

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta
Ústav aplikované informatiky

Modelování dopravního systému

Bakalářská práce

Jan Matoušek

Školitel: Ing. Jiří Jelínek, CSc.

České Budějovice 2013

Bibliografické údaje

Matoušek, J., 2013: Modelování dopravního systému. [Transport system modelling. Bc. Thesis, in Czech.] – 64 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje problematice modelování a simulace systémů, konkrétně modelování dopravního systému. V práci je s přihlédnutím k využití multiagentního přístupu navržen model dopravního toku v omezené síti komunikací. Navržený model je poté vytvořen v nástroji AnyLogic. S vytvořeným modelem jsou provedeny experimenty zkoumající změnu a dopravního toku, jejichž výsledky je možné pozorovat přímo v síti komunikací, nebo jsou zachyceny v grafech dopravního zatížení.

Abstract

This bachelor thesis deals with the topic of computer modelling and simulation of systems, and specifically transport system modelling. This project utilizes multi-agent approach to design traffic flow model in a restricted road system. Designed model is afterwards created in the AnyLogic software tool. Experiments investigating changes of traffic flow are performed with this model. Results of the experiments can be seen on visualization of road network or on traffic load charts.

Klíčová slova

model, simulace, agent, dopravní síť

Key words

model, simulation, agent, road network

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátu.

V Českých Budějovicích, dne 23.4.2013.

Podpis:

Jan Matoušek

Poděkování

Na tomto místě bych velice rád poděkoval svému školiteli Ing. Jiřímu Jelínkovi, CSc. za odborné vedení práce, cenné rady, připomínky a čas strávený konzultacemi.

Obsah

1	ÚVOD A CÍLE PRÁCE	1
1.1	Úvod.....	1
1.2	Cíle práce	1
2	TEORETICKÉ PODKLADY	2
2.1	Systém.....	2
2.2	Model.....	2
2.3	Modelování.....	4
2.4	Simulace	5
2.5	Základní přístupy k simulačnímu modelování	7
3	MODELOVÁNÍ V DOPRAVĚ	8
3.1	Typy modelů podle úrovně abstrakce.....	9
3.2	Nástroje na simulaci dopravního systému.....	11
4	MODEL DOPRAVNÍHO SYSTÉMU	15
4.1	Konceptuální model – popis řešeného problému	15
4.2	Program AnyLogic	17
4.3	Implementace sítě komunikací.....	18
4.4	Agent.....	21
4.5	Vstupní data	25
4.6	Vizualizace modelu.....	28
4.7	Verifikace a validace modelu.....	30
5	EXPERIMENTY	30
5.1	Vizuální znázornění experimentu v grafu silniční sítě	31
5.2	Experiment 1.....	31
5.3	Experiment 2.....	34
5.4	Experiment 3.....	37
6	ZÁVĚR	40
	POUŽITÁ LITERATURA	42
	SEZNAM OBRÁZKŮ	44
	SEZNAM TABULEK	45
1	PŘÍLOHA 1 – DATA EXPERIMENT 1	46
2	PŘÍLOHA 2 – DATA EXPERIMENT 2	48
3	PŘÍLOHA 3 – DATA EXPERIMENT 3	55
4	PŘÍLOHA 4 – TABULKA RYCHLOST VS HUSTOTA	62
5	PŘÍLOHA 5 – SPUŠTĚNÍ MODELU	63
6	PŘÍLOHA 6 – DALŠÍ ČÁSTI PŘILOŽENÉ K PRÁCI	64

1 Úvod a cíle práce

1.1 Úvod

Doprava a její organizace je v současnosti základní a velmi podstatnou složkou společnosti. S ohromným rozvojem automobilové dopravy, který v uplynulých desetiletích zaznamenáváme, současně přicházejí různé problémy týkající se organizace, řízení a dalších jejích složek. Vzhledem k neustále rostoucí poptávce po automobilové dopravě je potřeba silniční síť rozšiřovat, neustále opravovat, řešit nestandardní situace jako uzavírky z důvodu přírodních katastrof, dopravních nehod a jiné.

Dopravní systém je poměrně komplexní a špatné zásahy do jeho organizace mohou přinést nemalý zmatek a problémy. Proto je důležité vždy před každým zásahem do dopravní sítě danou změnu pečlivě analyzovat a vyhodnotit její dopady na systém. Vyhodnocení bylo dříve prováděno zejména čistě analytickými propočty, ovšem s výrazným rozvojem výpočetní techniky, zejména v posledních dekadách, se stalo velmi populární využití počítačové simulace. Jako velmi zajímavé se díky své analogii k celulárním automatům, dříve často používaným v počítačových modelech v odvětví dopravy, jeví využití multiagentního přístupu, jenž je poměrně nový v oblasti modelování a simulace.

Právě vytvoření multiagentního simulačního modelu sítě komunikací s účelem následné simulace nestandardních situací a jejich vlivu na dopravní tok je cílem práce.

1.2 Cíle práce

- 1) Seznámení s obecnými přístupy k modelování systémů. Rešerše v současnosti používaných technik a nástrojů pro modelování a simulaci toku dopravy.
- 2) Navržení konceptuálního multiagentního modelu dopravního toku v síti komunikací s cílem simulovat stavy vznikající změnou komunikační sítě.
- 3) Vytvoření simulačního modelu a simulace toku dopravy na umělých datech.
- 4) Pokusit se získat vhodná reálná data, ověření modelu na těchto datech.
- 5) Provedení experimentů na simulačním modelu s výše uvedeným cílem. Vyhodnocení dat z experimentů, zhodnocení přínosu modelu.

2 Teoretické podklady

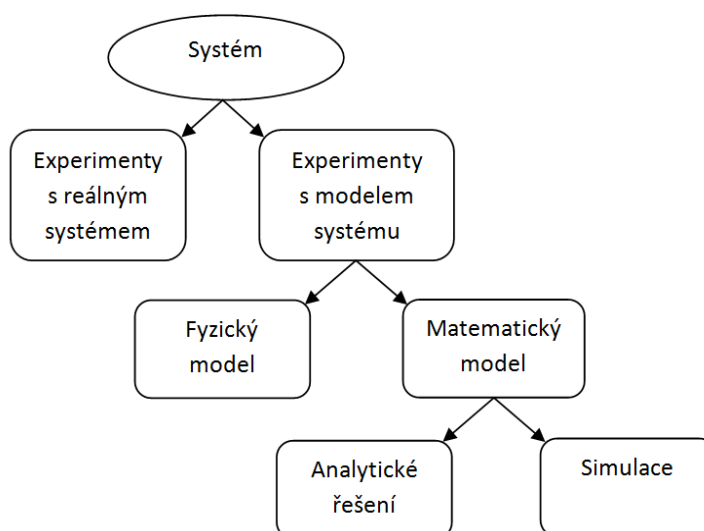
Abychom se mohli začít zabývat simulačním modelováním, je nutné z počátku vysvětlit některé důležité pojmy, bez kterých bychom se jen velice obtížně orientovali v této problematice. Mezi tyto důležité pojmy patří zejména systém, modelování a simulace.

2.1 Systém

Systém je definován jako kolekce entit, např. lidí nebo strojů, které jednají a spolupracují za účelem dosažení nějakého společného logického cíle (1). Lze si představit velice rozmanité druhy systémů. Od relativně jednoduchých, jimiž mohou být různé abstraktní systémy (rodinný systém, či systém literatury) nebo fyzické systémy (dům, auto, výrobní linka), až po velmi složité, komplexní, systémy, jako např. přírodní systémy (systém počasí, vesmír) (2). Člověk se je často snaží prozkoumat a zjistit jak fungují. Tuto snahu popisuje Obrázek 1.

2.2 Model

Modelem rozumíme kolekci objektů, pojmů nebo myšlenek, uspořádané v nějaké formě a s nějakými vazbami, jiné než je modelovaný objekt (systém) sám (3). Model tedy reprezentuje nějaký zkoumaný systém (objekt, problém). Jelikož modely zpravidla vytváříme za účelem pochopení zkoumaného objektu, je důležité, vzhledem ke složitosti tohoto objektu, užívat patřičná zjednodušení. Je nutné přesně stanovit důležité prvky



Obrázek 1: Způsoby zkoumání systémů, převzato z (1)

systému, které ovlivňují jeho stav. Ostatní prvky, které nejsou tak důležité pro chod a popis systému, můžeme ve vytvářeném modelu ignorovat. Takovému zjednodušení říkáme abstrakce. Abstrakce, jak dokládá Paretův princip – kdy 80% funkcionality je dosaženo 20% příčin (3), je užitečná. Kdybychom totiž abstrakci při tvorbě modelu nevyužívali a snažili se udělat tak přesný model, který by odpovídal realitě, dostali bychom model tak komplikovaný a složitý, že by jej pravděpodobně ani nebylo možné řešit (4). Vzhledem k těmto informacím se hodí následující tvrzení.

Všechny modely jsou špatně. Některé modely jsou užitečné. (Připisováno autorům: George Box, Edwards Deming).

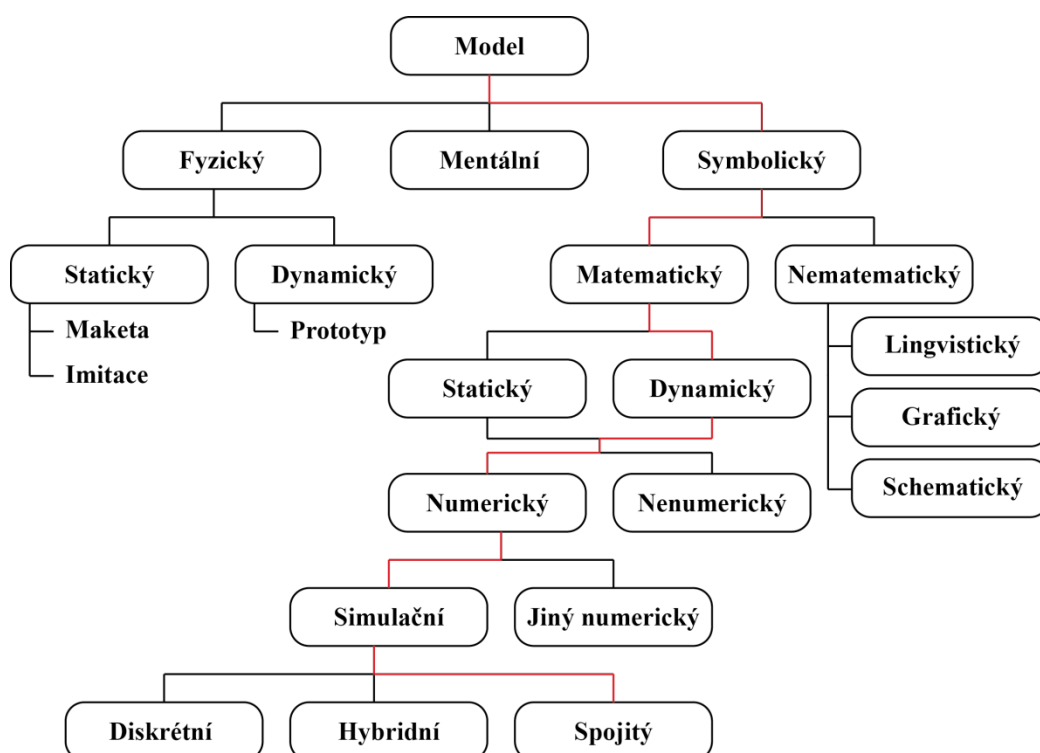
Krásným příkladem modelu může být například mapa. Mapa je modelem prostoru. Špatně na ní je to, že neobsahuje všechny dostupné detaily prostoru, ale je užitečná například pro plánování cesty (5).

2.2.1 Dělení modelů

Jelikož svět je velmi rozsáhlý a obsahuje nepřeberné množství různých objektů, je možné vytvořit ohromné množství různých modelů reprezentujících tyto objekty. Z toho důvodu také musí existovat velké množství kritérií pro jejich patřičné rozdělení. Níže jsou popsána kritéria, kterými lze specifikovat model vytvářený v této práci (zdroje: zejména (6), (7), (8) a (9)). Komplexní dělení s vyznačením linie modelu z této práce je uvedeno na Obrázku 2.

- **Symbolické modely** – jsou opakem fyzických modelů. Zatímco s fyzickými modely je možné provádět experimenty fyzikální podstaty (měření, vážení,...) se symbolickými modely toho možné není. Symbolické (abstraktní) modely jsou založeny na principu formalizovaného popisu modelovaného systému. Zpravidla je volen matematický popis za využití různých druhů rovnic. Abstraktní model však nemusí být popsán pouze matematicky, je možné k jeho popisu využít i různé diagramy (9). Hlavní rozdíl abstraktních modelů od fyzických je, že z fyzických modelů lze přímo získávat informace o modelovaném systému, ovšem abstraktní je nutné určitým způsobem řešit, ať už matematicky nebo logicky.
- **Dynamické** – výstupní hodnoty modelu jsou závislé nejen na vstupech, ale i na čase. Jednoduše řečeno, tyto modely sledují vývoj systému v čase.

- **Simulační** – používají se k předpovídání budoucího stavu modelu. S modelem se provádí různé experimenty, od změn vstupních proměnných až po změny konfigurace modelu. Pozorováním, jak se projeví tyto změny, jsme schopni zjišťovat možné budoucí stavy modelu.
- **Spojitě** – v tomto typu modelu dochází ke změnám stavových proměnných spojitě, respektují čas, tedy že s vývojem času se mění i stavové proměnné (např. rychlost v jedoucím autě).



Obrázek 2: Kompletní dělení modelů s červeně vyznačenou linií modelu z praktické části, převzato z (6)

2.3 Modelování

Modelování je proces, při němž je zkoumaný reálný objekt (systém) nahrazen modelem. Jinými slovy, je to proces, při němž je za využití abstrakce a jasně stanovených kritérií vytvořen nějaký druh fyzického, či abstraktního modelu zkoumaného objektu (systému) (10). Terminologie v případě modelování se může zdát matoucí, proto dochází v řadě zdrojů ke zjednodušení označení, jako například v úvodní větě odstavce. Správné označení v první větě by bylo: reálný objekt (originál) – modelovaný systém, model – modelující systém (11). V této práci dávám přednost zjednodušenému označení. Výsledkem procesu modelování se stává vytvořený model.

2.4 Simulace

Z počátku je nutné poznamenat, že simulace se uplatňuje na zkoumané systémy z důvodu posuzování jejich dynamiky. Definice simulace existuje mnoho, podle Shannona (3) je simulace proces vytváření modelu reálného systému a provádění experimentů s tímto modelem za účelem pochopení chování studovaného systému či za účelem posouzení různých variant činnosti systému.

Simulace se aplikuje na systémy, jež bývají komplexní (je velice obtížné, nebo nereálné je analyticky popsat), nebo na systémy s nimiž není možné provádět experimenty v reálném stavu, či na systémy, které jednoduše ještě neexistují (např. nejdříve se provádí vyhodnocení funkcionality, než se přejde k vytvoření systému). Proces simulace zahrnuje jak vytváření modelu (simulační model, simulátor), tak provádění experimentů s tímto simulačním modelem, proto je proces simulace považován za experimentální výzkumnou metodu.

2.4.1 Simulační proces

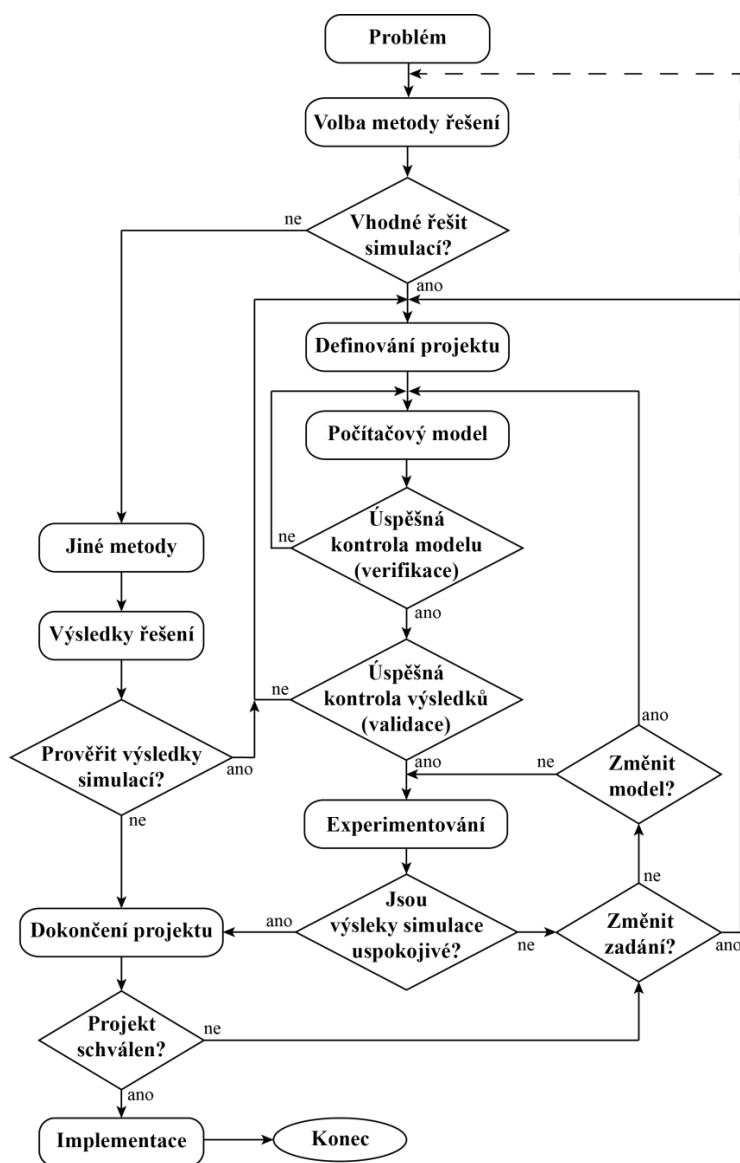
Simulační proces v sobě zahrnuje mnoho samostatných etap, od definování problému, který chceme řešit, přes vytváření modelu, až po provádění různých experimentů (simulačních běhů) s modelem, což z něj dělá poměrně rozsáhlý a zdoluhavý proces. I když je simulační modelování v posledních desetiletích velmi populární a používaná technika, neexistuje žádný přesný návod, jak celou studii provést – snad proto, že každý simulační projekt je specifický. Existuje pouze řada doporučení, v různé literatuře se drobně liší, jaké kroky by celý simulační proces měl pokrývat. Na Obrázku 3 je uveden celý simulační proces.

Popis jednotlivých fází simulačního procesu (3) (12):

- 1) Definování problému, který chceme řešit, jasné stanovení účelu a cíle tvorby modelu. Nutné je přesné vymezení zkoumaného problému, zodpovězení otázek: proč daný problém chceme řešit a čeho přesně chceme dosáhnout.
- 2) Volba metody řešení je velice důležitým krokem. Nedoporučuje se volit simulaci, pokud jsou dostupné jiné přesnější techniky, např. analytické modelování.
- 3) Definování projektu – přesnější vymezení zkoumaného systému, stanovení úrovně abstrakce a tvorba konceptuálního modelu.
- 4) Tvorba počítačového modelu – k transformaci konceptuálního modelu do počítačového prostředí se používají běžné programovací jazyky, často obohacené

o speciální knihovny určené pro simulační modelování, nebo speciální programy zaměřené přímo na tvorbu simulačních modelů a provádění experimentů, přičemž tyto programy využívají buď běžných programovacích jazyků či mají speciální jazyk.

- 5) Verifikace – ověření zda počítačový model odpovídá konceptuálnímu modelu
- 6) Validace – ověření výsledků počítačového modelu, zda odpovídají s určitou mírou přesnosti modelovanému systému (originálu)
- 7) Sestavení a následné provedení simulačních experimentů (simulačních běhů). Po provedení experimentů dochází k vyhodnocení jejich výsledků a případné úpravě vstupních hodnot, modelu nebo dokonce celého řešení.



Obrázek 3: Simulační proces, převzato a upraveno z (12)

- 8) Následuje zpracování závěrečné zprávy celé simulační studie, vyhotovení dokumentace modelu a předání zadavateli. Pokud je vše v pořádku, může následovat i implementace výsledků na originál.

Celý simulační proces lze rozdělit do dvou hlavních částí. První část, návrh a tvorbu simulačního modelu, pokrývají kroky 1-6. Druhá část, sestavení a provádění experimentů s modelem, zahrnují kroky 7 a 8. Dobré je také zmínit doporučení 40/20/40 pro tvůrce modelu z (3). Kdy 40% času a úsilí by mělo být věnováno krokům 1-3, 20% kroku 4 a zbylých 40% času a úsilí krokům 5-8.

2.5 Základní přístupy k simulačnímu modelování

Informace k této části byly shromážděny zejména z (9) a (13).

2.5.1 Simulace diskrétních událostí (Discrete event simulation – DES)

Jak už název naznačuje, tento typ simulace nesleduje čas spojitě, ale čas se posouvá pouze v určitých časových okamžicích, přesněji když nastane nějaká událost (např. příchod nějakého prvku do systému). Stejně tak modelové proměnné mění svůj stav pouze v tyto časové okamžiky. DES se používá pro systémy, jejichž struktura je dobře známa. Prvky vstupují do modelu, celý jej projdou a zase systém opustí. Typické jsou pro tento typ simulace fronty.

2.5.2 Systémová dynamika (System dynamics simulation – SDS)

Na rozdíl od DES systémová dynamika sleduje čas spojitě, v každý moment času je systém vyhodnocován a mění se hodnoty proměnných. SD využívá vysokou úroveň abstrakce, což také odráží způsob jakým je zpracovávána – diagramy toků a zásob. Tok prvků v systému je vyhodnocován diferenciálními rovnicemi. Značnou výhodou tohoto přístupu je dobrá možnost identifikace zpětných vazeb a jejich poměrně snadná implementace v modelu.

2.5.3 Agentní simulace (Agent-based simulation – ABS)

Už základní pojetí tohoto druhu simulace se absolutně liší od obou předchozích zmíněných přístupů, zatímco při DES a SDS je potřeba znát celkové chování, provázání a vlastnosti řešených systémů, aby bylo možné sestavit jejich simulační modely, tedy tzv. „top-down“

přístup k vytváření modelů. U agentní simulace je tomu přesně naopak, není potřeba znát přesné chování a provázání komponent systému, stačí umět přesně popsat základní prvky zkoumaného systému, z jejichž interakce poté vzejde chování celého systému – tzv. „bottom-up“ přístup.

Základním stavebním prvkem ABS jsou agenti. Agenti reprezentují základní prvky zkoumaného systému. V jednom agentním modelu nemusí být pouze agenti jednoho druhu. Může existovat více, navzájem třeba úplně odlišných druhů agentů umístěných do stejného modelu. Agenti jsou také umístěni do prostředí, v němž mohou provádět činnost, ke které jsou určeni. Ačkoli agenti mohou být úplně primitivní entity, jejich velkou předností je možnost vzájemné komunikace a interakce s ostatními agenty, což ještě ve spojení s interakcí s prostředím vytváří úplný obraz systému jako celku. Právě agentní modelování a simulace bude využita v praktické části práce.

2.5.4 Hybridní simulace (Multi-method simulation MMS)

Tento přístup k simulačnímu modelování nepřichází s žádným dalším pojetím zkoumaného systému, pouze využívá a kombinuje všechny dříve uvedené přístupy. Hybridní simulace se používá například tam, kde chceme rozšířit funkcionalitu klasických přístupů – např. pokud máme diskrétní model obsluhy klientů v bance, můžeme místo pasivních entit procházejících modelem dosadit agenty s určitými vlastnostmi, tím dostaneme hybridní simulační model.

3 Modelování v dopravě

Zájem o dopravní modelování je možné sledovat už od první poloviny 20 století. Vzhledem ke stavu výpočetní techniky v té době vznikali především velmi jednoduché matematické výpočetní modely určené k analýze a jednoduché simulaci vývoje vybrané komunikační sítě. Vznikalo velké množství různých modelů, ale mezi ty, jež se uchytily, patří zejména Greenshieldsův lineární model, Greenbergův logaritmický model, Underwoodův exponenciální model nebo Pipesův zobecněný model (14). Některé z těchto modelů jsou dokonce ještě dnes používány pro zjednodušený popis stavu dopravy. Všechny uvedené modely vycházejí ze stejného základního vztahu rychlosti a hustoty dopravního proudu, jehož výsledkem je intenzita dopravního proudu. Rychlost udávají v kilometrech za hodinu,

hustotu jako počet vozidel na jednom kilometru jízdního pruhu a intenzitu jako počet vozidel, jež projedou jízdním pruhem za jednu hodinu. Modely v uvedeném pořadí vznikaly postupem času, tak jak byly znovu přezkoumávány, z důvodu vylepšení nějakého nedostatku jejich předchůdců. Ačkoli byly modely dopravního proudu postupně zdokonalovány, ani jeden ze vzniklých modelů nebyl natolik dokonalý, aby jej bylo možné použít pro univerzální modelování jakýchkoli podmínek – každý z modelů se hodí pro specifické podmínky. Pokud tedy dnes chceme vytvářet přiměřeně přesný model dopravního proudu pro co nejširší spektrum možných podmínek, využívají se tzv. multirežimové kombinované modely (14), jež kombinují různé modely, tedy jejich vhodnost pro určité situace, dohromady.

3.1 Typy modelů podle úrovně abstrakce

Základním účelem tvorby simulačních dopravních modelů je zejména modelování pohybu a vzájemné interakce účastníků provozu (vozidel). Hlavním kritériem při tvorbě dopravních modelů je především rozsah modelovaného prostředí, přičemž současně s rozsahem prostředí, jež model pokrývá, jde i míra detailu s jakým by měl model reprezentovat skutečnost. Podle rozsahu modelovaného prostředí lze modely rozdělit na makroskopické, mezoskopické a mikroskopické (v některých zdrojích se zmiňuje ještě úroveň nanoskopická) (14). Míra detailu je pak určována mírou vypuštění nepotřebných detailů pro modelovaný problém (abstrakce) v jednotlivých modelech. Hierarchie modelů je zobrazena na Obrázku 4.

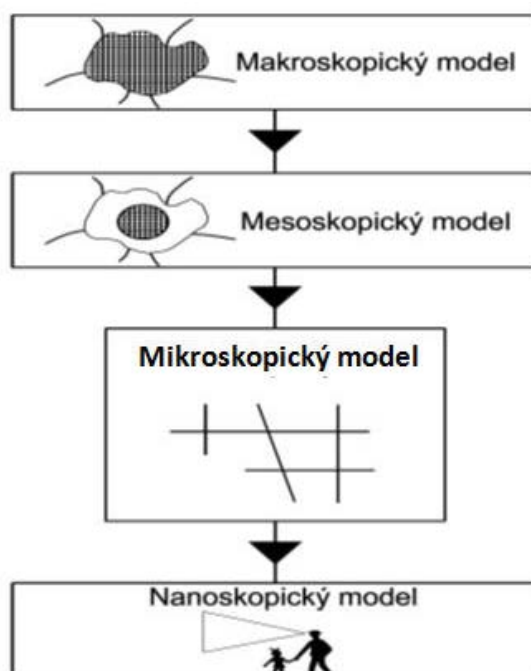
3.1.1 Makroskopické modely

Využívají se k modelování rozsáhlých oblastí, přičemž vzhledem k rozsahu modelované komunikační sítě se zde uplatňuje poměrně vysoká úroveň abstrakce. Makroskopické modely nemodelují pohyb jednotlivých účastníků provozu, ale s informacemi o pohybu pracují na agregované úrovni. Základem běžně používaných makroskopických modelů jsou vztahy mezi rychlostí, hustotou a intenzitou dopravního proudu (viz. výše zmíněné modely dopravního proudu).

3.1.2 Mikroskopické modely

Na rozdíl od makroskopických modelů jsou využívány pro simulaci prostorově výrazně menších sítí komunikací, či jen jedné vybrané části komunikace nebo křižovatky. Úroveň

abstrakce je v mikroskopických modelech úměrně nízká, tak aby postihovala dostatečný rozsah detailů vůči velikosti zkoumané komunikace. Základním rysem mikroskopických modelů je modelování pohybu jednotlivých účastníků provozu, přičemž se berou v potaz nejen detailní informace o dopravním prostředku (jako je zrychlení, zpomalení, hmotnost, typ vozidla, atd.) ale i různé charakteristiky chování řidičů jednotlivých vozidel. U tohoto typu modelu je nutné také velmi přesně postihnout detaily modelované komunikační sítě (povolená rychlost, počty, umístění a časové sekvence semaforů, přesná geometrická specifikace...). Vzhledem k tomu, že mikroskopické modely charakterizují dopravu na úrovni jednotlivých automobilů, veličiny rychlost, hustota a intenzita již nejsou pro popis pohybu vozidel dostatečně přesné, z toho důvodu využívá mikroskopická simulace další množinu veličin. Důležité jsou především časová a délková mezera. Časová mezera – udává časovou vzdálenost dvou po sobě jedoucích vozidel měřenou v k tomu určeném místě. Délková mezera – stejná definice jako u časové mezery, pouze vzdálenost se udává v délkových jednotkách. Pro mikroskopickou simulaci se využívá například těchto modelů: různé verze car-flowing modelů, GHR model, model bezpečné vzdálenosti, psycho-fyzikální model či poměrně populárních celulárních automatů.



Obrázek 4: Hierarchie modelů podle detailu, převzato z (14)

3.1.3 Mezoskopické modely

Přesné vymezení mezoskopických modelů neexistuje, liší se zdroj od zdroje. Přesně stanoveno je pouze, že se pohybují na rozhraní mezi makroskopickými a mikroskopickými modely. Tato skutečnost umožňuje využívat výhody obou dvou druhů modelů. Úroveň abstrakce se tedy odvíjí od potřeb konkrétního modelu, přičemž se pohybuje mezi úrovněmi abstrakcí zmíněných modelů. Dobrým příkladem abstrakce na mezoskopické úrovni může být křižovatka. V mikroskopických modelech se řeší její přesná reprezentace (od semaforů až po přesné geometrické vymezení), zatímco v modelech makroskopických řešena vůbec není, bývá chápána pouze jako uzel pro větvení komunikace. V mezoskopických modelech je možné ji chápat jako v makroskopických, nebo je možné s ní pracovat na určité úrovni abstrakce, například ji reprezentovat pouze jako pevné zpomalení projíždějících aut.

3.1.4 Nanoskopické modely

Tyto modely jsou speciálním případem mikroskopických modelů, oproti kterým ještě snižují už tak nízkou úroveň abstrakce. Správně zpracované nanoskopické modely dokáží poskytnout velmi přesná data, ovšem aby tyto data poskytly, jsou velmi náchylné na přesná reálná data a nastavení modelu (stejně jako mikroskopické modely).

3.2 Nástroje na simulaci dopravního systému

V posledních desetiletích prošli nástroje používané na simulaci dopravního systému velmi prudkým rozvojem, což umožnil zejména rozvoj výpočetní techniky. Dřívější nástroje se zaměřovali zvláště na analýzu dopravního proudu a s ní spojené výpočty, sloužily tedy spíše pro urychlení a automatizaci známých výpočetních postupů, což také odpovídalo stavu a možnostem tehdejší výpočetní techniky. S rozvojem a narůstajícími možnostmi výpočetní techniky začaly vznikat i nástroje snažící se přesněji zachytit dopravní systém – jednotlivá auta, jejich pohyb, vzájemné relace – jinými slovy nástroje pro mikroskopickou simulaci. Mezi první takové nástroje by se nechaly zařadit ty, jež využívají celulární automaty, jejichž princip diskrétního prostředí se využívá i dnes v některých nástrojích.

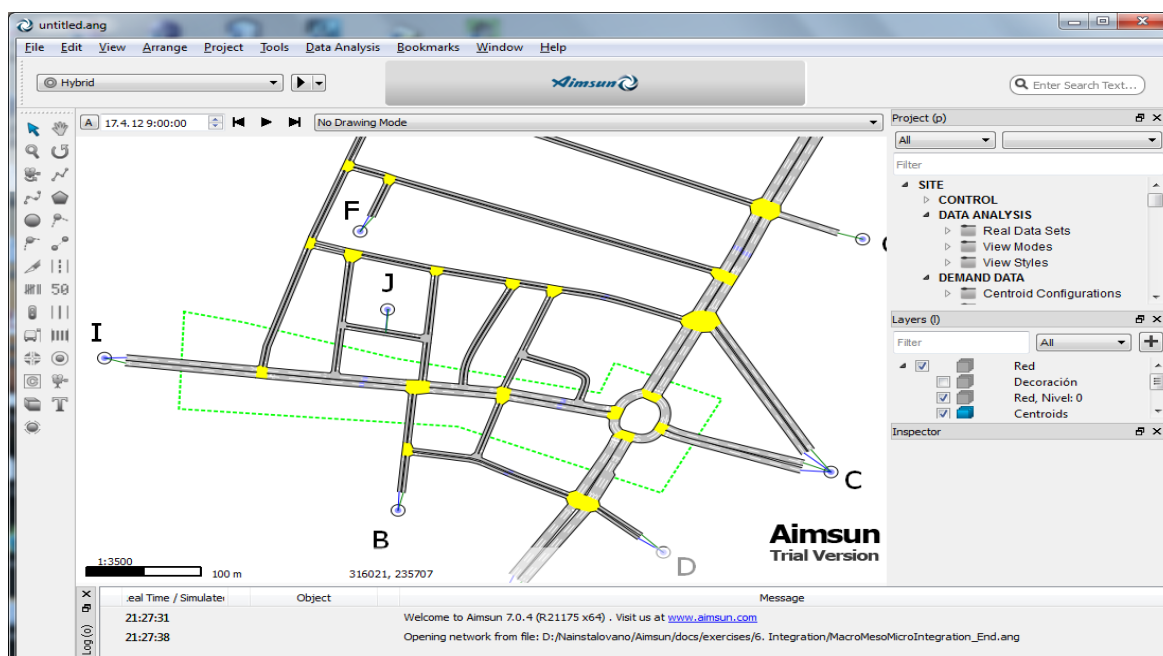
Simulační nástroje ve snaze zpřesňovat poskytované výstupy postupem času nabrali na komplexnosti. V jednom simulačním nástroji tak vznikají přesné modely dopravní sítě, fyzické modely vozidel, psychické modely řidičů aj. Tyto modely spolu interagují a společně

tak vytvářejí výsledné chování modelovaného systému. Dnešní nástroje na simulaci dopravního systému nabízejí širokou doplňkovou funkcionalitu např. zkoumání a vyhodnocení modelované dopravní sítě za účelem zavedení efektivního mýtného, odhady množství výfukových emisí vyprodukovaných na sledovaném úseku, aj.

3.2.1 Aimsun¹

Aimsun je softwarový nástroj určený pro dopravní modelování a simulaci vyvíjený firmou TTS – Transport Simulation Systems. V současnosti se používá verze s číslem 7 (v prvním čtvrtletí letošního roku se očekává vydání verze 8). Aimsun je možné použít nejen k vytváření mikroskopických a makroskopických simulačních modelů, ale i jejich kombinací, tedy hybridních simulačních modelů. Tato možnost dělá z Aimsunu mocný nástroj s nímž je možno modelovat poměrně rozsáhlé sítě na mezoskopické úrovni, přičemž některé důležité úseky, u nichž je to žádoucí, mohou být modelovány mnohem detailněji, na mikroskopické úrovni. Obrázek 5 zachycuje prostředí tohoto nástroje.

Aby bylo možné vytvářet velmi přesné modely dopravní sítě, umožňuje Aimsun importovat data různých formátů, např. GIS, CAD nebo Google Earth, pokud data o dopravní síti nejsou k dispozici, je možné využít komponentu OpenStreetMap pro import dat z elektronických



Obrázek 5: Prostředí produktu Aimsun

¹ Dostupný online na <http://www.aimsun.com/>

map dostupných na internetu. Modelování dopravních prostředků také nabízí mnoho možností. Je možné rozlišovat mezi typy: osobní, nákladní, hromadná doprava, pěší nebo cyklisté (další je možné samostatně doplnit). Každému z druhů dopravních prostředků je možné přidělit specifické vlastnosti, přičemž se však každý člen určité množiny dopravních prostředků bude chovat opět jinak, podle jemu nastavených parametrů chování.

Další nespornou výhodou Aimsunu je modulární konstrukce. Ta umožňuje za využití modulů vytvořených třetími vývojáři rozšiřovat funkcionalitu např. o optimalizační výpočty světelných signalizací. Důležitou roli také hrají rozsáhlé API rozhraní, Aimsun Microscopic Simulator Software Development Kit a Aimsun Platform Software Development Kit, díky nimž je možné Aimsun rozšiřovat o vlastní objekty, funkce, modely, nebo jej napojit na stávající systémy. Silnou stránkou je multiplatformost – dostupný jak pro různé verze Microsoft Windows, Mac OS X tak i některé Linuxové distribuce.

3.2.2 Visum²

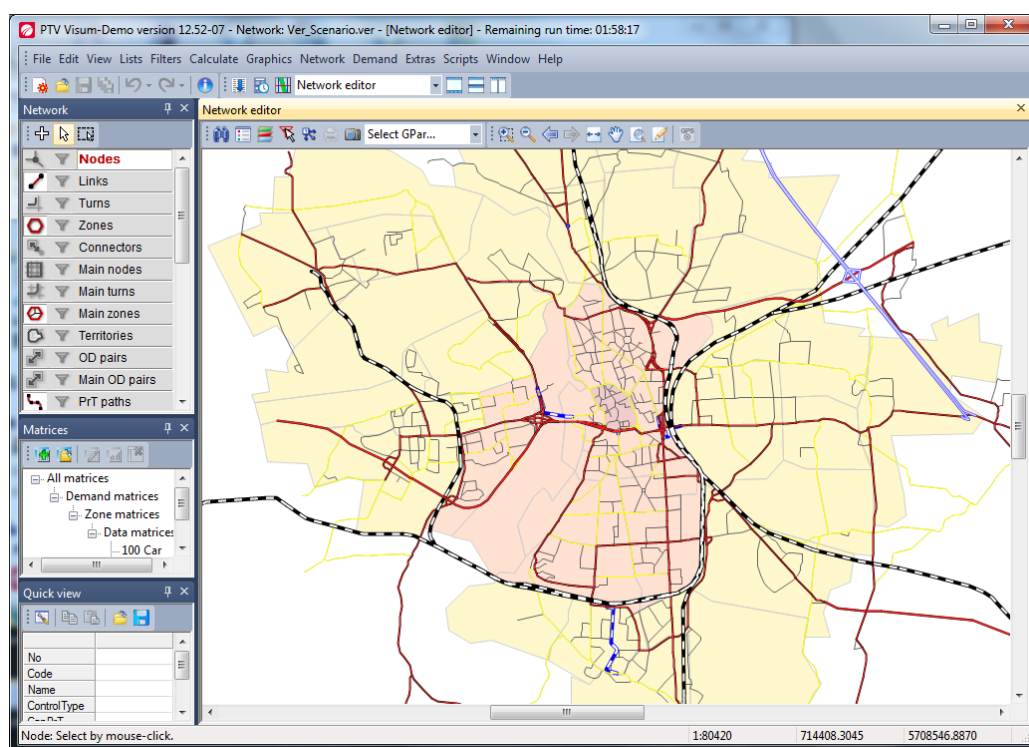
Visum patří do rodiny softwarových nástrojů pod označením Vision Traffic Suite, jež tvoří balíček pro kompletní dopravní analýzu, od plánování přes dopravní inženýrství až po simulaci, vytvářený německou společností PTV GROUP – the mind of movement. Úrovní detailu a prostředí, které Visum pokrývá, je určen k makroskopickému či mezoskopickému modelování a simulaci dopravní sítě. Současná číselná verze programu je 12.5. Obrázek 6 zachycuje prostředí tohoto nástroje.

Stejně jako Aimsun i Visum umožňuje vytváření velmi detailních modelů dopravní sítě. Visum primárně pracuje s datovým formátem GIS, proto všechny ostatní formáty jsou do něj zpravidla převáděny. Nabízí také možnost importu mapových podkladů z jiných zdrojů prostřednictvím modulu OpenStreetMap, stejně jako Aimsun. Velkou výhodou v oblasti modelování dopravní sítě je spolupráce společnosti PTV Group se společností TomTom International B.V., díky níž Visum nabízí možnost získat za příplatek detailní mapové podklady i s doplňkovými dopravními daty (povolené rychlosti, omezení, zatížení komunikace v různé denní dobu...). V oblasti modelování dopravních prostředků Visum také nabízí pestré rozdělení do různých kategorií, neumožňuje však tak detailní zpracování jednotlivých dopravních prostředků, což je dáno povahou mezo či makroskopických modelů.

² Dostupný online z <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-visum/>

V základní konfiguraci je Visum poměrně pestrý škálou nabízených možností vyhodnocení simulačních dat. Nabízí možnost velmi detailně zkoumat dopravní tok sítí – časové zatížení úseků komunikací, vyhledání „slabin“ sítě (úseky s nedostatečnou kapacitou), dále analýzu dopravní poptávky – určení regionů zdrojů a cílů dopravy, ekonomické plánování struktur dodávek zboží či služeb, rozvržení a optimalizace tras veřejné dopravy a další. Zajímavé jsou také funkce optimalizace časování světelných signalizačních zařízení, či kalkulace výfukových emisí, nebo hlukového znečištění a celkového dopadu těchto aspektů na okolí.

Díky propracovanému API je možné Visum napojit na stávající systémy pro řízení dopravy a dodávat tak modelu reálná data o provozu na komunikacích, nebo připojovat vlastní vytvořené moduly pro rozšíření funkcionality programu.



Obrázek 6: Prostředí produktu PTV Visum

3.2.3 Další nástroje

V tabulce 1 jsou uvedeny některé další nástroje používané na simulaci dopravního systému.

SW nástroj	Úroveň detailu	Vývojář
Cube Avenue	Mezoskopický	Citilabs, Inc. http://www.citilabs.com/products/cube/cube-avenue
OmniTRANS	Makroskopický	Omnitrans International http://www.omnitrans-international.com/
Paramics	Mikroskopický	Quadstone Paramics http://www.paramics-online.com/
PTV Vissim	Mikroskopický	PTV GROUP – the mind of movement http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim/
Saturn	Makroskopický	Institute for Transport Studies, University of Leeds and distributed by WS Atkins of Epsom https://saturnsoftware.co.uk/index.html
Tracks	Mikroskopický	GABITES PORTER http://www.gabites.co.nz/
TRANSYT-7F	Makroskopický	McTrans Center, University of Florida http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/TRANSYT-7F/
TSIS-CORSIM	Mikroskopický	McTrans Center, University of Florida http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/TSIS/
Vista	Mezoskopický	Vista Transport Group http://vistatransport.com/

Tabulka 1: Některé nástroje používané pro simulaci dopravního systému, zdroj zejména (15)

4 Model dopravního systému

4.1 Konceptuální model – popis řešeného problému

Cílem práce je vytvořit simulační model 24 hodin dopravního toku ve vymezené síti komunikací. Model bude vytvářen s využitím multiagentního přístupu k modelování, přičemž agenti v modelu jsou jednotliví účastníci provozu a prostředím, do něhož budou agenti zasazeni a v němž se pohybují, je systém komunikací. Dopravní tok v rámci sítě komunikací bude reprezentován agregací pohybu jednotlivých agentů (dopravních prostředků). Množstvím pokrytých detailů bude vytvořený model odpovídat úrovni mezoskopických modelů. Po dodání potřebných vstupních údajů – zdrojích a cílech dopravní poptávky – by měl model v rámci simulačního běhu, s přihlédnutím na úroveň abstrakce, vykazovat uspokojivou míru shody s reálnými daty.

Účelem vytváření počítačového modelu je požadavek zkoumat chování dopravního systému bez závislosti na reálném prostředí. To umožňuje provádět různé změny v organizaci komunikací, ať už trvalé (nová silnice, vytvoření jednosměrky) nebo dočasné (oprava komunikace) a zkoumat jejich vliv na dopravní tok ve sledované síti komunikací. Výhodou počítačového modelu je také možnost urychlit simulační čas, což případně dovoluje rychle vyhodnotit potřebné změny v organizaci dopravy z důvodu nějakých neočekávaných událostí (např. hromadná dopravní nehoda).

4.1.1 Prvky modelu

Při vytváření návrhu modelu je nutná specifikace prvků, jež bude model obsahovat a jejich vazby, obecně prostředí modelu. Model se skládá z jednotlivých silnic, jejichž propojením vznikne systém komunikací, a z dopravních prostředků, jež se po silnicích pohybují. Od křižovatek je v tomto modelu abstrahováno – jsou brány pouze jako jakési body, jež propojují jednotlivé komunikace. Semafory, ačkoli v reálném prostředí jsou potřebné ke správné funkci komunikační sítě, potažmo pohybu automobilů, nemají pro tento model vypovídající hodnotu, proto budou také vynechány. Vypuštění křižovatek a semaforů plně odpovídá mezoskopické úrovni detailu plánovaného modelu.

- **Silnice** – elementární prvek, po němž se pohybují auta (agenti). Je nutné ji popsat základními charakteristikami, jimiž jsou délka, počet pruhů a povolená rychlost. Ostatní možné charakteristiky, např. hustota provozu, budou dopočítávány při běhu modelu. Počet pruhů bude udáván jako desetinné číslo, protože u mnoha úseků komunikací je např. půlka dvoupruhá a půlka třípruhá. Důležitá vlastnost silničního úseku v modelu je určování rychlosti vozidel. Všechna vozidla pohybující se po stejném úseku mají stejnou rychlost (= rychlost dopravního proudu).
- **Dopravní prostředek** – prvek, jež se pohybuje silniční sítí z nějakého počátečního bodu cesty směrem k jeho cílovému bodu – v tomto modelu jej reprezentuje agent. Agent při vzniku vstupuje do modelu, tedy do systému komunikací a s dosažením cíle cesty jej opouští. Pro správnou funkci agenta, potažmo modelu, mu není potřeba přiřazovat detailní fyzické charakteristiky vozidla, s výjimkou délky, která se využívá např. pro výpočty teoretické hustoty.

Agent je nejaktivnější součástí modelu, zná svou současnou pozici, pamatuje si předchozí dílčí bod cesty a zná cíl cesty. Krom těchto znalostí také monitoruje stav prostředí modelu a na základě všech těchto informací vypočítává svou cestu. Agent mimo jiné také nepřímo ovlivňuje ostatní auta – zvyšuje obsazenost, hustotu, úseku, po němž se pohybuje, což vede ke snížení rychlosti na daném úseku.

- **Silniční síť** – vzniká propojením jednotlivých úseků komunikací. Přičemž označení každého úseku např. mezi body A, B musí být z důvodu směrové orientace přesné. Je tedy rozdíl pokud úsek označíme AB nebo BA. Silniční síť tvoří prostředí, v němž se pohybují agenti, a právě správné označení úseku určuje agentům směr, jímž se mohou pohybovat. Další údaje potřebné pro pohyb agentů v silniční síti vycházejí z vlastností komunikací, např. rychlost či hustota.

4.1.2 Potřebná data

K vytvoření silniční sítě je nutné znát geometrickou charakteristiku komunikací, tedy délky jednotlivých úseků silnic a počty pruhů. Aby bylo možno grafické znázornění, je potřeba dodat údaje o rozmístění silnic v prostoru. Z hlediska omezení toku dopravy po komunikacích je nutné stanovit maximální povolenou rychlost.

Dále je potřeba znát data, na jejichž základě bude generován dopravní tok. Optimálními údaji z tohoto pohledu jsou informace o zdrojích a cílech dopravní poptávky ve sledované síti a časové rozložení intenzity této poptávky.

Vstupním údajem je i konstanta průměrná délka vozidla. Její hodnota je stanovena na základě procentuálního podílu druhů dopravních prostředků a dat o délkách vozidel z (16).

4.2 Program AnyLogic³

Výše popsany konceptuální model vytvářený v této práci je převáděn do počítačové podoby s využitím modelačního a simulačního nástroje AnyLogic. Ten je vyvíjen stejnojmennou ruskou společností (původní název firmy byl XJ Technologies) od roku 1992, přičemž první verze byla představena roku 2000. Současná verze programu je 6.9.0.

AnyLogic je jediným nástrojem, který podporuje všechny základní přístupy k modelování – simulaci diskrétních událostí, systémovou dynamiku i agentní simulaci – najednou v jediném

³ Dostupný online z <http://www.anylogic.com/>

vývojovém prostředí, což umožňuje vytvářet modely, jež libovolně kombinují základní přístupy k dosažení svého cíle. Flexibilita v možnosti kombinací přístupů umožňuje vytvářet jedinečné modely s požadovanou úrovní detailu zachycující rozsáhlou komplexitu modelovaných systémů, čehož nelze dosáhnou využitím samostatných přístupů bez jejich kombinace. Silnou stránkou AnyLogicu je vytváření modelů v grafickém prostředí, skládáním a propojováním předem připravených prvků, kterých v základu nabízí veliké množství, což velice usnadňuje orientaci v připravovaném modelu a také urychluje vývoj.

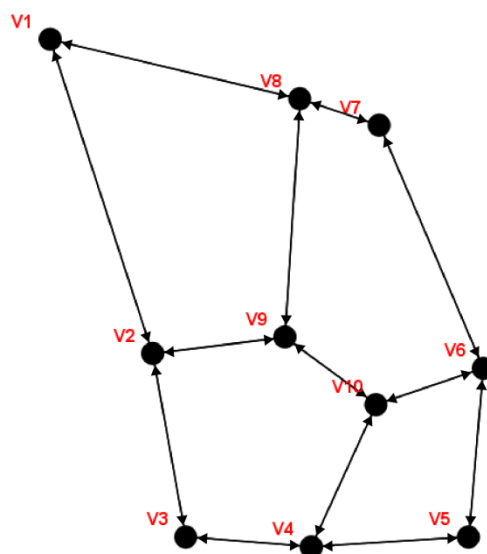
AnyLogic je postaven na programovacím jazyku Java. Veškeré požadované vlastnosti prvků modelu lze tedy snadno doplnit dopsáním vlastních tříd, nebo importem již dříve vytvořených. Obecně modulární konstrukce AnyLogicu umožňuje vytvářet prvky modelu, které mohou být později jednoduše vyjmuty a použity v jiných modelech.

Další předností tohoto nástroje je poměrně rozsáhlá možnost zpracování výsledků simulačních běhů modelu. Nabízí možnosti pro statistické zpracování a k nim odpovídající výstupy v podobě různých grafů či histogramů. Také je možné simulaci prezentovat v podobě 2D či dokonce 3D vizualizací.

4.3 Implementace sítě komunikací

Základním problémem je tok jakýchkoli prvků, agentů, v nějakém síťovém systému. Jako síťový systém si, zjednodušeně řečeno, můžeme představit libovolnou síť, prostřednictvím které jsou přenášeny, nebo prochází prvky z nějakého bodu A do předem stanoveného bodu B. Mohou to tedy být počítačové sítě, v nichž jsou přenášeny a směrovány pakety, nebo třeba síť dopravních komunikací – například hlavní sběrné silnice ve větším městě. Pokud se na definici síťového systému podíváme trochu z výšky, začne připomínat jakýsi systém vzájemně propojených bodů. V přesnější terminologii graf. Pro představu přirovnání k uvedené síti dopravních komunikací – křižovatky představují uzly (body) grafu a hlavní silnice mezi křižovatkami jsou hrany grafu. A právě tento způsob reprezentace silniční sítě je zvolen v modelu vytvářeném v rámci této práce.

Silniční síť má v základu jednu vlastnost, kterou nesmíme při vytváření grafu přehlédnout. Touto vlastností je orientovanost. Tu si lze představit jako jednosměrky – je povoleno ji projíždět pouze jedním směrem, např. z bodu A do bodu B, opačně průjezd není povolen.



Obrázek 7: Orientovaný graf silniční sítě

Analogicky provoz po silnici, kde jeden pruh je v podstatě jednosměrkou z bodu A do B a druhý pruh naopak. V rámci grafu vytvářeného v tomto modelu, tedy klasickou obousměrnou silnicí, budou v grafu reprezentovat dvě orientované hrany – hrana z bodu A do B a naopak. Vytvořený graf silniční sítě je zachycen na Obrázku 7.

V rámci grafu je používáno jednotné pravidlo pro pojmenování vrcholů a hran grafu. Vrcholy jsou určeny velkým písmenem V a číslem vrcholu (např. V3). Hrany jsou pojmenovávány podle vrcholů, které spojují, přičemž první se uvádí vrchol, ve kterém hrana začíná (z důvodu orientovanosti hran), např. tedy V2V4. Čísla vrcholů jsou v modelu vždy zadávané snižené o 1, protože v matici sousedností jsou vrcholy číslovány od 0.

Data potřebná k vytvoření grafu sítě komunikací by bylo možné zadávat přímo v kódu programu, poté by však bylo náročné měnit tato data a proto musí být uloženy v externí struktuře. Vzhledem možnosti AnyLogic, který dovoluje komunikovat s MS tabulkovými dokumenty, byla zvolena tato struktura pro uložení dat. Vždy při startu modelu jsou potřebné informace načteny.

4.3.1 Silnice (hrana)

Pojmem silnice rozumíme úsek mezi dvěma křižovatkami uvažovanými v modelu.

K reprezentaci silnice (hrany grafu) v rámci modelu byla vytvořena třída *SilnicniUsek*.

Vytvořená třída rozšiřuje třídu ShapePolyLine, sloužící pouze ke grafické vizualizaci lomené čáry (tato vlastnost je využita k vykreslení hrany), o parametry nutné k popisu úseku silnice – počet pruhů, délka a povolená rychlost – i parametry využívané z hlediska funkce modelu.

Parametry silnice

- **pocatectiBod** – určuje pozici vrcholu, z něž hrana vychází
- **koncovyBod** – pozice vrcholu, ve kterém hrana končí
- **nazev** – název hrany, určený podle popsanych pravidel
- **delkaTrasy** – uchovává informaci o skutečné délce silničního úseku v kilometrech
- **rychlostMax** – maximální povolená rychlost na dané silnici
- **pocetPruhů** – počet pruhů v daném směru komunikace
- **agentiNaHrane** – kolekce uchovávající informaci o agentech, kteří právě projíždějí přes tuto hranu (silnici)
- **mistoNaHrane** – booleovská proměnná přechovávající informaci, zda již byla dosažena maximální hustota dané silnice
- **kmVPixelech** – uchovává údaj o počtu pixelů, jež reprezentují 1km skutečné délky hrany – slouží pro přepočítání rychlosti agenta, tedy určení doby strávené na hraně

4.3.2 Váha hrany

Díky využití orientovaného grafu jsme schopni říci, jakým směrem se můžeme vydat z daného vrcholu. Postupným složením těchto informací je člověk schopen si sestavit cestu z nějakého bodu A do jiného bodu B. Ovšem tento přístup má značný nedostatek, a to že neznáme cenu vybrané cesty. Co když existuje více možných cest z našeho počátečního bodu do koncového? V takovém případě bychom nebyli schopni určit, kterou cestou je výhodnější se vydat. Právě z tohoto důvodu se využívá vah hran, které nám řeknou cenu daného spojení a jejich součet určí cenu celé cesty. Využitím vah získáme ohodnocený graf, který je poté možno zpracovávat algoritmy k tomu určenými.

V sestavovaném grafu udává váhu každé hrany čas, za který je agent schopný ji překonat. Přičemž z důvodu aktuálnosti dochází k přepočítávání váhy vždy, když libovolný agent vstoupí či opustí hranu.

4.3.3 Rychlost hrany

Jak bylo uvedeno výše, rychlost všech agentů na jedné hraně je stejná. Z toho důvodu je nutné stejně jako u váhy přehodnocovat rychlost vždy poté, co dojde ke změně v počtu agentů na hraně. Jelikož rychlost a hustota jsou navzájem závislými hodnotami, výpočet rychlosti vychází ze vzorce pro určení maximálního možného počtu agentů na dané hraně při udržování určité rychlosti a bezpečných časových rozestupů ($= 2s \Rightarrow 2/3600$ hod). Bezpečný časový rozestup se udává jako vzdálenost mezi vozidly ujetá za 2 vteřiny při dané rychlosti. Vzorec zohledňuje i průměrnou délku vozidla (viz. 4.1.2).

Parametry vzorce

- **pp** – počet pruhů dané hrany (silničního úseku); z důvodu nerovnoměrnosti v počtu pruhů může být desetinné číslo
- **s** – délka úseku v kilometrech
- **h** – aktuální hustota (počet aut) na dané hraně
- **pdv** – průměrná délka vozidla v kilometrech

Vzorec pro výpočet rychlosti

$$\left(\frac{pp * s}{h} - pdv \right) * \frac{3600}{2}$$

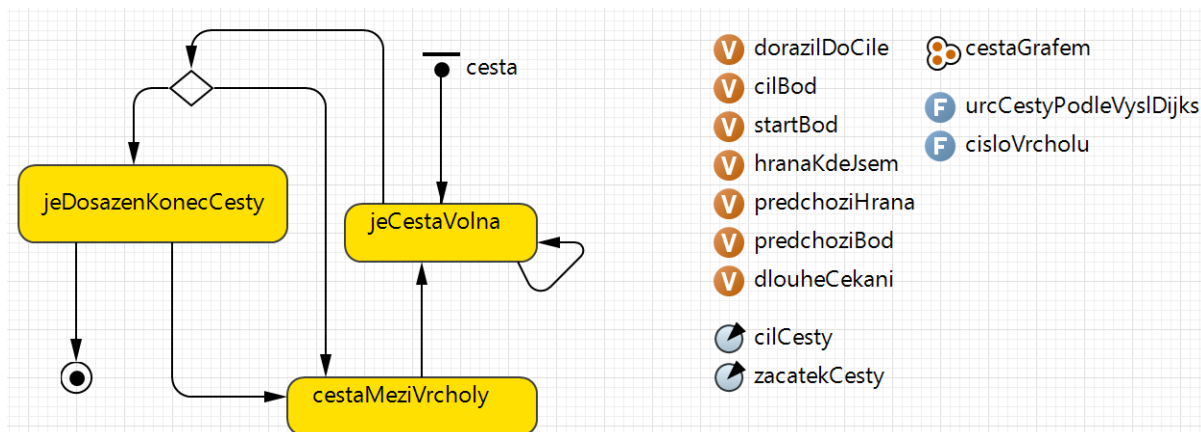
Vzorec pro výpočet max. počtu agentů na hraně

$$\left(\frac{s}{v * \frac{2}{3600} + pdv} \right) * pp$$

4.4 Agent

Agent je základním prvkem, na němž stojí multiagentní přístup zvolený v této práci. Sám o sobě bývá agent relativně jednoduchá struktura s do značné míry předvídatelným chováním. Agent často ani nepotřebuje mít nijak zvláště složitou strukturu chování. Stačí mu základní funkcionalita v rámci daného prostředí. Agenti se také nechají rozdělit na několik typů, podle toho jakou mají vazbu mezi vlastním vstupem a výstupem. V práci je využit cílově orientovaný agent – je to druh agenta s vnitřním stavem, jež se snaží pomocí prohledávání a plánování předvídat tak, aby co nejlépe dosáhl svého cíle. V rámci vývoje v AnyLogicu je vnitřní struktura agenta popsána stavovým diagramem, viz Obrázek 8.

Generování agentů probíhá na základě vstupních dat, která určují, kolik agentů by mělo být v určitém časovém rozmezí vygenerováno na určitou trasu. K samotnému generování se využívá v AnyLogicu implementované Poissonovo rozdělení, jež nám určuje počet na sobě nezávislých výskytů události za jednotku času.



Obrázek 8: Návrh agenta v prostředí AnyLogic

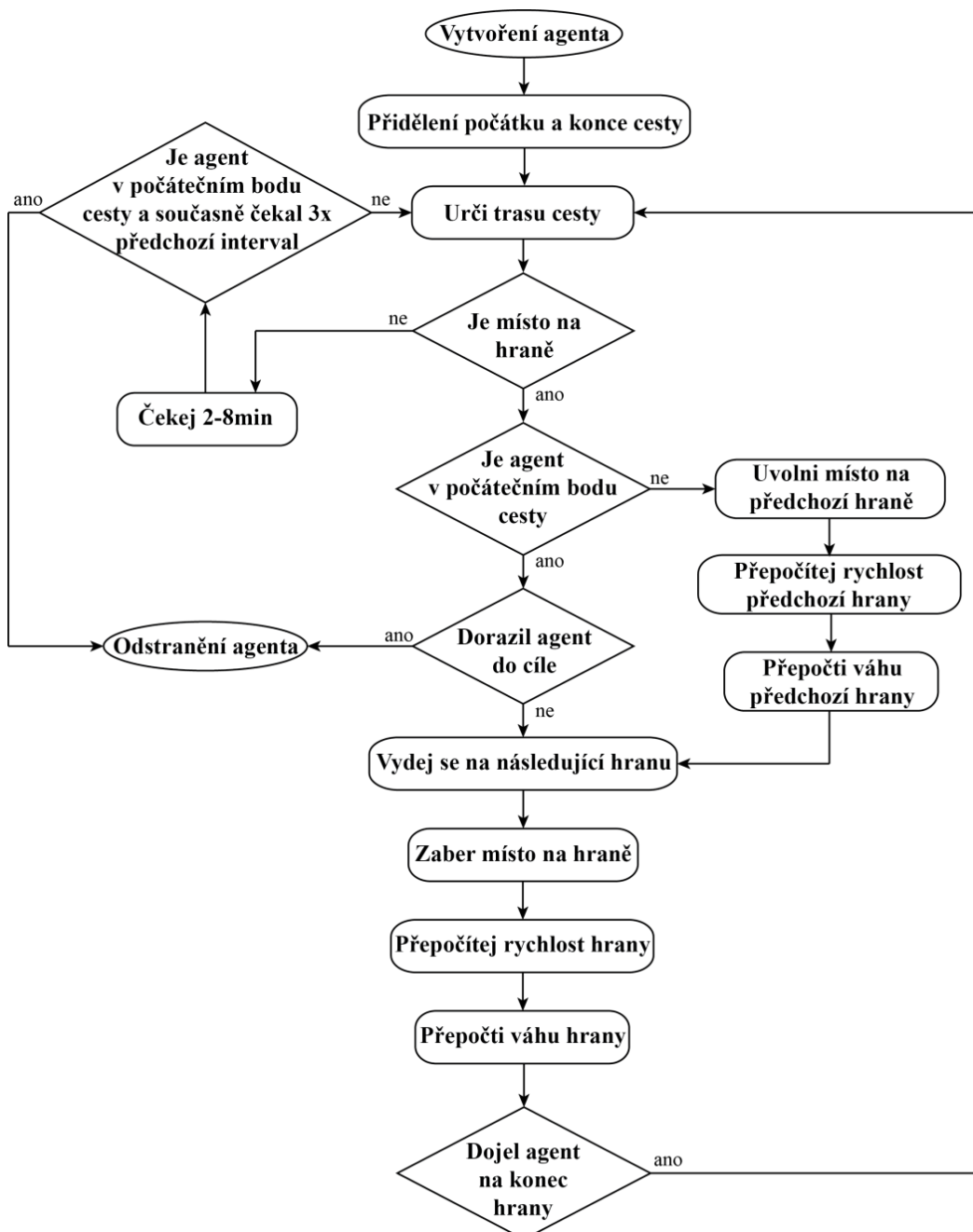
Celkový princip fungování agenta je popsán diagramem na Obrázku 9.

4.4.1 Informace uchovávané agentem

- **zacatekCesty** – číslo vrcholu, kde agent začíná svou cestu
- **cilCesty** – číslo koncového vrcholu agentovi cesty
- **startBod** – počáteční bod části cesty agenta
- **cilBod** – koncový bod části cesty agenta
- **dorazilDoCile** – booleovská proměnná určující zda agent dosáhl konečného cíle cesty
- **hranaKdeJsem** – objekt třídy reprezentující hranu (silnici) na které se agent nachází
- **predchoziHrana** – objekt třídy zastupující hranu, na které se agent nacházel bezprostředně před vstupem na hranu, kde se právě nachází
- **predchoziBod** – uchovává předchozí bod (vrchol) průjezdu agenta – používá se při výpočtu cesty grafem, aby se zaručilo, že se agent nebude hned vracet stejnou cestou
- **dlouheCekani** – pomocná proměnná k určení příliš dlouhého čekání na vstup do grafu
- **cestaGrafem** – nese informaci o bodech, jež musí agent v přesném pořadí projet, aby dosáhl končného cíle cesty

4.4.2 Vlastní funkce agenta

- **urcCestyPodleVyslDijks** – využije upravený Dijkstrův grafový algoritmus (skončí hledání dosažením koncového bodu) k výpočtu cesty daného agenta z jeho aktuálního startBodu do finálního cíle cesty a trasu uloží do kolekce cestaGrafem
- **cisloVrcholu** – po dodání určitého bodu (vrcholu grafu) vrátí jeho číslo



Obrázek 9: Diagram principu fungování agenta

4.4.3 Zpracování dat grafového algoritmu

Pro zpracování grafu za účelem hledání cest pro agenty (automobily) je v této práci využíván lehce modifikovaný Dijkstrův algoritmus převzatý z (17). Vstupem upraveného grafového algoritmu je počáteční bod cesty, matice sousednosti vrcholů, předchozí bod cesty a dílčí cíl cesty. Matice sousednosti je dvourozměrné pole, v němž jsou na souřadnicích odpovídajících propojeným vrcholům uloženy váhy dané hrany. Číslo předchozího bodu cesty se zadává z důvodu, aby při výpočtu byla vynechána cesta zpět do předcházejícího bodu. Dílčí cíl je zadáván, aby nedocházelo ke zbytečnému prohledávání grafu. Výstupem algoritmu je pole o velikosti rovné počtu vrcholů, přičemž každý prvek pole odpovídá vrcholu grafu (číslované od nuly). Každý prvek pole uchovává číslo vrcholu předcházejícího tomuto vrcholu při cestě z počátečního bodu cesty do tohoto vrcholu. Hodnoty těchto „předchůdců“ jsou určovány na základě propočtů vah hran uvedených v matici sousednosti. Počáteční vrchol cesty má vždy předchůdce označeného číslem -1.

4.4.4 Určení cesty grafem

Aby byl agent schopný pohybu, je mu vždy potřeba zadat přesný startovní bod, cílový bod a hranu, po které se do cílového bodu dostane. Tyto informace však výstup grafového algoritmu neposkytne. Proto je nutné tento výstup ještě dále zpracovat.

Jelikož výstupem grafového algoritmu je pole předchůdců jednotlivých vrcholů při stanovení cesty z určeného počátečního vrcholu do všech vrcholů je potřeba určit postup, kterým se získají a seřadí vrcholy, jež agent musí postupně navštívit při cestě grafem z počátečního do cílového bodu.

Princip zjištění pořadí všech vrcholů na cestě agenta je následující. Podíváme se, který bod je koncový (zjistíme jeho číslo). Dále v poli podle čísla koncového bodu zjistíme, jaký je předchůdce tohoto vrcholu. Následuje podmínka, která zjišťuje, zda předchůdce není roven počátečnímu vrcholu a současně předchůdce není roven hodnotě 0 (hodnota 0 → inkrementovaná hodnota předchůdce počátečního vrcholu z důvodu implementace algoritmu). Pokud tato podmínka platí je současný vrchol zaznamenán do agentovy cesty grafem, jako koncový bod je označen zjištěný předchůdce současného vrcholu a znovu se opakuje celý popsáný algoritmus.

Zmíněná podmínka nebude splněna pouze za předpokladu, že právě zpracovávaný vrchol je úvodním vrcholem agentovi cesty. V takovém případě vyhledávání již dál nepokračuje – ve zvláštním případě se toto může stát hned při prvním průchodu algoritmu, to pak znamená, že počáteční vrchol je současně i cílovým vrcholem.

Pokud by byly vrcholy zapisované do pomocné struktury ukládány v pořadí, ve kterém jsou zpracovávány, získali bychom cestu opačnou – tedy pořadí vrcholů od koncového do počátečního vrcholu. Z toho důvodu je vždy každý zapisovaný vrchol do pomocné struktury ve výše popsaném algoritmu zapsán na první pozici struktury. Takto se získá pořadí vrcholů, které musí agent na cestě grafem z počátečního do koncového bodu projít.

Cesta je přehodnocována pokaždé, když agent dosáhne dalšího vrcholu ve své cestě. Přepočítávání cesty musí být prováděno především z důvodu změn v zatížení hran grafu (komunikací), tedy změnami stavu hustoty dopravy.

4.4.5 Navigace grafem

Agentovi se při vzniku přímo zadává počáteční vrchol a cílový vrchol, pokud však nejsou tyto vrcholy přímo propojeny, agent není schopen – při zachování pravidla, omezujícího jeho pohyb pouze na silnici (hranu grafu) – splnit svůj úkol, dostat se do cílového bodu. Z toho důvodu musí být celková cesta rozdělena na dílčí úseky. Například pokud se chce agent dostat z bodu A do bodu B, přičemž body jsou spojené hranou, může jet přímo. Avšak cestu z bodu A do bodu C – body nemají přímé propojení – je nutné zpracovat ve dvou krocích. Nejdříve cesta z bodu A do B a poté cesta z bodu B do C.

Obecně agent k pohybu tedy potřebuje startovní, cílový bod úseku a hranu propojující body. Tyto informace zjistíme z dříve stanovené posloupnosti vrcholů v cestě agenta. Startovním bodem je současný vrchol a cílovým bodem je vždy první ze zbývajících vrcholů v agentově cestě. Hranu propojující tyto vrcholy zjistíme díky pravidlu pro pojmenovávání hran pouze spojením názvu zjištěných vrcholů.

4.5 Vstupní data

V rámci vytvářeného modelu byla očekávána jako optimální vstupní data, informace o zdrojích a cílech dopravní poptávky ve sledované síti a časové rozložení intenzity této

4.5.1 Příprava dat

Z důvodu nedostupnosti dat jsem se po konzultaci s vedoucím práce rozhodl věnovat značnou pozornost přípravě náhradních vstupních údajů pro model, přičemž ta spočívá v úpravě informací získaných z kartogramu i křivky za účelem alespoň je přiblížit do podoby modelem požadovaných vstupních dat.

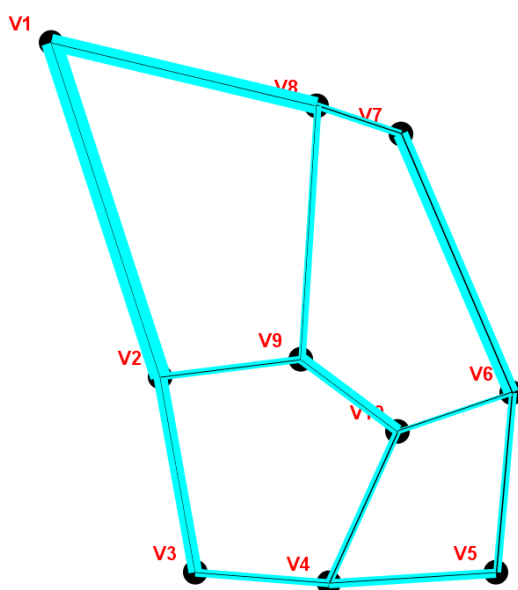
Křivku zpoždění MHD je nejprve nutné využitím optimalizační funkce výškově usadit – plocha pod křivkou se rovná celkovému počtu aut, která projedou sledovanou sítí za jeden den. Je tedy nutné najít patřičný koeficient, kterým když se vynásobí a sečtou všechny hodnoty osy y dané křivky v minutových intervalech (osy x), tak dostaneme požadovaný počet automobilů. K tomu je využita optimalizační funkce v AnyLogicu, jež po provedení pětiset iterací najde požadovanou konstantu. Poté při běhu modelu je možné výpočtem plochy pod křivkou odvodit přibližnou intenzitu dopravy v čase.

Co se týče kartogramu, z něj není možné získat přesné informace o zdrojích a cílech dopravní poptávky, je ovšem možné, za předpokladu znalosti všech existujících tras v grafu (silniční síti) a využití optimalizační funkce – tentokrát v MS Excel – zjistit, kolik aut by mělo po každé trase projet za 24 hodin. Princip je následující: po otevření úvodního dialogového okna, při spuštění modelu jsou volbou „Vytvoř model“ načtena data o modelu, je zkonstruována jeho základní struktura a jsou vygenerovány všechny existující trasy v silniční síti, přičemž ty jsou ve formě matic sousedností uloženy do externího excelovského souboru. Do tohoto souboru jsou také zapsána data z kartogramu – kolik aut projede po každé silnici během dne – a je vytvořeno propojení těchto zmíněných dat vzorci tak, že další matice sousednosti ukazuje počty aut, která projedou po každém ze silničních úseků při určitém využití jednotlivých tras. V horní části souboru je poté buňka, jež sumarizuje rozdíly mezi skutečnými počty průjezdů (z kartogramu) a počty průjezdů po jednotlivých úsecích při vypočítaném zatížení existujících tras v síti. Následně je nutné se přepnout do tohoto souboru a provést samotný optimalizační výpočet – funkcí „ŘEŠITEL“ – který najde takové hodnoty zatížení tras, aby odchylka mezi skutečným zatížením a vypočítaným byla minimální. Vypočítaná data jsou následně načtena do modelu v AnyLogicu, kde jsou společně s přibližným časovým rozložením z křivky využita pro generování agentů.

Výsledné údaje složené z obou optimalizačních funkcí nejsou sice zcela přesné – poskytované údaje, např. kolik aut má projet po dané trase během jednoho dne jsou rovnoměrně rozloženy do celého dne i když ve skutečnosti tomu tak není – ale z důvodu potřeby alespoň zástupných dat pro model jsou dostačující.

4.6 Vizualizace modelu

Značnou roli při interpretaci výsledků hraje vizuální výstup modelu. Zásadním je zde graf silniční sítě. Ten je vykreslen na základě vstupních dat o komunikační síti během spuštění modelu. Jeho základní funkcí při simulačním běhu je zobrazovat aktuální vytížení jednotlivých hran v čase. Vytížení je zobrazováno barevným rozšířením dané hrany na jedné z jejích stran – určuje se podle směru jízdy. Vizualizaci zatížení hran je možné najít na Obrázku 11. Zobrazení aktuálního obsazení úseku silniční sítě je kromě vizuální reprezentace možné najít ve výpisu v pravé části.

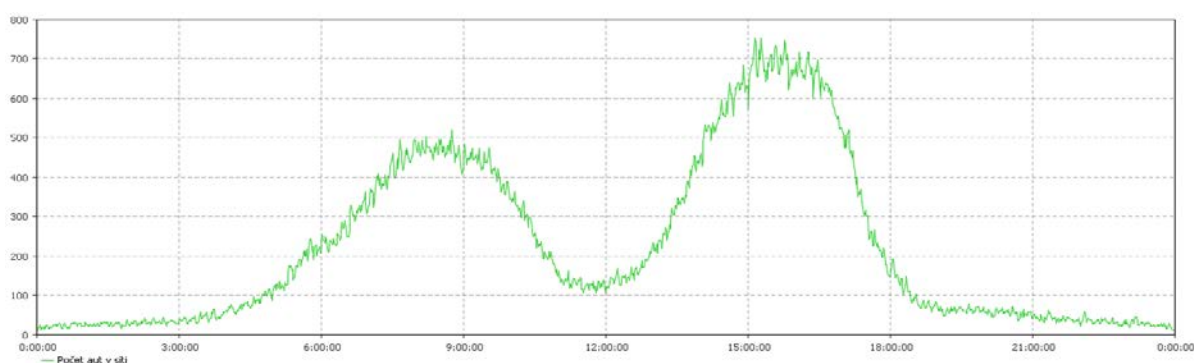


Obrázek 11: Vizualizace zatížení dopravní sítě

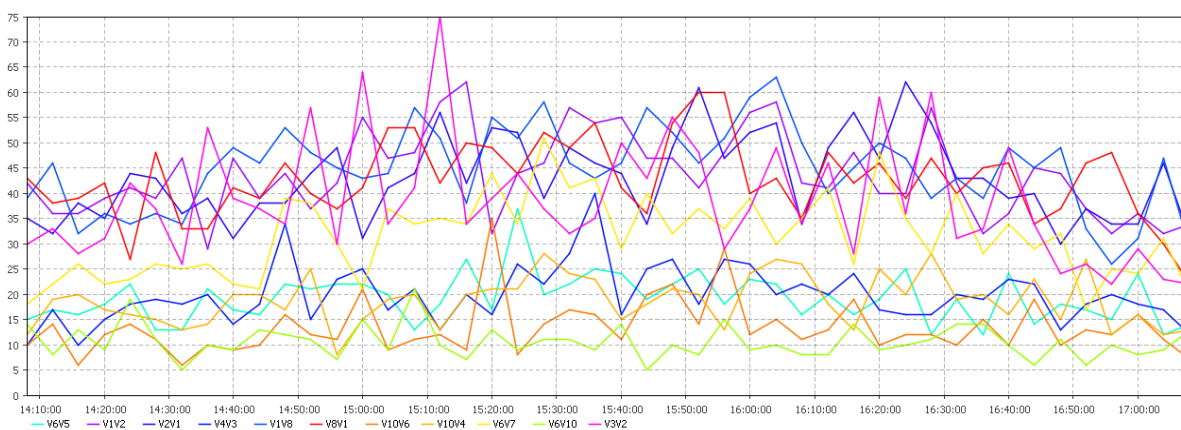
Dále je možné ve spodní části obrazovky najít tři grafy. První z grafů zobrazuje celkové vytížení silniční sítě v průběhu jednoho dne. Na něm je možné identifikovat dopravní špičky ve zkoumané síti komunikací. Druhý z grafů zobrazuje aktuální vytížení jednotlivých hran za uplynulé tři hodiny. Třetí graf také zobrazuje aktuální vytížení hrany, ovšem pro lepší přehlednost v procentech – podle procentuálního zatížení a tabulky přepočtů rychlosti

(viz Příloha 4) se nechá lehce určit rychlost na silničních úsecích zanesených v grafu. Druhý a třetí graf byly přidány zejména z důvodu vizualizace v rozdílu zatížení jednotlivých hran během experimentů s modelem. Grafy je možné pomocí ovládacích prvků, zaškrtnutých políček, umístěných ve spodní části upravovat během simulace, tak aby zobrazovaly údaje o právě sledovaných hranách. Ukázky grafů jsou na Obrázcích 12, 13 a 14.

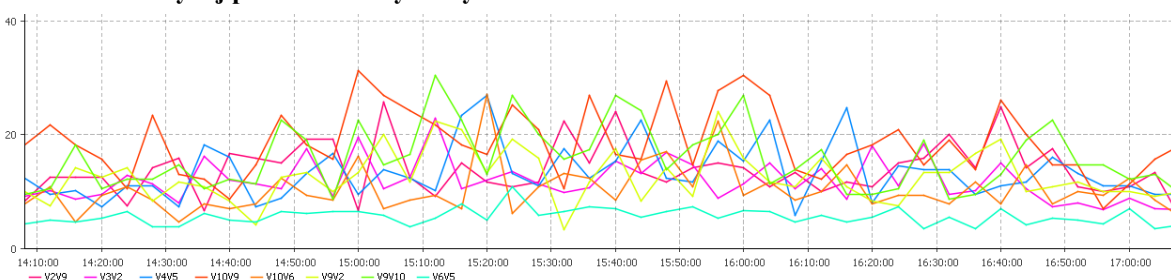
Pro orientaci v čase simulace jsou napravo od grafu zobrazeny hodiny ukazující skutečný čas. V rámci simulace je reálný čas základním nastavením urychlen tak, že za jednu sekundu simulačního času uběhne v modelu jedna minuta reálného času.



Obrázek 12: Graf znázorňuje vývoj počtu dopravních prostředků v silniční síti za dobu 24h



Obrázek 13: Vývoj počtu aut na vybraných úsecích v tříhodinovém náhledu



Obrázek 14: Procentuální zatížení vybraných úseků v tříhodinovém náhledu

4.7 Verifikace a validace modelu

Jak bylo v konceptuálním modelu řečeno, důležité je samotné vytvoření prostředí, v němž se auta (agenti) budou pohybovat. Toho je v počítačovém modelu dosaženo načtením potřebných dat z Excelu a následnou konstrukcí grafu (silniční sítě) nad těmito daty. Současně s vytvořením grafu jsou nastaveny parametry jednotlivých komunikací. Agenti vytváření v počítačovém modelu jsou schopni, díky striktně stanoveným vlastnostem a pravidlům chování, cíleného pohybu v grafu ze startovního do cílového bodu. Díky čemuž povahově odpovídají dopravním prostředkům popsaným v konceptuálním modelu. Lze tedy vyvodit, že verifikace modelu vůči pojmovému modelu proběhla úspěšně.

Validování modelu probíhalo porovnáním výstupních údajů modelu o celkovém zatížení jednotlivých hran grafu za 24 hodin a sumě agentů, kteří se během celého dne objevili v grafu, oproti informacím stejného charakteru získaným z kartogramu zatížení silniční sítě. Z důvodu použití vestavěné funkce AnyLogicu, využívající Poissonovského rozdělení, pro generování agentů, se data generovaná modelem po každém simulačním běhu drobně liší. Proto bylo provedeno několik simulačních běhů a porovnání jejich výsledků oproti údajům z kartogramu. Průměrná odchylka výsledků modelu se pohybovala od 2,9% do 4,7%. Validaci z tohoto důvodu hodnotím jako úspěšnou.

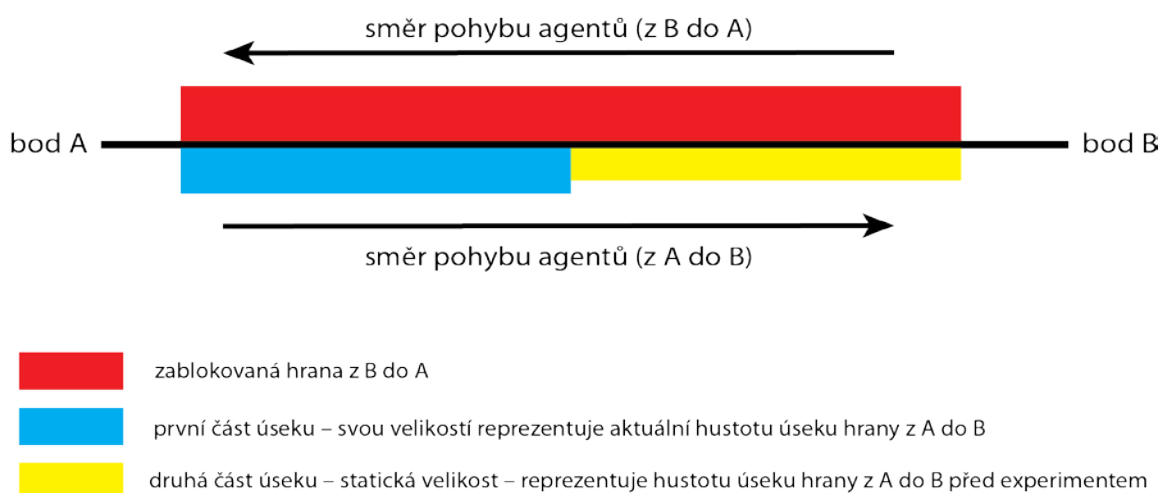
5 Experimenty

Jak již bylo dříve v textu zmíněno, simulační modely se vytvářejí za účelem lépe pochopit, či prozkoumat vlastnosti zkoumaného objektu (sytému) bez nutnosti mít daný systém fyzicky k dispozici. Toto bádání se provádí pomocí experimentů – často na bázi „what-if“. V případě modelu vytvářeného v této práci je možnost simulace ještě cennější, protože i když je reálná silniční síť fyziky k dispozici, zkoumat dopravní tok přímými zásahy do její struktury z věcného hlediska není možné.

Experimenty prováděné v této práci si kladou za cíl zkoumat změny v dopravním toku sítí, které jsou následkem neočekávaných změn v organizaci sítě komunikací. Jelikož v základním nastavení modelu se výstupy (např. počet průjezdů po jedné hraně) jednotlivých simulačních běhů navzájem liší – je potřeba provést každý experiment vícekrát po sobě a pozorovat rozdíly mezi výsledky.

5.1 Vizuální znázornění experimentu v grafu silniční sítě

Aby byl dostatečně zvýrazněn průběh experimentu, zpravidla blokace silničního úseku, je využito barevného oddělení. v běžném stavu je hustota silničního úseku zobrazena pouze jednobarevným rozšířením hrany, ovšem v rámci probíhajícího experimentu je hrana v každém směru rozdělena do dvou nezávislých barevně oddělených úseků. První část – směrem z počátečního bodu do koncového bodu daného úseku (= podle silničních pravidel vždy pravá strana hrany) – zůstává stále proměnlivá, aby reprezentovala hustotu na hraně. Druhá část grafické vizualizace počtu aut na silničním úseku změní s počátkem experimentu barvu a do jeho konce zůstane statická. Což poskytuje možnost porovnávat změny v hustotě jednotlivých úseků před a během experimentu. Blokace nějaké hrany v rámci experimentu se zobrazuje výrazným červeným vyznačením daného úseku. Uvedené způsoby vizualizace experimentu je i s popiskem zobrazena na Obrázku 15.



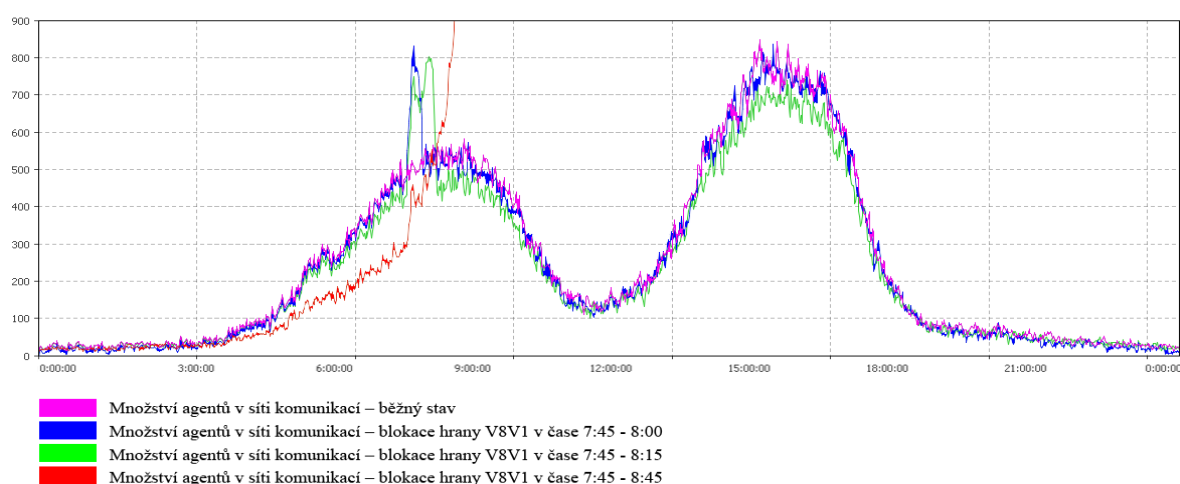
Obrázek 15: Vizualizace silničního úseku při experimentu

5.2 Experiment 1

Experiment spočívá v pozorování změny dopravního toku při uzavření úseku silniční sítě z V8 do V1 (vzhledem k dennímu zatížení – důležitý úsek). Dále prověření dostatečné kapacity okolních úseků, jež budou muset pojmout dopravní zatížení blokované hrany.

Blokace úseku byla provedena ve třech různě dlouhých časových úsecích – 15min, 30min a 60min – během ranní dopravní špičky, přičemž začínala vždy v čase 7:45 (reálného času). Experiment s každým časovým úsekem byl pokaždé zopakován třikrát pro ověření jeho výsledků (zejména z důvodu přítomnosti náhodné složky v běhu modelu).

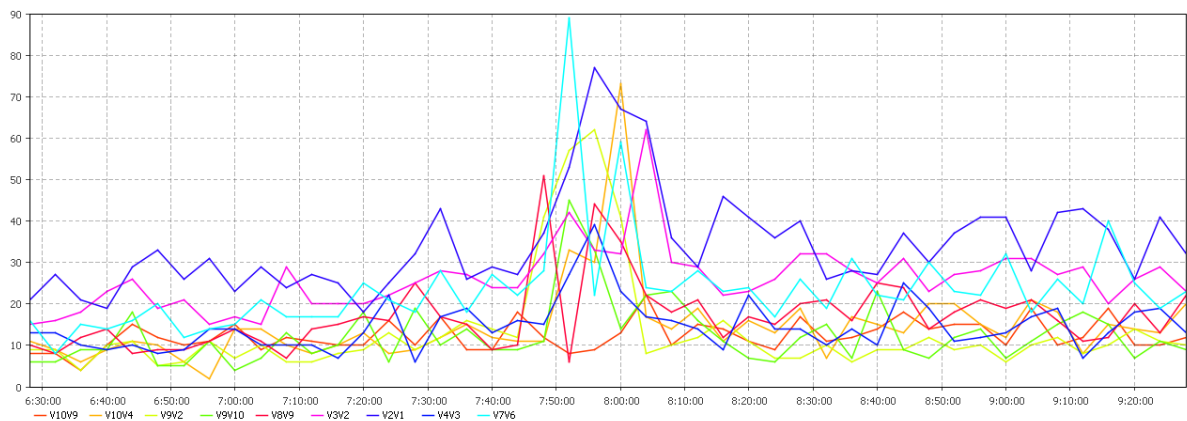
Jak je možné vidět v na Obrázku 16, blokace zmíněného úseku po dobu 15 min vede pouze k dočasnému nárůstu počtu vozidel v dopravní síti – to lze vysvětlit delší dobou potřebnou pro dojezd do cíle, než by trvala cesta původní trasou – a po uplynutí doby uzavření úseku se provoz rychle vrátí do běžného stavu. Uzavření úseku po dobu 30 min vede k podobným důsledkům, pouze s vyšším nárůstem počtu vozidel. Problémem by se stalo uzavření spoje na jednohodinový úsek. V tom případě dochází k velmi výraznému nárůstu počtu vozidel v celé síti i vozidel čekajících na vstup do sítě komunikací. Tento stav má za následek výrazné přetížení sítě a následný kolaps.



Obrázek 16: Porovnání vývoje objemu dopravy v silniční síti při různě dlouhé blokadě hrany V8V1 (osa x – čas, osa y – počet dopravních prostředků v silniční síti)

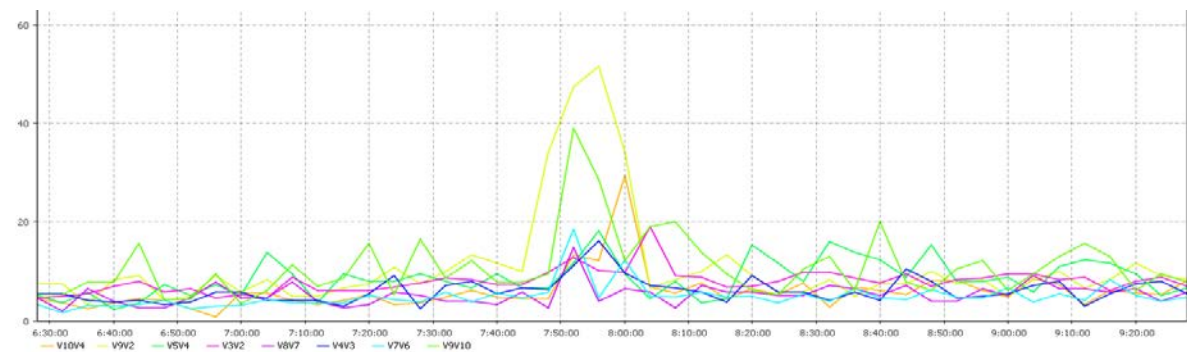
Další grafy se věnují jednotlivým časovým úsekům blokace. Z těchto grafů lze vyčíst, že v případě 15 minutové uzavírky dochází k nárůstu počtu aut zejména na hranách: V2V1, V7V6, V9V2, V10V4, V3V2, V9V10, V8V9, V10V9 a V4V3, viz Obrázek 17. K výrazné změně procentuálního obsazení dochází na hranách V9V10, V10V4 – 30-40% tzn. průměrná rychlost 26-16 km/h – nejvýraznější nárůst pak hrana V9V2 kde hustota dosahuje 50%, tedy průměrné rychlosti asi 11 km/h. Zachyceno na Obrázku 18.

Obdobně u 30 minutové uzavírky, kde dochází k nárůstu počtu aut zejména na hranách: V10V9, V10V4 a V2V1 nejvýrazněji na hranách V3V2, V8V1 a V9V2. V procentuálním zatížení se V8V1, V10V9, V9V10, V10V6 a V10V4 pohybují v rozmezí 30-50% hustoty což znamená průměrnou rychlost 25-11 km/h, V3V2 65-70% tedy 5-6 km/h a hrana V9V2 dosahuje téměř 100% hustoty, tedy kolona s rychlostí 0-0,5 km/h, zachyceno na Obrázek 19.



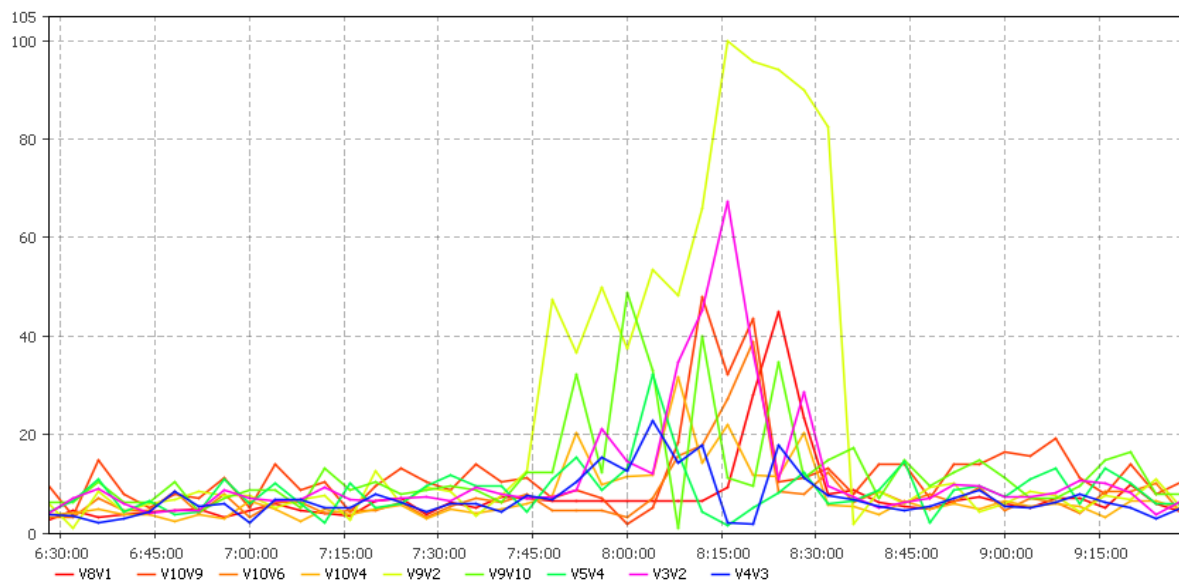
Obrázek 17: Počet aut na vybraných hranách při blokaci V8V1 v čase 7:45 - 8:00

(osa x – čas, osa y – počet dopravních prostředků na daném silničním úseku)



Obrázek 18: Procentuální obsazení vybraných hran při blokaci V8V1 v čase 7:45 - 8:00

(osa x – čas, osa y – procenta obsazení silničního úseku)



Obrázek 19: Procentuální obsazení vybraných hran při blokaci V8V1 v čase 7:45 - 8:15

(osa x – čas, osa y – procenta obsazení silničního úseku)

U hodinového zastavení provozu hrany V8V1 dochází k postupnému zahlcení více než 12 úseků grafu a následnému kolapsu dopravního systému. Z dat tabulky počtu průjezdů (viz Příloha 1) je jasně čitelné, že v silniční síti došlo ke kolapsu dopravy a automobily na vstupu do modelované silniční sítě raději volili nějakou náhradní trasu, jež není zanesena v modelu. Tento fakt dokládá i výrazný pokles počtu průjezdů v síti.

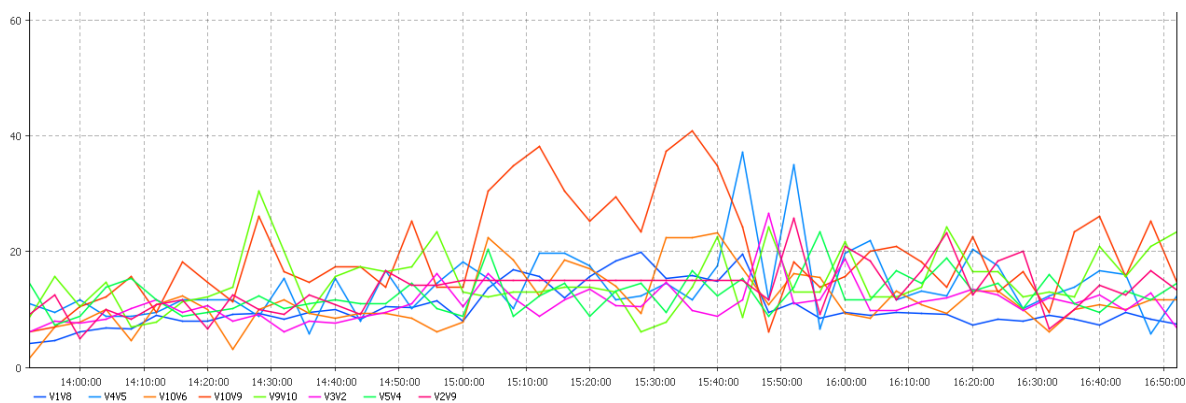
Výsledky všech simulačních běhů tohoto experimentu dokládají možnost identifikovat hrany s vyšší hustotou během zatížení = náhradní trasy, jež volí agenti. Druhou částí experimentu bylo prověření dostatečné kapacity ostatních úseků na pojmutí objemu, který běžné přísluší uzavřené hraně. V případě 15 minutového výpadku síť neměla problém dodatečný objem pojmout, začínající problémy již naznačoval graf procentuálních zatížení hran při 30min blokaci, ale síť se nakonec vždy stabilizovala. Problémem by se stala pouze hodinová blokáce, která vždy vedla ke kolapsu. Další grafy a tabulky týkající se tohoto experimentu lze nalézt v Příloze 1.

5.3 Experiment 2

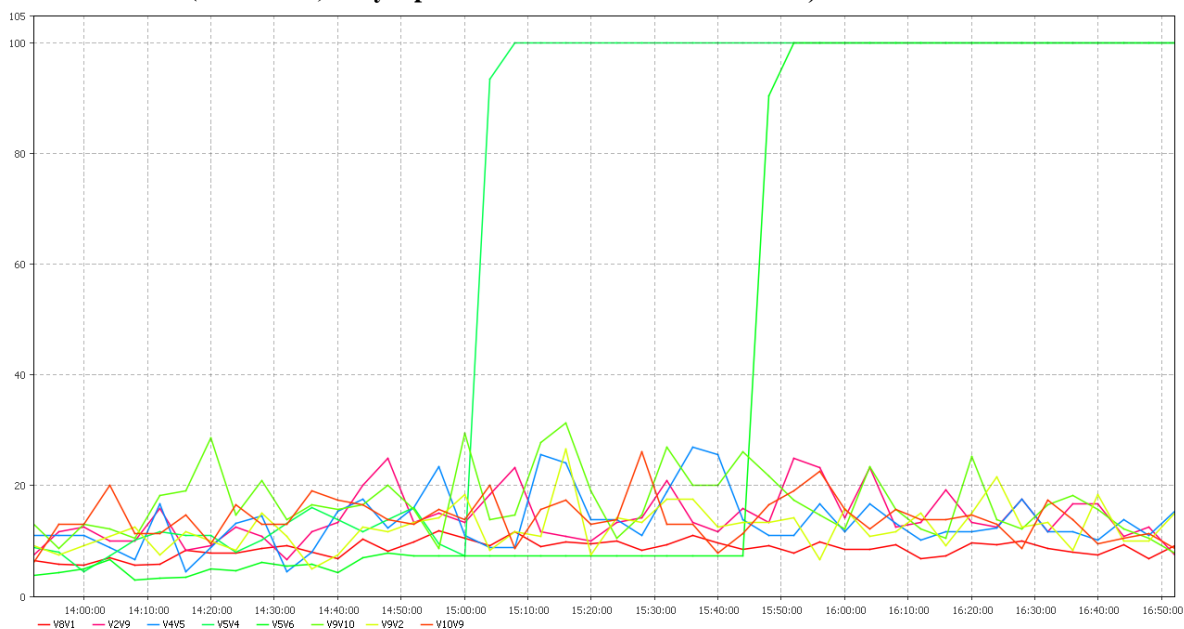
Předmětem zkoumání druhého experimentu se stalo prověření rezervní kapacity silniční sítě v odpolední dopravní špičce. K tomuto účelu bylo vybráno několik úseků silniční sítě, které byly v nezávislých simulačních bězích postupně úplně uzavřeny po dobu 45 minut (představme si to například jako rozsáhlejší dopravní nehodu, kvůli které je nutné dočasně uzavřít jeden směr dané komunikace).

Uzavírka každého úseku byla opět pro ověření výsledků simulována vždy třikrát, přičemž konkrétně probíhala v rozmezí 15:00 – 15:45.

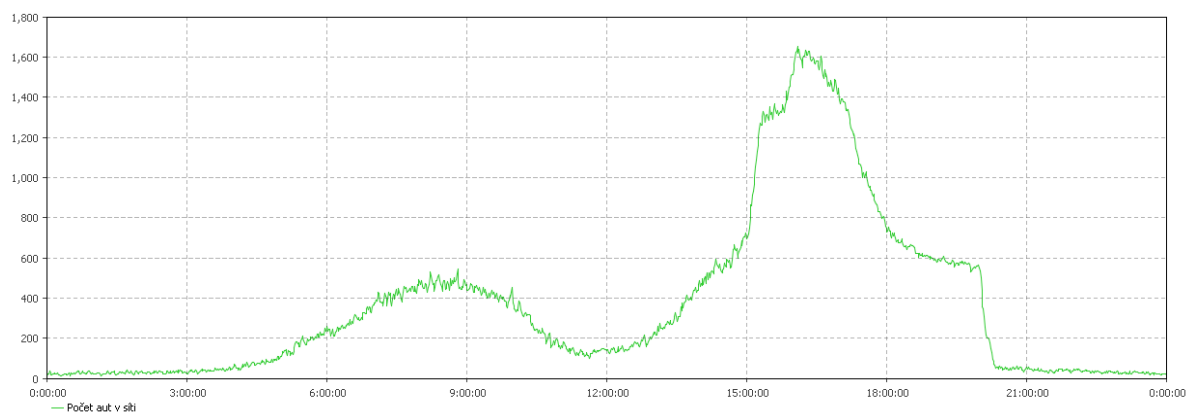
Blokace hrany V2V9. Pohled na grafy naznačuje, že dopravní tok se přesunul zejména na hrany V1V8 a V10V9, přičemž pouze druhá z uvedených zaznamenala výrazný nárůst v procentuálním obsazení, viz Obrázek 20. Závěrem, jež potvrdily další sim. běhy, je zajímavé zjištění, a to že uzavření této hrany nezpůsobí z pohledu celé sítě žádné problémy.



Obrázek 20: Procentuální obsazení vybraných hran při blokaci V2V9 v čase 15:00 - 15:45
(osa x – čas, osa y – procenta obsazení silničního úseku)



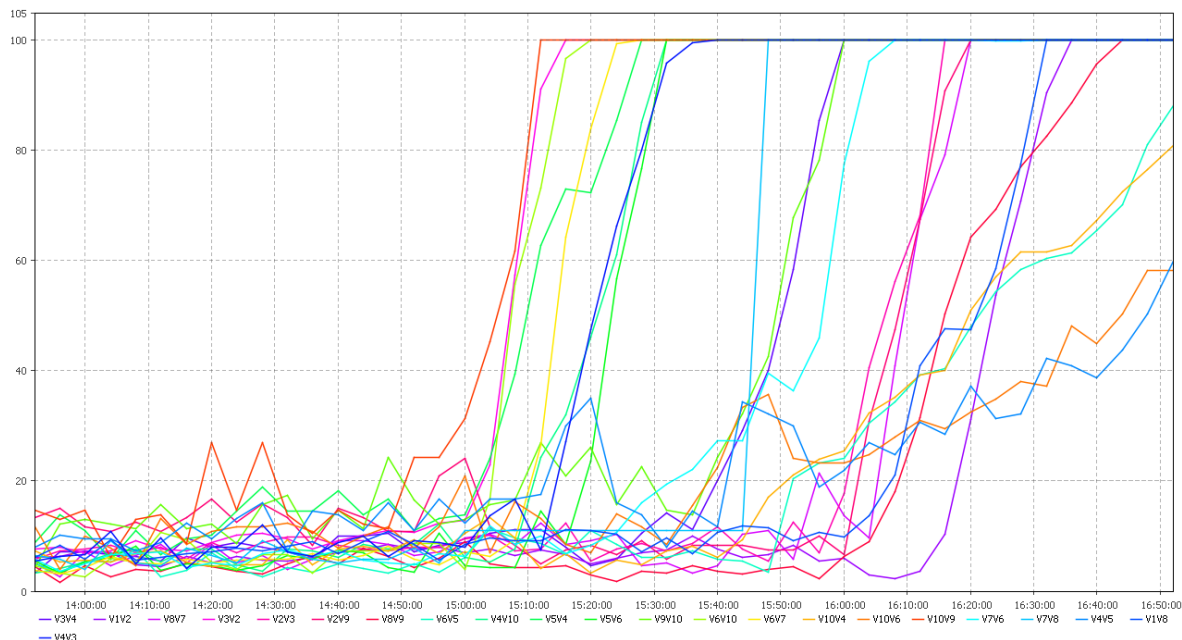
Obrázek 21: Procentuální obsazení vybraných hran při blokaci V5V6 v čase 15:00 - 15:45
(osa x – čas, osa y – procenta obsazení silničního úseku)



Obrázek 22: Vývoj objemu dopravy za 24h, při blokaci V5V6 v čase 15:00 - 15:45
(osa x – čas, osa y – počet dopravních prostředků v silniční síti)

Blokovaná hrana V5V6. Jak ukazuje Obrázek 21, v době blokování této hrany dojde k výraznému nárůstu počtu vozidel v systému. Grafy počtů aut na hranách i procentuální obsazení totožně ukazují, že během blokace se veškerý provoz z V5 snaží pojmout V5V4, což vede k jejímu úplnému zahlcení a po otevření V5V6 ani ta nezvládá nápor kolon, jež chtějí bodem projet. To má za následek lokální zahlcení sítě a nemožnost do ní vstoupit prostřednictvím V5, s čímž se síť vypořádává přibližně do 20:00, viz Obrázek 22. Důsledkem je snížení celkového počtu vozidel, která projedou systémem za celý den, o vozidla volící jinou cestu (nezanesenou v modelu) z důvodu nemožnosti vstupu přes V5. Závěr – blokace způsobí lokální paralýzu systému, zbytek sítě však neovlivní.

V případě hran V7V8, V4V3, V10V9 a V2V1 mělo simulované uzavření vždy fatální následky pro celý systém. Docházelo k postupnému úplnému zahlcení většiny úseků grafu a v důsledku k úplnému kolapsu systému – auta ve vstupních bodech se z tohoto důvodu vyhýbají vstupu do systému (volí cestu nezaneseným okolím systému). Grafy počtu aut v síti i procentuálního zatížení jsou při blokaci těchto hran téměř totožné, ukázka je na Obrázku 23.



Obrázek 23: Procentuální obsazení vybraných hran při blokaci V7V8 v čase 15:00 - 15:45 (osa x – čas, osa y – procenta obsazení silničního úseku)

Další doplňující grafy, stejně tak jako tabulky celkového vytížení hran za 24hod jsou přiloženy v Příloze 2.

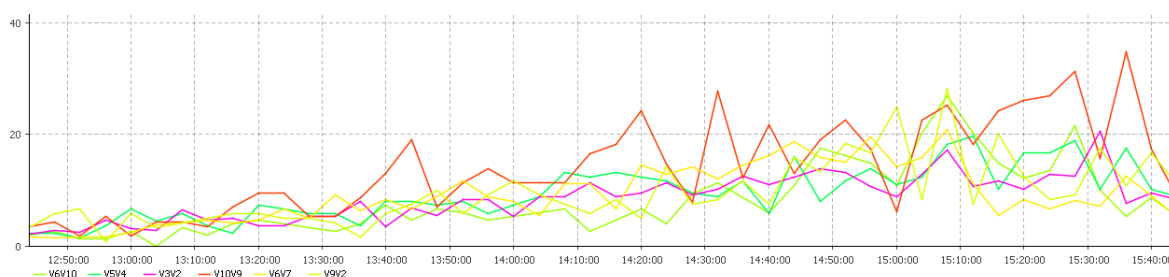
Celkově po provedení všech simulačních běhů můžeme usuzovat, že v době odpolední dopravní špičky silniční systém již nemá dostatečné rezervní kapacity a uzavření některého z úseků povede s největší pravděpodobností k částečnému či úplnému kolapsu systému.

5.4 Experiment 3

Tento experiment si klade za cíl simulovat částečné uzavření některých náhodně vybraných úseků komunikací a v souvislosti s tím zkoumat změnu dopravního toku sítí i prověření dostatečné rezervní kapacity. Tyto stavy si lze představit jako drobnější dopravní nehodu zabírající část vozovky v jednom směru a trvání odpovídající jejímu vyšetření a odstranění.

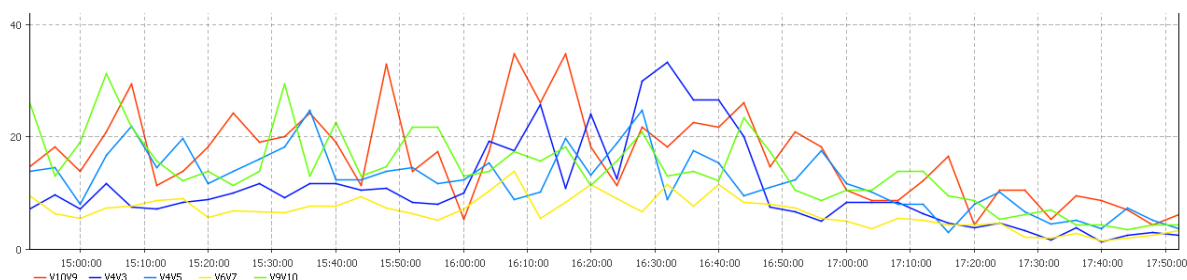
Nejdříve byly u čtyř hran provedeny omezení provozu na 50% původní maximální hustoty, čemuž následovala kombinace dopravního omezení tak, že se navzájem časově prolínali.

Omezení na hraně V6V7 probíhalo v čase 13:00 – 15:10. Toto omezení mělo za následek pouze lehce zvýšený počet aut na hranách V2V1, V3V2, V4V3, V5V4, V4V10, V10V9 a V9V8 což naznačuje směr odlivu dopravního toku. Časové vymezení omezení hrany V6V10 bylo 14:40 – 15:30. I zde lze vysledovat odliv dopravy na hrany V2V1, V3V2, V4V10, V5V4, V9V8 a V10V9. Provedením obou zmíněných při jednom simulačním běhu vytvoříme jakousi návaznost, kdy omezení V6V7 způsobí zvýšení dopravního toku po V6V10 a v jeho důsledku vzniká další omezení („nehoda“). Za tohoto stavu lze pozorovat úbytek dopravy v určitých úsecích, jež je vyrovnáván zejména hranami V2V1, V2V3, V4V10, V5V4, V9V8 a V10V9, přičemž nárůst v procentuálním zatížení zaznamenají pouze V10V9, V6V10, V5V4, V6V7 a V9V2, viz Obrázek 24. Celkově lze tedy konstatovat, že ani kombinace těchto drobných omezení nezpůsobí žádné výrazné problémy v komunikační síti.



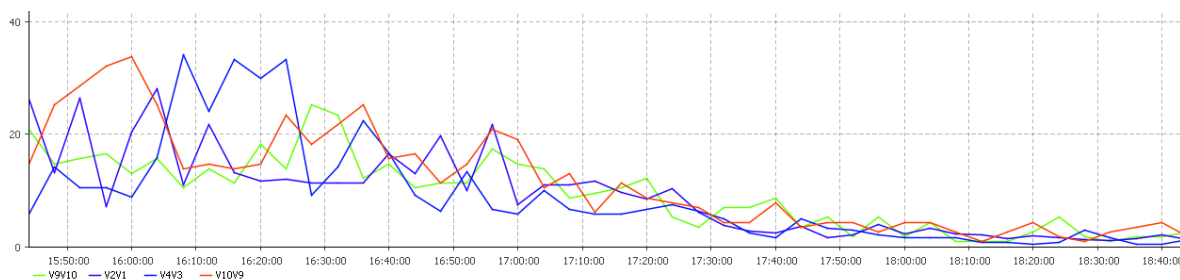
Obrázek 24: Procentuální obsazení vybraných hran při omezení V6V7 (13:00 - 15:10) a V6V10 (14:40 - 15:30), (osa x – čas, osa y – procenta obsazení silničního úseku)

Další zamýšlenou dvojicí hran k omezení provozu byla V3V2 a V2V1. Tento úmysl byl přehodnocen vzhledem k tomu, že omezení provozu ve zvoleném časovém úseku 16:00 – 16:45 na hraně V3V2 vedlo k zahlcení silniční sítě (potvrzuje závěr Experiment 2). V3V2 byla nahrazena úsekem V4V3. Omezením této hrany došlo k nárůstu provozu na hranách V6V7, V10V9 a V5V6 přičemž k výraznému nárůstu procentuálního zatížení došlo na hranách V10V9 a V4V3, viz Obrázek 25. V celodenním srovnání však rostl objem dopravy na V2V9, V4V10, V9V2 a V9V8. Částečná uzavírka na úseku V2V1 probíhala 16:30 – 18:30. Sledování zvýšení provozu na některých komunikacích bylo v tomto případě velice komplikované, protože čas odpovídá končící odpolední špičce a tak provoz obecně má klesající trend. Z celodenního srovnání lze vyčíst zvýšení provozu V9V8, V7V8, V8V1, V6V7, V4V10, V2V9 a V5V6 to ale nemusí být odpovídající pro náš časový úsek.



Obrázek 25: Procentuální obsazení vybraných hran při omezení V4V3 v čase 16:00 - 16:45 (osa x – čas, osa y – procenta obsazení silničního úseku)

Provedením blokáží V4V3 a V2V1 v jednom simulačním běhu zjistíme, kromě změn v dopravním toku, zda se události na obou úsecích navzájem ovlivňují, přičemž podle předchozích výsledků víme, že pokud jsou omezení na těchto úsecích simulována zvlášť, nemají vliv na druhý z úseků – nedochází k žádným změnám v počtu průjezdů na neblokovaných hranách. Pozorování opět není zcela jednoznačně kvůli obecně klesajícímu trendu, ale do určité míry se nechají vyzorovat nárůsty provozu na V9V2, V6V7, V4V3 a V7V6. Procentuální zatížení výrazně vzrostlo jen na V4V3, drobně vzrůstalo i na V9V10 a V10V9, viz Obrázek 26. Z celodenního pohledu nejvíce suplovali snížené možnosti omezených hran zejména V4V10, V5V6, V6V7, V7V8, V8V1 a V9V8. Jelikož oproti výsledkům oddělených omezení provozu nedocházelo k žádným výrazným rozdílům a nárůstům provozu u blokováných úseků ani v jiné části sítě – grafy zachycují změny v provozu u stejných hran – lze usuzovat, že tato dvě omezení se neovlivňují.



Obrázek 26: Procentuální obsazení vybraných hran při omezení V2V1 (16:30 - 18:30) a V4V3 (16:00 - 16:45), (osa x – čas, osa y – procenta obsazení silničního úseku)

Doplňující grafy zobrazující počet aut i procentuální obsazení úseků, stejně tak jako tabulky celkového vytížení hran za 24hod jsou přiloženy v Příloze 3.

Simulační běhy provedené v rámci tohoto experimentu dokazují, že lze při pečlivém porovnání všech výsledků analyzovat, jak se změní dopravní tok v síti komunikací, při omezení provozu v různých částech sítě.

6 Závěr

V první části práce je čtenář seznámen s problematikou a základními teoretickými východisky práce. Jsou zde popsány obecné principy modelování a přístupy k simulaci. Také je zde popsán celkový proces tvorby simulační studie, z kterého se vychází v praktické části práce při tvorbě simulačního modelu dopravního toku v omezené síti komunikací.

Následuje část práce, která pojednává o některých specifikách tvorby modelů v oblasti dopravy. Součástí tohoto oddílu je i výčet některých, v současnosti používaných, nástrojů pro tvorbu dopravních modelů a simulaci, přičemž nejrozšířenější nástroje jsou podrobněji popsány.

Hlavním cílem práce bylo vytvoření simulačního modelu toku dopravy. Postup jeho tvorby popisuje třetí část práce. Z počátku je popsán konceptuální (pojmový) model, který specifikuje vytvářený model. Dále je zde popsána implementace prvků modelu (agentů) a prostředí, v němž jsou zasazeny do počítačové verze modelu. V rámci vytvořeného modelu bych vyzdvihl možnost snadné modifikace silniční sítě, jelikož ta je konstruována vždy při spuštění modelu a její vlastnosti záleží pouze na datech uložených v excelovském souboru (příložen k modelu), jež ji popisují. Další předností je interpretace simulačního běhu a jeho výsledků nezávislému pozorovateli, jelikož je možné při simulaci pozorovat jak vizualizaci současného objemu dopravy v síti komunikací v čase, tak několik grafů, jež popisují vývoj objemu dopravy a zatížení silničních úseků. V následující sekci se práce věnuje řešení problému dostupnosti reálných dat, jenž vynikl v průběhu zpracování práce. Tento problém byl úspěšně vyřešen získáním reálných dat částečně jiné povahy, než požaduje model a transformací získaných dat do podoby vyžadované modelem. Následuje část věnovaná verifikaci a validaci vytvořeného počítačového modelu.

Poslední část práce se věnuje zpracování a vyhodnocení navržených experimentů. Jsou zde popsány experimenty sledující změnu dopravního toku při různých zásazích do silniční sítě a experimenty zkoumající rezervní kapacitu sítě. Výsledek každého experimentu je detailně slovně popsán, přičemž všechny závěry jsou podloženy daty z patřičných simulačních běhů – grafy a tabulkové porovnání. Jak dokazují provedené experimenty, vytvořený model umožňuje při správně zvoleném experimentu zkoumat změnu toku v silniční síti, její kapacitu či celkové zatížení jednotlivých úseků.

Celkově lze říci, že práce splnila všechny ze svých stanovených cílů. Byl navržen a vytvořen počítačový simulační model dopravního toku v síti komunikací. Tento model byl úspěšně verifikován a validován vůči reálným datům a následně bylo provedeno několik experimentů s vytvořeným modelem. V současné podobě, odpovídající zadání, je model funkční, ovšem do budoucna vidím možnost v jeho rozšíření změnou úrovně abstrakce a zahrnutí více detailů. Zajímavé by jistě mohlo být rozšíření agentů tak, aby model postihoval dynamiku dopravního toku.

Použitá literatura

1. **Law, Averill M.** *Simulation modeling and analysis*. Boston [u.a.] : McGraw-Hill, 2007. 978-007-125519-6.
2. **Siebers, Peer-Olaf.** G54 SIM - Simulation for Computer Scientists: 2011/2012 (Autumn). *School of Computer Science, The University of Nottingham*. [Online] 5. 10 2011. [Citace: 1. 2 2013.] <http://www.cs.nott.ac.uk/~pos/g54sim/2011-2012/slides/G54SIM-Lec01%202011%20r01.pdf>.
3. **Shannon, Robert E.** *Introduction to the art and science of simulation*. [Online] 1998. [Citace: 15. 1 2013.] <http://www.informs-sim.org/wsc98papers/001.PDF>.
4. **Berka, Milan.** *Operační výzkum*. Brno : Vysoké učení technické, 1991. 80-214-0346-2.
5. **Pelánek, Radek.** *Modelování a simulace*. [Online] [Citace: 1. 2 2013.] <http://www.fi.muni.cz/~xpelaneK/IV109/slidy/modelovani.pdf>.
6. **Daněk, Jan.** *Využití simulace jako inženýrského nástroje*. [Online] [Citace: 5. 2 2013.] <http://www2.humusoft.cz/www/pub/witness/ppt/inovacia2002/index.htm>.
7. **Široký, Jaromír.** *Sylaby předmětu: Modelování a simulace v dopravě*. [Online] [Citace: 5. 2 2013.] http://homen.vsb.cz/~s1i95/MaSvD/masvd_ram.HTM.
8. **Sterman, John D.** *A Skeptic's Guide to Computer Models*. [Online] 1991. [Citace: 5. 2 2013.] http://web.mit.edu/jsterman/www/Skeptic's_Guide.pdf.
9. **Borshchev, Andrei.** *The Big Book Of AnyLogic. AnyLogic*. [Online] [Citace: 30. 12 2012.] <http://www.anylogic.com/the-big-book-of-anylogic>.
10. **Jelínek, Jiří.** *Výukové texty, předmět Modelování a simulace*. [Online] 2012. [Citace: 15. 12 2012.] <http://moodle.prf.jcu.cz/course/view.php?id=76>.
11. **Křivý, Ivan a Kindler, Evžen.** *Simulace a modelování*. [Online] 2011. [Citace: 18. 12 2012.] <http://prf.osu.cz/kip/dokumenty/Msm.pdf>.
12. **Dorda, Michal.** *Výukové texty předmětu Aplikace počítačů v provozu*. [Online] 14. 9 2010. [Citace: 10. 2 2013.] http://home1.vsb.cz/~dor028/Aplikace_PC.htm.
13. **Šalamon, Tomáš.** *Development of Agent-based Models for Economic Simulation*. Praha : VŠE-FIS, 2010. Disertační práce.
14. **Křivda, Vladislav a Škvain, Václav.** *Učební texty. Městské komunikace a křižovatky*. [Online] 2011. [Citace: 3. 1 2013.] <http://kds.vsb.cz/mkk/>.
15. **U.S. Department of Transportation.** *U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Traffic Analysis Tools by Category*. [Online] [Citace: 20. 3 2013.] http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysisstools/tat_vol2/sectapp_e.htm.

16. **Křivda, Vladislav.** Problematika homogenizace dopravního proudu v silniční dopravě. *Perner's contacts*. 2008, Sv. III, 3.
17. **Mička, Pavel.** Dijkstrův algoritmus. *Algoritmy.net*. [Online] [Citace: 3. 12 2012.] <http://www.algoritmy.net/article/5108/Dijkstruv-algoritmus>.
18. **M., Ross S.** *Simulation*. Boston : Elsevier Academic Press, 2006. 0-12-598063-9.
19. **Pelánek, Radek.** *Modelování a simulace komplexních systémů: jak lépe porozumět světu*. Brno : Masarykova univerzita, 2011. 978-80-210-5318-2.
20. **Demel, Jiří.** *Grafy a jejich aplikace*. Praha : Academia, 2002. 80-200-0990-6.
21. **Anylogic.** *Using AnyLogic Help System*. [Online] [Citace: 15. 12 2012.] <http://www.anylogic.com/anylogic/help/>.
22. **Schank, Jeff.** Agent-Based Modeling (ABM). *Agent-Based Models methodology and philosophy*. [Online] 2012. [Citace: 10. 3 2013.] <http://www.agent-based-models.com/blog/>.
23. **Macal, Charles M. a North, Michael J.** *Tutorial on Agent-Based Modeling and Simulation*. [Online] 2005. [Citace: 10. 1 2013.] <http://www.informs-sim.org/wsc05papers/002.pdf>.

Seznam obrázků

Obrázky v textové části

OBRÁZEK 1: ZPŮSOBY ZKOUMÁNÍ SYSTÉMŮ	2
OBRÁZEK 2: KOMPLEXNÍ DĚLENÍ MODELŮ S ČERVENĚ VYZNAČENOU LINÍÍ MODELU Z PRAKTICKÉ ČÁSTI	4
OBRÁZEK 3: SIMULAČNÍ PROCES.....	6
OBRÁZEK 4: HIERARCHIE MODELŮ PODLE DETAILU	10
OBRÁZEK 5: PROSTŘEDÍ PRODUKTU AIMSUN.....	12
OBRÁZEK 6: PROSTŘEDÍ PRODUKTU PTV VISUM.....	14
OBRÁZEK 7: ORIENTOVANÝ GRAF SILNIČNÍ SÍTĚ.....	19
OBRÁZEK 8: NÁVRH AGENTA V PROSTŘEDÍ ANYLOGIC	22
OBRÁZEK 9: DIAGRAM PRINCIPU FUNGOVÁNÍ AGENTA	23
OBRÁZEK 10: NÁHLED ZÍSKANÉHO KARTOGRAMU ZATÍŽENÍ SÍTĚ ZA DOBU 24H.....	26
OBRÁZEK 11: VIZUALIZACE ZATÍŽENÍ DOPRAVNÍ SÍTĚ	28
OBRÁZEK 12: GRAF ZNÁZORŇUJÍ VÝVOJ POČTU DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ V SILNIČNÍ SÍTI ZA DOBU 24H	29
OBRÁZEK 13: VÝVOJ POČTU AUT NA VYBRANÝCH ÚSECÍCH V TŘÍHODINOVÉM NÁHLEDU.....	29
OBRÁZEK 14: PROCENTUÁLNÍ ZATÍŽENÍ VYBRANÝCH ÚSEKŮ V TŘÍHODINOVÉM NÁHLEDU.....	29
OBRÁZEK 15: VIZUALIZACE SILNIČNÍHO ÚSEKU PŘI EXPERIMENTU.....	31
OBRÁZEK 16: POROVNÁNÍ VÝVOJŮ OBJEMU DOPRAVY V SILNIČNÍ SÍTI BLOKACI HRANY V8V1	32
OBRÁZEK 17: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI BLOKACI V8V1 V ČASE 7:45 - 8:00	33
OBRÁZEK 18: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI BLOKACI V8V1 V ČASE 7:45 - 8:00	33
OBRÁZEK 19: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI BLOKACI V8V1 V ČASE 7:45 - 8:15.....	33
OBRÁZEK 20: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI BLOKACI V2V9 V ČASE 15:00 - 15:45.....	35
OBRÁZEK 21: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI BLOKACI V5V6 V ČASE 15:00 - 15:45	35
OBRÁZEK 22: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI BLOKACI V5V6 V ČASE 15:00 - 15:45.....	35
OBRÁZEK 23: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI BLOKACI V7V8 V ČASE 15:00 - 15:45	36
OBRÁZEK 24: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI OMEZENÍ V6V7 (13:00 - 15:10) A V6V10 (14:40 - 15:30).....	37
OBRÁZEK 25: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI OMEZENÍ V4V3 V ČASE 16:00 - 16:45	38
OBRÁZEK 26: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI OMEZENÍ V2V1 (16:30 - 18:30) A V4V3 (16:00 - 16:45)	39

Obrázky v příloze

OBRÁZEK 27: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI BLOKACI V8V1 V ČASE 7:45 - 8:15	46
OBRÁZEK 28: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI BLOKACI V8V1 V ČASE 7:45 - 8:45	46
OBRÁZEK 29: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI BLOKACI V8V1 V ČASE 7:45 - 8:45	46
OBRÁZEK 30: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI BLOKACI V2V9 V ČASE 15:00 - 15:45	48
OBRÁZEK 31: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI BLOKACI V2V9.....	48
OBRÁZEK 32: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI BLOKACI V5V6 V ČASE 15:00 - 15:45	48
OBRÁZEK 33: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI BLOKACI V7V8 V ČASE 15:00 - 15:45	49
OBRÁZEK 34: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI BLOKACI V7V8.....	49
OBRÁZEK 35: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI BLOKACI V4V3 V ČASE 15:00 - 15:45	49
OBRÁZEK 36: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI BLOKACI V4V3 V ČASE 15:00 - 15:45	50
OBRÁZEK 37: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI BLOKACI V4V3.....	50
OBRÁZEK 38: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI BLOKACI V10V9 V ČASE 15:00 - 15:45	50
OBRÁZEK 39: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI BLOKACI V10V9 V ČASE 15:00 - 15:45	51
OBRÁZEK 40: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI BLOKACI V10V9.....	51

OBRÁZEK 41: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI BLOKACI V2V1 v ČASE 15:00 - 15:45.....	51
OBRÁZEK 42: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI BLOKACI V2V1 v ČASE 15:00 - 15:45	52
OBRÁZEK 43: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI BLOKACI V2V1.....	52
OBRÁZEK 44: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI OMEZENÍ V6V7 v ČASE 13:00 - 15:10.....	55
OBRÁZEK 45: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI OMEZENÍ V6V7 v ČASE 13:00 - 15:10	55
OBRÁZEK 46: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI OMEZENÍ V6V7.....	55
OBRÁZEK 47: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI OMEZENÍ V6V10 v ČASE 14:40 - 15:30.....	56
OBRÁZEK 48: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI OMEZENÍ V6V10 v ČASE 14:40 - 15:30	56
OBRÁZEK 49: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI OMEZENÍ V6V10.....	56
OBRÁZEK 50: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI OMEZENÍ V6V7 A V6V10	57
OBRÁZEK 51: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI OMEZENÍ V6V7 A V6V10	57
OBRÁZEK 52: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI OMEZENÍ V2V1 v ČASE 16:30 - 18:30.....	57
OBRÁZEK 53: PROCENTUÁLNÍ OBSAZENÍ VYBRANÝCH HRAN PŘI OMEZENÍ V2V1 v ČASE 16:30 - 18:30	58
OBRÁZEK 54: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI OMEZENÍ V2V1.....	58
OBRÁZEK 55: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI OMEZENÍ V4V3 v ČASE 16:00 - 16:45.....	58
OBRÁZEK 56: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI OMEZENÍ V4V3.....	59
OBRÁZEK 57: POČET AUT NA VYBRANÝCH HRANÁCH PŘI OMEZENÍ V2V1 A V4V3	59
OBRÁZEK 58: VÝVOJ OBJEMU DOPRAVY ZA 24H, PŘI OMEZENÍ V2V1 A V4V3.....	59

Seznam tabulek

Tabulky v textové části

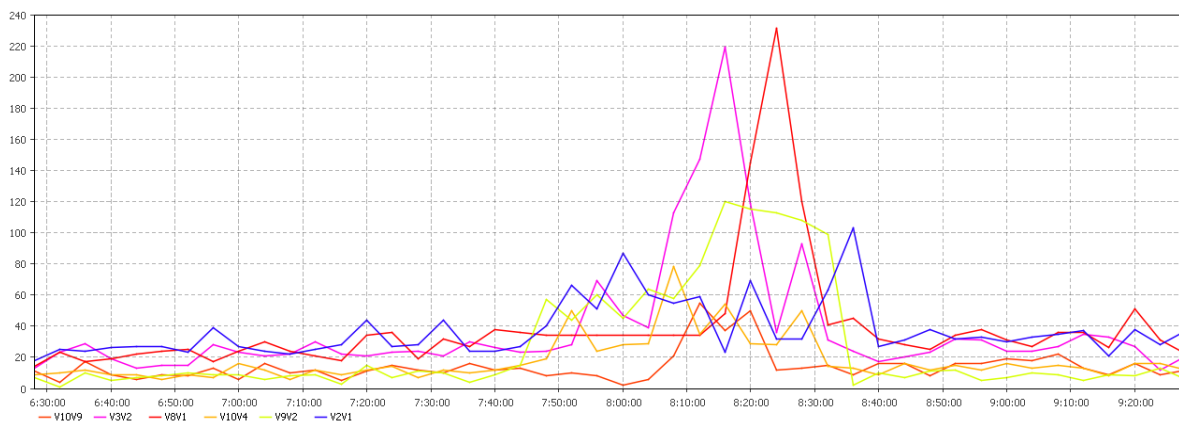
TABULKA 1: NĚKTERÉ NÁSTROJE POUŽÍVANÉ PRO SIMULACI DOPRAVNÍHO SYSTÉMU	15
---	----

Tabulky v příloze

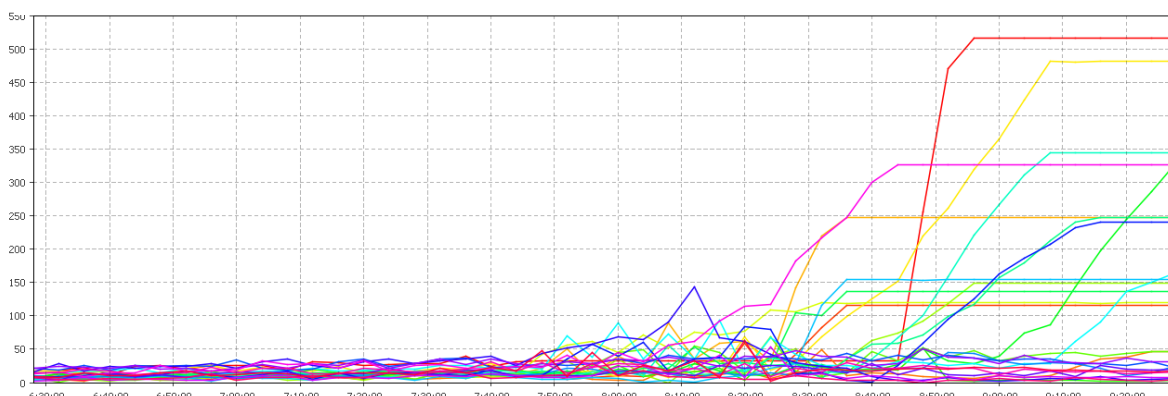
TABULKA 1: POČET PRŮJEZDŮ PO HRANÁCH ZA JEDEN DEN, PŘI TŘECH ČASECH BLOKACE HRANY V8V1	47
TABULKA 2: POČET PRŮJEZDŮ PO HRANÁCH ZA JEDEN DEN, PŘI BLOKACI HRAN V2V9, V7V8 A V4V3.....	53
TABULKA 3: POČET PRŮJEZDŮ PO HRANÁCH ZA JEDEN DEN, PŘI BLOKACI HRAN V5V6, V10V9 A V2V1	54
TABULKA 4: POČET PRŮJEZDŮ PO HRANÁCH ZA JEDEN DEN, OMEZENÍ HRAN V6V7 A V6V10.....	60
TABULKA 5: POČET PRŮJEZDŮ PO HRANÁCH ZA JEDEN DEN, OMEZENÍ HRAN V2V1 A V4V3	61
TABULKA 6: RYCHLOSTI PRO DANÉ HODNOTY OBSAZENÍ HRANY V1V2.	62

1 Příloha 1 – data Experiment 1

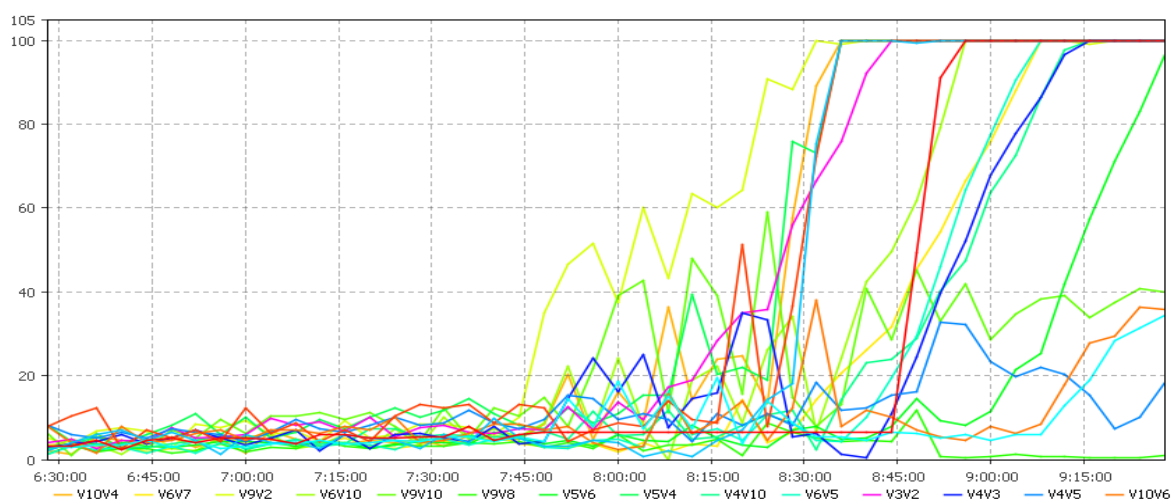
Doplňkové obrázky a tabulky k 5.2 Experiment 1. Na ose x všech grafů je vždy čas, osa y se liší podle typu grafu.



Obrázek 27: Počet aut na vybraných hranách při blokaci V8V1 v čase 7:45 - 8:15 (osa y – počet aut)



Obrázek 28: Počet aut na vybraných hranách při blokaci V8V1 v čase 7:45 - 8:45 (osa y – počet aut)



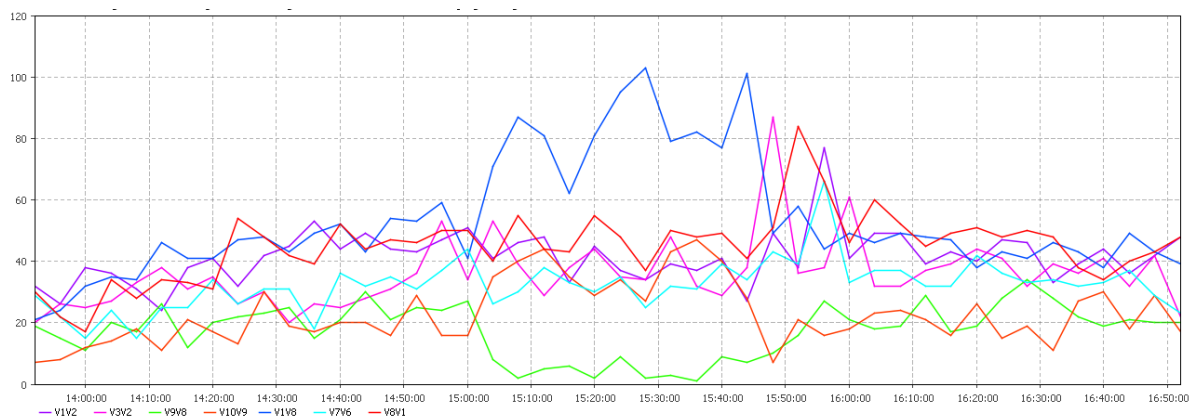
Obrázek 29: Procentuální obsazení vybraných hran při blokaci V8V1 v čase 7:45 - 8:45 (osa y – procenta)

Název hrany	Počet průjezdů za 24 hodin															Průměrné rozdíly
	Běžné průjezdy	Blokače 7:45 - 8:00			Průměrné rozdíly	Blokače 7:45 - 8:15			Průměrné rozdíly	Blokače 7:45 - 8:45			Průměrné rozdíly			
		1. běh	2. běh	3. běh		1. běh	2. běh	3. běh		1. běh	2. běh	3. běh				
V1V2	14636	14511	14720	14540	-0,31%	14774	14472	14738	0,17%	13480	10721	11771	-18,07%			
V1V8	17979	18089	18015	18022	0,35%	18085	17959	18154	0,48%	14894	11704	12676	-27,19%			
V2V1	14567	14790	15090	15234	3,23%	15550	15596	15391	6,49%	13294	7700	13332	-21,45%			
V2V3	19318	19289	19521	19567	0,73%	19475	19449	19471	0,76%	15401	11505	14156	-29,15%			
V2V9	9605	9493	9688	9363	-0,94%	9411	9499	9445	-1,60%	8611	6459	6340	-25,70%			
V3V2	22207	22335	22872	22746	2,00%	23066	23074	23025	3,82%	17913	11600	17562	-29,34%			
V3V4	12403	12437	12475	12756	1,23%	12576	12614	12766	2,01%	12568	8230	12905	-9,42%			
V4V10	8910	9018	9256	9120	2,48%	8950	9216	9136	2,14%	11146	4386	12768	5,87%			
V4V3	12436	12652	12884	13209	3,85%	13476	13338	13377	7,73%	9110	4325	9252	-39,19%			
V4V5	9534	9460	9608	9635	0,35%	9641	9551	9682	0,95%	8215	6190	7596	-23,08%			
V5V4	8872	8776	8993	9172	1,22%	9100	9243	9039	2,88%	3267	2766	2941	-66,28%			
V5V6	9612	9665	9464	9558	-0,52%	9385	9743	9665	-0,15%	5745	4516	5672	-44,75%			
V6V10	8114	8378	8196	8414	2,65%	8430	8580	8519	4,88%	4282	2962	3415	-56,21%			
V6V5	7988	8002	7867	7741	-1,48%	7856	7943	7931	-0,98%	7355	3647	5402	-31,55%			
V6V7	9603	9658	9497	9497	-0,54%	9625	9453	9430	-1,04%	5845	3816	6542	-43,76%			
V7V6	9909	10193	10155	10177	2,68%	10510	10484	10364	5,49%	7729	5665	4897	-38,47%			
V7V8	12547	12514	12387	12365	-1,00%	12499	12522	12430	-0,50%	4455	3555	4253	-67,42%			
V8V1	17653	17144	17126	17161	-2,89%	16721	16976	17149	-3,99%	13254	4901	10790	-45,34%			
V8V7	11838	12111	11865	11983	1,25%	12038	12113	12119	2,13%	10116	7448	7201	-30,27%			
V8V9	7683	7758	7937	7698	1,49%	8035	8086	7796	3,77%	6332	3489	5490	-33,57%			
V9V10	10515	10482	10575	10340	-0,47%	10469	10475	10226	-1,19%	8992	5548	5859	-35,33%			
V9V2	8762	8806	8879	8889	1,10%	8861	9133	8459	0,64%	6939	2574	5868	-41,49%			
V9V8	7576	7691	7721	7704	1,71%	7575	7662	7842	1,54%	9236	4561	7792	-5,01%			
V10V4	8970	9184	9214	9103	2,20%	9605	9582	9618	7,04%	7707	3637	6799	-32,58%			
V10V6	9796	9799	9852	9811	0,25%	9714	9853	9531	-0,99%	10034	5038	10046	-14,53%			
V10V9	11191	11269	11381	11378	1,36%	10934	11450	11272	0,25%	10689	3268	10036	-28,53%			
celkem	302224	303504	305238	305183	0,80%	306361	308066	306575	1,58%	246609	150211	221361	-31,82%			

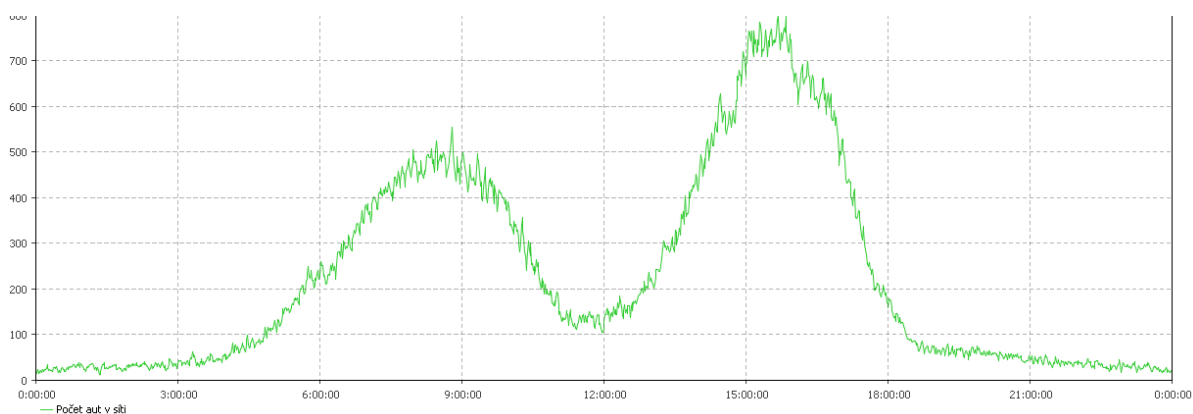
Tabulka 1: Počet průjezdů po jednotlivých hranách za jeden den, při třech časech blokače hrany V8V1

2 Příloha 2 – data Experiment 2

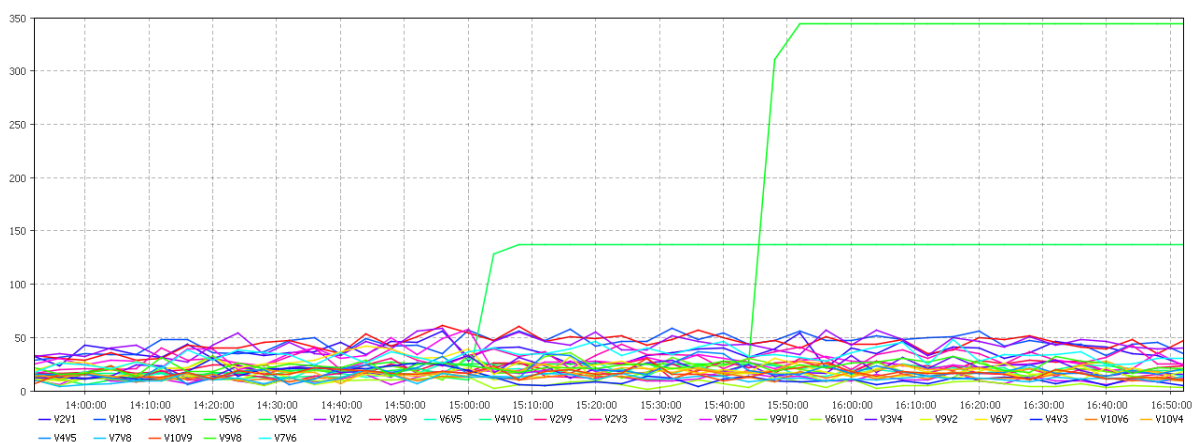
Doplňkové obrázky a tabulky k 5.3 Experiment 2. Na ose x všech grafů je vždy čas, osa y se liší podle typu grafu.



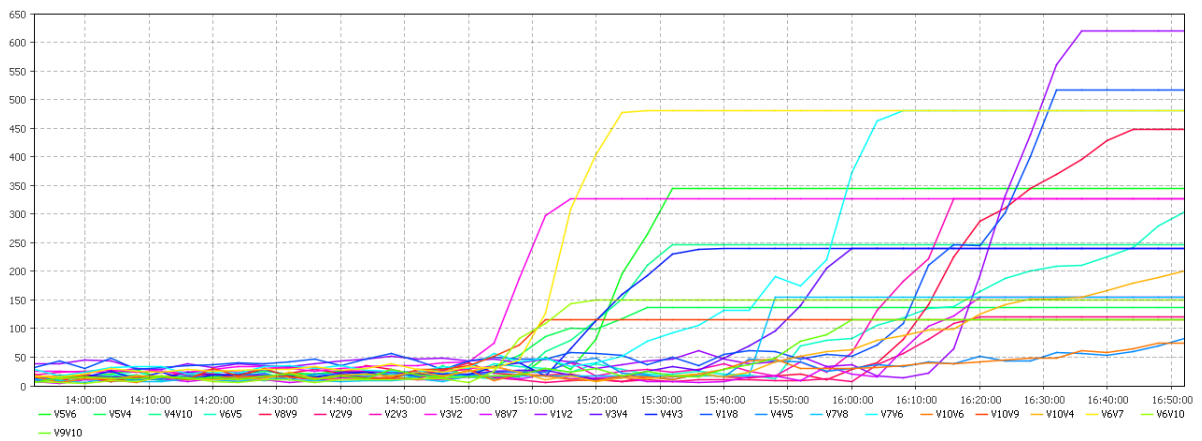
Obrázek 30: Počet aut na vybraných hranách při blokaci V2V9 v čase 15:00 - 15:45 (osa y – počet aut)



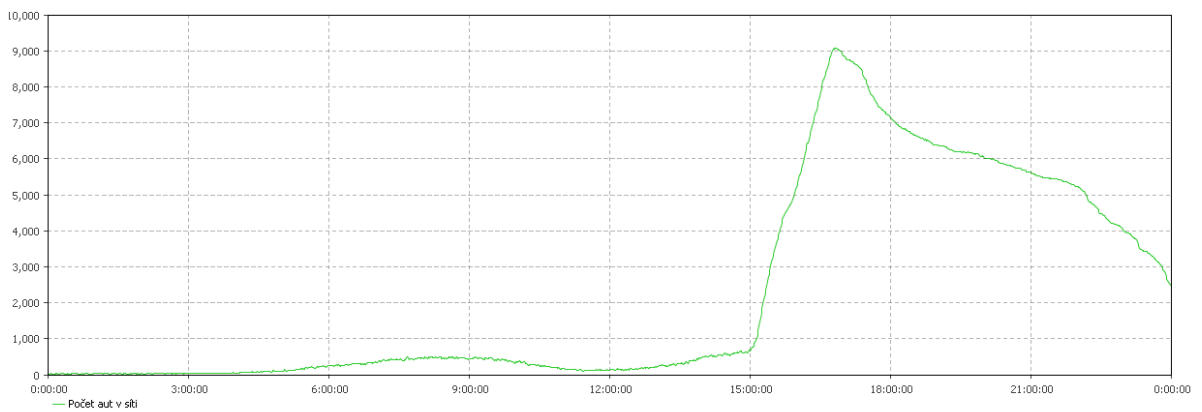
Obrázek 31: Vývoj objemu dopravy za 24h, při blokaci V2V9 (osa y – počet aut v síti)



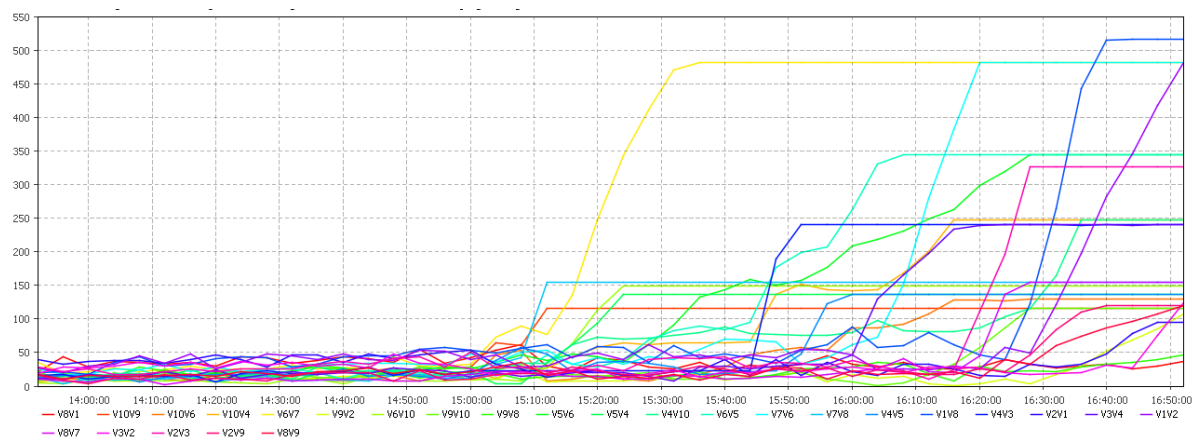
Obrázek 32: Počet aut na vybraných hranách při blokaci V5V6 v čase 15:00 - 15:45 (osa y – počet aut)



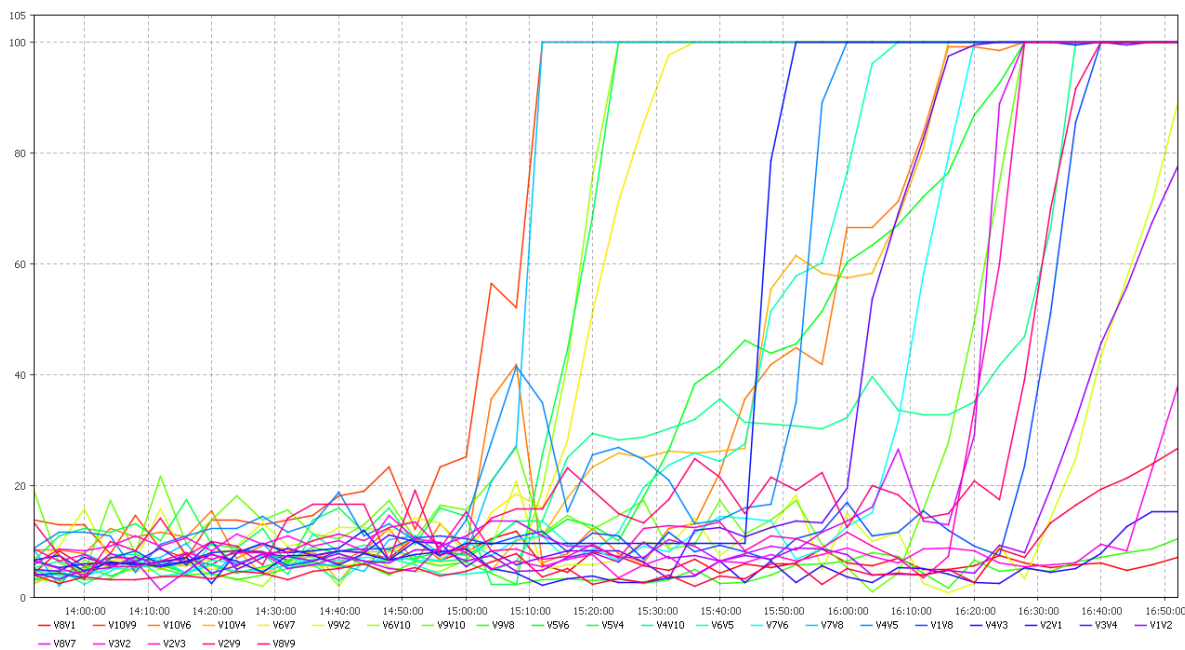
Obrázek 33: Počet aut na vybraných hranách při blokaci V7V8 v čase 15:00 - 15:45 (osa y – počet aut)



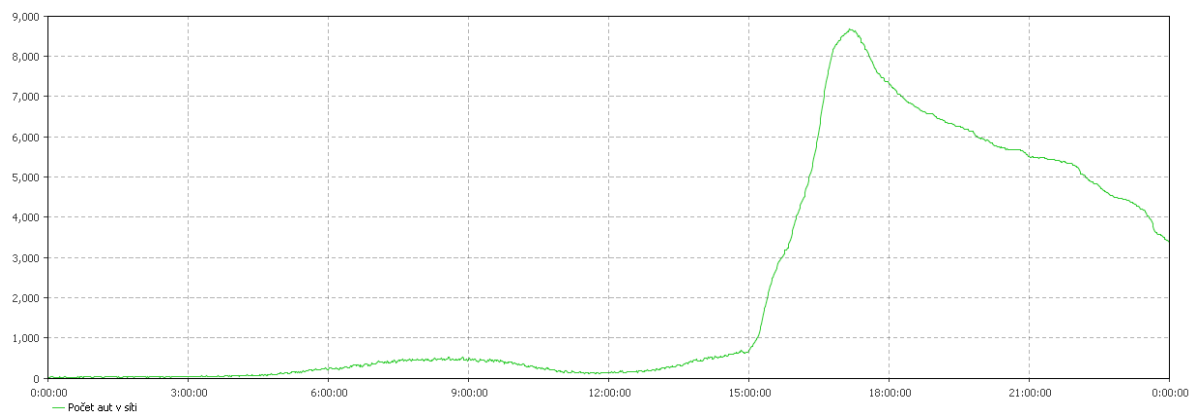
Obrázek 34: Vývoj objemu dopravy za 24h, při blokaci V7V8 (osa y – počet aut v síti)



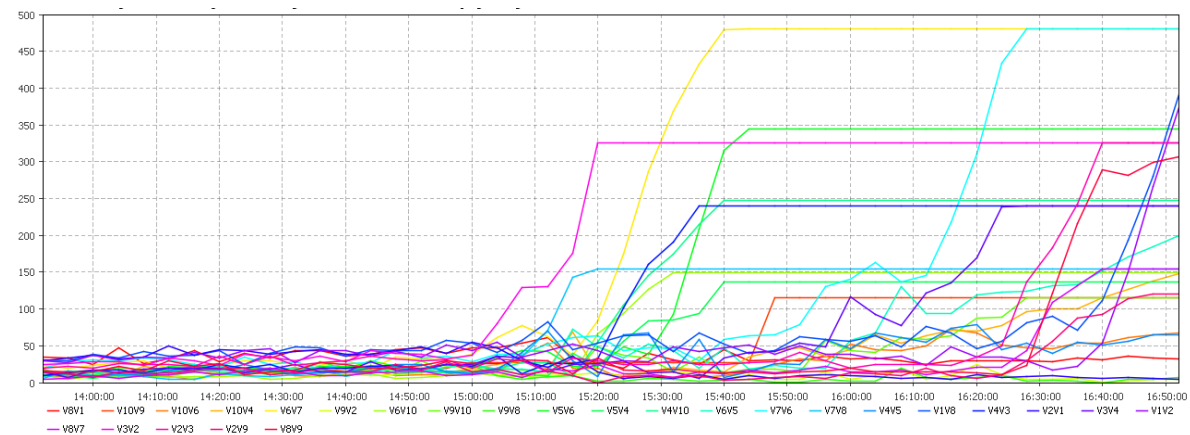
Obrázek 35: Počet aut na vybraných hranách při blokaci V4V3 v čase 15:00 - 15:45 (osa y – počet aut)



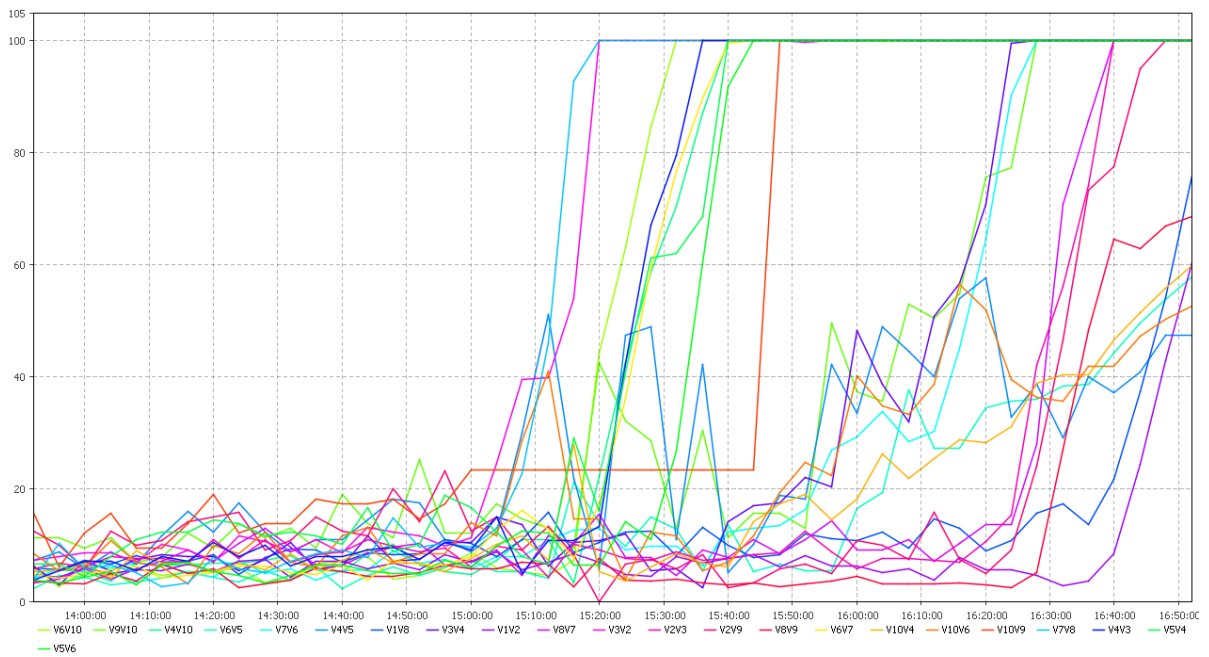
Obrázek 36: Procentuální obsazení vybraných hran při blokaci V4V3 v čase 15:00 - 15:45 (osa y – %)



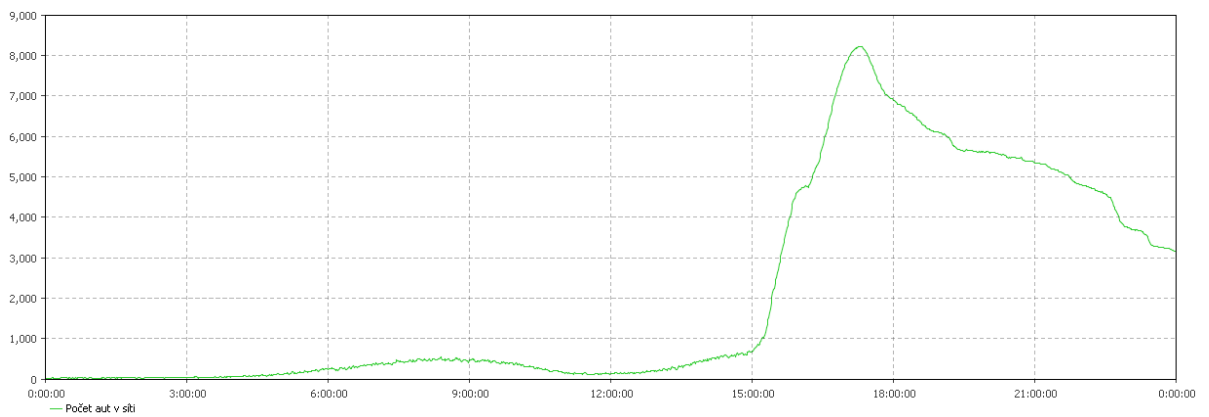
Obrázek 37: Vývoj objemu dopravy za 24h, při blokaci V4V3 (osa y – počet aut v síti)



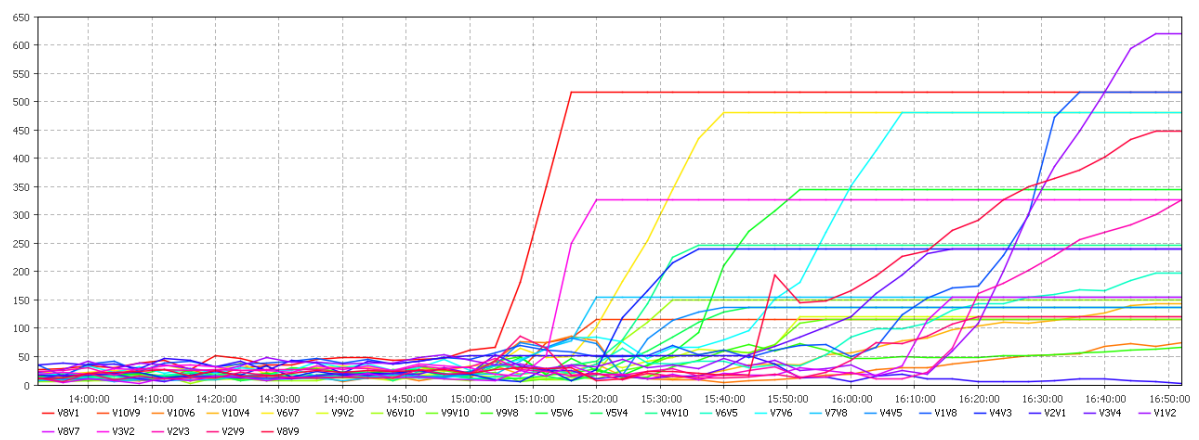
Obrázek 38: Počet aut na vybraných hranách při blokaci V10V9 v čase 15:00 - 15:45 (osa y – počet aut)



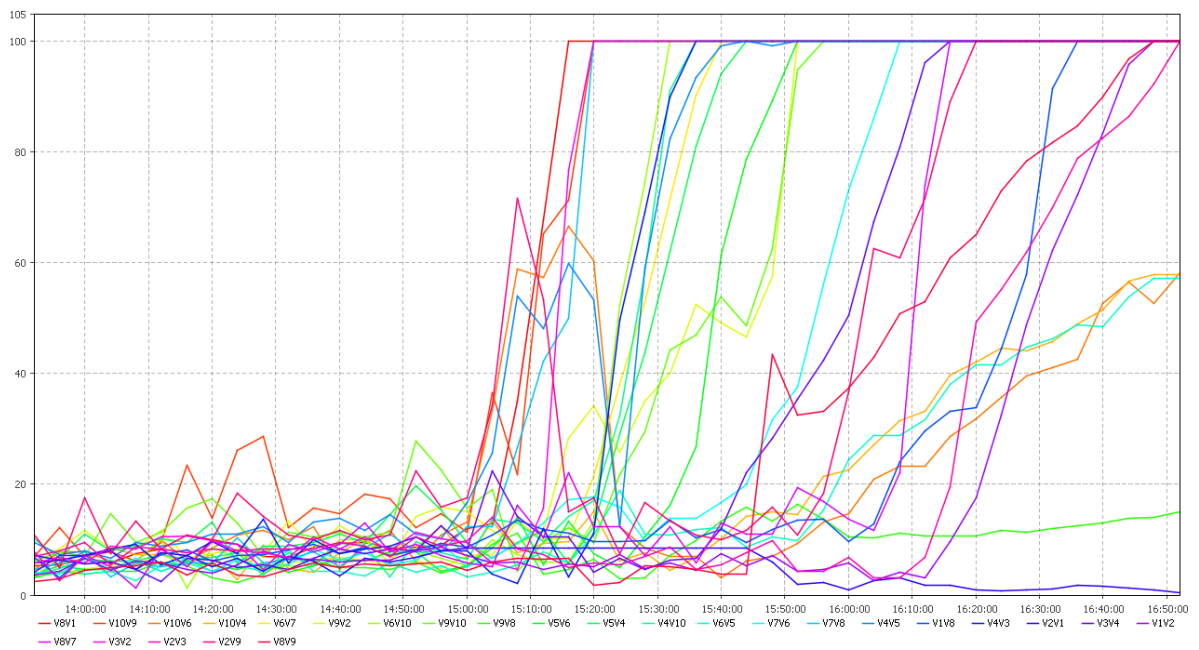
Obrázek 39: Procentuální obsazení vybraných hran při blokaci V10V9 v čase 15:00 - 15:45 (osa y – %)



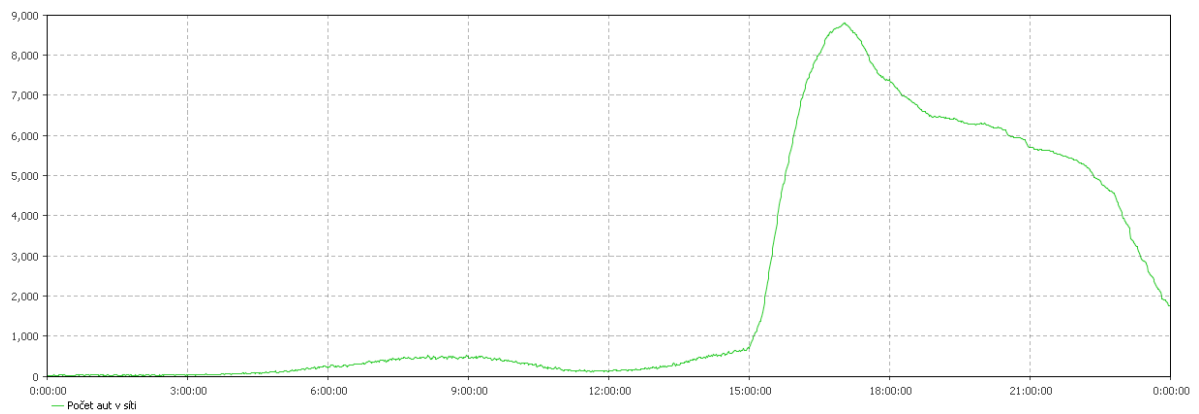
Obrázek 40: Vývoj objemu dopravy za 24h, při blokaci V10V9 (osa y – počet aut v síti)



Obrázek 41: Počet aut na vybraných hranách při blokaci V2V1 v čase 15:00 - 15:45 (osa y – počet aut)



Obrázek 42: Procentuální obsazení vybraných hran při blokaci V2V1 v čase 15:00 - 15:45 (osa y – %)



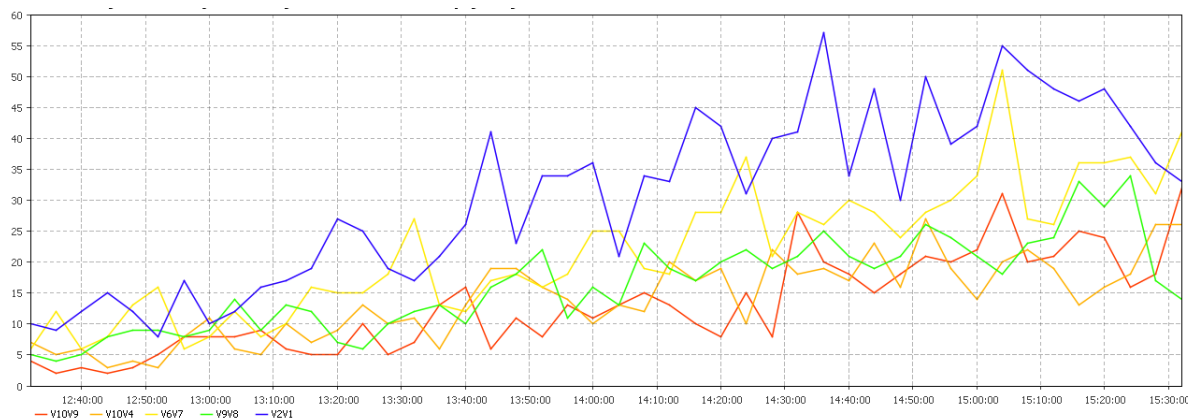
Obrázek 43: Vývoj objemu dopravy za 24h, při blokaci V2V1 (osa y – počet aut v síti)

Název hrany	Počet průjezdů za 24 hodin												Průměrné rozdíly							
	Běžné průjezdy			V2V9 – blokáce 15:00 - 15:45			Průměrné rozdíly			V7V8 – blokáce 15:00 - 15:45				Průměrné rozdíly			V4V3 – blokáce 15:00 - 15:45			Průměrné rozdíly
	1. běh	2. běh	3. běh	1. běh	2. běh	3. běh	rozdíly	1. běh	2. běh	3. běh	rozdíly	1. běh		2. běh	3. běh	rozdíly	1. běh	2. běh	3. běh	
V1V2:	14636	14409	14268	14344	-2,02%	12389	13181	13050	-12,04%	12579	12464	12304	-14,94%							
V1V8:	17979	18577	18727	18498	3,46%	15577	16887	15639	-10,82%	16216	16518	16094	-9,47%							
V2V1:	14567	15134	14968	15060	3,34%	11491	12146	11859	-18,78%	11566	11636	11587	-20,39%							
V2V3:	19318	19409	19643	19518	1,06%	15716	16810	16609	-15,22%	16265	16070	15779	-16,98%							
V2V9:	9605	8610	8825	8614	-9,60%	7266	9250	8177	-14,31%	8569	8296	8438	-12,19%							
V3V2:	22207	22433	22488	22192	0,74%	15973	18993	18138	-20,29%	18233	18073	18022	-18,45%							
V3V4:	12403	12749	12913	12733	3,19%	10061	10509	10364	-16,86%	10327	10247	10022	-17,77%							
V4V10:	8910	9477	9401	9450	5,98%	6818	7145	7048	-2,140%	7206	7098	7015	-20,24%							
V4V3:	12436	12720	12819	12730	2,58%	9374	9352	9288	-24,91%	8722	8914	8906	-28,86%							
V4V5:	9534	9528	9736	9569	0,81%	8178	7883	7733	-16,81%	7653	7664	7482	-20,29%							
V5V4:	8872	9183	9002	8964	2,00%	6454	6547	6616	-26,30%	6250	6305	6378	-28,87%							
V5V6:	9612	9358	9339	9598	-1,88%	7536	8077	7685	-19,21%	8043	8037	8201	-15,80%							
V6V10:	8114	7975	7950	7951	-1,91%	6466	6425	6023	-22,30%	5955	5747	5928	-27,57%							
V6V5:	7988	7908	7759	7989	-1,29%	7125	7424	7316	-8,76%	6886	6909	6958	-13,40%							
V6V7:	9603	9875	9892	9932	3,09%	7457	7599	7259	-22,54%	7609	7554	7752	-20,46%							
V7V6:	9909	9985	9986	9989	0,78%	8691	9843	9861	-4,48%	8974	9038	8922	-9,40%							
V7V8:	12547	12997	13062	12770	3,16%	8934	9109	8999	-28,16%	9166	9316	9172	-26,53%							
V8V1:	17653	17733	17759	17703	0,45%	16194	16127	15949	-8,85%	16307	16505	16492	-6,90%							
V8V7:	11838	11694	11984	11689	-0,41%	9957	11891	11301	-6,66%	11023	11020	10838	-7,41%							
V8V9:	7683	7879	8021	7922	3,35%	6523	6872	7176	-10,75%	6806	6681	6853	-11,75%							
V9V10:	10515	10359	10195	10419	-1,81%	8219	8767	8958	-17,76%	8522	8508	8497	-19,08%							
V9V2:	8762	8667	8819	8686	-0,43%	7317	7610	7488	-14,73%	7429	7265	7246	-16,53%							
V9V8:	7576	7085	7196	7216	-5,42%	5880	7444	6875	-11,13%	6754	6597	6719	-11,69%							
V10V4:	8970	9087	9125	9065	1,36%	7802	7689	7676	-13,91%	7036	7065	7106	-21,19%							
V10V6:	9796	10063	9898	10099	2,29%	7869	7731	7753	-20,54%	7755	7642	7620	-21,68%							
V10V9:	11191	11274	11120	11140	-0,12%	8010	8101	7818	-28,73%	8060	7917	7947	-28,74%							
celkem	302224	304168	304895	303840	0,69%	243277	259412	252658	-16,69%	249911	249086	248278	-17,58%							

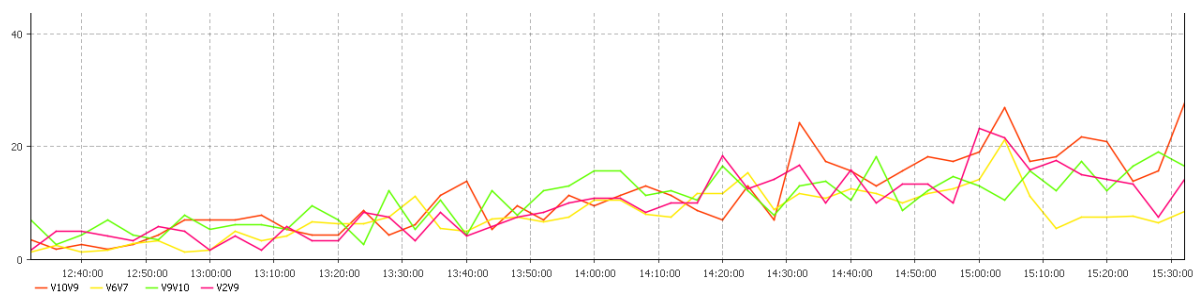
Tabulka 2: Počet průjezdů po jednotlivých hranách za jeden den, při postupné blokáci hran V2V9, V7V8 a V4V3 v čase 15:00 – 15:45

3 Příloha 3 – data Experiment 3

Doplňkové obrázky a tabulky k 5.4 Experiment 3. Na ose x všech grafů je vždy čas, osa y se liší podle typu grafu.



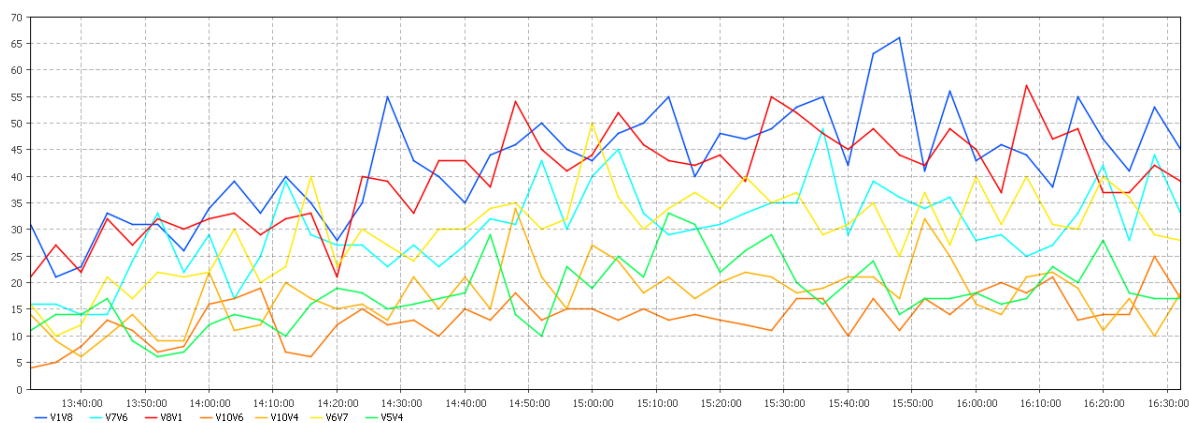
Obrázek 44: Počet aut na vybraných hranách při omezení V6V7 v čase 13:00 - 15:10 (osa y – počet aut)



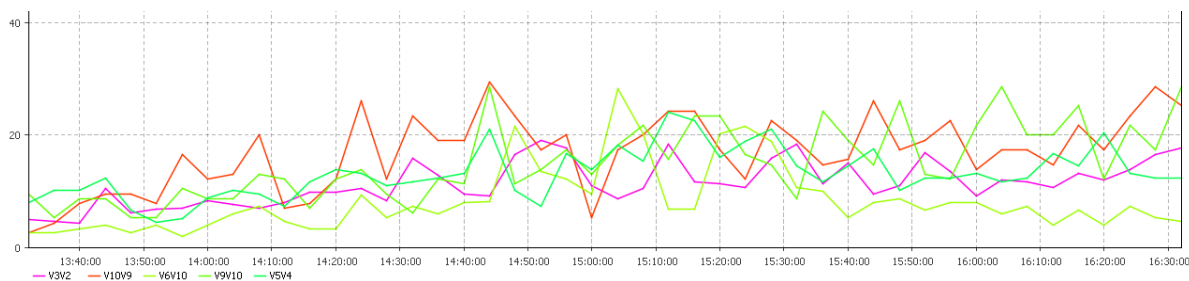
Obrázek 45: Procentuální obsazení vybraných hran při omezení V6V7 v čase 13:00 - 15:10 (osa y – %)



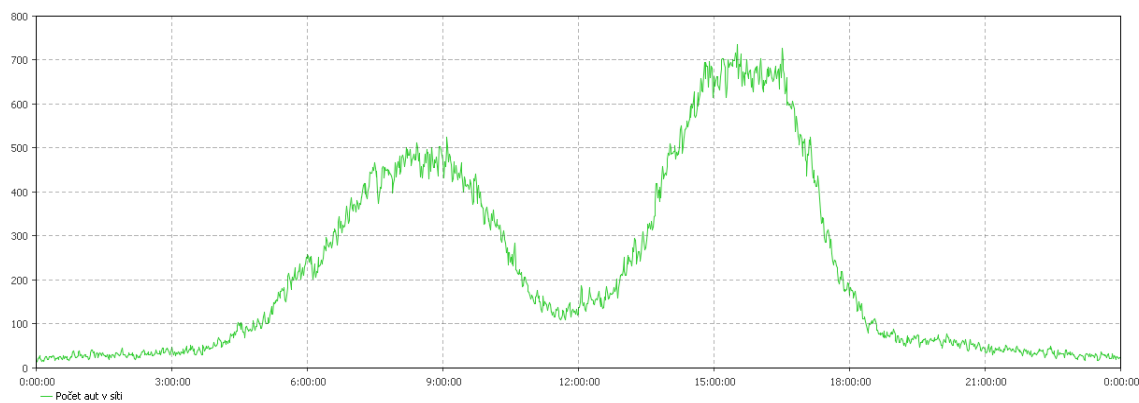
Obrázek 46: Vývoj objemu dopravy za 24h, při omezení V6V7 (osa y – počet aut v síti)



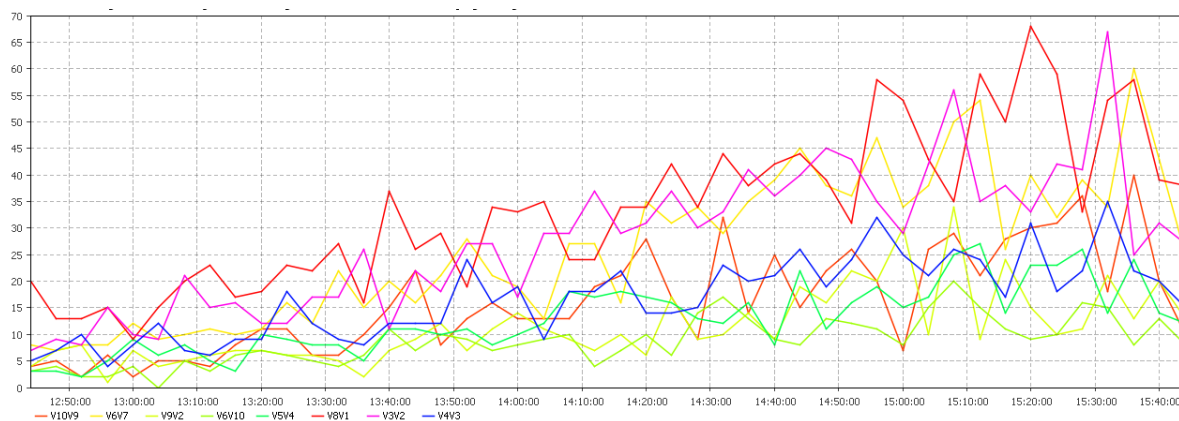
Obrázek 47: Počet aut na vybraných hranách při omezení V6V10 v čase 14:40 - 15:30 (osa y – počet aut)



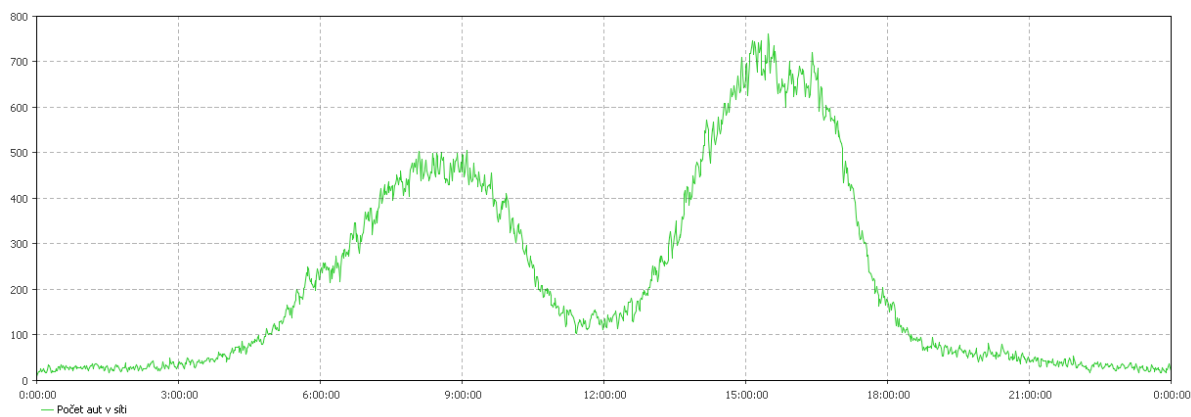
Obrázek 48: Procentuální obsazení vybraných hran při omezení V6V10 v čase 14:40 - 15:30 (osa y – %)



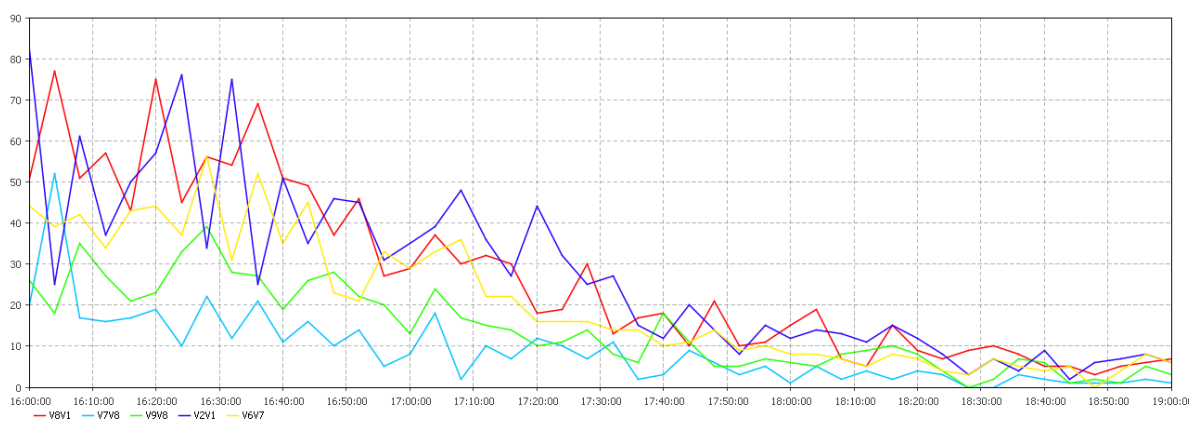
Obrázek 49: Vývoj objemu dopravy za 24h, při omezení V6V10 (osa y – počet aut v síti)



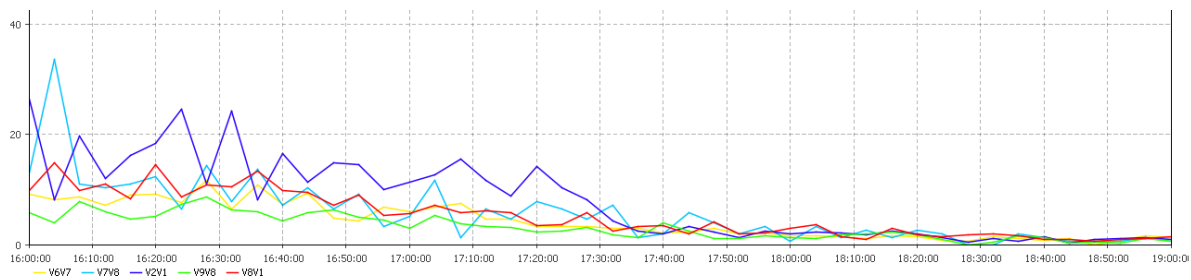
Obrázek 50: Počet aut na vybraných hranách při omezení V6V7 (13:00 - 15:10) a V6V10 (14:40 - 15:30), (osa y – počet aut)



Obrázek 51: Vývoj objemu dopravy za 24h, při omezení V6V7 (13:00 - 15:10) a V6V10 (14:40 - 15:30), (osa y – počet aut v síti)



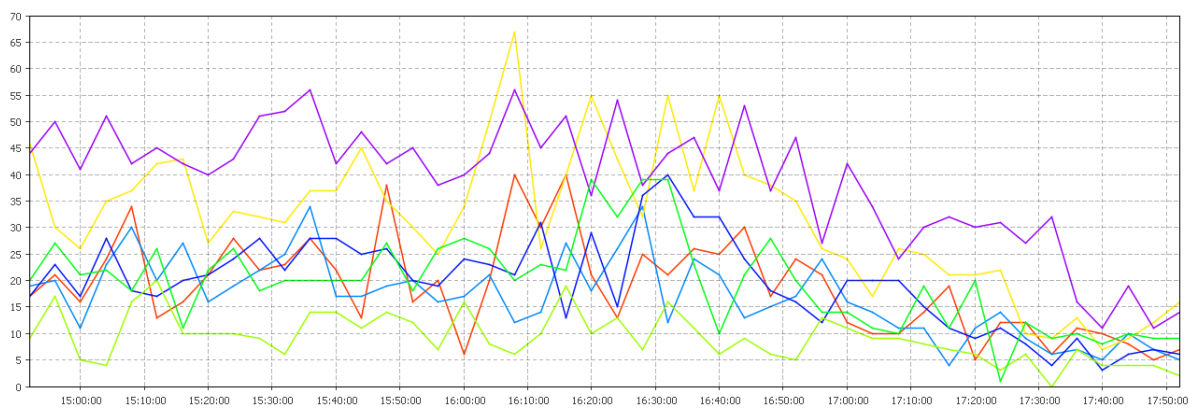
Obrázek 52: Počet aut na vybraných hranách při omezení V2V1 v čase 16:30 - 18:30 (osa y – počet aut)



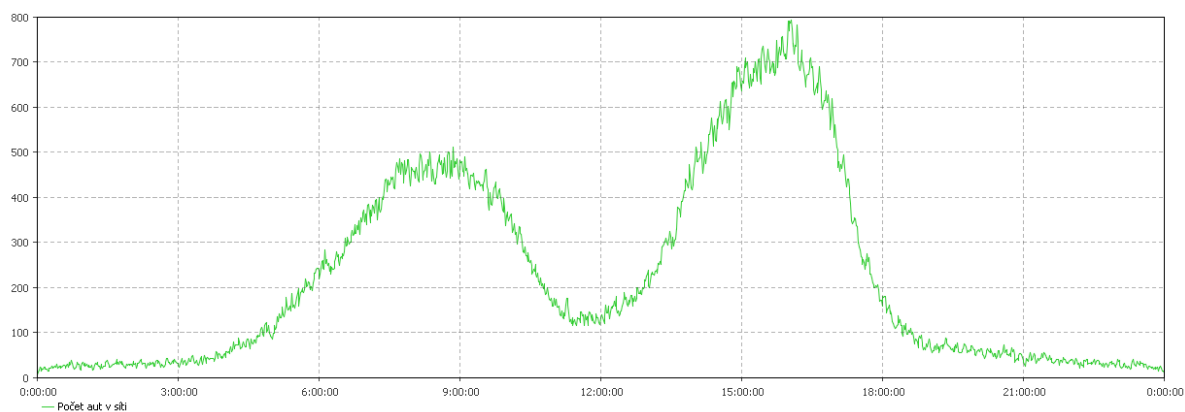
Obrázek 53: Procentuální obsazení vybraných hran při omezení V2V1 v čase 16:30 - 18:30 (osa y – %)



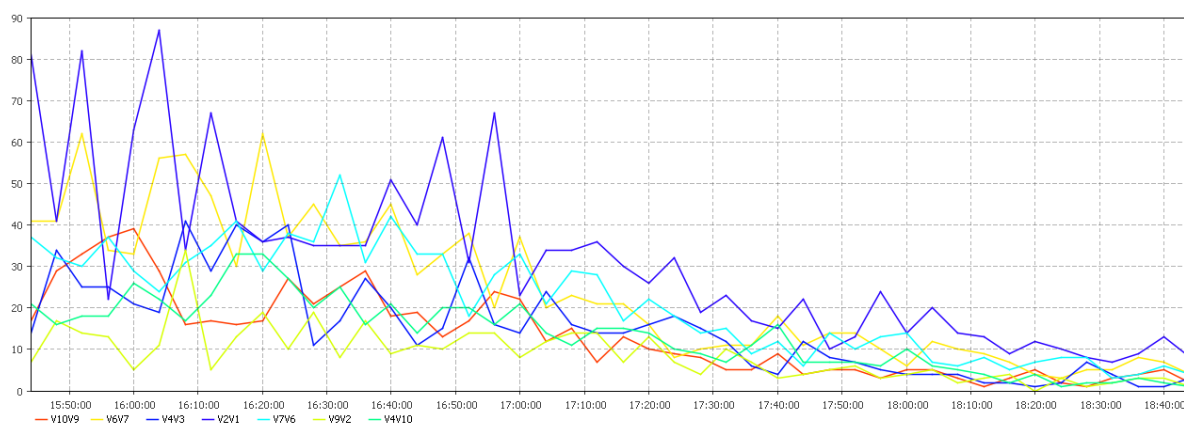
Obrázek 54: Vývoj objemu dopravy za 24h, při omezení V2V1 (osa y – počet aut v síti)



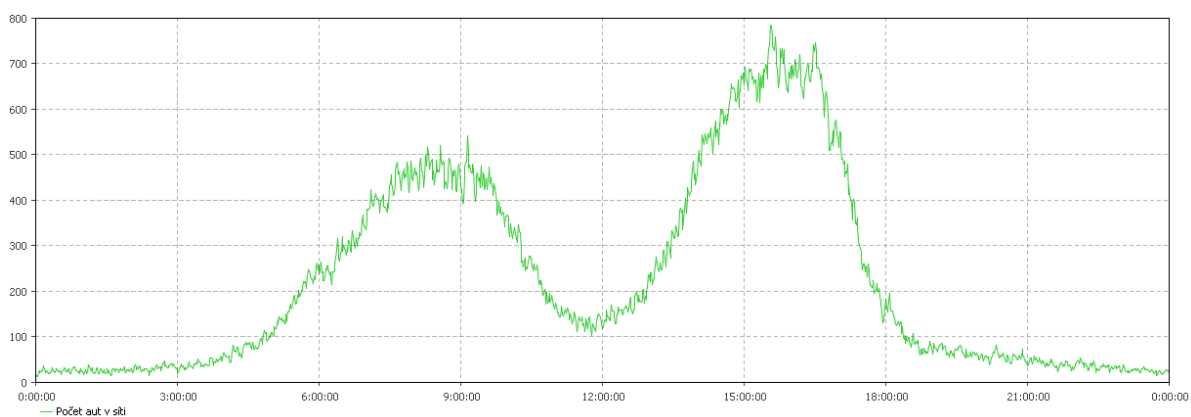
Obrázek 55: Počet aut na vybraných hranách při omezení V4V3 v čase 16:00 - 16:45 (osa y – počet aut)



Obrázek 56: Vývoj objemu dopravy za 24h, při omezení V4V3 (osa y – počet aut v síti)



Obrázek 57: Počet aut na vybraných hranách při omezení V2V1 (16:30 - 18:30) a V4V3 (16:00 - 16:45), (osa y – počet aut)



Obrázek 58: Vývoj objemu dopravy za 24h, při omezení V2V1 (16:30 - 18:30) a V4V3 (16:00 - 16:45), (osa y – počet aut v síti)

Název hrany	Počet průjezdů za 24 hodin												Průměrné rozdíly	
	Běžné průjezdy			V6V7 – omezení 13:00 - 15:10			V6V10 – omezení 14:40 - 15:30			V6V7+V6V10 – omezení kombin. čas				Průměrné rozdíly
	1. běh	2. běh	3. běh	1. běh	2. běh	3. běh	1. běh	2. běh	3. běh	1. běh	2. běh	3. běh		
V1V2:	14636	14599	14420	14456	14589	14765	14483	14589	14765	14483	14429	14530	14494	-1,04%
V1V8:	17979	17951	18108	17822	18060	17979	18122	18060	17979	18122	17989	18074	17880	0,01%
V2V1:	14567	14683	14973	14662	14681	15007	14653	14681	15007	14653	14497	14576	14729	0,23%
V2V3:	19318	19367	19343	19301	19239	19440	19334	19239	19440	19334	19065	19371	19338	-0,31%
V2V9:	9605	9611	9544	9629	9550	9750	9575	9550	9750	9575	9673	9582	9516	-0,15%
V3V2:	22207	22545	22878	22544	22548	22779	22398	22548	22779	22398	22447	22479	22471	1,16%
V3V4:	12403	12429	12340	12378	12216	12505	12280	12216	12505	12280	12370	12467	12301	-0,19%
V4V10:	8910	9075	9077	9267	9021	9099	9038	9021	9099	9038	9038	9223	9159	2,58%
V4V3:	12436	12761	12853	12716	12657	12653	12407	12657	12653	12407	12609	12575	12720	1,60%
V4V5:	9534	9540	9522	9582	9506	9626	9351	9506	9626	9351	9500	9518	9510	-0,26%
V5V4:	8872	9008	9139	8964	9042	8916	8945	9042	8916	8945	8995	9000	8983	1,36%
V5V6:	9612	9623	9605	9573	9393	9558	9382	9393	9558	9382	9730	9409	9583	-0,40%
V6V10:	8114	8150	8112	8176	7993	8012	7952	7993	8012	7952	8017	7940	8001	-1,58%
V6V5:	7988	7808	8008	7869	7875	7901	7949	7875	7901	7949	7779	7951	7749	-2,02%
V6V7:	9603	9631	9489	9650	9529	9489	9350	9529	9489	9350	9702	9384	9523	-0,69%
V7V6:	9909	9967	10082	9935	9992	10001	9985	9992	10001	9985	9860	10022	9897	0,17%
V7V8:	12547	12644	12598	12636	12562	12531	12360	12562	12531	12360	12522	12560	12587	0,07%
V8V1:	17653	17670	17531	17619	17564	17527	17422	17564	17527	17422	17621	17582	17481	-0,52%
V8V7:	11838	11772	11786	11874	11695	12029	11907	11695	12029	11907	11887	11824	11779	-0,07%
V8V9:	7683	7656	7808	7593	7647	7573	7670	7647	7573	7670	7459	7596	7659	-1,45%
V9V10:	10515	10292	10447	10479	10491	10267	10539	10491	10267	10539	10375	10422	10378	-1,17%
V9V2:	8762	8837	8904	8749	8825	8863	8759	8825	8863	8759	8588	8699	8665	-1,27%
V9V8:	7576	7736	7539	7785	7708	7799	7661	7708	7799	7661	7653	7719	7614	1,44%
V10V4:	8970	9024	9023	9015	8979	8954	8941	8979	8954	8941	8828	8848	8886	-1,29%
V10V6:	9796	9609	9791	9824	9763	9693	9735	9763	9693	9735	9692	9783	9708	-0,70%
V10V9:	11191	11183	11343	11358	11282	11341	11321	11282	11341	11321	11186	11321	11386	0,95%
celkem	302224	303171	304263	303456	302407	304057	301519	302407	304057	301519	301511	302455	301997	-0,08%

Tabulka 4: Počet průjezdů po jednotlivých hranách za jeden den, omezení hran V6V7 (13:00 - 15:10) a V6V10 (14:40 - 15:30)

Název hrany	Počet průjezdů za 24 hodin															Průměrné rozdíly				
	Běžné průjezdy			V2V1 – blokáce 16:30 - 18:30			Průměrné rozdíly			V4V3 – blokáce 16:00 - 16:45			Průměrné rozdíly				V2V1+V4V3– omezení kombin. čas			Průměrné rozdíly
	1. běh	2. běh	3. běh	1. běh	2. běh	3. běh	1. běh	2. běh	3. běh	1. běh	2. běh	3. běh	1. běh	2. běh	3. běh		1. běh	2. běh	3. běh	
V1V2:	14636	14468	14531	14697	-0,48%	14617	14578	14787	14787	0,17%	14479	14477	14345	14479	14477	14345	-1,38%			
V1V8:	17979	18061	18062	18074	0,48%	17882	18049	18054	18054	0,09%	18078	17949	18026	18078	17949	18026	0,22%			
V2V1:	14567	14094	14294	14308	-2,30%	14606	14600	14561	14561	0,15%	14281	14105	14159	14281	14105	14159	-2,65%			
V2V3:	19318	19099	19233	19623	0,00%	19331	19296	19635	19635	0,53%	19408	19229	19155	19408	19229	19155	-0,28%			
V2V9:	9605	9648	9741	9584	0,55%	9633	9681	9744	9744	0,84%	9626	9740	9652	9626	9740	9652	0,70%			
V3V2:	22207	22142	22323	22315	0,24%	22261	22213	22343	22343	0,29%	22281	22160	22129	22281	22160	22129	-0,08%			
V3V4:	12403	12358	12397	12478	0,06%	12400	12284	12674	12674	0,40%	12577	12223	12280	12577	12223	12280	-0,35%			
V4V10:	8910	9066	9056	9127	1,94%	9064	9001	9147	9147	1,80%	9167	9117	8951	9167	9117	8951	1,89%			
V4V3:	12436	12243	12172	12314	-1,55%	12527	12229	12413	12413	-0,37%	12362	12223	12351	12362	12223	12351	-1,00%			
V4V5:	9534	9548	9493	9528	-0,12%	9583	9476	9707	9707	0,57%	9600	9424	9466	9600	9424	9466	-0,39%			
V5V4:	8872	8569	8570	8708	-2,89%	8937	8655	8833	8833	-0,72%	8624	8552	8644	8624	8552	8644	-2,99%			
V5V6:	9612	9740	9551	9835	1,01%	9602	9744	9552	9552	0,22%	9967	9801	9755	9967	9801	9755	2,38%			
V6V10:	8114	8006	8128	8054	-0,63%	7959	8004	8020	8020	-1,47%	8184	8016	7967	8184	8016	7967	-0,72%			
V6V5:	7988	7880	7877	7700	-2,12%	7791	7755	7758	7758	-2,75%	7805	7719	7779	7805	7719	7779	-2,76%			
V6V7:	9603	9765	9687	10009	2,26%	9781	9727	9723	9723	1,46%	10154	9862	9681	10154	9862	9681	3,08%			
V7V6:	9909	10051	9995	9925	0,82%	9953	10066	10014	10014	1,03%	10115	9923	9851	10115	9923	9851	0,54%			
V7V8:	12547	12953	12752	13104	3,10%	12730	12819	12660	12660	1,51%	13245	12952	12851	13245	12952	12851	3,74%			
V8V1:	17653	18118	18035	18133	2,51%	17767	17603	17735	17735	0,28%	18200	18257	17976	18200	18257	17976	2,78%			
V8V7:	11838	11940	11796	11917	0,39%	11637	11840	11903	11903	-0,38%	11829	11743	11875	11829	11743	11875	-0,19%			
V8V9:	7683	7550	7706	7659	-0,58%	7581	7581	7747	7747	-0,61%	7808	7740	7742	7808	7740	7742	1,05%			
V9V10:	10515	10334	10539	10342	-1,05%	10394	10312	10541	10541	-0,94%	10419	10418	10374	10419	10418	10374	-1,06%			
V9V2:	8762	8437	8748	8727	-1,42%	8903	8862	8883	8883	1,38%	8627	8664	8695	8627	8664	8695	-1,14%			
V9V8:	7576	7986	7898	7940	4,82%	7404	7821	7715	7715	0,93%	7802	7777	7718	7802	7777	7718	2,50%			
V10V4:	8970	9014	9130	8857	0,34%	8855	8900	8947	8947	-0,77%	9164	8893	8877	9164	8893	8877	0,09%			
V10V6:	9796	9629	9829	9817	-0,38%	9875	9786	9783	9783	0,19%	9841	9710	9824	9841	9710	9824	-0,04%			
V10V9:	11191	11116	11337	11288	0,50%	11073	11284	11287	11287	0,21%	11069	11255	11201	11069	11255	11201	-0,14%			
celkem	302224	301815	302880	304063	0,23%	302146	302166	304166	304166	0,20%	304712	301929	301324	304712	301929	301324	0,14%			

Tabulka 5: Počet průjezdů po jednotlivých hranách za jeden den, omezení hran V2V1 (16:30 - 18:30) a V4V3 (16:00 - 16:45)

4 Příloha 4 – tabulka rychlost vs hustota

Tabulka ukazuje přepočtenou obsazenost úseků v procentech na průměrnou rychlost na hraně. Při výpočtu se používá vzorec uvedeného v části 4.3.3. Vypočítané rychlosti při stanoveném procentuálním zatížení odpovídají všem trasám grafu.

Obsazení hrany v procentech	Počet aut na hraně při uvedené obsazenosti	Rychlost	Obsazení hrany v procentech	Počet aut na hraně při uvedené obsazenosti	Rychlost
0	0	70	51	315,69	10
1	6,19	70	52	321,88	10
2	12,38	70	53	328,07	9
3	18,57	70	54	334,26	9
4	24,76	70	55	340,45	9
5	30,95	70	56	346,64	8
6	37,14	70	57	352,83	8
7	43,33	70	58	359,02	8
8	49,52	70	59	365,21	7
9	55,71	70	60	371,4	7
10	61,9	70	61	377,59	7
11	68,09	70	62	383,78	7
12	74,28	70	63	389,97	6
13	80,47	70	64	396,16	6
14	86,66	65	65	402,35	6
15	92,85	60	66	408,54	6
16	99,04	55	67	414,73	5
17	105,23	51	68	420,92	5
18	111,42	48	69	427,11	5
19	117,61	45	70	433,3	5
20	123,8	42	71	439,49	4
21	129,99	40	72	445,68	4
22	136,18	37	73	451,87	4
23	142,37	35	74	458,06	4
24	148,56	33	75	464,25	4
25	154,75	32	76	470,44	4
26	160,94	30	77	476,63	3
27	167,13	29	78	482,82	3
28	173,32	27	79	489,01	3
29	179,51	26	80	495,2	3
30	185,7	25	81	501,39	3
31	191,89	24	82	507,58	3
32	198,08	22	83	513,77	2
33	204,27	21	84	519,96	2
34	210,46	21	85	526,15	2
35	216,65	20	86	532,34	2
36	222,84	19	87	538,53	2
37	229,03	18	88	544,72	2
38	235,22	17	89	550,91	2
39	241,41	17	90	557,1	1
40	247,6	16	91	563,29	1
41	253,79	15	92	569,48	1
42	259,98	15	93	575,67	1
43	266,17	14	94	581,86	1
44	272,36	14	95	588,05	1
45	278,55	13	96	594,24	1
46	284,74	12	97	600,43	1
47	290,93	12	98	606,62	0
48	297,12	12	99	612,81	0
49	303,31	11	100	619	0
50	309,5	11			

Tabulka 6: v tabulce jsou pro ukázkou vypočítány rychlosti pro dané hodnoty obsazení hrany V1V2.

Některé rychlosti a procenta jsou zvýrazněny.

5 Příloha 5 – spuštění modelu

Pro spuštění modelu jsou k dispozici dvě varianty: s přípravou dat o zatížení jednotlivých tras a bez přípravy dat. Je důležité poznamenat, že druhou ze zmíněných variant je možné použít pouze v případě, kdy již máme data v excelovském souboru předpočítaná.

- 1) Model se spustí jako běžný projekt v AnyLogic

Spuštění s přípravou dat

- 2) Vytvoř strukturu modelu stiskem tlačítka "Vytvoř model"
- 3) Otevři excelovský soubor „zkk.xlsx“ – nachází se v adresáři projektu
- 4) Spusť funkci „Řešitel“ – buňka E1
- 5) Po dokončení výpočtu zkontroluj výslednou odchylku, případně změň parametry „Řešitele“ a proved' další výpočet. Při dosažení optimálních výsledků tabulkový soubor ulož a zavři.
- 6) Stiskem tlačítka „Načti dopočtená data“ se načtou vypočítaná data a proběhne přepnutí do základního prostředí modelu

Spuštění bez přípravy dat

- 2) Stiskni tlačítko „Opakované spuštění“ k přepnutí do modelového prostředí

Nastavení a spuštění experimentu

Nejprve je nutné blokovanou hranu přidat do kolekce „hranyNaBlokaci“. Dále je potřeba v prvku „casovaniBlokaci“ experiment časově rozvrhnout a ve spodní části vybrat (okomentováním) zda se jedná o blokaci celé hrany či jejích pruhů. Při výběru času je nutné do druhé hodnoty zadat pořadí dané hrany v kolekci „hranyNaBlokaci“ (číslováno od 1). Následuje již jen spuštění modelu a pozorování experimentu.

6 Příloha 6 – další části přiložené k práci

[A] CD s vlastním textem bakalářské práce v elektronické podobě a vytvořenou aplikací (modelem) spustitelnou v simulačním nástroji AnyLogic.