

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
**DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**  
**KATEDRA INFORMATIKY V DOPRAVĚ**

**SIMULACE DOPRAVNÍHO  
PROVOZU V OMEZENÝCH  
SEGMENTECH SILNIČNÍCH SÍTÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Antonín Kavička, Ph.D.**

Diplomant:

**David Svozil**

**2006**

**UNIVERSITY OF PARDUBICE**  
**THE JAN PERNER TRANSPORT FACULTY**  
**DEPARTMENT OF INFORMATICS IN TRANSPORT**

**TRAFFIC SIMULATION WITHIN  
LIMITED SEGMENTS OF URBAN  
ROAD NETWORKS**

**THESIS**

Supervisor:

**doc. Ing. Antonín Kavička, Ph.D.**

Author:

**David Svozil**

**2006**



Univerzita  
Pardubice  
Dopravní fakulta  
Jana Pernera

Katedra/Ústav: Katedra informatiky v dopravě  
Akademický rok: 2005/2006

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pro: **Bc. David Svozil**  
Studijní program: **Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Aplikovaná informatika v dopravě**

Název tématu: **Simulace dopravního provozu v omezených segmentech silničních sítí**

Zásady pro zpracování:

- Diplomová práce bude sloužit k demonstraci využití experimentální výzkumné metody simulace pro podporu dopravního inženýrství, přičemž má následující základní cíle:
  - a) výstavbu ilustračního simulačního modelu dopravního provozu na vybraném omezeném segmentu silniční sítě,
  - b) realizace série simulačních experimentů s tímto modelem,
  - c) zpracování výsledků simulačních experimentů s akcentem na ukazatele uplatnitelné v dopravním inženýrství.
- Zmíněný simulační model bude realizován v rámci prostředí simulačního nástroje AIMSUN.

Seznam odborné literatury:

- KŘIVÝ, I., KINDLER, E. *Simulace a modelování*, elektronická skripta Ostravské univerzity, 2001. 146 s.
- BANKS, J. *Handbook of simulation*. New York: John Wiley & Sons, 1998. 850s. ISBN 0-471-13403-1
- HUŠEK, R., LAUBER, J. *Simulační modely*, SNTL/ALFA, Praha 1987, 349 s.
- KAVIČKA, A., KLIMA, V., ADAMKO, N.: *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*, věd. monografie, EDIS, Žilina 2006, 210 s. ISBN 80-8070-477-5 (v tisku)
- KAVIČKA, A. : *Závěrečná zpráva k simulační studii Provozní prověření variant dopravního řešení ulice Studentská v Pardubicích*, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, 2004

Rozsah: cca 50 stran

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Antonín Kavička, Ph.D.

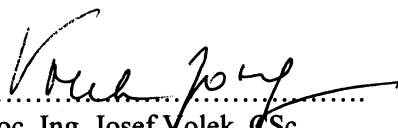
Datum zadání práce: 30. 11. 2005

Termín odevzdání práce: 30. 5. 2006

L. S.



.....  
prof. Ing. Karel Šotek, CSc.  
děkan



.....  
doc. Ing. Josef Volek, CSc.  
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, která na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 30.5.2006

David Svozil

## Poděkování

Děkuji doc. Ing. Antonínu Kavičkovi, Ph.D. za ochotu a pomoc při zpracování mé diplomové práce. Rovněž děkuji Ing. Michaele Ledvinové, Ph.D. za pomoc při provedení analytických výpočtů kapacit křížovatek, jež byly v této práci použity.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku simulací dopravního provozu v omezených segmentech silničních sítí. Je zde poskytnut přehled softwarových nástrojů specializovaných na podporu simulací silničního provozu a popsány vlastnosti a základní principy implementace simulačních modelů v prostředí mikroskopického simulátoru silničních dopravních systémů AIMSUN NG. Hlavní součástí práce je realizace případové simulační studie s využitím výše jmenovaného nástroje. Cílem této diplomové práce je demonstrovat využití experimentální výzkumné metody simulace pro podporu rozhodování v oblasti dopravního inženýrství.

## **Abstract**

This thesis is focused on problems of traffic simulations within limited segments of urban road networks. It provides an overview of software tools specialised in support of urban traffic simulation, as well features and basic principles of implementation of simulation models in an environment of the microscopic simulator of urban and non-urban traffic systems AIMSUN NG are described here. The essential part of this work consists of a realisation of a simulation case study with use of the tool mentioned above. The main goal of this thesis is to demonstrate an usage of simulation as an experimental research method to support decision processes in area of traffic engineering.

# Obsah

ÚVOD.....	1
<b>1 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....</b>	<b>3</b>
<b>2 TEORETICKÉ PODKLADY.....</b>	<b>4</b>
2.1 EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUMNÁ METODA SIMULACE.....	4
2.2 ŽIVOTNÍ CYKLUS SIMULAČNÍ STUDIE .....	6
2.3 MODELOVÁNÍ A ANALÝZA VSTUPŮ SIMULÁTORU .....	9
2.4 ANALÝZA VÝSLEDKŮ SIMULAČNÍHO EXPERIMENTU .....	11
2.5 URČENÍ POČTU REPLIKACÍ SIMULAČNÍHO EXPERIMENTU .....	13
<b>3 SOFTWAREVÉ NÁSTROJE PRO PODPORU SIMULACÍ SILNIČNÍCH DOPRAVNÍCH SYSTÉMŮ .....</b>	<b>15</b>
3.1 PŘEHLED DOSTUPNÝCH PRODUKTŮ.....	15
3.2 KLASIFIKACE, KRITÉRIA VOLBY VHODNÉHO NÁSTROJE .....	16
<b>4 MIKROSKOPICKÝ SIMULÁTOR SILNIČNÍCH DOPRAVNÍCH SYSTÉMŮ AIMSUN .....</b>	<b>17</b>
4.1 PŘEHLED VLASTNOSTÍ NÁSTROJE AIMSUN NG.....	17
4.2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY IMPLEMENTACE SIMULAČNÍHO MODELU V PROSTŘEDÍ AIMSUN NG .....	20
4.2.1 VYTVOŘENÍ MODELU INFRASTRUKTURY ZKOUMANÉHO SEGMENTU SÍTĚ .....	21
4.2.2 DEFINOVÁNÍ PLÁNU ŘÍZENÍ DOPRAVY .....	22
4.2.3 ZADÁNÍ PLÁNU VEŘEJNÉ HROMADNÉ DOPRAVY .....	23
4.2.4 DEFINOVÁNÍ DOPRAVNÍ POPTÁVKY.....	23
4.2.5 PROVÁDĚNÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ.....	26
4.2.6 VÝSTUPY ZE SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ.....	29
<b>5 PŘÍPADOVÁ SIMULAČNÍ STUDIE - STUDENTSKÁ ULICE .....</b>	<b>32</b>
5.1 ÚVOD K SIMULAČNÍ STUDII .....	32
5.2 FORMULACE PROBLÉMU A VYMEZENÍ OBJEKTU ZKOUMÁNÍ.....	32
5.3 STANOVENÍ CÍLŮ PŘÍPADOVÉ SIMULAČNÍ STUDIE.....	36
5.4 VYMEZENÍ ZKOUMANÉHO SYSTÉMU .....	36
5.5 VÝBĚR IMPLEMENTAČNÍHO PROSTŘEDÍ.....	38
5.6 ZPRACOVÁNÍ VSTUPNÍCH DAT PRO SIMULAČNÍ MODEL.....	38
5.6.1 TRANSFORMACE VSTUPNÍCH DAT .....	42
5.7 TVORBA SIMULAČNÍHO MODELU .....	46
5.8 VERIFIKACE SIMULAČNÍHO MODELU .....	47
5.9 VALIDACE MODELU.....	50
5.10 PLÁN SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ.....	51
5.10.1 SIMULAČNÍCH EXPERIMENTY .....	51
5.10.2 SLEDOVANÉ DOPRAVNĚ-INŽENÝRSKÉ UKAZATELE.....	51
5.10.3 DÉLKA SIMULAČNÍHO VÝPOČTU .....	52
5.10.4 DOBA NÁBĚHU SIMULÁTORU .....	52
5.11 PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ A JEJICH ANALÝZA.....	54
5.11.1 STANOVENÍ POČTU REPLIKACÍ SIMULAČNÍCH VÝPOČTŮ .....	54
5.11.2 VYKONÁNÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ .....	56
5.11.3 POSOUZENÍ PROPUSTNOSTI STUDOVANÉHO SEGMENTU SÍTĚ BEZ OHLEDU NA CHARAKTER PROVOZU .....	56
5.11.4 POSOUZENÍ CHARAKTERU DOPRAVNÍHO PROVOZU V RÁMCI CELÉHO ZKOUMANÉHO SEGMENTU SÍTĚ .....	58
5.11.5 POSOUZENÍ CHARAKTERU DOPRAVNÍHO PROVOZU NA STUDENTSKÉ ULICI.....	66



5.11.6	SROVNÁNÍ S VÝSLEDKY STUDIE REALIZOVANÉ DOPRAVNÍ FAKULTOU JANA PERNERA	68
5.11.7	UKÁZKY 3D ANIMACE SIMULAČNÍHO VÝPOČTU .....	71
<b>5.12</b>	<b>OVĚŘENÍ NUTNOSTI VYKONAT DALŠÍ EXPERIMENTY .....</b>	<b>73</b>
<b>5.13</b>	<b>ZÁVĚRY SIMULAČNÍ STUDIE.....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ S ANALYTICKÝMI VÝPOČTY PRO VYBRANÉ TYPY KŘÍŽOVATEK .....</b>	<b>75</b>
<b>6.1</b>	<b>MOTIVACE K PROVEDENÍ SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ S ANALYTICKÝM VÝPOČTEM.....</b>	<b>75</b>
<b>6.2</b>	<b>METODIKA ANALYTICKÉHO VÝPOČTU KAPACITY KŘÍŽOVATKY .....</b>	<b>75</b>
6.2.1	NEŘÍZENÁ STYKOVÁ KŘÍŽOVATKA .....	75
6.2.2	MALÁ OKRUŽNÍ KŘÍŽOVATKA .....	77
<b>6.3</b>	<b>VÝSLEDKY ANALYTICKÉHO VÝPOČTU .....</b>	<b>77</b>
6.3.1	NEŘÍZENÁ STYKOVÁ KŘÍŽOVATKA TVARU T.....	77
6.3.2	MALÁ ČTYŘRAMENNÁ OKRUŽNÍ KŘÍŽOVATKA .....	78
<b>6.4</b>	<b>VÝSLEDKY SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ.....</b>	<b>80</b>
6.4.1	NEŘÍZENÁ DOPRAVNĚ ROZLIŠENÁ STYKOVÁ KŘÍŽOVATKA .....	80
6.4.2	OKRUŽNÍ KŘÍŽOVATKA.....	81
<b>6.5</b>	<b>POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>82</b>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>86</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>89</b>
	<b>PŘÍLOHA - OBSAH PŘILOŽENÉHO DATOVÉHO NOSIČE (CD).....</b>	<b>91</b>

## Úvod

Současný rozvoj naší společnosti orientovaný na spotřebu a moderní životní styl s sebou přináší celou řadu problémů. Jedním z nich je i značný nárůst poptávky po přepravních výkonech.

Zatímco na počátku minulého století bylo vlastnictví automobilu považováno za luxus, dostupný pouze nejvyšším vrstvám společnosti, dnes, o sto let později, vlastní osobní vůz téměř každá rodina. Navíc, v dnešní době si stále větší oblibu získává bydlení mimo městská centra - na předměstích velkých měst a v menších obcích v jejich sousedství. Tyto oblasti jsou často nedostatečně nebo nejsou vůbec obsluhovány městskou či příměstskou hromadnou dopravou, a tak si zde rodiny většinou pořizují i dva automobily, aby oba manželé mohli dojíždět za prací do města nezávisle.

Ani trendy v oblasti nákladní dopravy nejsou příznivé. Moderní logistika klade zásadní důraz na rychlost, časovou přesnost a pružnost dodávek. Železniční přeprava mnohdy těmto požadavkům není s to vyhovět, a tak se nemalá část přepravních výkonů přesouvá ze železnice na silniční nákladní dopravu. Celkovou poptávku po nákladních přepravních výkonech přitom zvyšuje snaha výrobců maximalizovat rozsah spotřeby svých zákazníků a současně zkracovat životní cyklus výrobků.

Výše uvedené důvody a jistě i mnohé další tedy zapříčiňují značný nárůst silniční dopravy. V mnoha místech a oblastech pak dochází k tomu, že stávající zastaralá a nedostatečně dimenzovaná silniční infrastruktura není schopna tyto dopravní toky přenést. Odpovědné instituce pak v reakci na to přijímají rozhodnutí o investičních záměrech, jejichž cílem je tyto problémy řešit - jedná se např. o výstavbu silničních obchvatů, okruhů, magistrál, mimoúrovňových křižovatek a podobně.

Jelikož výstavba nových a modifikace stávajících segmentů silničních sítí je zpravidla vždy velmi nákladnou záležitostí, jež má v podstatě nevratnou povahu, je v každém takovém případě nutno velmi pečlivě a kvalifikovaně zvážit vliv daného rozhodnutí na příslušný segment sítě. Je třeba prověřit, zda navržené řešení bude samo o sobě kapacitně dostačující a to s ohledem na předpokládaný nárůst dopravní zátěže v horizontu třeba i několika budoucích desetiletí. Zároveň je nutno prověřit interakci dopravního řešení se svým bezprostředním okolím - zkušenosti z praxe například ukazují, že významné vylepšení dopravní propustnosti pouze izolovaného úseku dopravní sítě může způsobit vážné problémy v jeho širším okolí<sup>1</sup>. Chování silničního dopravního systému navíc citelně ovlivňují i změny, které nastávají vně dopravní infrastruktury - např. výstavba nového obchodního centra, nového výrobního závodu a podobně.

Je tedy zřejmé, že navrhování silničních dopravních systémů je poměrně náročná disciplína. Dopravní inženýři, urbanisté a řešitelé dopravních studií se při své práci potřebují opřít nejen o svoji expertní zkušenost, ale také o exaktní podklady - kapacitní výpočty propustnosti sítě a podobně. V minulosti, kdy ještě nebyla k dispozici výkonná výpočetní technika a software, bylo možno získávat tyto podklady pouze matematickým

---

<sup>1</sup> tzv. Braessův paradox [9]

výpočtem s využitím příslušných analytických metod. V dnešní době je pro tyto účely stále častěji a s úspěchem využívána metoda počítačové simulace.

K dispozici je již celá řada vyspělých softwarových produktů specializovaných na simulace systémů silniční dopravy umožňujících modelovat tyto systémy na poměrně detailní úrovni. Podporují např. simulaci dynamiky pohybu vozidel, simulaci chování řidičů, umožňují metodou simulace zkoumat vliv integrace moderních prostředků optimalizace a řízení silničního provozu, jako jsou například pružné signální plány křižovatek aktualizované na základě informací získaných z elektronických detektorů obsazenosti úseků silniční sítě, digitální informační tabule pro řidiče atd.

Výstupy simulačních studií realizované s využitím těchto nástrojů pak poskytují široké spektrum informací. Kromě celé řady klasických dopravně-inženýrských ukazatelů je možno sledovat i další kritéria - ekologickou zátěž jednotlivých úseků sítě, hodnocení zvažovaných variant z hlediska ekonomiky provozu a podobně.

Především však tyto simulační nástroje umožňují modelovat i poměrně komplexní silniční dopravní systémy, jejichž popis analytickými metodami by byl velmi náročný, a dále představují velmi flexibilní nástroj pro zkoumání různých alternativ návrhů silniční sítě a organizace provozu. V této diplomové práci je na praktickém příkladě demonstrováno využití softwarového nástroje tohoto typu. Konkrétně se jedná o mikroskopický simulátor silničních dopravních systému AIMSUN NG.

# 1 Cíle diplomové práce

Téma této diplomové práce zní "Simulace dopravního provozu v omezených segmentech silničních sítí" a jejím rámcovým cílem je demonstrovat využití experimentální výzkumné metody simulace pro podporu dopravního inženýrství. Pro její vypracování byly stanoveny tyto dílčí cíle:

- pojednat o základních teoretických aspektech experimentální výzkumné metody simulace a popsat životní cyklus simulační studie,
- poskytnout stručný přehled o dostupných softwarových produktech specializovaných na simulaci dopravního provozu,
- prezentovat základní principy implementace simulačních modelů a realizace simulačních experimentů v prostředí aplikace AIMSUN NG,
- vystavět ilustrační simulační model dopravního provozu na vybraném omezeném segmentu silniční sítě - konkrétně zvažované dopravní řešení ulice Studentská v Pardubicích, a to v prostředí simulačního nástroje AIMSUN NG,
- vyvinout vlastní software pro transformaci dostupných dat o prognózovaných intenzitách proudů vozidel tak, aby byla tato data použitelná pro parametrizaci modelu v aplikaci AIMSUN NG a následně transformovaná data v modelu aplikovat,
- provést verifikaci tohoto simulačního modelu a realizovat série simulačních experimentů pro čtyři zvažované varianty dopravního řešení ulice Studentská,
- zpracovat výsledky simulačních experimentů s akcentem na ukazatele uplatnitelné v dopravním inženýrství,
- demonstrovat pokročilé možnosti 3D animace, které software AIMSUN NG nabízí,
- mimo rámec výše uvedené simulační studie provést srovnání výsledků simulačních experimentů s modely jednoho typu izolované neřízené stykové a jednoho typu izolované okružní křižovatky realizované v prostředí aplikace AIMSUN NG s výsledky analytických kapacitních výpočtů těchto křižovatek a vyhodnotit případné rozdíly.

## 2 Teoretické podklady

### 2.1 Experimentální výzkumná metoda simulace

Tato podkapitola je doslovně převzata z mé bakalářské práce [4] a do této diplomové práce je zařazena proto, aby i zde zavedla a vysvětlila základní odborné termíny používané v oblasti simulací.

V publikaci [1] je **simulace** definována takto: *"Simulace je výzkumná technika, jejíž podstatou je náhrada zkoumaného dynamického systému jeho simulátorem s tím, že se simulátorem se experimentuje s cílem získat informace o původním zkoumaném dynamickém systému."*

Slovo systém je ve výše uvedené klíčové definici svázáno s nějakým objektem hmotného světa, přičemž tento objekt již může v realitě existovat, nebo se jedná o objekt, o němž uvažujeme, že by existovat mohl. Zkoumaný objekt však může být značně složitý a těžko popsateľný v plné šíři. Proto bývá aplikována **metoda abstrakce**, kdy jsou zanedbány některé aspekty zkoumaných objektů, které nejsou z hlediska daného typu studia důležité. Aspekty, které zanedbány nejsou, musejí být v rámci daného oboru zkoumání zvládnutelné. Takto abstrakcí zjednodušený zkoumaný objekt je pak v oblasti simulací nazýván **systémem**. Někdy také bývá používána formulace, že na objektech zkoumání jsou vymezovány systémy.

Systém, v němž se abstrahuje od významu času, je označován jako **statický systém**, zatímco systém, kde čas zanedbáván není, se nazývá **dynamický systém**. Jak plyne z výše uvedené definice, simulace se zabývá výhradně dynamickými systémy. V souvislosti s dynamickými systémy je třeba definovat pojem **časová existence systému** (zkráceně existence systému), jež označuje množinu všech okamžiků, v nichž dynamický systém z pohledu procesu simulace existuje. Tato množina je pak reprezentována obecně jakoukoli množinou reálných čísel. Časová existence systému je tedy opět určitou abstrakcí, tentokrát abstrakcí plynutí skutečného času.

Zkoumané objekty bývají zpravidla obklopeny dalšími objekty reálného světa, které sice nejsou přímo předmětem zkoumání, ale které nějakým nezanedbatelným způsobem ovlivňují objekty zkoumané a tvoří tedy okolí zkoumaného objektu. Abstrakce okolí zkoumaného objektu je pak nazývána **okolím systému**.

Systém z hlediska pojetí v oblasti simulací je složen z **entit** (prvků, elementů). Entita je abstrakcí nějaké komponenty zkoumaného objektu, přičemž může mít charakter fyzické věci nebo může mít povahu logického elementu (schopnost dané věci). Entity, které jsou přítomny v dynamickém systému po celou dobu jeho existence, jsou označovány jako **permanentní**, naopak prvky, které mohou do systému vstupovat, vystupovat, vznikat v něm nebo zanikat, jsou označovány jako **temporární** (tj. dočasné). Temporární entity dále dělíme na **exogenní** - ty vznikají vně studovaného systému - a **endogenní**, jež vznikají uvnitř systému.

Prvky systému jsou zpravidla nositeli nějakých vlastností. Ty při simulacích reprezentujeme prostřednictvím atributů. **Atributy** tedy přiřazují entitám nějaké hodnoty, které se mohou v dynamických systémech měnit. Atributy můžeme rozdělit na **standardní** a **referenční**. Standardní atributy uchovávají skalární, logické či textové hodnoty svázané s konkrétními entitami, zatímco referenční popisují relace mezi

entitami. **Stav dynamického systému** v určitém časovém okamžiku existence dynamického systému je určen entitami, které jsou v daném čase v systému přítomny a hodnotami jejich atributů v témže časovém okamžiku.

Zkoumaný dynamický systém bývá v odborné literatuře označován jako **simulovaný systém** resp. jako **originál**, jeho náhrada pak **simulujícím systémem** resp. **simulátorem**.

Analogii mezi simulovaným a simulujícím systémem označujeme termínem **model**. Konkrétně, model definuje vztah mezi oběma systémy tak, že každé entitě  $P$  simulovaného systému přiřazuje entitu  $Q$  simulujícího systému, každému atributu  $g$  entity  $P$  je přiřazen atribut  $h$  entity  $Q$  a pro hodnoty  $g$  a  $h$  je dána nějaká relace (u skalárních atributů např. úměrnost, tolerance aj.).

Pokud simulovaný i simulující systém jsou systémy statické, pak daný model označujeme jako **statický model**. V simulaci se však pracuje pouze se **simulačními modely**, které musí splňovat následující požadavky (převzato doslovně z [1]):

1. Jejich simulující i simulované systémy jsou dynamické systémy.
2. Existuje zobrazení  $\tau$  existence simulovaného systému do existence simulujícího systému; je-li tedy  $t_1$  okamžik, v němž existuje simulovaný systém  $M_1$ , je mu přiřazen okamžik  $\tau(t_1) = t_2$ , v němž existuje simulující systém  $M_2$ , a tak je zobrazením  $\tau$  přiřazen i stavu  $S_1(t_1) = \sigma_1$  systému  $M_1$  stav  $S_2(t_2) = \sigma_2$  systému  $M_2$ .
3. Mezi stavy  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  jsou splněny požadavky na vztahy mezi prvky a jejich atributy, jak jsme je výše popsali pro modely obecně; jako kdyby každému stavu  $\sigma_1$  simulovaného systému odpovídal stav  $\sigma_2$  simulujícího systému tak, že oba stavy jsou ve vztahu statického modelu.
4. Zobrazení  $\tau$  je neklesající; pokud nastane stav  $s$  simulovaného systému před stavem  $s^*$  téhož systému, pak stav, který odpovídá v simulujícím systému stavu  $s$ , nastane před stavem, který odpovídá stavu  $s^*$ , nebo mohou oba stavy nastat v simulujícím systému současně (totiž v případě, že simulující systém není "tak kvalitní", aby dokázal zobrazit všechny detaily v simulovaném systému), nikdy však nemůže být časové pořadí stavu v simulovaném systému a jím odpovídajících stavu v simulujícím systému přehozeno.

Pro dynamické systémy je typické, že v průběhu jejich existence dochází ke změnám jejich stavu. Tyto stavové změny jsou v simulačních modelech realizovány prostřednictvím aktivit. **Aktivita** je obrazem určitého děje v simulovaném systému, jinak řečeno, je v konečném důsledku abstrakcí nějaké činnosti, která probíhá ve zkoumaném objektu. Kromě toho, že aktivita může měnit stav simulujícího systému, platí pro ni také to, že má určité časové trvání. Časová existence aktivity je určena množinou reálných čísel, v nichž aktivita existuje a může případně měnit stav systému.

Aktivity lze dále členit na spojité a diskrétní. **Spojité aktivita** může měnit stav systému po celou dobu její časové existence, jež je dána intervalem reálných čísel  $\langle t_1, t_2 \rangle$ . Pro spojitou aktivitu je charakteristické, že v okamžiku jejího zahájení nelze obvykle předem určit čas jejího ukončení. **Diskrétní aktivita** naopak může měnit stav systému pouze v okamžiku jejího ukončení, po dobu jejího trvání nikoli. Časová

existence diskrétní aktivity je omezena pouze na konec jejího trvání, je tedy určena jednoprvkovou množinou reálných čísel  $\{t_2\}$ . Pro ukončení diskrétní aktivity byl zaveden speciální termín **událost**. Pakliže se v simulačním modelu vyskytují aktivity, které na sebe navazují a nějakým způsobem spolu logicky souvisejí, označujeme takovou skupinu aktivit termínem **proces**.

Pokud simulovaný systém obsahuje pouze spojité resp. diskrétní aktivity, hovoříme o **spojité simulaci** resp. o **diskrétní simulaci**. V případě, že simulovaný systém obsahuje zároveň spojité i diskrétní aktivity, jedná se o **kombinovanou (diskrétně-spojitou) simulaci**.

Jestliže se v simulačních modelech uplatňuje faktor náhodnosti, označujeme takové modely jako **stochastické**, v opačném případě jako modely **deterministické**. Při implementaci stochastických simulačních modelů jsou aplikovány poznatky matematické statistiky.

V dřívějších dobách byla simulace realizována různými technickými postupy - např. mechanicky, hydrodynamicky, elektromechanicky atd. Dnes se naprostá většina simulátorů realizuje na číslicových počítačích, hovoříme tedy o **číslicové simulaci**. Počítačový program, který řídí simulační výpočet při číslicové simulaci, se nazývá **simulační program**.

Jak již bylo řečeno, nedílnou součástí procesu simulace je experimentování se simulačním modelem. To je realizováno prostřednictvím **simulačních pokusů** (experimentů), přičemž v případě číslicové simulace je simulačním pokusem míněn běh simulačního programu podle jednoho daného scénáře. **Scénář** je přitom určen **scénou**, tj. množinou všech permanentních prvků systému s hodnotami jejich atributů, rozhodovacími a řídicími algoritmy, jež implementují příslušné aktivity a konečně pravidly vstupu, výstupu, generování a zániku temporárních prvků. V průběhu simulačního pokusu eviduje simulační program tzv. **simulační čas**, který je obrazem času v simulovaném systému. Pro časový úsek simulačního výpočtu, během něhož se nemění hodnota simulačního času, je v odborné literatuře zaveden termín **simulační krok**. Pakliže je simulační výpočet konstruován tak, že po každém simulačním kroku je simulační čas navýšen o konstantní přírůstek, hovoříme o **ekvidistantním** simulačním čase, jinak hovoříme o **neekvidistantním** simulačním čase.

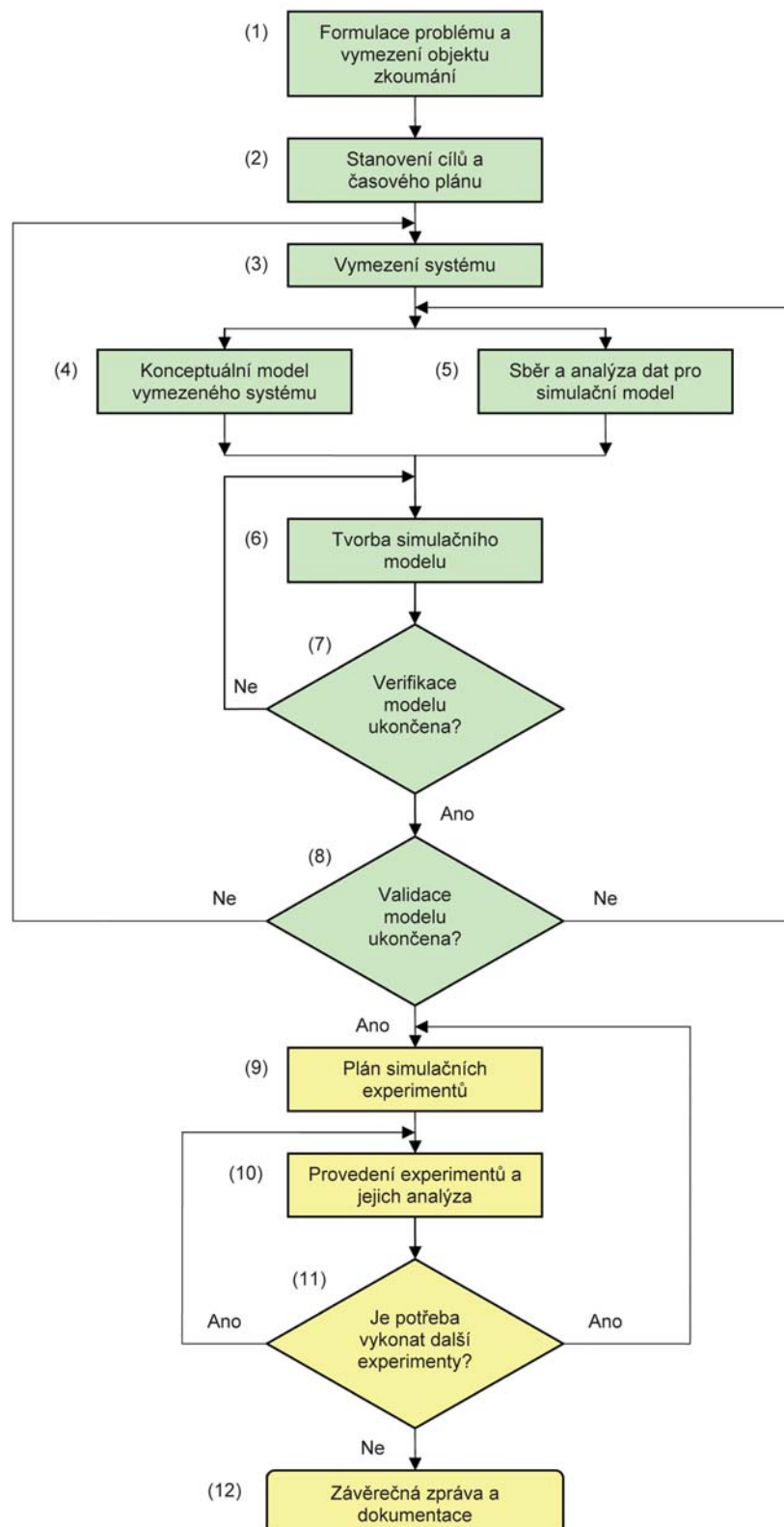
Posloupnost simulačních pokusů provedená s různými scénáři, avšak realizovaná za týmž účelem, se nazývá **simulační studie**, někdy také **simulační projekt**. V běžné praxi přitom cílem simulační studie nebývá pouze samotné studium simulovaného systému (originálu), nýbrž nalezení řešení nějaké optimalizační úlohy. Experimentátor tedy hledá takovou konfiguraci scénáře, při němž je chování systému nejlepší z hlediska sledovaných kritérií.

## **2.2 Životní cyklus simulační studie**

Jelikož hlavní náplní této diplomové práce je vypracování případové simulační studie, pojednává tato kapitola ve stručnosti o životním cyklu typické simulační studie, tedy o etapách a fázích, jimiž zpravidla její evoluce prochází. Obsah této kapitoly je výtahem z [2] a obsahuje i převzaté vyobrazení.

Postup realizace simulační studie lze rozdělit na dvě základní etapy - na etapu návrhu a tvorby simulačního modelu a dále na etapu experimentování s vytvořeným

modelem. Tyto etapy lze dále rozčlenit na dílčí fáze. Ty mohou probíhat buď sekvenčně, nebo paralelně. Celkové schéma životního cyklu simulační studie je zobrazeno na následujícím vývojovém diagramu, kde zeleně podbarvená část představuje první etapu, žlutě podbarvená část etapu druhou.



Obrázek 1: Životní cyklus simulační studie. Zdroj: [2]



### **Etapa I - Fáze 1 - Formulace problému a vymezení objektu zkoumání**

Zadávací fáze projektu - formulace základních problémů, které budou řešeny metodou simulace. Řešitel ověřuje, zda metoda simulace bude v daném případě použitelná, v kladném případě je provedena prvotní analýza, tj. především je na reálném objektu vymezen objekt zkoumání, na nějž bude v průběhu realizace simulační studie soustředěna pozornost

### **Etapa I - Fáze 2 - Stanovení cílů a plánu projektu**

Následuje stanovení konkrétních cílů a časového plánu projektu a definování otázek, na které má simulační studie odpovědět.

### **Etapa I - Fáze 3 - Vymezení systému**

Aplikace metody abstrakce na objekt zkoumání tak, aby mohl být vymezen zkoumaný/simulovaný systém. Zohledňují se pouze prvky objektu zkoumání, jejich vazby a vlastnosti, jež jsou důležité pro řešení definovaných problémů v souladu s cíly studie.

### **Etapa I - Fáze 4 - Konceptuální model vymezeného systému**

Výběr metodiky a architektury simulačního modelu, případně tvorba konceptuálního modelu (prostřednictvím neimplementačního formalismu). I v této fázi je nutná aktivní účast zadavatele.

### **Etapa I - Fáze 5 - Sběr a analýza dat pro simulační model**

Tato fáze probíhá paralelně s třetí fází, sbíraná data popisující vlastnosti modelovaného systému mají nejrůznější charakter - deterministické či stochastické číselné hodnoty, data o pravidlech technologických postupů, data o vstupech prvků do systému, rozhodovací pravidla atd.

### **Etapa I - Fáze 6 - Tvorba simulačního modelu**

Fází tvorby simulačního modelu zahajuje zásadní krok - volba pro daný případ vhodného implementačního prostředí. V úvahu obvykle přicházejí vyšší programovací jazyky, obecné simulační jazyky či poměrně široká škála méně či více specializovaných softwarových simulačních nástrojů. Následuje vlastní implementace simulačního modelu ve zvoleném prostředí, přičemž technologický postup výstavby simulačního modelu je samozřejmě specifický pro konkrétní typ daného implementačního prostředí.

### **Etapa I - Fáze 7 - Verifikace modelu**

Poté, co je dokončena implementace simulačního modelu, je nutné provést verifikaci modelu, tj. ověřit, zda průběh simulačního výpočtu je v souladu s konceptuálním modelem a simulační model je funkčně správný. Případné nedostatky jsou odstraňovány opravnými implementačními zásahy.

### **Etapa I - Fáze 8 - Validace modelu**

Verifikovaný model je dále třeba validovat, tedy ověřit, zda simulátor odráží objekt zkoumání s očekávanou resp. požadovanou mírou přesnosti. Validaci lze provádět různými metodami - např. porovnávat model s reálným systémem

prostřednictvím statistických metod, porovnání s jiným (matematickým) modelem, či empiricky, kdy nezávislý odborník z příslušné oblasti posuzuje správnost chování modelu. I zde případné zjištěné nedostatky mohou vést k tomu, že je simulační model nutno modifikovat, načež je třeba opakovat provedení verifikace a validace modelu. V některých případech může negativní výsledek validace modelu vést až k nutnosti změnit vymezení zkoumaného systému.

### **Etapa II - Fáze 9 - Plán simulačních experimentů**

Druhá etapa simulační studie je zahájena sestavením plánu simulačních experimentů, jejichž realizace povede k dosažení cílů projektu. Tento plán nemá zpravidla fixní charakter - výsledky jednotlivých experimentů mohou vést řešitele ke korekcím tohoto plánu.

### **Etapa II - Fáze 10 - Provedení experimentů a jejich analýza**

Poté, co je sestaven plán simulačních experimentů, následuje jejich vykonání, statistické vyhodnocení a analýza získaných výsledků.

### **Etapa II - Fáze 11 - Ověření nutnosti vykonat další experimenty**

Pokud po realizaci experimentů vymezených původním plánem vyvstanou nové problémy či otázky, přistupuje se k naplánování dalších experimentů s alternativními scénáři a jejich vykonání. Iterační proces opakování fází 9 a 10 směřuje k nalezení dobrého, v ideálním případě optimálního řešení problémů, které simulační studie zkoumá.

### **Etapa II - Fáze 12 - Závěrečná zpráva a dokumentace**

Po ukončení simulačních experimentů završuje řešitel simulační studii vypracováním závěrečné zprávy a dokumentace s vyhodnocením výsledků studie, případně předloží i doporučení řešení problémů spojených s objektem zkoumání.

## **2.3 Modelování a analýza vstupů simulátoru**

Pokud implementovaný simulační model vyžaduje modelování vstupů, je nutno vytvořit také model vstupů, který je ve vztahu k danému simulačnímu modelu označován jako submodel vstupů. Tento submodel může být implementován buď jako standardní simulační model, nebo jako metamodel, tj. "černá skříňka" generující data požadovaným způsobem [5].

První uvedený přístup je aplikován zpravidla v případech, kdy generování daného typu vstupů představuje složitější proces a/nebo v případech, kdy je požadováno, aby ze submodelu vstupů do vlastního simulačního modelu vstupovaly již vytvořené exogenní entity.

Metamodel vstupů produkuje data, na jejichž základě simulační model provádí generování exogenních entit nebo mění svůj stav. Metamodel vstupů může existovat mimo simulační model, nebo může být jeho součástí. Generování dat probíhá buď na bázi deterministické nebo stochastické. V principu je tedy při modelování vstupů prostřednictvím metamodelu aplikována vysoká míra abstrakce.

Pakliže metamodel generuje vstupní data na deterministické bázi, jsou zpravidla tato data k dispozici (v paměti počítače nebo na paměťovém médiu) již před zahájením

simulačního výpočtu. Tento přístup je typicky využíván v případech, kdy je třeba modelovat proud vstupních dat odpovídající sesbíranému souboru reálných historických dat.

Jeden z možných způsobů generování vstupních dat metamodelem vstupů na bázi stochastické spočívá v realizaci umělých náhodných pokusů, jejichž výsledky mají dané empirické nebo standardní statistické rozdělení pravděpodobnosti.

V případě standardního statistického rozdělení pravděpodobnosti jsou hodnoty generovány tak, že je nejprve prostřednictvím generátoru pseudonáhodných čísel s rovnoměrným rozdělením vygenerována hodnota z intervalu  $\langle 0;1 \rangle$  a tato hodnota je poté použita jako argument inverzní funkce k distribuční funkci daného rozdělení pravděpodobnosti. Výsledek tohoto výpočtu je pak výstupem metamodelu vstupů.

V případě empirického rozdělení pravděpodobnosti je proces generování hodnot opět zahájen vygenerováním pseudonáhodného čísla  $u$  z intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ . Následně se zjistí, mezi které dvě hodnoty empirické distribuční funkce náhodné číslo  $u$  padlo a poté je provedena lineární interpolace - proložení přímkou těmito dvěma body, přičemž rovnice přímkou je vyjádřena ve směnicovém tvaru. Následně je vyjádřena inverzní funkce (k rovnici přímkou) a je proveden konečný výpočet, kdy pseudonáhodné číslo  $u$  je použito jako argument této funkce. Výsledek výpočtu je výstupem metamodelu vstupů.

Aby mohl být stochastický metamodel vstupů implementován, je třeba nejprve provést analýzu vstupů v modelovaném systému, tedy zjistit, zda náhodnost modelovaných vstupů v reálném systému odpovídá nějakému teoretickému rozdělení pravděpodobnosti. Pokud tomu tak je, zpravidla bývá ještě nutné zjistit parametry tohoto rozdělení. V opačném případě je třeba metamodel vstupů postavit na empirickém rozdělení pravděpodobnosti.

Při analýze vstupů jsou obvykle používány standardní metody matematické statistiky. Provádí se testování hypotéz o tvaru rozdělení náhodné veličiny - nejčastěji prostřednictvím Chí-kvadrát testu či Kolmogorovova-Smirnovova testu [17]. Dále je třeba s pomocí statistických metod provést odhad parametrů daného rozdělení (bodový či intervalový), případně otestovat hypotézu o odhadovaném parametru rozdělení pravděpodobnosti.

Korektní implementace modelování vstupů je nutnou podmínkou úspěšné implementace celého simulačního modelu, neboť vstupy mají zpravidla zásadní vliv na výsledky simulačního výpočtu. Analýze vstupů a implementaci modelu resp. metamodelu vstupů je tedy třeba věnovat v rámci vypracování simulační studie velkou pozornost. Součástí procesu výstavby simulačního modelu by měla být důkladná, samostatně provedená verifikace a validace modelu resp. metamodelu vstupů.

Vlastní implementace generátoru náhodných vstupů se neobejde bez využití generátoru náhodných čísel z rovnoměrného rozdělení (viz postup popsáný výše). I jeho kvalitě je třeba věnovat velkou pozornost - musí splňovat některé požadavky, např. musí mít dostatečně dlouhou nebo nejlépe žádnou periodu a nesmí vykazovat korelaci mezi jednotlivými vygenerovanými náhodnými čísly. V případě potřeby více proudů náhodných čísel je třeba pro každý proud použít samostatný generátor, aby byla zajištěna jejich vzájemná nezávislost.

Simulační jazyky a především pokročilé specializované simulátory zpravidla obsahují zabudovanou a propracovanou podporu generátorů náhodných vstupů. Podle účelu nasazení pokročilého specializovaného simulátoru může tento simulátor obsahovat podporu pro práci s deterministickými i stochastickými typy vstupů, pro stochastické generátory pak mohou být k dispozici kromě funkcí pro generování standardních teoretických rozdělení (obvykle standardní součást většiny softwarových produktů tohoto typu) i nástroje pro generování hodnot dle empirického rozdělení pravděpodobnosti, přičemž parametrizace těchto generátorů probíhá uživatelsky přívětivým způsobem. Propracovanější nástroje pro podporu simulace rovněž mohou obsahovat i funkce pro provedení analýzy vstupů (tedy přímo historických dat naměřených v modelovaném systému), což přispívá k rychlejší a snazší implementaci simulačních modelů.

## 2.4 Analýza výsledků simulačního experimentu

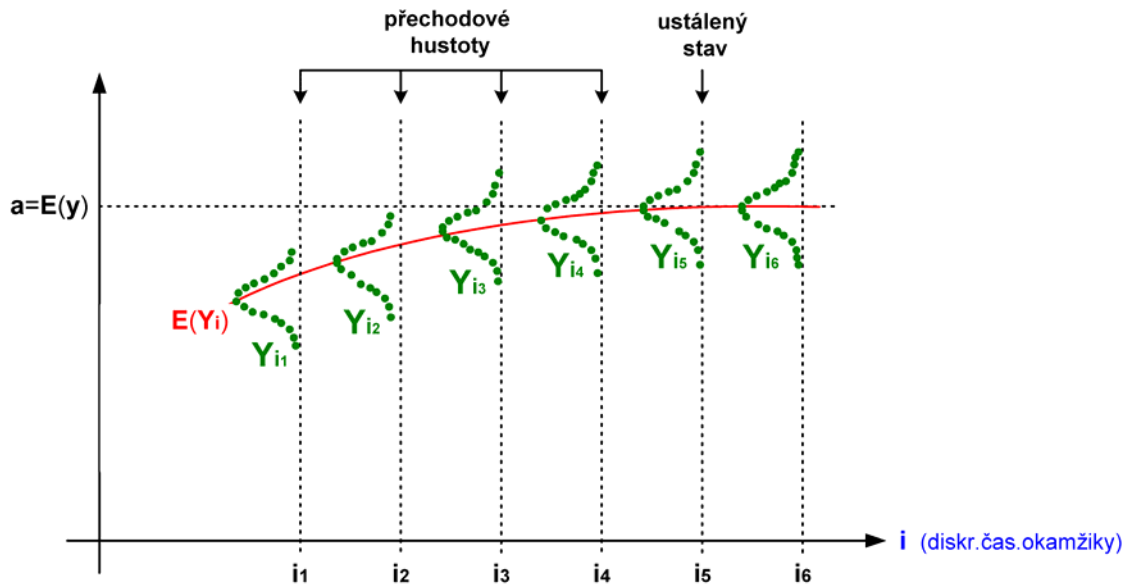
Nedílnou součástí etapy experimentování se simulačním modelem je analýza výsledků jednotlivých experimentů [5]. Pakliže je modelován stochastický systém, tak každý z těchto experimentů obvykle zahrnuje provedení potřebného počtu replikací simulačního výpočtu. V případě stochastického systému jsou vstupy i výstupy náhodné veličiny a výstupy je proto nutno zpracovat a analyzovat metodami matematické statistiky.

Pokud  $Y_1, Y_2, \dots$  je výstupní stochastický proces z jednoho běhu simulačního programu (replikace), kde  $Y_i$  je např. počet obslužených požadavků systémem v  $i$ -té hodině, pak daná  $Y_i$  v rámci jedné replikace mohou být závislá a mohou mít i různá rozdělení pravděpodobnosti. Je tedy nutno realizovat více nezávislých replikací se shodnými počátečními podmínkami a různými násadami generátorů náhodných čísel. Cílem výstupní analýzy je potom odhadnout rozdělení a parametry náhodných proměnných  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ . Např. odhad střední hodnoty proměnné  $Y_i$  po realizaci  $n$  replikací simulačního výpočtu provedeme s užitím následujícího vztahu:

$$\bar{y}_i(n) = \frac{\sum_{j=1}^n y_{ij}}{n}$$

Při zpracování výsledků simulací stochastických systémů by experimentátor měl vyhodnocovat data, která simulátor produkuje v tzv. ustáleném stavu (pokud tento pro daný simulovaný systém existuje) a z takto zpracovaných dat pak vytvářet závěry. Data produkovaná simulátorem v tzv. přechodovém stavu by se neměla do konečných výsledků promítat. Ustálené pravděpodobnostní rozdělení stochastického procesu je definováno takto: mějme výstupní stochastický proces  $Y_1, Y_2, \dots$  a podmíněné rozdělení pravděpodobnosti  $F_i$  dané vztahem  $I_0: F_i(y/I_0) = P(Y_i \leq y / I_0)$ . Jestliže  $F_i(y/I_0) \rightarrow F(y)$  pro  $i \rightarrow \infty$  a všechna  $y$  a  $I_0$ , pak  $F(y)$  představuje ustálené pravděpodobnostní rozdělení výstupního procesu  $Y_1, Y_2, \dots$

Naznačená konvergence teoreticky nastává v nekonečnu, v praxi však hledáme takové  $k$ , že rozdělení  $F_{k+1}, F_{k+2}, \dots$  jsou považována za shodná a tak výstupy  $Y_{k+1}, Y_{k+2}, \dots$  považujeme za výstupy ustáleného stochastického procesu.



Obrázek 2: Přechodový a ustálený stav výstupního procesu. Zdroj: [5]

Předchozí dva odstavce v podstatě pojednávají o tom, že experimentátora zajímá takové chování simulovaného stochastického systému, jež nezávisí na vstupních podmínkách. V praxi patrně většina simulovaných systémů vykazuje existenci přechodového stavu způsobeného pro daný proces "nestandardními" vstupními podmínkami (např. prázdná výrobní linka v okamžiku spuštění výroby, prázdný segment silniční sítě na počátku simulace atd.).

Nejčastěji aplikovaným postupem, jak se vypořádat s eliminací přechodových stavů, je provedení náběhu (zahřívání) simulujícího systému, tj. spuštění simulačního výpočtu v celkové délce trvání<sup>2</sup>  $t = t_z + t_u$ , kde  $t_z$  je doba zahřívání simulátoru a  $t_u$  je doba, během níž již simulátor produkuje ustálené výstupy. Při zpracování konečných výsledků simulace bereme v úvahu pouze výstupy zaznamenané v časovém úseku  $t_u$ , jehož délku rovněž považujeme za celkovou dobu simulačního výpočtu. Výsledky získané během časového úseku  $t_z$  nepoužijeme.

Alternativním, rovněž často aplikovaným řešením, je spuštění simulačního výpočtu po dobu  $t = t_r * n$ , kde  $t_r$  je plánovaná doba trvání jedné replikace a  $n$  je celkový počet replikací v rámci jednoho experimentu. Tedy namísto opakování  $n$  replikací je pak proveden pouze jeden běh simulačního programu, přičemž časové okamžiky  $t_i = t_r * i$  představují hranice mezi koncem  $i$ -té replikace a začátkem  $i+1$ -né replikace. Přitom konečný stavový prostor  $i$ -té replikace představuje počáteční stavový prostor  $i+1$ -né replikace (neprovádí se tedy "reset" systému).

<sup>2</sup> uvažujeme simulační čas

Z hlediska výstupní analýzy lze simulaci klasifikovat takto:

- A. Simulace s ukončením
- B. Simulace bez ukončení
  - i. s ustálenými parametry
  - ii. s ustálenými cyklickými parametry
  - iii. s jinými parametry

Při simulaci s ukončením existuje "přirozená" událost  $U$ , která ohraničuje délku každého běhu simulačního programu a po jejím výskytu např. nejsou data produkovaná simulátorem zajímavá, simulující systém je prázdný a podobně. Při simulaci bez ukončení taková událost neexistuje a charakteristikou chování simulujícího systému jsou ustálená rozdělení (a jejich parametry) výstupních stochastických procesů.

## 2.5 Určení počtu replikací simulačního experimentu

Dalším ze zásadních problémů, se kterými je třeba se vypořádat při experimentování se stochastickým simulačním modelem, je určení počtu replikací daného simulačního experimentu. Ten je determinován požadovanou přesností konečných výsledků při stanovené hladině významnosti. Jak již bylo řečeno výše, výsledkem realizace  $N$  replikací simulačního výpočtu je náhodná veličina s daným rozdělením pravděpodobnosti a parametry. Patrně nejčastěji sledovaným parametrem je střední hodnota, kterou odhadujeme aritmetickým průměrem. Počet replikací  $N$  je třeba stanovit takový, aby tato hodnota s danou pravděpodobností padla do stanoveného intervalu spolehlivosti  $< \bar{x} - \Delta; \bar{x} + \Delta >$  [17].

Šířka intervalu spolehlivosti  $\Delta$  je určena požadovanou přesností. Ta může být dána relativně (procentuálně) vůči odhadu střední hodnoty, nebo může být zadána konkrétní hodnotou. Pokud platí předpoklad normálního rozdělení výstupní náhodné veličiny, pro šířku intervalu platí následující vztah:

$$\Delta = \frac{s_{\bar{x}}}{\sqrt{N}} t_{1-\frac{\alpha}{2}; N-1}$$

Jeden z možných praktických postupů exaktního stanovení potřebného počtu replikací spočívá v postupném vykonávání sekvence replikací simulačního výpočtu, kdy po realizaci každé replikace je prostřednictvím výše uvedeného vztahu vypočtena šířka intervalu spolehlivosti (ze všech dosud získaných hodnot sledovaného statistického ukazatele) a následně je ověřeno, zda vypočtený odhad střední hodnoty sledovaného ukazatele padnul do tohoto intervalu spolehlivosti. Pakliže tomu tak není, je třeba provést další replikaci simulačního výpočtu a výše popsany proces opakovat. V opačném případě lze dosud provedený počet replikací simulačního výpočtu považovat za dostatečný.

Nicméně, vzhledem k tomu, že tato analýza zkoumá výsledky stochastických procesů, lze doporučit provedení ještě několika dalších replikací simulačního výpočtu a uvedeným způsobem prověřit dosaženou přesnost, aby případný výskyt odlehlejší hodnoty opět neposunul odhad střední hodnoty mimo interval spolehlivosti. V praxi je navíc vhodné zjištěný potřebný počet replikací případně mírně navýšit k zabezpečení určité rezervy v přesnosti získaných výsledků.

Závěrem této podkapitoly je třeba ještě poznamenat, že existují statistické metody, s jejichž pomocí lze získat prvotní přibližný odhad potřebného počtu replikací simulačního výpočtu realizovaný na základě analýzy výsledků několika málo provedených replikací simulačního výpočtu.

## 3 Softwarové nástroje pro podporu simulací silničních dopravních systémů

### 3.1 Přehled dostupných produktů

V tabulce níže je uveden (bez nároku na úplnost) přehled softwarových nástrojů specializovaných na podporu simulací silničních dopravních systémů. Cílem této práce není poskytnout jejich podrobný popis ani provádět jejich srovnání, proto tabulka obsahuje pouze názvy těchto produktů, odkazy na jejich výrobce a zařazení do příslušné kategorie z hlediska úrovně detailnosti simulace dopravních procesů.

Produkt	Výrobce URL	Úroveň detailnosti modelování
AAMOTION	Akcelik & Associates <a href="http://www.aatraffic.com/aaVIS/aaMotion.htm">http://www.aatraffic.com/aaVIS/aaMotion.htm</a>	Mikroskopický simulátor
AIMSUN	TSS - Transport Simulation Systems <a href="http://www.aimsun.com">http://www.aimsun.com</a>	Mikroskopický simulátor
CONTRAM	Mott MacDonald and TRL <a href="http://www.contram.com">http://www.contram.com</a>	Mezoskopický simulátor
CORSIM/TSIS	Vyvinuto pro instituci Federal Highway Administration <a href="http://ops.fhwa.dot.gov">http://ops.fhwa.dot.gov</a>	Mikroskopický simulátor
CUBE DYNASIM	Citilabs <a href="http://www.citilabs.com/dynasim/index.html">http://www.citilabs.com/dynasim/index.html</a>	Mikroskopický simulátor
INTEGRATION	Dr. Hesham Rakha <a href="http://www.filebox.vt.edu/users/hrakha/Software.htm">http://www.filebox.vt.edu/users/hrakha/Software.htm</a>	Mikroskopický simulátor
PARAMICS	SIAS <a href="http://www.sias.co.uk/sias/homepage.html">http://www.sias.co.uk/sias/homepage.html</a>	Mikroskopický simulátor
SATURN	Atkins <a href="http://www.saturnsoftware.co.uk">http://www.saturnsoftware.co.uk</a>	Makroskopický simulátor
TRANSMODELER	Caliper <a href="http://www.caliper.com">http://www.caliper.com</a>	Mikroskopický simulátor
TRANSYT7F	Akcelik & Associates <a href="http://www.aatraffic.com/transyt7f.htm">http://www.aatraffic.com/transyt7f.htm</a>	Makroskopický simulátor
VISSIM	The Traffic Group, Inc. <a href="http://www.trafficgroup.com">http://www.trafficgroup.com</a>	Mikroskopický simulátor
VISUM	PTV America <a href="http://www.ptvamerica.com">http://www.ptvamerica.com</a>	Mikroskopický simulátor

*Tabulka 1: Přehled softwarových nástrojů specializovaných na podporu simulací silničních dopravních systémů.*

Dále, již bez odkazů na výrobce, uvádím názvy dalších produktů, které se mi podařilo vyhledat v níže citovaných zdrojích: ANATOL, AUTOBAHN, BTS, CASIMIR, DRACULA, DYNAMIT-P, DYNAMIT-X, DYNASMART-P, DYNASMART-X, FLEXSYT-II, FREQ12, HIPERTRANS, HUTSIM, KRONOS, MELROSE, MESOTS, METACOR/METANET, MICROSIM, MICSTRAN, MITSIM, MIXIC, NEMIS, NETCELL, PADSIM, PASSER, PHAROS, PLANSIM-T, ROADSIM, SHIVA, SIGSIM, SIMDAC, SIMNET, SIMONE, SIMTRAFFIC, SISTM, SITRA-B, SITRAS, SMARTPATH, SYNCHRO, TEXAS, TRAF-CORFLO, TRANSIM, TRANSIMS, TRANSYT, TRARR, TWOPAS, VISTA, WATSIM. Kategorizaci výše vyjmenovaných simulátorů dle typu (makroskopický, mezoskopický, mikroskopický - viz níže) lze nalézt například v [19] a [26].



### 3.2 Klasifikace, kritéria volby vhodného nástroje

Jak již bylo řečeno, základem úspěchu realizace simulační studie je volba správného prostředí pro implementaci simulačního modelu. Při jeho výběru je třeba definovat relevantní kritéria a dle nich pak realizovat výběr vhodného softwarového nástroje. Mezi kritéria volby softwarového produktu specializovaného na podporu simulací silničního provozu můžeme řadit například následující:

- Požadovaná úroveň detailnosti simulace dopravních procesů - v praxi se zpravidla pro klasifikaci typu simulátoru z tohoto hlediska používá označení makroskopický, mikroskopický nebo mezoskopický simulátor. Makroskopický simulátor poskytuje z výše uvedených nejmenší úroveň detailnosti simulace dopravních procesů (tj. aplikuje nejvyšší míru abstrakce) a je zpravidla využíván pro simulace rozsáhlejších dopravních sítí, kdy jsou modelovány jen významnější silniční komunikace dopravního systému města včetně jejich napojení na okolí dopravního systému. Nástroje označované jako mikroskopický simulátor naopak nabízejí možnosti poměrně detailní simulace dopravních procesů (včetně dynamiky pohybu vozidel, chování řidičů atd.), přičemž aplikace tohoto typu jsou nasazovány především při simulacích omezených segmentů silničních sítí. Mezoskopický simulátor potom představuje určitou kombinaci výše uvedených přístupů.
- Způsob parametrizace simulačního modelu - ten musí být v souladu s daty, jež jsou k dispozici pro popis simulovaného systému (např. výsledky dopravního průzkumu), a to jak z hlediska obsahu, tak z hlediska formátu (popř. alespoň musí existovat způsob, jak tato data do vyhovujícího formátu převést).
- Požadované typy výstupů - je třeba posoudit, zda typy výstupů, které simulátor produkuje, budou vhodnými podklady pro vypracování závěrů simulační studie.
- Podpora animačních výstupů - pokud je požadováno, aby součástí realizace simulační studie bylo poskytnutí animačních výstupů, je třeba ověřit podporu 2D nebo 3D animace simulačního výpočtu.
- Cena a licenční politika dodavatele softwarového produktu - řešitel simulační studie musí rovněž hodnotit dostupné nástroje i z těchto hledisek, pakliže jeho práce má být rentabilní.
- Možnost exportu výstupních dat nebo napojení na databázi - pokud simulační výpočet produkuje větší množství dat a/nebo pokud tato data je třeba zpracovávat specifickým způsobem, je vhodné, pokud simulační software nabízí možnost exportu výstupů simulačního výpočtu nebo ještě lépe pokud tato data ukládá do databázového systému, k němuž je možno se připojit a s pomocí jazyka SQL výstupní data získávat a zpracovávat požadovaným způsobem.
- Zpřístupnění API nebo zabudovaná podpora skriptování - v případě, že pro implementaci simulačního modelu nelze vystačit s funkcemi, které daný softwarový nástroj nabízí a je zde předpoklad nutnosti některé další funkce naprogramovat, je nutné, aby tento nástroj zpřístupňoval programátorské rozhraní (API) nebo obsahoval zabudovanou podporu skriptování.
- Další specifické vlastnosti - s ohledem na povahu zadání je třeba zvážit další specifické vlastnosti simulačního nástroje určeného pro simulaci silničních dopravních systémů, např. podporu moderních prvků optimalizace a řízení silničního provozu, integraci podpory simulace městské hromadné dopravy dle daných jízdních řádů atd.

## 4 Mikroskopický simulátor silničních dopravních systémů AIMSUN

### 4.1 Přehled vlastností nástroje AIMSUN NG

AIMSUN NG<sup>3</sup> je sada softwarových nástrojů pro modelování a analýzu silniční dopravy plně integrovaná do prostředí jedné aplikace. Ústřední komponentou této sady je Aimsun Microscopic Simulator - mikroskopický simulátor silničních dopravních systémů. Aplikaci vyvíjí a dodává španělská společnost TSS - Transport Simulation Systems se sídlem v Barceloně.

Mikroskopický simulátor AIMSUN NG umožňuje vytvářet geometricky přesné modely silniční sítě a v průběhu simulačního výpočtu pak detailně modeluje dynamiku jízdy vozidel a variabilitu chování řidičů. Podporuje simulace všech běžných typů dopravy - osobní, nákladní, pěší i městskou hromadnou dopravu včetně městské kolejové dopravy. Pro jednotlivé typy mobilních entit realizujících příslušné typy dopravy lze specifikovat dynamiku jejich pohybu (zrychlení, zpomalení, maximální rychlost, ...) včetně míry její variability.

AIMSUN NG může být nasazen při modelování dopravy v segmentech silničních a dálničních sítí lokalizovaných jak ve městech, tak v extravilánu. Umožňuje modelovat i složitější topologie silničních sítí - komunikace s větším počtem jízdních pruhů a jejich křížení, kruhové objezdy, mimoúrovňové křížení komunikací a podobně. V průběhu simulačního výpočtu jsou potom při určování dynamiky jízdy vozidel brány v potaz faktory dané vlastnostmi sítě - sklon vozovky, rozhledová vzdálenost v místě křížení komunikací, přípustná rychlost při odbočení atd.

AIMSUN NG podporuje modelování silničního provozu řízeného dopravní signalizací, umožňuje při tom aplikovat pevné i adaptivní signální plány světelných křižovatek. Dále nabízí možnost využít v modelech některé moderní prostředky řízení a optimalizace provozu, jako např. proměnné dopravní značení (Variable Message Signs). Je zde rovněž k dispozici možnost automaticky generovat modelované výskyty dopravních nehod.

Simulační výpočet realizovaný v prostředí simulátoru AIMSUN NG produkuje řadu statistických ukazatelů. Ty jsou dostupné buď prostřednictvím uživatelského rozhraní vlastní aplikace, nebo je možno nastavit jejich ukládání do externího relačního databázového systému, kde je lze dále přímo zpracovávat prostřednictvím dotazovacího jazyka SQL. Průběh simulačního výpočtu lze vizualizovat ve formě pokročilé 2D nebo 3D animace, kterou je možno exportovat do digitálních videoformátů.

AIMSUN NG podporuje importy dat pocházejících z jiných aplikací, např. ze systému CAD a GIS, rastrová data či formáty dat jiných konkurenčních či komplementárních systémů zaměřených na oblast simulací dopravních systémů (EMME/2, CONTRAM, CUBE a SATURN). Součástí dodávky aplikace AIMSUN NG je i specifikace zpřístupněného API rozhraní, jehož prostřednictvím mohou uživatelé

---

<sup>3</sup> název odvozen zkrácením označení Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks - New Generation














































vyvíjet komponenty přidávající do aplikace nové funkce a eventuelně přímo propojovat AIMSUN NG s jinými informačními systémy.

Z hlediska architektury simulačního jádra kombinuje AIMSUN NG metodiku diskrétního i spojitého modelování simulovaných procesů. Simulační výpočet je řízen jednak metodou plánování událostí a jednak metodou snímání aktivit.

Předchozí verze systému AIMSUN dělily svoji funkcionalitu mezi několik samostatných softwarových aplikací (TEDI, AIMSUN, AIMSUN 3D, ...) a systém byl primárně vyvíjen pro platformu UNIX, přičemž pro jeho spuštění na platformě Microsoft Windows bylo nutno nainstalovat podpůrný emulátor. V nové verzi AIMSUN NG je vše integrováno do jediné aplikace a ta je již vytvářena primárně pro platformu MS Windows. Výrobce ve specifikacích k produktu člení funkce aplikace AIMSUN NG do 4 hlavních oblastí:

- AIMSUN MICROSCOPIC SIMULATOR - funkce týkající se vlastního simulátoru, o jehož vlastnostech převážně pojednává tato kapitola
- AIMSUN MODELLER - funkce editoru modelu simulovaného segmentu silniční sítě
- AIMSUN PLANNER - sada funkcí pro podporu dopravního plánování, analýzu dopravní poptávky a její rozložení na modelu dopravní sítě atd.
- AIMSUN SERVER - verze aplikace bez GUI dostupná prostřednictvím počítačové sítě, využívá se v situacích, kdy je třeba získávat výsledky simulací rychleji, než jak plyne reálný čas (využitelné pro operativní řízení dopravního provozu a pod.)

Následující tabulka poskytuje přehled o aktuálně dostupných verzích aplikace AIMSUN NG a jim odpovídajícím funkcionalitám. Další informace a kontakty na výrobce lze nalézt na domovských stránkách produktu - <http://www.aimsun.com>.

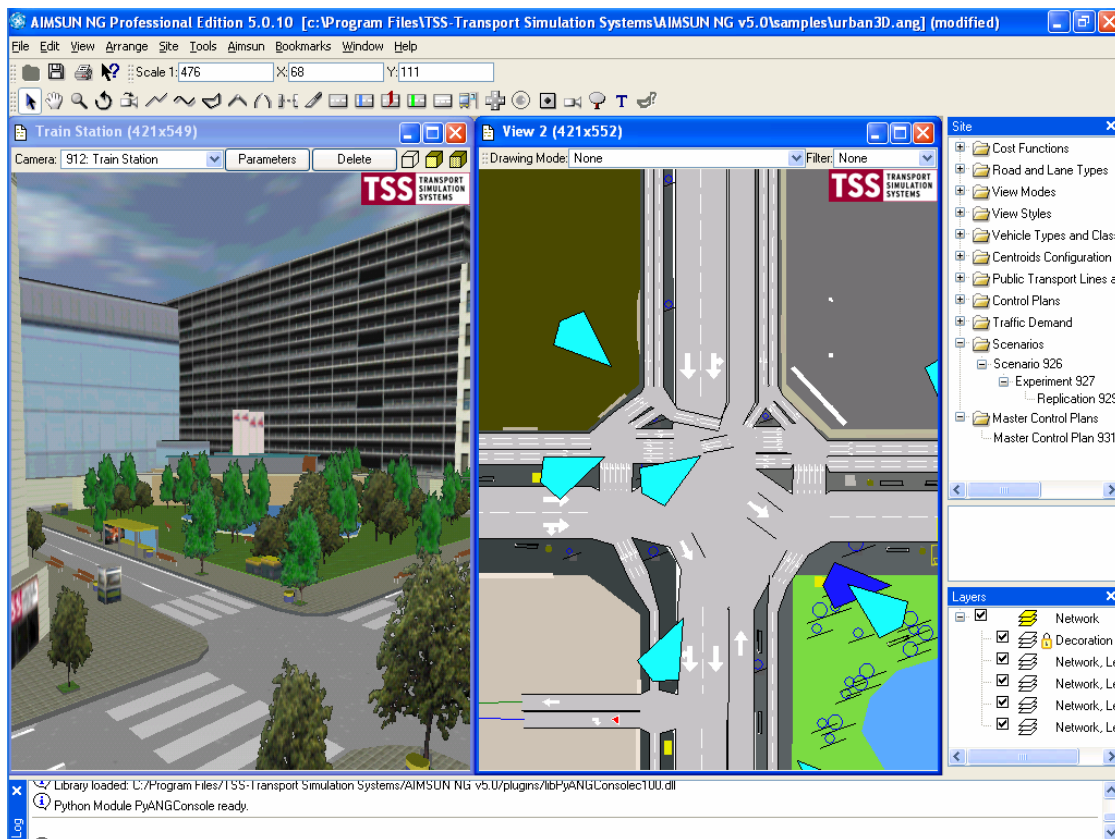
<b>Legenda:</b>  - Standardní součást  - Volitelná součást	<b>SMALL*</b>	<b>STANDARD*</b>	<b>PROFESSIONAL</b>	<b>ADVANCED</b>
AIMSUN Simulator				
3D				
Public Transport				
Traffic Management				
Server				
Parallel				
<b>PLANNING</b>				
AIMSUN Planner				
<b>INTERFACES</b>				
EMME/2				
TRANSIT/7F				
SCATS				
UTOPIA				
VS-PLUS				
<b>FILTERS</b>				
Detection				
CAD				
SATURN				
CUBE				
GIS				
<b>DEVELOPMENT</b>				
Scripting				
AIMSUN API				
AIMSUN NG SDK				

\* Verze SMALL resp. STANDARD mají určitá omezení - umožňují otevřít, editovat, uložit a spustit modely sítě s maximálně 10 uzly a 20 km úseků resp. s maximálně 100 uzly a 200 km úseků.

Tabulka 2: Přehled verzí aplikace AIMSUN NG. Zdroj: [11]

## 4.2 Základní principy implementace simulačního modelu v prostředí AIMSUN NG

Jak již bylo řečeno výše, všechny funkce softwarového nástroje AIMSUN NG jsou integrovány do prostředí jediné aplikace spustitelné pod operačním systémem MS Windows. Grafické uživatelské prostředí této aplikace přibližuje obrázek níže. Jsou na něm vidět - kromě řady standardních ovládacích prvků, jejichž význam z části vyplyne z následujícího výkladu - dvě okna umístěná na pracovní ploše aplikace. Okno vlevo obsahuje 3D pohled na simulační scénu, v okně napravo je potom 2D pohled na model. Vytvářet a modifikovat model silniční sítě je možné pouze ve 2D pohledu.



Obrázek 3: Ukázka grafického uživ. prostředí aplikace AIMSUN NG.

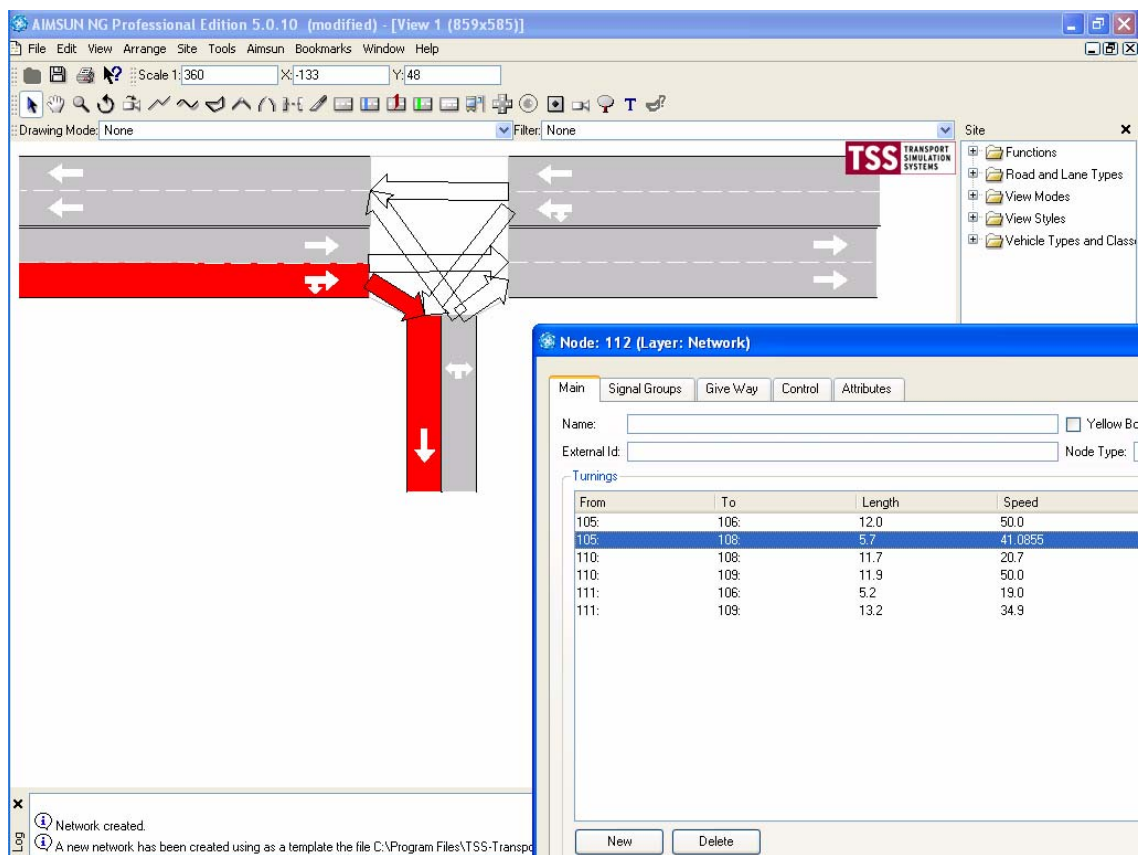
Vytvoření simulačního modelu v prostředí aplikace AIMSUN NG v podstatě znamená zadat do simulátoru všechny potřebné nebo volitelné vstupy. Jejich zadávání probíhá buď formou vkládání numerických a alfanumerických hodnot, nebo prostřednictvím vkládání grafických objektů představujících např. elementy silniční sítě a manipulací s nimi. Tyto vstupy bychom mohli rozdělit do 4 základních kategorií:

1. Geometrický popis modelovaného segmentu silniční sítě
2. Plán řízení dopravy v modelovaném segmentu - definování předností v jízdě, určení signálních plánů světelné signalizace atd.
3. Plán veřejné hromadné dopravy (definice linek, zastávek bus, jízdní řády)
4. Definice dopravní poptávky (intenzity a struktury dopravních proudů)

## 4.2.1 Vytvoření modelu infrastruktury zkoumaného segmentu sítě

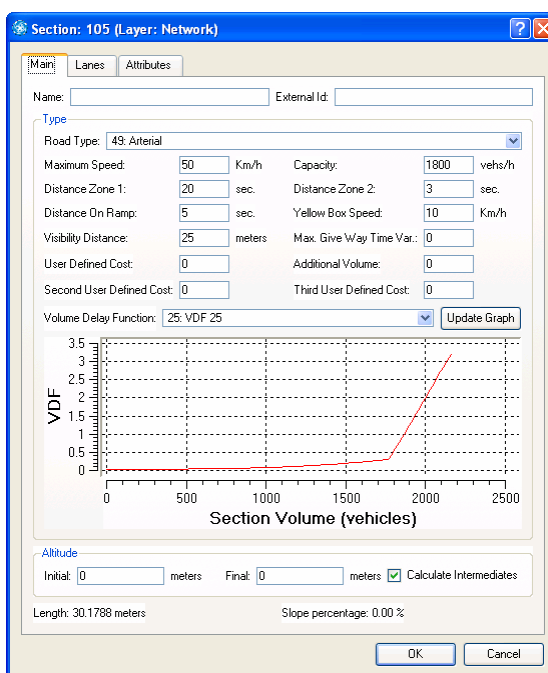
Základními stavebními kameny modelu silniční infrastruktury v prostředí aplikace AIMSUN NG jsou úseky (Section) a uzly (Node). Jejich rozmístování na pracovní ploše okna 2D pohledu na síť probíhá ve vizuálním režimu, tento proces je převážně realizován prostřednictvím polohovacího zařízení (myši). Pokud je k dispozici elektronický podklad s vykreslením geometrie sítě (naskenovaná mapa, data z GIS nebo v CAD formátu), pak je výhodné si tuto geometrii "podložit" v odpovídajícím měřítku pod vrstvu obsahující úseky a uzly, což zásadním způsobem usnadní vytváření přesného modelu silniční infrastruktury.

Následující obrázek prezentuje ukázkou vytvoření modelu relativně jednoduché stykové křižovatky, kdy na plochu modelu bylo umístěno 6 úseků, z toho 4 se dvěma jízdními pruhy. Dále zde byl umístěn uzel a bylo definováno napojení jednotlivých úseků sítě v rámci uzlu (křižovatky).



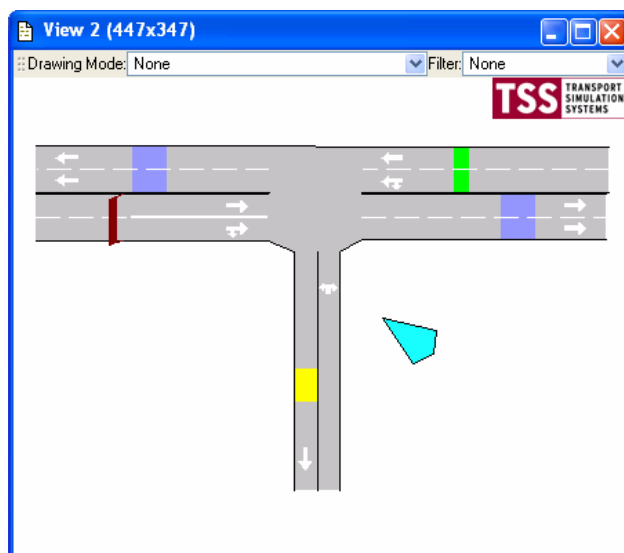
Obrázek 4: Modelování infrastruktury silniční sítě v prostředí aplikace AIMSUN NG.

Každý úsek sítě disponuje řadou atributů, které lze nastavit - např. max. povolená rychlost, počet a šířka jízdních pruhů, nadmořská výška začátku a konce úseku atd.



Obrázek 5: Nastavení atributů úseku sítě.

Na modelovanou síť je možno umístit některé další elementy - autobusové zastávky, detektory (snímače povahy provozu), kamery pro 3D pohledy, proměnné dopravní značení atd.



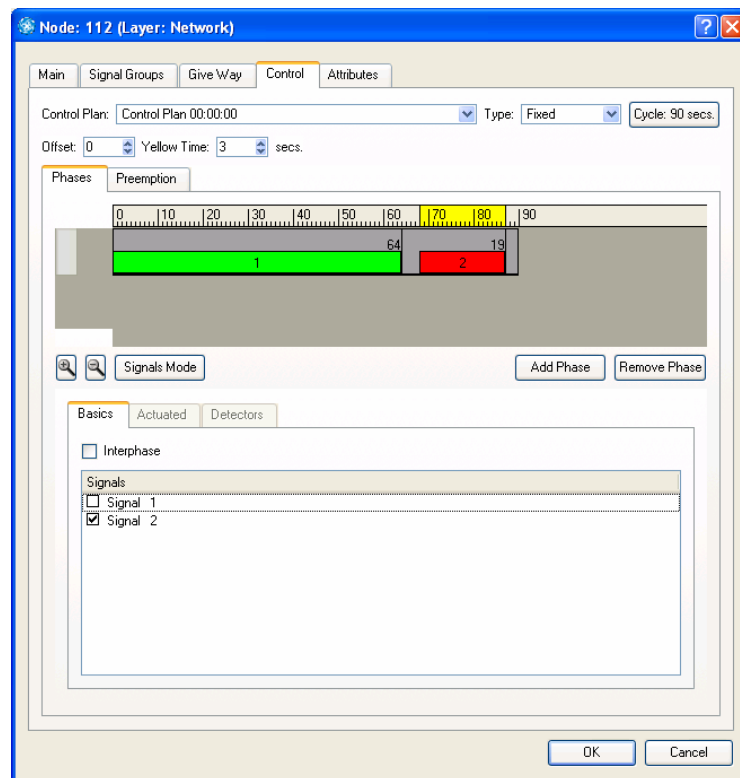
Obrázek 6: Další možné elementy zasazené do modelu silniční infrastruktury.

#### 4.2.2 Definování plánu řízení dopravy

Nastavení předností v jízdě i definování signálních plánů světelně řízených křižovatek se provádí při editaci vlastností uzlů. Ta odbočení na uzlech, jež dávají

přednost v jízdě jiným proudům, se označí příznakem Give Way nebo Stop. Na složitějších křižovatkách pak lze využít možnosti definovat vzájemné přednosti kolizních proudů v matici.

Definování signálních plánů pak představuje určení signálních skupin (záložka Signal Groups ve vlastnostech uzlu) a dále jejich zařazení do fází a určení délky a řazení fází (záložka Control) - viz následující obrázek. Implementované signální plány mohou mít složitější podobu, řízení světelné signalizace může být napojeno prostřednictvím API na externí aplikace atd. - tato problematika však přesahuje rámec tohoto stručného přehledu.



Obrázek 7: Definování fází signálního plánu křižovatky.

### 4.2.3 Zadání plánu veřejné hromadné dopravy

Zadání plánu veřejné hromadné dopravy spočívá v definování linek (tj. sekvencí úseků sítě), definování seznamů zastávek pro každou linku a definování jízdních řádů těchto linek. Vzhledem k tomu, že hromadná doprava v této diplomové práci není modelována, není nutno zde tuto oblast více přibližovat.

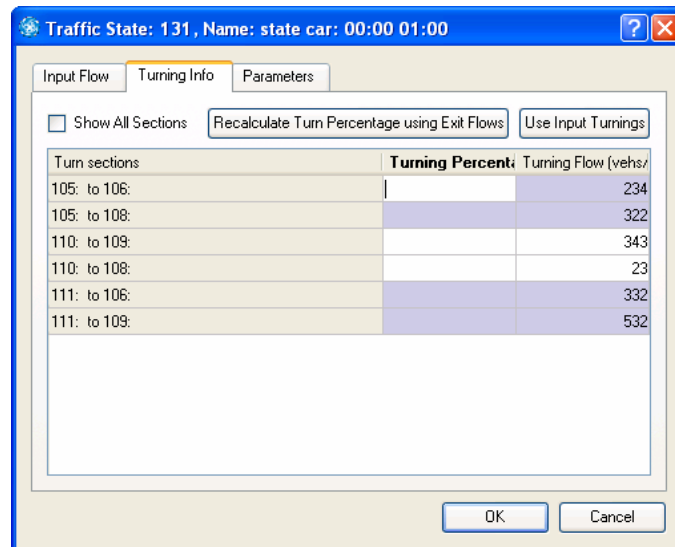
### 4.2.4 Definování dopravní poptávky

Definování dopravní poptávky, tedy určení intenzit, skladby a směrování dopravních toků v modelovaném segmentu silniční sítě, lze v prostředí aplikace AIMSUN NG realizovat prostřednictvím dvou různých přístupů. První z nich je založen na určení procentuálního rozpadu dopravních proudů v uzlech sítě spolu s určením vstupních toků na hraničních úsecích sítě. Tento přístup je v terminologii aplikace AIMSUN NG označován jako "Traffic State". Druhá metodika staví na využití tzv. centroidů - těžišť dopravy, tj. míst, ze kterých a do kterých jsou směřovány dopravní



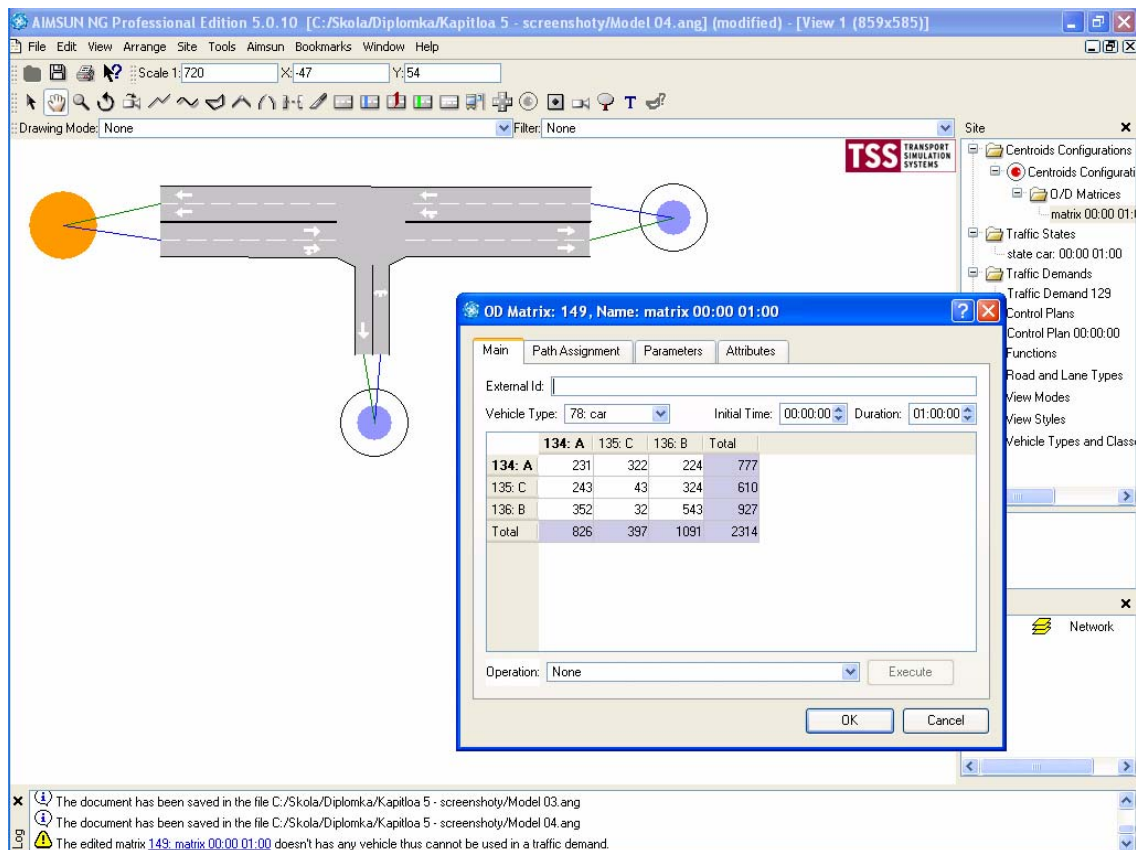
toky o příslušných intenzitách, a O/D matic (O/D je zkratkou pro Origin/Destination), které a tyto intenzity specifikují.

Následující obrázek zobrazuje dialogové okno pro nastavení rozpadu proudů v příslušném uzlu sítě - hodnoty lze zadat buď přímo procentuelně, nebo v konkrétních hodnotách. Pod záložkou Input Flow se potom skrývá podobná tabulka umožňující určit hodnoty vstupních toků na hraničních úsecích sítě.



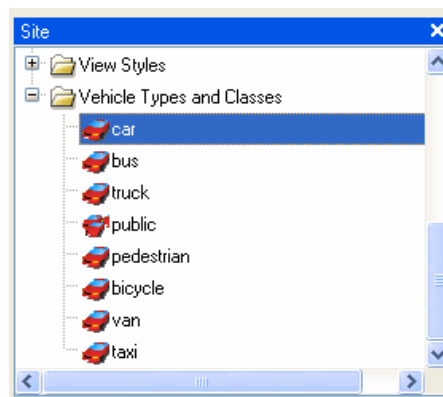
Obrázek 8: Určení rozpadu dopravních proudů v uzlu.

Další snímek obrazovky dokumentuje druhý možný přístup - v ilustračním modelu křižovatky byly rozmístěny tři centroidy, následně byly pojmenovány písmeny A, B a C a poté byla vytvořena O/D matice, která definuje toky mezi příslušnými centroidy.

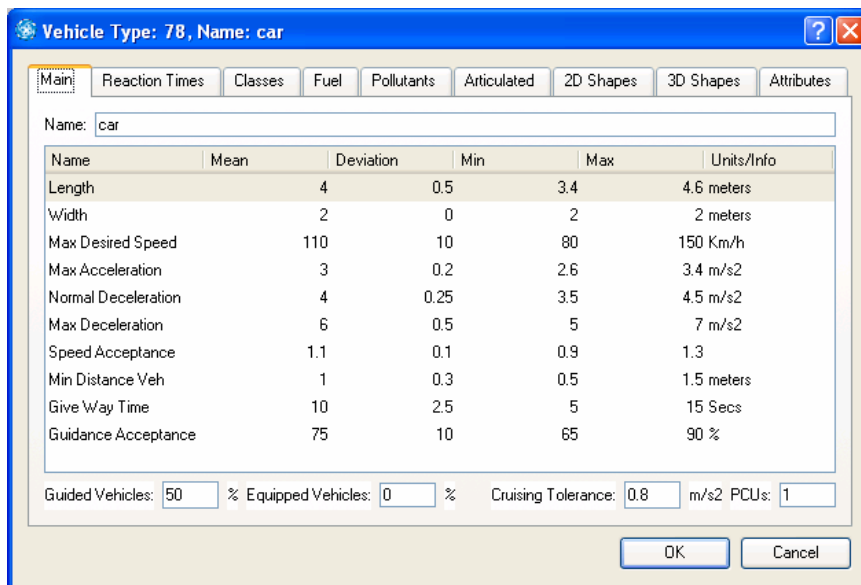


Obrázek 9: Úsek sítě s rozmístěnými centroidy a dialogové okno pro definování O/D matice.

Jak v případě "Traffic State", tak i v případě definování dopravní poptávky prostřednictvím O/D matic jsou hodnoty intenzit zadávány vždy zvlášť pro příslušný typ vozidla (osobní, nákladní, chodec, tramvaj, ...). Při modelování skladby dopravních proudů lze použít již definované typy, nebo je možno dodefinovat vlastní. Pro každý typ vozidla lze specifikovat jeho parametry, které určují mj. dynamiku jízdy a chování řidičů daného typu vozidla.



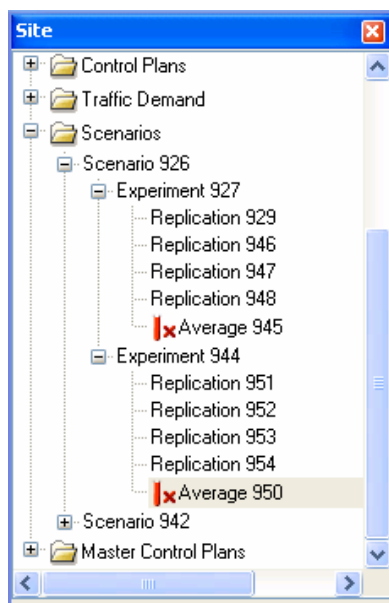
Obrázek 10: Typy a třídy vozidel.



Obrázek 11: Nastavení atributů pro příslušný typ vozidla.

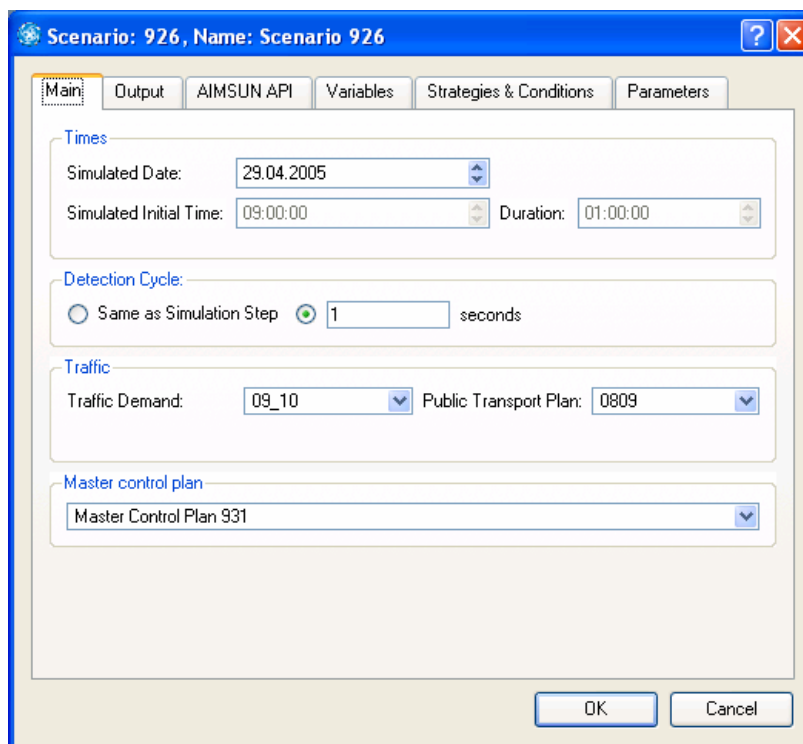
#### 4.2.5 Provádění simulačních experimentů

Zahájení fáze experimentování s vytvořeným simulačním modelem v prostředí aplikace AIMSUN NG spočívá v definování jednoho či více scénářů, v rámci každého scénáře pak jednoho či více experimentů a v rámci každého experimentu vytvoření jedné či více instancí replikací simulačního výpočtu - viz obrázek níže.

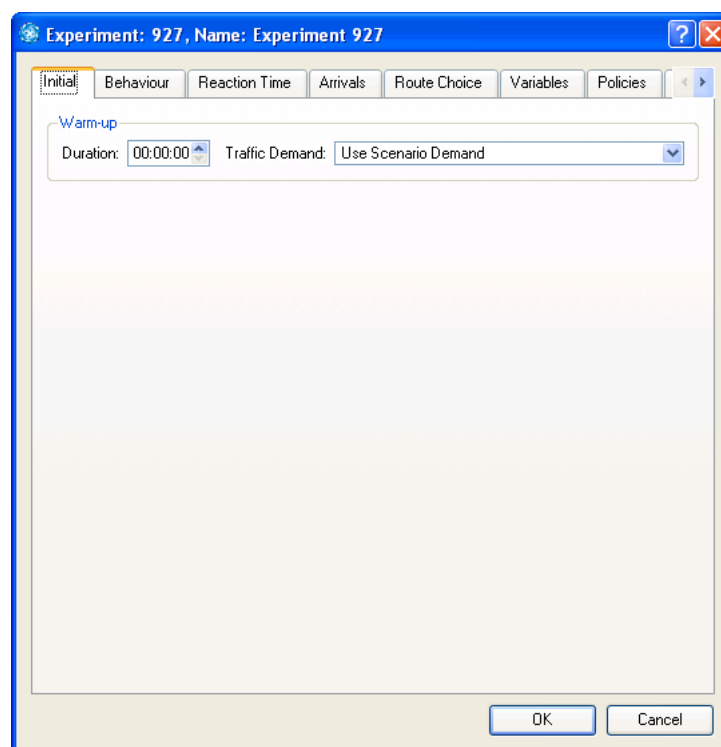


Obrázek 12: Rozhraní pro správu scénářů, experimentů a replikací simulačního výpočtu.

V příslušné definici scénáře, experimentu či replikace lze potom nastavovat celou řadu parametrů - to spočívá v přiřazení příslušného plánu řízení dopravy, přiřazení plánu veřejné hromadné dopravy, určení aplikované dopravní poptávky, nastavení délky simulačního výpočtu, doby náběhu simulačního výpočtu, určení simulačního kroku, definice sledovaných statistiky atd.

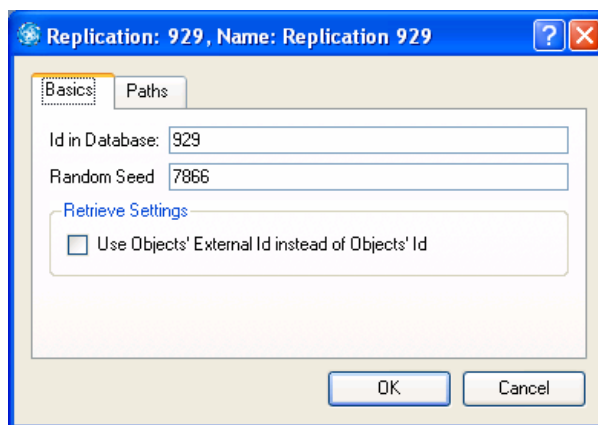


Obrázek 13: Parametrizace scénáře.



Obrázek 14: Parametrizace experimentu.

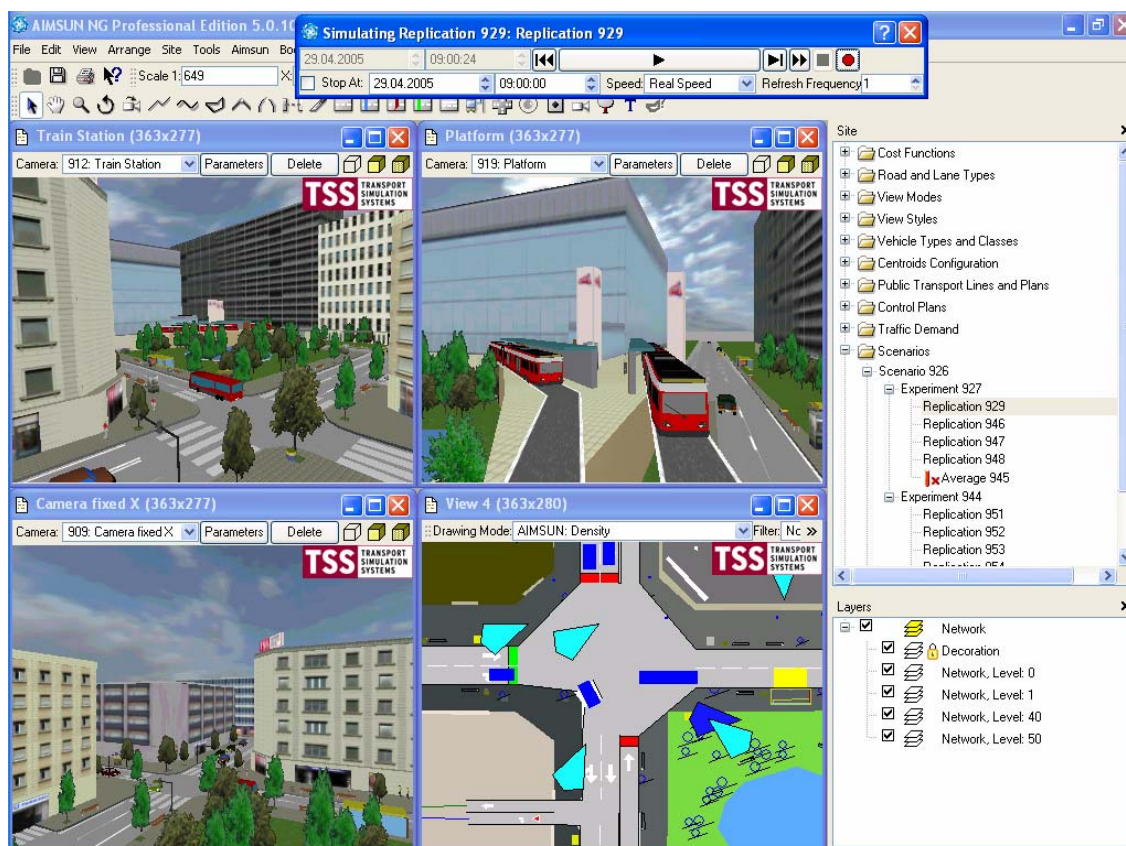
Technická poznámka: při experimentování se simulačními modely při zpracování této diplomové práce jsem zjistil, že na chování modelu a výsledky experimentů má poměrně značný vliv nastavení hodnoty simulačního kroku (dialog. okno Experiment). V rozporu s mým očekáváním mělo nastavení nejmenší hodnoty simulačního kroku (tj. 0,1 sekundy) za následek to, že simulátor produkoval výstupy, které se mnohem více rozcházely s hodnotami zjištěnými analytickým výpočtem (viz kapitola 6) ve srovnání s výstupy produkovány při výrobce nastavené hodnotě simulačního kroku (0,75 sekundy). Tomuto jevu bych doporučoval věnovat zvýšenou pozornost při nasazení aplikace AIMSUN NG v "ostrých" projektech, případně toto ještě konzultovat s výrobcem.



Obrázek 15: Dialogové okno pro nastavení vlastností replikace simulačního výpočtu.

Poté, co jsou definovány všechny parametry naplánovaných experimentů, je možno spustit simulační výpočet. Pokud je požadována jeho animace, lze spustit výpočet pouze jediné zvolené replikace. Animaci lze přitom sledovat v jednom či více oknech současně, přičemž v příslušném okně je buď 2D nebo 3D animační scéna. V případě 3D scén se vždy jedná o pohled jedné z mnoha kamer, jejichž pozici a úhel pohledu lze určit.

Pokud animace není požadována, lze simulační výpočet spustit v dávkovém režimu, kdy jsou bez nutnosti jakýchkoli zásahů experimentátora automaticky postupně realizovány běhy všech naplánovaných a dosud neprovedených replikací simulačního výpočtu.



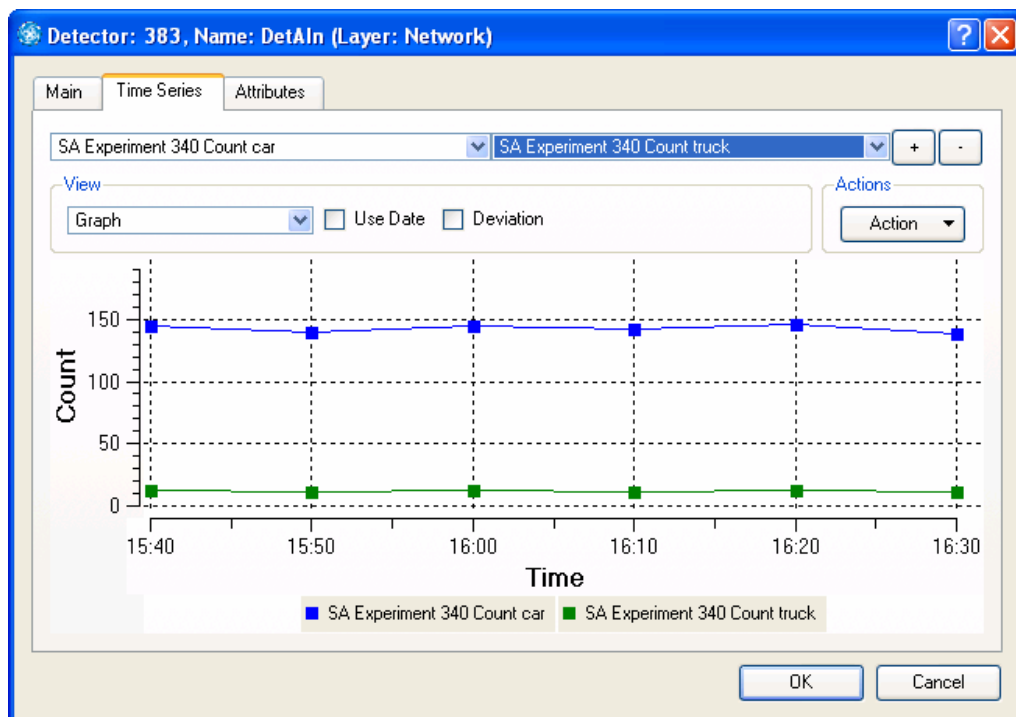
Obrázek 16: Ukázka 2D a 3D animace simulačního výpočtu.

## 4.2.6 Výstupy ze simulačních experimentů

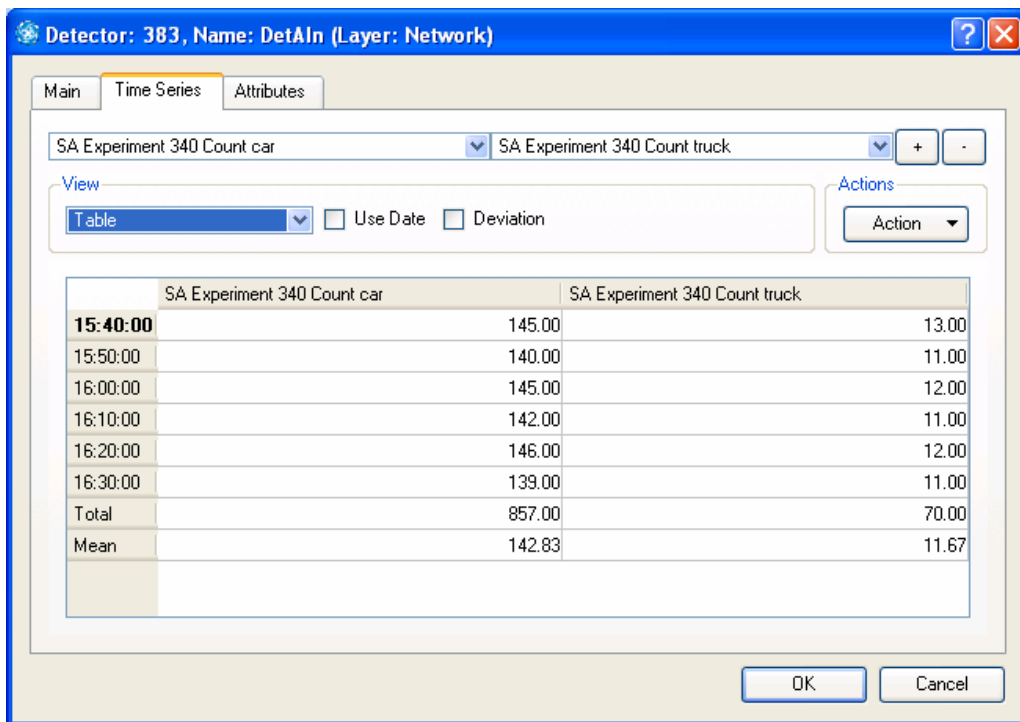
Výsledky simulačních experimentů realizovaných v aplikaci AIMSUN NG lze vyhodnocovat dvěma způsoby:

- analýzou číselných statistických ukazatelů,
  - prostřednictvím zobrazení v dialogovém okně "Time Series" - buď v podobě tabulky nebo v podobě 2D grafu či regresní křivky,
  - prostřednictvím zpracování statistických dat uložených v připojené relační databázi,
- analýzou vizualizovaných výsledků, kdy příslušné ukazatele jsou zobrazovány přímo na 2D modelu dopravní sítě v podobě čísel nebo v podobě barevných zvýraznění objektů (úseků, uzlů atd.) či odlišných způsobů vykreslení.

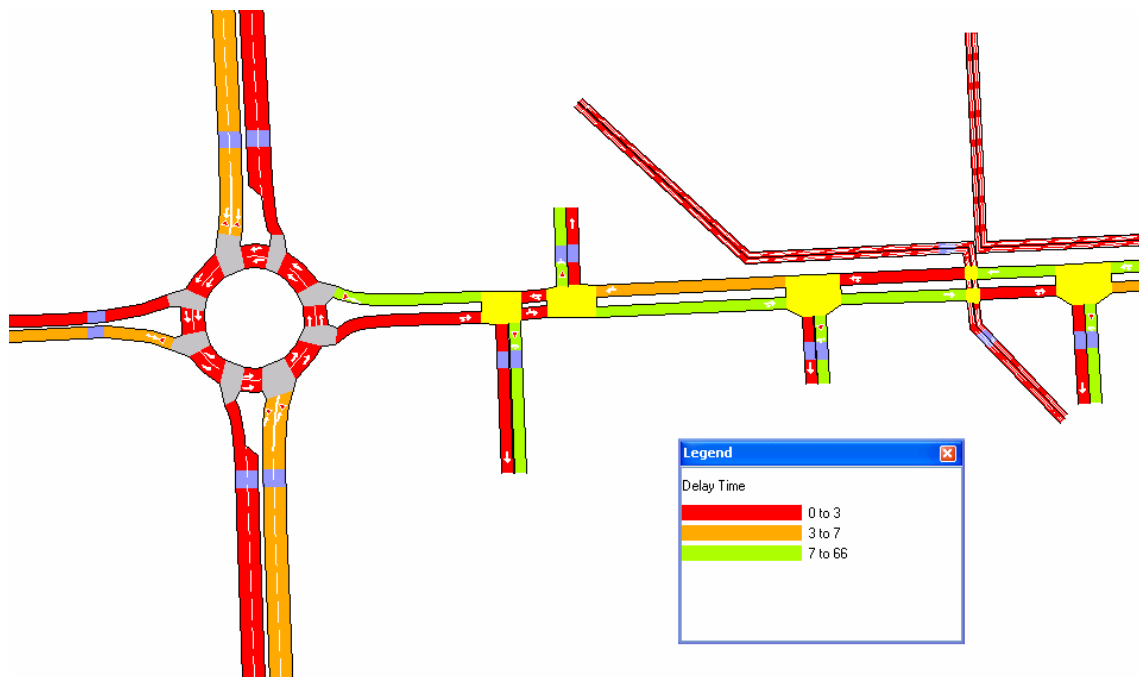
Příslušné statistické ukazatele lze přitom sledovat z hlediska různých úrovní modelu - např. pro celou zkoumanou síť, pro jednotlivé úseky, pro definované sekvence úseků atd. každou hodnotu lze dále sledovat pro všechny nebo pro vybraný typ vozidla, rovněž je možno výsledky členit podle jednotlivých replikací nebo lze pracovat s průměrnými hodnotami vypočtenými pro celý experiment. Tabulka č. 3 na konci této kapitoly poskytuje přehled statistických ukazatelů, které lze v prostředí aplikace AIMSUN NG získat jako výstupy ze simulačních experimentů.



Obrázek 17: Zobrazení vybraných statistických ukazatelů v okně "Time Series".



Obrázek 18: Stejná data v okně "Time Series" zobrazená v tabulce.



Obrázek 19: Statická vizualizace sledovaných ukazatelů na modelu sítě.



Označení ukazatele v terminologii AIMSUN NG	Český překlad	Popis	Křížky označují domény, pro které lze daný ukazatel sledovat				
			Celá síť	Úseky a odboč. směry	Streams (sekvence úseků)	O/D matice	Veřejná doprava
Mean Flow	Průměrný tok [voz]	Průměrný počet vozidel, která za 1 hodinu projedou sítí resp. úsekem resp. sekvencí úseků (jsou počítána v okamžiku, kdy opouštějí síť resp. úsek atd.)	x	x	x	x	x
Density	Hustota [voz/km]	Průměrný počet vozidel na 1 km sítě resp. úseku resp. sekvence úseků	x	x	Ne	x	Ne
Mean Speed	Průměrná rychlost [km/hod]	Průměrná rychlost - vypočítána pro všechna vozidla, která projela sítí resp. úsekem resp. sekvencí úseků	x	x	x	x	x
Harmonic Mean Speed	Harmonická průměrná rychlost [km/hod]	Harmonická průměrná rychlost - vypočítána pro všechna vozidla, která projela sítí resp. úsekem resp. sekvencí úseků	x	x	x	x	x
Travel Time	Čas jízdy [sec]	Průměrný čas, který vozidlo potřebovalo na ujetí 1 km. Vypočítáno pro všechna vozidla, která projela sítí resp. úsekem resp. sekvencí úseků.	x	x	x	x	x
Delay Time	Časová ztráta [sec]	Průměrná časová ztráta na 1 km jízdy - rozdíl doby, kterou vozidlo v průměru potřebovalo na ujetí 1 km jízdy a doby, za kterou by stejnou trasu ujelo v ideálních podmínkách	x	x	x	x	x
Stop Time	Doba strávená stáním [sec]	Průměrný čas, který vozidlo strávilo stáním na 1 ujetý km	x	x	x	x	x
Number of Stops	Počet zastavení	Průměrný počet zastavení vozidla na 1 km jízdy	x	x	x	x	x
Total Travel	Celková ujetá vzdálenost [km]	Celkový počet kilometrů ujetých všemi vozidly - vztaženo buď na celou síť, daný úsek nebo danou sekvenci úseků	x	x	x	x	x
Total Travel Time	Celkový čas na cestě [hod]	Celkový čas jízdy (doba pobytu v síti resp. na daném úseku resp. na dané sekvenci úseků) - součet pro všechna vozidla	x	x	x	x	x
Fuel Consumed	Spotřeba paliva [litry]	Celkové množství paliva, které spotřebovala všechna vozidla, která projela sítí resp. úsekem resp. sekvencí úseků	x	x	x	x	x
Pollution Emitted	Emise škodlivin [kg]	Celkové množství škodlivin v kilogramech vyprodukované vozidly, která projela sítí resp. úsekem resp. sekvencí úseků	x	x	x	x	x
Mean Queue Length	Průměrná délka fronty [voz]	Průměrná délka fronty na daném úseku - vyjádřeno jako počet vozidel v jednom jízdním pruhu	Ne	x	Ne	Ne	Ne
Maximum Queue Length	Maximální délka fronty [voz]	Maximální délka fronty na daném úseku - vyjádřeno jako počet vozidel v jednom jízdním pruhu	Ne	x	Ne	Ne	Ne

Tabulka 3: Přehled statistických ukazatelů, které lze sledovat v prostředí aplikace AIMSUN NG. Zdroj: [7]



## **5 Případová simulační studie - Studentská ulice**

### **5.1 Úvod k simulační studii**

Hlavní náplní této diplomové práce je realizace případové simulační studie s cílem demonstrovat využití experimentální výzkumné metody simulace pro podporu dopravního inženýrství a při tom poukázat na to, jaké ukazatele uplatnitelné v dopravním inženýrství tato metoda může poskytnout. Na základě konzultace s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že se konkrétně bude jednat o realizaci studie kapacitního prověření variant navrhovaného dopravního řešení ulice Studentská v Pardubicích.

Tato studie již byla v minulosti<sup>4</sup> zpracována (s využitím počítačové simulace) Dopravní fakultou Jana Pernera Univerzity Pardubice (dále DFJP). Tehdy použité implementační prostředí - simulátor Villon<sup>5</sup> - však modeluje přemíst'ovací procesy s uplatněním vyšší míry abstrakce ve srovnání s prostředím, jež bylo použito v této práci (tj. mikroskopický simulátor silničních dopravních systémů AIMSUN NG). Realizace shodně zaměřené studie v rámci této diplomové práce by tedy měla poskytnout její alternativní vypracování s možností vzájemného srovnání výsledků a závěrů, přičemž lze očekávat určité zpřesnění dosažených výsledků díky nasazení více specializovaného simulačního nástroje.

Při implementaci simulačního modelu, plánování experimentů a parametrizaci modelu se zde vychází z podkladů publikovaných v závěrečné zprávě a dokumentaci k výše uvedené realizaci simulační studie dopravního řešení ulice Studentská provedené DFJP [3].

Text dále v této kapitole je členěn tak, aby jednotlivé podkapitoly svým obsahem přibližně odpovídaly jednotlivým fázím realizace simulační studie, jak to bylo popsáno výše v kapitole 2.2.

### **5.2 Formulace problému a vymezení objektu zkoumání**

V posledních letech se intenzivně pracuje na plánech modernizace, rozvoje a optimalizace silniční dopravní sítě města Pardubice. Zatímco koncepce vnější dopravní sítě je v zásadě vyřešena, problematika koncepce vnitřní dopravní sítě je dosud předmětem odborného zkoumání.

V rámci této případové simulační studie by mělo být provedeno kapacitní posouzení jednoho navrhovaného dopravního řešení segmentu vnitřní silniční sítě v oblasti kampusu Univerzity Pardubice v městské části Polabiny.

---

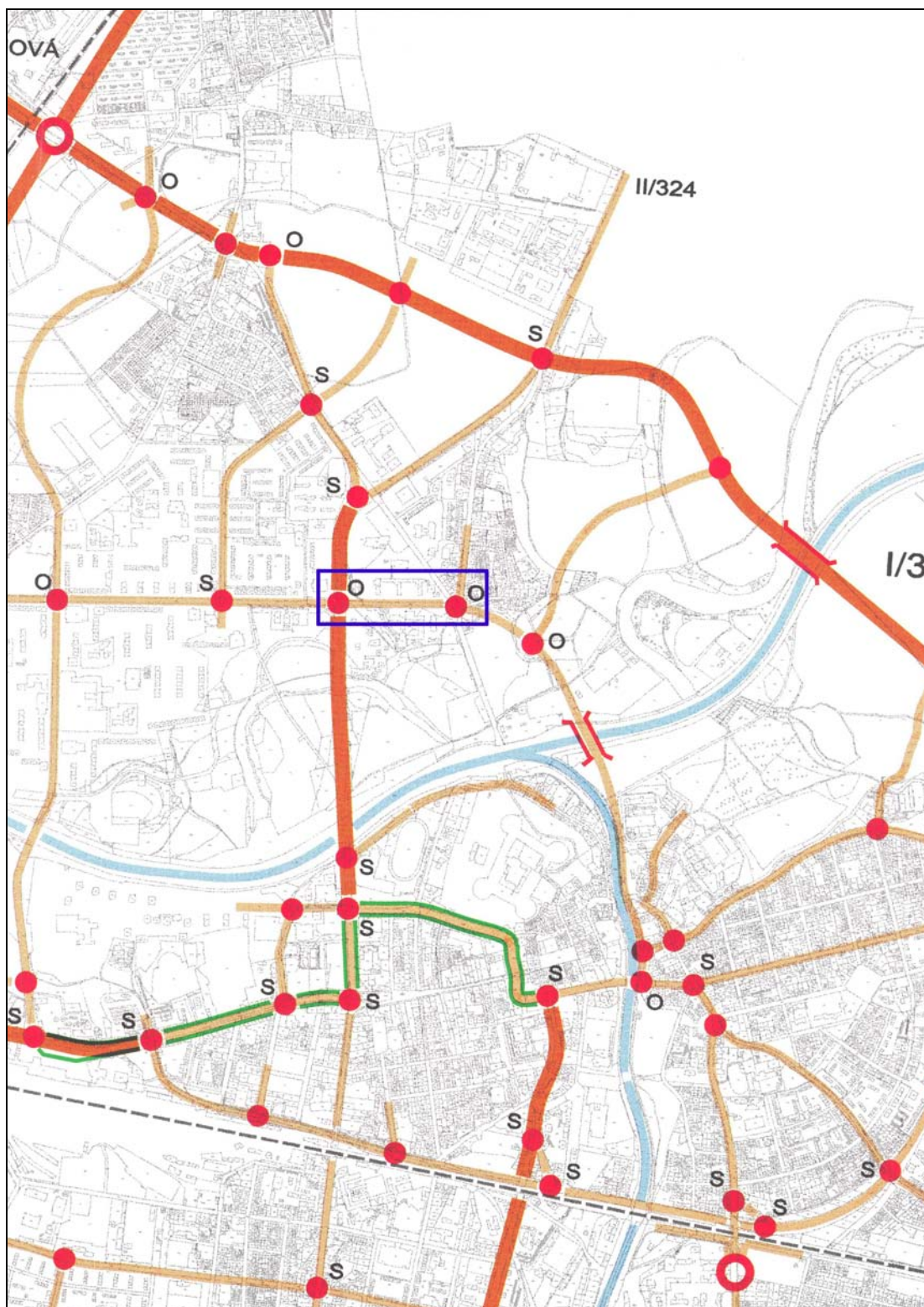
<sup>4</sup> v roce 2004

<sup>5</sup> simulátor Villon je primárně určen pro simulace dopravy v železničních uzlech, lze jej však využít i na simulace silniční dopravy [25]

Objekt zkoumání, na nějž je simulační studie zaměřena, lze vymezit jako souvislou podsíť (spolu s prognózovaným provozem na této podsíti) navrhované dopravní sítě města Pardubice, jež sestává z:

- dvoupruhové silniční komunikace (ulice Studentská) a k ní přiléhající části odbočných komunikací,
- dvou okružních křižovatek, do nichž je ulice Studentská zaústěna,
- částí ostatních silničních komunikací, které jsou rovněž zaústěny do těchto okružních křižovatek,
- jednoho resp. dvou přechodů pro chodce na ulici Studentská.

Následující dvě vyobrazení jednak vytyčují tuto zájmovou oblast v širším kontextu plánovaného řešení vnitřní dopravní sítě města Pardubice a dále přibližují dvě alternativy posuzovaného dopravního řešení Studentské ulice.

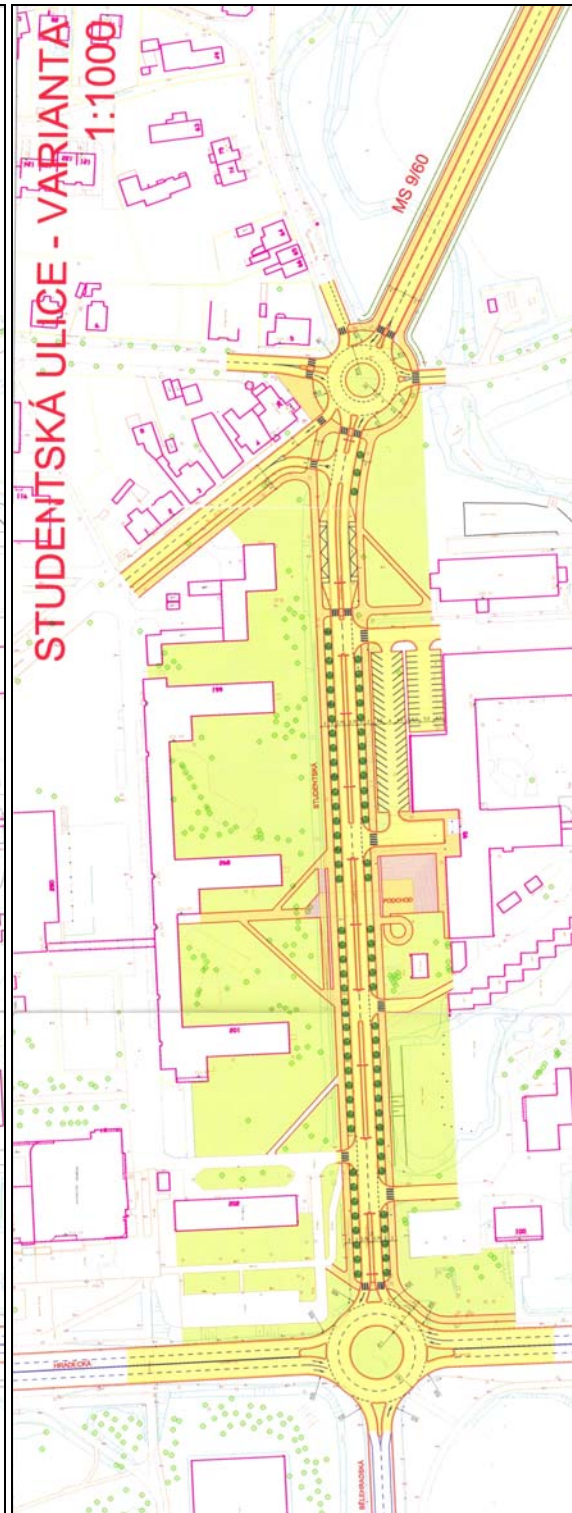


Obrázek 20: Vymezení objektu zkoumání – podsít tzv. 5. varianty komunikačního systému města Pardubic navržené firmou Highway Design (viz modře orámovaná oblast) . Zdroj: [12]





Obrázek 21: Dopravní řešení Studentské ulice (návrh firmy Highway Design).  
Zdroj: [12]



Obrázek 22: Alternativa dopravního řešení Studentské ulice s podchodem (návrh firmy Highway Design). Zdroj: [12]

### 5.3 Stanovení cílů případové simulační studie

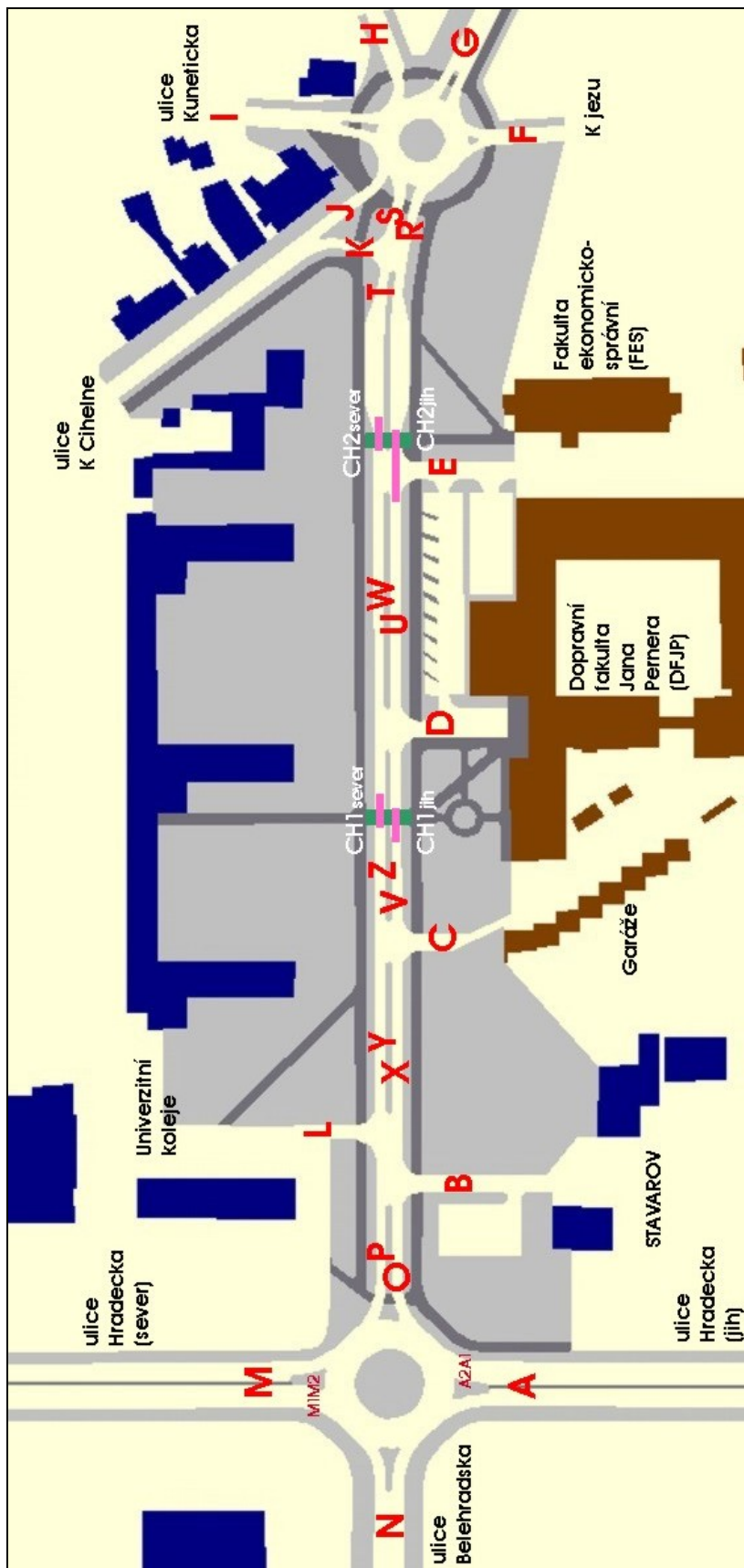
Hlavním cílem této simulační studie je kapacitně prověřit charakter silničního provozu ve špičkové hodině na ulici Studentská a přilehlých komunikacích pro tzv. 5. variantu komunikační sítě města navrženou firmou Highway Design Hradec Králové a to při prognózovaných intenzitách a strukturách dopravních proudů pro rok 2020 (tyto hodnoty jsou převzaty z [3]).

Zásadní otázkou, kterou má simulační studie zodpovědět, je, zda navrhované řešení zkoumaného segmentu silniční sítě bude kapacitně vyhovující, tedy zda při výše zmíněných intenzitách dopravních proudů umožní plynulý provoz bez zahlcování. Vyslovený závěr je třeba podložit příslušnými dopravně-inženýrskými ukazateli.

### 5.4 Vymezení zkoumaného systému

Pro účely vypracování této simulační studie je nutno na výše specifikovaném objektu zkoumání vymežit zkoumaný systém, jež abstrahuje od těch vlastností, struktur a procesů objektu zkoumání, jež nejsou z hlediska studovaného problému významné. Vymezený zkoumaný systém v případě této simulační studie zahrnuje následující prvky a procesy:

- Stabilní permanentní prvky - úseky dopravní infrastruktury zkoumaného segmentu silniční sítě, přičemž každému úseku je přiřazen jednoznačný alfanumerický identifikátor. Jsou definovány rozměry jednotlivých úseků a jejich vzájemné geometrické uspořádání (v realitě), rovněž jsou pro každý úsek dány maximální povolené rychlosti pro příslušný typ mobilního prvku, který se po něm může pohybovat. Značení uvedených úseků je podchyceno na obr. 23.
- Mobilní temporární prvky - osobní a nákladní automobily a chodci, pohybující se předepsaným způsobem po vymezených úsecích silniční infrastruktury resp. přechodech pro chodce.
- Procesy - v této simulační jsou uvažovány pouze procesy přemísťování mobilních temporárních prvků po dopravní infrastruktuře. Z tohoto hlediska lze dynamiku zkoumaného systému popsat jako souhrn interagujících procesů přemísťování jednotlivých temporárních prvků.
- Okolí zkoumaného systému - prvek, od jehož struktury abstrahujeme. Pro daný zkoumaný systém je okolí zajímavé tím, že jsou jím generovány mobilní temporární prvky, které do systému vstupují (a zahajují tak jednotlivé přemísťovací procesy) a následně do okolí vystupují (jsou jím absorbovány), čímž jsou přemísťovací procesy ukončovány. V rámci zavedeného značení úseků studovaného segmentu silniční sítě může docházet k zahajování resp. ukončování přemísťovacích procesů osobních a nákladních vozidel na množině úseků  $U_s = \{A, M, N, B, C, D, E, F, G, H, I, K, L\}$  resp.  $U_k = \{A, M, N, B, C, D, E, F, G, H, I, J, L\}$ . Množinu studovaných interagujících dopravních proudů pak tvoří kartézský součin  $P_1 = U_s \times U_k$ . Pro chodce lze definovat množinu studovaných proudů (jež spolu vzájemně neinteragují) jako  $P_2 = \{[CH1sever, Ch1jih], [CH1jih, CH1sever], [CH2sever, CH2jih], [CH2jih, CH2sever]\}$ . Dále dochází k interakcím mezi proudy množiny  $P_2$  a některými proudy z množiny  $P_1$ .



Obrázek 23: Identifikace komunikací a jejich částí pro účely značení dopravních proudů. Zdroj: [3]

## **5.5 Výběr implementačního prostředí**

Vyvinout kvalitní software umožňující implementaci netriviálních simulačních modelů silničních dopravních systémů "od základu", tedy např. v nějakém vyšším programovacím jazyce, by jistě byla velmi náročná a zřejmě i neekonomická záležitost (v případě nedostatečného vyřízení výsledného produktu). Proto volba vhodného prostředí pro implementace těchto modelů většinou směřuje k některému z již existujících softwarových nástrojů specializovaných na podporu simulací této třídy systémů. Přehled řady nejznámějších produktů spadajících do uvedené kategorie byl podán v kapitole 3.1.

Vymezený zkoumaný systém v rámci této simulační studie je představován omezeným, relativně malým segmentem silniční sítě a je zde třeba poměrně detailně simulovat pohyby a interakce jednotlivých mobilních prvků. To indikuje nutnost dále omezit výběr na podmnožinu uvedeného typu nástrojů, a sice na ty, jež lze klasifikovat jako mikroskopické simulátory silničních dopravních systémů.

Pro účely realizace případové simulační studie v rámci vypracování této diplomové práce byla volba softwarového nástroje v podstatě předepsána - konkrétně produkt AIMSUN NG, jehož výrobcem je španělská společnost TSS - Transport Simulation Systems.

Software AIMSUN NG splňuje výše uvedené požadavky, dokonce je v současnosti považován za jeden z nejlepších existujících mikroskopických simulátorů silničního provozu a je také často nasazován při realizacích simulačních studií v rámci České Republiky. Jeho obecné vlastnosti jsou přiblíženy v kapitole 4.1, základní principy implementace simulačních modelů v tomto prostředí pak popisuje kapitola 4.2.

Z hlediska realizace této simulační studie se nejví jako nutné či opodstatněné vytvářet konceptuální model (s využitím neimplementačního formalismu), v dalších fázích je tedy přistoupeno k implementaci simulačního modelu přímo v prostředí aplikace AIMSUN NG.

## **5.6 Zpracování vstupních dat pro simulační model**

Vstupními daty pro implementovaný simulační model jsou prognózy intenzit a struktur dopravních proudů osobních a nákladních vozidel projíždějících zájmovým segmentem silniční sítě a dále intenzit proudů chodců přecházejících ulici Studentská na dvou resp. jednom přechodu pro chodce v roce 2020 ve špičkové hodině, tj. v čase od 15:30 do 16:30 hodin.

Protože součástí náplně této diplomové práce není provedení vlastního dopravního průzkumu ani výpočet předpokládaného nárůstu intenzit dopravních proudů, byla tato data kompletně převzata ze studie vypracované na Univerzitě Pardubice [3]. První verzi těchto prognóz zpracovala firma DHV CR, s.r.o. Praha [27]. V rámci realizace výše citované studie pak byl jejími řešiteli proveden ve zkoumané lokalitě vlastní dopravní průzkum a na jeho základě byly tyto hodnoty ještě zpřesněny. Výsledné hodnoty prognózovaných intenzit jsou uvedeny v následujících tabulkách.

	A	B	C	D	E	F	G	I	J	L	M	N	O	P	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
855	A										518	212	125										
39	B									0				29							10		
4	C																		1			3	
10	D																	3					7
70	E														45					25			
34	F						13	8	0							13							
451	G					8		37	21							385							
9	H					0	0	0	0							9							
120	I					2	27		12							79							
52	K														14		38						
18	L									2				12							4		
514	M	387										42	85										
361	N	112									66		183										
393	O									11											331		
582	P	110									151	321											
394	R					9	238	79	43							25							
511	S																511						
549	T																						
343	U																						
346	V																						
346	V																						
543	W																						
345	X																						
549	Y																						
548	Z																						
	A	609	59	2	8	39	19	278	124	76	13	735	575	393	582	394	511	549	346	543	345	546	548
	B																						
	C																						
	D																						
	E																						
	F																						
	G																						
	H																						
	I																						
	J																						
	K																						
	L																						
	M																						
	N																						
	O																						
	P																						
	Q																						
	R																						
	S																						
	T																						
	U																						
	V																						
	W																						
	X																						
	Y																						
	Z																						

Tabulka 4: Intenzity proudů osobních automobilů ve špičkové hodině. Zdroj: [3]



	A	B	C	D	E	F	G	I	J	L	M	N	O	P	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
62	A										37	8	17										
2	B									0				1							1		
0	C																		0			0	
0	D																	0					0
3	E														1				2				
2	F					0	0	0	0							2							
54	G				0		2	1								51							
0	H				0	0	0	0								0							
4	I				0	2		0								2							
6	K														3		3						
2	L	2												0							0		
59	M	36										8	15										
60	N	8								2	10		42										
74	O	3																			69		
68	P	17									13	38											
69	R				0	56	3	1								9							
64	S																64						
67	T				0															67			
68	U				3										65								
68	V																	68					
69	W																						69
70	X																						
69	Y													67					68				
69	Z									0												69	
A	61	7	2	0	3	0	58	5	2	2	60	54	74	68	69	64	67	68	68	69	70	69	69
	A	B	C	D	E	F	G	I	J	L	M	N	O	P	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z

Tabulka 5: Intenzity proudů nákladních automobilů ve špičkové hodině. Zdroj: [3]

Prognózané proudy chodců (viz tabulka níže) jsou rozděleny na dvě skupiny - na proudy studentů a proudy ostatních chodců. Proudů chodců - studentů sestávají z elementárních entit, kde každá představuje skupinku čtyř studentů. V případě ostatních chodců jedna entita reprezentuje jednoho chodce.

Proudů chodců		Celkem jednotlivců	Studenti		Ostatní
Z	Do		Jednotlivci	Čtyřčlenné skupinky	
CH1 <sub>sever</sub>	CH1 <sub>jih</sub>	350	216	54	134
CH1 <sub>jih</sub>	CH1 <sub>sever</sub>	441	252	63	189
CH2 <sub>sever</sub>	CH2 <sub>jih</sub>	154	96	24	58
CH2 <sub>jih</sub>	CH2 <sub>sever</sub>	338	192	48	146
Σ		1283	756	189	527

Tabulka 6: Prognózané proudů chodců přes Studentskou ulici ve špičkové hodině Zdroj: [3]

Proudů studentů je třeba generovat tak, že 80% z celkového počtu skupinek studentů přejde Studentskou ulici v čase 15:50 až 16:10, zbývajících 20% je generováno ve zbytku špičkové hodiny. Proudů ostatních chodců jsou generovány rovnoměrně během celé špičkové hodiny.

Všechny vstupní proudů považujeme za Poissonovské toky, velikosti intervalů mezi příjezdy resp. příchody vozidel resp. chodců jsou tedy produkovány nezávislými generátory exponenciálního rozdělení.

Přemísťovací procesy mobilních temporárních entit jsou charakterizovány především maximálními rychlostmi, které příslušné typy vozidel resp. chodci mohou dosahovat na daných úsecích zkoumaného segmentu silniční sítě. Tyto maximální rychlosti jsou uvedené v tabulce níže.

OSOBNÍ A NÁKLADNÍ DOPRAVA		
Studentská ulice	Nekřížovatkové úseky	40,0 km/h
	Nekřížovatkové úseky s bariérami	32,0 km/h
	Křížovatkové úseky	30,0 km/h
	Křížovatkové úseky s bariérami	24,0 km/h
Ostatní komunikace	Komunikace A,M,N	50,0 km/h
	Komunikace G	70,0 km/h
	Ostatní křížovatkové úseky	30,0 km/h
	Ostatní nekřížovatkové úseky	40,0 km/h
	Komunikace G	52,5 km/h
	Ostatní křížovatkové úseky	22,5 km/h
	Ostatní nekřížovatkové úseky	30,0 km/h
	CHODCI	
Studentská ulice	Přechody pro chodce (CH1 a CH2)	3,1 km/h

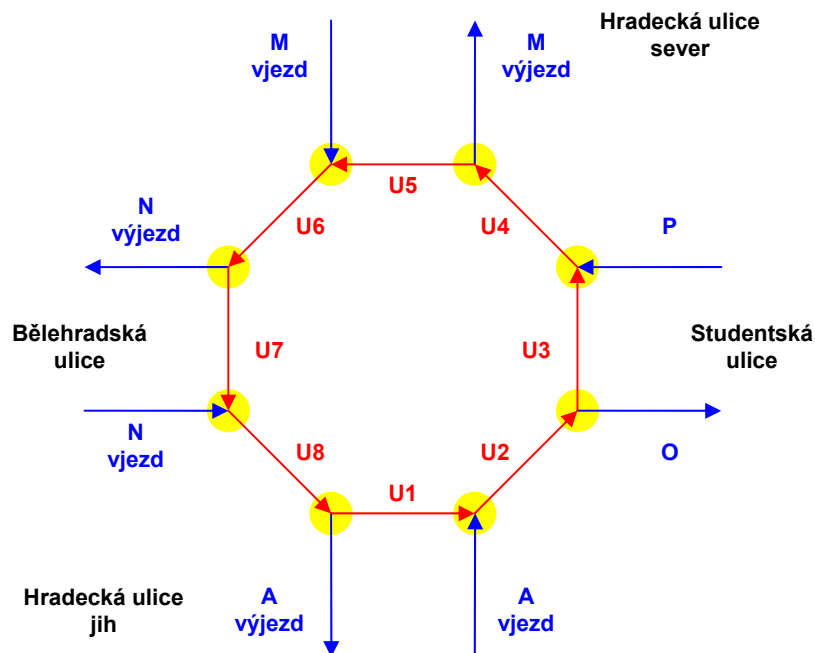
Tabulka 7: Specifikace maximálních (průměrných) rychlostí automobilů a chodců Zdroj: [3]

## 5.6.1 Transformace vstupních dat

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.2.4, intenzity dopravních toků lze v aplikaci AIMSUN NG specifikovat dvěma způsoby - buď prostřednictvím tzv. "Traffic State" nebo prostřednictvím O/D matic a tzv. centroidů. Vstupní data pro tuto simulační studii, tedy prognózané intenzity dopravních proudů pro rok 2020, byla zadána ve formě tabulek udávajících rozpad proudů vozidel na jednotlivých křižovatkách, jež jsou součástí studovaného segmentu silniční sítě. Tento formát dat je pro daný účel v podstatě standardem, mnohdy může být přímým produktem dopravního průzkumu realizovaného na příslušných křižovatkách.

Takto zadaná data jsou vhodným a přímo použitelným podkladem pro implementaci simulačních modelů v aplikaci AIMSUN NG v případě, že modelovaný segment sítě obsahuje pouze průsečné popř. stykové a žádné okružní křižovatky - tehdy by dopravní poptávka byla zadávána prostřednictvím "Traffic State". V případě této simulační studie je třeba modelovat kromě několika stykových křižovatek také dvě křižovatky okružní. To je ale z hlediska implementace modelu problém. Formát vstupních dat, který je zde k dispozici, je totiž koncipován tak, že okružní křižovatka je považována za jeden uzel silniční sítě a rozpad dopravních proudů je specifikován pro všechny jeho vstupní a výstupní úseky.

V prostředí aplikace AIMSUN NG je však třeba okružní křižovatku modelovat jako několik samostatných třiramenných stykových křižovatek. Toto je znázorněno na obrázku 24 - konkrétně se jedná o schéma pro modelování okružní křižovatky Hradecká - Bělehradská - Studentská. Modré šipky symbolizují úseky silniční sítě - tak, jak byly definovány a identifikovány v rámci vymezení zkoumaného systému. Červené šipky označené *U1* až *U8* pak představují "pomocné" úseky a žlutě jsou označena místa, která bude v aplikaci AIMSUN NG třeba modelovat jako uzel (spojující příslušné úseky).



Obrázek 24: Schéma modelování okružní křižovatky v aplikaci AIMSUN NG prostřednictvím úseků (modré a červené šipky) a uzlů (žluté kruhy).

Zde již nelze zadat dopravní poptávku prostřednictvím "Traffic State" s využitím vstupních dat přímo v tom formátu, v jakém jsou k dispozici, protože z nich nelze vyčíst hodnoty rozpadů proudů pro vnitřní uzly okružní křižovatky (tj. pro žlutě označené spojnice úseků na předchozím obrázku). Uvedený problém lze řešit dvěma způsoby.

První z nich spočívá v rozšíření původních matic rozpadů proudů na křižovatkách o pomocné vnitřní úseky okružních křižovatek a následné přepočítání toků směřovaných přes okružní křižovatky tak, aby byly určeny toky procházející přes tyto jejich vnitřní úseky. Principem je uvedený krok podobný tomu, jež je aplikován jako součást analytického výpočtu kapacity okružní křižovatky - více viz kapitola 6.2.2. Takto upravené matice již lze použít pro zadání dopravní poptávky prostřednictvím "Traffic State".

Druhý způsob, jímž lze řešit naznačený problém a který byl také aplikován při implementaci simulačního modelu v rámci realizace této případové simulační studie, staví na využití centroidů a O/D matic [9]. Zadání dopravní poptávky pro model implementovaný v aplikaci AIMSUM prostřednictvím centroidů je podle mého názoru snazší a rychlejší. Potřebné O/D matice pro zkoumaný segment sítě však nebyly k dispozici, proto bylo nutno původní matice udávající rozpady dopravních proudů na křižovatkách na tyto O/D matice transformovat.

Protože ruční výpočet O/D matice by byl poměrně pracný a k chybám náchylný úkon, rozhodl jsem se, že pro realizaci této operace vytvořím podpůrný počítačový program. Algoritmus pro implementaci tohoto výpočtu jsem neměl k dispozici (ač je možné, že je v literatuře popsán), proto jsem jej sám navrhnul.

Vstupem transformačního výpočtu je matice udávající rozpad dopravních proudů na jednotlivých křižovatkách. Ta pro každý úsek sítě (uvedený v řádku) vyjadřuje počty vozidel, které z tohoto úseku odbočují do potenciálně přilehlých úseků (identifikovaných záhlavím příslušného sloupce). Výstupem algoritmizovaného výpočtu je potom redukovaná matice obsahující pouze řádky a sloupce odpovídající hraničním úsekům studovaného segmentu dopravní sítě a příslušné intenzity dopravních proudů vyjádřené ve formě O/D matice (čtené ve smyslu "z řádku do sloupců").

Výpočet je možné provést in situ<sup>6</sup> nad datovou strukturou matice (dále označovaná jako výstupní matice) s využitím informací o rozpadech dopravních proudů uložených v druhé matici (dále označovaná jako vstupní matice). Rovněž je třeba mít k dispozici pomocnou datovou strukturu umožňující určit, které řádky/sloupce identifikují hraniční úseky segmentu sítě.

Podstata uvedeného algoritmu spočívá v tom, že dopravní toky vstupující hraničními úseky do sítě jsou iteračním postupem v matici přenášeny na navazující úseky (v poměru určeném příslušnými rozpady dopravních proudů uvedených ve vstupní matici) a to do okamžiku, až jsou všechny hodnoty vstupních toků přeneseny na hraniční úseky sítě, jimiž tyto toky z vymezeného segmentu sítě vystupují. Tím je pak O/D matice určena.

---

<sup>6</sup> tj. přímo nad vlastní datovou strukturou matice, není tedy nutno ukládat data do dalších, pomocných datových struktur

Jednotlivé kroky algoritmu lze stručně popsat následujícím způsobem:

- načtení dat do vstupní matice,
- výpočet součtů řádků vstupní matice,
- vynulování výstupní matice,
- pro všechny řádky výstupní matice, které identifikují hraniční úseky (ty ostatní tedy nejsou zpracovávány a ve výstupní matici nebudou figurovat, resp. budou vyplněny nulami) provést operaci transformace řádku, skládající se z těchto kroků:
  - zkopírovat hodnoty v řádku vstupní matice na odpovídající pozice výstupní matice,
  - dokud v transformovaném řádku výstupní matice existuje nenulová hodnota v  $i$ -tém sloupci, který neidentifikuje hraniční úsek, tak tuto hodnotu distribuovat (přičíst) v rámci zpracovávaného řádku do příslušných sloupců v poměrech určených rozpadem proudu směřujícího z daného úseku na úseky navazující - tyto poměry jsou určeny  $i$ -tým řádkem vstupní matice, tj. hodnotami v tomto řádku danými do poměru k řádkovému součtu téhož řádku vstupní matice, následně na pozici distribuované hodnoty (ve výstupní matici) dosadit hodnotu nula.

Následující výtah ze zdrojového kódu pomocné aplikace pro výpočet O/D matic představuje stěžejní části implementace výše popsaného algoritmu v jazyce C# [15], [16]. Kompletní zdrojové kódy této aplikace jsou k dispozici na datovém nosiči (CD), jež je přílohou této diplomové práce.

```
public void VypocetVystupniMatice()
{
    VypocetSumRadkuVstupniMatice();
    VynulovaniVystupniMatice();
    for (int r = 0; r < velikostMatice; r++)
    {
        if (hranicniUseky[r])
            TransformaceRadku(r);
    }
}

private void TransformaceRadku(int radek)
{
    // kopírování výchozích hodnot ze vstupní matice do výstupní
    for (int sloupec = 0; sloupec < velikostMatice; sloupec++)
        vystupniMatice[radek, sloupec] = vstupniMatice[radek, sloupec];

    // transformace
    bool opakuj;
    do
    {
        opakuj = false;
        for (int sloupec = 0; sloupec < velikostMatice; sloupec++)
        {
            if ((vystupniMatice[radek, sloupec] != 0) && (!hranicniUseky[sloupec]))
            {
                opakuj = true;
                DistribuceToku(radek, sloupec);
                vystupniMatice[radek, sloupec] = 0;
            }
        }
    } while (opakuj);
}
```

```

private void DistribuceToku(int dRadek, int dSloupec)
{
    int radek = dSloupec;
    int sumaRadku = sumyRadkuVstupniMatice[radek];
    decimal distrHodnota = vystupniMatice[dRadek, dSloupec];

    for (int sloupec = 0; sloupec < velikostMatice; sloupec++)
    {
        vystupniMatice[dRadek,sloupec] += distrHodnota
        * vstupniMatice[radek,sloupec] / sumaRadku;
    }
}

```

Uvedené metody náleží třídě *TransformacniMatice*. Po načtení vstupních dat je vlastní výpočet zahájen voláním metody *VypocetVystupniMatice*. Ta pro každý zpracovávaný řádek matice (představující hraniční úsek sítě) volá metodu *TransformaceRadku*. Metoda *TransformaceRadku* nejprve zkopíruje řádek vstupní matice do matice výstupní a potom volá metodu *DistribuceToku* pro všechny výskyty nenulové hodnoty ve sloupcích výstupní matice identifikujících vnitřní úseky segmentu sítě, a to tak dlouho, dokud se ve zpracovávaném řádku tyto hodnoty vyskytují. Metoda *DistribuceToku* pak provede vlastní přenesení hodnoty na navazující úseky v poměru určeném příslušným rozpadem dopravních proudů uvedeným ve vstupní matici.

Vlastní aplikace disponuje jednoduchým intuitivním grafickým uživatelským rozhraním - viz obrázek níže. Import vstupních i export výstupních dat probíhá ve standardním formátu CSV. Součástí vstupních dat je i označení řádků a sloupců matice (identifikace příslušných úseků segmentu sítě), přičemž názvy hraničních úseků v řádcích musí obsahovat dvojtečku, kde nalevo od ní se předpokládá alfanumerický identifikátor úseku, napravo pak druhý alfanumerický identifikátor (například budoucího centroidu). Nicméně, uvedené identifikátory mohou být bez konkrétního významu, podstatné je pouze to, aby hraniční úseky byly v názvech řádků určeny výskytem dvojtečky (v názvech sloupců toto není třeba). Ukázky vstupních i zpracovaných výstupních dat jsou přiloženy ke zdrojovému kódu aplikace. Implementace popisovaného podpůrného programu byla realizována ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2005 (v jazyce C#) a pro případné spuštění již přeložené aplikace je třeba mít na PC nainstalován Microsoft .NET Framework verze 2.0 a vyšší.

Za předpokladu dodržení požadavků na formát vstupních dat popsaných v předchozím odstavci by tato pomocná softwarová aplikace mohla být použita univerzálně, tedy i v jiných případech, kdy by bylo potřeba provést výše popsanou konverzi dat.

>>> Konverze vstupních dat >>>

Import - načíst vstupní matici      Výpočet - konverze dat      Export - uložit výstupní matici      Ukončit aplikaci

Zobrazit:  Vstupní data    Vypočtená výstupní data

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	R	S	T	U
A:C01	0.4...	0.7...	0.4...	0	0.6...	0	11...	0	0.6...	0.2...	0	0.4...	37...	9.0...	0	0	0	0	0	0
B:C02	0.2...	0.0...	0.0...	0	0.0...	0	0.7...	0	0.0...	0.0...	0	0	0.2...	0.6...	0	0	0	0	0	0
C:C03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D:C04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E:C05	0.5...	0.0...	0	0	0	0	0.8...	0	0.0...	0.0...	0	0	0.3...	1.1...	0	0	0	0	0	0
F:C06	0.4...	0.0...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3...	1.0...	0	0	0	0	0	0
G:C07	12...	1.4...	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	9.4...	27...	0	0	0	0	0	0
H:C08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I:C09	0.4...	0.0...	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0.3...	1.0...	0	0	0	0	0	0
J:C10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K:C11	0.8...	0.0...	0	0	0	0	2.4...	0	0.1...	0.0...	0	0	0.6...	1.8...	0	0	0	0	0	0
L:C12	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M:C13	36...	0.6...	0.3...	0	0.5...	0	10...	0	0.5...	0.1...	0	0.4...	0.3...	8.9...	0	0	0	0	0	0
N:C14	9.1...	1.8...	1.1...	0	1.6...	0	29...	0	1.5...	0.5...	0	1.1...	10...	2.5...	0	0	0	0	0	0
O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obrázek 25: Snímek obrazovky s uživatelským rozhraním aplikace pro transformaci vstupních dat.

## 5.7 Tvorba simulačního modelu

Jak již bylo uvedeno výše, zvoleným implementačním prostředím pro vytvoření simulačního modelu a realizace simulačních experimentů je mikroskopický simulátor silničních dopravních systémů AIMSUN NG. Základní principy a metodika implementace simulačních modelů v prostředí této aplikace jsou popsány v kapitole 4.2. Při výstavbě simulačního modelu Studentské ulice v rámci této případové studie byly uvedené postupy aplikovány a nemělo by zřejmě smysl je zde znovu detailně opisovat. Obecně bylo třeba provést tyto kroky:

- importovat ve správném měřítku rastrový podklad ve formátu JPG s geometricky přesným vyobrazením projektovaného dopravního řešení Studentské ulice (viz obrázek 21 resp. 22),
- nad tímto rastrovým podkladem sestavit pokud možno geometricky přesný model sítě složený z úseků a uzlů,
- na příslušných uzlech (křižovatkách) nastavit odpovídající úpravu předností v jízdě,
- pro příslušné konfigurace simulačního modelu nastavit odpovídající maximální povolené rychlosti na daných úsecích zkoumaného segmentu silniční sítě,
- vytvořit, pojmenovat a rozmístit centroidy a napojit je na hraniční úseky sítě,
- zadat dopravní poptávku prostřednictvím O/D matic pro všechny tři typy mobilních temporárních entit (osobní a nákladní vozidla, chodci),
- ve vybrané variantě konfigurace simulačního modelu rozmístit 3D objekty, aplikovat na ně fotografické textury a připravit tak animační scénu pro vytvoření ukázek pokročilé 3D animace simulačního výpočtu.

## 5.8 Verifikace simulačního modelu

První metodou, která byla použita při verifikaci vytvořeného simulačního modelu, bylo pozorování 2D, případně 3D animace simulačního výpočtu v různých časových úsecích simulované špičkové hodiny. Pozornost přitom byla zaměřena na sledování charakteristiky pohybu jednotlivých vozidel a chodců a na jejich vzájemné interakce, především pak dodržování předností v jízdě. Tato pozorování chování simulačního modelu v náhodně vybraných úsecích simulačního času v rámci jedné replikace simulačního výpočtu neodhalila žádné závady.

Dalším krokem verifikace simulačního modelu bylo ověření, zda modelovaným segmentem silniční sítě během simulovaného časového úseku (špičkové hodiny, tj. v čase 15:30 až 16:30) procházejí dopravní proudy v požadovaných intenzitách, strukturách a v požadovaném směřování - tak, jak toto bylo zadáno prostřednictvím O/D matic.

Tato kontrola byla provedena s využitím tzv. detektorů umístěných na všechny vstupní i výstupní hraniční úseky modelu segmentu silniční sítě. Detektory umožňují v průběhu simulačního výpočtu zaznamenávat různé hodnoty, například i počty entit, jež přes ně přecházejí, přičemž tyto počty je možno dále členit podle definovaných typů entit.

Určitým problémem, s kterým bylo třeba se vypořádat při vyhodnocování takto naměřených hodnot, byla skutečnost, že prostředí AIMSUN NG neumožňuje zobrazit tyto statistické výsledky souhrnným způsobem, tj. například nelze v jedné tabulce zobrazit přehled naměřených hodnot na všech jednotlivých detektorech v rámci jedné replikace simulačního výpočtu, rovněž nelze zobrazovat takto souhrnně sumy a průměrné hodnoty těchto počtů pro více replikací najednou pro všechny detektory. Naměřené hodnoty lze vyčíst v dialogovém okně "Time Series" vždy pro každý jeden detektor zvlášť.

Provedení kontroly tímto způsobem by tedy například znamenalo pro všech 33 nasazených detektorů "ručně" extrahovat vždy 3 hodnoty (tj. pro 3 různé typy entit) naměřených průměrných počtů za  $n$  replikací simulačního výpočtu a tyto hodnoty porovnat s O/D maticemi, celkem by tedy bylo nutno provést 99 porovnání pro jednu konfiguraci simulačního modelu, pro zkoumané 4 konfigurace pak 396 porovnání. Případné vyhodnocování naměřených hodnot pro jednotlivé replikace simulačního výpočtu by mohlo vyžadovat provedení ještě daleko většího množství operací. Pakliže by vyvstala nutnost modifikovat simulační model a provést novou verifikaci, celý tento pracný a časově náročný proces by musel být opakován.

Z tohoto důvodu bylo nezbytné využít alternativní postup zpracování statistických výstupů ze simulačních výpočtů, které aplikace AIMSUN NG nabízí. Jedná se o možnost aktivovat ukládání těchto dat během simulačního výpočtu do externího relačního databázového systému (v tomto případě byl využit databázový systém Access), což následně umožňuje jejich efektivní zpracování prostřednictvím dotazovacího jazyka SQL [14].

Založil jsem tedy databázi nazvanou *Output.mdb* a nakonfiguroval prostředí AIMSUN NG tak, aby statistická data byla ukládána do této databáze. Dále jsem do databáze doplnil tabulku s názvem *Verifikace* obsahující hodnoty z O/D matic, aby bylo možno k naměřeným hodnotám v dotazu přímo přiřadit očekávané hodnoty intenzit



dopravních proudů, s nimiž bylo třeba provést srovnání. Následně jsem vytvořil agregační SQL dotaz (nazvaný *VerifikaceDetektory*), s jehož pomocí jsem po realizaci 50 replikací simulačního výpočtu (provedených pro účely verifikace) snadno získal potřebná výstupní data, která bylo poté možno exportovat do aplikace Excel a tam je dále zpracovat a vyhodnotit.

Následně jsem vytvořil agregační SQL dotaz *SumyDetektoryReplikace*, kterým jsem provedl kontrolní součty počtů entit, jež protekly studovaným segmentem sítě, a to zvláště pro každou jednotlivou replikaci simulačního výpočtu.

Uvedené SQL dotazy jsou pro ilustraci vypsány níže. Struktura databáze, do níž AIMSUN NG ukládá výstupní data, tedy popis a seznam databázových tabulek a jejich atributů, lze nalézt v [7].

SQL příkaz *VerifikaceDetektory*:

```
SELECT Smer, Entita, namedet, Round(sum(countveh)/50) AS Pocet, ODMatice
FROM DetecMea, vehTypes, Verifikace
WHERE DetecMea.ctype=vehTypes.ctype And DetecMea.rid=vehTypes.rid And
vehTypes.name=Verifikace.name And DetecMea.namedet=Verifikace.Detektor And
DetecMea.rid<>882
GROUP BY Entita, Smer, namedet, ODMatice
ORDER BY Smer, Entita, namedet;
```

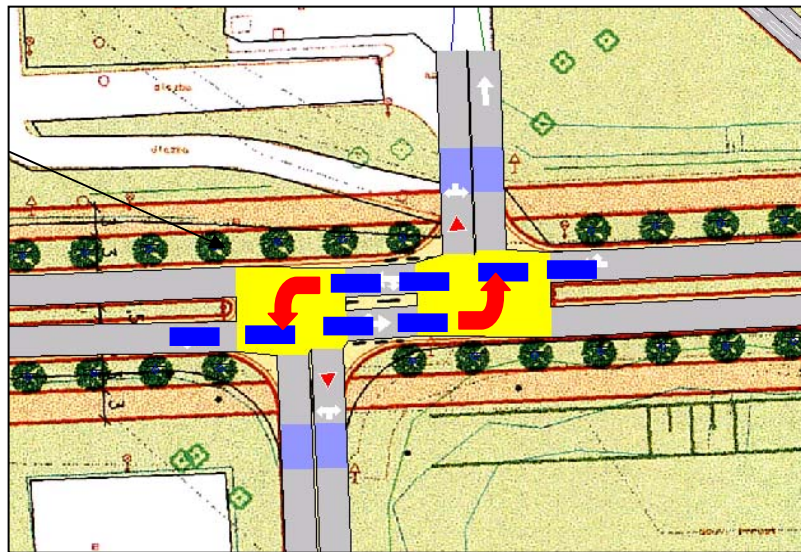
SQL příkaz *SumyDetektoryReplikace*:

```
SELECT DetecMea.rid, name, sum(countveh) AS PocetEntit
FROM DetecMea, vehTypes
WHERE DetecMea.ctype=vehTypes.ctype And DetecMea.rid=vehTypes.rid And DetecMea.rid<>882
GROUP BY DetecMea.rid, name
ORDER BY name, DetecMea.rid;
```

Verifikací implementovaného simulačního modelu byly odhaleny dva zásadní nedostatky, které bylo nutno odstranit. První problém byl zapříčiněn chybou aplikace AIMSUN NG, kdy při provádění simulačního výpočtu v případě některých replikací docházelo k tomu, že proud entit představujících chodce se bez objektivní příčiny samovolně zablokoval. Kontaktoval jsem tedy v této záležitosti výrobce aplikace AIMSUN NG a bylo mi sděleno, že se skutečně jedná o softwarovou chybu, která bude v následujících verzích aplikace odstraněna. Dále mi výrobce doporučil postup, jak výskytu této chyby při používání stávající verze zabránit - bylo nutno nepatrně zvýšit střední hodnotu akcelerace entit typu chodec. Tento zásah výskyt chyby skutečně zcela eliminoval a to bez zásadního vlivu na výsledky simulačního výpočtu.

Druhý problém spočíval rovněž v zablokování pohybu entit. V tomto případě však k němu došlo nikoli z důvodu chyby v aplikaci AIMSUN NG či chyby v implementaci simulačního modelu. Jednalo se o situaci (viz obrázek níže), kdy během simulačního výpočtu byl modelován pohyb dvou proti sobě jedoucích proudů vozidel pohybujících se po ulici Studentská, přičemž:

- v obou těchto proudech se vyskytlo vozidlo, jež mělo provést odbočení vlevo v místě, kde se vyskytují dvě křižovatky typu T těsně za sebou,
- za každým z těchto dvou vozidel se pohybovala další vozidla,
- obě tato vozidla dosáhla bodu, v němž měla odbočit, ve stejném okamžiku.



Obrázek 26: Znárodnění situace, jež způsobovala problémy při v průběhu simulačním výpočtu.

V reálném provozu na silniční síti by zřejmě takovouto situaci řidiči vyřešili vzájemnou komunikací a obnovili by tak plynulost silničního provozu, simulátor však bohužel takovou mírou inteligence nedisponuje a tak tento v podstatě chybový stav činí výsledek dané replikace simulačního výpočtu nepoužitelným. Prostředí aplikace AIMSUN NG poskytuje prostředek, který problémovým stavům tohoto typu do jisté míry čelí - jedná se o tzv. "Yellow Box". Jestliže příslušný uzel sítě je označen jako "Yellow Box", potom by do oblasti tohoto uzlu vozidla neměla vjíždět, pokud hrozí nebezpečí, že by na něm musela zastavit (z důvodu obsazenosti navazujícího úseku). V podstatě se jedná o prostředek, s jehož pomocí lze modelovat pravidlo silničního provozu zakazující vjezd do křižovatky, pokud není zaručen její plynulý průjezd.

V případě problémového úseku na Studentské ulici označení uzlů příznakem "Yellow Box" míru výskytu uvedeného problému omezilo. Protože se zde však jedná o dvě křižovatky umístěné za sebou a mezi nimi leží ještě jeden krátký přímý úsek v každém směru, tak toto opatření nevyřešilo situaci úplně a v několika málo provedených replikacích simulačního výpočtu opět došlo v tomto místě k zablokování provozu.

Protože výskyt tohoto problémového stavu lze považovat za náhodný jev (v důsledku stochastické povahy simulačního modelu) a jeho četnost byla relativně malá - cca ve 3% realizovaných replikacích simulačního výpočtu - rozhodl jsem se toto řešit poněkud účelovým opatřením, a sice změnou násady generátorů náhodných čísel pro ty replikace, v nichž tento stav nastal. Ač se nejedná o zcela standardní postup z hlediska teorie experimentální výzkumné metody simulace, v tomto případě bych takové řešení považoval za efektivní a vzhledem k malé četnosti aplikací tohoto postupu předpokládám jeho zcela zanedbatelný vliv na výsledky realizovaných simulačních experimentů.

Domnívám se, že k problémům tohoto typu, tedy k situaci, kdy dojde v průběhu simulačního výpočtu k zablokování silničního provozu vozidly vzájemně si dávajícími přednost, může dojít i v jiných částech modelovaného segmentu silniční sítě, zvláště pak v oblastech složitějšího křížení komunikací. Rovněž vysoké intenzity dopravních

proudů blížíci se hranici kapacitní propustnosti segmentu sítě mohou být příčinou vzniku uvedeného problému.

Proto je v rámci verifikace simulačního modelu (resp. všech jeho konfigurací) třeba ověřit, zda modelovaným segmentem sítě během simulačního výpočtu protékla požadovaná množství entit. Pokud tomu tak není, je nutno posoudit, zda důvodem je nedostatečná kapacita sítě nebo zda došlo k výše popsanému zablokování provozu. Jestliže se tento stav vyskytuje v průběhu simulačního výpočtu příliš často, měl by experimentátor posoudit, zda toto neindikuje potenciální problémy v reálném provozu. V takovém případě by pak příliš frekventovaný výskyt blokování provozu nebyl považován za nedostatek z hlediska verifikace simulačního modelu. Takové zjištění by naopak bylo postoupeno do dalších fází realizace simulační studie a stalo by se případně podkladem pro vyslovení negativních závěrů o parametrech navrženého dopravního řešení.

V případě realizace této simulační studie byly oba uvedené problémy odstraněny výše popsanými opravnými implementačními zásahy, což bylo potvrzeno následným opakováním procesu verifikace simulačního modelu. Protože další nedostatky implementovaného simulačního modelu již nebyly zjištěny a model se jevil být funkčně správný, mohl jsem jej považovat za verifikovaný a postoupit do dalších fází realizace simulační studie.

## **5.9 Validace modelu**

Provést komplexní validaci implementovaného simulačního modelu v případě této simulační studie v podstatě nebylo možné. Modelovaný systém totiž v realitě neexistuje a nelze proto zjistit jeho charakteristiky, s nimiž by v rámci validace byly srovnávány výstupy produkované simulačním modelem. K dispozici není ani matematický model celého simulovaného systému a k jeho vytvoření (pakliže toto je vůbec realizovatelné) by byly zapotřebí znalosti, které leží mimo hranice mé odbornosti. O určité zhodnocení validity výsledků produkovaných simulátorem AIMSUN NG prostřednictvím srovnání s analytickými kapacitními výpočty jsem se pokusil v kapitole 6, to se však netýkalo přímo simulačního modelu zkoumaného segmentu silniční sítě, nýbrž pouze izolovaných křižovatek.

Jediným prostředkem pro validaci simulačního modelu vytvářeného v rámci této studie bylo empirické posouzení správnosti chování simulačního modelu založené především na sledování animací simulačních výpočtů. Kredibilitu implementovaného simulačního modelu je zde tedy možno postavit na předpokladu kvalitně provedené verifikace modelu a analýze chování simulačního modelu prostřednictvím sledování animací simulačních výpočtů a dále na dosažené poměrně dobré shodě výsledků analytických výpočtů s výsledky simulačních experimentů v rámci výše zmíněného srovnání, realizovaného v prostředí téhož simulátoru, jež byl použit při implementaci simulačních modelů v této studii.

## 5.10 Plán simulačních experimentů

### 5.10.1 Simulačních experimenty

Cílem této simulační studie je kapacitně-provozní prověření čtyř různých variant dopravního řešení ulice Studentská. Jednotlivá dopravní řešení se liší:

- předpokladem vybudování resp. nevybudování podchodu pod Studentskou ulicí (ten by nahradil přechod pro chodce **CHI**),
- předpokladem instalování resp. neinstalování technických zpomalovacích zařízení (bariér) na vozovce před přechody pro chodce na Studentské ulici.

V souladu s těmito variantami dopravního řešení byly navrženy čtyři rozdílné simulační experimenty takto:

Experiment	Vybudován podchod nahrazující přechod CH1	Instalovány zpomalovací bariéry před přechodem:	
		CH1	CH2
1.	Ne	Ano	Ano
2.	Ne	Ne	Ne
3.	Ano	-	Ano
4.	Ano	-	Ne

Tabulka 8: Konfigurace silniční infrastruktury pro jednotlivé simulační experimenty. Zdroj: [3]

V experimentech zkoumajících ta dopravní řešení, která předpokládají vybudování podchodu nahrazujícího přechod pro chodce, nejsou simulátorem realizovány proudy chodců křižujících Studentskou ulici na přechodu **CHI** (tzn. prognózované intenzity těchto proudů nejsou obsaženy v příslušné O/D matici). V konfiguracích simulačního modelu pro ty experimenty, kde se předpokládá instalace zpomalovacích bariér pro chodce, jsou sníženy maximální povolené rychlosti na odpovídajících úsecích sítě - viz tabulka 6.

### 5.10.2 Sledované dopravně-inženýrské ukazatele

Ještě před spuštěním simulačních výpočtů musí být určeno, které dopravně-inženýrské statistické ukazatele bude nutno sledovat, aby mohly být úspěšně zodpovězeny otázky vyslovené v rámci specifikace cílů studie. Na základě toho je pak třeba v aplikaci AIMSUN NG v konfiguraci scénáře experimentu aktivovat zaznamenávání relevantních dat v průběhu simulačních výpočtů. Z množiny všech statistických ukazatelů, které v uvedené aplikaci mohou být produkovány jako výstupy simulačních experimentů, byly v tomto případě zvoleny ty, jež jsou popsány v tabulce č. 9.

Označení ukazatele v terminologii aplikace AIMSUN NG	Popis významu
Mean Flow	Tok sítě - průměr počtu vozidel, která během 1 hodiny simulačního času projela síť [vozidel/hod]
Density	Hustota provozu - průměrný počet vozidel na 1 km sítě [vozidel/km]
Mean Speed	Průměrná rychlost průjezdu vozidel sítě [km/hod]
Delay Time	Průměrný čas zdržení každého vozidla na jednom kilometru sítě [sec]
Stop Time	Průměrný čas stání jednoho vozidla na jednom kilometru sítě [sec]
Number of Stops	Průměrný počet zastavení jednoho vozidla na jednom kilometru sítě [počet zastavení]
Total Travel Time	Součet času všech vozidel která projela síť [hod]

Tabulka 9: Sledované dopravně-inženýrské ukazatele. Zdroj: [7]

### 5.10.3 Délka simulačního výpočtu

Délka provádění simulačního výpočtu pro všechny experimenty plyne ze zadání této studie - jelikož je třeba zkoumat studovaný segment sítě ve špičkové hodině, tj. od 15:30 do 16:30, bude simulační výpočet spouštěn v délce trvání 60 minut (simulačního času).

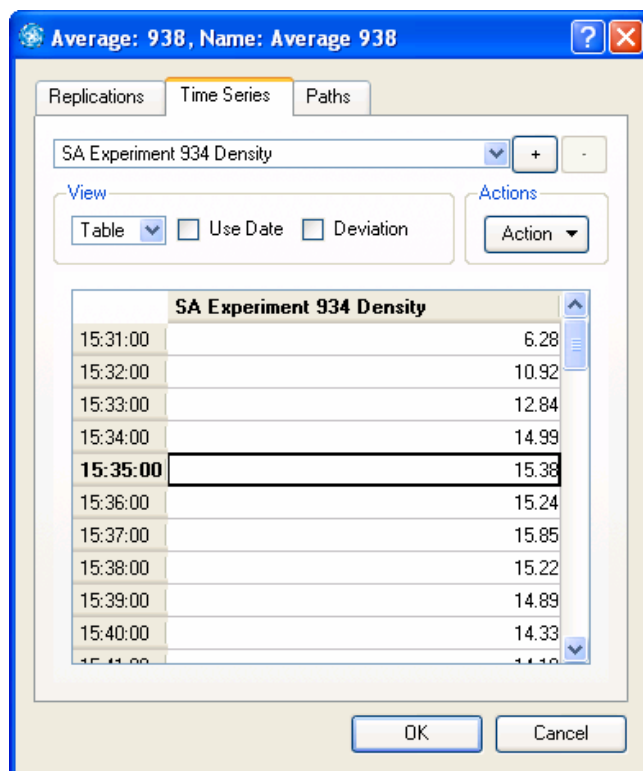
### 5.10.4 Doba náběhu simulátoru

Protože v okamžiku zahájení simulačního výpočtu je zkoumaný segment silniční sítě prázdný, je třeba na začátku každé replikace simulačního výpočtu provést náběh ("zahřívání") simulátoru. Tuto funkci aplikace AIMSUN NG přímo podporuje, zbývá tedy rozhodnout pouze o délce provádění náběhu.

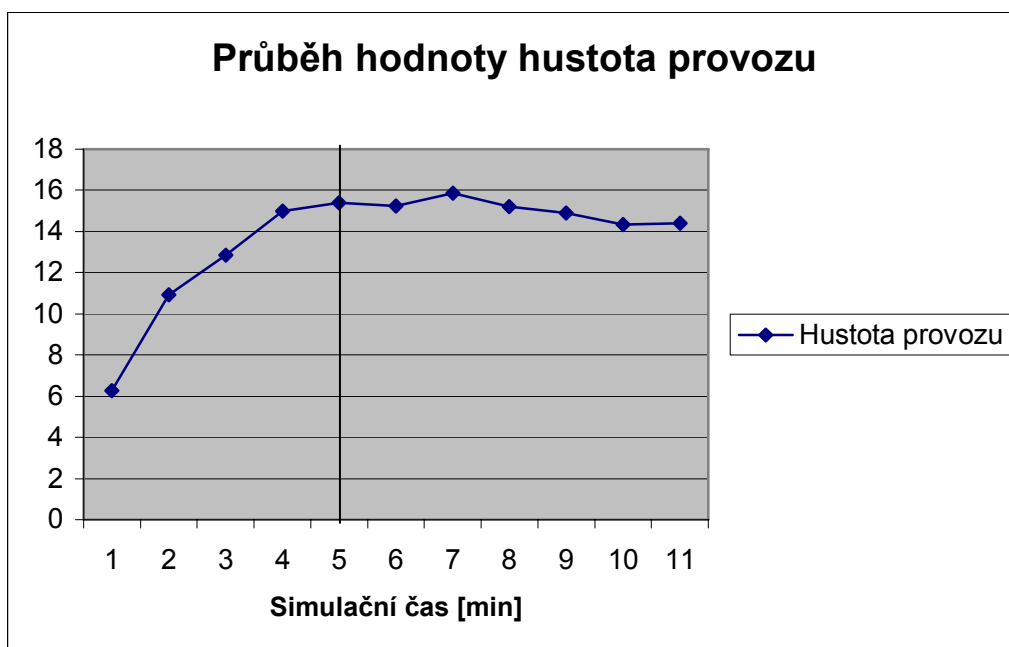
Toto rozhodnutí lze provést na základě sledování hustoty provozu v modelovaném segmentu silniční sítě. V prvních minutách simulačního výpočtu původně nulová hustota roste, až se ustálí na určité hladině (za předpokladu, že se nemění dopravní poptávka neboli že intenzity dopravních proudů jsou po tuto dobu určeny neměnnými O/D maticemi). Tento okamžik určuje minimální potřebnou dobu náběhu simulátoru<sup>7</sup>.

Míru obsazenosti sítě v prostředí aplikace AIMSUN NG popisuje ukazatel Density (průměrný počet vozidel na 1 km sítě). Vývoj průměrů této hodnoty v čase pro deset zkušebně provedených replikací simulačního výpočtu při konfiguraci simulačního modelu pro experiment č. 1 dokumentuje následující obrázek. Z těchto výsledků plyne, že minimální potřebná doba náběhu simulátoru je přibližně 5 minut - po uplynutí této doby se sledovaný ukazatel ustálí na hodnotě cca 15 (vozidel na 1 km sítě). Po přičtení určité rezervy byla tato doba stanovena na 10 minut, a to pro všechny prováděné experimenty.

<sup>7</sup> nejedná se o obecný návod, v jiných případech lze pochopitelně aplikovat specifický postup určení doby náběhu simulátoru - s ohledem na charakter simulovaných procesů



Obrázek 27: Průběh ukazatele hustota provozu sledovaný za účelem určení doby náběhu simulátoru.



Obrázek 28: Grafické znázornění průběhu hodnot ukazatele hustota provozu (experiment č. 1).

O potřebném minimálním počtu replikací simulačního výpočtu v rámci každého experimentu bude rozhodnuto až na počátku fáze provádění experimentů na základě prvotní analýzy výsledků.



## 5.11 Provedení experimentů a jejich analýza

### 5.11.1 Stanovení počtu replikací simulačních výpočtů

Ze vztahů uvedených v kapitole 2.5 plyne, že minimální počet replikací simulačních výpočtů, které je nezbytné realizovat pro dosažení požadované přesnosti získaných výsledků, závisí na variabilitě sledovaného ukazatele, na stanovené míře požadované přesnosti a na stanovené hladině významnosti.

Vzhledem k tomu, že při hodnocení výsledků této studie je sledováno poměrně velké množství ukazatelů, byl pro určení počtu replikací simulačních výpočtů zvolen pragmatický přístup - tato hodnota byla stanovena na základě statistické analýzy výsledků pouze tří ukazatelů, které jsou pro vyslovení závěrů simulační studie považovány za klíčové. U zjištěných výstupních hodnot ostatních ukazatelů tedy není garantováno dodržení požadované hladiny významnosti, nicméně i přesto mají značnou vypovídací schopnost.

Tabulka níže specifikuje sledované klíčové ukazatele a u každého z nich definuje stanovenou požadovanou míru přesnosti.

Ukazatel	Stanovená přesnost
Průměrná rychlost na ulici Studentská v úseku "Hradecká → U Josefa"	5% z odhadu střední hodnoty
Průměrná rychlost na ulici Studentská v úseku "U Josefa → Hradecká"	5% z odhadu střední hodnoty
Časová ztráta na 1 km pro jedno vozidlo pro celý studovaný segment sítě	10 sekund

*Tabulka 10: Přehled klíčových ukazatelů vybraných pro stanovení počtu replikací simulačního výpočtu a určení požadovaných přesností výstupů.*

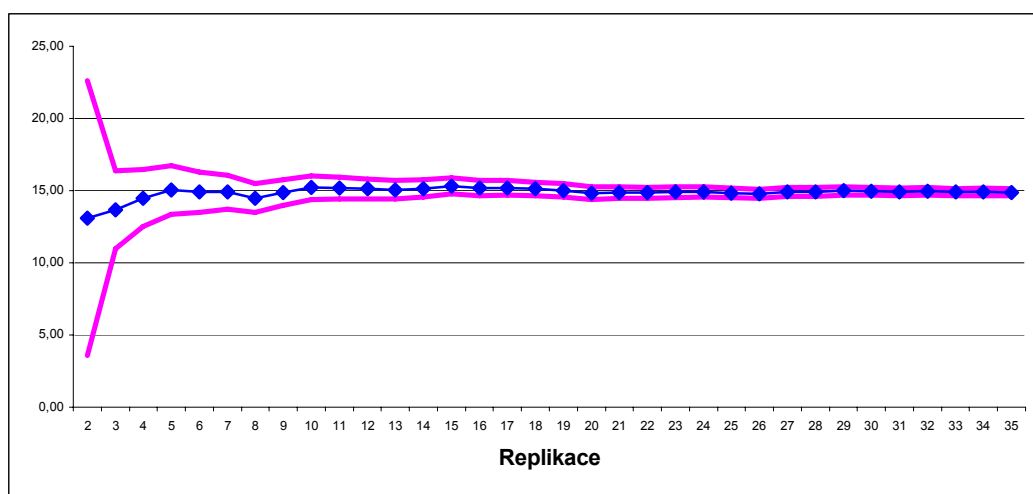
Určení nezbytného počtu replikací simulačního výpočtu bylo provedeno při stanovené hladině významnosti 95%, přičemž byla aplikována metoda porovnání příslušných intervalů spolehlivosti pro výše uvedené ukazatele s jejich požadovanou přesností při zvyšujícím se počtu realizovaných simulačních pokusů. Tabulka níže dokumentuje tento postup, konkrétně pro konfiguraci simulátoru použitou při provádění experimentu číslo 1. Červeně zvýrazněné hodnoty šířky intervalu indikují, že při daném počtu replikací simulačního výpočtu ještě nebylo dosaženo požadované přesnosti. Dalších 15 ještě provedených replikací není zobrazeno, neboť u všech vyšších počtů replikací již bylo dosaženo požadované přesnosti.

Výstupní hodnoty produkované simulátorem v případě zbývajících tří experimentů vykazovaly nižší variabilitu, proto pro určení počtu replikací simulačního experimentu byla rozhodující analýza výsledků prvního experimentu. Z provedené analýzy plyne, že pro zabezpečení požadované přesnosti výsledků je třeba provést minimálně 35 replikací simulačního výpočtu.

Replikace	Dosahované průměrné rychlosti na ulici Studentská [km/h]				Časová ztráta 1 vozidla na 1 km jízdy pro celý segment sítě [sec]	
	Hradecká → U Josefa	Δ	U Josefa → Hradecká	Δ	Hodnota	Δ
1	18,24		11,58		152,71	
2	23,42	32,89	14,58	19,03	50,57	648,92
3	22,96	7,12	14,86	4,51	57,43	141,83
4	22,68	3,83	16,94	3,51	43,43	81,85
5	20,69	2,67	17,34	2,85	55,71	56,45
6	21,26	2,02	14,06	2,20	67,29	42,72
7	23,62	1,78	14,97	1,77	51,43	35,06
8	21,51	1,49	11,49	1,79	87,43	29,87
9	23,51	1,36	17,87	1,77	43,86	26,60
10	24,43	1,31	18,34	1,74	45,14	23,90
11	22,90	1,18	15,12	1,55	55,29	21,39
12	23,22	1,08	14,29	1,41	83,71	19,60
13	21,04	1,00	14,40	1,29	57,14	17,92
14	22,32	0,92	16,17	1,20	46,86	16,70
15	25,37	0,96	17,95	1,18	44,29	15,69
16	21,97	0,90	12,72	1,15	74,14	14,66
17	19,61	0,91	15,55	1,07	56,57	13,73
18	21,82	0,85	13,82	1,02	84,00	13,11
19	22,59	0,81	13,23	0,98	58,00	12,37
20	22,26	0,76	11,20	1,01	74,86	11,75
21	23,62	0,73	15,86	0,96	54,71	11,18
22	24,51	0,73	14,38	0,92	66,57	10,63
23	25,28	0,74	15,83	0,88	47,57	10,24
24	21,49	0,71	14,97	0,84	57,00	9,79
25	20,99	0,69	13,40	0,81	70,29	9,39
26	20,69	0,68	13,16	0,79	59,71	9,01
27	23,22	0,65	18,38	0,81	41,14	8,81
28	20,37	0,65	14,92	0,78	56,71	8,49
29	23,24	0,63	17,49	0,77	45,29	8,26
30	23,12	0,61	14,04	0,74	85,14	8,13
31	21,74	0,59	13,72	0,72	78,43	7,92
32	24,41	0,58	16,38	0,71	48,57	7,71
33	18,72	0,61	12,45	0,70	172,14	10,08
34	21,43	0,59	15,47	0,68	54,29	9,79
35	24,85	0,59	14,14	0,66	77,14	9,52

Tabulka 11: Průběh průměrných hodnot sledovaných ukazatelů.

Následující obrázek již jen pro ilustraci znázorňuje průběh hodnot kumulovaného průměru ukazatele průměrná rychlost na úseku "U Josefa → Hradecká" pro experiment č. 1.



Obrázek 29: Průběh hodnot kumulovaného průměru ukazatele průměrná rychlost na úseku "U Josefa → Hradecká" (experiment č. 1).



### **5.11.2 Vykonání simulačních experimentů**

Po zadání všech požadovaných vstupů do simulátoru bylo přistoupeno k provedení celkem 4 x 35 tj. 140 replikací simulačního výpočtu. Aplikace AIMSUN NG byla nastavena tak, aby hodnoty statistických ukazatelů byly ukládány do externí databáze (Access).

Pro orientaci lze uvést, že realizace 35 replikací simulačního výpočtu v dávkovém režimu zpracování v prostředí aplikace AIMSUN NG v tomto případě trvala na PC s procesorem AMD Athlon 3000+ a 512 RAM operační paměti přibližně tři minuty.

### **5.11.3 Posouzení propustnosti studovaného segmentu sítě bez ohledu na charakter provozu**

Provedeme-li srovnání hodnot poptávaných intenzit dopravních proudů zadaných do O/D matic a skutečně realizovaných průjezdů vozidel a průchodů chodců přes detektory umístěné na vstupních a výstupních úsecích zkoumaného segmentu sítě, můžeme vyslovit závěr, že zkoumaný segment sítě je v průměru schopen propustit prognózované dopravní toky, a to ve všech čtyřech prověřovaných variantách dopravního řešení. Na tomto místě je ale třeba zdůraznit, že tento fakt nic nevypovídá o charakteru provozu - k tomu se vyjadřuje až další podkapitola.

Z tabulek uvedených na dalších stránkách vyplývá, že dopravní toky skutečně realizované během simulačních výpočtů byly dokonce cca o 6% větší než ty, které byly zadány do O/D matic (což bylo patrně způsobeno zaokrouhlovacími rozdíly), nicméně tato míra odchylky je v tolerovatelných mezích. Větší relativní rozdíly byly zaznamenány u velmi slabých dopravních proudů, kde se zřejmě více projevila chyba zaokrouhlení při generování vstupních proudů vozidel. Jelikož se ale jedná o přípojně vedlejší komunikace a absolutní chyba je zde malá, tak nelze předpokládat její vliv na celkové výsledky simulačního výpočtu.

Porovnání hodnot naměřených na vstupních detektorech s O/D maticí - hodnoty udávají počty entit											
Entita	Detektor	OD matice		Naměřené hodnoty				Absolutní rozdíly			
		Exp. 1 a 2	Exp. 3 a 4	1	2	3	4	1	2	3	4
Chodec	CH1JihIn	252	-	251	250	0	0	-1	-2	-	-
Chodec	CH1SeverIn	188	-	190	186	0	0	2	-2	-	-
Chodec	CH2JihIn	194	194	196	195	196	196	2	1	2	2
Chodec	CH2SeverIn	82	82	84	85	84	84	2	3	2	2
Nákl. aut.	DetAln	62	62	71	72	71	71	9	10	9	9
Nákl. aut.	DetBln	2	2	5	5	5	5	3	3	3	3
Nákl. aut.	DetCln	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nákl. aut.	DetDln	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nákl. aut.	DetEln	3	3	7	7	7	7	4	4	4	4
Nákl. aut.	DetFln	2	2	5	5	5	5	3	3	3	3
Nákl. aut.	DetGln	54	54	62	61	62	62	8	7	8	8
Nákl. aut.	DetHln	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nákl. aut.	DetInn	4	4	8	8	8	8	4	4	4	4
Nákl. aut.	DetKln	6	6	11	12	11	11	5	6	5	5
Nákl. aut.	DetLln	2	2	3	4	3	3	1	2	1	1
Nákl. aut.	DetMln	59	59	69	69	69	69	10	10	10	10
Nákl. aut.	DetNln	60	60	72	74	73	74	12	14	13	14
Os. aut.	DetAln	855	855	874	872	872	872	19	17	17	17
Os. aut.	DetBln	39	39	50	51	50	50	11	12	11	11
Os. aut.	DetCln	4	4	9	9	9	9	5	5	5	5
Os. aut.	DetDln	10	10	17	17	17	17	7	7	7	7
Os. aut.	DetEln	70	70	81	79	81	81	11	9	11	11
Os. aut.	DetFln	34	34	43	42	42	42	9	8	8	8
Os. aut.	DetGln	451	451	465	466	466	464	14	15	15	13
Os. aut.	DetHln	9	9	16	15	16	16	7	6	7	7
Os. aut.	DetInn	120	120	132	131	132	132	12	11	12	12
Os. aut.	DetKln	52	52	64	64	64	64	12	12	12	12
Os. aut.	DetLln	18	18	27	28	27	27	9	10	9	9
Os. aut.	DetMln	514	514	531	528	531	531	17	14	17	17
Os. aut.	DetNln	361	361	381	378	379	382	20	17	18	21
	Součty	3507	3067	3724	3713	3280	3282	217	206	213	215
	Rozdíl v %							6,2%	5,9%	6,9%	7,0%

Tabulka 12: Porovnání hodnot naměřených na vstupních detektorech s O/D maticí.

Porovnání hodnot naměřených na výstupních detektorech s O/D maticí - hodnoty udávají počty entit											
Entita	Detektor	OD matice		Naměřené hodnoty				Absolutní rozdíly			
		Exp. 1 a 2	Exp. 3 a 4	1	2	3	4	1	2	3	4
Chodec	CH1JihOut	188	-	190	186	0	0	2	-2	-	-
Chodec	CH1SeverOut	252	-	251	250	0	0	-1	-2	-	-
Chodec	CH2JihOut	82	82	84	85	84	84	2	3	2	2
Chodec	CH2SeverOut	194	194	196	195	196	196	2	1	2	2
Nákl. aut.	DetAOut	61	61	71	72	71	71	10	11	10	10
Nákl. aut.	DetBOut	7	7	14	14	14	14	7	7	7	7
Nákl. aut.	DetCOut	2	2	5	4	4	4	3	2	2	2
Nákl. aut.	DetDOut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nákl. aut.	DetEOut	3	3	6	6	7	6	3	3	4	3
Nákl. aut.	DetFOut	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nákl. aut.	DetGOut	58	58	67	68	68	69	9	10	10	11
Nákl. aut.	DetIOut	5	5	9	10	10	10	4	5	5	5
Nákl. aut.	DetJOut	2	2	5	5	5	5	3	3	3	3
Nákl. aut.	DetLOut	2	2	4	4	4	5	2	2	2	3
Nákl. aut.	DetMOut	60	60	68	69	68	69	8	9	8	9
Nákl. aut.	DetNOut	54	54	64	64	64	64	10	10	10	10
Os. aut.	DetAOut	609	609	630	632	631	633	21	23	22	24
Os. aut.	DetBOut	59	59	70	69	70	69	11	10	11	10
Os. aut.	DetCOut	2	2	4	4	4	4	2	2	2	2
Os. aut.	DetDOut	8	8	16	15	15	16	8	7	7	8
Os. aut.	DetEOut	39	39	50	51	50	50	11	12	11	11
Os. aut.	DetFOut	19	19	29	28	29	29	10	9	10	10
Os. aut.	DetGOut	278	278	294	293	296	297	16	15	18	19
Os. aut.	DetIOut	124	124	141	140	140	140	17	16	16	16
Os. aut.	DetJOut	76	76	87	87	86	86	11	11	10	10
Os. aut.	DetLOut	13	13	22	22	21	22	9	9	8	9
Os. aut.	DetMOut	735	735	750	750	751	749	15	15	16	14
Os. aut.	DetNOut	575	575	589	591	592	593	14	16	17	18
Součty		3507	3067	3716	3714	3280	3285	209	207	213	218
Rozdíl v %								6,0%	5,9%	6,9%	7,1%

Tabulka 13: Porovnání hodnot naměřených na výstupních detektorech s O/D maticí.

Poznámka: principiálně identická analýza výstupních hodnot (jen pro větší počet replikací simulačního výpočtu) byla provedena i při verifikaci simulačních modelů, kdy bylo ověřováno, jestli modelem segmentu sítě procházejí dopravní proudy o intenzitách odpovídajících těm, jež byly nastaveny v O/D maticích - viz kapitola 5.8.

#### 5.11.4 Posouzení charakteru dopravního provozu v rámci celého zkoumaného segmentu sítě

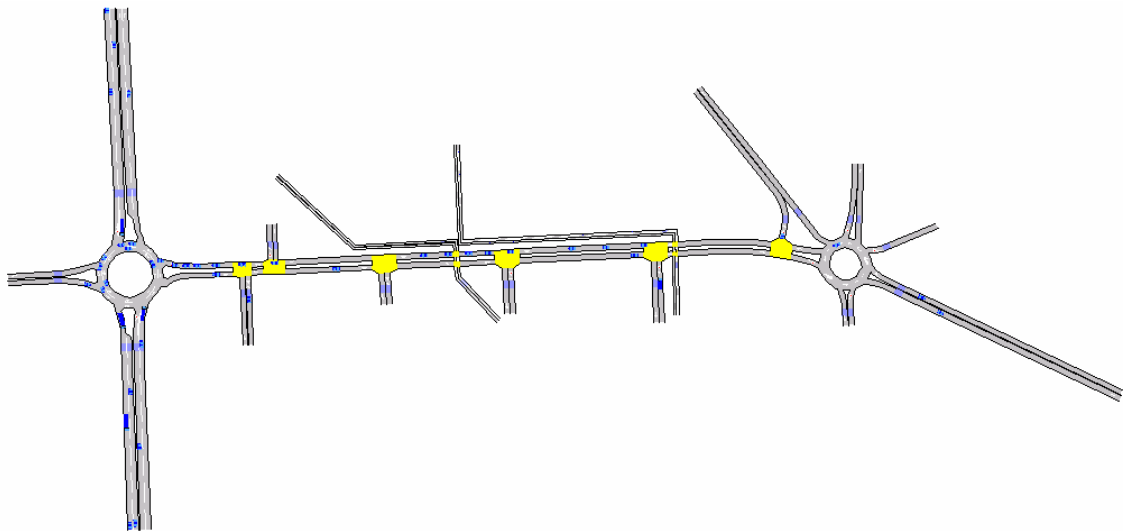
Při hodnocení charakteru dopravního provozu na studovaném segmentu sítě bylo třeba jednak u každé prověřované varianty dopravního řešení posoudit, zda dokáže zabezpečit plynulý provoz bez výraznějšího zahlcování, a dále bylo třeba tyto varianty vzájemně porovnat z hlediska různých dopravně-inženýrských kritérií.

## Riziko zahlcování provozu

Dobrou pomůckou při posuzování rizika vzniku kongescí na prověřovaném segmentu sítě v rámci analýzy výsledků simulačních experimentů byla možnost sledování 2D a 3D animací simulačního výpočtu.

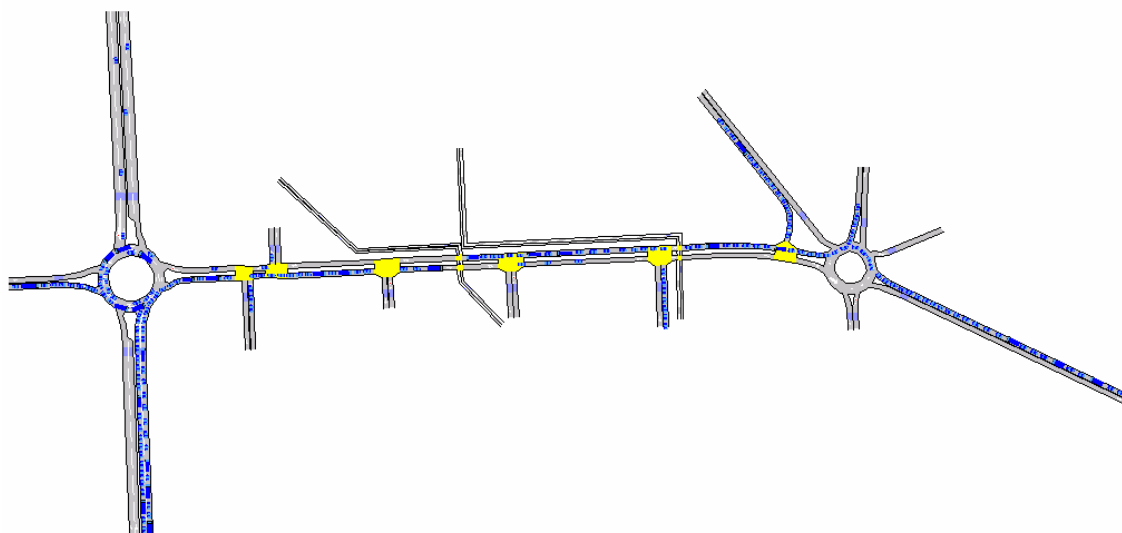
Vzhledem k tomu, že z časových důvodů prakticky není možné shlédnout animace všech realizovaných replikací simulačního výpočtu, byl aplikován následující přístup: nejprve byly prostřednictvím SQL dotazů vyhodnoceny průměrné hodnoty ukazatelů za jednotlivé replikace, jejichž vysoké hodnoty mohou indikovat výskyt kongescí - např. čas stání na 1 km jízdy nebo vyjádřené časové ztráty vozidel. Ty replikace simulačního výpočtu s nejvyššími zjištěnými hodnotami pak byly podrobeny analýze metodou sledování animace simulačního výpočtu.

Na základě toho lze konstatovat, že v případě experimentů č. 3 a č. 4 ani replikace udávající nejvyšší hodnoty sledovaného ukazatele (průměrné časové ztráty vozidel) nevykazovaly tendence k tvorbě kolon a modelovaný provoz při těchto konfiguracích lze tedy hodnotit jako bez rizika zahlcování. Nejvyšší zjištěné hodnoty ukazatele časových ztrát se v případě experimentů č. 3 a č. 4 pohybovaly kolem 43 sekund.



*Obrázek 30: Snímek obrazovky s animací bezproblémového provozu na studovaném segmentu sítě.*

Analýzou výsledků experimentů č. 1 a č. 2 bylo rovněž zjištěno, že naprostá většina replikací simulačních výpočtů modelovala provoz, který lze charakterizovat jako provoz bez zahlcování. Několik málo replikací simulačních výpočtů realizovaných v rámci uvedených experimentů však vykazovalo již relativně vysoké hodnoty časových ztrát vozidel (v řádu 100 až 180 sekund na 1 km jízdy). Animace těchto replikací simulačního výpočtu při hodnotách simulačního času kolem 16:00 hod, tedy v době, kdy Studentskou ulicí křižují proudy chodců o zvýšených intenzitách, vizualizovaly modelovaný provoz, který by bylo možno hodnotit jako provoz se zahlcováním. Obrázek níže zobrazuje patrně nejkritičtější z modelovaných situací (experiment č. 1, čas 16:12).



*Obrázek 31: Snímek obrazovky s animací patrně nejnepříznivějšího výsledku simulačního výpočtu (experiment č. 1).*

Protože výskyt výše popsané situace byl skutečně minoritní, lze setrvat na hypotéze, že i konfigurace simulátoru pro experimenty č. 1 a č. 2 modelují provoz bez zahlcování. Pokud by však varianty dopravního řešení prověřované v rámci těchto experimentů byly opravdu vážnými kandidáty na jejich uplatnění v realitě, pak by zřejmě bylo vhodné znovu přezkoumat míru rizika vzniku kongescí. V takovém případě bych doporučil realizovat výrazně větší počet replikací simulačního výpočtu s příslušnou konfigurací simulátoru a za asistence odborníka - dopravního inženýra - určit, v kolika procentech realizovaných replikací je modelován provoz, který lze charakterizovat jako zahlcený. Následně by opět dopravní inženýr měl rozhodnout, zda na základě zjištěných výsledků je realizace daného dopravního řešení v praxi přípustná či nikoli.

### **Plynulost provozu**

Posouzení plynulosti provozu na sledovaném segmentu sítě je zřejmě vhodné provést přímo prostřednictvím číselných ukazatelů. Je tedy na místě prezentovat přehled všech dopravně-inženýrských ukazatelů, které byly získány zpracováním výstupů simulačních výpočtů realizovaných v prostředí aplikace AIMSUN NG v rámci každého ze čtyř simulačních experimentů. Tyto hodnoty jsou obsaženy v následujících dvou tabulkách, zvlášť pro osobní a zvlášť pro nákladní dopravu.

<b>Osobní doprava</b>					
<b>Ukazatel</b>		<b>Experiment</b>			
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Mean Flow	Tok sítě - průměr počtu vozidel, která během 1 hod. sim. času projela sítě [vozidel/h]	2 683,00	2 684,00	2 687,00	2 688,00
Density	Hustota provozu - průměrný počet vozidel na 1 km sítě [vozidel/km]	9,97	9,27	6,99	6,87
Mean Speed	Průměrná rychlost průjezdu vozidel sítě [km/h]	30,74	31,39	34,27	34,53
Delay Time	Průměrný čas zdržení každého vozidla na jednom kilometru sítě [sec]	76,00	66,00	37,00	36,00
Stop Time	Průměrný čas stání jednoho vozidla na jednom kilometru sítě [sec]	54,00	45,00	18,00	17,00
Number of Stops	Průměrný počet zastavení jednoho vozidla na jednom kilometru sítě	3,48	3,22	2,08	2,01
Total Travel Time	Součet dob pobytů vozidel v síti [h]	49,96	46,76	35,23	34,63

*Tabulka 14: Hodnoty statistických ukazatelů popisující výsledky simulačních experimentů z hlediska celého modelovaného segmentu sítě - osobní doprava.*

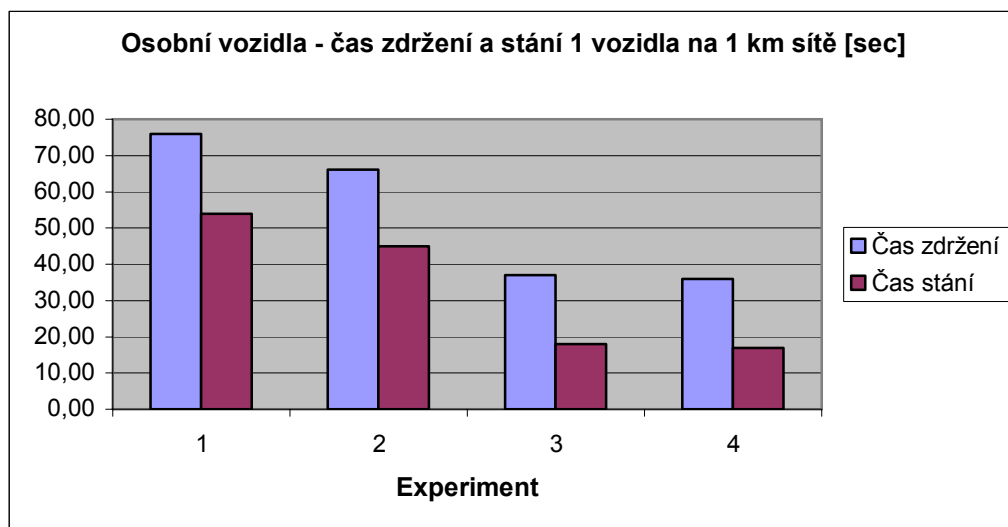
<b>Nákladní doprava</b>					
<b>Ukazatel</b>		<b>Experiment</b>			
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Mean Flow	Tok sítě - průměr počtu vozidel, která během 1 hod. sim. času projela sítě [vozidel/h]	313,00	318,00	316,00	316,00
Density	Hustota provozu - průměrný počet vozidel na 1 km sítě [vozidel/km]	1,54	1,44	1,08	1,06
Mean Speed	Průměrná rychlost průjezdu vozidel sítě [km/hod]	25,53	26,16	29,26	29,60
Delay Time	Průměrný čas zdržení každého vozidla na jednom kilometru sítě [sec]	97,00	86,00	50,00	48,00
Stop Time	Průměrný čas stání jednoho vozidla na jednom kilometru sítě [sec]	71,00	60,00	26,00	25,00
Number of Stops	Průměrný počet zastavení jednoho vozidla na jednom kilometru sítě	3,10	2,88	1,86	1,70
Total Travel Time	Součet dob pobytů vozidel v síti [h]	7,70	7,27	5,42	5,31

*Tabulka 15: Hodnoty statistických ukazatelů popisující výsledky simulačních experimentů z hlediska celého modelovaného segmentu sítě - nákladní doprava.*

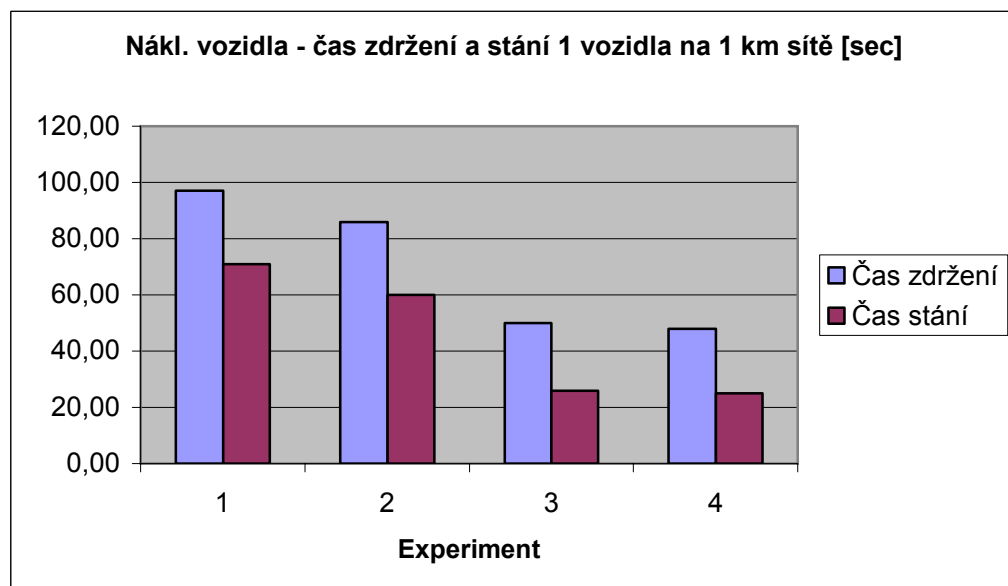
K otázce plynulosti silničního provozu lze zřejmě nelépe vztáhnout ukazatel časových ztrát vozidel. Ten popisuje, o kolik se v průměru jedno vozidlo zdrží na jednom km jízdy oproti ideálnímu průjezdu stejného úseku. Rovněž ukazatel průměrného času stání vozidla na jednom km sítě úzce souvisí s problematikou plynulosti provozu.

Z grafické reprezentace hodnot průměrného času zdržení a času stání vozidla na 1 km sítě (viz následující dva grafy) lze vyzorovat, že vybudování podchodu nahrazujícího přechod **CHI** vede k výraznému, až téměř 50% snížení průměrných časových ztrát vozidel při průjezdu studovaným segmentem sítě. Instalace zpomalovacích bariér hodnoty těchto ukazatelů zvyšuje, ovlivňuje je však výrazně méně.

Varianty dopravního řešení zahrnujícího vybudování podchodu pro chodce rovněž vykazují v průměru nižší relativní podíl času stání vůči celkovému času zdržení vozidla při průjezdu jedním kilometrem sítě. Uvedené trendy platí pro osobní i nákladní dopravu.

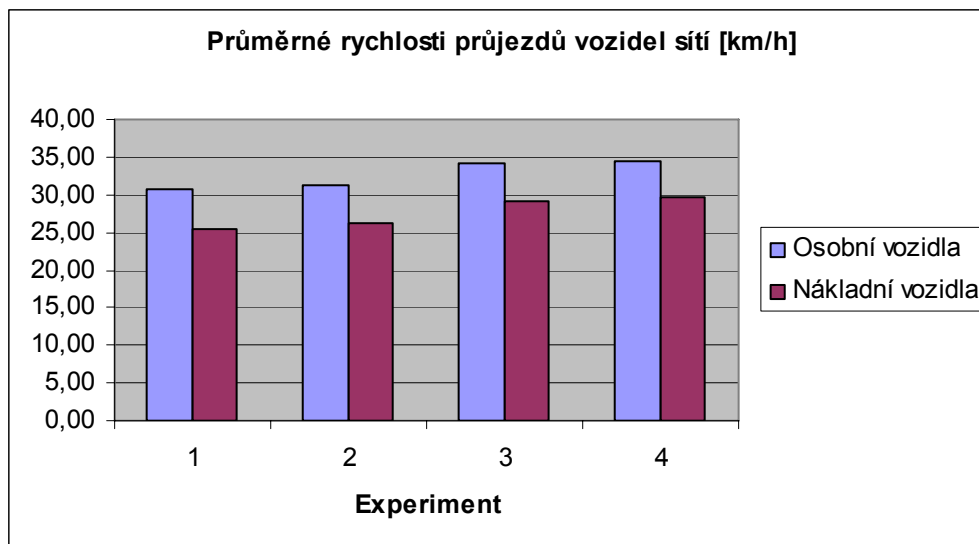


Obrázek 32: Srovnání časů zdržení a stání - osobní vozidla.



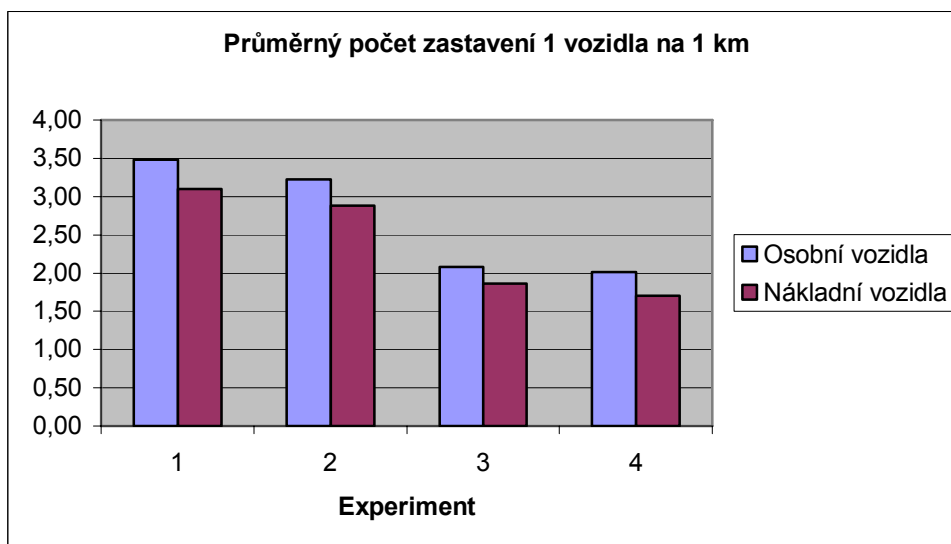
Obrázek 33: Srovnání časů zdržení a stání - nákladní vozidla.

Dalším ukazatelem charakterizujícím plynulost silničního provozu je bezesporu dosahovaná průměrná rychlost průjezdu vozidel sítí. Její zjištěné hodnoty vykazují poněkud menší diference ve srovnání s časovými ztrátami - přibližně v řádu 15%. I zde vycházejí příznivěji varianty řešení s podchodem pro chodce, instalace bariér má také v tomto případě minimální vliv. Důležitější však zřejmě bude vyhodnocení ukazatele průměrná rychlost vztaženého pouze na komunikaci Studentská ulice.



Obrázek 34: Průměrné rychlosti průjezdů vozidel sítí.

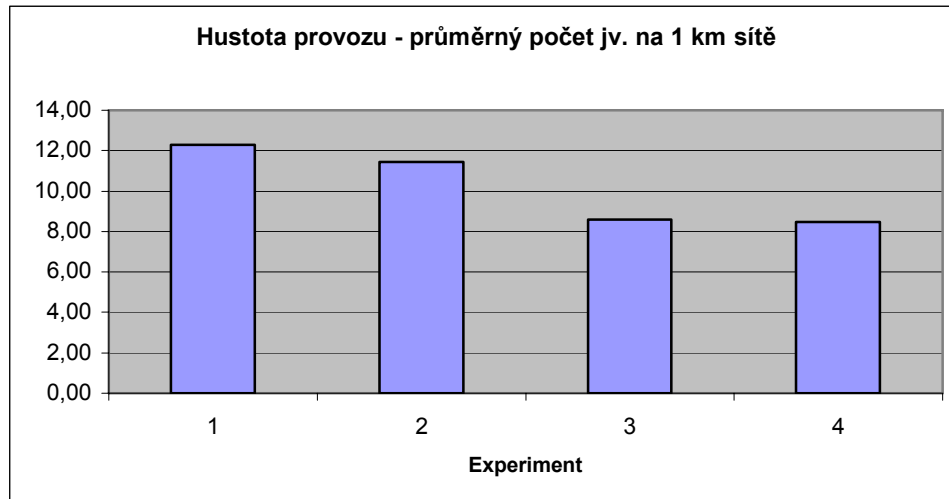
Dá se očekávat, že vybudování podchodu pro chodce výrazně sníží počty průměrných zastavení vozidla na jednom kilometru jízdy sítí. Naměřené hodnoty tohoto ukazatele to potvrzují - viz následující obrázek. Ten poukazuje patrně i na poněkud agresivnější (popř. setrvačnější) modelovaný styl jízdy řidičů nákladních vozů ve srovnání s řidiči osobních vozů, neboť průměrná hodnota tohoto ukazatele je pro nákladní dopravu o něco nižší.



Obrázek 35: Průměrné počty zastavení 1 vozidla na 1 km pro celou síť.



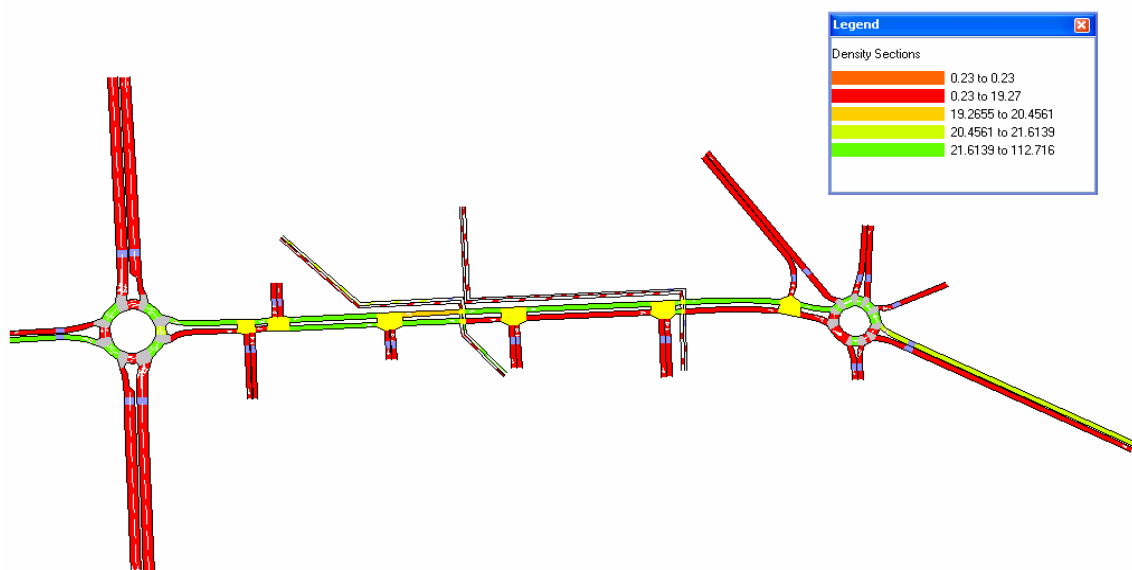
Dalším vyhodnocovaným ukazatelem je hustota provozu, tedy počet vozidel (v tomto případě přepočítaných na jednotková vozidla), jež se v průměru nacházejí na jednom kilometru sítě. I zde má vybudování podchodu pro pěší poměrně znatelný efekt - hustota provozu ve variantách řešení zkoumaných v experimentech č. 3 a č. 4 je přibližně o 30% nižší ve srovnání s výsledky experimentů č. 1 a č. 2.



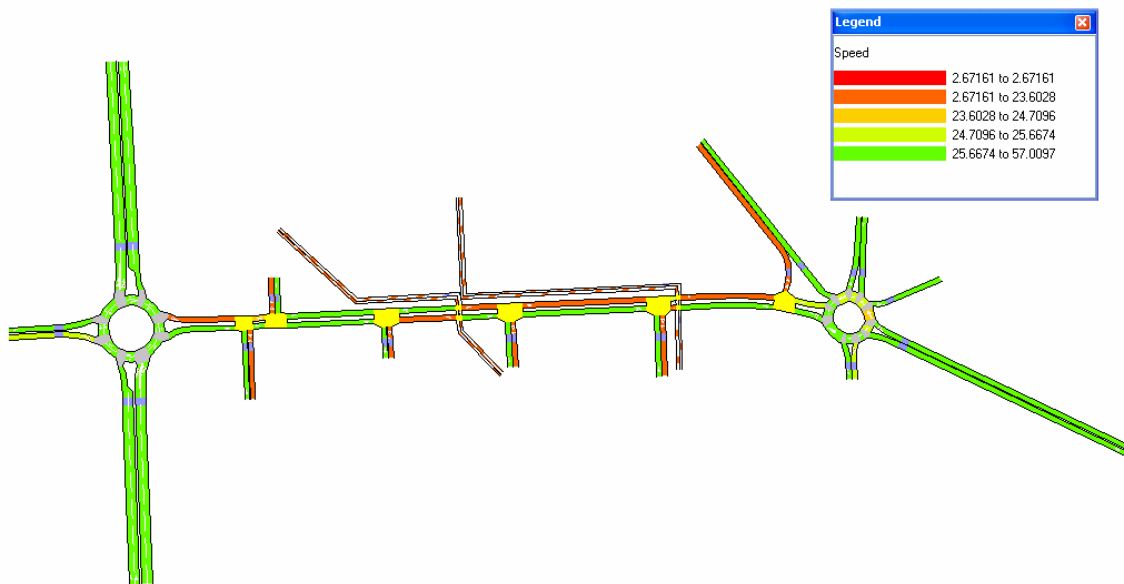
Obrázek 36: Srovnání hustoty provozu v celé síti - jednotková vozidla.

### Statická vizualizace výsledků simulačních experimentů - pohled na celý segment studované dopravní sítě

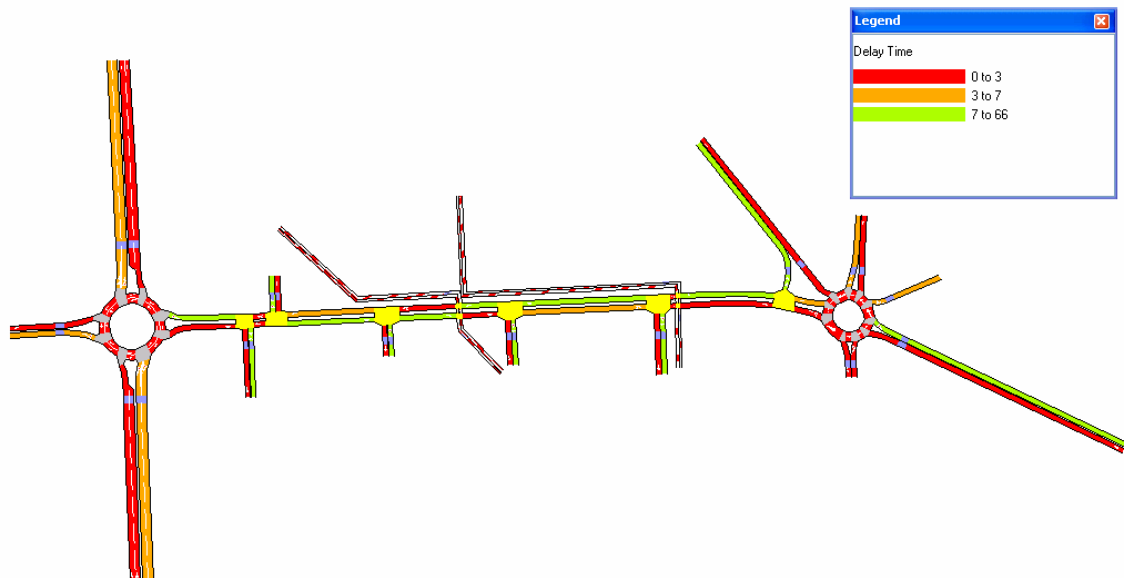
K lepší představě o charakteru modelovaných dopravních procesů vztahujících se ke konkrétním úsekům sítě může přispět i případná vizualizace výsledků simulačních experimentů, kterou aplikace AIMSUN NG rovněž nabízí. Z důvodu omezení kladeného na rozsah diplomové práce zde pouze pro ilustraci prezentuji tři tyto vizualizace vytvořené na základě výsledků simulačního experimentu č. 1. Lze říci, že výsledky analýzy těchto vizualizací jsou v souladu se závěry, ke kterým jsem dospěl vyhodnocením číselných ukazatelů a sledováním animací simulačního výpočtu.



Obrázek 37: Statická vizualizace hodnot hustoty provozu (experiment č. 1).



Obrázek 38: Statická vizualizace hodnot průměrných rychlostí (experiment č. 1).



Obrázek 39: Statická vizualizace hodnot průměrného času zdržení pro 1 vozidlo na 1 km jízdy (experiment č. 1).

Poznámka: na výše uvedených obrázcích jsou vždy nejvyšší hodnoty sledovaného ukazatele zobrazeny zelenými barvami spektra, nejnižší naopak červenými. To může být u některých typů ukazatelů v rozporu s očekáváním postaveným na běžných konvencích, nicméně takto jsou v aplikaci AIMSUN NG barvy přidělovány nástrojem pro automatické definování vizualizovaných intervalů.

### **Shrnutí poznatků získaných analýzou ukazatelů charakterizujících provoz v celém studovaném segmentu silniční sítě**

Na základě provedené analýzy těchto výsledků simulačních experimentů, které charakterizují celkovou povahu provozu ve zkoumaném segmentu sítě, lze konstatovat, že v případě všech čtyřech zkoumaných variant dopravního řešení ulice Studentská a přilehlých komunikací je možné očekávat vcelku plynulý provoz. Dosahované

průměrné rychlosti odpovídají topologii silniční sítě (navíc na většině úseků je rychlost omezena na 40 km/h či méně), rovněž časové ztráty vozidel jsou vcelku přiměřené. Instalace zpomalovacích bariér snižuje plynulost provozu v celém segmentu jen nepatrně, vybudování podchodu pro pěší by naopak plynulost provozu znatelně zlepšilo.

Poznámka: srovnávat hodnoty průměrného toku sítě nemá příliš smysl, neboť, jak bylo uvedeno výše, v případě všech prověřovaných dopravních řešení hodnoty simulátorem realizovaných dopravních toků v podstatě odpovídaly nastaveným hodnotám dopravní poptávky. Stejně tak nebylo sledováno a vyhodnocováno směřování pohybu vozidel v síti, neboť topologie zde modelovaného segmentu silniční sítě zřejmě řidičům nenabízí možnosti volby tras mezi počátečními a koncovými úseky - vždy existuje pouze jediná.

### 5.11.5 Posouzení charakteru dopravního provozu na Studentské ulici

Studentská ulice se nachází v centru modelovaného segmentu silniční sítě a je spojnicí mezi dvěma okružními křižovatkami. Analýzou animací simulačních výpočtů i statických vizualizací ukazatelů na modelu sítě lze dospět ke zjištění, že přechody pro chodce na této ulici představují v čase, kdy jsou realizovány nejvyšší intenzity přechodů chodců, zřejmě relativně nejproblémovější místa v celém segmentu zkoumané sítě. Chodci s předností na přechodech se zde totiž nejvyšší měrou podílejí na snižování celkové plynulosti provozu.

Nicméně, závěry charakterizující povahu dopravního provozu z globálního pohledu v celém segmentu zkoumané sítě vyslovené v předchozí podkapitole lze vztáhnout i na úseky Studentské ulice. I zde je tedy možno provoz považovat za dostatečně plynulý, ač s tvorbou dočasných front vozidel před přechody pro chodce.

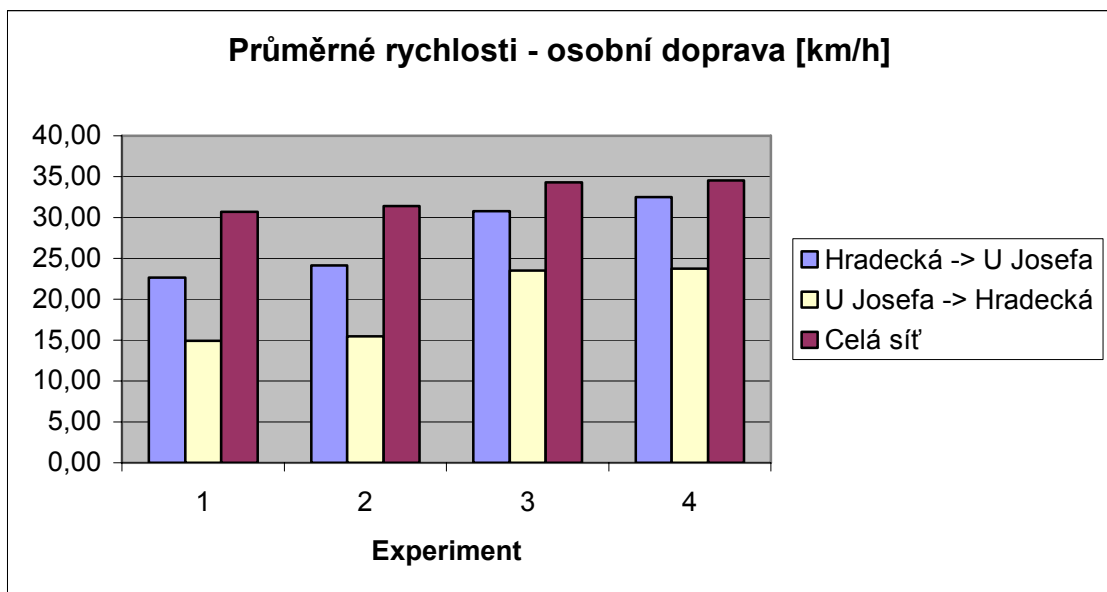
Následující tabulka uvádí zjištěné hodnoty statistických dopravně-inženýrských ukazatelů charakterizujících provoz na Studentské ulici vyjádřených zvláště pro oba směry. Jak je ukázáno níže, na kvalitu provozu v jednotlivých směrech má vliv skutečnost, že intenzity poptávaných dopravních proudů (nastavené v příslušné O/D matici) u osobních vozidel ve směru "U Josefa → Hradecká" jsou ve sledované špičkové hodině řádově o 45% vyšší než v opačném směru. V případě nákladní dopravy uvedená disproporce nenastává, poptávané intenzity dopravních proudů nákladních vozidel jsou v obou směrech vyrovnané.

Ukazatel	Směr	Osobní doprava				Nákladní doprava			
		Experiment				Experiment			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Průměrný tok [voz./h]	Hradecká → U Josefa	318,00	315,00	318,00	318,00	64,00	66,00	66,00	66,00
	U Josefa → Hradecká	460,00	465,00	466,00	464,00	62,00	62,00	63,00	63,00
Průměrná rychlost [km/h]	Hradecká → U Josefa	22,67	24,16	30,80	32,53	20,27	21,30	27,80	28,98
	U Josefa → Hradecká	14,92	15,49	23,54	23,74	14,08	14,53	21,91	22,11
Časové ztráty vozidel [sec]	Hradecká → U Josefa	34,00	30,00	10,00	8,00	39,00	35,00	12,00	10,00
	U Josefa → Hradecká	79,00	72,00	29,00	28,00	81,00	74,00	30,00	29,00
Čas stání [sec]	Hradecká → U Josefa	23,54	20,20	3,54	1,94	28,03	25,11	4,28	3,14
	U Josefa → Hradecká	64,51	58,46	18,57	17,71	67,91	61,46	19,90	18,66
Počet zastavení	Hradecká → U Josefa	1,72	1,45	0,51	0,32	1,51	1,38	0,44	0,37
	U Josefa → Hradecká	4,33	4,11	1,94	1,90	3,13	2,99	1,44	1,41

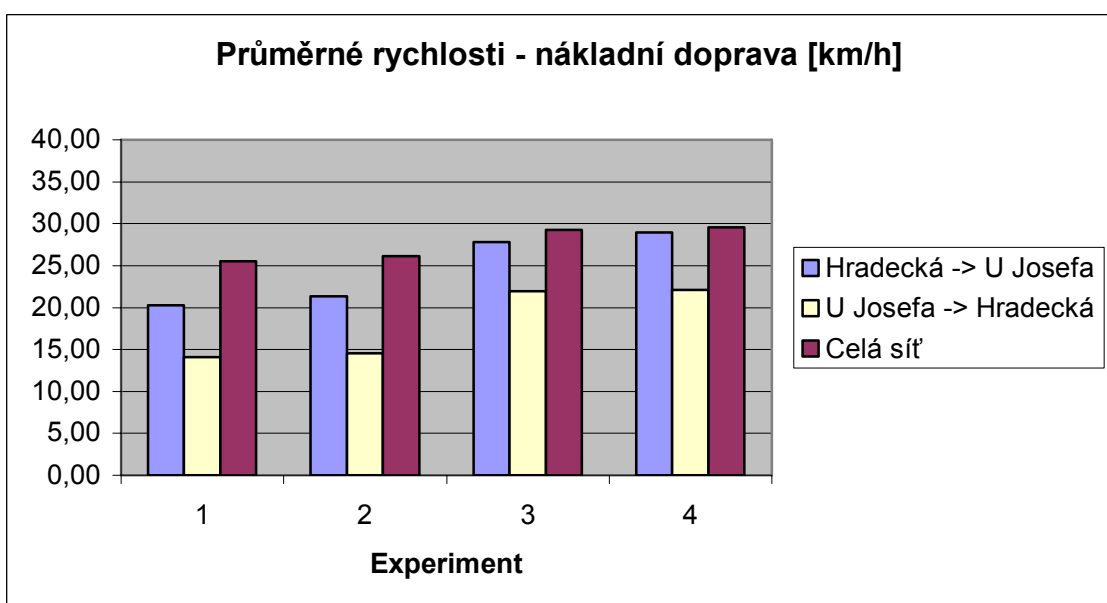
Tabulka 16: Výsledné hodnoty statistických ukazatelů pro oba jízdní směry na ulici Studentská.

Rozborem těchto ukazatelů, především jejich grafické reprezentace v podobě sloupcových diagramů vyobrazených níže, lze vyslovit analogické závěry jako v případě hodnocení celkového provozu ve sledovaném segmentu sítě. Vybudování podchodu pro pěší by se výraznou měrou podílelo na zlepšení plynulosti provozu na Studentské ulici, instalace zpomalovacích bariér by plynulost snižovala, avšak pouze nepatrně.

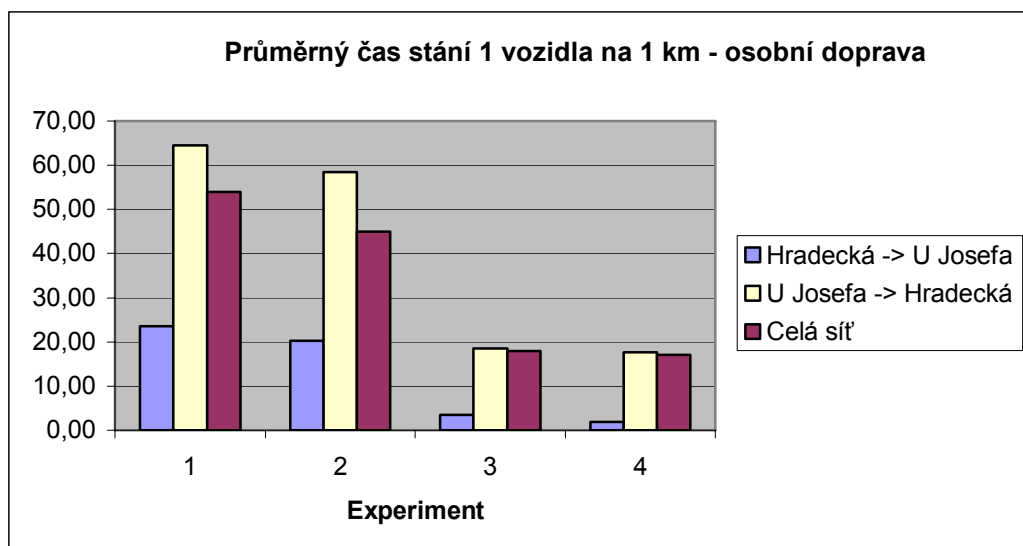
Uvedené grafy rovněž jasně dokumentují skutečnost, že modelovaný provoz ve směru "Hradecká→U Josefa" byl znatelně plynulejší než ve směru opačném. To se projevilo jak na dosahovaných průměrných rychlostech, tak především na průměrných hodnotách času stání, kde je rozdíl mezi oběma směry poměrně značný. Do grafické reprezentace ukazatelů zjištěných pro oba směry na Studentské ulici byly doplněny i průměrné hodnoty zjištěné pro celou síť, aby bylo umožněno jejich poměrné srovnání.



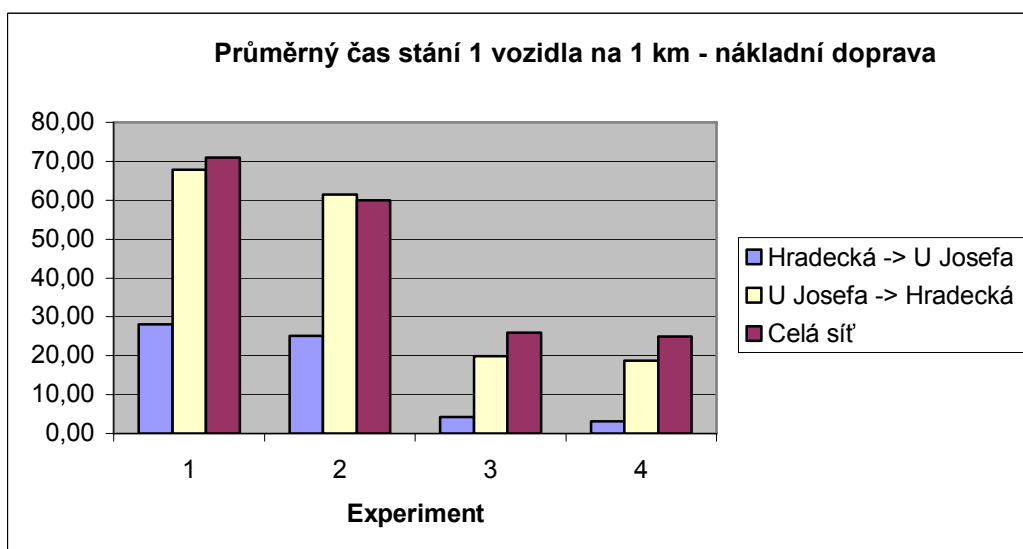
Obrázek 40: Dosahované průměrné rychlosti na ulici Studentská - osobní doprava.



Obrázek 41: Dosahované průměrné rychlosti na ulici Studentská - nákladní doprava.



Obrázek 42: Průměrný čas stání 1 vozidla na 1 km sítě na ulici Studentská - osobní doprava.



Obrázek 43: Průměrný čas stání 1 vozidla na 1 km sítě na ulici Studentská - nákladní doprava.

### 5.11.6 Srovnání s výsledky studie realizované Dopravní fakultou Jana Pernera

Závěry vyslovené na základě analýzy výsledků simulačních výpočtů a také některé ukazatele v této studii lze srovnat s těmi, které jsou uvedeny v již zmíněné studii [3] zpracované Dopravní fakultou Jana Pernera Univerzity Pardubice, neboť obě vycházejí ze stejných podkladů, vymezují stejný objekt zkoumání a aplikují stejnou experimentální výzkumnou metodu, tedy počítačovou simulaci.

Na druhou stranu, jak již bylo konstatováno v úvodu k této simulační studii, simulátor Villon, použitý při implementaci simulačních modelů ve studii DFJP, aplikuje vyšší míru abstrakce při modelování přemísťovacích procesů vozidel ve srovnání se simulátorem AIMSUN NG. Lze tedy očekávat určité rozdíly ve zjištěných hodnotách

sledovaných ukazatelů při porovnání výsledků obou studií, přičemž simulační experimenty provedené v této studii by měly poskytovat přesnější výsledky.

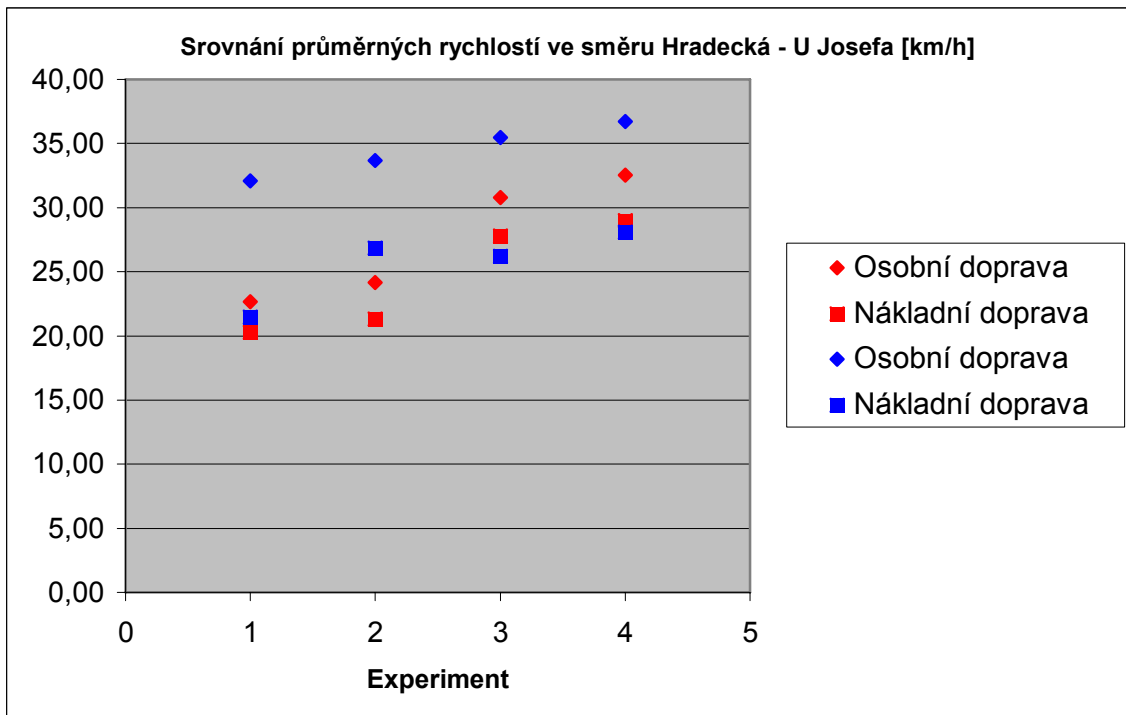
V zásadě však je možné konstatovat, že obě studie dospěly ke shodným závěrům, tedy v obou případech byly všechny čtyři prověřované varianty dopravního řešení posouzeny jako kapacitně vyhovující. Dílčí rozdíly v závěrech obou studií spočívají především v hodnocení míry vlivu rozdílů v konfiguracích silniční infrastruktury na povahu provozu, jimiž se jednotlivé varianty dopravního řešení odlišovaly.

Konkrétně, výsledky studie, která je součástí této diplomové práce, indikovaly v poměru větší rozdíl v kvalitě provozu (především na ulici Studentská) při vybudování resp. nevybudování podchodu pro chodce. Tento fakt lze doložit například srovnáním hodnot průměrných rychlostí simulovaných pohybů vozidel na ulici Studentská - viz tabulka a grafy níže.

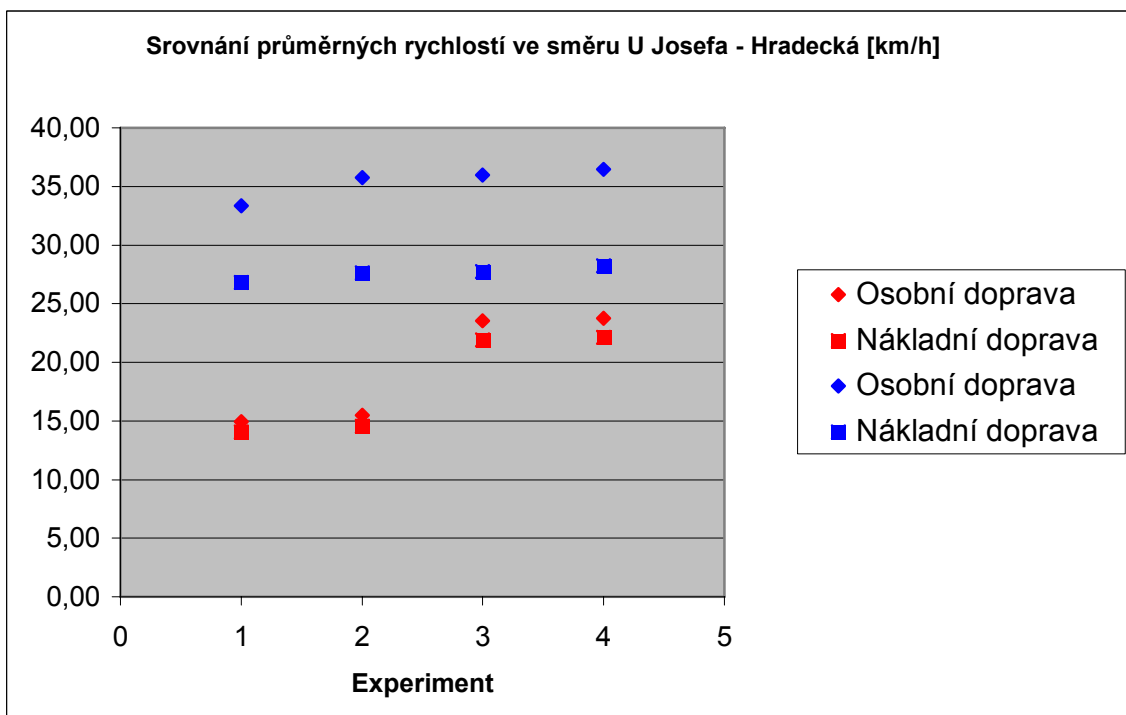
Rovněž je nutno konstatovat, že simulačních experimenty realizované v této práci produkují celkově relativně méně optimistické výsledky v porovnání s výsledky srovnávané studie, přičemž tento rozdíl je patrně nejvyšší v hodnocení kvality provozu na Studentské ulici ve směru "U Josefa → Hradecká".

		Osobní doprava				Nákladní doprava			
		Experiment				Experiment			
Směr		1	2	3	4	1	2	3	4
Výsledky dosažené v této práci [km/h]	Hradecká - U Josefa	22,67	24,16	30,80	32,53	20,27	21,30	27,80	28,98
	U Josefa - Hradecká	14,92	15,49	23,54	23,74	14,08	14,53	21,91	22,11
Výsledky dosažené ve studii DFJP [km/h]	Hradecká - U Josefa	32,08	33,67	35,48	36,71	21,45	26,87	26,20	28,09
	U Josefa - Hradecká	33,33	35,75	35,96	36,48	26,79	27,61	27,72	28,24
Procentuelní srovnání	Hradecká - U Josefa	71%	72%	87%	89%	94%	79%	106%	103%
	U Josefa - Hradecká	45%	43%	65%	65%	53%	53%	79%	78%
Procentuelní diference	Hradecká - U Josefa	-29%	-28%	-13%	-11%	-6%	-21%	6%	3%
	U Josefa - Hradecká	-55%	-57%	-35%	-35%	-47%	-47%	-21%	-22%

*Tabulka 17: Srovnání hodnot experimentálně určených průměrných rychlostí vozidel na ulici Studentská zjištěných v obou porovnávaných studiích.*



Obrázek 44: Srovnání průměrných rychlostí ve směru "Hradecká → U Josefa" červenou barvou jsou znázorněny hodnoty zjištěné v této studii, modrou barvou hodnoty zjištěné ve studii DFJP.



Obrázek 45: Srovnání průměrných rychlostí ve směru "U Josefa → Hradecká" červenou barvou jsou znázorněny hodnoty zjištěné v této studii, modrou barvou hodnoty zjištěné ve studii DFJP.



### 5.11.7 Ukázky 3D animace simulačního výpočtu

Následující čtyři obrázky poskytují náhled na vytvořenou 3D animační scénu - Studentská ulice, přilehlé komunikace a budovy kampusu Univerzity Pardubice. Na datovém nosiči, který je přílohou této práce, jsou k dispozici videosekvence s ukázkami 3D animace simulačního výpočtu.



Obrázek 46: Snímek obrazovky s ukázkou 3D animace simulačního výpočtu



Obrázek 47: Snímek obrazovky s ukázkou 3D animace simulačního výpočtu





Obrázek 48: Snímek obrazovky s ukázkou 3D animace simulačního výpočtu



Obrázek 49: Snímek obrazovky s ukázkou 3D animace simulačního výpočtu

## **5.12 Ověření nutnosti vykonat další experimenty**

Naplánované simulační experimenty byly úspěšně vykonány a zjištěné statistické ukazatele poskytly potřebné podklady pro vyslovení závěrů studie. Jelikož cílem této simulační studie bylo kapacitně prověřit a vzájemně porovnat daná čtyři dopravní řešení segmentu silniční sítě bez ambice navrhnout a prověřit jiná, potenciálně lepší řešení, lze konstatovat, že není nutno vykonat další experimenty a simulační studii je možno uzavřít.

## **5.13 Závěry simulační studie**

Cílem této případové simulační studie bylo prověřit experimentální výzkumnou metodou počítačové simulace z provozně-kapacitního hlediska čtyři zvažované varianty dopravního řešení ulice Studentská a přilehlých komunikací, a to během špičkové odpolední hodiny při intenzitách dopravních proudů prognózovaných pro rok 2020. Varianty navrhovaného dopravního řešení předpokládají napojení na tzv. 5. variantu komunikační sítě města Pardubic a jejich autorem je firma Highway Design Hradec Králové.

Simulační experimenty naplánované v souladu s uvedeným cílem byly úspěšně vykonány, jejich výstupy byly následně zpracovány statistickými metodami a případně převedeny do grafické reprezentace a vyhodnoceny. Použitým implementačním prostředím byl mikroskopický simulátor silniční dopravy AIMSUN NG verze 5.10.

Na základě analýzy dosažených výsledků lze vyslovit tyto hlavní závěry:

- a) Všechny čtyři prověřované varianty dopravního řešení umožní realizovat silniční provoz, který lze charakterizovat jako provoz plynulý, bez výraznějšího zahlcování.
- b) Příslušné sledované dopravně-inženýrské ukazatele jasně poukazovaly na to, že výstavba podchodu pro pěší by měla výrazný pozitivní vliv na plynulost provozu v celém zkoumaném segmentu silniční sítě (proudy chodců křižujících Studentskou ulici s předností na přechodech představují zřejmě relativně nejproblémovější faktor ve studovaném systému).
- c) Instalace zpomalovacích bariér v obou směrech před přechody pro chodce plynulost provozu sníží, avšak jen nepatrnou měrou.

Ze všech čtyřech zkoumaných variant dopravního řešení ulice Studentská se tedy jeví jako nejlépe přijatelná ta, jež předpokládá výstavbu podchodu pro pěší spolu s instalací zpomalovacích bariér. Tato varianta umožní realizaci vcelku plynulého provozu bez rizika vzniku kongescí jak na ulici Studentská, tak z hlediska celého zkoumaného segmentu sítě. Nepatrné snížení plynulosti provozu způsobené instalací zpomalovacích bariér je vyváжено podstatným přínosem v podobě zvýšení bezpečnosti chodců na poměrně frekventovaném přechodu.

Pokud by vážným kandidátem na realizaci v praxi byla varianta dopravního řešení nepředpokládající výstavbu podchodu pro chodce, doporučil bych ještě hlouběji (postupem uvedeným výše v textu studie) prozkoumat míru kapacitních rezerv tohoto

řešení vzhledem k prognózovaným intenzitám dopravy pro rok 2020 a kvalifikovaně posoudit, zda je dostatečná z hlediska principu tzv. bezpečného návrhu. Několik málo replikací simulačního výpočtu v případě těchto variant totiž indikovalo potenciální rizika vzniku dočasných kongescí ve špičkové hodině.

Závěrem lze podotknout, že nebyly (v souladu se zadáním studie) prozkoumány všechny dílčí alternativy celkového navrženého dopravního řešení - v případě zájmu zadavatele by tedy bylo možno metodou počítačové simulace prověřit ještě další varianty, které by na zvažované rámcově dané silniční infrastruktuře přicházely v úvahu - například změna umístění podchodu pro pěší, použití světelné signalizace na přechodech pro chodce a podobně. Implementační prostředí použité při vypracování této studie rovněž nabízí další možnosti hodnocení jednotlivých zkoumaných dopravních řešení, např. možnost posoudit míru ekologické zátěže způsobované exhalacemi výfukových plynů.

## **6 Porovnání výsledků simulačních experimentů s analytickými výpočty pro vybrané typy křižovatek**

### **6.1 Motivace k provedení srovnání výsledků simulačních experimentů s analytickým výpočtem**

Z důvodů uvedených výše (viz kapitola 5.9) nebylo možno provést validaci simulačního modelu implementovaného v rámci případové simulační studie, která je součástí této diplomové práce. Abych alespoň částečně ověřil validitu výsledků produkovaných mikroskopickým simulátorem AIMSUN NG, provedl jsem srovnání výsledků analytického výpočtu kapacity jednoho typu izolované stykové neřízené křižovatky a jednoho typu izolované okružní křižovatky s výsledky simulačních experimentů s modely shodných typů křižovatek.

Styková neřízená křižovatka uvažovaná v rámci tohoto srovnání je navržena jako co nejjednodušší křížení resp. napojení dvou proudů - jednosměrného hlavního proudu a napojovaného jednosměrného vedlejšího proudu (tj. s odbočením vpravo). Okružní křižovatka je potom geometricky identická s okružní křižovatkou Hradecká - Studentská - Bělehradská, která byla součástí segmentu sítě zkoumaného v případové studii.

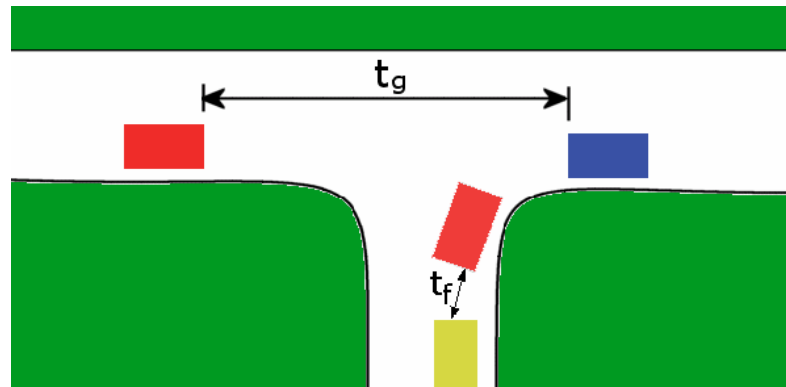
### **6.2 Metodika analytického výpočtu kapacity křižovatky**

#### **6.2.1 Neřízená styková křižovatka**

Dle definice uvedené v [8] je výkonnost průsečné popř. stykové dopravně rozlišené křižovatky podmíněna výkonností v každém jejím styčném bodě, v němž dochází k přetínání, spojení nebo rozpojení jízdnic proudů. Výkonnost podřazených proudů je determinována počtem časoprostorových mezer mezi vozidly s předností v jízdě. Rozhodující pro celkovou výkonnost křižovatky je nejméně příznivá kombinace zatížení jízdnic proudů.

Rozhodujícími podklady pro určení kapacity vedlejších dopravních proudů při tom jsou:

- model rozdělení časových mezer mezi vozidly hlavního (nadřazeného proudu či proudů) - jedná se o pravděpodobnostní rozdělení,
- stanovení tzv. kritické mezery  $t_g$  [s] mezi vozidly hlavního proudu, tj. mezery, kterou 50% řidičů přijímá jako dostatečnou pro realizaci úspěšného zařazení do hlavního proudu,
- model odjezdu vozidel vedlejšího proudu, resp. stanovení tzv. následné mezery  $t_f$  [s] mezi vozidly tohoto proudu.



Obrázek 50: Význam hodnot  $t_g$  (kritická mezera) a  $t_f$  (následná mezera). Zdroj: [8]

Konkrétní hodnoty  $t_g$  a  $t_f$  lze nalézt v normě ON 73 6102 [13] nebo je možno je určit dopravním průzkumem. Hodnoty  $t_g$  jsou závislé na typu vozidla (osobní, pomalá), na rychlosti hlavního proudu, na typu úpravy přednosti v jízdě (dej přednost resp. stop - dej přednost) a na typu prováděného manévru. Hodnoty  $t_f$  závisí na podílu pomalých vozidel v dopravních proudech a na typu úpravy přednosti v jízdě.

Odvozená podoba výpočetního vztahu pro maximální kapacitu vedlejšího dopravního proudu  $c_m$  při zařazování odbočením vpravo do hlavního proudu s intenzitou provozu  $M$  má tuto podobu:

$$c_m = \frac{M}{e^{M \cdot t_g / 3600} - e^{M \cdot (t_g - t_f) / 3600}}$$

Výše uvedený vztah udává tzv. základní výkonnost křižovatky, tj. maximální teoretickou výkonnost nezohledňující kvalitu provozu. V praxi se posuzuje tzv. praktická výkonnost, kdy se bere v úvahu kvalita provozu, přičemž sledovaným kritériem je časová ztráta vozidla při průjezdu křižovatkou, jež by neměla překročit 25 sekund. Pro praktickou výkonnost platí vztah  $c_p = c_m - K$ , kde za  $K$  dosazujeme hodnotu 150 voz/hod pro špičkový provoz (průměrná kvalita) a 200 voz/hod pro denní průměrný provoz (dobrá kvalita).

Dále existují výpočetní vztahy pro vyjádření ztrátového času  $t_w$  a délky vzduť  $n$ . Obecné vztahy jsou poměrně složité. Pro případ zde uvažovaného typu křižovatky platí níže uvedené výpočetní vztahy, kde  $M$  je intenzita hlavního proudu a  $N$  je intenzita vedlejšího proudu.

$$t_w = \frac{3600 \cdot (1 - \gamma)}{c_m - N}$$

$$n = \frac{N \cdot (1 - \gamma)}{c_m - N}$$

$$\gamma = e^{-(M \cdot t_g + N \cdot t_f) / 3600}$$

## 6.2.2 Malá okružní křižovatka

Kapacita malé okružní křižovatky je podmíněna kapacitou každého jejího vjezdu. Jelikož v případě malé okružní křižovatky nedochází k průpletu vozidel (typickému pro velkou okružní křižovatku), chovají se řidiči na vjezdech do malé okružní křižovatky podobně jako na neřízené stykové křižovatce, každý vjezd je proto posuzován jako tříramenná styková křižovatka dvou jednosměrných komunikací. Kapacita vedlejšího proudu je ovlivněna především intenzitou hlavního proudu. Jedná se v podstatě o funkční závislost, přičemž ta může být v lineárním, exponenciálním či složitějším tvaru.

Konkrétní tvar a koeficienty této funkční závislosti se liší pro různé země - důvodem je především odlišné chování, návyky, zkušenosti a disciplinovanost při provozu na okružních křižovatkách v různých částech světa. Proto v zemích s dlouholetou tradicí okružních křižovatek (Anglie, Austrálie) kapacitní výpočty udávají větší (a to i výrazně) hodnoty než jaké vycházejí např. pro Německo, kde jsou okružní křižovatky relativně novým prvkem a disciplinovanost řidičů na vysoké úrovni. Pro výpočty kapacit okružních křižovatek v našich podmínkách se doporučuje používat vzorec a koeficienty udávající nižší hodnoty, tj. ten, který byl provedenými měřeními ověřen pro Spolkovou republiku Německo.

Tento výpočetní vztah pro kapacitu vjezdu  $Q_e$  při intenzitě provozu na předchozím úseku okružní křižovatky  $Q_c$  má následující tvar:

$$Q_e = A e^{-B \cdot 10^{-4} Q_c}$$

Hodnoty koeficientů A a B používaných v podmínkách České Republiky jsou následující:

Počet pruhů		A	B
na okruhu	na vjezdu		
3	2	2018	6,68
2	2	1577	6,61
2-3	1	1300	8,60
1	1	1226	10,77

Tabulka 18: Hodnoty koeficientů A a B. Zdroj: [8]

Autorem metodiky aplikující výše uvedený výpočetní vztah je prof. Brillon, po němž je tato metoda také pojmenována. Nutno poznamenat, že existují i jiné metodiky výpočtu kapacit okružních křižovatek, které jsou rovněž používány v dopravně inženýrských výpočtech pro oblast České Republiky.

## 6.3 Výsledky analytického výpočtu

### 6.3.1 Neřízená styková křižovatka tvaru T

Jak již bylo řečeno, pro účely tohoto srovnávacího experimentu je zvažována jednoduchá dopravně rozlišená styková křižovatka (se značením Dej přednost), kde se na jednosměrný hlavní proud napojuje jednosměrný vedlejší proud odbočením vpravo.

Předpokládejme rychlost hlavního proudu 60 km/hod a jeho intenzitu  $M = 700$ . Abychom eliminovali případnou chybu v definici, co ještě považujeme za vozidlo rychlé a co za vozidlo pomalé, bude tento výpočet (i následný simulační experiment) proveden pouze pro proud osobních vozů. Potom hodnoty příslušných koeficientů jsou  $t_g = 5$  a  $t_f = 3,9$ . Výpočtem získáváme:

$$c_m = \frac{M}{e^{M \cdot t_g / 3600} - e^{M \cdot (t_g - t_f) / 3600}} = \frac{700}{e^{700 \cdot 5 / 3600} - e^{700 \cdot (5 - 3,9) / 3600}} = 498$$

Maximální kapacita této křižovatky je tedy 498 vozidel/hod. Jedná se při tom o teoretickou, maximální výkonnost křižovatky, nezohledňující kvalitu provozu (délky front, čas. ztráty cestujících atd.).

Praktická výkonnost při stanoveném  $K = 150$  voz/hod (špičkový provoz, průměrná kvalita) je  $c_p = 348$  a při stanoveném  $K = 200$  voz/hod (denní průměrný provoz, dobrá kvalita) je  $c_p = 298$ .

Poznámka: ačkoli by bylo vhodnější provést srovnání analytického výpočtu s výsledky simulačních experimentů pro předpokládané rychlosti takové, jež byly aplikovány při parametrizaci simulačních modelů v případové studii zpracovávané v rámci této práce (tj. např. rychlosti 40 km/hod resp. 30 km/hod), byl zde proveden výpočet pro rychlost hlavního proudu 60 km/hod, neboť toto byla nejnižší hodnota, pro kterou jsou v normě ON 73 6102 [13] uváděny hodnoty koeficientů  $t_g$  a  $t_f$ .

### 6.3.2 Malá čtyřramenná okružní křižovatka

Výpočet kapacity malé okružní křižovatky výše popsanou Brillonovou metodou nedává přímou odpověď na to, jaká je maximální kapacita dané křižovatky, nýbrž umožňuje při určených intenzitách dopravních proudů vyjádřit rezervy resp. deficity kapacit na jednotlivých vjezdech.

Maximální přípustnou zátěž okružní křižovatky zkoumané v tomto experimentu jsem tedy vyjádřil tak, že určité dané výchozí intenzity dopravních proudů jsem proporcionálně navyšoval, aby došlo k anulování původně indikované rezervy. Konkrétně, výchozí zadání intenzit vykazovalo nejmenší z rezerv na všech ramenech hodnotu cca 13%. Při proporcionálním navýšení intenzit o cca 8% došlo k anulování původní rezervy a tím byla pro danou křižovatku při daném poměru intenzit dopravních proudů určena maximální přípustná zátěž. Tyto hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Ze směru	Do směru			
	Hradecká sever	Bělehradská	Hradecká jih	Studentská
Hradecká Sever		97	703	29
Bělehradská	112		331	94
Hradecká Jih	613	380		113
Studentská	35	72	131	

Tabulka 19: Výchozí hodnoty intenzit dopravních toků v jv. před navýšením (s rezervou 13% na vjezdu z Bělehradské ulice).



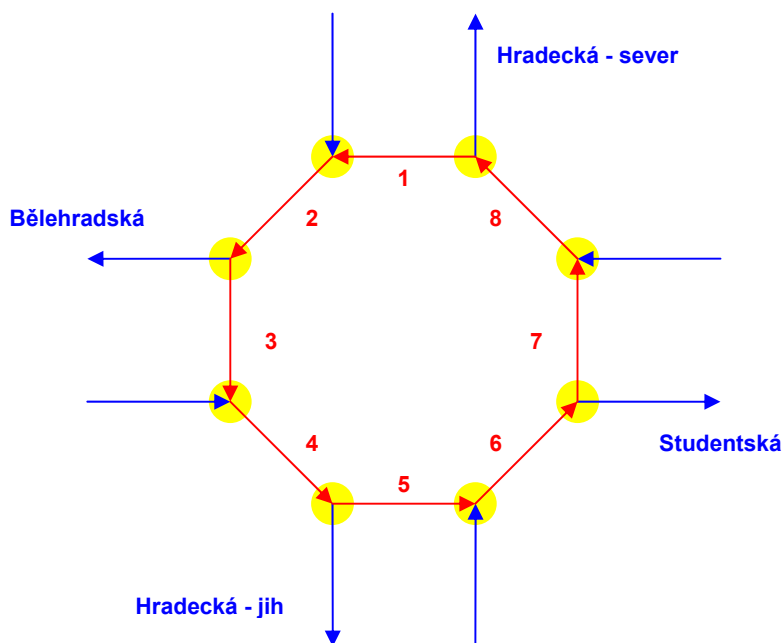
Vjezd	Úsek	$Q_c$ [voz]	A	B	$Q_e$ [voz]	Poptávaná intenzita $I_e$ [voz]	Rezerva vjezdu
Hradecká sever	1	583	1577	6,61	1 073	829	22,72%
Bělehradská	3	863	1300	8,60	619	537	13,23%
Hradecká jih	5	235	1577	6,61	1 350	1 106	18,08%
Studentská	7	1 105	1300	8,60	503	238	52,65%

Tabulka 20: Výpočet rezerv na vjezdech k výchozím intenzitám dopravních toků.

Ze směru	Do směru			
	Hradecká sever	Bělehradská	Hradecká jih	Studentská
Hradecká sever	0	105	762	31
Bělehradská	121	0	359	102
Hradecká jih	664	412	0	122
Studentská	38	78	142	0

Tabulka 21: Hodnoty maximálních intenzit dopravy v jv. pro prověřovanou okružní křižovatku vypočtené Brillonovou metodou.

Pro výpočet rezerv na vjezdech do zkoumané okružní křižovatky při výše uvedené dopravní zátěži Brillonovou metodou musíme nejprve zavést značení vnitřních úseků na této křižovatce a pro tyto úseky (při daných celkových intenzitách dopravních proudů) vyjádřit intenzity provozu, jež přes ně přechází. Způsob značení a vypočtené hodnoty jsou uvedeny níže.



Obrázek 51: Číslování vnitřních úseků okružní křižovatky použité při výpočtech.



	HS-B	HS-HJ	HS-S	B-HS	B-HJ	B-S	HJ-HS	HJ-B	HJ-S	S-HS	S-B	S-HJ	Q <sub>c</sub>
1								412			78	142	632
2	105	762	31					412			78	142	1 530
3		762	31									142	935
4		762	31	121	359	102						142	1 517
5			31	121		102							255
6			31	121		102	664	412	122				1 453
7				121			664	412					1 197
8				121			664	412		38	78	142	1 455

**Legenda:** HS - Hradecká sever, HJ - Hradecká jih, B - Bělehradská, S - Studentská  
Číselné hodnoty udávají jednotková vozidla

Tabulka 22: Intenzity provozu procházejícího přes vnitřní úseky okružní křižovatky.

Výsledný výpočet níže demonstruje, že výše uvedená tabulka intenzit dopravních proudů skutečně uvádí maximální zátěž zkoumané okružní křižovatky při daném poměru dopravní zátěže na jednotlivých vjezdech. Na kritickém vjezdu z Bělehradské ulice je přibližně nulová hodnota rezervy, další poměrné zvyšování intenzit tedy v tomto případě už není možné.

Vjezd	Úsek	Q <sub>c</sub> [voz]	A	B	Q <sub>e</sub> [voz]	Poptávaná intenzita I <sub>e</sub> [voz]	Rezerva vjezdu
Hradecká sever	1	632	1577	6,61	1 039	898	13,55%
Bělehradská	3	935	1300	8,60	582	582	0,01%
Hradecká jih	5	255	1577	6,61	1 333	1 198	10,10%
Studentská	7	1 197	1300	8,60	464	258	44,48%

Tabulka 23: Vyjádření rezerv kapacit na jednotlivých vjezdech.

## 6.4 Výsledky simulačních experimentů

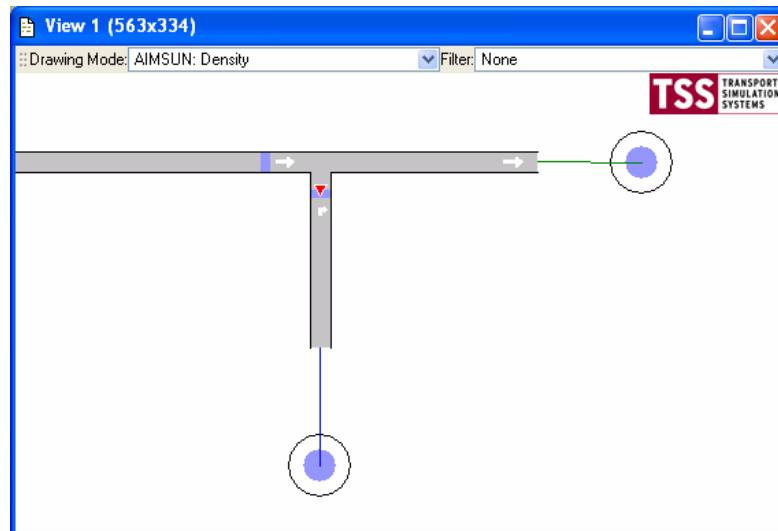
### 6.4.1 Neřízená dopravně rozlišená styková křižovatka

Model stykové křižovatky vytvořený v prostředí aplikace AIMSUN NG pro účely srovnávacího experimentu je zobrazen na obrázku na další straně. Intenzita proudů osobních vozidel byla nastavena tak, že ve vodorovném hlavním směru činí tato hodnota 700 vozidel a ve vedlejším směru 3000 vozidel, přičemž skutečně realizované průjezdy na obou vstupech do uzlu snímají detektory. Na všech úsecích je nastavena maximální povolená rychlost 60 km/hod.

V rámci tohoto experimentu bylo realizováno 15 replikací simulačního výpočtu. Kontrolní detektor ve vodorovném směru zaznamenal průjezd 701 vozidel (což odpovídá definované poptávce), detektor na vedlejším směru zaznamenal průjezd v průměru 520 vozidel. Tato hodnota představuje sledované kritérium pro tento experiment a lze ji považovat za experimentálně určenou maximální kapacitu modelované stykové křižovatky.

Dále bylo provedeno 9 experimentů s postupně zvyšovanými intenzitami přípojného proudu, kdy byly vyhodnocovány také kvalitativní ukazatelé - hodnoty průměrných

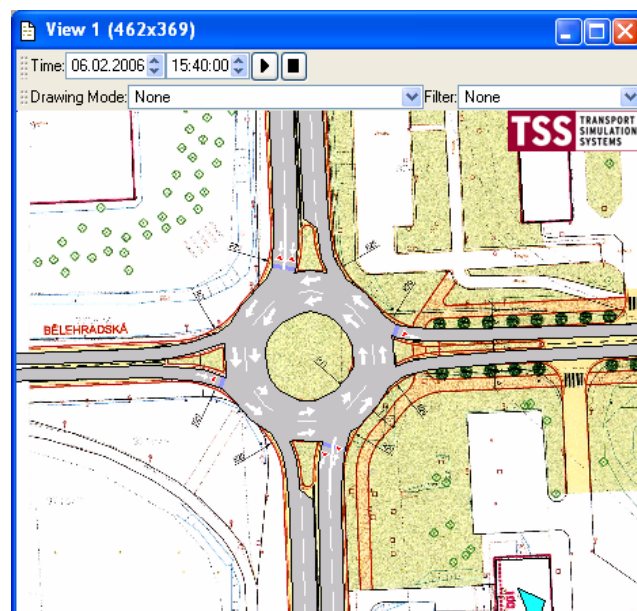
časových ztrát vozidel ve vedlejším přípojném proudu a dále maximální a průměrná délka na vedlejším rameni stykové křižovatky. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 25 v kapitole 6.5, kde je provedeno i srovnání s očekávanými analyticky vypočtenými hodnotami.



Obrázek 52: Snímek obrazovky s modelem zkoumané stykové křižovatky.

#### 6.4.2 Okružní křižovatka

Experimentální určení maximální kapacity izolované okružní křižovatky metodou simulace bylo provedeno na simulačním modelu s geometrií silniční sítě zobrazenou na snímku obrazovky níže.



Obrázek 53: Snímek obrazovky s modelem zkoumané okružní křižovatky.

V tomto případě bylo provedeno celkem šest simulačních experimentů prověřujících kapacitní výkon a chování zkoumané křižovatky při postupném proporcionálním navyšování hodnot intenzit dopravní poptávky tak, aby tato

představovala 90%, 100%, 110%, 120%, 130% a 140% hodnot určených jako maximální kapacita křižovatky analytickým výpočtem Brillonovou metodou. Pro přepočítání nákladních vozidel na jednotková vozidla byl použit koeficient 1,5 a podíl nákladní dopravy byl stanoven přibližně stejný, jaký byl aplikován v rámci případové simulační studie Studentské ulice, tj. cca 7%. I v tomto případě bylo v rámci každého z šesti experimentů realizováno 15 replikací simulačního výpočtu.

Výstupem z uvedených simulačních experimentů jsou počty vozidel, která projela přes vstupní ramena okružní křižovatky v místě jejich napojení na okruh, přičemž tyto hodnoty budou porovnány s hodnotami modelované poptávky. Dále byly sledovány fronty vozidel na každém rameni okružní křižovatky, a to jejich maximální a průměrné délky. Výsledné zaznamenané hodnoty ukazuje následující tabulka.

Rameno	Intenzity [jv]		Rozdíl [jv]		Délka fronty [jv]	
	Poptávka	Projelo	Abs.	Rel.	Maximum	Průměr
90%						
Hradecká Jih	1 052	1 049	-3	0%	4,50	0,10
Studentská	226	228	2	1%	5,30	0,30
Hradecká Sever	789	798	9	1%	4,80	0,20
Bělehradská	511	513	2	0%	8,50	0,90
Celkem	2 579	2 588	9	0%		
100%						
Hradecká Jih	1 169	1 162	-7	-1%	5,60	0,20
Studentská	252	250	-2	-1%	5,50	0,40
Hradecká Sever	876	878	2	0%	5,50	0,30
Bělehradská	568	570	2	0%	11,30	1,50
Celkem	2 865	2 860	-5	0%		
110%						
Hradecká Jih	1 286	1 293	7	1%	6,80	0,30
Studentská	277	276	-1	0%	7,60	0,80
Hradecká Sever	964	953	-11	-1%	7,40	0,60
Bělehradská	625	640	15	2%	18,50	5,40
Celkem	3 152	3 162	10	0%		
120%						
Hradecká Jih	1 403	1 394	-9	-1%	7,10	0,40
Studentská	302	304	2	1%	8,50	1,20
Hradecká Sever	1 052	1 063	11	1%	9,40	1,20
Bělehradská	681	663	-18	-3%	30,00	15,40
Celkem	3 438	3 424	-14	0%		
130%						
Hradecká Jih	1 520	1 496	-24	-2%	8,20	0,50
Studentská	327	331	4	1%	11,30	2,30
Hradecká Sever	1 139	1 142	3	0%	10,20	2,00
Bělehradská	738	603	-135	-18%	35,90	23,90
Celkem	3 725	3 572	-153	-4%		
140%						
Hradecká Jih	1 637	1 643	6	0%	11,60	1,40
Studentská	352	343	-9	-3%	14,70	4,10
Hradecká Sever	1 227	1 220	-7	-1%	15,60	5,60
Bělehradská	795	558	-237	-30%	36,80	27,50
Celkem	4 011	3 764	-247	-6%		

Tabulka 24: Výstupy simulačních experimentů - hodnoty poptávaných a maximálních realizovaných intenzit dopravních proudů a sledované délky front.

## 6.5 Porovnání výsledků

V případě stykové křižovatky, kdy analytickou metodou byla vypočtena maximální kapacita 498 vozidel a simulačním experimentem byla tato hodnota stanovena na 520 vozidel, lze konstatovat, že bylo dosaženo velmi dobré shody -

relativní rozdíl hodnot činí pouze 4,42%. Obě uvedené hodnoty je možno poměrně exaktně porovnat, protože popisují skutečně maximální teoretickou kapacitu křižovatky, tj. bez ohledu na charakter provozu.

Dále je možno provést alespoň orientační srovnání ukazatelů popisujících kvalitu provozu (průměrné časová ztráta vozidla, maximální a průměrná délka fronty), přičemž lze prozkoumat hodnoty těchto ukazatelů pro intenzity vedlejšího proudu odpovídající praktické výkonnosti křižovatky. Naměřené hodnoty zobrazuje tabulka níže.

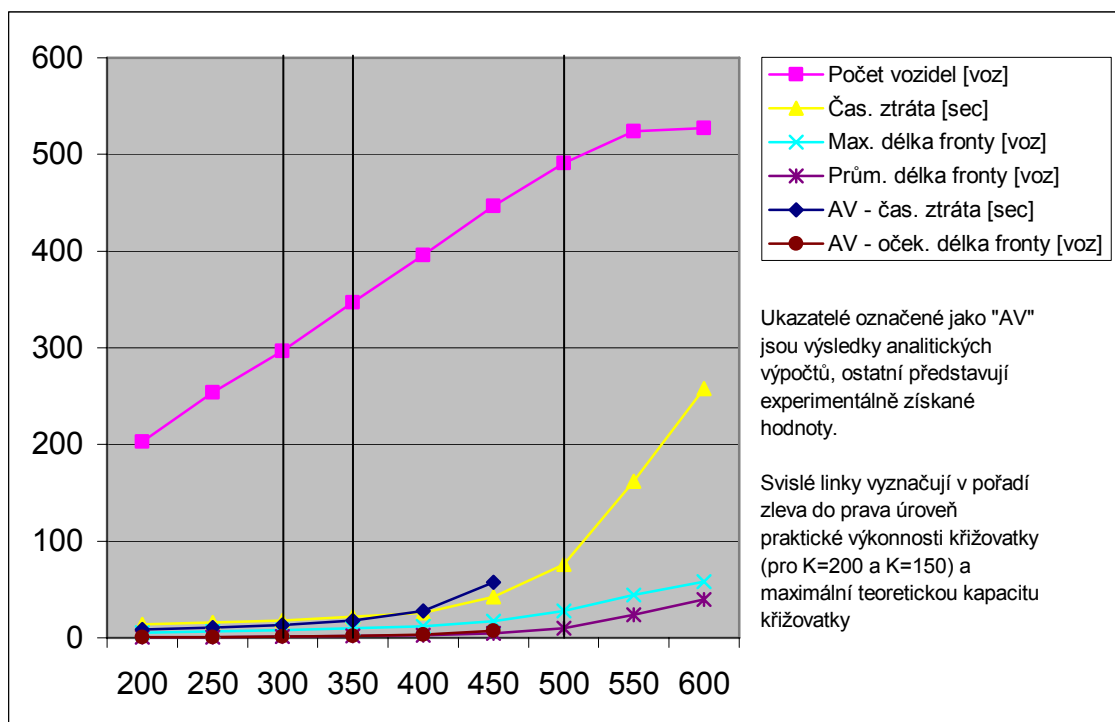
Řádek v tabulce zvýrazněný červeně zobrazuje hodnoty popisující charakter provozu při stanovené poptávané intenzitě vedlejšího proudu odpovídající přibližně úrovni odpovídající praktické výkonnosti křižovatky při stanoveném  $K = 150$  voz/hod (špičkový provoz, průměrná kvalita). Řádek zvýrazněný zeleně pak zobrazuje hodnoty popisující charakter provozu při stanovené poptávané intenzitě vedlejšího proudu odpovídající přibližně úrovni odpovídající praktické výkonnosti křižovatky při stanoveném  $K = 200$  voz/hod (denní průměrný provoz, dobrá kvalita).

Poptávaná intenzita vedlejšího proudu ( $N$ ) [voz]	Výsledky simulačních experimentů				Analytický výpočet	
	Skutečně realizované toky vedlejšího proudu [voz]	Průměrná čas. ztráta vozidla [sec]	Maximální délka fronty [voz]	Průměrná délka fronty [voz]	Časová ztráta vozidla $t_w$ [sec]	Oček. délka fronty [voz]
200	203	14	5,20	0,59	8,40	0,47
250	254	16	6,60	0,88	10,33	0,72
<b>300</b>	<b>297</b>	<b>18</b>	<b>7,60</b>	<b>1,17</b>	<b>13,21</b>	<b>1,10</b>
<b>350</b>	<b>347</b>	<b>22</b>	<b>10,00</b>	<b>1,72</b>	<b>18,03</b>	<b>1,75</b>
400	396	26	11,80	2,40	27,73	3,08
450	447	42	17,33	4,67	57,58	7,20
500	491	76	27,60	10,14	-	-
550	524	162	44,53	23,87	-	-
600	527	258	58,13	39,61	-	-

Tabulka 25: Experimentálně a výpočtem určené ukazatele kvality provozu na stykové křižovatce.

Rozborem získaných výsledků lze dospět k zjištění, že experimentálně určená hodnota ukazatele průměrné délky fronty se poměrně dobře shoduje s hodnotou získanou výpočtem alespoň do úrovně zátěže odpovídající praktické výkonnosti křižovatky, při vyšší zátěži nastává určitá diference. Ukazatel průměrné časové ztráty vykazuje vyšší diference, nicméně alespoň z hlediska trendů si obě křivky (viz obrázek níže) přibližně odpovídají.

Poznámka: pro hodnoty poptávané intenzity vedlejšího proudu  $N$  převyšující maximální kapacitu křižovatky  $c_m$  již výpočetní vztahy pro určení časové ztráty vozidel a očekávané průměrné délky fronty nelze použít.



Obrázek 54: Grafické znázornění experimentálně a výpočtem určených hodnot ukazatelů kvality provozu na zkoumané stykové křižovatce.

V případě zkoumané malé okružní křižovatky je metodika porovnání výsledků poněkud komplikovanější - Brillonova metoda dle vyjádření odborníků z oblasti dopravního inženýrství zřejmě udává maximální kapacitu křižovatky zohledňující charakter provozu, tedy takové hodnoty, při kterých je provoz na křižovatce považován za přiměřeně plynulý. Bohužel se mi však nepodařilo zjistit, jaké konkrétní kritérium (průměrná délka fronty a pod.) pro posouzení přijatelnosti charakteru provozu při daných intenzitách by bylo vhodné zde aplikovat.

Ze zaznamenaných hodnot (viz tabulka č. 24 výše) lze však vyzorovat, že již při navýšení prověřovaných intenzit na 110% oproti hodnotám určeným Brillonovou metodou na kritickém rameni křižovatky, tj. vjezdu z Bělehradské ulice, dochází k nárůstu průměrné délky fronty, při navýšení na 120% tato hodnota již indikuje provoz, který bychom mohli považovat za zahlcený a při navýšení na 130% již kritické rameno křižovatky nepropustí poptávané dopravní intenzity (s deficitem -18%).

Na základě uvedených skutečností je i v případě prověřované malé okružní křižovatky možno konstatovat, že nastala poměrně dobrá shoda výsledků získaných analytickým výpočtem a experimentální výzkumnou metodou simulace. Provedená srovnání, která bychom mohli považovat za určité prověření validity výsledků produkovaných mikroskopickým simulátorem AIMSUN NG, neodhalila v tomto případě žádný zásadní problém (nicméně toto samozřejmě nelze považovat za univerzální výsledek validace simulačních modelů implementovaných v tomto prostředí - pokud je to možné, je třeba provádět validaci vždy konkrétního simulačního modelu).

V každém případě validaci a kalibraci simulačních modelů silničních sítí, v jejichž infrastruktuře se vyskytují okružní křižovatky, bych doporučoval věnovat zvýšenou pozornost - výchozí nastavení a implementované algoritmy simulátoru by

totiž mohly odrážet charakteristiky chování řidičů na okružních křižovatkách v podmínkách odlišných od těch, které jsou v České Republice.

Rovněž by bylo vhodné podobným způsobem prověřit i výsledky simulace provozu na izolované křižovatce řízené světelnou signalizací. K tomuto účelu je nezbytné mít k dispozici precizně vypracovaný optimalizovaný signální plán křižovatky a při implementaci jejího simulačního modelu přesně dodržet geometrii té konkrétní křižovatky, pro níž byl optimální signální plán vypočten. Na realizaci tohoto experimentu však již bohužel v této diplomové práci nezbyl prostor.

## Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo demonstrovat využití experimentální výzkumné metody simulace pro podporu dopravního inženýrství. Tento cíl byl naplněn především vypracováním případové simulační studie zaměřené na provozně-kapacitní prověření čtyř různých variant navrhovaného dopravního řešení Studentské ulice a přilehlých komunikací.

Posloupnost úkonů provedených a zdokumentovaných při realizaci uvedené studie odpovídá fázím životního cyklu simulační studie, o němž jsem pojednal v teoretické části práce. Zvoleným implementačním prostředím pro vytvoření počítačových simulačních modelů omezeného segmentu silniční sítě a experimentování s nimi byl mikroskopický simulátor silničních dopravních systémů AIMSUN NG.

Při vytváření geometricky přesného modelu infrastruktury zkoumaného segmentu silniční sítě v grafickém uživatelském prostředí výše uvedené aplikace jsem nenarazil na žádný problém a lze říci, že se jednalo o poměrně snadný a rychle realizovatelný úkon. Určité potíže nastaly až při parametrizaci poptávaných intenzit dopravních proudů - výchozí zadání bylo ve formátu, který nebylo možno přímo použít. Proto jsem navrhnul algoritmus pro transformaci vstupních dat na O/D matici a na jeho základě implementoval pomocnou aplikaci v prostředí vyššího programovacího jazyka. Uvedený algoritmus i zdrojové kódy aplikace jsou v práci zdokumentovány.

Verifikací simulačních modelů byly odhaleny určité nedostatky, které bylo nutno odstranit opravnými implementačními zásahy. Při tom jsem narazil i na menší softwarovou chybu aplikace AIMSUN NG, kterou bylo nutno řešit s výrobcem - španělskou společností TSS - Transport Simulation Systems. Na základě vlastních zkušeností mohu konstatovat, že výrobce poskytuje k tomuto produktu kvalitní, promptní a vstřícnou podporu, a to i relativně méně významným zákazníkům z nekomerční sféry.

Realizace všech replikací simulačních výpočtů ve fázi experimentování se simulačním modelem nebyla časově náročná - vyžádala si časovou investici v řádu nejvýše desítek minut. Rovněž nebylo problematické nastavit aplikaci AIMSUN NG tak, aby byly v průběhu simulačních experimentů zaznamenávány požadovaným způsobem vybrané dopravně-inženýrské ukazatele. Poněkud hůře bych však hodnotil možnosti zpracování výstupních statistických dat přímo prostřednictvím uživatelského rozhraní aplikace. Naštěstí zde existuje možnost ukládat tato data do externího relačního databázového systému, takže některé výstupy jsem mohl zpracovat s pomocí dotazovacího jazyka SQL. Domnívám se, že pokud bych měl aplikaci AIMSUN NG používat v každodenní praxi, tak bych si zřejmě vytvořil pomocný software, který by usnadňoval zpracování statistických výstupů ze simulačních experimentů realizovaných v tomto prostředí.

V každém případě však lze konstatovat, že mikroskopický simulátor AIMSUN NG produkuje dostatečné spektrum výstupních statistických ukazatelů, které lze uplatnit při rozhodování v oblasti dopravního inženýrství. Kromě výstupů číselných hodnot nabízí tento nástroj i možnost jejich statické vizualizace např. v podobě různobarevného vykreslení úseků modelované sítě. Také možnosti 2D a 3D animace simulačního výpočtu jsou velmi dobře využitelné jako pomůcka při verifikaci a validaci simulačního modelu, jakož i při konečné analýze výsledků simulačních experimentů.

I v případě simulační studie realizované v rámci této diplomové práce poskytnula analýza výstupů simulačních experimentů dostatek podkladů pro, aby mohly být zodpovězeny otázky, na něž studie hledala odpověď, a vysloveny příslušné závěry. Ty jsem potom mohl srovnat se závěry shodně zaměřené studie realizované Univerzitou Pardubice [3], přičemž lze říci, že obě studie dospěly v zásadě ke shodným zjištěním. Simulační experimenty provedené v průběhu vypracování simulační studie obsažené v této práci přitom zřejmě poskytnuly relativně přesnější výstupy, neboť v tomto případě byl použit software (tj. AIMSUN NG) více specializovaný na oblast simulací silničního provozu ve srovnání s tím, který byl použit při realizaci studie vypracované Univerzitou Pardubice (tj. Villon).

Součástí této diplomové práce je i provedené srovnání výsledků simulačních experimentů s jednoduchými modely izolované okružní a izolované světelnou signalizací neřízené stykové křižovatky s výsledky analytických kapacitních výpočtů pro tyto křižovatky, kdy zjišťovaným a srovnávaným kritériem byla jejich maximální kapacita. Toto srovnání poukázalo na poměrně dobrou shodu dosažených výsledků. Nicméně, jednalo se o velmi elementární srovnání a jistě by bylo vhodné se na tuto oblast více zaměřit, provést obdobná srovnání pro více typů vozidel, pro složitější typy křižovatek a také pro křižovatky řízené světelnou signalizací. Rovněž by bylo zajímavé ve spolupráci s odborníky z oblasti dopravního inženýrství důkladně prověřit vliv nastavení poměrně velkého množství parametrů simulačního modelu, které jsou v aplikaci AIMSUN NG definovány, na výsledky simulačních experimentů a vytvořit tak podklady pro kalibraci simulačních modelů silničních dopravních systémů v našich podmínkách.

Vlastní realizaci případové simulační studie předcházelo důkladné studium principů implementace simulačního modelu v prostředí aplikace AIMSUN NG. Získané poznatky byly shrnuty a začleněny do této diplomové práce v podobě samostatné kapitoly, která může být případně použita jako studijní materiál pro získání základního přehledu o možnostech a způsobech použití tohoto softwarového nástroje. V práci je rovněž obsažen stručný přehled většiny dalších významnějších softwarových produktů zaměřených na simulace silniční dopravy.

V závěru této diplomové práce lze konstatovat, že bylo dosaženo stanoveného cíle, tedy že byly na praktickém případě demonstrovány možnosti využití experimentální výzkumné metody simulace pro podporu rozhodování v oblastech dopravního inženýrství. Pro tento účel zvolený nástroj - mikroskopický simulátor silničních dopravních systémů AIMSUN NG - se osvědčil a jeho nasazení v příslušné oblasti lze doporučit. Na základě zkušeností získaných při zpracovávání této diplomové práce, kdy jsem občas pociťoval určitý nedostatek detailních znalostí z oblasti dopravního inženýrství (mojí primární obecnou specializací je oblast informačních technologií), bych akcentoval na nezbytnost úzké spolupráce odborníků z obou výše jmenovaných oblastí při realizaci simulačních studií zaměřených na oblast silničních dopravních systémů.

Co se perspektiv dalšího vývoje v doméně simulací silniční dopravy týká, lze očekávat stále masivnější nasazování těchto prostředků pro podporu rozhodování, řízení a optimalizace v cílové oblasti. V současné době se intenzivně pracuje také na výzkumu a vývoji v oblasti tzv. on-line simulace silničního provozu, kdy je simulátor přímo napojen na reálný (informační) systém a poskytuje podklady pro operativní plánování a řízení provozu.



## Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled softwarových nástrojů specializovaných na podporu simulací silničních dopravních systémů.....	15
Tabulka 2: Přehled verzí aplikace AIMSUN NG. Zdroj: [11] .....	19
Tabulka 3: Přehled statistických ukazatelů, které lze sledovat v prostředí aplikace AIMSUN NG. Zdroj: [7].....	31
Tabulka 4: Intenzity proudů osobních automobilů ve špičkové hodině. Zdroj: [3].....	39
Tabulka 5: Intenzity proudů nákladních automobilů ve špičkové hodině. Zdroj: [3].....	40
Tabulka 6: Prognózané proudy chodců přes Studentskou ulici ve špičkové hodině Zdroj: [3]....	41
Tabulka 7: Specifikace maximálních (průměrných) rychlostí automobilů a chodců Zdroj: [3] .....	41
Tabulka 8: Konfigurace silniční infrastruktury pro jednotlivé simulační experimenty. Zdroj: [3].	51
Tabulka 9: Sledované dopravně-inženýrské ukazatele. Zdroj: [7].....	52
Tabulka 10: Přehled klíčových ukazatelů vybraných pro stanovení počtu replikací simulačního výpočtu a určení požadovaných přesností výstupů. ....	54
Tabulka 11: Průběh průměrných hodnot sledovaných ukazatelů.....	55
Tabulka 12: Porovnání hodnot naměřených na vstupních detektorech s O/D maticí. ....	57
Tabulka 13: Porovnání hodnot naměřených na výstupních detektorech s O/D maticí. ....	58
Tabulka 14: Hodnoty statistických ukazatelů popisující výsledky simulačních experimentů z hlediska celého modelovaného segmentu sítě - osobní doprava. ....	61
Tabulka 15: Hodnoty statistických ukazatelů popisující výsledky simulačních experimentů z hlediska celého modelovaného segmentu sítě - nákladní doprava.....	61
Tabulka 16: Výsledné hodnoty statistických ukazatelů pro oba jízdní směry na ulici Studentská. .	66
Tabulka 17: Srovnání hodnot experimentálně určených průměrných rychlostí vozidel na ulici Studentská zjištěných v obou porovnávaných studiích.....	69
Tabulka 18: Hodnoty koeficientů A a B. Zdroj: [8].....	77
Tabulka 19: Výchozí hodnoty intenzit dopravních toků v jv. před navýšením (s rezervou 13% na vjezdu z Bělehradské ulice). ....	78
Tabulka 20: Výpočet rezerv na vjezdech k výchozím intenzitám dopravních toků. ....	79
Tabulka 21: Hodnoty maximálních intenzit dopravy v jv. pro prověřovanou okružní křižovatku vypočtené Brillonovou metodou.....	79
Tabulka 22: Intenzity provozu procházejícího přes vnitřní úseky okružní křižovatky. ....	80
Tabulka 23: Vyjádření rezerv kapacit na jednotlivých vjezdech. ....	80
Tabulka 24: Výstupy simulačních experimentů - hodnoty poptávaných a maximálních realizovaných intenzit dopravních proudů a sledované délky front. ....	82
Tabulka 25: Experimentálně a výpočtem určené ukazatele kvality provozu na stykové křižovatce.	83

## Seznam použitých informačních zdrojů

- [1] KŘIVÝ, I.; KINDLER E. *Simulace a modelování*. Elektronická skripta Ostravské univerzity, 2001
- [2] KAVIČKA, A.; KLIMA, V.; ADAMKO, N. *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*, věd. monografie, EDIS, Žilina 2006, 210 s., ISBN 80-8070-477-5
- [3] KAVIČKA, A. *Závěrečná zpráva k simulační studii Provozní prověření variant dopravního řešení ulice Studentská v Pardubicích*, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, 2004
- [4] SVOZIL, D. *Porovnání softwarových nástrojů a implementačních technik diskrétní simulace*, bakalářská práce, Univerzita Pardubice, 2004
- [5] KAVIČKA, A. *Modelování a simulace - Elektronické materiály pro podporu výuky*, Univerzita Pardubice, 2003
- [6] TSS - TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS *AIMSUN NG User's Manual*, Barcelona 2005
- [7] TSS - TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS *AIMSUN 5.0 Microsimulator User's Manual*, Barcelona 2005
- [8] PIPKOVÁ, B.; DLOUHÁ, E.; JIRAVA, P.; SLABÝ, P. *Dopravní inženýrství - Návod pro cvičení*, ČVUT, Praha 1994, ISBN 80-01-01226-3
- [9] ČERNÁ, A.; ČERNÝ, J. *Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech*, Institut Jana Pernera, o.p.s, Pardubice 2004, 150 s., ISBN 80-86530-15-9
- [10] KAVIČKA, A. : *Diskrétní simulace - Elektronické materiály pro podporu výuky*, Univerzita Pardubice, 2006
- [11] *WWW stránky produktu AIMSUN NG* [online] [cit. 2006-05-30]  
Dostupné z: <<http://www.aimsun.com>>
- [12] HIGHWAY DESIGN, HRADEC KRÁLOVÉ *Pardubice - dopravní systém města (výsledný tvar komunikační sítě) - dopravně inženýrská studie*, Hradec Králové listopad 2003
- [13] Český normalizační institut *ČSN 73 6102 - Projektování křižovatek na silničních komunikacích*
- [14] ŠIMŮNEK, M. *SQL - Kompletní kapesní průvodce*, GRADA Publishing, Praha 1999, ISBN 80-7169-692-7
- [15] SHARP, J.; JAGGER, J. *Visual C#.NET krok za krokem*, Mobil Media, Praha 2002, ISBN 80-86593-27-4
- [16] ROBINSON, S. a kol., *C# - Programujeme profesionálně*, Computer Press, Praha 2003, ISBN 80-251-0085-5
- [17] KUBANOVÁ, J. *Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi*, Statis, Bratislava 2003, 80-85659-31-X

- [18] UGGE, A. *Dopravní inženýrství*, Univerzita Pardubice, Pardubice 1996, ISBN 80-7194-042-9
- [19] *Traffic Analysis Tools by Category* [online] [cit. 2006-05-30]  
Dostupné z: <[http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat\\_vol2/sectapp\\_e.htm](http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol2/sectapp_e.htm)>
- [20] LINDA, B; KUBANOVÁ, J. *Statistické tabulky a vzorce*, Univerzita Pardubice, Pardubice 2000, ISBN 80-7194-277-4
- [21] BANKS, J. *Handbook of Simulation*, John Wiley & Sons, New York 1998, ISBN 0-471-13403-1
- [22] HUŠEK, R.; LAUBER, J. *Simulační modely*, SNTL/ALFA, Praha 1987
- [23] VOLEK, J. *Operační výzkum I*, Univerzita Pardubice, Pardubice 2002, ISBN 80-7194-410-6
- [24] ŠOTEK, K. *Výpočetní technika a informatika v dopravě*, Univerzita Pardubice, Pardubice 1999, ISBN 80-7194-230-8
- [25] KAVIČKA, A.; ADAMKO, N; KLIMA, V; MÁRTON, P. *Racionalizace dopravních uzlů pomocí simulačních technik*, Sborník příspěvků z konference "Věda o dopravě 2004", ČVUT Praha, 2004, ISBN 80-01-03047-4
- [26] AKCELIK & ASSOCIATES *Traffic models* [online] [cit. 2006-05-30]  
Dostupné z: <<http://www.aatraffic.com/TrafficModels.htm>>
- [27] DHV CR, s.r.o. *Pardubice - model zatížení dopravní sítě okružního systému*, studie, Praha, listopad 2002

## **Příloha - obsah přiloženého datového nosiče (CD)**

Součástí této diplomové práce je přiložený datový nosič (CD) s následující strukturou adresářů:

### */animace\_3D/*

- ukázky 3D animací simulačních výpočtů (experiment č. 1)

### */animace\_2D/*

- 2D animace simulačních výpočtů, pro každý experiment zaznamenán průběh v čase od 16:00 do 16:15 hodin

### */konverze\_zdrojovy\_kod/*

- zdrojový kód aplikace pro konverzi vstupních dat - vytvořeno v prostředí Microsoft Visual Studio 2005 v jazyce C# (viz kapitola 5.6.1)

### */konverze\_aplikace/*

- přeložený (spustitelný) kód aplikace pro konverzi dat - viz výše

### */konverze\_data\_vstup/*

- ukázka vstupních dat určených ke zpracování výše uvedenou aplikací

### */konverze\_data\_vystup/*

- ukázka výstupních dat po zpracování výše uvedenou aplikací

### */ms\_net\_framework/*

- instalátor Microsoft .NET Framework verze 2.0 - prostředí vyžadované pro spuštění aplikací naprogramovaných v MS Visual Studio 2005

Poznámka: pro přehrávání videosekvencí ve formátu AVI je nutno mít na PC nainstalován příslušný videokodek - ten lze zdarma stáhnout např. z webového serveru z <http://www.divx.com>.

## ÚDAJE PRO KNIHOVNICKOU DATABÁZI

Název práce	Simulace dopravního provozu v omezených segmentech silničních sítí
Autor práce	David Svozil
Obor	Simulace a modelování silničního provozu
Rok obhajoby	2006
Vedoucí práce	doc. Ing. Antonín Kavička, Ph.D.
Anotace	Stručný teoretický úvod do problematiky diskrétních simulací, životní cyklus simulační studie, popis vlastností a principů práce v aplikaci AIMSUN NG, přehled softwarových nástrojů pro podporu simulací silniční dopravy, případová studie - provozní prověření variant dopravního řešení ulice Studentská v Pardubicích, elementární srovnání výsledků simulačních experimentů v prostředí AIMSUN NG s analytickými kapacitními výpočty křižovatek
Klíčová slova	Simulace, modelování, silniční provoz, AIMSUN NG