



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMATIZACE INŽENÝRSKÝCH ÚLOH A INFORMATIKY

INSTITUTE OF COMPUTER AIDED ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE

## POSOUZENÍ VYUŽITÍ VEŘEJNÉHO PROSTORU NÁMĚSTÍ PROSTŘEDNICTVÍM SIMULACE POHYBU OSOB

Public space assessment using simulation of pedestrian movement

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Forejtník

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Uhlík

BRNO 2020



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3656 Městské inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program
<b>Studijní obor</b>	3647R025 Městské inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Ondřej Forejtník
<b>Název</b>	Posouzení využití veřejného prostoru náměstí prostřednictvím simulace pohybu osob
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Ondřej Uhlík
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2019
<b>Datum odevzdání</b>	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

---

doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT



## PODKLADY A LITERATURA

Keith S. G. Introduction to Crowd Science; Timmermans H. Pedestrian behavior. Models, data collection and applications; Apeltauer T. Systém pro monitorování, vyhodnocování a řízení proudů chodců a cyklistů. Odborná zpráva za rok 2018; ČSN 73 6110. Projektování místních komunikací; vyhláška č. 501/2006 Sb. o obecných požadavcích na využívání území a další související vyhlášky a nařízení; mapové, výkresové, popř. statistické podklady pro řešené území; manuál a související podpora vývojářů software Pathfinder.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem bakalářské práce je analyzovat, vyhodnotit a navrhnout opatření pro zkvalitnění komfortu pěší dopravy vybraného náměstí s využitím agentního modelu. Student stanoví metriky měření kvality pěší dopravy (např. hustota osob na m<sup>2</sup>) s následným terénním průzkumem a analýzou pohybu chodců v rámci náměstí. Pěší provoz vyhodnotí pomocí mikroskopického modelu pohybu chodců. Na základě simulací modelu navrhne vhodná opatření pro zkvalitnění pěší dopravy na řešeném území (např. úprava mobiliáře). V teoretické části práce student popíše obecné charakteristiky pěší dopravy a jejího modelování se zaměřením na agentní modely.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Ondřej Uhlík  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se v teoretické části zabývá významem pěší dopravy pro městské prostředí a popisuje princip numerického modelování pohybu osob. V praktické části se bakalářská práce zaměřuje na posouzení veřejného prostoru náměstí Míru v Brně za použití extrakce dat z videozáznamu a numerické simulace pohybu osob. Následuje ověření připravovaného návrhu dopravního řešení a konkrétní doporučení pro pozměnění návrhu. Cílem práce je prozkoumat přínos moderních technologií pro komplexní proces posuzování a navrhování veřejných prostranství.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Model pohybu osob, Brno, veřejný prostor, Pathfinder, extrakce dat z videozáznamu, kvalita pěší dopravy, význam pěší dopravy

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals in its theoretical part with the significance of the pedestrian traffic for the urban areas and describes the principles of numerical modeling of the pedestrian movement. In the practical part, the bachelor's thesis focuses on the assessment of the public space of náměstí Míru square in Brno using data extraction from a recorded video and numerical simulation of the pedestrian movement. This is followed by a verification of the traffic plan design in preparation and specific recommendations for amending the design. The aim of this work is to explore the contribution of modern technologies to the complex process of assessing and designing public spaces.

## **KEYWORDS**

Pedestrian model, Brno, public space, Pathfinder, data extraction from a video, level of service, pedestrian traffic significance

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Ondřej Forejtník *Posouzení využití veřejného prostoru náměstí prostřednictvím simulace pohybu osob*. Brno, 2020. 57 s.. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky. Vedoucí práce Ing. Ondřej Uhlík.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5.6.2020

---

Ondřej Forejtník  
autor

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na prvním místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ondřeji Uhlíkovi za obdivuhodné nasazení a lidský přístup, se kterými práci odborně vedl po celou dobu vypracování. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Mileně Forejtníkové za korekturu a cenné rady. V neposlední řadě patří mé díky Kanceláři architekta města Brna a magistrátu města Brna za konzultace a poskytnuté materiály.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PĚŠÍ DOPRAVA VE MĚSTECH</b> .....	<b>2</b>
2.1	MÍRA URBANIZACE .....	2
2.2	VÝVOJ KONCEPCE PĚŠÍ DOPRAVY .....	3
<b>3</b>	<b>POHYBOVÉ CHARAKTERISTIKY OSOB</b> .....	<b>7</b>
3.1	Statický dav .....	8
3.2	Dynamický dav .....	11
3.3	Úroveň kvality pěší dopravy .....	13
<b>4</b>	<b>NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ POHYBU OSOB</b> .....	<b>14</b>
4.1	Verifikace, kalibrace, validace .....	14
4.2	Technologie modelování .....	15
4.3	Pathfinder .....	18
<b>5</b>	<b>ŘEŠENÁ LOKALITA</b> .....	<b>22</b>
5.1	Obecná charakteristika lokality .....	22
5.2	Analýza pohybu chodců .....	25
5.3	Analýza dopravního prostoru .....	27
<b>6</b>	<b>PŘÍPRAVA DAT</b> .....	<b>29</b>
6.1	Pokročilé nástroje analýzy obrazu .....	29
6.2	Rozložení populace .....	30
6.3	Trajektorie a rychlosti .....	30
<b>7</b>	<b>MODEL A – SOUČASNÝ STAV</b> .....	<b>32</b>
7.1	Vstupní data .....	32
7.2	Výstupy simulace a vyhodnocení .....	34
7.3	Vyhodnocení .....	36
<b>8</b>	<b>MODEL B – NÁVRH DOPRAVNÍHO ŘEŠENÍ</b> .....	<b>37</b>
8.1	Základní zhodnocení návrhu .....	37
8.2	Vstupní data .....	38
8.3	Výstupy simulace .....	39
8.4	Ověření navrhovaných změn .....	42
8.5	Vyhodnocení .....	45
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>47</b>
	<b>Bibliografie</b> .....	<b>48</b>
	<b>Seznam příloh</b> .....	<b>50</b>
	<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>50</b>
	<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>50</b>
	<b>Příloha A</b> .....	<b>52</b>
	<b>Příloha B</b> .....	<b>57</b>

# 1 ÚVOD

Chůze je pro člověka zcela jistě nejvíce přirozeným způsobem pohybu. Již od pradávna tak slouží jako primární způsob lidské dopravy. V průběhu 20. století však byla chůze v rámci městského plánování postupně upozaděna. Prostor byl dán modernějším dopravním prostředkům, a to zejména osobním automobilům. Praxe i řada výzkumů z posledních desetiletí nám však ukazuje, že tento přístup se negativně projevuje jednak na efektivitě městské dopravy, ale zejména na kvalitě městského života.

V dnešní době se karta opět obrací. Chůze je stále více považována za základ dopravy ve městě. Řada světových metropolí, jako například Londýn, Vídeň či Chicago, si význam chůze plně uvědomují a na pěší dopravě staví své plánovací strategie.

Je tedy zřejmé, že výhledově bude zlepšování podmínek pro chodce jednou z hlavních priorit městského plánování. Předvídání chování osob a dynamika davů, které se mohou ve městě pohybovat, přitom představují velmi komplexní úlohy. Je tedy na místě hledat vhodné nástroje, které by dopravním inženýrům a architektům veřejných prostor usnadnily práci.

Tato bakalářská práce se soustředí na využití moderních technologií pro automatizaci inženýrských úloh spojených s navrhováním veřejných prostranství. Práce využívá sběru dat pomocí pořízení videozáznamu a jeho následné analýzy. Dále pak zkoumá možnosti numerického modelování pohybu osob, dnes již s úspěchem využívaného pro evakuace, i pro běžný provoz veřejného prostranství.

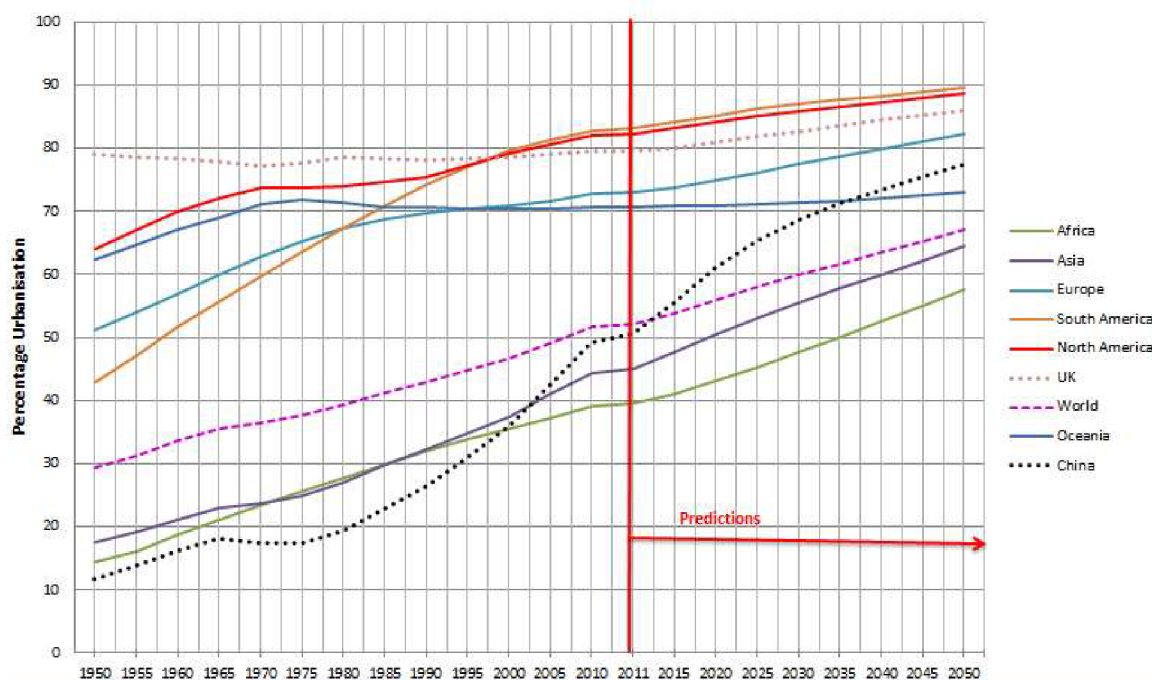
Za zkoumanou lokalitu bylo po konzultaci s Kanceláří městského architekta a Magistrátem města Brna zvoleno náměstí Míru v Brně. Jedná se o lokalitu v klidnější části města, nicméně ve špičce silně dopravně zatíženou. Tato skutečnost je způsobeno zejména množstvím školských zařízení, které se v lokalitě nacházejí.

Výstupem práce bude návrh opatření pro zvýšení kvality pěší dopravy ve zvolené lokalitě za využití výše popsaných metod.

## 2 PĚŠÍ DOPRAVA VE MĚSTECH

### 2.1 MÍRA URBANIZACE

Po většinu vývoje lidské civilizace lidé přebývali převážně v menších sídlech a komunitách. Je možné říct, že čím vyšší stupeň vývoje společnosti, tím větší tendence k vytváření větších společenských a organizačních útvarů, tedy i sídel. K nejvýraznějším změnám docházelo v průběhu minulého století a od roku 2007 můžeme konstatovat, že většina světové populace žije ve městech. [1] Obrázek 1 zobrazuje míru urbanizace (poměr lidí žijících ve městech) v různých částech světa.



Obrázek 1: Míra urbanizace v různých částech světa [21]

V České republice se podle Českého statistického úřadu současná míra urbanizace pohybuje okolo 75 %. [2] Jak v celosvětovém měřítku, tak v rámci ČR lze výhledově očekávat další navyšování tohoto faktoru. Život ve městě nabízí více pracovních příležitostí a vyšší platy, nespočet možností trávení volného času a dostupné kvalitní služby. [3] V dnešní společnosti je těmto aspektům přikládána vyšší hodnota než například zdravému životnímu prostředí a klidnému životnímu stylu menších obcí. Očekává se, že k roku 2050 dosáhne míra urbanizace ve světě 68 % a v ČR dokonce 83 %. [1] S rostoucí populací a stále vyššími nároky na kvalitu života roste také význam městského plánování. Jedním ze stěžejnějších aspektů územně plánovacích koncepcí je pak nesporně i osobní přeprava.



## 2.2 VÝVOJ KONCEPCE PĚŠÍ DOPRAVY

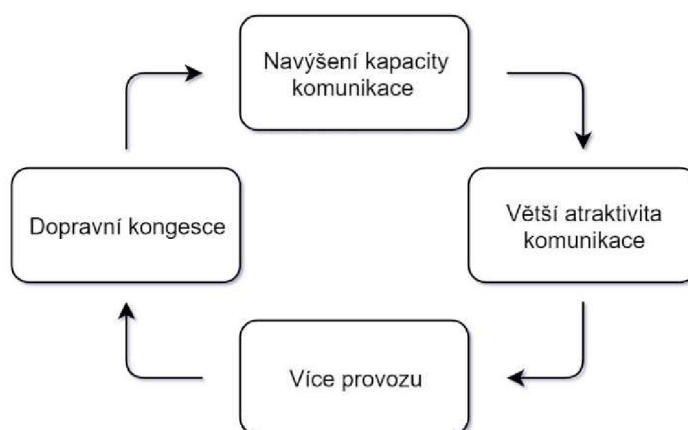
Kanadská nezávislá výzkumná organizace The Victoria Policy Transport Institute, která se zabývá inovacemi městské dopravy, rozlišuje „konvenční“ a „moderní“ koncept plánování městské dopravy. [4] Ač rozdílným názvoslovím, podobnou problematiku popisuje i řada jiných publikací. [5] [6] [3]

### 2.2.1 Konvenční koncept

Konvenční způsob plánování klade důraz zejména na pohodlí a pohyblivost, tedy schopnost překlenout co největší vzdálenost za určitý časový úsek. Automobilový průmysl zažil dramatický růst v druhé polovině 20. století a osobní automobil se stal ideálním stavebním kamenem této koncepce. [5] Dopravní inženýři rázem začali přizpůsobovat města primárně automobilové dopravě.

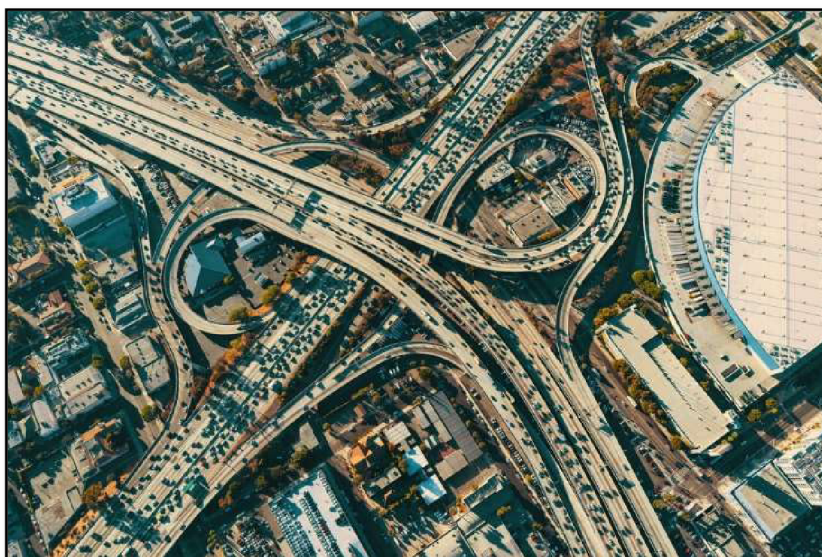
Dnes již víme, že dopravní systémy stavící na konvenčním konceptu přináší řadu problémů. [6] Často bývá podceňována většina negativních externalit. Automobilová doprava produkuje nemalé množství emisí, způsobuje hlukové znečištění a zabírá velké dopravní plochy v poměru k celkové ploše intravilánu. [3]

Vysoké přepravní rychlosti vedou k rozvolnění zástavby a větším dojezdovým vzdálenostem. Dopravní stavby pro automobilovou dopravu vytvářejí ve městech bariéry ve formě rozsáhlých parkovacích ploch nebo víceproudých komunikací. Vzdálenost cílů a vzniklé bariéry často znemožňují využití jiných dopravních prostředků jako např. městské hromadné dopravy (dále jen MHD) či cyklostezek, čímž dochází k diskriminaci těch obyvatel města, pro které není automobilová doprava přirozená (např. děti či důchodci). V konečném důsledku dochází k snížení dostupnosti, tedy schopnosti průměrného obyvatele efektivně dosáhnout cíle své cesty. [6]



Obrázek 2: Schéma dopravní indukce [Vlastní]

Důležitou roli zde hraje také efekt dopravní indukce. Tento jev platí pro všechny způsoby dopravy a můžeme ho popsat následovně: S rostoucí nabídkou nové dopravní kapacity spoje vzroste také jeho atraktivita, což automaticky vyvolá (indukuje) novou poptávku, která zde předtím nebyla. V praxi to znamená, že pokud se město spoléhá většinou na automobilovou dopravu, brzy vznikne na základě vysokého provozu poptávka po dalším dopravním prostoru. Pokud dopravní inženýři zareagují pouze přidáním dalších jízdnic pruhů a parkovacích míst, lze očekávat opětovné zvýšení provozu až do bodu, kdy se komunikace budou opět zahlcovat. Město se tak dostává do začarovaného kruhu, který můžeme vidět na schématu (viz Obrázek 2). Jako příklad konvenčního plánování městské dopravy může posloužit město Los Angeles, kde podíl dopravních ploch dosahuje více než 60 % rozlohy města (viz Obrázek 3).



Obrázek 3: Dopravní situace v Los Angeles [7]

### 2.2.2 Moderní koncept

Jako alternativa se nabízí přístup popisovaný v knize *Města pro lidi* od dánského architekta Jana Gehla. [5] Tento trend klade důraz zejména na kvalitu života obyvatel města a postupně si ho osvojuje řada významných měst napříč světem. V dnešní době již můžeme prvky tohoto moderního přístupu najít v plánovacích strategiích mnoha evropských i světových metropolí. Jako příklad můžeme uvést Londýn, Vídeň, Sydney, Washington DC, Kodaň a mnoho dalších. [5] [3] [6]

Snahou moderního konceptu městské dopravy je dopravu občanům co nejvíce zjednodušit a příjemnit. Kde se tradiční způsob plánování snaží maximalizovat dopravní intenzitu, aby bylo dosaženo cíle, moderní způsob uspokojuje potřeby občanů a cíle přibližuje. Pro tento účel se osvědčuje využití širší palety dopravních prostředků, přičemž nejlepších dopravních výsledků dosahují města kombinující prvky pěší dopravy, cyklistiky a městské hromadné dopravy (dále jen MHD). [4]

Pokud například zřídíme v dopravním prostoru cyklostezku, část účastníků silničního provozu ji začne využívat. Zájem o cyklistickou dopravu měli již předtím, nicméně ji nemohli využívat. Přednost byla dávana čistě jízdám pruhům sloužícím motorové dopravě. Přesunem těchto cestujících k méně prostorově náročnému způsobu dopravy se dopravní prostor uvolní, a i intenzita automobilového provozu se sníží. Obdobná řešení nám poskytují efektivní cestu ze začarovaného kruhu automobilové dopravní indukce. Na obrázku (viz Obrázek 4) můžeme vidět, jaký dopravní prostor zaujímá stejný počet osob využívající rozdílné dopravní prostředky.



Obrázek 4: Prostorová efektivita městských dopravních prostředků [8]

Moderní koncept plánování nachází hlavní hodnotu v kvalitě lidského života ve městě. Díky tomu začíná být opět uplatňováno lidské měřítko a k chůzi, která byla dlouhou dobu městskými plánovači opomíjena, je opět přistupováno jako k základnímu kamenu městské dopravy. Každá cesta nevyhnutelně chůzí začíná i končí. Na rozdíl od jiných způsobů dopravy se k chůzi pouze obtížně nachází alternativy. [3]

Člověk, který se pohybuje pěšky je nejvíce zranitelný, proto je mu, pokud to technická situace umožňuje, dávana přednost před ostatními prostředky a v rámci systému vznikají bezpečnostní prvky. Důraz je také kladen na kvalitní bezbariérová řešení. Populace ve vyspělých zemích stárne a poměr pohybově znevýhodněných obyvatel se pohybuje okolo 30 %. [3]

### 2.2.3 Význam chůze pro člověka

Lidská chůze se výrazně liší od jiných způsobů přepravy. Jak již bylo řečeno, jedná se o způsob pohybu lidem evolučně přirozený a jako takový má celou řadu pozitivních účinků. Pravidelná chůze snižuje tlak a srdeční tep a znatelně posiluje imunitní systém. Během pohybu se snižuje hladina kortizolu, a naopak dochází k vyplavování dopaminu. Tyto hormony jsou zodpovědné za pocity stresu, resp. štěstí a efektivně tak vedou k větší spokojenosti. Lidé, kteří pravidelně chodí, se



dožívají více let. Podobné výhody sice přináší organismu i celá řada sportů, chůze je však pro lidské tělo nejpřirozenější. Nevyžaduje tolik úsilí, zátěž na svaly a klouby je minimální. Ideálně by měl člověk „nachodit“ okolo 7 km denně. [3]

Pěší pohyb, na rozdíl od jiných způsobů dopravy, má i jiné funkce než čistě dopravní. Slouží lidem jako relaxace či meditační technika při cestě z práce, kdy si můžeme vyčistit hlavu a pustit do plic čerstvý vzduch. Stává se prostředkem různých lidských aktivit od venčení psů po běhání. Umožňuje obyvatelům města naplňovat společenské potřeby a setkávat se s jinými lidmi. V mnoha případech se tak samotná cesta stává cílem. Města, která toto pochopí, respektují lidské měřítko. Dávají přednost bohatému veřejnému prostoru před homogenní automobilovou dopravou. Disponují pro chodce zajímavou a členitou zástavbou a zajímavými pohledy, které pobízejí k procházení. Nabízejí bohatý mobiliář, dostatek zeleně a služby, které naopak vybízejí k zastavení a pobytu v daném prostoru. Tato investice se následně vrací v kvalitě městského života, ve zdravém a bezpečném životním prostředí pro občany a v násobně vyšších finančních obrátech soukromého sektoru a služeb. [3] [5]

Obrázek 5 zachycuje, jaký efekt měla úprava veřejného prostoru ve prospěch obyvatel a chodců na Times Square v New Yorku. Jedná se přitom o významnou křižovatku jednoho z nejlidnatějších měst světa.



Obrázek 5: Rozdíl mezi plánováním zaměřeným na automobily vs. na lidské měřítko [5]

Jako další příklad můžeme použít proměnu veřejného prostoru nizozemského města Utrecht. Následující fotografie (viz Obrázek 6) ukazují historické centrum města Utrecht v roce 1976 a po rekonstrukci v roce 2018. K proměně došlo na základě debaty vyvolané obyvateli města o budoucí podobě historického centra. Při rekonstrukci byly využity zásady moderního konceptu dopravního plánování. [9]



Obrázek 6: Utrecht, ulice Oudkerkhof před a po rekonstrukci [9]

### 3 POHYBOVÉ CHARAKTERISTIKY OSOB

Analýza a modelování pěšího pohybu je disciplína, jejímuž vývoji byl v průběhu uplynulých čtyř desetiletí věnován nemalý prostor. [10] Poznatky v této oblasti napomáhají lepšímu řešení evakuace osob z objektů či bezpečnému pořádání hromadných akcí. V neposlední řadě však mohou napomoci zkvalitňovat pěší dopravu ve městech.

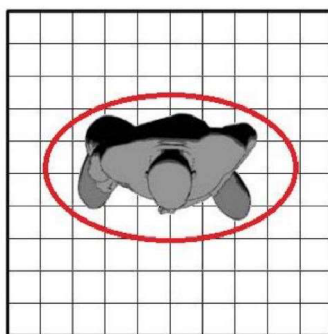
Pro kvalitu pěší dopravy je rozhodující metrikou hustota, udávaná jako počet osob na metr čtvereční [ $os.m^{-2}$ ]. Ta má zásadní vliv na ostatní charakteristiky davu. Ovlivňuje rychlost, kterou se mohou chodci pohybovat, jejich komfort i riziko mimořádné davové události. Tento přístup je přijímán odbornou veřejností a je podrobně popsán v publikacích *Pedestrian planning and design* od urbanisty Johna J. Fruina [11] a *Introduction to Crowd Science* od Keitha Stilla [12].

Pro správné porozumění problematiky hustoty davu a stanovení jejích mezních hodnot je potřeba znát prostorové nároky běžného chodce. Ty se však zásadním způsobem mění na základě toho, zda chodec stojí na místě, nebo je v pohybu. Je proto nutné tyto dva případy odlišit a řešit každý zvlášť. [12]

## 3.1 Statický dav

### 3.1.1 Prostorové nároky stojícího chodce

Podle Johna J. Fruina je možné minimální prostorové nároky lidského těla vyjádřit tzv. elipsou těla. [11] Ta vznikne promítnutím fyzické stavby člověka do podstavy a přidáním základní intimní zóny. Základní předpokládané rozměry osy elipsy jsou 61 cm pro delší osu a 46 cm pro osu kratší. Vzniká tak prostor o ploše 0,22 m<sup>2</sup> (viz Obrázek 7). Toto určení prostorových nároků je běžně užíváno a je možné ho považovat za standard při navrhování veřejného prostoru. Pracuje však pouze s rozměry průměrného člověka.



Obrázek 7: Zobrazení elipsy těla ve čtverci o rozměrech 1 m x 1 m. [11]

Přesnější data pro konkrétní skupiny lidí přináší Stephen Pheasant ve své publikaci *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*. [13] Zde jsou hodnoty seřazeny dle národností a pohlaví jedinců. Pheasant pracuje pouze s rozměry těla jako takovými, minimální intimní prostor je zanedbán. To je také důvodem pro průměrně nižší hodnoty plochy prostorových nároků, než tomu je v případě Fruinovy elipsy. Z hodnot v této publikaci také vycházejí standardy užívané v dopravním inženýrství USA. Vybrané hodnoty zobrazuje Tabulka 1.

Při zohlednění všech výše uváděných hodnot vyplývá, že se minimální prostorové nároky stojícího člověka pohybují v rozmezí 0,20 až 0,26 m<sup>2</sup>. Odtud tedy můžeme stanovit maximální hustotu statického davu, při které se člověk cítí komfortně, na 4-5 os.m<sup>-2</sup>. V případě, že se dá dav do pohybu již tato hodnota neplatí. Takové situaci je věnován prostor dále v textu.

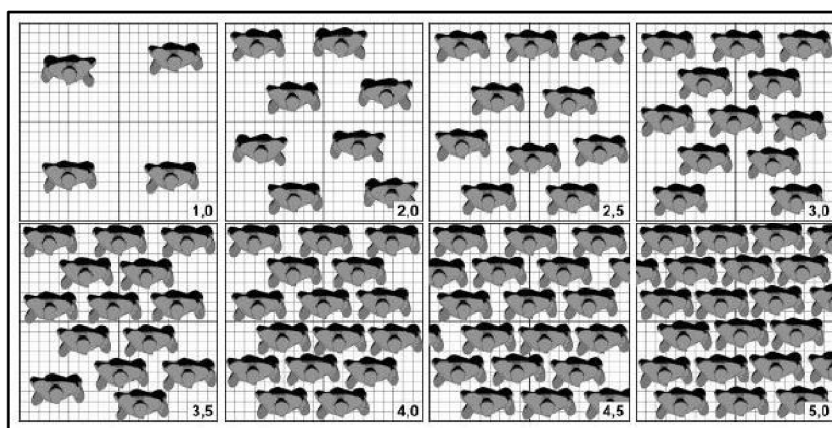


ROZMĚRY LIDSKÉHO TĚLA			
Země původu	Šířka [cm]	Hloubka [cm]	Plocha [m <sup>2</sup> ]
Velká Británie - muž	51,0	32,5	0,26
Velká Británie - žena	51,0	32,5	0,26
Polsko - muž	47,5	27,5	0,21
Polsko - žena	41,0	28,5	0,18
Francie - muž	51,5	28,0	0,23
Francie - žena	47,0	29,5	0,22
Švédsko - muž	51,0	25,5	0,20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

Tabulka 1: Rozměry lidského těla dle země původu [13]

### 3.1.2 Statická charakteristika skupiny

Na obrázku (viz Obrázek 8) můžeme vidět různé přípustné hustoty davu až po stanovenou hraniční hodnotu 5 os.m<sup>-2</sup>. Z vizualizace je jasně patrný snižující se komfort jedinců. Doposud jsme pracovali s variantou, kdy jsou všichni jedinci natočeni stejným směrem a jejich rozmístění je tedy z pohledu využití prostoru téměř optimální. Lze mluvit například o koncertech či demonstracích, kde je všechna pozornost jedinců soustředěna směrem k jednomu bodu. Ve chvíli, kdy jedince rozmístíme nahodile, jedná-li se o akci s více cíli pozornosti, vznikne určité procento nevyužití plochy a dosažitelná hustota se tak ještě sníží. Hodnotu 5 os.m<sup>-2</sup> tak můžeme považovat za skutečně hraniční.



Obrázek 8: Vizualizace statické hustoty skupiny při hodnotách hustoty 1,0 – 5,0 os.m<sup>-2</sup> [13]

Norma ČSN 73 6110 – projektování místních komunikací [14] tuto problematiku přehledně zpracovává v tabulce (viz Tabulka 2). Norma stanovuje nejvyšší hustotu umožňující volný pohyb napříč statickým davem bez nutného kontaktu s ostatními jedinci na 0,75 os.m<sup>-2</sup>. Kritický bod, při němž je nevyhnutelný kontakt s ostatními

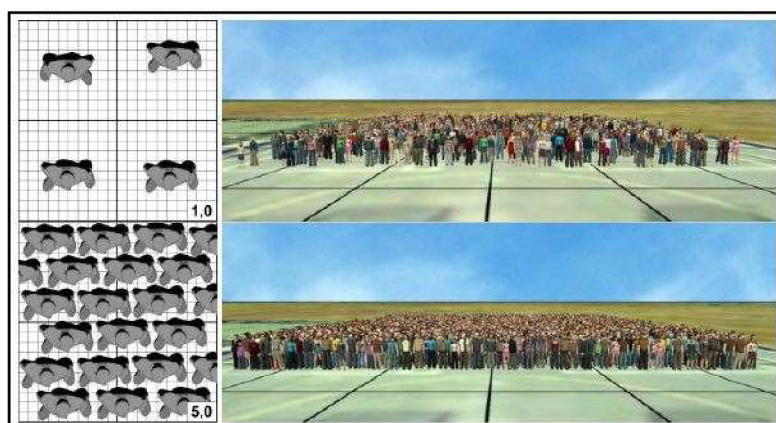
jedinci a pohyb v rámci shluku je zcela znemožněn, dle normy nastává při hustotě davu  $4,0 \text{ os.m}^{-2}$ . Vyšší hodnoty již nejsou vhodné, a tedy se nedoporučují.

Stupeň úrovně kvality	Průměrný počet osob/m <sup>2</sup>	Průměrná plocha m <sup>2</sup> /osobu	Charakteristika	Typické užití
A	0,75	1,4	Stání nebo volný pohyb jsou možné bez vzájemného rušení	Stezky/pásky/pruh pro chodce bez výrazných špiček v intenzitách provozu a bez plošného nebo prostorového omezení.
B	1,0	1,0	Je možné stání a pohyb je částečně omezen bez vzájemného rušení	Zatížené stezky/pásky/pruhy pro chodce, přestupní stanice veřejné dopravy, okolí veřejných budov s nevýznamnými špičkami v pohybech chodců.
C	1,4	0,7	Stání a omezený pohyb je možný při vzájemném rušení, hustota je v mezích osobního pohodlí	Silně zatížené přestupní stanice a okolí veřejných budov s výraznými špičkami v pohybech chodců a s určitým prostorovým omezením.
D	2,5	0,4	Stání je možné bez vzájemných dotyků, pohyb je výrazně omezen a vpřed je možný jen ve skupině	Jen pro nejvíce zatížené přestupní stanice a komunikace pro chodce, kde pohyb vpřed charakterizuje celý proud chodců.
E	4,0	0,25	Fyzický kontakt s ostatními osobami je nevyhnutelný, pohyb uvnitř shluku je nemožný	Jen pro krátkodobé nebo nekontrolovatelné špičky (sportovní utkání, příjezdy vlaků, výtahy, vozidla veřejné dopravy). Zajistit dostatečné rozptylové plochy.
F	5 a více	0,2 a méně	Všechny osoby jsou v přímém fyzickém kontaktu, není možný žádný pohyb, hustota je velmi nepohodlná	Přeplněná vozidla veřejné dopravy nebo výtahy ve špičkách. Nevhodné, nedoporučuje se.

Tabulka 2: Úrovně kvality pohybu chodců ve shluku a v proudu [14]

### 3.1.3 Vliv perspektivy

Při vizuálním hodnocení hustoty davu je třeba zohlednit fakt, že dojem z hustoty při šikmém pohledu (například z bezpečnostní kamery) může být výrazně zkreslený. Pokud se na dav lidí podíváme z perspektivy, výškový a šířkový rozměr opticky zaplní mezery mezi jedinci a dojem hustoty při pohledu zvětší je pak větší. Rozdíl mezi půdorysným pohledem a pohledem z perspektivy je demonstruje Obrázek 9. Typicky se může jednat o záběry z videokamer či pohledy z vyvýšených míst. [10]



Obrázek 9: Optický rozdíl hustoty davu mezi půdorysným průmětem a pohledem z perspektivy [10]



### 3.1.4 Riziko mimořádné davové události u statického davu

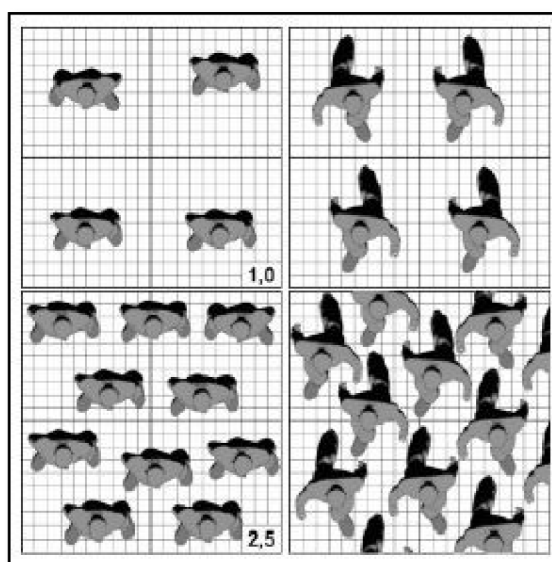
S rostoucí hustotou proudu roste i riziko incidentu. Jedinec, který není nijak omezován, disponuje svobodou pohybu. Rychlost, směr a způsob pohybu řídí na základě vlastních rozhodnutí a potřeb. Pokud klopýtne nebo je na něj působeno vnější silou, automaticky na tyto nečekané události reaguje tlakem v opačném směru. Nakloní se, rozkročí nohy nebo třeba ustoupí.

S rostoucí hustotou davu je všechny pohyb postupně omezován a ubývá prostor pro individuální chování a reakce jedinců. Rychlost a směr pohybu určuje dav jako celek. Při hodnotě hustoty davu přibližně  $6-7 \text{ os.m}^{-2}$  již mezi jedinci nezůstává takřka žádný prostor. Jedinec tak ztrácí schopnost vnější impulzy kompenzovat. Nemá dost místa pro rozkročení či ustoupení a místo toho přenáší energii davem dál. Stačí, aby klopýtl jeden člověk a může tak vzniknout rázová vlna, která se z jednoho místa šíří davem dál a jejíž energie dokonce nabývá na síle.

Tento jev může být pro lidi v davu velice nebezpečný. Existuje mnoho případů, kdy způsobil vážná zranění či dokonce úmrtí. [12] Proto je potřeba stanovit maximální bezpečnou hodnotu hustoty dynamického davu. Empiricky ověřená hodnota, kdy zaručeně nedochází k rázovým vlnám je  $5 \text{ os.m}^{-2}$ . [12]

## 3.2 Dynamický dav

### 3.2.1 Prostorové nároky chodce v pohybu



Obrázek 10: Rozdíl mezi statickým a dynamickým davem pro hodnoty hustot  $1 \text{ os.m}^{-2}$  a  $2,5 \text{ os.m}^{-2}$  [12]

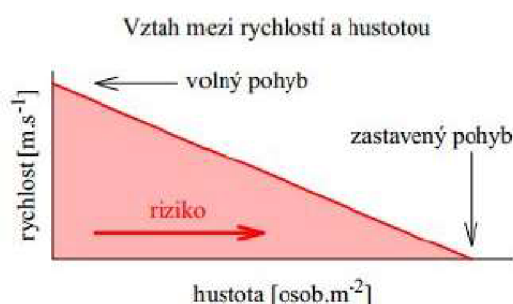
Modelová situace se zásadně změní, když se dají jedinci do pohybu. Zde dochází k rozšíření elipsy těla zejména o pohyb nohou, a i minimální intimní prostor se zvyšuje (viz Obrázek 10). Určení mezních hodnot pro hustotu davu v tomto případě

bude o něco komplikovanější. Nově totiž do úvahy vstupuje i rychlost daného proudu chodců.

### 3.2.2 Fundamentální diagramy pěší dopravy

Pokud zjednodušíme pohyb chodců do jednosměrného homogenního proudu (v praxi např. přístupové cesty, chodníky, úzké koridory), funguje na stejných zákonitostech jako např. silniční provoz. Základními veličinami se stává intenzita, rychlost a hustota dopravního proudu.

**Vztah mezi rychlostí a hustotou** je zobrazen na grafu (viz Obrázek 11). Při nízkých hustotách není pohyb chodce nijak omezován a rychlost pohybu se blíží potenciálu chodce. S rostoucí hustotou proudu začíná být pohyblivost chodců omezoována a rychlost se lineárně snižuje až do bodu kongesce a úplného zastavení. [10]



Obrázek 11: Vztah mezi rychlostí a hustotou proudu chodců [10]

**Vztah mezi intenzitou a hustotou** je zobrazen na grafu (viz Obrázek 12). Intenzita, tedy počet osob přepravených za časovou jednotku na určitou vzdálenost, se s rostoucí hustotou zvyšuje, dokud výrazně neomezuje rychlost chodce. V určitém bodě je dosaženo maximální kapacity a s omezením pohybu se snižuje i intenzita. V bodě úplného zastavení proudu je i intenzita rovna nule. [10]



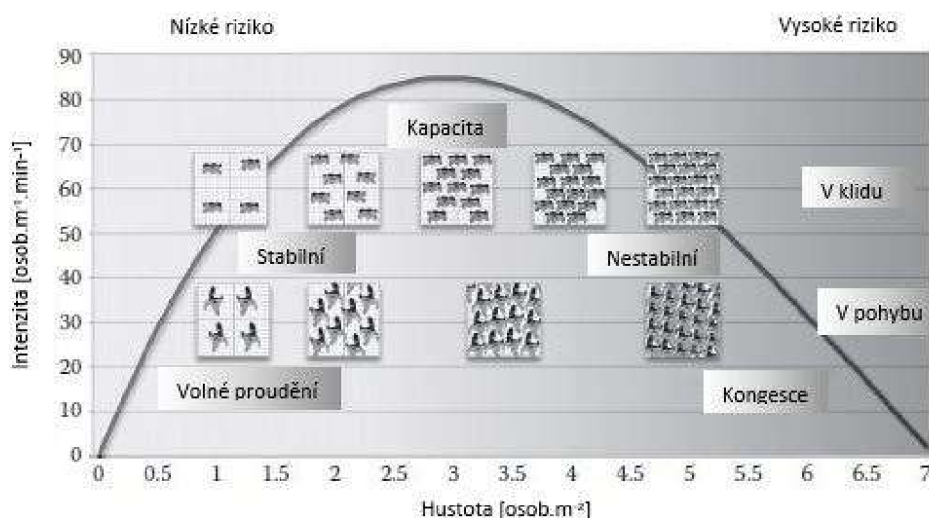
Obrázek 12: Vztah mezi intenzitou a hustotou proudu chodců [10]

Po dosažení empiricky získaných dat viz Obrázek 13, je možno odečíst konkrétní hodnoty. Optimální intenzity dav dosahuje při hustotě cca 3 os.m<sup>-2</sup>. Konkrétně se

jedná o hodnotu intenzity  $85 \text{ os.m}^{-1}.\text{min}^{-1}$ . Při vyšších hustotách se intenzita snižuje a k úplnému zastavení dochází při hustotě cca  $7 \text{ os.m}^{-2}$ . V tomto bodě dav není schopen pohybu a riziko vzniku rázové vlny je velmi vysoké.

### 3.2.3 Riziko mimořádné davové události dynamického davu

I při určování míry rizika je situace dynamického davu o něco složitější. Obecně však lze říct, že s rostoucí hustotou roste také riziko incidentu. Při hustotách vyšších, než je hodnota  $3 \text{ os.m}^{-2}$  dochází k fyzickému kontaktu mezi chodci. Dav přestává být stabilní a riziko dramaticky roste. [12] Podrobnější popis analýzy rizika mimořádné události dynamického davu je nad rámec této práce, nicméně detailněji o tématu pojednává publikace [12].



Obrázek 13: Vztah mezi hustotou a intenzitou proudu chodců s konkrétními hodnotami a zobrazením statického a dynamického davu [12]

## 3.3 Úroveň kvality pěší dopravy

John J. Fruin ve své práci definuje metodu pro posuzování kvality pěší dopravy právě na základě hustoty a rychlosti, tzv. „Level of service“, do češtiny překládáno jako úroveň kvality dopravy. Tento koncept je hojně užíván zejména v automobilové dopravě. Hodnotí dopravní síť pomocí zjednodušené stupnice A-F. Hodnocení „A“ znamená, že jednotlivé subjekty se mohou pohybovat bez kontaktu s jinými a navzájem se nijak neomezují. Hodnocení „F“ naopak popisuje situaci, kdy jsou subjekty natolik v kontaktu a navzájem si překáží, že nejsou prakticky schopné pohybu.

John J. Fruin tento přístup poprvé aplikuje na pěší dopravu. Rozlišuje jednotlivé kategorie této stupnice zvláště pro chodníky, schodiště a čekací plochy. Konkrétní

hodnoty zachycuje Tabulka 3. Ačkoliv je tato metoda hodnocení úrovně pěší dopravy inženýrskou praxí hojně užívána, české normy jí prozatím nedisponují. [10]

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

Tabulka 3: Úroveň kvality pěší dopravy podle Fruina [10]

## 4 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ POHYBU OSOB

Numerický model je matematická reprezentace určitého chování ve fyzickém světě. Komplexní děje, které bychom si byli jen obtížně schopni představit, umožňuje simulovat výpočetní technika. Stačí do počítače pomocí matematických vztahů zadat zkoumaný děj a počítač nám sérií výpočtů, pro člověka časově náročných, během okamžiku vykreslí jeho průběh v čase. [15] Tento nástroj je hojně využíván zejména v geologii, meteorologii, ale i ve stavebním inženýrství.

### 4.1 Verifikace, kalibrace, validace

Aby byly výsledky numerické simulace relevantní, je nutné respektovat základní pravidla počítačového modelování. Pro zaručení určité spolehlivosti výsledků a vymezení oblasti, v nichž jsou použitelné, využíváme proces *verifikace, kalibrace a validace*. Jedná se o zcela klíčový faktor numerického modelování. Tyto pojmy můžeme definovat následně. [10]

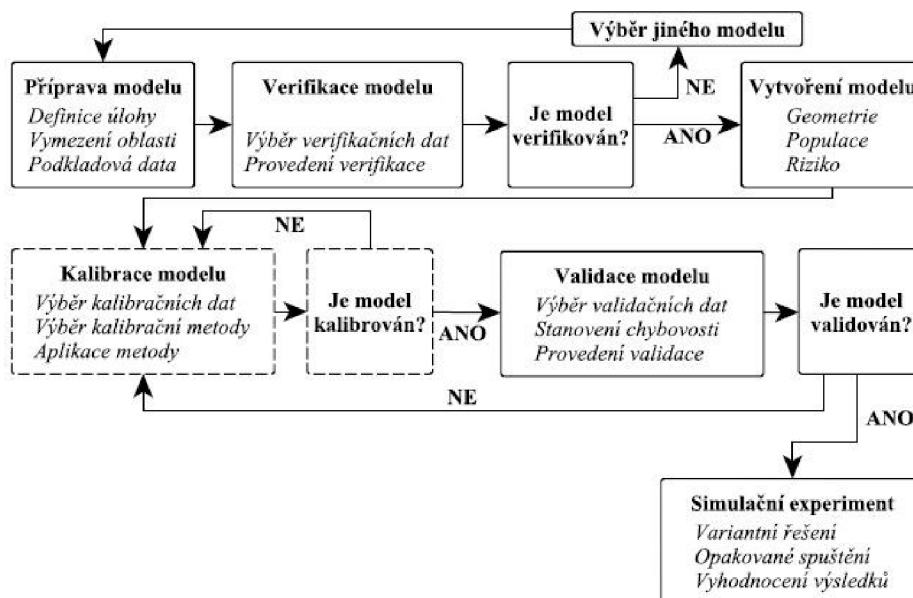
**Verifikace modelu.** Jedná se o první krok při modelování. Podstatou je ověření, že zvolený model odpovídá specifickým požadavkům pro účel simulace. Pokud model neprojde verifikací, tzn. není použitelný pro záměry uživatele, je z uživatelského hlediska neopravitelným. V takovém případě musí být nahrazen modelem novým, případně jeho relevanci zúžíme na oblast, pro kterou může být implementován. [10] Verifikaci může například provést expert v dané oblasti nebo může být provedena formou schémat popisujících každý možný scénář, který v simulaci nastane. [16]

**Kalibrace modelu.** Následuje proces kalibrace. Jedná se o nastavení parametrů modelu tak, aby se jeho chování co nejvíce blížilo realitě zkoumaného děje. Vzhledem k množství neznámých náhodných dějů, které do pohybu osob vstupují,

je vhodné kalibrovat pouze parametry, které nemáme naměřené či ověřené experimentem. [10] Zjednodušeně řečeno, snažíme se model co nejvíce přiblížit realitě.

**Validace modelu.** Proces Validace ověřuje přesnost, se kterou model simuluje reálný zkoumaný jev. Jedná se o konečný test, který je zcela oddělen od předchozích procesů verifikace a kalibrace. Provádí se porovnáním výsledků modelu s daty získanými experimentálně. Porovnávaná empirická data přitom musí být odlišná od dat využitých ke kalibraci. V případě, že model při validaci nevyhoví je vrácen zpátky do procesu kalibrace. [10]

Při implementaci výše uvedených procesů můžeme postoupit samostatně, případně se řídit některým z ověřených postupů. V našem prostředí je vhodné použít standardizovaný postup dle ISO [10], lze však použít i některou z verifikačních a validačních studií. Celý proces můžeme vidět na schématu (viz Obrázek 14).



Obrázek 14 Schéma celkového procesu verifikace, kalibrace a validace [10]

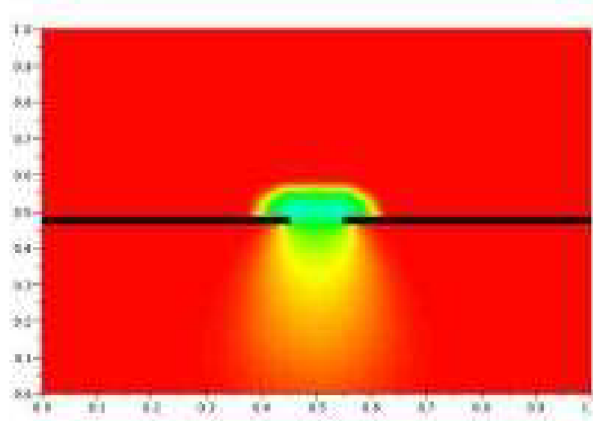
## 4.2 Technologie modelování

Technologie modelování pohybu osob můžeme rozdělit na základě tří základních přístupů. Jedná se o modely makroskopické, mikroskopické a mesoskopické. Každý z těchto modelů je vhodné použít v jiných situacích. [17]

### 4.2.1 Makroskopické modely

Makroskopické modely vycházejí z předpokladu, že modelovaný dav je možno popsat jako celek na základě jeho vnějších charakteristik jako hustoty, intenzity atd. Model přitom zcela zanedbává vnitřní strukturu davu. Nerozlišuje konkrétní osoby ani jejich interakce a dochází ke ztrátě dat vlivem průměrování těchto informací [17]

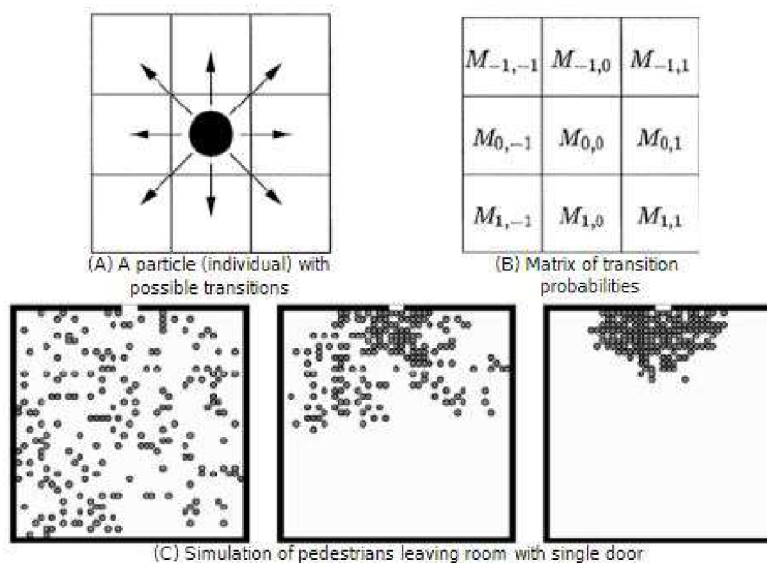
Tento přístup se osvědčil při modelování automobilové dopravy, jeho využitelnost pro modelování pohybu osob, by tedy neměla být o moc menší. Makroskopické modely je vhodné použít zejména v situacích, kdy sledujeme model ve větším měřítku a nemáme potřebu se při analýze zabývat detaily jednotlivých osob. Je také potřeba mít výše zmíněná omezení na paměti. [18] Příklad makroskopického modelu zachycuje Obrázek 15.



Obrázek 15: Příklad jednoduchého makroskopického modelu pohybu osob [22]

#### 4.2.2 Mikroskopické modely

Mikroskopický model popisuje všechny osoby zvlášť a stejně tak jejich vzájemné interakce i interakce s prostředím. Nepochází tak ke ztrátám dat vlivem průměrování jako u makroskopických modelů. To umožňuje také přizpůsobit model specifické populaci a jejím vlastnostem. V dnešní době existuje velké množství mikroskopických modelů, které se navzájem různě překrývají ve svých přístupech. Je možné je zhruba rozdělit na tyto čtyři typy: celulární automaty, agentní modely, modely na bázi teorie her a modely silové. [18]

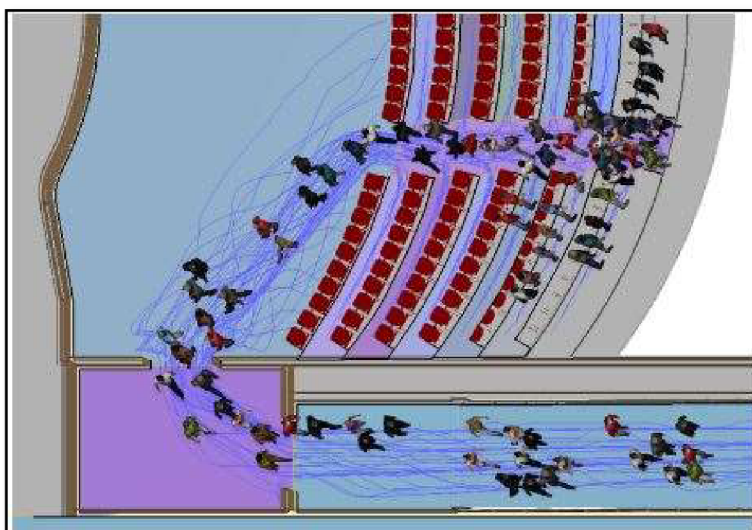


Obrázek 16: Příklad modelu na bázi celulárních automatů [23]



**Celulární automaty** byly první z mikroskopický modelů, a to zejména z důvodu nižších požadavků na výkon díky využívání pouze diskrétních hodnot. Prostor modelu je členěn do jednotlivých buněk. Každá buňka může být buď zaplněna překážkou, jednou osobou, nebo může zůstat prázdná. Tento základní předpoklad modelu tak fixně určuje velikost osoby (jedna buňka) i způsob pohybu osob (pouze z buňky na buňku), viz Obrázek 16. Celulární automaty sice neumožňují natolik detailní modelování, nicméně oproti technologiím využívajících spojitých hodnot jsou požadavky na výpočetní výkon skutečně nesrovnatelně nižší. [18]

**Agentní modely** již jsou komplexnější a umožňují využívat diskrétní i spojitě množiny hodnot. Tato technologie staví zejména na vysokém počtu vlastností, které lze přiřadit každé osobě neboli agentu. Chování jednotlivých agentů je pak odvozeno od jejich vzájemných interakcí. Agentní modely umožňují velice podrobné a věrné modelování pohybu osob. To s sebou však nese i objemy výpočtů, které si kladou vysoké nároky na výpočetní techniku. Agentní modely jsou v současné době nejpokročilejší technologií, kterou máme k dispozici. [18]

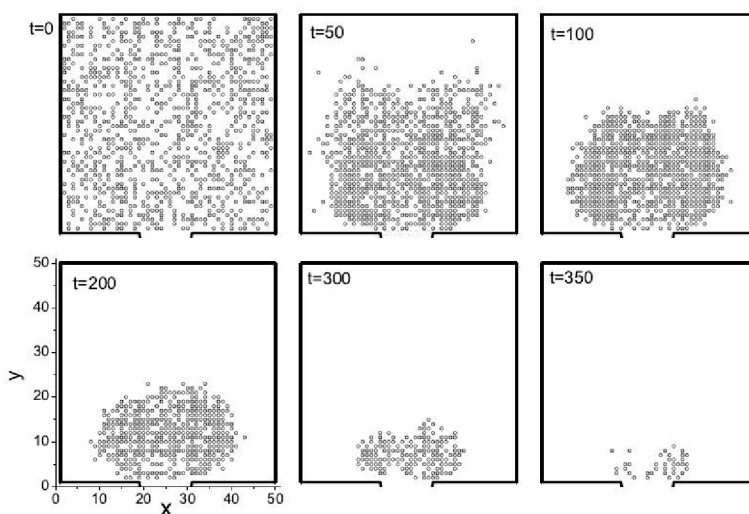


Obrázek 17: Příklad modelu na bázi agentní technologie [20]

**Silové modely** se soustředí výhradně na úhybné manévry osob. Vyžadují pro každou osobu zadání ideální trajektorie ve formě vektorů, kterých se pak snaží s určitou silou držet. Tato síla je závislá na rychlosti osoby, čase a hmotnosti. Jednotlivé osoby se poté působením těchto sil ze svých trajektorií mohou navzájem vychylovat. Odpuzující silou působí také všechny překážky. Působení sil je o to větší, čím jsou jednotlivé subjekty k sobě blíže. [18]

**Modely na bázi teorie her** se zaměřují na vyhodnocování konfliktů, které vzniknou například protnutím zamýšlené trajektorie osob či snahou osob vstoupit do stejného pole v celulární síti. Teorie her předpokládá, že se každý subjekt chová racionálně, tak aby maximalizoval své výsledky. Současně je potřeba přiřadit subjektům určité strategie, které mohou vykonat. Tyto modely mohou být užitečné

například pro simulaci evakuací. Agenti se snaží minimalizovat svůj čas úniku a využít mohou strategii kooperace (řízení se pravidly evakuace) a konkurence (unikají sami za sebe), viz Obrázek 18. [19]



Obrázek 18: Příklad modelu na bázi teorie her, všichni agenti kooperují [19]

### 4.2.3 Mesoskopické modely

Mesoskopické modely usilují o dosažení jistého kompromisu mezi makroskopickým a mikroskopickým přístupem. Zejména se jedná o zachování výpočetní rychlosti makroskopických modelů při částečném zohlednění vlastností jednotlivých osob. Tento model tedy je schopen osoby rozlišovat a přiřazovat jim charakteristiky, nicméně simulace stále probíhá formou průměrování (dochází ke ztrátě informací) a výsledky dostáváme v makroskopické hladině. [18]

### 4.3 Pathfinder

Pro účely této práce bude použit program Pathfinder. Poskytovatelem tohoto softwaru je studio Thunderhead Engineering Consultants, Inc., které se soustředí na vývoj nástrojů vizualizace a modelování pro inženýrskou činnost. Samotný Pathfinder je simulátor pohybu osob postavený na agentní technologii. [20] Zaměřuje se především na evakuace lidí z budov a areálů, nicméně vhodným modelováním a zvolením vstupních parametru může být velmi přínosný i v jiných oblastech modelování pěšího pohybu.

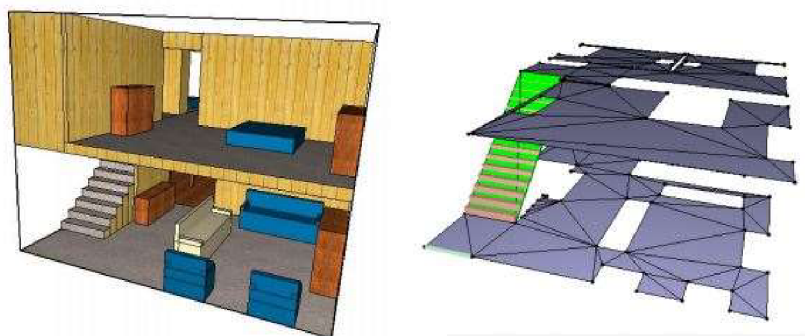
Prostředí Pathfinderu se skládá ze tří modulů: prostředí pro modelování geometrie modelu, simulátor pohybu a 3D nástroj pro zobrazování výsledků a analýzu. [20]



### 4.3.1 Modelování geometrie

Pro určení geometrie Pathfinder využívá 3D modelu prostředí. Disponuje vlastním editorem, nicméně importování projektové dokumentace z jiných formátů není problém. Pathfinder podporuje formáty AutoCADu: DXF a DWG, dále formát IFC využívaný většinou předních softwarů BIM. Importovat lze i modely vytvořené v jiných nástrojích společnosti Thunderhead Engineering Consultants, Inc.: PyroSim a Fire Dynamics Simulator. Pokud uživatel disponuje pouze plánem, lze vložit podkladový obrázek ve formátu JPG nebo PNG a geometrii následně obkreslit. [20] Příklad geometrie modelu zachycuje Obrázek 19.

Při samotné simulaci je 3D geometrie reprezentována tzv. navigační mřížkou (viz Obrázek 19). Navigační mřížka je souvislá jednostranná 2D plocha, tvořená sítí nepravidelných trojúhelníků. To umožňuje Pathfinderu poměrně přesně reflektovat složitější detaily či křivky v geometrii a poměrně věrně do simulace přenést plynulost lidského pohybu. [20]



Obrázek 19: Porovnání 3D geometrie a 2D navigační mřížky [20]

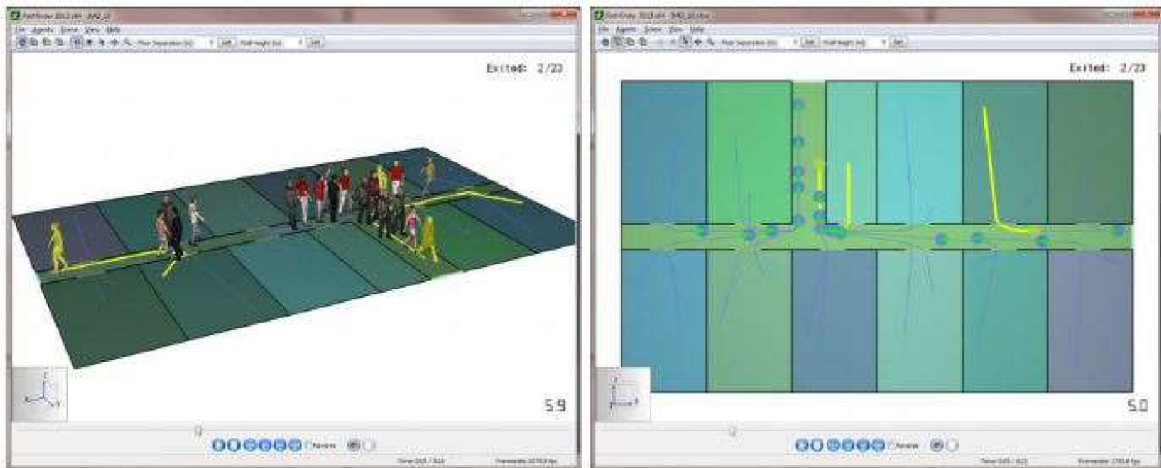
Jak ukazuje Obrázek 19, všechny pevné objekty, které by byly překážkou v pohybu, do simulace vstupují jako mezery v navigační mřížce. Za překážku generátor navigační mřížky považuje jakýkoliv pevný objekt do vertikální vzdálenosti 1,8 m od povrchu.

### 4.3.2 Simulování pohybu

#### Režimy SPFA a Steering

V Pathfinderu si můžeme zvolit ze dvou základních režimů simulace pohybu: režim SPFA a režim Steering. Režim SPFA je postavený na intenzitě. Rychlost pohybu osob je určena hustotou osob v dané místnosti. Tento režim také umožňuje, aby více agentů zabíralo stejný prostor viz (Obrázek 20). Intenzita pohybu osob u dveří a únikových východů je pak vypočítána na základě šířky průchodu. [20] V principu tento režim stále staví na agentní technologii, nicméně je zde i jistá podobnost s makroskopickými modely. [10]

V režimu Steering se každý agent pohybuje samostatně za svými stanovenými cíli. Trasu a rychlost přizpůsobuje překážkám, které jsou mu staveny do cesty, a jiným agentům. Jednotliví agenti tedy nemohou zabírat stejný prostor. Intenzita v místě průchodů nevzniká výpočtem, nýbrž přímo na základě chování agentů. Tento režim je tedy schopen simulovat i složitější chování, jakožto přirozený vedlejší produkt pohybového algoritmu. [20] V režimu Steering také můžeme očekávat výsledky více se blížící realitě. [10] Obrázek 20 zachycuje porovnání obou popsanych režimů.



Obrázek 20: Porovnání režimu Steering (vlevo) a režimu SFPE (vpravo) [20]

## Nastavitelná populace

Každou osobu v modelu reprezentuje agent. Ten má vlastní profil a vlastnosti. Lze mu přiřadit specifickou rychlost, velikost atd. Zde je vhodné využít dostupných informací o složení populace, která se v modelovaném prostředí pohybuje. Může posloužit například demografická křivka nebo informace o uživatelských objektech. [10]

Pathfinder umožňuje také organizování agentů do skupin, které budou v rámci simulace postupovat společně a následovat svého vůdce. V případě, že se některý z agentů vzdálí více, než je povolená vzdálenost, skupina zpomalí, aby se agent mohl znovu připojit. [20]

## Chování a cíle

Každému agentu nebo skupině agentů je přiřazeno specifické chování. Chování každého agenta se skládá ze sekvence cílů, kterých musí agent v simulaci dosáhnout. Pathfinder rozlišuje dva typy cílů: Seek goals a Idle goals. [20]

Seek goal znamená, že se agent aktivně pohybuje po navigační mřížce a hledá optimální cestu do zadané destinace. V případě evakuace se může jednat o cestu k únikovému východu. V případě modelování pohybu chodců například chůze z jednoho konce náměstí na druhý. [20]

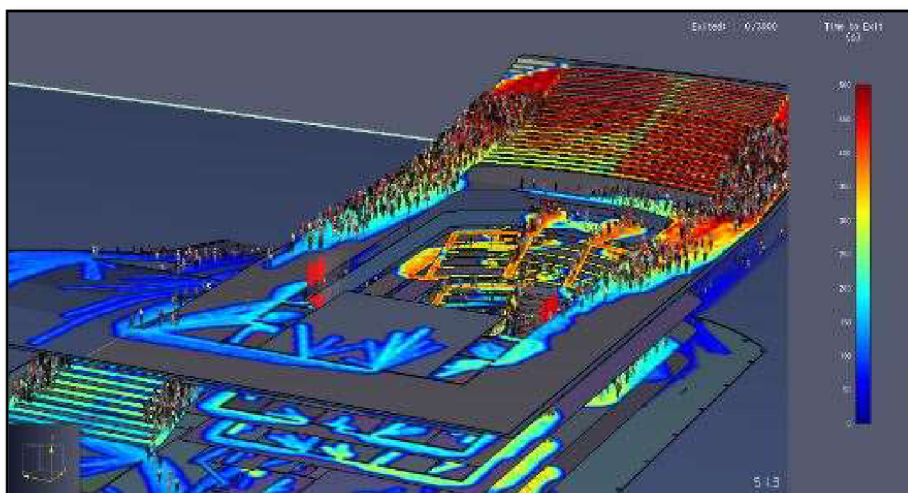
Idle goal znamená, že je agent pasivní a vyčkává na určitou zadanou událost. V režimu SFPE to znamená, že se po dobu čekání skutečně nehne z místa. V režimu Steering se agent může stále pohybovat a je mu určena přilehlá plocha, kterou by neměl opustit. Pokud se tak však stane, agentu se aktivuje dočasný Seek goal, který ho navede zpátky do vymezené oblasti. [20]

### 4.3.3 Vyhodnocení simulace

Celý průběh simulace je možno sledovat v přehledném interaktivním 3D prostředí. Pathfinder disponuje množstvím modelů osob. Ty se liší podle oblečení, věku nebo rasy. Zastoupení různých modelů osob se dá vyjádřit procentuálně, není tedy problém ve vizualizaci namodelovat požadované složení populace (viz Obrázek 20). Modely nejsou příliš propracované, což však umožňuje hladký průběh vizualizace i o desítkách tisíc agentů. [20]

V průběhu i po ukončení simulace se dají snadno měnit pohledy, uživatel může zobrazovat různé trasy agentů či se libovolně posouvat po časové ose. Lze i poměrně snadno vytvořit film zaznamenávající průběh simulace. [20]

Po průběhu simulace má uživatel k dispozici množství dat, které je možno přehledně zobrazit například formou grafů či barevných škál viz Obrázek 21. Barevná škála může přehledně vyjádřit mimo jiné hodnoty hustot, intenzit nebo času, který agenti potřebovali pro dosažení cíle. [20]



Obrázek 21: Ukázka vyhodnocení simulace za pomoci barevné škály [20]

### 4.3.4 Možnosti a limity Pathfinderu

Je důležité si uvědomovat, že Pathfinder, stejně jako jiné nástroje numerického modelování, má své limity. Přes vysoké množství nastavitelných charakteristik, se model vždy bude výrazně lišit od skutečné situace. To je způsobeno faktem, že je ve hře stále mnoho aspektů, které musí být pro účely modelu zanedbány. Jejich

identifikace a prozkoumání všech jejich kombinací i přes současnou výpočetní techniku zkrátka není možné. [12]

Při modelování je proto vhodné se nesnažit simulovat pohyb osob v celé jeho komplexnosti, ale zaměřit se vždy na úzký počet charakteristik ve velice konkrétních případech. Tím se počet kombinací znatelně sníží. Současně je vhodné, aby byl procesu účasten odborník na pěší pohyb osob. To zajistí, že zkoumané charakteristiky budou relevantní ve vztahu k reálnému chování davu. [12]

Numerické modelování pohybu osob tedy může inženýrům či architektům poskytnout odpovědi na konkrétní otázky či je upozornit na problematická místa v návrhu. Může se tak jednat například o ověření určitého plánu evakuace či vhodného umístění mobiliáře v pěší zóně.

## **5 ŘEŠENÁ LOKALITA**

Pro účely praktické části práce bylo zvoleno náměstí Míru v Brně. Výběru předcházela konzultace s Kanceláří architekta města Brna a s Magistrátem města Brna. Oba tyto městské orgány přitom označily řešení budoucí podoby náměstí Míru za jednu z hlavních priorit města. Roli při výběru hrála i autorova osobní vazba na lokalitu a jeho podrobná znalost lokality.

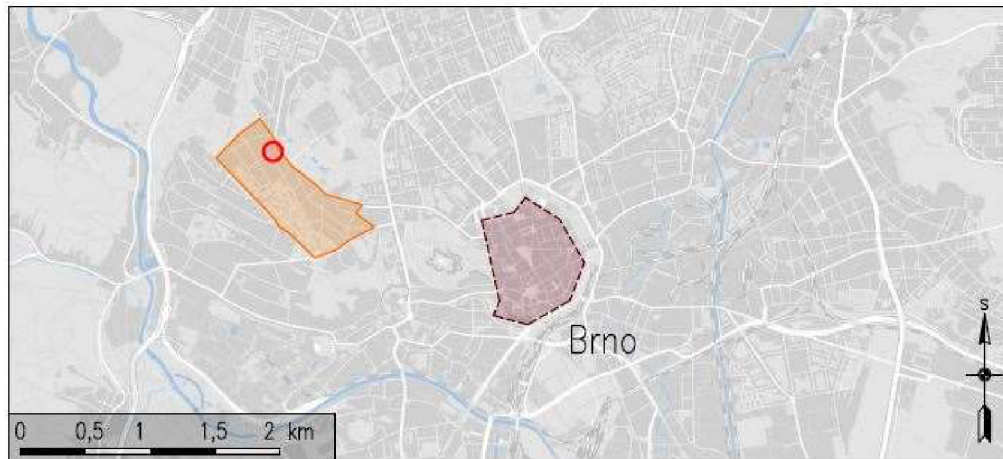
Praktická část práce si klade za cíl posoudit kvalitu pěší dopravy na náměstí Míru ve stávajícím stavu a následně ověřit návrh dopravního řešení pro novou podobu náměstí. K těmto účelům bude využit numerický model vytvořený v programu Pathfinder.

### **5.1 Obecná charakteristika lokality**

#### **5.1.1 Poloha náměstí Míru**

Náměstí Míru se nachází v Brně, na severozápadním okraji městské části Brno-střed (viz Obrázek 22) a tvoří přirozenou vstupní bránu do Masarykovy čtvrti. Masarykova čtvrť je zejména díky svojí výhodné poloze a převážně vilové zástavbě jednou z nejatraktivnějších čtvrtí pro bydlení v Brně.





### Legenda

- |                    |                  |              |
|--------------------|------------------|--------------|
| Historické centrum | Masarykova čtvrť | náměstí Míru |
|--------------------|------------------|--------------|

Obrázek 22: Poloha náměstí Míru v městě Brně [Vlastní]

## 5.1.2 Výkres širších vztahů

Významné souvislosti potřebné pro pochopení pěších aktivit na náměstí Míru jsou zpracovány ve výkresu širších vztahů (viz Obrázek 23).



### Legenda

- |                              |                         |                       |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Hvězdárna a planetárium Brno | Wilsonův les            | Řešené území          |
| Vysokoškolské koleje         | Park Kraví hora         | Koupaliště Kraví hora |
| Školská zařízení             | Tramvaj, linka č. 4     | Bývalý vojenský areál |
| Směr Biskupské gymnázium     | Směr historické centrum | Restaurace            |

Obrázek 23: Výkres širších vztahů náměstí Míru [Vlastní]

Náměstí Míru se nachází relativně blízko historickému centru města. Konkrétně se jedná o docházkovou vzdálenost přibližně 15 minut, resp. 6 minut tramvají. Primární dopravní spojení přitom tvoří tramvajová linka č. 4.

Náměstí Míru se vyznačuje vysokou koncentrací školských zařízení a vysokoškolských kolejí. Na samotném náměstí se nacházejí dvě základní školy: Základní škola Brno, nám. Míru 3 (dále jen ZŠ Míru), a Cyrilometodějská církevní základní škola Brno (dále jen CMCZŠ), a střední škola Cyrilometodějské gymnázium a střední odborná škola pedagogická (dále jen CMG). Linka č. 4 přitom částečně dopravně obsluhuje i Biskupské gymnázium (dále jen Bigy) vzdálené přibližně 800 m od konečné zastávky. Jedny vysokoškolské koleje nalezneme přímo na náměstí Míru, druhé v těsné blízkosti náměstí.

Z pohledu rekreačních a sportovních příležitostí je náměstí velice dobře situováno. V blízkosti nalezneme parky Wilsonův les a Kraví hora. Na vrcholu Kraví hory se přitom nalézají Hvězdárna a planetárium Brno, která pořádá řadu pro obyvatele města atraktivních akcí. Sportovnímu vyžití je k dispozici areál Koupaliště Kraví hora a řada udržovaných veřejných sportovišť.

Výraznou bariéru v zástavbě a současně výzvu pro další rozvoj čtvrti tvoří bývalý vojenský areál bezprostředně sousedící s náměstím. Obyvatelé čtvrti vyžadují zejména využití těchto pozemků pro vznik zařízení občanské vybavenosti. Dle připravovaného územního plánu města Brna by zde přitom měla vzniknout 6–16 m vysoká zástavba plnící funkci smíšenou. Lze tedy očekávat, že zástavba, která tu vznikne bude sloužit občanské vybavenosti a současně bytovému bydlení.

### 5.1.3 Funkční využití náměstí

Jak již bylo řečeno, náměstí Míru funguje jako lokální centrum Masarykovy čtvrti. Náměstí plní především funkci dopravní. Linka č. 4 propojuje lokalitu s centrem, poskytuje dostatečnou dopravní kapacitu pro obsluhu všech blízkých škol. Opačným směrem dopravní spojení zajišťuje autobusová linka. V tomto případě se jedná především o propojení s městskou částí Žabovřesky.

Náměstí občanům poskytuje většinu základních služeb (viz Obrázek 24). Krom již výše zmiňovaných škol a kolejí zde nalezneme například samoobsluhu, restauraci i malou kavárnu. Dominantou náměstí je bezesporu kostel sv. Augustýna, kde také probíhají pravidelné nedělní mše. V západní části náměstí se nachází pětipodlažní bytový dům, v jehož přízemních prostorech nalezneme lékárnu U sv. Augustýna.

Náměstí má však i určité slabé stránky, kvůli kterým se do budoucna počítá s jeho obnovou. Jako první můžeme jmenovat nevhodné dopravní řešení. Na náměstí se nachází nepřehledná křižovatka pozemních komunikací, do které navíc zasahuje obratiště tramvaje a autobusová zastávka. Krom toho chodníky na náměstí Míru často nerespektují přirozené trasy chodců, což je možné doložit častou chůzí chodců přes zeleň a přecházení mimo přechody. I s ohledem na častý pohyb dětí je tedy na místě bezpečnější a více elegantní dopravní řešení.

Druhým nedostatkem náměstí Míru je fakt, že na chodce příliš jako náměstí nepůsobí. Prostor je zcela otevřen směrem do parku Kraví hora a budova samoobsluhy a restaurace je pouze přízemní. Náměstí tak není příliš kompaktní. Ačkoliv tudy denně projde mnoho lidí, jedná se vždy o chůzi s jasným cílem. Veřejný prostor náměstí téměř nijak nevybízí k zastavení se či venkovním aktivitám. Příliš tak nerespektuje zásady veřejného prostoru pro kvalitní městský život popsané například urbanistou Gehlem [5].



Obrázek 24: Funkční analýza náměstí Míru [Vlastní]

## 5.2 Analýza pohybu chodců

Pro vytvoření modelu pěšího pohybu na náměstí Míru je klíčové získání dat pro věrné nastavení charakteristik a chování agentů, kteří v modelu skutečné chodce reprezentují. Konkrétně se jedná především o hodnoty základních rozměrů, rychlosti chůze a trajektorie chodců. Důležité je ale také pochopení širšího kontextu. Odkud chodci vycházejí a kam směřují či rozložení pěší dopravy během dne. Tato podkapitola se tedy věnuje zmiňovaným základním souvislostem.

### 5.2.1 Vymezení špičky

Model budeme vytvářet pro nejvyšší zátěžový dopravní stav, ke kterému na náměstí dochází. Z toho důvodu je potřeba určit tzv. lokální špičku, tedy časový úsek, při kterém na náměstí dochází k nejvyšším hodnotám pěší dopravy.

Obecně lze říct, že nejvíce významným dopravním vztahem ve městě je vztah bydliště a místa denního působení (zejména zaměstnání a školy). Proto také hlavní dopravní špičky a jimi způsobené kongesce pozorujeme převážně v hodinách ranních (cesta do působiště) a odpoledních (návrat do bydliště). Obecné špičku ve všední den tak očekáváme v časech: 6:30 – 8:00 a od 15 h dále.

Vzhledem k charakteru náměstí Míru můžeme pozorovat tři lokální špičky:

**Ranní špička.** Na náměstí a v blízkém okolí se nacházejí dvě školy základní a dvě školy střední. Ranní špička je tedy způsobena převážně žáky, studenty a učiteli cestujícími do těchto škol. Nastává ve všední dny v čase 7:00 – 8:00. Primárním lokálním zdrojem dopravy je výstupní tramvajová zastávka. Tato špička je nejvíce koncentrována jak do krátkého časového úseku, tak prostorově do omezeného počtu trajektorií. Lze tedy očekávat nejvyšší intenzity pěší dopravy. Tato špička bude použita pro model.

**Odpolední špička.** Ekvivalent špičky ranní. Nastává ve všední dny v čase od 15 h dále. Největší procento chodců cestuje ze škol na nástupní zastávku tramvaje. Krom toho je špička doplněna o obyvatele čtvrti vyhledávající služby na náměstí a rekreační aktivity v přilehlém parku. Tato špička je však časově lépe rozložena, proto při ní není dosahováno tak vysokých intenzit, jako u špičky ranní.

**Špička víkendová.** K této špičce dochází v časech bohoslužeb či jiných akcí v kostele sv. Augustýna. Tato špička je méně častá a nedosahuje tak vysokých intenzit jako špička ranní. Je však zcela odlišná od špičky ranní a odpolední ve všední dny. Probíhá v jiné časové úseky a lokální zdroje dopravy jsou v tomto případě pestřejší a zcela odlišné. Rozsah této práce problematiku víkendové špičky na náměstí Míru nepokrývá. Při návrhu budoucí podoby náměstí by však tato špička měla být náležitě zohledněna.

## 5.2.2 Zdroje a cíle pěší dopravy

Většina pěšího pohybu na náměstí je tzv. „goal-oriented“, tedy jedná se o chůzi přímo směřující ke konkrétnímu cíli cesty. Na základě předchozích analýz můžeme identifikovat jednotlivé body, které fungují jakožto lokální zdroje a cíle dopravy (viz Obrázek A 1 v příloze) a na základě jejich charakteru a poloze lze definovat základní dopravní vztahy:

**Školy (CMcZš, ZŠ Míru, Bigy, CMG).** V pracovních dnech jsou školy zodpovědné za většinu pěší dopravy v lokalitě. Většina žáků a studentů přichází ráno do školy od tramvajové zastávky, určité procento i z různých směrů čtvrti. Odpoledne opouštějí žáci a studenti lokalitu obdobným způsobem. Doprava je však lépe rozložena v čase, proto intenzity pěší dopravy nabývají o něco nižších hodnot.



**Koleje náměstí Míru.** V rámci náměstí Míru je většina pěší dopravy z kolejí vázána na Brněnku, tramvajovou zastávku a park Kraví hora.

**Brněnka (samoobsluha).** Hojně využívána jak žáky a studenty škol, tak vysokoškolskými studenty z kolejí a obyvateli čtvrti. Vysoká intenzita po většinu dne, špička v pozdějších odpoledních hodinách.

**Kostel sv. Augustýna.** Po většinu týdne nijak významný dopravní bod. O víkendech zde probíhají bohoslužby či případné svatby a pohřby způsobující vysoké dopravní intenzity. Dopravní vazba převážně na obyvatele čtvrti. Doprava ze vzdálenějších lokalit spíše automobilová než MHD.

**Park Kraví hora.** Nejvíce využívaný vstup do parku. V ranních a dopoledních hodinách park využívají školy pro hodiny tělovýchovy. Špička nastává v odpoledních hodinách, kdy park využívají školní družiny a obyvatelé čtvrti a kolejí ke sportu a rekreaci.

**Tramvajová zastávka výstupní.** Od zbytku náměstí je oddělena přechodem přes pozemní komunikaci. V ranních hodinách zdrojem většiny pěší dopravy na náměstí, tramvaj přijíždějí žáci a studenti blízkých škol. V odpoledních a večerních hodinách tramvaj přiváží převážně obyvatele čtvrti a studenty z kolejí.

**Tramvajová zastávka nástupní.** V ranních hodinách využívána převážně obyvateli čtvrti a studenty z kolejí. V odpoledních hodinách tramvaj odváží žáky a studenty z blízkých škol.

## 5.3 Analýza dopravního prostoru

Pro analýzu dopravního prostoru posloužily mapové podklady, osobní pochůzky a v neposlední řadě i autorovy dlouholeté zkušenosti s navštěvováním náměstí.

### 5.3.1 Kvalita pěší dopravy

Náměstí Míru je protkáno poměrně spleťitou sítí chodníků (viz Obrázek A 2 v příloze). Chodníky jsou převážně rekonstruované, z betonové zámkové dlažby.

Na náměstí je dostatek zeleně ve formě zatravněných ploch vzrostlých stromů a keřů. Přes plochy zeleně jsou často prošlapány cesty, což značí, že chodníky příliš nerespektují přirozené trajektorie chodců. V takových místech je zatravnění zcela zničeno, nalezneme zde široké plochy udusané hlíny.

Náměstí je také protknuto pozemními komunikacemi. Křižovatka, která se zde nachází, je nepřehledná a zabírá neúměrně velkou plochu. Přecházení přes pozemní komunikace je řešeno přechody. Chodci nicméně hojně přecházejí i na jiných

místech, což je patrné například z vyšlapaných cest. U nejvíce nebezpečných míst je vstup do vozovky chráněn zábradlím.

Situaci pro pěší také komplikuje nástupní zastávka tramvaje. Výška obrubníku je zde 200 mm a snižuje se pouze na některých místech. Snížení obrubníku nelícuje na opačných stranách tramvajového pásu a vnucuje tak chodcům nepřímou trajektorii, nebo nepohodlné přecházení vysokého obrubníku. Krom snížení obrubníku není nijak určeno konkrétní místo pro přecházení tramvajového pásu.

Z pohledu mobiliáře je náměstí dostatečně vybaveno. Nachází se tu dostatek laviček, odpadkových košů a například i bankomat, trafika. Množství mobiliáře odpovídá způsobu využití náměstí, které je v současné době převážně průchozího charakteru. Pokud by náměstí mělo chodce vést i k zastavení či venkovním aktivitám, musel by být mobiliář rozšířen.

### **5.3.2 Komfort chůze**

Na náměstí se v současné době vyskytují čtyři druhy povrchu (viz Obrázek A 3 v příloze). V nejlepším stavu jsou zastávky výstupní i nástupní, které byly v nedávné době rekonstruovány. Nové krytí chodníku v těchto místech je provedeno z betonových dlaždic. Chodníky jsou rovné a beze spár, pro chůzi tedy velmi pohodlné. Výška obrubníků a stupňů je 200 mm. Součástí rekonstrukce bylo i provedení hmatové úpravy pro nevidomé ve všech místech snížených obrubníků na náměstí.

Naproti tomu celý dělicí ostrůvek s trafikou a prostory v blízkosti Brněnky jsou pokryty asfaltovým povrchem. Ten je nerovný a jsou zde velmi časté spáry a trhliny či asfaltové vysprávkky. Defekty větších rozsahů se zde nenacházejí, nicméně povrch není pro chůzi příliš pohodlný a osobám s pohybovým znevýhodněním může působit problémy. Asfaltový povrch je lemován nerovným obrubníkem z žulového kamene, ten nabývá výšek přibližně v rozsahu 50-100 mm.

Třetím typem povrchu na náměstí je žulová dlažba staršího typu, skládaná s podélným přesahem. Tou jsou pokryty chodníky před kostelem sv. Augustýna a chodníky vedoucí napříč náměstím. Dlažba je vinou mnoha let užívání místy zvlněná a nerovná, i přesto je však pro chůzi stále poměrně bezproblémová. Trhliny, spáry ani větší defekty zde nenajdeme.

Čtvrtým a posledním typem chodníkového povrchu na náměstí je mozaika z drobných žulových kostek lemující park Kraví hora. Zde je povrch v dobrém stavu, zejména díky nízkému dopravnímu zatížení. Mozaika navíc tvoří dvoubarevný motiv šachovnice, který působí v celku esteticky.

Pro osobu s pohybovým znevýhodněním je v současném stavu náměstí průchozí. Ne vždy je však trasa přímá a vede i přes povrchy v problematickém stavu (viz Obrázek A 3 v příloze).

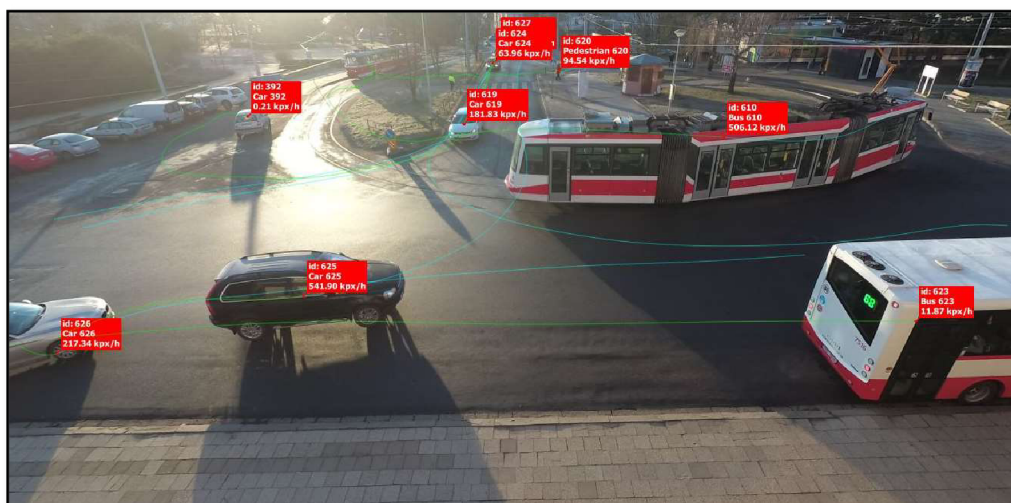
## 6 PŘÍPRAVA DAT

Pro sběr dat potřebných pro vytvoření modelu pohybu chodců na náměstí Míru byl zvolen postup extrakce dat z pořízeného video záznamu. Tento postup se dnes již hojně využívá v dopravním inženýrství. Možnosti využití v oblasti posuzování a navrhování veřejných prostranství však zatím nejsou příliš probádány.

Videozáznam byl autorovi pro účely práce poskytnut Odborem dopravy Magistrátu města Brna. Video bylo pořízeno ze stříšky na kostele sv. Augustýna a zachycuje pěší pohyb na náměstí v čase ranní špičky viz Obrázek 25. Kvalita obrazu je velmi dobrá. Úhel kamery bohužel není pro účely práce optimální (viz Obrázek A 4 v příloze). Záběr pokrývá převážně tramvajovou smyčku, křižovatku a přilehlé parkoviště. Pohyb chodců na zbytku náměstí bohužel nezachycuje. Tato komplikace je způsobena skutečností, že videozáznam byl Odborem dopravy pořízen zejména pro účely posouzení automobilové, autobusové a tramvajové dopravy.

### 6.1 Pokročilé nástroje analýzy obrazu

Původním záměrem bylo využít pro extrakci trajektorií a rychlostí z videa službu Data From Sky (dále jen DFS), která se přímo na tuto problematiku zaměřuje. DFS je analytický nástroj, který je schopen identifikovat jednotlivé pohybující se objekty na videu, například vozidla či chodce. Dále pak vykreslí jejich trajektorii a pomocí georeference i jejich průběžné rychlosti viz Obrázek 25. Vybraná data si následně uživatel exportuje formou CSV souboru.



Obrázek 25: Screenshot analýzy videa v DFS [Vlastní]

Pro účely práce se však služba DFS ukázala jako nevhodná. DFS pro správné fungování vyžaduje videozáznam z co možná nejvyššího bodu, a to ideálně v půdorysném průmětu, při zachování vysokého rozlišení. Příliš ostrý úhel našeho videa však způsobil, že služba nebyla schopna od sebe rozlišit jednotlivé chodce v davu. Také při snaze měřit průběžné rychlosti DFS selhalo: DFS přiřazuje chodcům referenční bod v úrovni pasu. Ten se v případě pohledu z ptačí perspektivy promítne do místa, kde se chodec aktuálně nachází. Při pohledu z boku je však referenční bod chodce promítnut do místa i několik desítek metrů vzdáleného a přiřazená souřadnice je tak zcela chybná, stejně jako naměřené rychlosti. Pro účely práce tedy muselo být video analyzováno ručně. DFS však bylo využito při analýze trajektorií a validaci modelu popsaných v dalších kapitolách

## 6.2 Rozložení populace

Analýza úseku videa potvrdila předpokládané rozložení populace. Většinu chodců tvoří děti (žáci a studenti) a ženy (studentky gymnázií, miminky a učitelky). Mužů je na záznamu méně, přičemž většinu z nich tvoří studenti gymnázií:

*Muži: 20      Ženy: 36      Děti: 61      Celkem: 117*

Jedná se pouze o chodce, kteří se vyskytli v měřeném úseku videa. Skutečný počet chodců pohybující se v daný čas po náměstí lze předpokládat o něco vyšší.

## 6.3 Trajektorie a rychlosti

### 6.3.1 Trajektorie pohybu chodců

Dále je možné na základě videa určit trajektorie chodců. Pro přehledné grafické znázornění si tyto trajektorie rozdělíme do dvou skupin. První a významnější je skupina chodců, kteří vystupují z tramvaje. Jedná se většinou o žáky a studenty a trajektorie jejich pohybu budou tedy směřovat ke školám (viz Obrázek A 5 v příloze). Proto není problém trajektorie odhadnout i mimo záběr kamery. Rozložení chodců v této skupině zobrazuje Tabulka 4. Druhou skupinou je ostatní pohyb chodců na náměstí (viz Obrázek A 6 v příloze). Jedná se především o lidi, kteří se scházejí na zastávku nástupní a o žáky a studenty z řad obyvatel čtvrti. Zde již není, vzhledem k velkému počtu variant, možné určit trajektorie i mimo záběr kamery. Rozložení chodců v této skupině zobrazuje Tabulka 5.

Trajektorie od tramvaje					
č.	pracovní název	Chodci	M	Ž	D
1	Přes trávu k přechodu	16		1	15
2	Přes trávu k ZŠ	13	1	3	9
3	Středem k ZŠ	20	2	6	12
4	Středem k CGy	22	6	11	5
5	Spodem k CGy	10		6	4
6	Zadem k ZŠ	2			2
7	Zadem k CGy	1	1		
8	Zadem na Údolní	1		1	
9	Kravák před auty	2	1	1	
10	Kravák za auty	1	1		
<b>Celkem:</b>		<b>88</b>	<b>12</b>	<b>29</b>	<b>47</b>

Tabulka 4: Rozložení chodců jdoucích od tramvaje [Vlastní]

Trajektorie ostatní					
č.	pracovní název	Chodci	M	Ž	D
1	Kostel k ZŠ	3	1	1	1
2	Kostel ke Kraváku	1	1		
3	Od přechodu k zastávce	6	2	2	2
4	Od ZŠ k zastávce	4		3	1
5	Od obchodu k zastávce	1		1	
6	Od obchodu na Údolní	2	1		1
7	Z Údolní k ZŠ	2			2
8	Z Údolní na roh	7			7
9	Na zastávce	3			
<b>Celkem:</b>		<b>29</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>14</b>

Tabulka 5: Rozložení ostatních chodců [Vlastní]

### 6.3.2 Rychlost

Pro určení rychlosti chodců byl zvolen následující postup: Z videa bylo náhodně vybráno 20 chodců. Dobře určitelné úseky trajektorie jejich pohybu byly, co možná nejpřesněji, přeneseny do georeferencovaného výkresu v prostředí AutoCADu (viz Obrázek A 7 v příloze). Zde byly změřeny jejich délky. Časy, za které chodci tyto vzdálenosti urazily, byly změřeny z videa. Rychlost byla následně vypočtena jako podíl dráhy a doby chůze. Celou statistiku zachycuje Tabulka B 1 v příloze.

Ze statistiky můžeme určit hodnoty 5% a 95% percentilu, které v modelu využijeme jako hodnoty minima (Min) a maxima (Max). Dále stanovíme medián (M) a směrodatnou odchylku (SO). Těmito hodnotami je řízeno normální rozdělení rychlosti agentů v modelu:

$$\text{Min.} = 1,14 \quad \text{Max.} = 1,64 \quad \text{M} = 1,38 \quad \text{SO} = 0,20$$

Typickým příkladem „goal oriented“ chůze je přecházení na přechodu. Pro porovnání jsou uvedeny výsledky Studie analyzující přecházející rychlosti 673 chodců v Sydney. V případě chodců, kteří stihli přejít na zelenou bylo rozdělení následující:

$$\text{Min.} = 1,22 \quad \text{Max.} = 1,75 \quad \text{M} = 1,50 \quad \text{SO} = 0,26$$

Pokud však bylo přecházení zahájeno při zelené a dokončeně během červené, rozdělení v části, kdy šel chodec na zelenou je velmi blízké hodnotám naměřeným na náměstí Míru:

$$\text{Min.} = 0,95 \quad \text{Max.} = 1,80 \quad \text{M} = 1,38 \quad \text{SO} = 0,41$$

## 7 MODEL A – SOUČASNÝ STAV

Samotné posouzení kvality pěší dopravy na náměstí Míru bude provedeno formou numerické simulace v prostředí programu Pathfinder. Model simulace byl kalibrován pro účely stanovení hodnot LoS („Level of Service“), doby obsazenosti a plynulosti pohybu. A to na části náměstí Míru zachycené videem v době ranní špičky ve všední den. Vzhledem k velkému měřítku a požadavku na realistický pohyb agentů byl použit režim „steering“.

### 7.1 Vstupní data

#### 7.1.1 Geometrie

Geometrie modelu byla vytvořena na základě mapového podkladu, všechny rozměry tak věrně reflektují realitu. Jsou zde vymezeny plochy, po nichž se agenti mohou pohybovat. Dále pevné objekty, které v pohybu brání (budovy, zábradlí, vozidla atd.) a výškové rozdíly (výšky obrubníků, schody), viz Obrázek 26.

Přechod od výstupní tramvajové zastávky je řešen formou dveří, které se otevírají a zavírají na základě zadaných intervalů. Intervaly byly nastaveny tak, aby odpovídaly přecházení chodců na videu.



Obrázek 26: Geometrie náměstí Míru v programu Pathfinder [Vlastní]



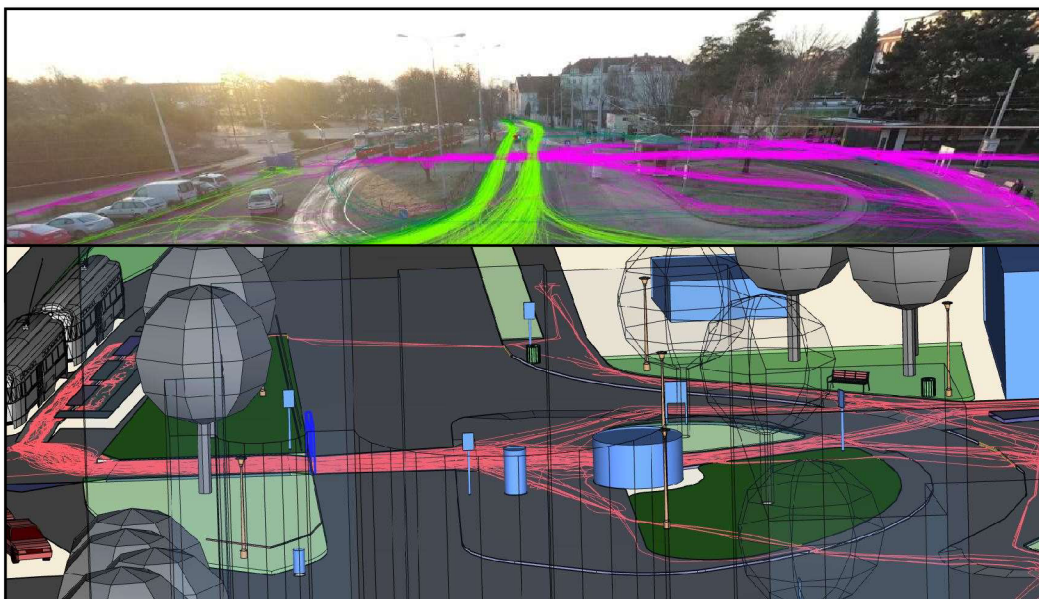
## 7.1.2 Populace

Do geometrie bylo vloženo celkem 117 agentů. Ti byli rozmístěných do výchozích pozic, a to dle jejich ekvivalentních chodců, konkrétně místa, kde se chodci na počátku videozáznamu nacházeli či kde do záběru kamery poprvé vstoupili.

Každému agentu byl přidělen profil muž, žena či dítě na základě tabulek (viz Tabulka 5 a Tabulka 4). Každý profil je specifický zadanými rozměry agentů. Ty jsou definovány šířkou v ramenech. Pro konkrétní hodnoty posloužila tato publikace [13]. Všem profilům byla nastavena stejná rychlost, hodnoty dle vlastního měření.

Dále bylo každému agentu přiděleno určité chování formou cílů, kterých má agent dosáhnout, opět přesně na základě videa. Přesné trajektorie zadány nebyly, místo toho byly kalibrovány některé detaily geometrie a rozmístění agentů tak, aby se výsledné trajektorie co nejvíce blížily trajektoriím zachyceným na videu. Trajektorie z videozáznamu byly vykresleny pomocí služby DFS. Jasně zelené trajektorie vykreslují trajektorie automobilové dopravy. Pro naše účely tyto zanedbáváme a budeme se soustředit na trajektorie fialové, které vykreslují pohyb chodců. Výsledné porovnání trajektorií zobrazuje Obrázek 27.

Validaci modelu ověřil vedoucí práce nezávisle na autorovi.



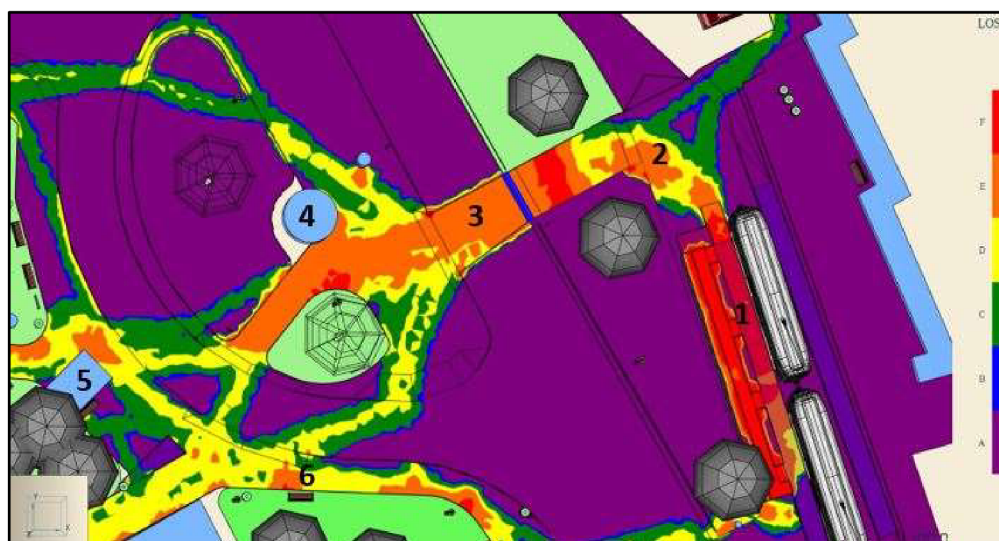
Obrázek 27: Porovnání trajektorií z DFS (nahore) s trajektoriemi ze simulace (dole) [Vlastní]

## 7.2 Výstupy simulace a vyhodnocení

### 7.2.1 Úroveň kvality pěší dopravy

Obrázek 28 zobrazuje hodnoty hustoty proudu chodců, které jsou reprezentovány barevnou škálou dle úrovně Level of service (dále jen LoS). Jedná se o maximální hodnotu, která se v daném bodě za celý průběh simulace vyskytla. Kritické hodnoty hustoty, tedy LoS F, můžeme pozorovat zejména u výstupní zastávky a plochy před přechodem. V obou těchto místech je šířka chodníku v současném stavu nedostatečná. Červené hodnoty LoS F můžeme pozorovat také na dělicím ostrůvku, kde plocha zeleně zasahuje do přirozené trajektorie chodců.

Vysokých hodnot LoS E je dosahováno na rozptylové ploše mezi zastávkou a přechodem, kde opět roh zeleně zasahuje do trajektorie chodců. Dále pak na přechodu a celém dělicím ostrůvku, kde je šířka chodníku nedostatečná. Chodník vedoucí přes dělicí ostrůvek navíc nerespektuje přirozené trajektorie chodců, ty jsou často lomené či vedou přes plochy zeleně. Posledním bodem nežádoucích vysokých hodnot LoS je místo, kde do trasy chodců zasahuje roh boudy DPMB.



Obrázek 28: Úroveň kvality pěší dopravy náměstí Míru

1. výstupní plocha, 2. rozptylová plocha, 3. přechod, 4. trafika, 5. objekt DPMB, 6. nástupní zastávka [Vlastní]

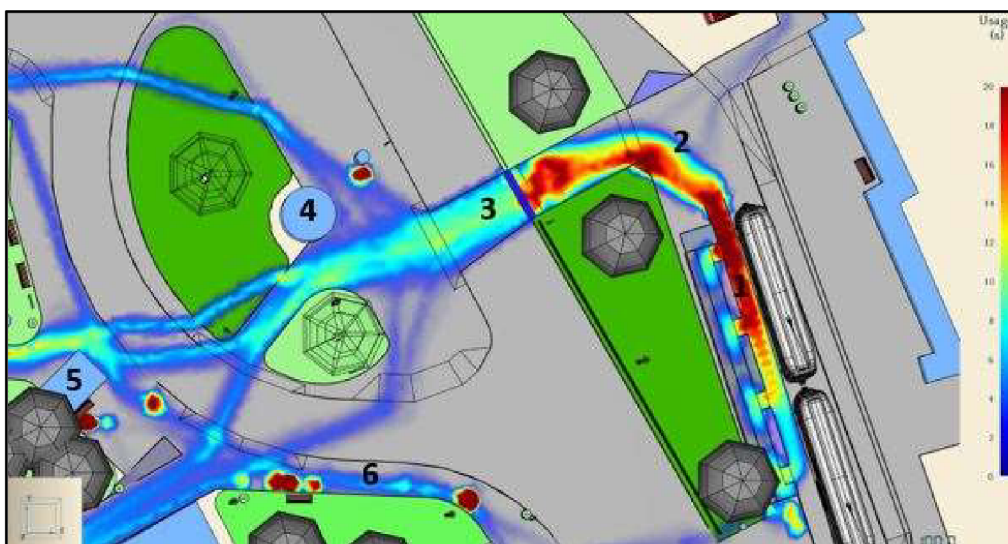
Vysokých hodnot je dosahováno také na zastávce nástupní, zde však chodci nejsou v pohybu, proto nejsou hodnoty problematické. Ve zbytku sledovaného výřezu dosahuje LoS hodnot D a C, které jsou pro pěší dopravu ve městě vhodné.

## 7.2.2 Doba obsazenosti

Doba obsazenosti (anglicky „usage“) vyjadřuje, kumulovanou dobu, po kterou chodci pobývali v daném bodě. Barevná škála pro tuto analýzu byla nastavena v rozsahu 0–20 s.

Ojedinelé červené fleky můžeme zanedbat, jedná se o místa, kde chodci z vlastní vůle čekají. Relevantní kritické hodnoty doby zdržení můžeme pozorovat u výstupní zastávky a trase chodníku vedoucí k přechodu. Opět v těchto místech můžeme konstatovat nedostatečnou šířku zastávky a nevhodné směrové vedení chodníku. Před samotným přechodem je vysoká hodnota doby obsazenosti způsobena dáváním přednosti projíždějícím vozidlům.

Ve zbytku lokality se hodnoty doby obsazenosti pohybují v rozumných mezích a pohyb je tedy pravděpodobně poměrně plynulý.



Obrázek 29: Doba obsazenosti náměstí Míru

1. výstupní plocha, 2. rozptylová plocha, 3. přechod, 4. trafika, 5. objekt DPMB, 6. nástupní zastávka [Vlastní]

## 7.2.3 Plynulost pohybu

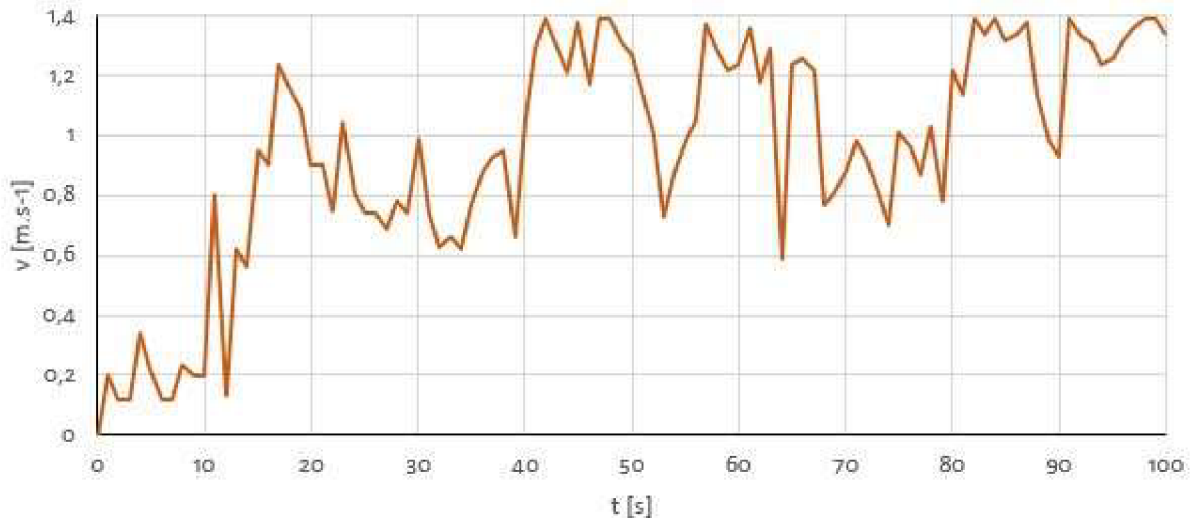
Pro určení plynulosti pohybu byla z programu Pathfinder exportována CSV data průběhu pohybu jednoho z chodců a z nich následně vytvořen graf závislosti rychlosti chůze na čase (viz Obrázek 30). Konkrétně se jedná o agenta profilu „dítě“, který se pohybuje z výstupní zastávky tramvaje směrem k CMcZŠ. Rychlost pohybu tohoto agenta je  $1,39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a vzhledem k počáteční poloze v zadní části tramvaje se agent pohybuje v zadní části dopravního proudu.

Z grafu můžeme vyčíst významné omezení rychlosti chůze při výstupu z tramvaje. Dále pak hodnoty rychlosti oscilují mezi maximální a přibližně poloviční



rychlostí chůze našeho chodce. Po většinu průběhu pohybu je rychlost chodce poměrně výrazně omezena, což opět indikuje nedostatečnou šířku chodníků.

Jedná se však pouze o alternativní metriku, která může poskytnou představu o průběhu pěšího pohybu. Pro její plnohodnotné nasazení by však bylo nutné grafické výsledky experimentálně ověřit a následně metodu aplikovat ve větším rozsahu co do počtu posuzovaných agentů.



Obrázek 30: Průběh rychlosti chůze typického chodce [Vlastní]

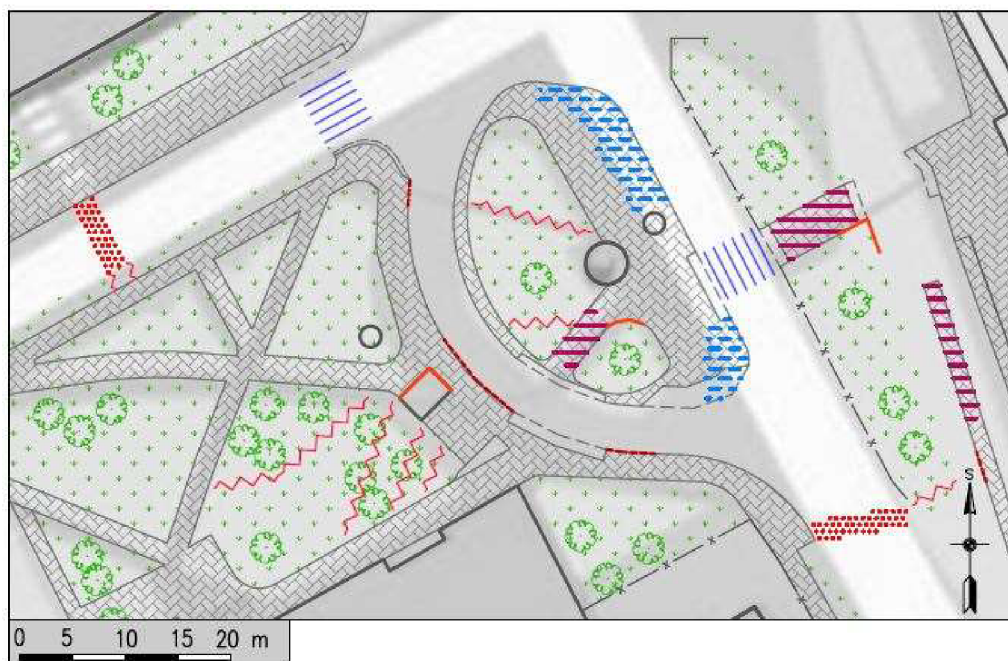
### 7.3 Vyhodnocení

Konkrétní výstupy analýzy pěšího pohybu na náměstí Míru zobrazuje Obrázek 31. Analýza poukázala na dva základní nedostatky prostoru.







Prvním z nich je, že současný stav náměstí příliš nerespektuje přirozené trajektorie chodců. To je možné doložit častou chůzí chodců přes plochy zeleně a vysoké obrubníky. Byla také identifikována dvě místa, kde pravidelně dochází k přecházení pozemní komunikace mimo přechod. První z nich se nachází před vchodem vysokoškolských kolejí, druhé pak mezi výstupní a nástupní zastávkou při ústí ulice Údolní. V návrhu budoucí podoby náměstí by bylo vhodné více zohlednit přirozené trajektorie chodců a doplnění přechodů či míst pro přecházení ve zmiňovaných místech.

Druhým nedostatkem je nedostatečná šířka chodníků na hlavní trase špičky. Současná šířka výstupní zastávky (1,5 m) je pro výstup lidí z plně obsazené tramvaje nedostačující, chybí zde potřebný rozptylový prostor. Nedostatečná je také šířka prostoru před přechodem (4,2 m) a šířka chodníku protínajícího ostrůvek (2,5 m). V návrhu budoucí podoby se doporučuje navrhnout větší šířky chodníků na této trase, které umožní nižší hustotu dopravního proudu chodců.

Jistý potenciál skýtají poměrně velké plochy na dělicím ostrůvku, které leží mimo trasy chodců a jsou tak ve stávajícím stavu zcela nevyužité. Tyto plochy by bylo vhodné redukovat například ve prospěch ploch zeleně.



#### Legenda

	Nedostatečná šířka chodníku		Překážky v chůzi		Nevyužitá plocha
	Přecházení mimo přechod		Chůze přes vysoký obrubník		Chůze přes zeď

Obrázek 31: Vyhodnocení analýzy kvality pěšího pohybu na náměstí Míru [Vlastní]

## 8 MODEL B – NÁVRH DOPRAVNÍHO ŘEŠENÍ

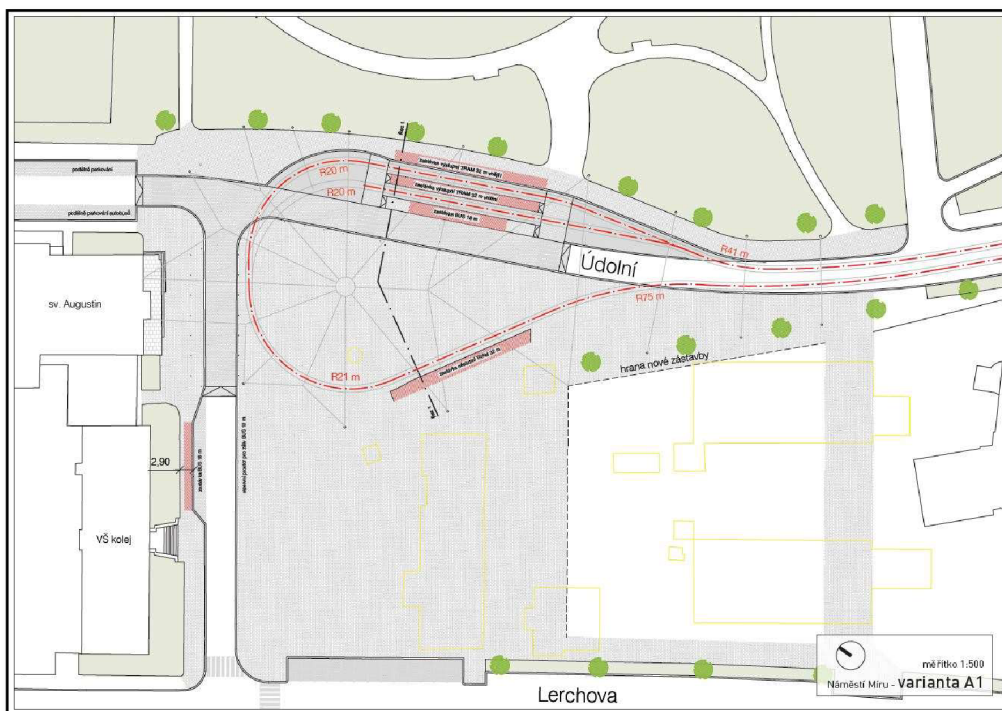
### 8.1 Základní zhodnocení návrhu

Návrh dopravního řešení náměstí (viz Obrázek 32) byl pro účely práce poskytnut Kanceláří architekta města Brna. Nejedná se o komplexní architektonický návrh, nýbrž pouze o podklad do připravované architektonické soutěže. Ve výkresu je především vyznačeno řešené území, nová poloha tramvajové smyčky a zastávek MHD a poloha pozemních komunikací.

Nový návrh řeší řadu nedostatků zjištěných u stávajícího stavu náměstí. Nepřehledná křižovatka byla narovnána a plochy sloužící silniční dopravě díky tomu značně redukovány. Vozovka je v klíčové části náměstí vyvýšená, což pravděpodobně vyloučí chůzi přes vysoké obrubníky a napomůže zklidnění dopravy. Konkrétní výškové řešení však pro účely práce není k dispozici.

Návrh dále významně rozšiřuje plochu náměstí na úkor bývalého vojenského areálu. Vznikne tak dostatečný prostor pro umístění prvků vybízejících k zastavení.





Obrázek 32: Návrh dopravního řešení náměstí Míru [KAM]

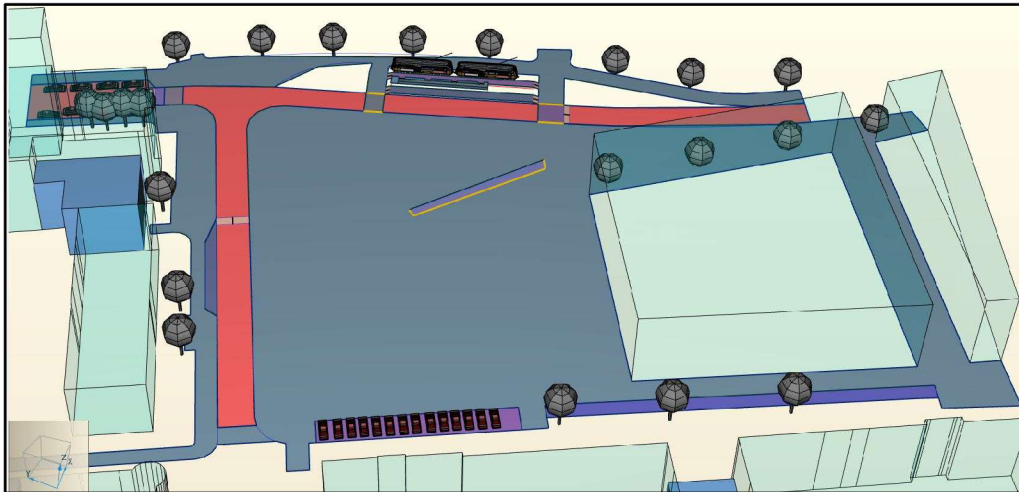
V místech současného vojenského areálu je navržena nová zástavba. Ta bude pravděpodobně vyšší než současná samoobsluha a veřejný prostor tak díky pocitové kompaktnosti získá charakter náměstí. Také by dle návrhu měl vzniknout koridor propojující ulice Údolní a Lerchova. Ten napomůže lepšímu zpřístupnění gymnázia CMG a parku Kraví hora.

## 8.2 Vstupní data

Výkres dopravního řešení náměstí Míru neobsahuje konkrétní řešení tras pro pěší, vyjma umístění zastávek MHD a přechodů. Model bude proto vytvořen za účelem ověření polohy zastávek a přechodů a návržení základních pěších tras pro ranní špičku včetně šířkových dimenzí.

### 8.2.1 Geometrie

Geometrie pro návrhový model byla vytvořena čistě na základě mapových podkladů a výkresu dopravního řešení (viz Obrázek 32). Autor do návrhu nijak nezasahoval. Intervaly otevření přechodů byly převzaty z modelu stávajícího stavu a odpovídají tedy ranní špičce. Geometrii pro návrhový model zachycuje Obrázek 33.



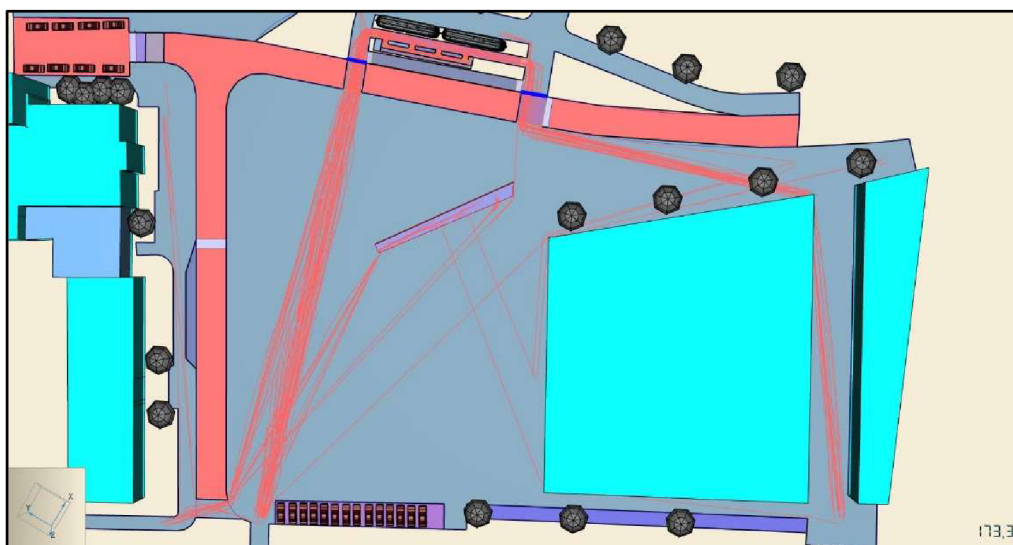
Obrázek 33: Geometrie návrhového modelu [Vlastní]

## 8.2.2 Populace

Rozložení populace a rychlostí vychází z modelu stávajícího stavu (viz 7.1 Vstupní data). Bylo pouze odebráno několik agentů, jimž v návrhové situaci nelze jednoznačně určit počáteční bod ani cíl pohybu. Počáteční rozmístění agentů bylo pozměněno, tak aby odpovídalo novému návrhu, tedy například přesun z původní polohy zastávky na návrhovou polohu zastávky. Finální cíle pěšího pohybu agentů zůstaly stejné, nicméně všechny průběžné cíle reflektující individuální chování chodců byly odstraněny.

## 8.3 Výstupy simulace

### 8.3.1 Trajektorie



Obrázek 34: Trajektorie pohybu chodců v návrhovém modelu [Vlastní]

Analýza trajektorií pohybu agentů po návrhové ploše viz Obrázek 34 poukázala na určité skutečnosti návrhového modelu. Přidání druhého přechodu k výstupní zastávce napomáhá vhodně rozložit dopravní proud, oba přechody jsou hojně využity. Nově navržený přechod respektuje trasu studentů gymnázia CGM. Ti, za předpokladu, že volí nejkratší trasu ke škole, dále pokračují na ulici Údolní a novým průchodem v zastávbě ke gymnáziu CGM. Přirozená šířka tohoto dopravního proudu je přibližně 3 m. Za povšimnutí stojí, že přechod v původní poloze je využit v celé šíři a přechod nově navržený je využit přibližně z poloviny. Tzn. nově navržený přechod je pro potřeby ranní špičky šířkově naddimenzován.

Dalším poznatkem je, že přechod vedoucí k ZŠ Míru na druhé straně náměstí příliš nerespektuje přirozenou trajektorii chodců, kteří se tímto směrem pohybují. Vzhledem k faktu, že ani předchozí analýzy nenaznačili potřebu přechodu v místě daném návrhem, doporučuje se posunutí přechodu do polohy zmiňované v analýze současného stavu. Tedy umístění přechodu ke vchodu vysokoškolských kolejí. Přirozená šířka proudu pohybujícího se k této ZŠ je 2 m.

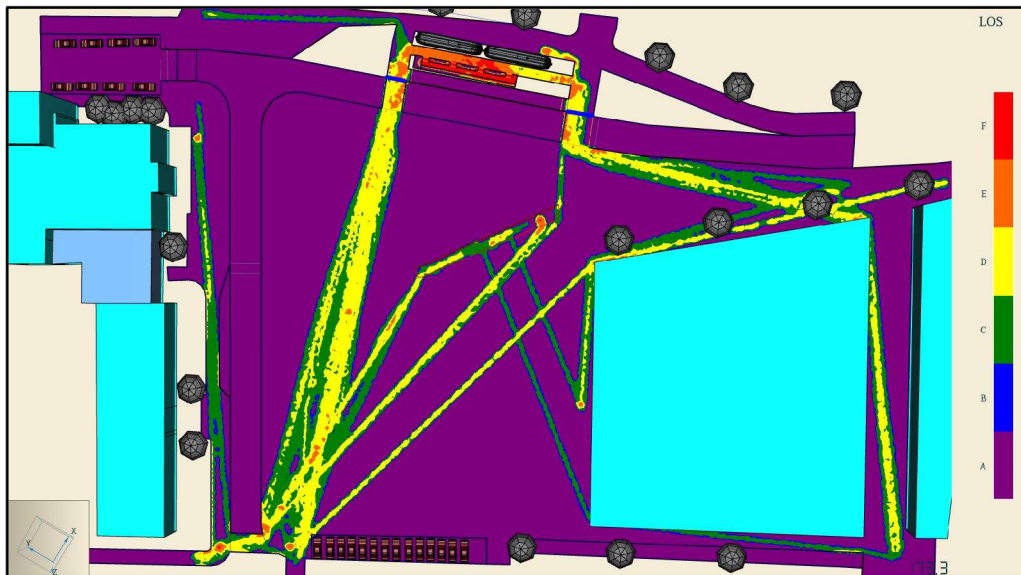
Třetím významným proudem je směr k CMcZŠ. Zde je průběh trasy zcela jednoznačný a v konkrétních návrzích by měl být silně respektován. Přirozená šířka dopravního proudu je zde přibližně 3,5 m.

### **8.3.2 Úroveň kvality pěší dopravy**

Z analýzy úrovně kvality pěší dopravy (viz Obrázek 35) vyplývá, že návrh nového dopravního řešení může úspěšně vyřešit problémy týkající se kritických hustot dopravního proudu. Kritických hodnot LoS F je v návrhu dosahováno pouze ve střední části výstupní zastávky. Návrhová šířka výstupního prostoru je v tomto místě 2 m. Rozšíření výstupního prostoru o 0,5 m na 2,5 m celkem by snížilo hodnotu LoS po celé ploše nástupiště na úroveň E.

Vysokých hodnot LoS E je dosahováno i na rozptylové ploše před přechodem (původním). Zde by tedy bylo vhodné rozšířit chodník z navrhovaných 4 m na 5 m.

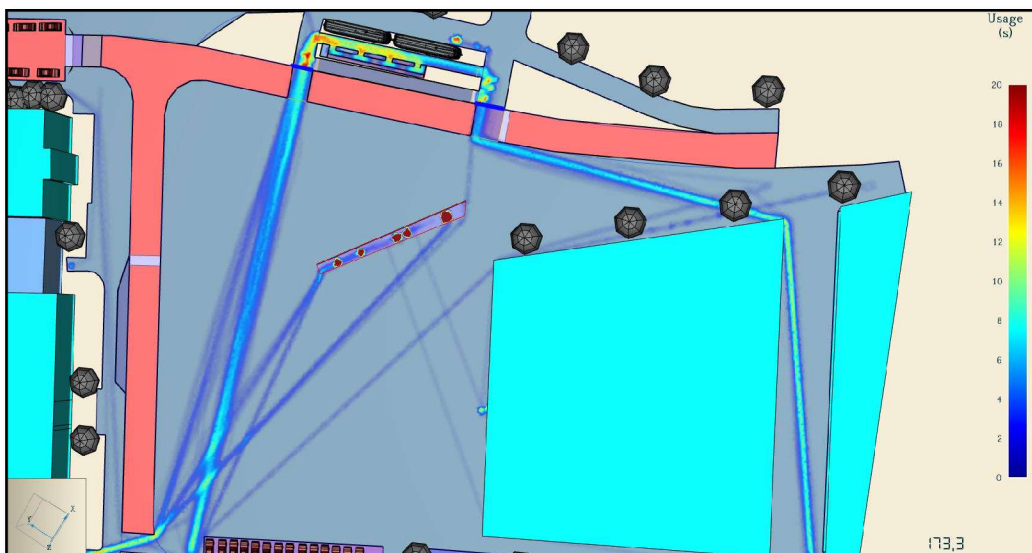
Naproti tomu nově navržený přechod není zdaleka kapacitně naplněn, zde by bylo možné rozptylovou plochu i přechod zúžit z návrhových 5,5 m na 4 m při zachování stejné úrovně LoS.



Obrázek 35: Úroveň kvality pěší dopravy návrhového modelu [Vlastní]

### 8.3.3 Doba obsazenosti

Barevná stupnice pro analýzu doby obsazenosti (viz Obrázek 36) byla opět nastavena v rozsahu 0-20 s. Za kritické hodnoty jsou tedy považovány místa, kde se doba obsazenosti blíží či přesahuje 20 s. Hodnoty doby obsazenosti jsou však vzhledem k nijak neřízenému pohybu agentů na většině modelové plochy příznivé. Kritické hodnoty na zastávce nástupní můžeme zanedbat, jedná se o očekávaný výsledek, který není možné ovlivnit.



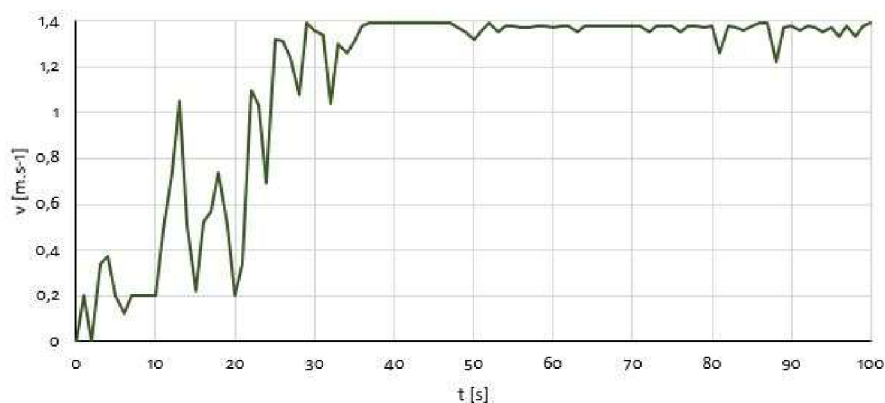
Obrázek 36: Doba obsazenosti náměstí Míru [Vlastní]

Za pozornost však stojí návrh výstupní zastávky a přilehlých tras. Kritických hodnot obsazenosti zde dosahuje prostor před přechodem ve stávající poloze. I zde je možné vysoké hodnoty očekávat, nicméně rozšíření profilu by mohlo charakteristiku snížit. Hodnoty samotného výstupního prostoru jsou v celku

příznivé. Jako problematická se jeví rampa vedoucí na rozptylovou plochu před přechodem ve stávající poloze. I zde je dosahováno vysokých hodnot doby obsazenosti a rozšíření profilu je tak na místě.

Naopak prostor přechodu nově navrženého i z této analýzy vychází jako využit méně než z poloviny a doby obsazenosti jsou zde velmi příznivé. Šířku přechodu a přilehlé rozptylové plochy je tedy možné snížit.

### 8.3.4 Plynulost pohybu



Obrázek 37: Průběh rychlosti chůze typického chodce [Vlastní]

Obrázek 37 zachycuje průběh rychlosti chůze v závislosti na čase typického chodce. Jedná se o toho samého, jako v analýze současného stavu. Porovnáním grafů zjistíme, že nový návrh výstupní zastávky je pro plynulost chůze příznivější. Chodec dosahuje při pohybu na zastávce vyšších rychlostí a díky tomu se také dříve dostává do míst, kde je jeho pohyb volnější. Rychlost chůze však stále v počátečních trajektorie významně kolísá.

## 8.4 Ověření navrhovaných změn

V modelu navrhovaných změn budou ověřeny následující parametry:

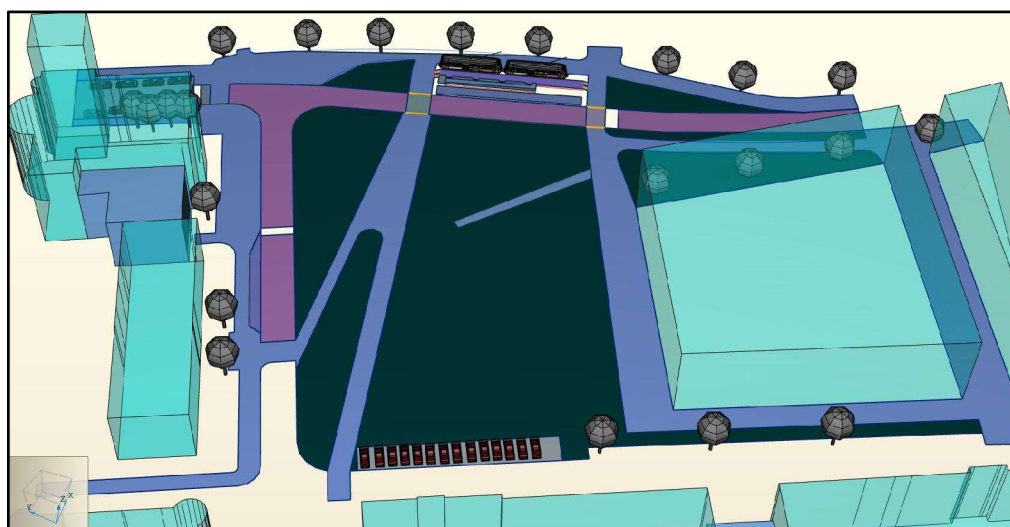
- rozšíření výstupní plochy na 2,5 m
- rozšíření stávajícího přechodu a prostoru před ním u výstupní zastávky na 5 m
- zúžení nového přechodu a prostoru před ním u výstupní zastávky na 4 m
- přesun přechodu vedoucímu k ZŠ Brno nám. Míru 3 do polohy před kolejemi
- šířka chodníku k ZŠ Míru 3 2 m
- šířka chodníku k CMcZŠ 3,5 m
- šířka chodníku k CMG 3 m



## 8.4.1 Vstupní data

### Geometrie

Geometrie ověřovacího modelu (viz Obrázek 38) vychází z původního návrhu a byla pozměněna dle ověřovaných parametrů. Trasy chodníků respektují trajektorie zjištěné v předchozí simulaci. Méně významné trasy, které nejsou předmětem ověření byly zanedbány.



Obrázek 38: Geometrie navrhovaných změn [Vlastní]

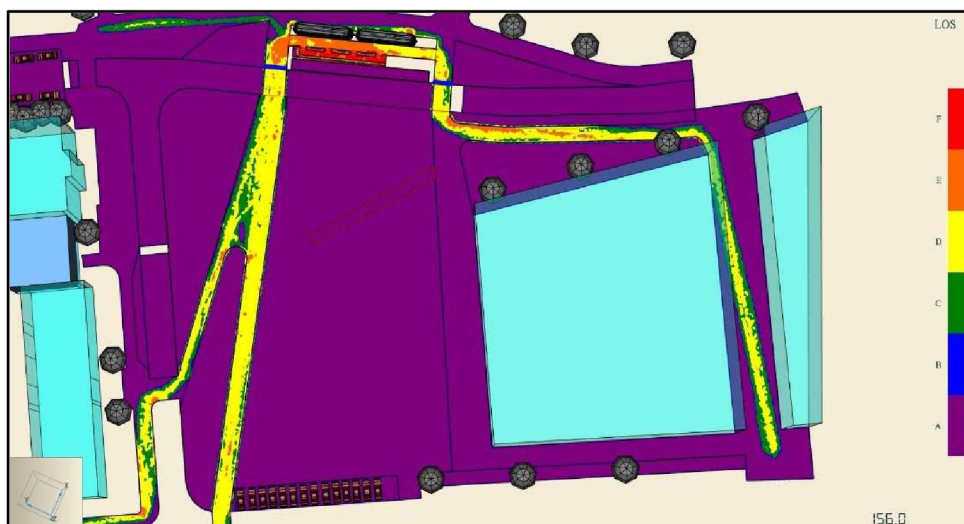
### Populace

Populace modelu taktéž vychází z předchozích simulací, počet agentů v modelu byl však omezen na ty, kteří se pohybují po ověřovaných trajektoriích. Rozmístění agentů zůstává stejné jako v předchozím modelu a stejně tak chování a základní charakteristiky agentů.

## 8.4.2 Výstupy simulace

### Úroveň kvality pěší dopravy

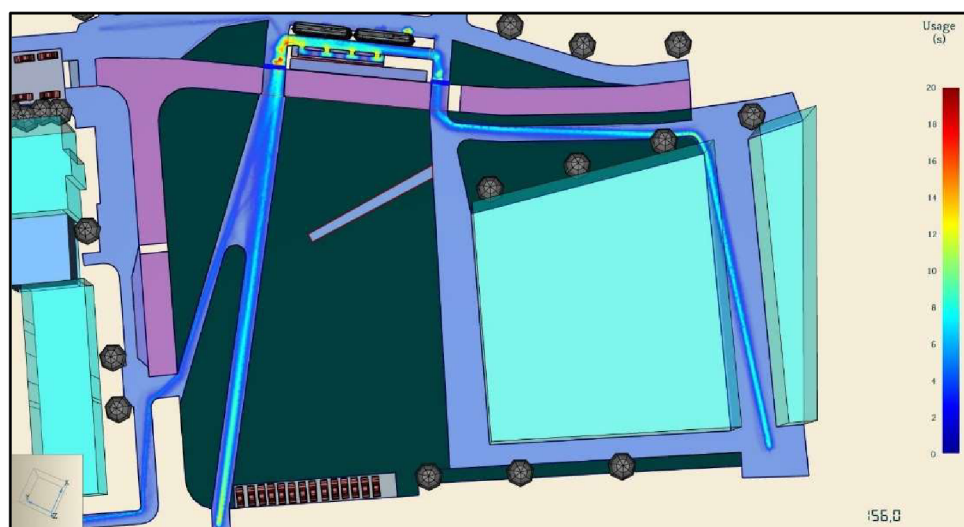
Z analýzy úrovně kvality pěší dopravy (viz Obrázek 39) vyplývá, že rozšíření výstupního prostoru povede k eliminaci kritických hodnot LoS F v této části návrhu. Změny v dimenzích přechodů napomáhají jejich optimálnímu využití. Navržené šířky a směrová řešení tří základních tras zachovávají hodnoty LoS převážně mezi C a D, návrh tedy lze považovat za vhodný. Přesun přechodu na trase k ZŠ Míru do polohy před vysokoškolské koleje vede k přímější trajektorii dopravního proudu.



Obrázek 39: Úroveň kvality pěší dopravy navrhovaných změn [Vlastní]

### 8.4.3 Doba obsazení

Analýza doby obsazenosti (viz Obrázek 40) prokázala, že k vyšším časům zdržení dochází pouze před přechody, kde se však ty hodnoty dají očekávat a jsou odůvodněné. V ostatních místech navržených tras již probíhá pohyb plynule.



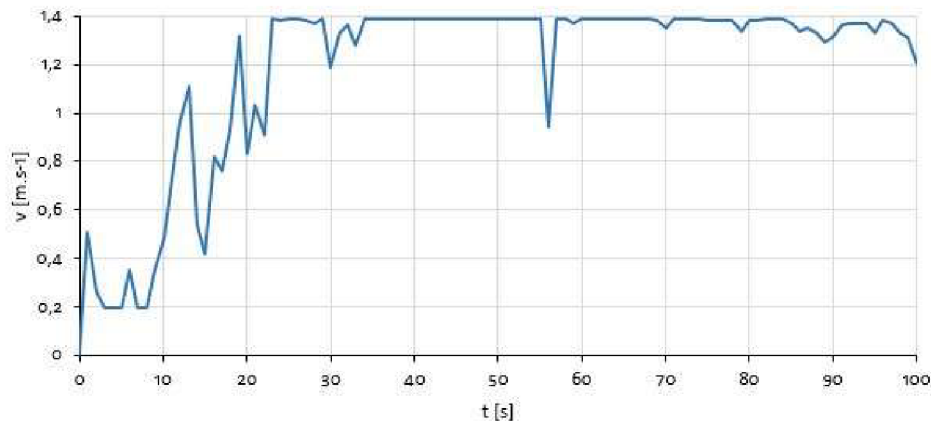
Obrázek 40: Analýza doby obsazení navrhovaných změn návrhu [Vlastní]

### Plynulost pohybu

Porovnání průběhu rychlosti chůze námi sledovaného chodce (viz Obrázek 41) s grafy z předchozích modelů prokazuje, že zapracování doporučených změn do návrhu výrazně napomůže plynulosti chůze.

V první části průběhu, kdy se chodec pohybuje mezi tramvají a přechodem stále dochází k výraznému omezení pohybu. Nicméně volnost pohybu velice rychle roste a chodec tak tento prostor překoná výrazně rychleji, než tomu bylo v předchozích modelech. Od 22. vteřiny, kdy chodec přešel přechod již je rychlost chůze stabilní na

hodnotě odpovídající maximální rychlosti tohoto chodce, což prokazuje vhodně zvolenou šířku chodníku na této trase. Jediný významný výkyv, který můžeme v této části grafu pozorovat je způsoben náhodným zkřížením trajektorie s jiným chodcem.



Obrázek 41: Graf průběhu rychlosti typického chodce [Vlastní]

## 8.5 Vyhodnocení

Posuzovaný návrh dopravního řešení se příliš nezabývá otázkou pěší dopravy na náměstí a spíše stanovuje mantinely, v nichž se budoucí návrh tras pro pěší bude pohybovat. Návrh reflektuje většinu nedostatků zjištěných v analýze současného stavu. K pozitivním aspektům patří zejména:

- Využití potenciálu bývalého vojenského areálu.
- Zpřehlednění a narovnání křižovatky pozemních komunikací.
- Přidání druhého přechodu k výstupní zastávce tramvaje.
- Vytvoření dostatečného prostoru pro setkávání občanů a umístění prvků vybízejících k zastavení.

Jako slabé stránky návrhu pak byly identifikovány zejména:

- **Nedostatečné překlenutí pozemní komunikace před VŠ kolejemi a kostelem sv. Augustýna.**
- **Neuvážené dimenzování šířkových rozměrů navrhovaných dopravních ploch pro chodce.**

Na základě poznatků z numerické simulace pohybu chodců po náměstí v čase ranní špičky je možné doporučit konkrétní změny návrhu:

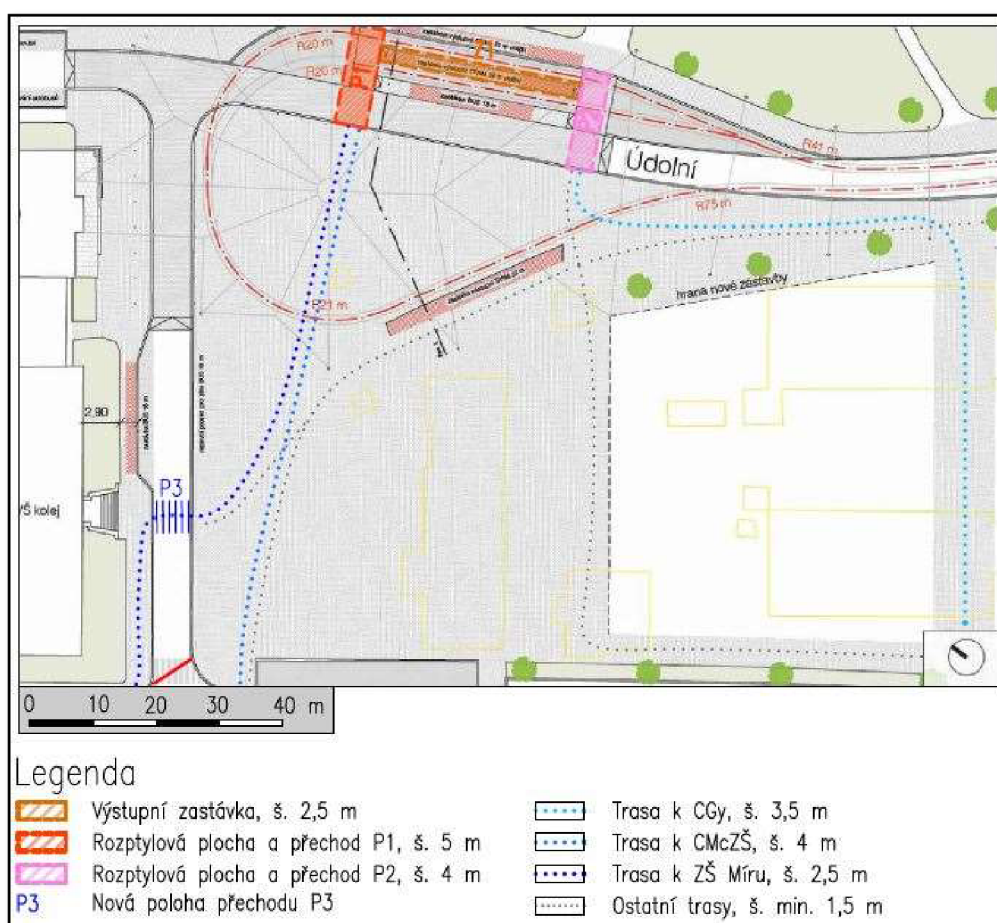
- Rozšíření vnitřní výstupní plochy tramvajové zastávky ze 2 m na 2,5 m.
- Rozšíření rozptylové plochy výstupní zastávky a přechodu ve stávající poloze ze 4 m na 5 m.
- Zúžení rozptylové plochy výstupní zastávky a přechodu v nové poleze ze 6 m na 4 m.
- Přesun přechodu na trase k ZŠ Míru do polohy před VŠ koleje.

Dále je možné na základě provedených simulací doporučit respektování určitých tras pro pěší a dodržení jejich minimálních šířkových rozměrů:

- Trasa od výstupní zastávky tramvaje k ZŠ Míru.
- Trasa od výstupní zastávky tramvaje k CMcZŠ.
- Trasa od výstupní zastávky tramvaje ke gymnáziu CMG.
- Ostatní trasy zjištěné v čase ranní špičky.

Všechna doporučení zobrazuje Obrázek 42. Při jejich zapracování do návrhu je důležité mít na paměti, že doporučení vznikla na základě analýzy ranní dopravní špičky. V návrhu je nutné zohlednit i zbylé dvě špičky, tedy špičku odpolední ve všední dny a špičku víkendovou související s kostelem sv. Augustýna. V případě víkendové špičky je na místě zejména otázka umístění přechodu či místa pro přecházení před vchod kostela.

Trasy pro pěší dopravu byly navrženy zejména na základě praktičnosti. V případě jejich zapracování do návrhu je tak důležité doplnit zejména dlouhé přímé úseky zelení, mobiliárem, stánky či jinými zajímavými prvky tak, aby byla zajištěna dostatečná atraktivita těchto tras.



Obrázek 42: Doporučené změny a doplnění návrhu dopravního řešení [Vlastní]

## 9 ZÁVĚR

V dnešní době již můžeme konstatovat, že klíčem ke spokojenému životu obyvatel města je lidské měřítko a městská doprava těžící z krátkých vzdáleností. Městská doprava by měla člověku nabízet širokou paletu dopravních prostředků. Dopravní prostor města je zatráktivňován tak, aby vybízel i k cyklistické dopravě či chůzi. Chůze samotná přitom v moderním městě slouží nejen jako dopravní prostředek, ale také k množství venkovních aktivit.

Architekti veřejných prostor jsou často při své práci odkázáni na osobní zkušenosti a všeobecné zásady navrhování. Jakékoliv získání relevantních dat o populaci či chování chodců v řešeném území je přinejlepším komplikované. Cílem bakalářské práce tedy bylo prozkoumat možnosti využití moderních technologií v procesu navrhování veřejných prostranství, a to zejména numerického modelování pohybu osob.

Pro účely praktické části práce byla vybrána lokalita náměstí Míru v Brně, jehož budoucí podoba je předmětem diskuze laické i odborné veřejnosti. Pohyb osob na náměstí byl v bakalářské práci důkladně zanalyzován, a to zejména díky videozáznamu ranní špičky na náměstí. Na základě analýz byl vytvořen numerický model. Ten odhalil konkrétní pro chodce problematická místa.

V druhé části autor práce ověřoval připravovaný návrh dopravního řešení náměstí Míru. Díky numerickému modelu pohybu osob byly identifikovány nedostatky návrhu a doporučeny změny návrhu respektující pohyb chodců.

Numerické modelování pohybu osob nenahradí kvalifikovanou práci architektů či dopravních inženýrů. Bakalářská práce však prokázala, že má potenciál stát se cenným a praktickým nástrojem pro pořizování vstupních analýz a ověřování konkrétních návrhů. Modelování pohybu osob tak může výrazně zefektivnit celý proces.



## Bibliografie

- [1] *World Urbanization Prospect 2018* [online]. New York: United Nations, 2018 [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://population.un.org/wup/>
- [2] *Český statistický úřad* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/>
- [3] *Město pro pěší: strategie rozvoje pěší dopravy*. Vyd. 1. Praha: Oživení, 2008. ISBN isbn978-80-254-1391-3.
- [4] Comprehensive Transport Planning Framework. *Victoria Policy Transport Institute* [online]. Victoria: Victoria Policy Transport Institute, 2012 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://www.vtpi.org/comprehensive.pdf>
- [5] GEHL, Jan. *Města pro lidi*. 1. Brno: Partnerství, 2012. ISBN 978-80-260-2080-6.
- [6] GLOBAL ROADMAP OF ACTION Toward Sustainable Mobility. *The World Bank* [online]. Washington: World Bank, 2019 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <http://pubdocs.worldbank.org/en/585041571411007093/Universal-Urban-Access-Global-Roadmap-of-Action.pdf>
- [7] Los angeles traffic. In: *Traveldailymedia.com* [online]. Travel Daily, 2018 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.traveldailymedia.com/assets/2018/12/los-angeles-traffic-750x430.jpg>
- [8] Canberra Transport Photo. In: <https://www.cyclingpromotion.org/> [online]. Canberra: We Ride Australia, 2017 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: [https://static.wixstatic.com/media/27b1f8\\_d5443c59ad214574ac1a4f89af965dd2~mv2\\_d\\_2400\\_1271\\_s\\_2.jpg/v1/fill/w\\_600,h\\_318,al\\_c,q\\_80,usm\\_o.66\\_1.00\\_o.01/27b1f8\\_d5443c59ad214574ac1a4f89af965dd2~mv2\\_d\\_2400\\_1271\\_s\\_2.webp](https://static.wixstatic.com/media/27b1f8_d5443c59ad214574ac1a4f89af965dd2~mv2_d_2400_1271_s_2.jpg/v1/fill/w_600,h_318,al_c,q_80,usm_o.66_1.00_o.01/27b1f8_d5443c59ad214574ac1a4f89af965dd2~mv2_d_2400_1271_s_2.webp)
- [9] Another reconstructed city centre street in Utrecht. *BICYCLE DUTCH* [online]. 2018 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://bicycledutch.wordpress.com/2018/09/18/another-reconstructed-city-centre-street-in-utrecht/>
- [10] APELTAUER, Tomáš, Petr BENEŠ a Luděk VRÁNA. *Aplikace pokročilých metodů pohybu osob a dynamiky požáru pro bezpečnou evakuaci osob a analýzu rizik*. Brno, 2016.. Certifikovaná metodika č. CERO 1/2016. Vysoké učení technické v Brně.
- [11] FRUIN, John. *Pedestrian planning and design*. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.

- [12] STILL, G. *Introduction to crowd science*. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 9781466579644.
- [13] PHEASANT, Stephen a C. HASLEGRAVE. *Bodyspace: anthropometry, ergonomics, and the design of work*. 3rd ed. Boca raton: Taylor & Francis, 2006. ISBN 0415285208.
- [14] PROKEŠ, Stanislav. *Projektování místních komunikací: komentář k ČSN 73 6110 : komentované příklady řešení*. Praha: Český normalizační institut, 2007. Stavebnictví (komunikace, silnice). ISBN 978-80-7283-216-3.
- [15] Numerical Modeling. *ScienceDirect* [online]. Elsevier B.V., 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/numerical-modeling>
- [16] BANKS, Jerry. *Discrete-event system simulation*. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. ISBN 0136062121.
- [17] KORMANOVÁ, Anna. *A Review on Macroscopic Pedestrian Flow Modelling*. 2013.. University of Žilina.
- [18] JOHANSSON, Fredrik. *Microscopic Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic*. Norrköping, 2013.. Licentiate Thesis. Linköping University.
- [19] BOUZAT, Sebastián a Marcelo N KUPERMAN. Game theory in models of pedestrian room evacuation. *Physical Review E*. 2014, (), 13.
- [20] *Pathfinder* [online]. Manhattan, USA: Thunderhead Engineering Consultants, Inc. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder>
- [21] Urbanisation: characteristics, causes and effects. *World Cities* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://www.coolgeography.co.uk/A-level/AQA/Year%2013/World%20Cities/Urbanisation/Urbanisation.htm>
- [22] Macroscopic Models for Pedestrian Flows. *HAL-Inria* [online]. Venice, Italy: CCSD, 2010 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://hal.inria.fr/inria-00534882/document>
- [23] Crowd modeling and simulation technologies. *ResearchGate* [online]. 2010 [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/220136467\\_Crowd\\_modeling\\_and\\_simulation\\_technologies](https://www.researchgate.net/publication/220136467_Crowd_modeling_and_simulation_technologies)

## Seznam příloh

Obrázek A 1: Významné zdroje a cíle pěší dopravy a základní dopravní vztahy náměstí Míru [Vlastní] .....	52
Obrázek A 2: Analýza kvality pěších tras [Vlastní] .....	53
Obrázek A 3: Analýza kvality povrchů a výškových rozdílů pěších tras [Vlastní] .....	54
Obrázek A 4: Záběr kamery [Vlastní] .....	55
Obrázek A 5: Trajektorie pohybu chodců ve směru od tramvaje [Vlastní] .....	55
Obrázek A 6: Ostatní trajektorie pohybu chodců [Vlastní] .....	56
Obrázek A 7: Úseky trajektorií s měřenou rychlostí [Vlastní] .....	56
Tabulka B 1: Statistika naměřených rychlostí chodců [Vlastní] .....	57

## Seznam tabulek

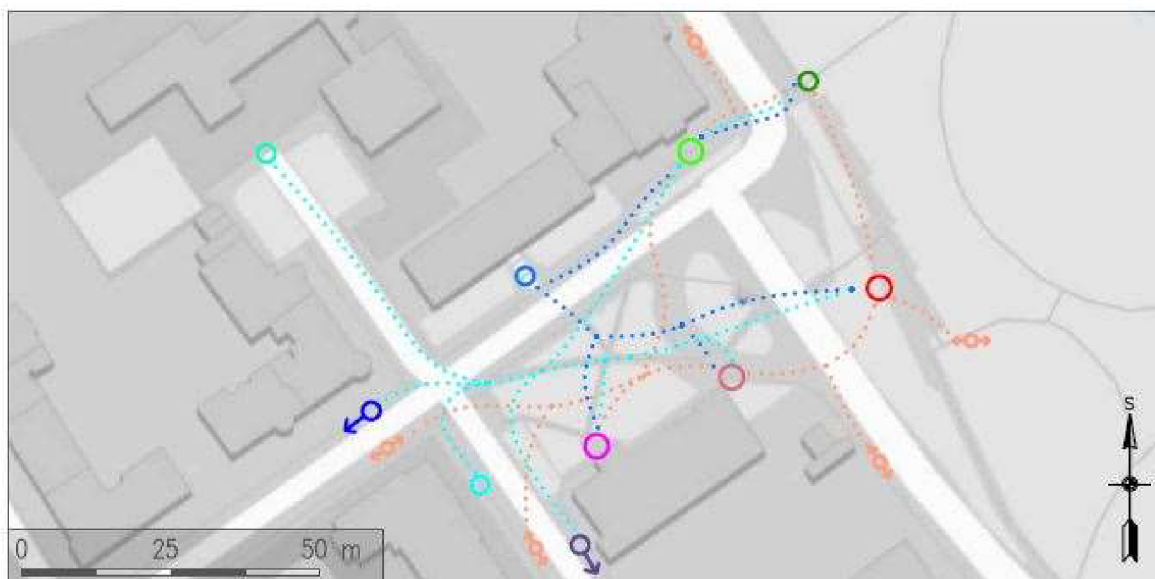
Tabulka 1: Rozměry lidského těla dle země původu [13] .....	9
Tabulka 2: Úroveň kvality pohybu chodců ve shluku a v proudu [14] .....	10
Tabulka 3: Úroveň kvality pěší dopravy podle Fruina [10] .....	14
Tabulka 5: (napravo): Rozložení ostatních chodců [Vlastní] .....	31
Tabulka 4: (vlevo): Rozložení chodců jdoucích od tramvaje [Vlastní] .....	31

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Míra urbanizace v různých částech světa [21] .....	2
Obrázek 2: Schéma dopravní indukce [Vlastní] .....	3
Obrázek 3: Dopravní situace v Los Angeles [7] .....	4
Obrázek 4: Prostorová efektivita městských dopravních prostředků [8] .....	5
Obrázek 5: Rozdíl mezi plánováním zaměřeným na automobily vs. na lidské měřítko [5] .....	6
Obrázek 6: Utrecht, ulice Oudkerkhof před a po rekonstrukci [9] .....	7
Obrázek 7: Zobrazení elipsy těla ve čtverci o rozměrech 1 m x 1 m. [11] .....	8
Obrázek 8: Vizualizace statické hustoty při hodnotách hustoty 1,0 – 5,0 os.m <sup>-2</sup> [13] .....	9
Obrázek 9: Optický rozdíl hustoty mezi půdorysným průmětem a pohledem z perspektivy [10] .....	10
Obrázek 10: Rozdíl mezi statickým a dynamickým davem pro hodnoty hustot 1 os.m <sup>-2</sup> a 2,5 os.m <sup>-2</sup> [12] .....	11
Obrázek 11: Vztah mezi rychlostí a hustotou proudu chodců [10] .....	12
Obrázek 12: Vztah mezi intenzitou a hustotou proudu chodců [10] .....	12
Obrázek 13: Vztah mezi hustotou a intenzitou proudu chodců s konkrétními hodnotami a zobrazením statického a dynamického davu [12] .....	13
Obrázek 14 Schéma celkového procesu verifikace, kalibrace a validace [10] .....	15

Obrázek 15: Příklad jednoduchého makroskopického modelu pohybu osob [22]....	16
Obrázek 16: Příklad modelu na bázi celulárních automatů [23] .....	16
Obrázek 17: Příklad modelu na bázi agentní technologie [20].....	17
Obrázek 18: Příklad modelu na bázi teorie her, všichni agenti kooperují [19] .....	18
Obrázek 19: Porovnání 3D geometrie a 2D navigační mřížky [20] .....	19
Obrázek 20: Porovnání režimu Steering (vlevo) a režimu SFPE (vpravo) [20] .....	20
Obrázek 21: Ukázka vyhodnocení simulace za pomoci barevné škály [20] .....	21
Obrázek 22: Poloha náměstí Míru v městě Brně [Vlastní] .....	23
Obrázek 23: Výkres širších vztahů náměstí Míru [Vlastní] .....	23
Obrázek 24: Funkční analýza náměstí Míru [Vlastní] .....	25
Obrázek 25: Screenshot analýzy videa v DFS [Vlastní] .....	29
Obrázek 26: Geometrie náměstí Míru v programu Pathfinder [Vlastní] .....	32
Obrázek 27: Porovnání trajektorií z DFS (nahore) s trajektoriemi ze simulace (dole) [Vlastní].....	33
Obrázek 28: Úroveň kvality pěší dopravy náměstí Míru .....	34
Obrázek 29: Doba obsazenosti náměstí Míru [Vlastní].....	35
Obrázek 30: Průběh rychlosti chůze typického chodce [Vlastní].....	36
Obrázek 31: Vyhodnocení analýzy kvality pěšního pohybu na náměstí Míru [Vlastní] .....	37
Obrázek 32: Návrh dopravního řešení náměstí Míru [KAM].....	38
Obrázek 33: Geometrie návrhového modelu [Vlastní] .....	39
Obrázek 34: Trajektorie pohybu chodců v návrhovém modelu [Vlastní] .....	39
Obrázek 35: Úroveň kvality pěší dopravy návrhového modelu [Vlastní].....	41
Obrázek 36: Doba obsazenosti náměstí Míru [Vlastní].....	41
Obrázek 37: Průběh rychlosti chůze typického chodce [Vlastní] .....	42
Obrázek 40: Geometrie navrhovaných změn [Vlastní] .....	43
Obrázek 41: Úroveň kvality pěší dopravy navrhovaných změn [Vlastní] .....	44
Obrázek 42: Analýza doby obsazení navrhovaných změn návrhu [Vlastní] .....	44
Obrázek 41: Graf průběhu rychlosti typického chodce [Vlastní].....	45
Obrázek 44: Doporučené změny a doplnění návrhu dopravního řešení [Vlastní] ..	46

## Příloha A

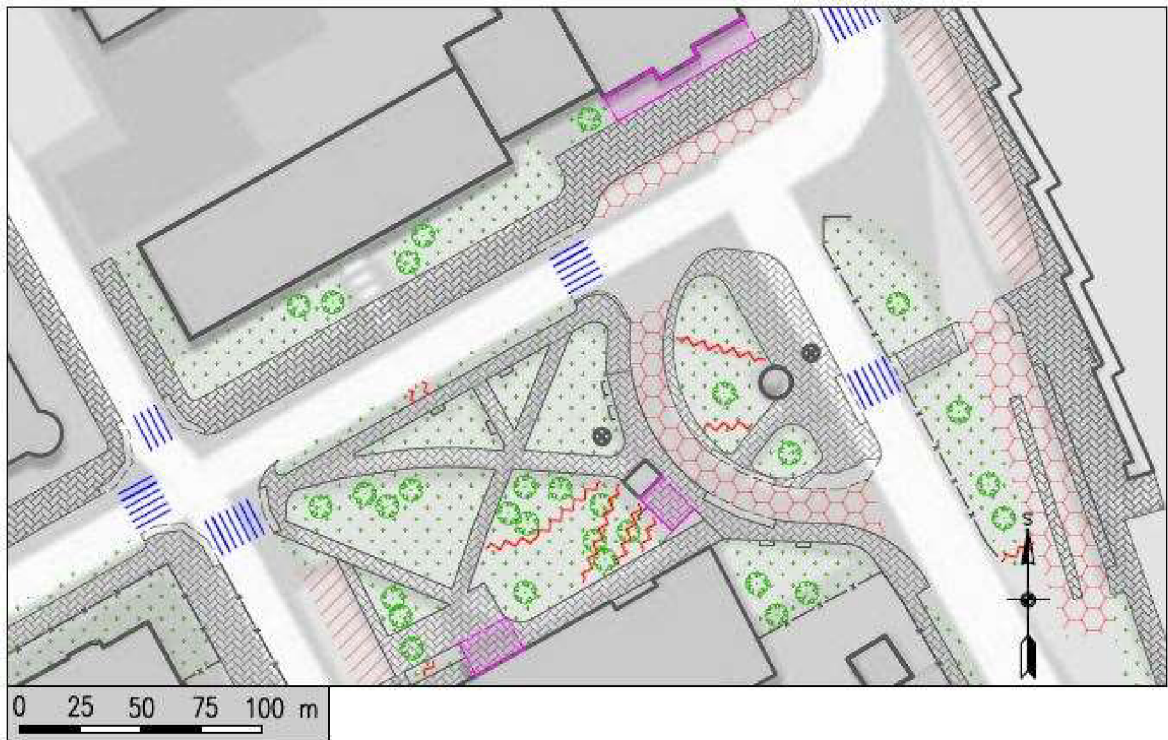


### Legenda















CMcZŠ	Brněnka	Trasy obyvatel čtvrti
ZŠ Brno, nám. Míru 3	Kostel sv. Augustýna	Dopravní vztahy, školy
Směr Bigy	Zastávka nástupní	Dopravní vztahy, koleje
Směr CMGaSOŠPg	zastávka výstupní	Dopravní vztahy, obyvatelé čtvrti
Koleje nám. Míru	Park Kraví hora	

Obrázek A 1: Významné zdroje a cíle pěší dopravy a základní dopravní vztahy náměstí Míru [Vlastní]

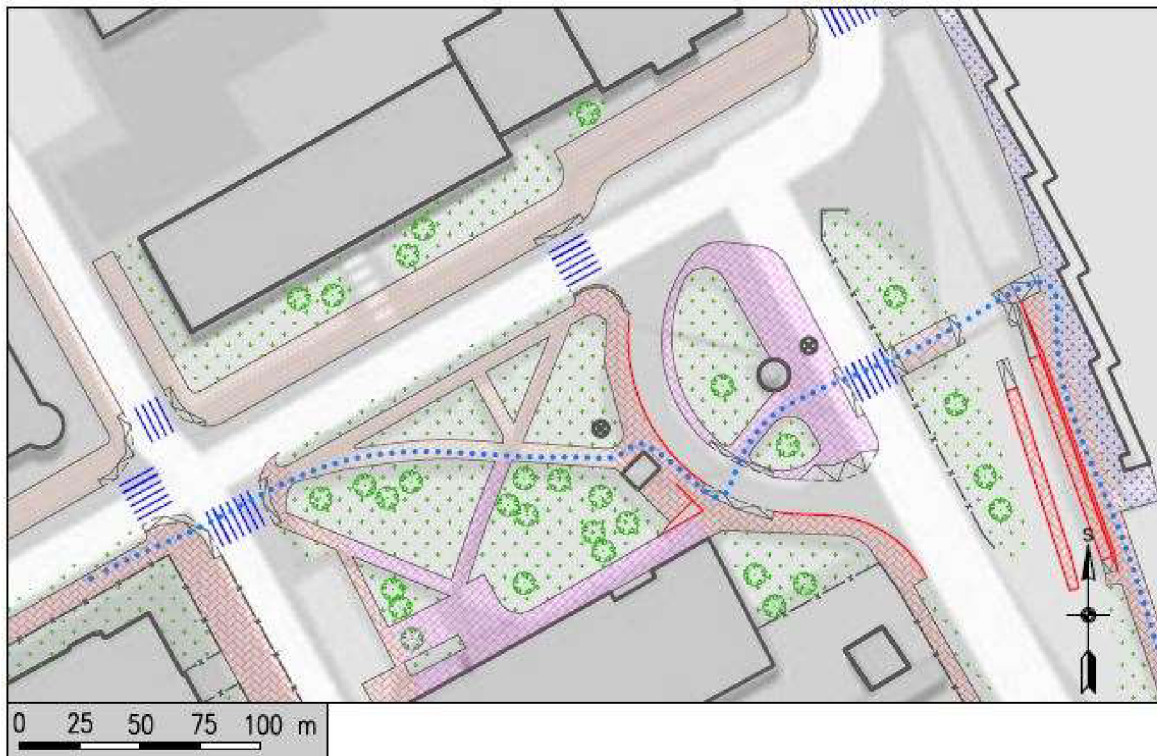











### Legenda

	Dlážděné chodníky		Zábradlí a oplocení		Reklamní sloup
	Neprůchozí objekty		Přechody		Lavičky
	Plochy zastávek MHD		Vyšlapané cesty		Stromy a keře
	Parkování		Snížený obrubník		Zastřešení
	Zatrávnění		Obrubník		

Obrázek A 2: Analýza kvality pěších tras [Vlastní]

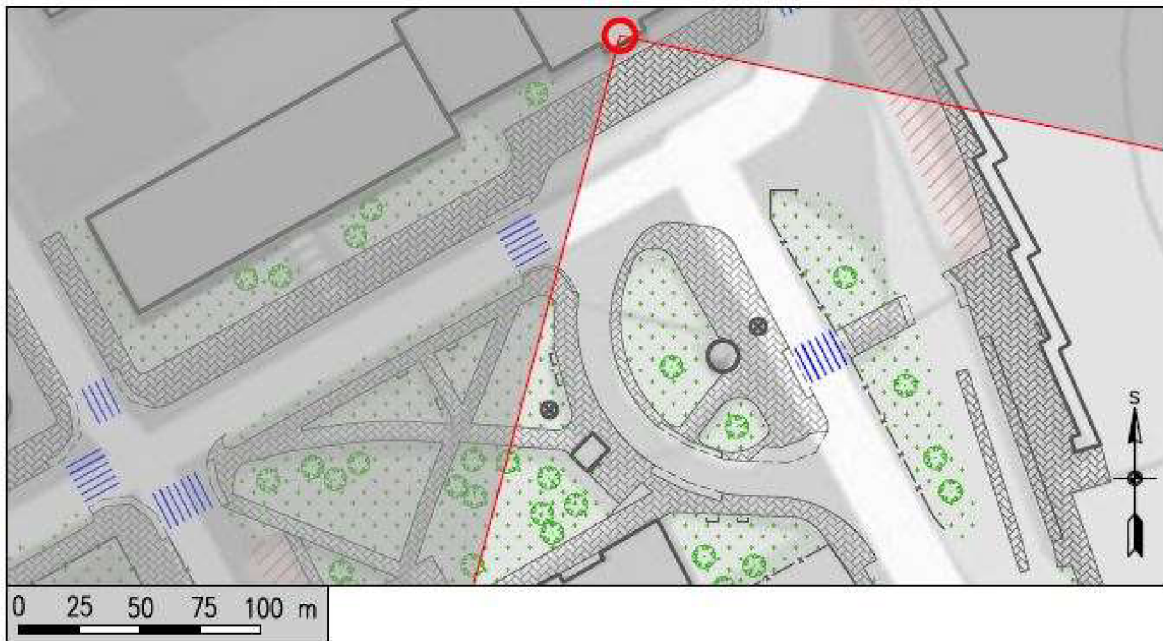


### Legenda

- |  |  |  |
|--|--|--|
|  Rekonstruovaná betonová dlažba |  Žulová dlažba    |  Vysoký obrubník či stupeň |
|  Asfaltový povrch               |  Snížený obrubník |  Bezbariérová trasa        |
|  Povrch z žulových kostek       |  |  |

Obrázek A 3: Analýza kvality povrchů a výškových rozdílů pěších tras [Vlastní]

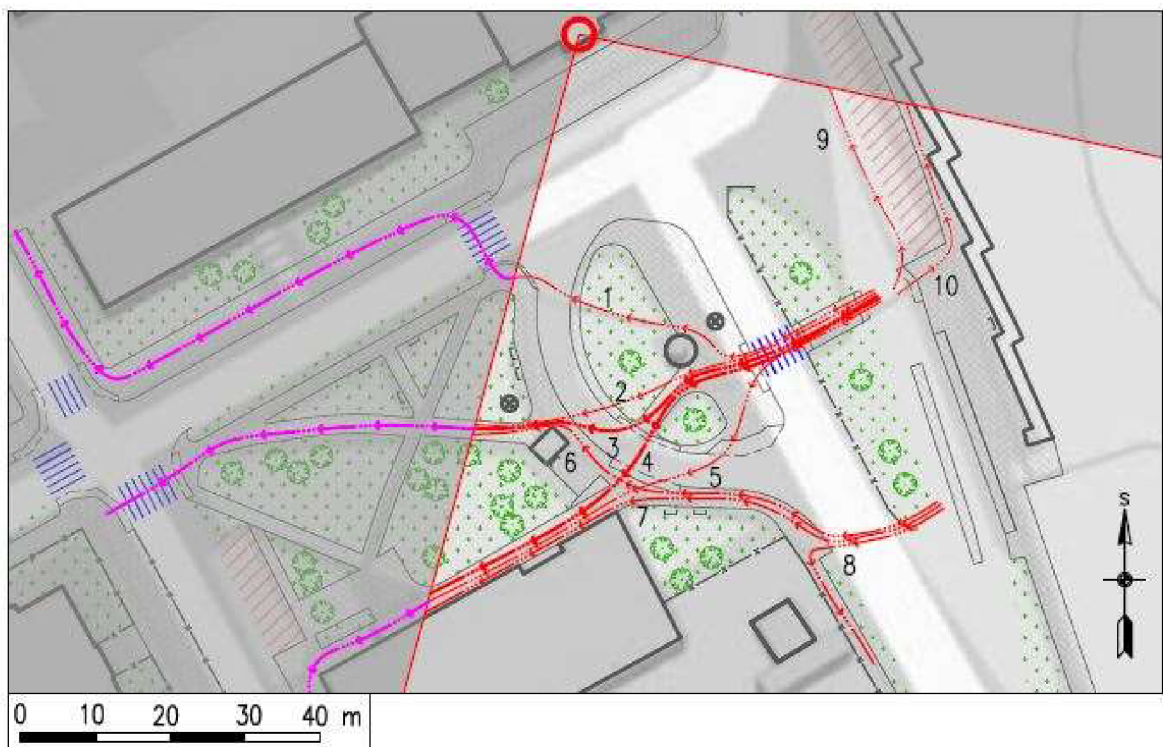




Legenda

- Umístění kamery
- Záběr kamery
- Mimo záběr kamery

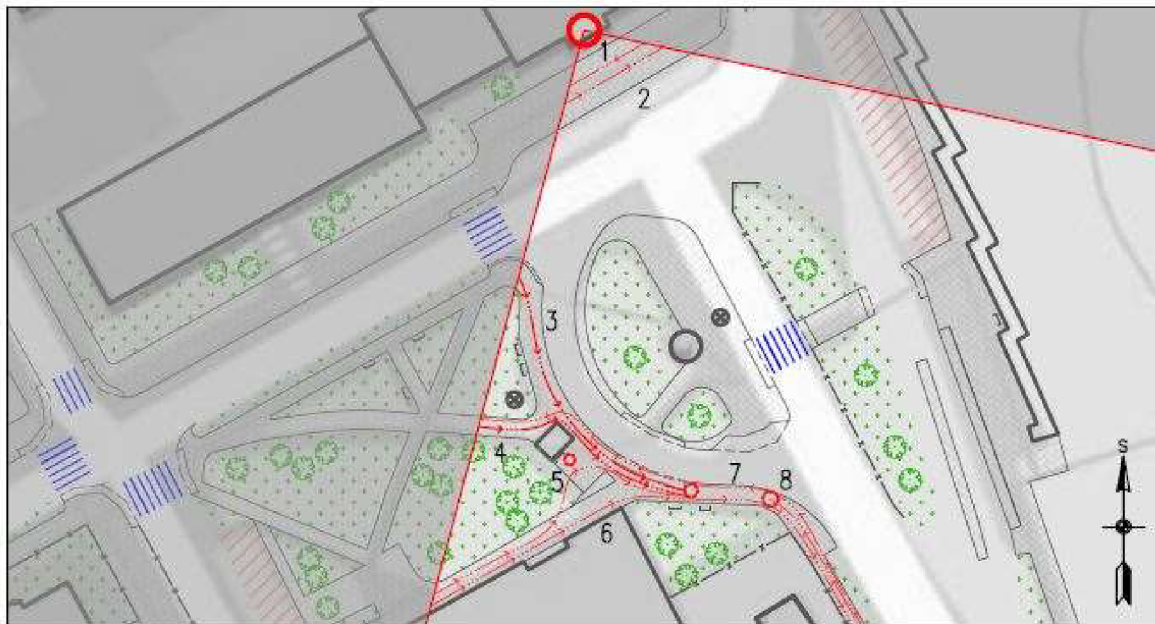
Obrázek A 4: Záběr kamery [Vlastní]



Legenda

- Trajektorie ověřené
- Trajektorie předpokládané

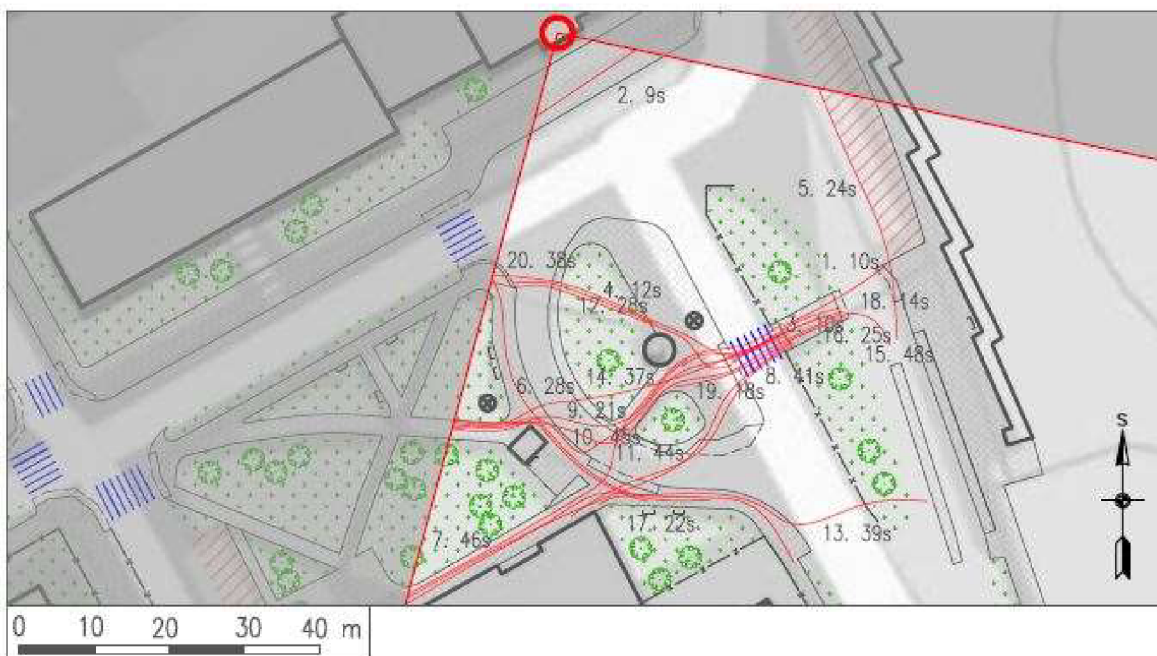
Obrázek A 5: Trajektorie pohybu chodců ve směru od tramvaje [Vlastní]



### Legenda

- Trajektorie ověřené
- Trajektorie předpokládané
- Místa čekání

Obrázek A 6: Ostatní trajektorie pohybu chodců [Vlastní]



Obrázek A 7: Úseky trajektorií s měřenou rychlostí [Vlastní]

## Příloha B

č.	t [s]	S [m]	v [m.s <sup>-1</sup> ]	v [km.h <sup>-1</sup> ]
1	10	15,8	1,58	5,68
2	9	17,3	1,92	6,90
3	10	14,7	1,47	5,29
4	12	19,4	1,62	5,83
5	24	35,2	1,47	5,28
6	28	45,8	1,64	5,89
7	46	57,8	1,26	4,53
8	41	61,2	1,49	5,38
9	21	34,2	1,63	5,86
10	45	50,2	1,12	4,02

č.	t [s]	S [m]	v [m.s <sup>-1</sup> ]	v [km.h <sup>-1</sup> ]
11	44	62,11	1,41	5,08
12	28	34,49	1,23	4,43
13	39	44,65	1,14	4,12
14	37	45,41	1,23	4,42
15	48	64,37	1,34	4,83
16	25	38,03	1,52	5,48
17	22	28,68	1,30	4,69
18	14	16,17	1,16	4,16
19	18	24,36	1,35	4,87
20	38	48,96	1,29	4,64

Tabulka B 1: Statistika naměřených rychlostí chodců [Vlastní]