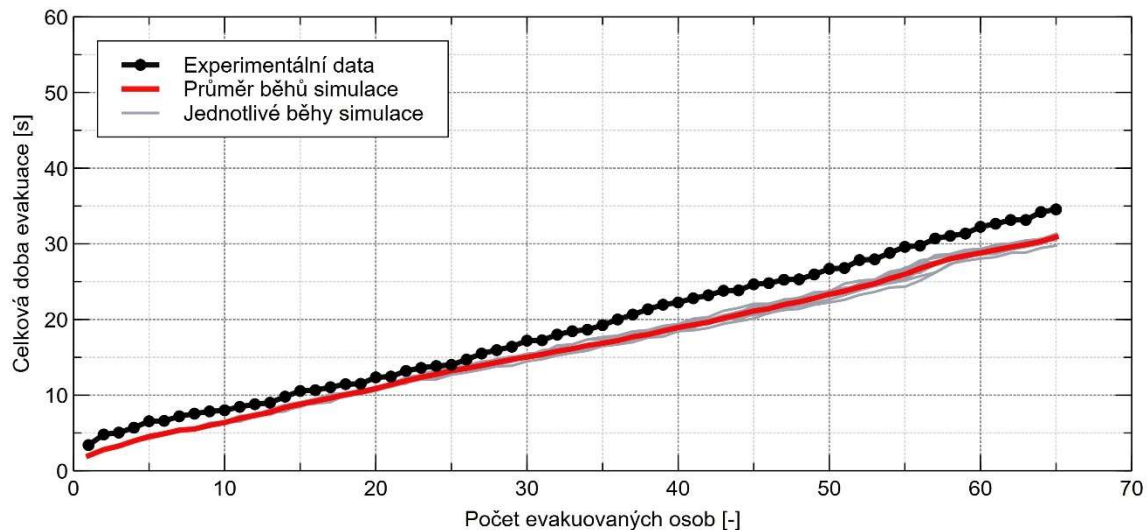


Obr. 10. 10 Graf porovnání toku osob v čase běhu T10

## Příloha 11 – Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků celkové doby evakuace jednotlivých běhů (validace upraveného modelu)

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T1

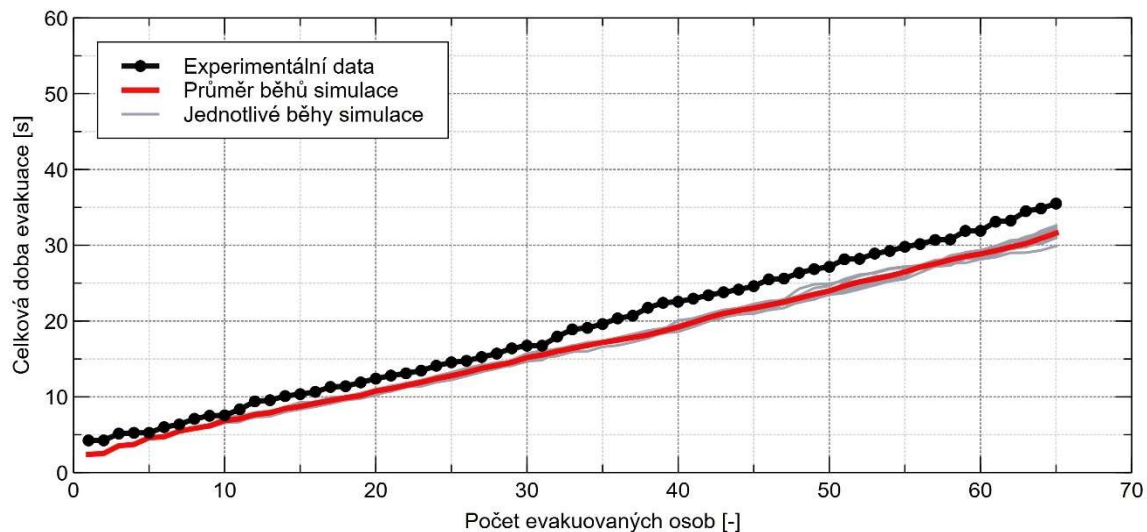
- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 11. 1 Graf porovnání TET běhu T1

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T2

- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm

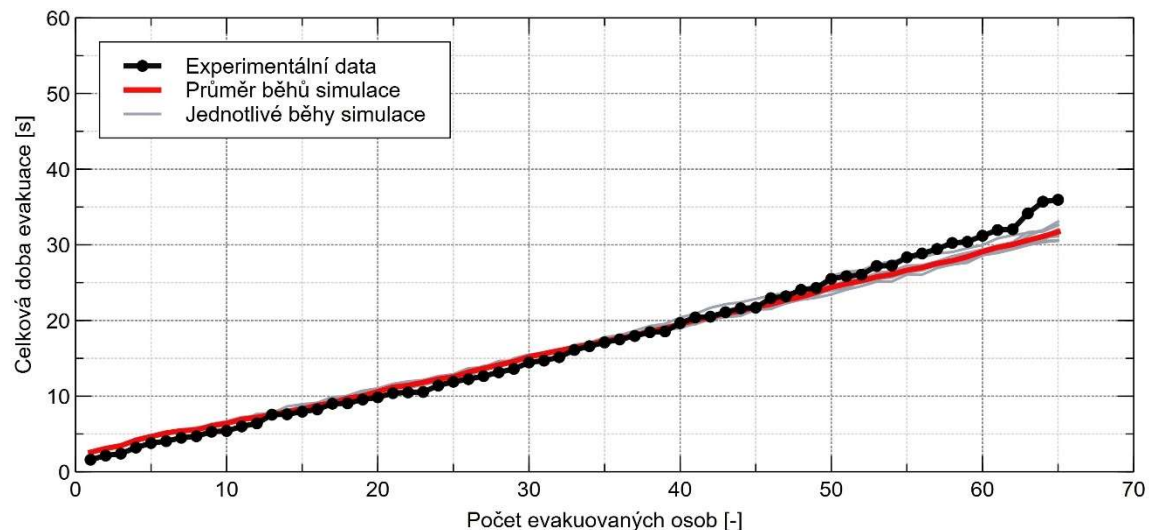


Obr. 11. 2 Graf porovnání TET běhu T2



### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T3

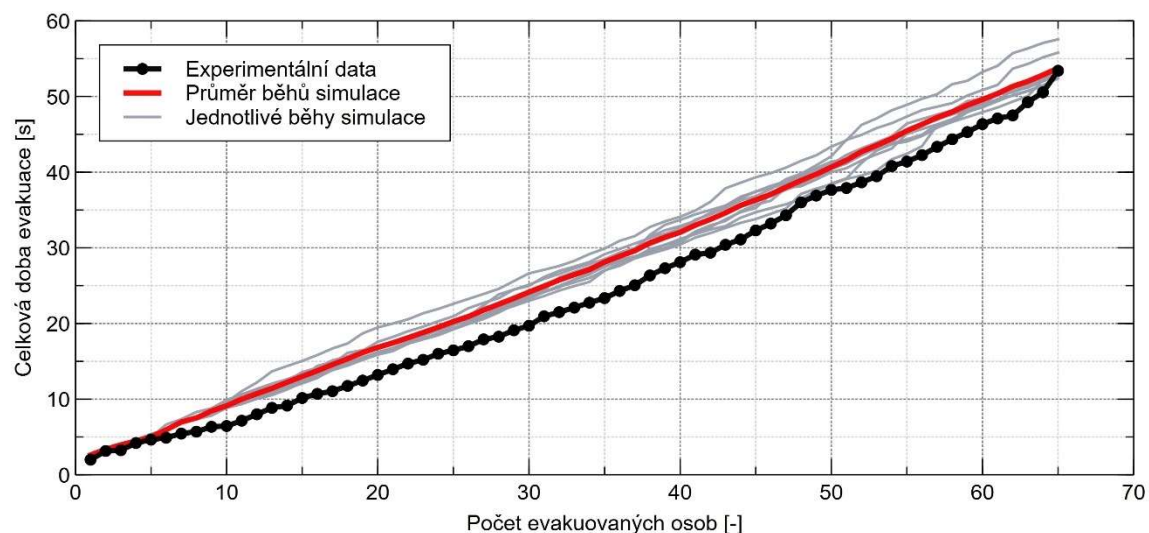
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 11. 3 Graf porovnání TET běhu T3

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T4

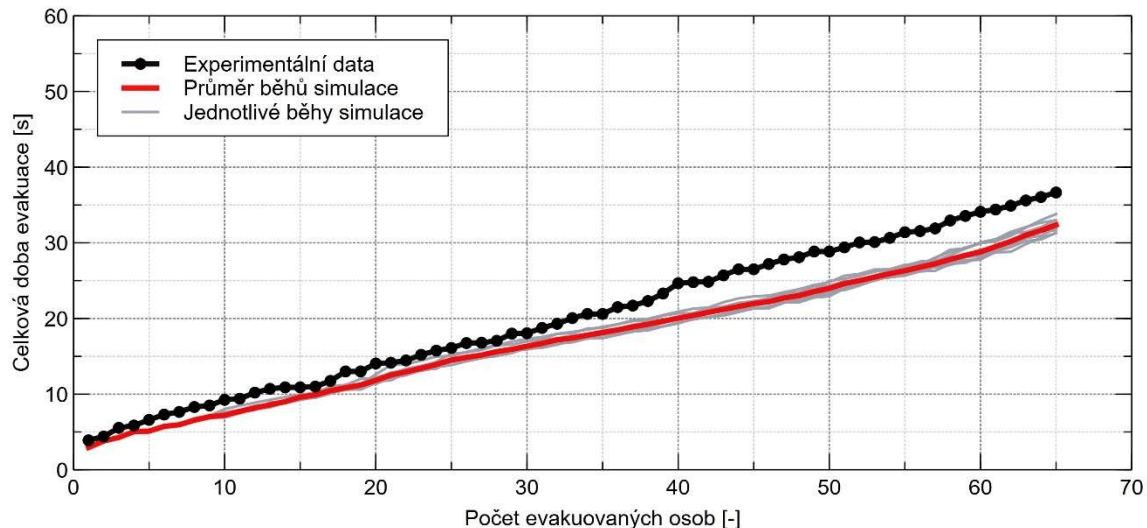
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm



Obr. 11. 4 Graf porovnání TET běhu T4

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T5

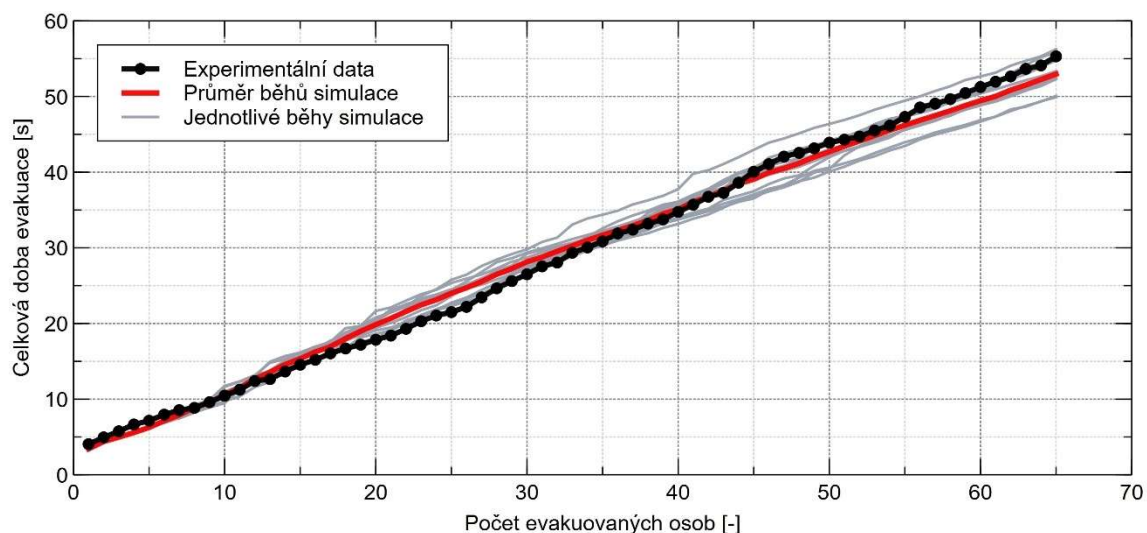
- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 11. 5 Graf porovnání TET běhu T5

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T6

- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm

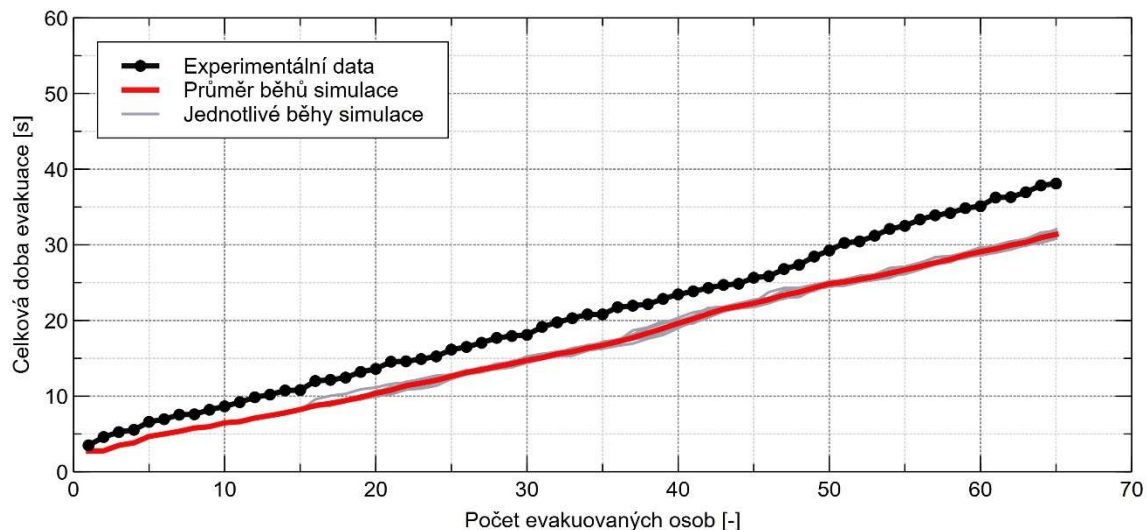


Obr. 11. 6 Graf porovnání TET běhu T6



### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T7

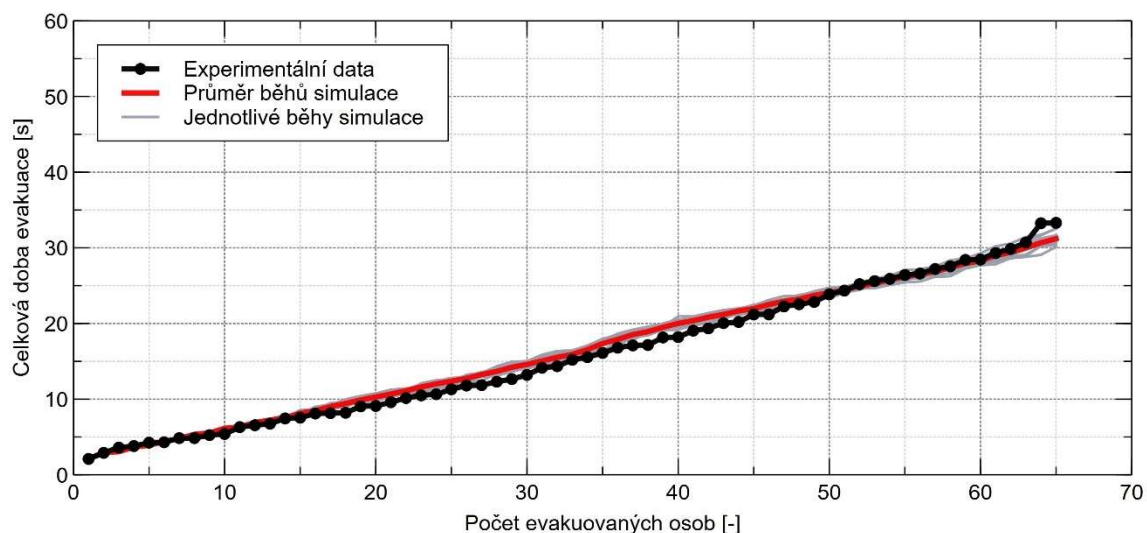
- modrá skupina usazena po strannách u koridorů
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 11. 7 Graf porovnání TET běhu T7

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T8

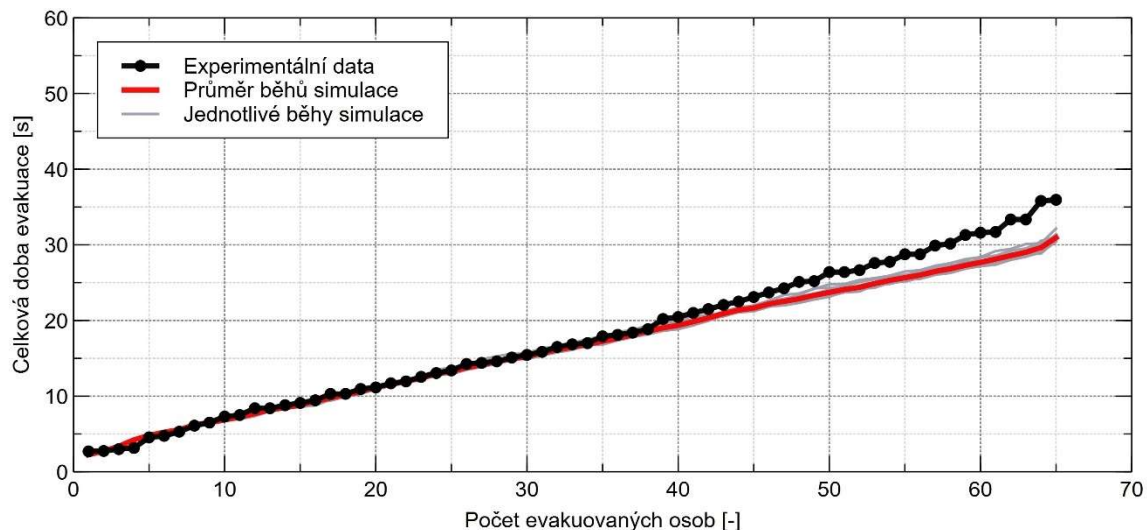
- modrá skupina usazena ve středu
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 11. 8 Graf porovnání TET běhu T8

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T9

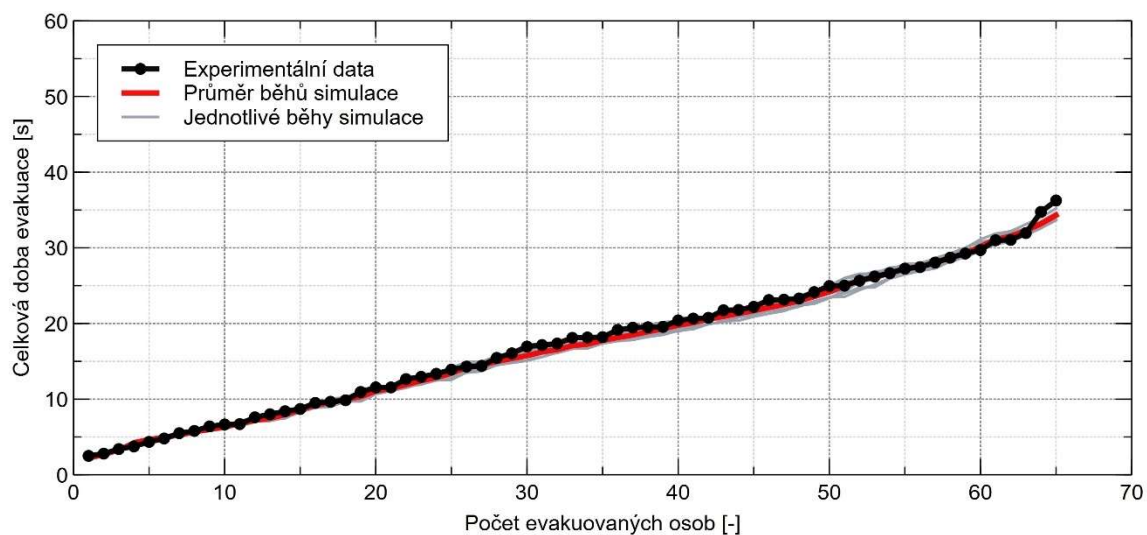
- modrá skupina usazena u pravého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 11. 9 Graf porovnání TET běhu T9

### Graf porovnání celkové doby evakuace běhu T10

- modrá skupina usazena u levého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka

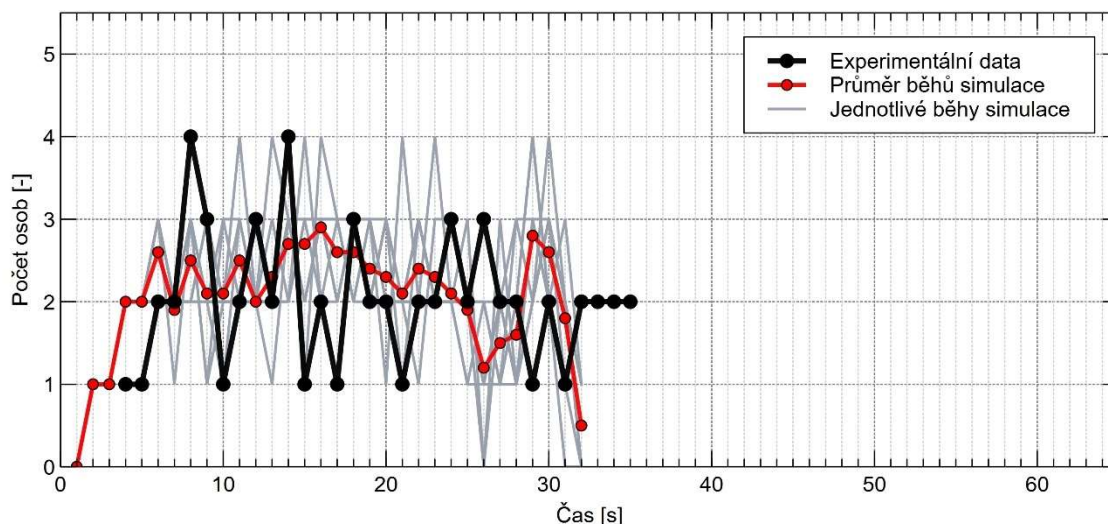


Obr. 11. 10 Graf porovnání TET běhu T10

## Příloha 12 – Grafy porovnání experimentálních a modelových výsledků toků osob v čase jednotlivých běhů (validace upraveného modelu)

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T1

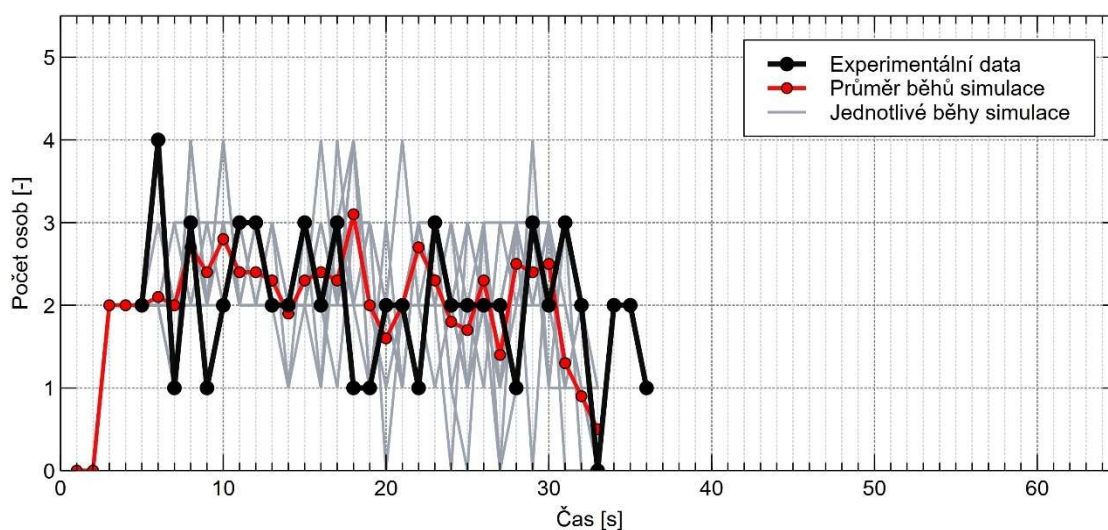
- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 12. 1 Graf porovnání toku osob v čase běhu T1

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T2

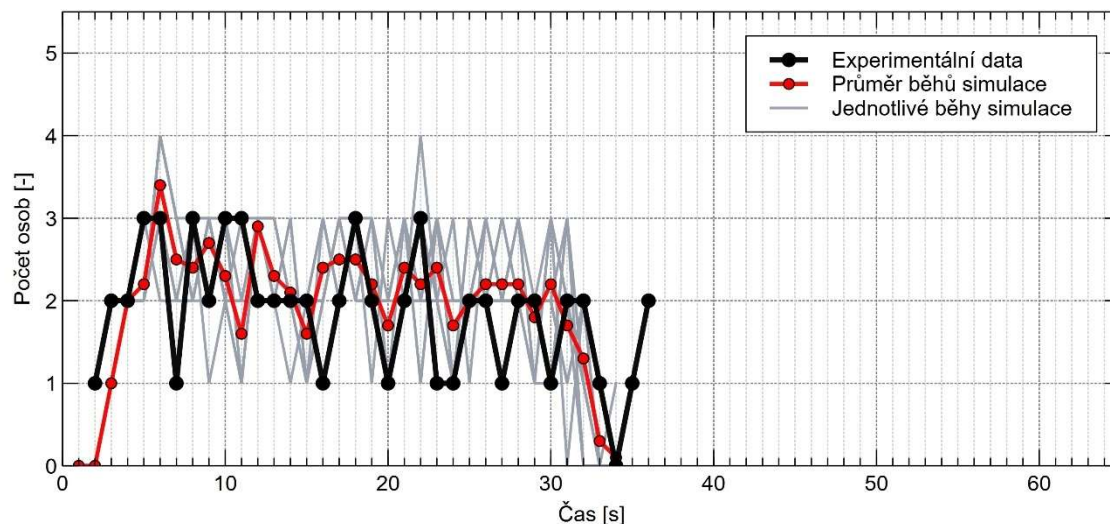
- modrá a červená skupina usazena náhodně
- neorganizované usazení dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 12. 2 Graf porovnání toku osob v čase běhu T2

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T3

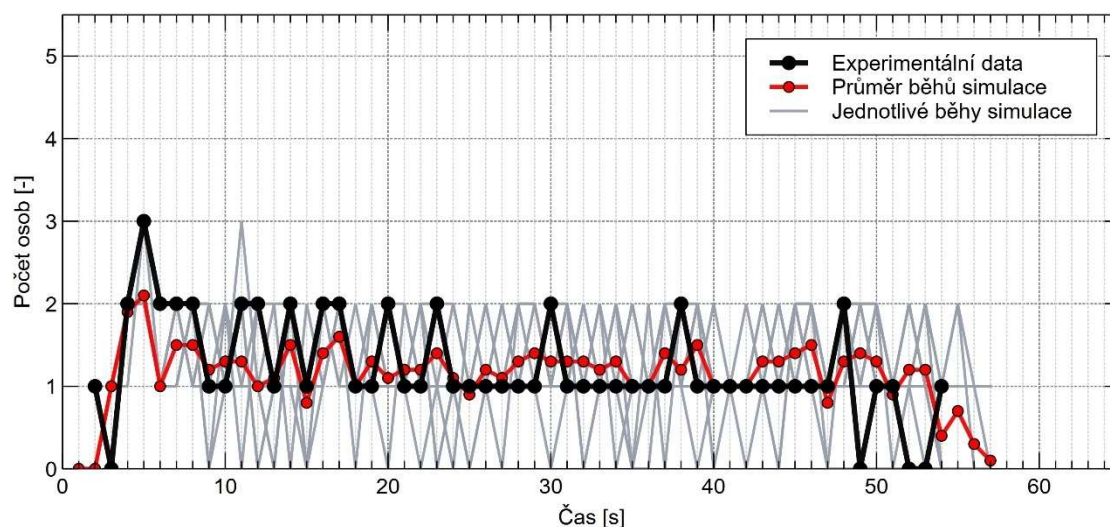
- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 12. 3 Graf porovnání toku osob v čase běhu T3

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T4

- modrá skupina usazena v dolní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm

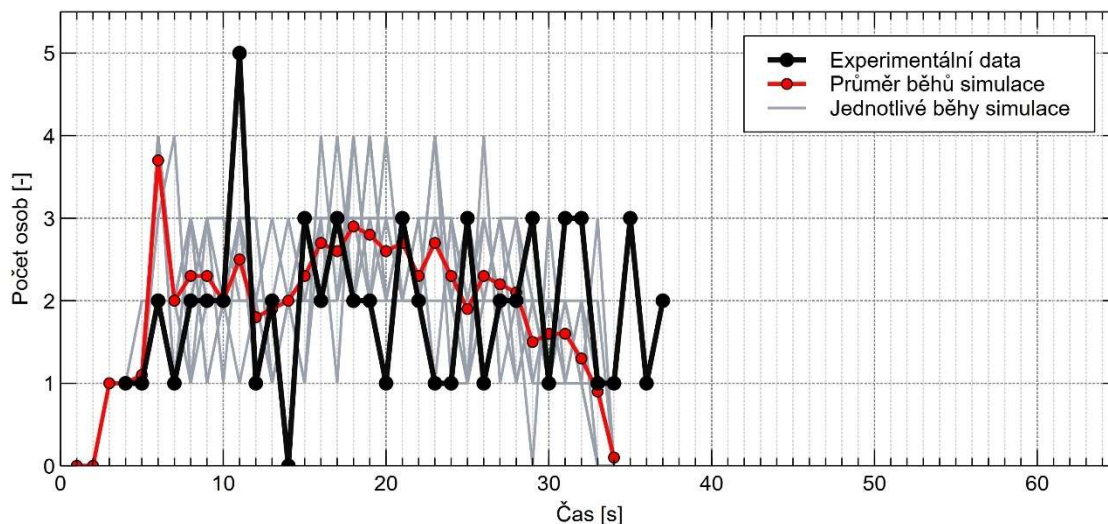


Obr. 12. 4 Graf porovnání toku osob v čase běhu T4



### Graf porovnání toku osob v čase běhu T5

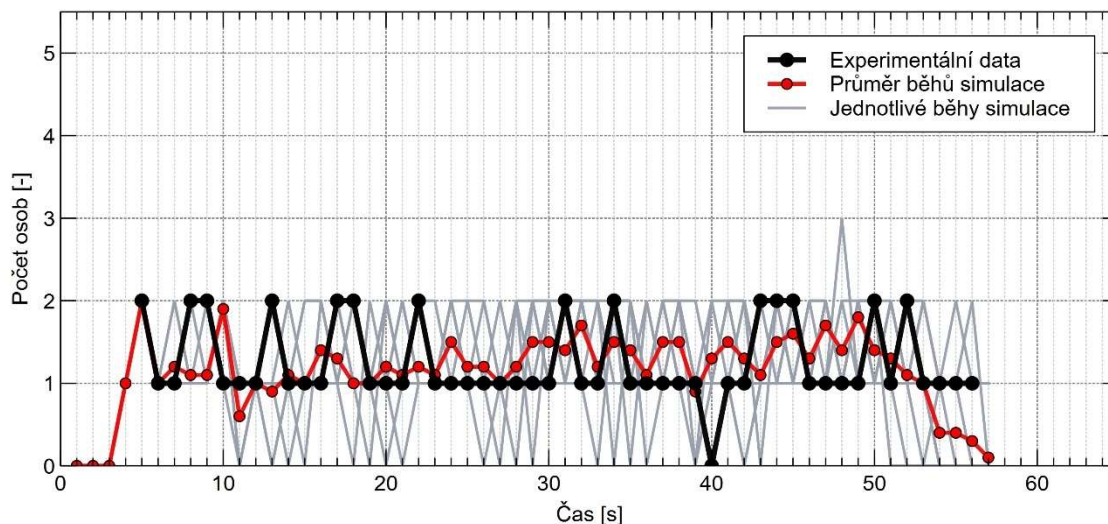
- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 12. 5 Graf porovnání toku osob v čase běhu T5

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T6

- modrá skupina usazena v horní části místnosti
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 800 mm

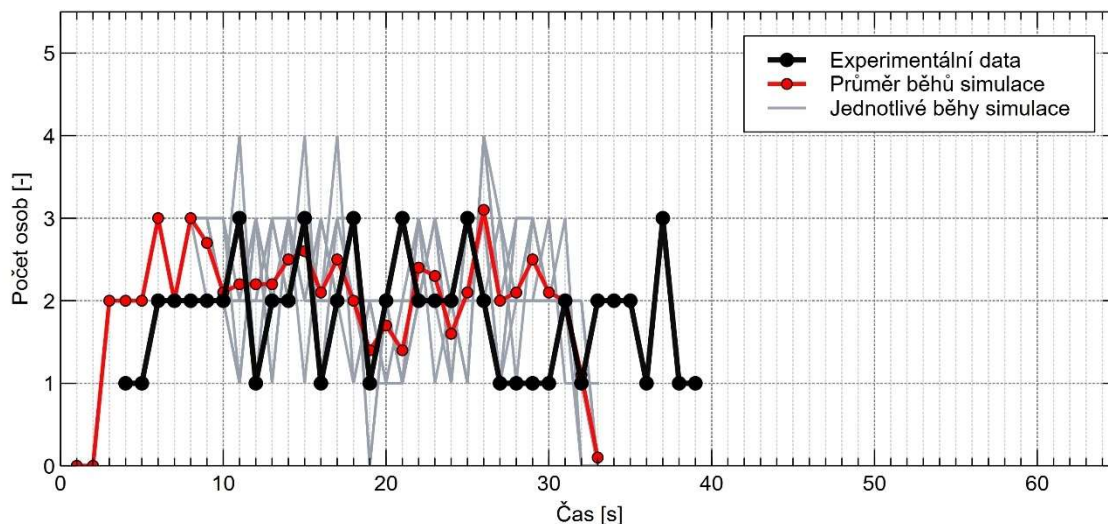


Obr. 12. 6 Graf porovnání toku osob v čase běhu T6



### Graf porovnání toku osob v čase běhu T7

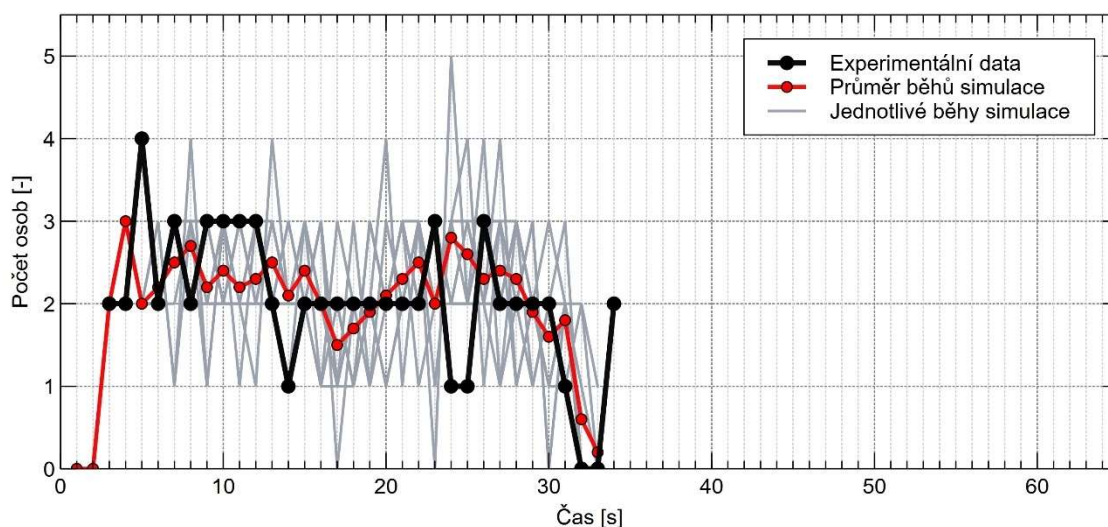
- modrá skupina usazena po strannách u koridorů
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 12. 7 Graf porovnání toku osob v čase běhu T7

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T8

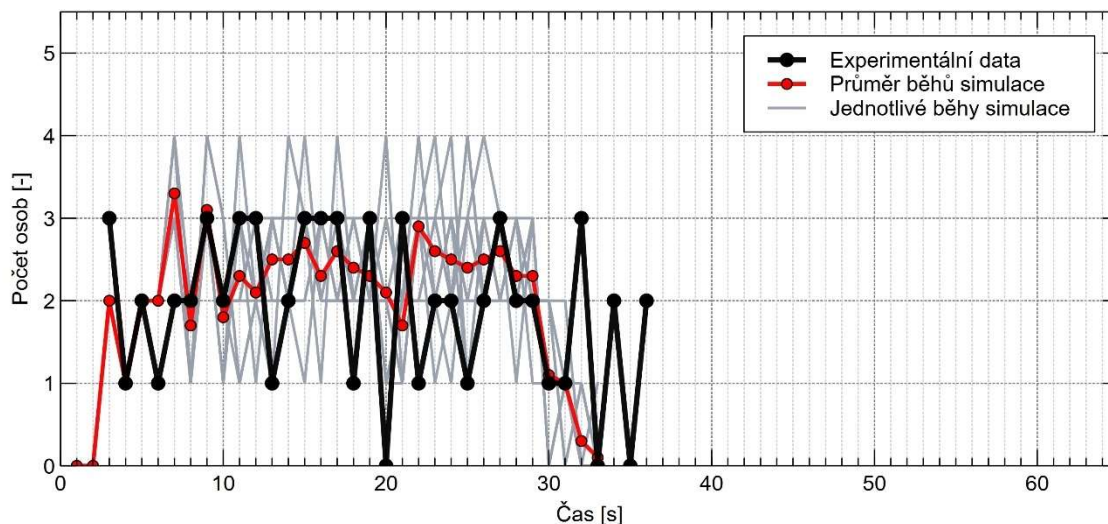
- modrá skupina usazena ve středu
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 12. 8 Graf porovnání toku osob v čase běhu T8

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T9

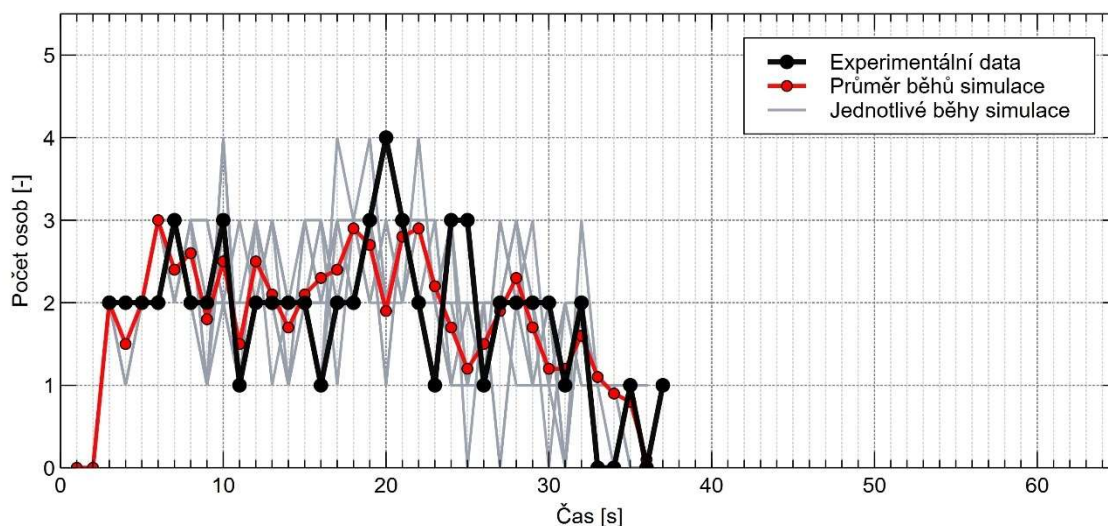
- modrá skupina usazena u pravého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka
- šířka únikového východu 1600 mm



Obr. 12. 9 Graf porovnání toku osob v čase běhu T9

### Graf porovnání toku osob v čase běhu T10

- modrá skupina usazena u levého koridoru
- organizované usazení do sektorů dle skupin
- volné usazení v rámci sektoru dle vůle účastníka



Obr. 12. 10 Graf porovnání toku osob v čase běhu T10