



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE INŽENÝRSKÝCH ÚLOH A  
INFORMATIKY  
INSTITUTE OF COMPUTER AIDED ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE

## MIKROSKOPICKÉ MODELY DOPRAVY V INTRAVILÁNU MĚSTA MICROSCOPIC TRAFFIC MODELLING IN URBAN AREAS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

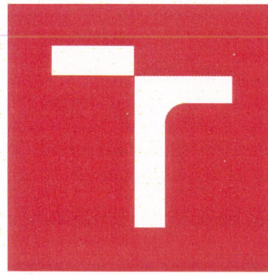
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Jan Brožek

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Mgr. TOMÁŠ APELTAUER, Ph.D.

BRNO 2018



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

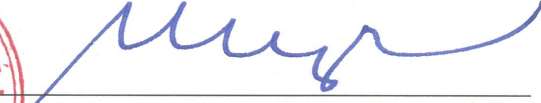
## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jan Brožek
Název	Mikroskopické modely dopravy v intravilánu města
Vedoucí práce	doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

  
doc. Ing. Aleš Krejčí, CSc.  
Vedoucí ústavu



  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Barceló, J. (editor): Fundamentals of Trac Simulation. International Series in Operations Research & Management Science, Springer, 2010, 492 s.

Gipps, P.: A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research Part B: Methodological, ročník 15, č. 2, April 1981: s. 105 - 111.

Ortúzar, J., G. Willumsen, L.: Modelling Transport, 4th Edition, 2011.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

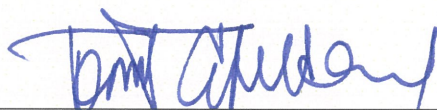
Aplikace mikroskopického modelu dopravy pro posouzení dopravní situace v rámci projektu Zemského stadionu Brno (Stadionu Za Lužánkami).

Cílem práce je demonstrovat přínosy aplikace mikroskopického modelu již ve fázi projektu staby, kdy dojde k otestování vybraného prvku návrhu stadionu, jeho přenosu z projektu do modelu a sestavení mikroskopického modelu dopravy. V rámci práce bude kapacitně a bezpečnostně posouzen daný prvek prostřednictvím různých variantních řešení.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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



doč. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce



## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá modelováním dopravy jak z pohledu teoretického, tak praktického. Za pomoci softwarového nástroje Aimsun byl vytvořen mikroskopický model dopravy pro různé situace, které byly následně mezi sebou porovnány.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Modelování, Simulace, Mikrosimulace, Aimsun, Brno

## ABSTRACT

The bachelor thesis deals with a traffic modeling from theoretical and practical perspectives. Microscopic traffic models for various circumstances were created in the Aimsun software and then they were compared with each other.

## KEYWORDS

Modelling, Simulation, Microsimulation, Aimsun, Brno

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Jan Brožek *Mikroskopické modely dopravy v intravilánu města*. Brno, 2018. 59 s., 4 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky. Vedoucí práce doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24. 5. 2018

---

Jan Brožek  
autor práce

# PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 12. 4. 2018

---

Jan Brožek  
autor práce

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Mgr. Tomášovi Apeltauerovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Apeltauerovi za poskytnuté materiály, rady a trpělivost. Dále také společnosti Brněnské Komunikace, a.s. za ochotu při poskytování dopravních dat pro účely této bakalářské práce.



# Obsah

Úvod.....	11
1 Úvod do modelování dopravy.....	12
1.1 Modelové skupiny dle rozsahu.....	12
1.1.1 Vhodnost použití mikrosimulace .....	13
2 Mikroskopické modely dopravy .....	15
2.1 Wiedemannův model .....	17
2.1.1 Prahové hodnoty modelu .....	18
2.2 Gippsův model .....	19
2.2.1 Definice modelu.....	19
2.2.2 Shrnutí vlastností Gippsova modelu.....	22
2.3 Model inteligentního řidiče .....	23
2.3.1 Definice modelu.....	23
3 Obecný postup při tvorbě mikrosimulace.....	26
3.1 Účel a rozsah studie .....	27
3.2 Sběr a příprava dat .....	27
3.2.1 Geometrie.....	27
3.2.2 Řízení dopravy.....	28
3.2.3 Aktuální dopravní zatížení.....	28
3.2.4 Kalibrační data.....	28
3.2.5 Budoucí dopravní zatížení .....	29
3.3 Tvorba modelu .....	29
3.3.1 Odstranění chyb, ladění modelu .....	30
3.3.2 Verifikace, kalibrace a validace modelu.....	30

3.3.3	Čas k překonání stavu nulové saturace .....	32
3.4	Interpretace výstupů .....	32
4	Popis řešené lokality Zemského stadionu Brno .....	33
4.1	Současný stav .....	34
4.2	Návrhový stav .....	35
4.2.1	Varianta A .....	35
4.2.2	Varianta B .....	37
5	Aimsun .....	39
5.1	Úvod .....	39
5.2	Tvorba modelu .....	39
5.2.1	Mapový podklad .....	39
5.2.2	Geometrie modelu .....	40
5.2.3	Zadání řídicích plánů křižovatek .....	41
5.2.4	Zadání dopravního zatížení .....	42
5.3	Spuštění simulace .....	45
5.4	Kalibrace a validace modelu .....	45
6	Vyhodnocení výsledků simulace .....	48
6.1	Stav běžného provozu .....	48
6.2	Srovnání návrhových variant .....	48
	Závěr .....	53
	Přílohy .....	54
	Použité zdroje .....	58
	Seznam obrázků .....	59
	Seznam tabulek .....	60

## Úvod

Rozsáhlý sportovní areál za Lužánkami v Brně je od počátku 21. století opomíjeným místem a dodnes není využit plný potenciál této lokality. Současně se však začalo mluvit o komplexní rekonstrukci celého sportovního areálu. V posledních letech vzniklo několik studií s různým geometrickým uspořádáním sportovišť a připojením areálu na dopravní síť města Brna.

Cílem práce je na základě teoretických poznatků o modelování dopravy vytvořit mikroskopický model stávajícího stavu komunikační sítě v okolí sportovního areálu a modely dvou návrhových variant a jejich následné porovnání z hlediska vlivu vyjíždějících vozidel na provoz na přilehlých komunikacích.

# 1 Úvod do modelování dopravy

Obecně modelování je napodobování reálného děje, reálného chování zkoumaného prvku s možností následně ovlivňovat jeho chování předepsaným způsobem. [1]

Jedná se o selektivní aproximaci, kdy vybíráme pouze podstatné vlivy a podřadné vlivy zanedbáváme z důvodu velmi malého vlivu na situaci. Z dat získaných z reálného děje získáváme pomocí transformačních matematických vztahů a algoritmů sofistikovaný matematický simulační model. Důležitým prvkem je způsob zachycení času. Z tohoto hlediska se simulace dělí na diskrétní a spojitě. U spojitěho modelování se výsledný děj mění plynule v čase, naproti tomu u diskrétního se výsledek změny v případě, že dojde k nové události, která změny hodnotu proměnné.

Simulační model dopravního proudu se sestává z několika submodelů, které se starají o specifickou úlohu simulaci reálného děje. Submodely, které řídí interakci sledovaného vozidla s vozidlem předchozím, můžeme rozdělit do modelů pro dodržování bezpečné vzdálenosti, psycho-fyzikální modely a modely jiného typu. Dále sem můžeme zahrnout i submodel pro chování chodců a interakci lidí s dopravním proudem.

## 1.1 Modelové skupiny dle rozsahu

### a) Makroskopické modely

Tyto modely se vyskytují ve dvou variantách. První tzv, model dynamiky kapalin je využíván především pro simulaci dálniční sítě. Druhý tzv. model cestovního času, který pracuje s odporem trasy, jako funkcí dopravního zatížení na trase. Charakteristickým znakem pro makroskopické modely je to, že se dopravní proud se nadále nečlení na jednotlivá vozidla. Popis dopravního proudu v jednotlivých úsecích probíhá prostřednictvím proměnných jako dopravní zatížení, nebo průměrná rychlost dopravy. Vztahy mezi jednotlivými veličinami jsou matematicky formulovány a výsledky graficky zobrazeny v tzv. fundamentálním diagramu.

#### **b) Mezoskopické modely**

V této skupině modelů jsou sice zohledňována jednotlivá vozidla, ale jejich pohyb je popsán pouze v makroskopickém měřítku, tudíž nejsou popsány interakce mezi jednotlivými vozidly.

#### **c) Mikroskopické modely**

Pro tyto modely jsou jednotlivá vozidla elementárními částicemi. Jsou jim přiřazeny individuální vlastnosti, popsány interakce mezi vozidly, zohledněno chování řidičů. Mikroskopické modely jsou přesnější než makroskopické a dokáží mnohem lépe vystihnout detailní problémové úlohy.

#### **d) Hybridní modely**

Spojením mikroskopických a makroskopických znaků vznikají modely hybridní. Doprava je interpretována v jiných částech modelu odlišným způsobem. Například úseky v makroskopickém zobrazení a uzlové odbočovací manévry v mikroskopickém pojetí.

#### **e) Submikroskopické modely**

Zde se stav vozidla modeluje mnohem podrobněji. Mohou zde být zobrazeny i veličiny jako výkon motoru nebo druh hnacího ústrojí. Jsou velmi detailní a tím kladou vysoké požadavky na vstupní data a čas k sestavení komplexního modelu.

### **1.1.1 Vhodnost použití mikrosimulace**

Mikrosimulace jako nejběžnější typ simulace v městském prostředí je také náročnější na vstupní data než modely makroskopické. Zato disponují detailním zobrazením dopravních jevů a tedy jsou případy, kdy nasazení mikrosimulace je zcela nezbytné. Jedná se především o následující situace. [5]

- *Předpoklad synergických jevů:*

V komplexních a kompaktních městských dopravních systémech při různorodém složení dopravního proudu lze očekávat vzájemné spolupůsobení – synergii. Např. zasahování dopravního proudu z jedné křižovatky do druhé,

délka překračující kolony délku odbočovacích pruhů, vliv těžkých nákladních vozidel na délku kolony, blokování dopravy neregulovaným proudem pěších. Tyto a další synergické jevy by při posuzování pouze jednotlivých prvků zůstaly neodhaleny.

- *Dopravní situace s kritickou saturací:*  
Situace, kdy míra saturace je na hranici stabilního a nestabilního stavu.
- *Překročení kapacity, stavy kongesce:*  
Předpokládá se překročení kapacity v uzlových, nebo úsekových prvků a následné tvoření dopravních kongescí.
- *Testování kapacitních hranic:*  
Stanovení kapacity dopravní sítě je důležité zejména pro oblasti rozvoje měst a obcí.
- *Nestandardní způsoby řešení:*  
Nestandardní řešení geometrie dopravní sítě, zejména ve stísněných podmínkách, která nemá, nebo má jen částečnou oporu v technické normě.
- *Technické řešení bez prokázaných zkušeností:*  
Je-li navržen zcela nový prvek na dopravní síti, se kterým nejsou zkušenosti z reálného provozu.
- *Dynamické řízení, preference veřejné dopravy:*  
Případ, kdy křižovatky jsou řízeny dynamickými signálními plány, signální plány se mění v závislosti na aktuální poptávce vozidel, nebo jsou vybaveny systémem preference veřejné dopravy.
- *Hodnocení emisí a hluku:*  
Detailní simulace dynamiky jízdy pro každé vozidlo a následné vyhodnocení míry negativních účinků na okolí.

## 2 Mikroskopické modely dopravy

Při modelaci dopravy se v současnosti využívají mikroskopické modely založené na popisu chování jednotlivých vozidel, které se pohybují a reagují na okolí dle předepsaných funkcí, jejichž parametry lze měnit zvoleným způsobem a to i náhodným. [1][2]

Reakce na okolí je sledována na hodnotě zrychlení  $n$ -tého vozidla. Do výpočtu této veličiny vstupují především parametry: vlastní rychlost vozidla, rychlost okolních vozidel a jejich vzájemná poloha.

$$\mathbf{a}_i(\mathbf{t}) = \mathbf{f}(\mathbf{v}_1(\mathbf{t}), \dots, \mathbf{v}_i(\mathbf{t}), \dots, \mathbf{v}_n(\mathbf{t}), \mathbf{x}_1(\mathbf{t}), \dots, \mathbf{x}_{i-1}(\mathbf{t}), \mathbf{x}_{i+1}(\mathbf{t}), \dots, \mathbf{x}_n(\mathbf{t})) \quad (2.1)$$

První mikroskopické modely dopravy byly vytvořeny v padesátých letech minulého století. Výpočet hodnoty zrychlení  $a_n$  je zde závislý na relativní rychlosti  $\Delta v_n$  a vzdálenosti  $\Delta x_n$ . Vztah vypadal následovně

$$a_n(\mathbf{t} + \tau) = l_n \frac{\Delta v_n(\mathbf{t})^k}{\Delta x_n(\mathbf{t})^m}, \quad (2.2)$$

kde  $\tau$  představuje reakční dobu řidiče a  $l_n$ ,  $k$  a  $m$  matematické konstanty, které je nutné kalibrovat pro daný model.

Dnes tento typ dopravního modelu známe jako model následujícího vozidla (CFM – Car Following Model). Základním prvkem této třídy modelů je stanovení závislosti pohybu vozidla na okolních podmínkách. Vytvoření takového modelu však není lehkým úkolem a dodnes se nepodařilo nalézt model, který by plně vystihoval skutečné chování řidiče a byl by snadno uchopitelný.

V modelu následujícího vozidla je zrychlení  $a$  je funkcí rychlosti vozidla v dopravním proudu  $v$ , relativní rychlosti  $\Delta v$  a odstupu od předcházejícího vozidla  $\Delta x$ .

$$a = f(v, \Delta v, \Delta x) \quad (2.3)$$

Tento vztah však můžeme upravit s ohledem na to, že vzdálenost mezi vozidly bude větší při vyšších rychlostech, tudíž výpočet zrychlení vozidla uplatňuje mocninovou závislost na rychlosti

$$a = \frac{-\lambda \cdot v^m \cdot \Delta v}{\Delta x^l}, \quad (2.4)$$

kde  $\lambda$ ,  $m$  a  $l$  je třeba kalibrovat na základě reálných měření. Tento vztah je uvažován pro případ, kdy sledované vozidlo se pohybuje pomaleji než vozidlo předcházející, tedy pro zápornou relativní rychlost  $\Delta v$ . V opačném případě se uvažuje s lineární závislostí na relativní rychlosti

$$a = -\mu \cdot \Delta v, \quad (2.5)$$

kde  $\mu$  je opět koeficient nutný kalibrace.

Výše uvedené vztahy však mají své nedostatky a nedokáží popsat veškeré dopravní situace. Například situaci velké hustoty dopravního proudu, kdy vzdálenost mezi vozidly je malá a při dosažení do vztahu roste hodnota zrychlení nade všechny meze.

Na principech modelu následujícího vozidla můžeme rozeznat několik typů modelů zejména:

1. Wiedemannův model,
2. Gippsův model,
3. IDM model (Model inteligentního řidiče).

První dva modely jsou základem pro komerční simulační nástroje. IDM model je ve vědecké sféře nejuznávanějším přístupem k popisu mikroskopických simulací dopravního proudu. Nicméně každý z uvedených modelů má své výhody i nevýhody.



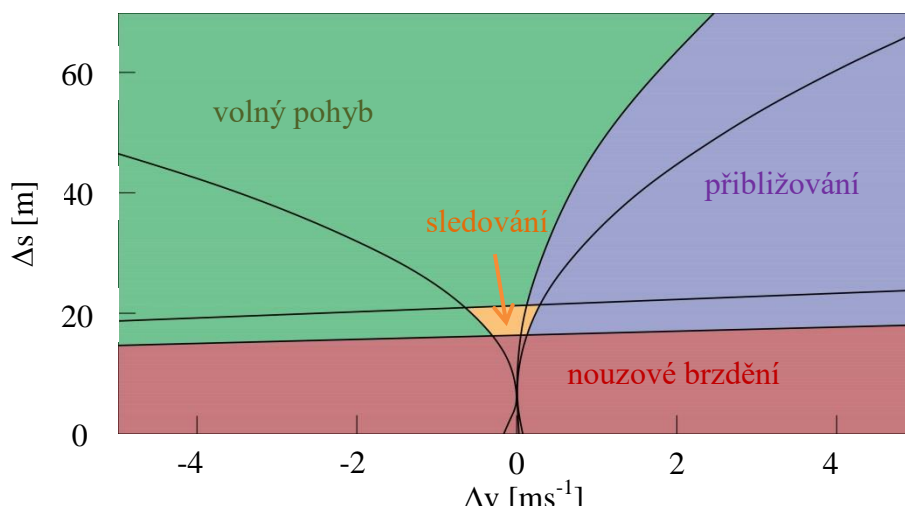
## 2.1 Wiedemannův model

Wiedemann se svým modelem přišel již v roce 1968 a dnes tento model tvoří základ nejen pro komerční simulační nástroje od společnosti PTV Group, ale je také brán jako etalon pro posuzování nově vyvíjených modelů. [1][3]

Tento model patří do skupiny tzv. psychofyziologických modelů, ve kterých se předpokládá, že řidič vozidla nevnímá relativní rychlosti a vzdálenosti stejně při různých rychlostech pohybu, takže reaguje odlišně v různých situacích. Pro různé situace jsou definovány mezní hodnoty relativní rychlosti a vzdálenosti, tudíž dle situace se mění algoritmus pro výpočet zrychlení.

Situace můžeme přehledně zobrazit v grafu, kde na vodorovné ose vynášíme relativní rychlost, kladné hodnoty znamenají přibližování vozidel a záporné jejich vzdalování, a na svislé ose vzdálenost mezi vozidly. Prahovými hodnotami modelu jsou vymezeny v grafu 4 oblasti, které reprezentují různé jízdní režimy:

1. volný pohyb,
2. přibližování,
3. sledování,
4. nouzové brzdění.

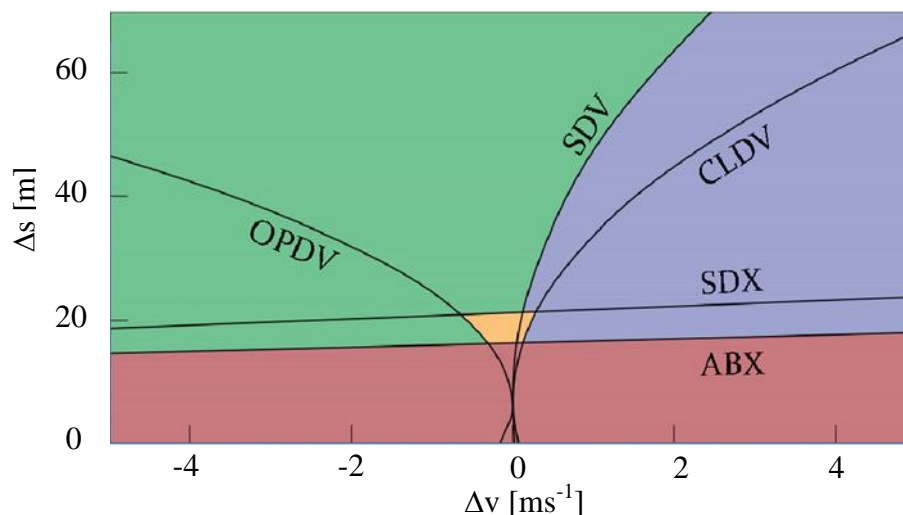


**Obrázek 2-1:** Schéma Wiedemannova modelu

### 2.1.1 Prahové hodnoty modelu

Prahové hodnoty jsou ony hraniční křivky, které od sebe oddělují oblasti jízdních režimů. Jedná se o křivky:

- **ABX**: Požadovaná minimální vzdálenost mezi vozidly při malém rozdílu rychlosti. Závisí na minimální vzdálenosti stojících vozidel, která je velmi ovlivněna subjektivní představou o bezpečné vzdálenosti, a rychlosti vozidla. Závislost na rychlosti nemusí vždy být přímo úměrná.
- **SDV**: Práh vnímání rozdílu rychlostí při velkých vzdálenostech. Udává bod, ve kterém začne řidič reagovat na pomaleji jedoucí předcházející vozidlo. Snižuje svou rychlost, dokud se nepohybuje stejnou rychlostí. Přitom se snaží zachovat vzdálenost větší než ABX.
- **SDX**: Práh vnímání vzdálenosti v režimu sledování. Řidič se snaží udržet stejnou vzdálenost a rychlost jako předcházející vozidlo. Pokud se vzdálenost zvětší, zareaguje akcelerací.
- **CLDV**: Práh vnímání malých rozdílů rychlostí při malé a zmenšující se vzdálenosti. Řidič zpomaluje, aby nedošlo ke kolizi s předcházejícím vozidlem.
- **OPDV**: Práh vnímání malých rozdílů rychlostí při malé, ale rostoucí vzdálenosti vozidel.



Obrázek 2-2: Prahové hodnoty Wiedemannova modelu

## 2.2 Gippsův model

Pochybnosti ohledně vstupních parametrů předchozího modelu se podařilo odstranit v roce 1981, kdy P. G. Gipps přišel se svým modelem následujícího vozidla. Gippsův model položil základy i pro současné komerční produkty. Příkladem může být software AIMSUN. [1][4]

Hlavním principem a rozdílem oproti Wiedemanna modelu je předpoklad, že vozidlo je omezeno určitou hodnotou maximální akcelerace a decelerace, která je stejná pro celý rozsah rychlostí, relativních rychlostí a vzdáleností. Řidič má snahu vždy dodržovat bezpečnou vzdálenost a jeho reakční doba, ač ji model přímo nezavádí, je zahrnuta v reakci řidiče v bezprostředně následujícím kroku.

### 2.2.1 Definice modelu

Vlastností Gippsova modelu je omezení rychlosti modelovaného vozidla na hodnotu, která vždy umožní bezpečné zastavení v situacích, kdy předcházející vozidlo náhle z jakýchkoli důvodů zastaví a díky tomu nedochází ke kolizím vozidel.

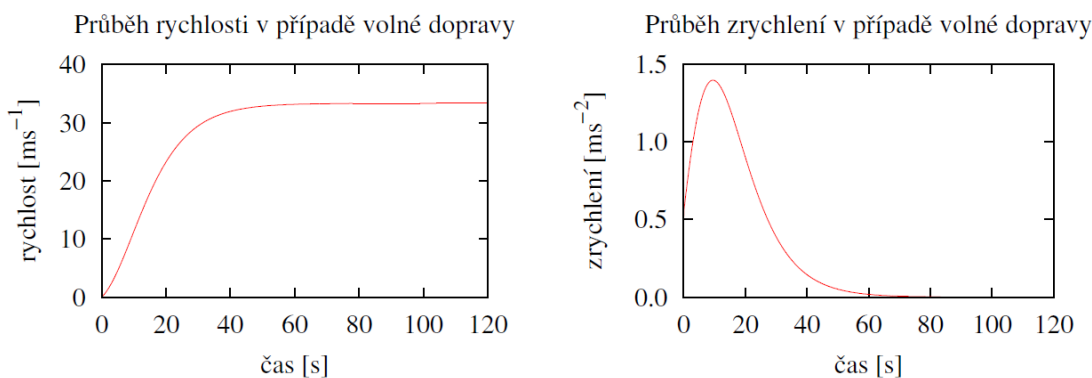
Při volném pohybu vozidlo využívá k dosažení své maximální rychlosti z počátku maximální možnou akceleraci a poté spojitě klesat k nule, tedy snaží se svou aktuální rychlost vyrovnat s hodnotou rychlosti maximální.

Z těchto předpokladů vyplývá vztah pro rychlost vozidla

$$v_n(t + \tau) \leq v_n(t) + 2,5 \cdot a_n \cdot \tau \cdot \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \cdot \sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{V_n}}, \quad (2.6)$$

kde  $v_n(t)$  je aktuální rychlost vozidla v čase  $t$ ,  $V_n$  maximální rychlost vozidla,  $a_n$  maximální akcelerace a  $\tau$  reakční doba řidiče, respektive výpočetní krok.

Číselné parametry ve výše uvedeném vztahu jsou výsledkem kalibrace dat z měření vozidla pohybujícího se v reálném dopravním proudu.



**Obrázek 2-3:** Grafické znázornění průběhu rychlosti a zrychlení pro situaci volného pohybu, kdy sledované vozidlo není omežováno okolními vozidly. Pro znázornění hodnota akcelerace  $a_n$  byla zvolena  $1,4 \text{ m/s}^2$  a maximální rychlost  $V_n = 120 \text{ km/h}$ .

V případě decelerace v reálném dopravním proudu výpočet lze výpočet rozdělit do jednotlivých kroků. Nejprve je nadefinována souřadnice  $x_{n-1 \text{ stop}}$ , což je místo na kterém zastaví předcházející vozidlo, pokud začne brzdit na souřadnici  $x_{n-1}$  v čase  $t$  s maximální decelerací  $b_n$ .

$$x_{n-1 \text{ stop}} = x_{n-1}(t) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}} \quad (2.7)$$

V návaznosti na tuto událost reaguje řidič následujícího vozidla až v čase  $t + \tau$  a zastaví na souřadnici  $x_{n \text{ stop}}$ .

$$x_{n \text{ stop}} = x_n(t) + \frac{(v_n(t) + v_n(t + \tau))\tau}{2} - \frac{v_n(t + \tau)^2}{2b_{n-1}} \quad (2.8)$$

Zároveň platí podmínka, že řidič následujícího vozidla by měl zastavit před zastavujícím vozidlem s bezpečnostní rezervou, tedy  $x_{n-1 \text{ stop}} - s_{n-1} \geq x_{n \text{ stop}}$ . Tato podmínka ovšem nepočítá s tím, že reakční doba řidiče  $\tau$  by mohla být o něco delší. Do nerovnosti tedy vstupuje bezpečnostní parametru zpoždění  $\theta$ .

$$\begin{aligned}
x_{n-1}(t) - \frac{v_{n-1}^2}{2b_{n-1}} - s_{n-1} & \tag{2.9} \\
\geq x_n(t) + \frac{(v_n(t) + v_n(t + \tau))\tau}{2} + v_n(t + \tau)\theta - \frac{v_n(t + \tau)^2}{2b_n}
\end{aligned}$$

Tento parametr zamezuje vozidlu brzdít s maximální možnou decelerací v okamžiku překročení kritické vzdálenosti před překážkou a tím činí brzdňý manévř plynulejším.

Kromě plynulosti brzdňého manévř musíme vzít v potaz i skutečnost, že řidič dobře neodhadne maximální deceleraci předcházejícího vozidla  $b_{n-1}$ . Tuto hodnotu proto nahrazujeme odhadovanou decelerací  $b$ .

$$\begin{aligned}
-\frac{v_n(t + \tau)}{2b_n} + v_n(t + \tau)\left(\frac{\tau}{2} + \theta\right) - [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] + v_n(t)\frac{\tau}{2} & \tag{2.10} \\
+ \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b} \leq 0
\end{aligned}$$

Hodnoty  $\tau$  a  $\theta$  jsou velmi důležité pro popis modelovaných vozidel. Pokud bude platit  $\theta = \tau/2$ , a odhadovaná decelerace  $b$  nebude podceněna, vozidlo dosáhne stabilního stavu na neomezeně dlouhou dobu. Po dosazení získáváme rovnici ve tvaru

$$\begin{aligned}
-\frac{v_n(t + \tau)^2}{2b_n} + v_n(t + \tau)\tau - [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] + v_n(t)\frac{\tau}{2} & \tag{2.11} \\
+ \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b} \leq 0
\end{aligned}$$

Jedná se o kvadratickou rovnici s kořeny  $v_{n1,2}(t + \tau)$ , které představují bezpečnou rychlost vozidla v následujícím kroku. Relevantní je pouze kladná hodnota, kterou lze vyjádřit nerovností 2.12.

$$v_n(t + \tau) \leq b_n \tau + \sqrt{b_n^2 \tau^2 - b_n [2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{b}]} \quad (2.12)$$

Tato nerovnice tedy vyjadřuje druhý přístup k výpočtu  $v_n(t + \tau)$  a plní souhrnný vztah, kde se bere menší hodnota z těchto dvou přístupů výpočtu.

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ \begin{array}{l} v_n(t) + 2,5a_n \tau \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \sqrt{\left(0,025 + \frac{v_n(t)}{V_n}\right)}; \\ b_n \tau + \sqrt{b_n^2 \tau^2 - b_n [2(x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)) - v_n(t) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{b}]} \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Jsou zde tedy dvě možnosti pro výpočet rychlosti sledovaného vozidla. Pokud bude ve výpočtu upřednostňována první možnost, tak se bude jednat o volný pohyb vozidla, kde nejsou v jeho blízkém okolí žádné překážky a jediným limitujícím faktorem je maximální rychlost. Naopak do druhé varianty výpočtu vstupuje několik omezujících faktorů, tudíž se bude jednat o pohyb v hustém dopravním proudu.

## 2.2.2 Shrnutí vlastností Gippsova modelu

Gippsov model následujícího vozidla byl prvním dopravním modelem, který dokázal zachytit charakteristiky reálného dopravního proudu a to jen s použitím parametrů, které se týkají přímo modelovaného pohybu vozidla. Chování tohoto modelu je výrazně ovlivněno pouze třemi faktory: rozdělením maximálních rychlostí  $V_n$ , reakční dobou řidiče  $\tau$ , a poměrem mezi hodnotou decelerace a odhadem decelerace ze strany řidiče  $b/b$ .

Gippsov model, částečně s Wiedemannovým modelem, spadají do kategorie modelů optimální rychlosti (OVM modely), kde průběhy dynamických veličin mají hladký průběh, avšak častokrát v rozporu s realitou, kdy vypočtené veličiny mohou překračovat fyzikální možnosti.

## 2.3 Model inteligentního řidiče

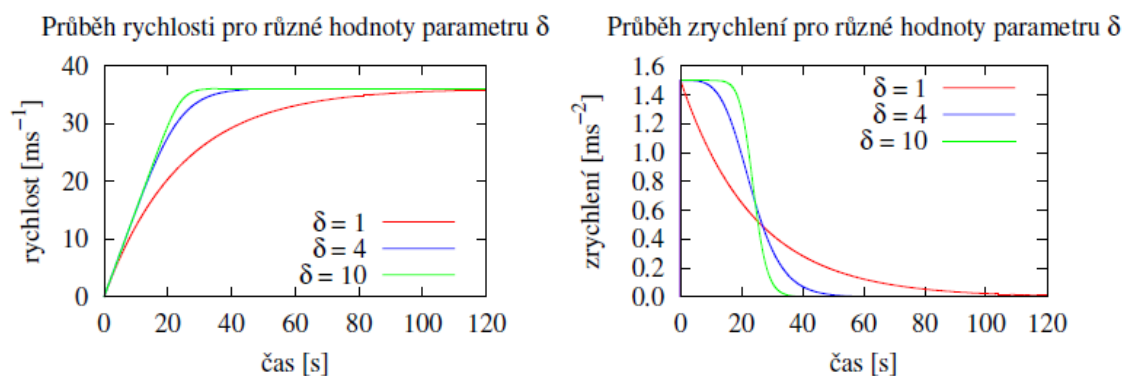
Model inteligentního řidiče (IDM) je další z řady mikroskopických modelů následujícího vozidla a v současnosti je považován za jeden z nejlepších dopravních modelů svého druhu. [1]

### 2.3.1 Definice modelu

Základem je stanovení závislosti funkce akcelerace sledovaného vozidla  $a_i = dv_i/dt$  o délce  $l_i$  jako spojitě funkce několika veličin: rychlosti  $v_i$ , odstupu od předcházejícího vozidla  $s_i(t) = x_{n-1}(t) - x_i(t) - l_i$  a relativní rychlosti sledovaného a předcházejícího vozidla  $\Delta v_i(t)$ . Pro základní popis zrychlení vozidla je definován vztah:

$$a_i(s_i, v_i, \Delta v_i) = a_{i0} \left[ 1 - \left( \frac{v_i}{v_{i0}} \right)^\delta - \left( \frac{s_{opt}(v_i, \Delta v_i)}{s_i} \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

kde  $a_{i0}$  je komfortní zrychlení,  $v_{i0}$  cílová rychlost vozidla a parametr  $\delta$  se snaží o realističnost akcelerace vozidla, kde krajními hodnotami jsou  $\delta = 1$ , která představuje exponenciální zrychlení, a  $\delta \rightarrow \infty$ , která je pro konstantní průběh zrychlení jdoucí do okamžiku dosažení maximální rychlosti vozidla. Vliv tohoto parametru na vozidlo je zobrazen na obrázku 2-4.



**Obrázek 2-4:** Znárodnění vlivu parametru  $\delta$  na rychlost a zrychlení vozidla pro případ, že sledované vozidlo není omezeno žádnými vnějšími vlivy. Pro znázornění zde byly použity hodnoty:  $a_0=1,4 \text{ m/s}^2$  a  $v_0=120 \text{ km/h}$ .

Z výše uvedené rovnice vyplývá, že pro případ volného dopravního proudu, kdy vozidlo není omežováno účastníky provozu, a tedy platí  $s_i \rightarrow \infty$ , tvar rovnice pro zrychlení je vyjádřen jako:

$$a_{i \text{ acc}} = a_{i 0} \left[ 1 - \left( \frac{v_i}{v_{i 0}} \right)^\delta \right]. \quad (2.15)$$

Vztah definující zpomalení vozidla má fyzikální charakter a výrazně závisí na vzdálenosti  $s_i$  od předcházejícího vozidla.

$$a_{i \text{ dec}}(s, v, \Delta v) = -a_{i 0} \left( \frac{s_{opt}}{s_i} \right)^2 \quad (2.16)$$

kde  $s_{opt}$  je tzv. efektivní optimální vzdálenost definovaná jako

$$s_{opt}(v, \Delta v) = s_{i 0} + v_i T_i + \frac{v_i \Delta v_i}{2\sqrt{a_{i 0} b_{i 0}}} \quad (2.17)$$

Parametr  $s_{i 0}$  představuje minimální vzdálenost mezi vozidly při zcela zastavené dopravě, a tedy řidič se snaží udržet optimální vzdálenost od předcházejícího vozidla, která je dána součtem minimální vzdálenosti  $s_{i 0}$ , bezpečné vzdálenosti  $vT$ , kde  $T$  je zvolený časový odstup a členu vyjadřující strategii brzdění. Řidič za běžných situací přibližuje míru decelerace ke komfortní hodnotě  $b_0$  a naopak v kritických situacích brzdí více agresivně. Kritickou situací rozumíme okamžiky, kdy nezbytná decelerace vozidla  $(\Delta v)^2/2s_{opt}$  přesáhne hodnotu  $b_0$ .



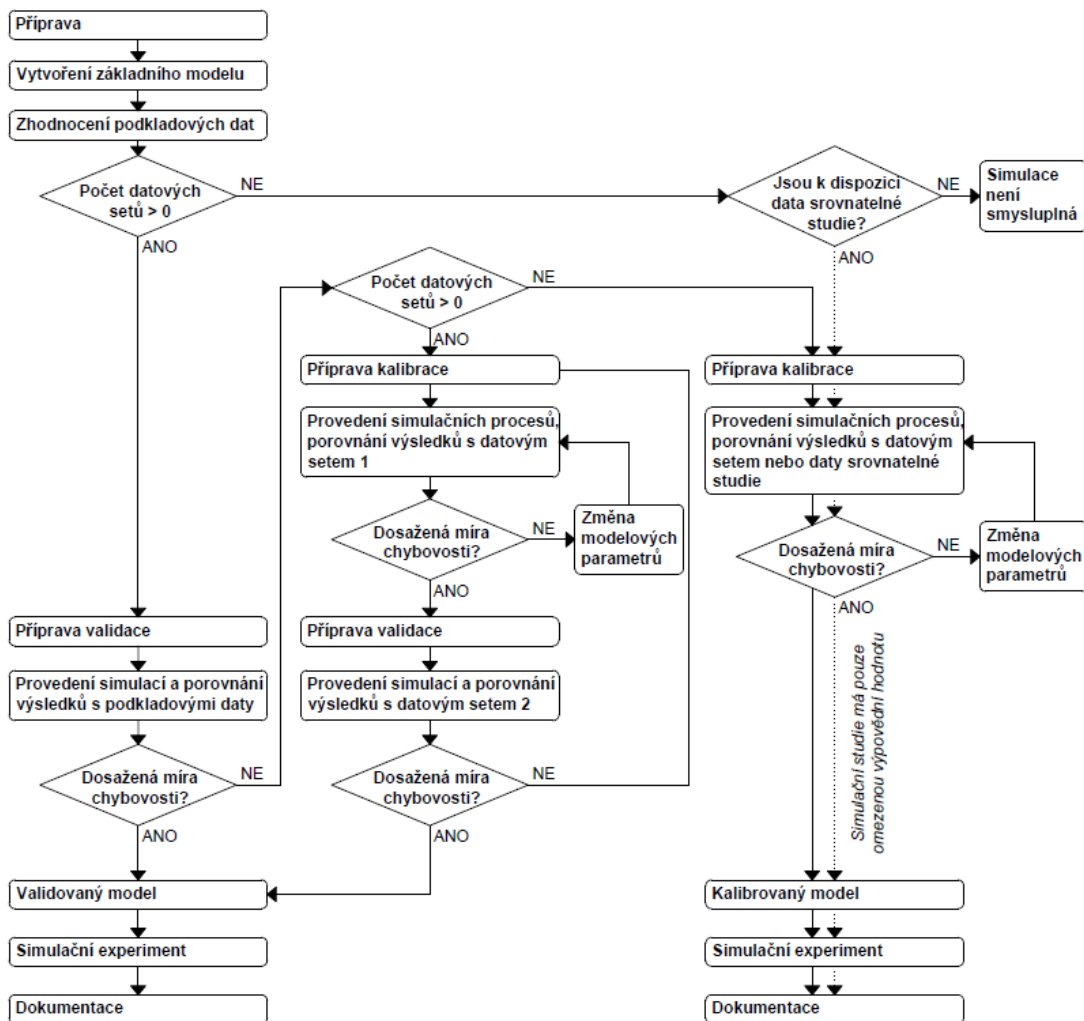
Velkou výhodou modelu IDM je nízký počet parametrů, které jdou navíc snadno představitelné. Kompletní seznam těchto parametrů spolu s jejich typickými a smysluplnými hodnotami je uveden v následující tabulce.

Parametr modelu	Typická hodnota	Smysluplné hodnoty
Maximální rychlost $v_0$ [km/h]	120	50 – 200
Bezpečný časový odstup $T$ [s]	1,5	0,9 – 3
Minimální vzdálenost $s_0$ [m]	2,0	1 – 5
Komfortní zrychlení $a_0$ [m/s <sup>2</sup> ]	1,4	0,3 – 3
Komfortní brzdění $b_0$ [m/s <sup>2</sup> ]	2,0	0,5 - 3

**Tabulka 2-1:** Přehled parametrů IDM modelu při  $\delta=4$ .

### 3 Obecný postup při tvorbě mikrosimulace

Tvorba mikrosimulačního modelu je komplexní úloha, která v sobě nese několik důležitých rozhodnutí, které mohou zásadně ovlivnit výsledek simulace. Pro snadnější výběr těchto rozhodnutí a vůbec pro přehlednost celého procesu tvorby modelu bylo sestaveno následující schéma. [5]



Obrázek 3-1: Schéma průběhu simulační studie

## 3.1 Účel a rozsah studie

Před vlastní tvorbou modelu musíme zodpovědět na několik otázek:

- Proč je simulace potřebná?
- Jaké situace mají být vytvořeny a co z nich bychom měli vyčíst?
- Kdo je odběratelem výsledků?
- Co bude a nebude v simulaci zohledněno?

Po nalezení odpovědí na tyto otázky hledáme nástroj, kterým bychom je realizovali. Při výběru je mj. také důležité vzít v potaz rozsah a kvalitu vstupních dat, požadovanou míru detailu, definovat časový rámec (zpravidla špičkovou hodinu), určit nákladovou efektivitu simulační studie, kterou můžeme zvýšit vhodným zjednodušením modelu, jako např.: nahrazení komplikovaného způsobu simulace pěších jednodušším nebo zanedbání velmi málo využívaných manévrů. V neposlední řadě určit prostorový rozsah studie. [5]

Stanovením prostorového rozsahu studie se vymezí tzv. ovlivněná oblast, ve které dochází ke změnám vlivem změn v zájmové oblasti. Ovlivněná oblast by měla být dostatečně velká, aby pokryla co nejvíce změn v chování dopravy a aby byly odhaleny všechny kritická místa.

## 3.2 Sběr a příprava dat

### 3.2.1 Geometrie

Mezi geometrické parametry patří počet pruhů, jejich šířka, délka, podélný sklon, dále horizontální zakřivení a návrhová rychlost. V křižovatkách je nutné znát úhel křížení, počty řadících odbočovacích pruhů. [5]

Tyto podklady lze získat z digitálního podkladu ve formě dwg/dxf/dgn výkresů posuzovaného projektu, pro zakreslení současného stavu jsou vhodné ortofotomapy.

### 3.2.2 Řízení dopravy

Signální plány světelně řízených křižovatek je možné získat přímo od správců komunikací, případně od jejich zpracovatelů. Alternativou je pozorování a sběr těchto dat přímo na místě, pokud nám postačí statické signální plány.

Obdobné zdroje dat platí i pro svislé a vodorovné dopravní značení.

### 3.2.3 Aktuální dopravní zatížení

Data o aktuálním dopravním zatížení lze získat přímým měřením, ať už manuálním nebo automatickým, nebo převzít z makroskopického modelu, pokud existuje.

Pro mikrosimulaci bývají kódována v podstatě třemi možnými způsoby.

- *Ve formě matic přepravního proudu:*

Zde pro každé vozidlo je dopředu dána trasa, po které se pohybuje, resp. počty vozidel jedoucích z místa A do místa B, z místa B do místa C, atd.

- *Ve formě vstupních intenzit a podílech na jednotlivých trasách:*

Jsou dány intenzity dopravy na vstupních úsecích modelované oblasti a procenta odbočení v jednotlivých uzlech. Vozidlo dostane informaci o své trase po vjezdu do modelu.

- *Ve formě vstupních intenzit a intenzit na všech křižovatkových směrech v jednotlivých křižovatkách:*

Jsou dány nejen intenzity dopravy na vstupních úsecích, ale i intenzity dopravy ve všech mezikřižovatkových úsecích. Vozidlo dostane informaci o trase průjezdu přes jednotlivou křižovatku až před samotnou křižovatkou.

### 3.2.4 Kalibrační data

Kromě samotné intenzity dopravy jsou zapotřebí shromáždit i další data, která poslouží jako data kalibrační. Jedná se například o cestovní časy, rychlosti dopravního proudu, doby zdržení či délku kolony.

### 3.2.5 Budoucí dopravní zatížení

Dopravní zatížení pro výhledové období lze získat buď z makro/mezoskopického modelu, nebo nemodelově pro hrubý odhad s využitím koeficientů růstu dopravy.

Zde je nutné vzít na vědomí skutečnost, že prognóza na základě koeficientů nepracuje s kapacitou systému, tudíž v těchto případech je nutné prognózu upravit.

Tak jako každá předpověď budoucího stavu nese s sebou míru nejistoty. Prognózu dopravy může ovlivnit ekonomický a urbanistický vývoj oblasti a i malé změny v kapacitě systému mohou vést k velkému ovlivnění odhadu budoucího zatížení. Dopravní prognózu pro výhledové období lze získat z makro/mezoskopického dopravního modelu, nebo pro jednoduché případy s využitím růstových koeficientů.

## 3.3 Tvorba modelu

Tvorba modelu se může lišit v závislosti na použitém softwaru, ale přitom všechny fungují na všeobecných principech a zásadách. Následující postup implementuje do modelu 3 hlavní typy vstupních dat – geometrii modelu, řídicí data, dopravní zatížení. [5]

- 1) Import podkladové grafiky.
- 2) Nastavení standardních parametrů modelových prvků.
- 3) Definice skladby dopravního proudu.
- 4) Definice uzlů a úseků dle grafického podkladu.
- 5) Definice geometrických atributů úseků.
- 6) Definice geometrických a řídicích atributů uzlů.
- 7) Definice dopravního zatížení.
- 8) Nastavení doplňujících parametrů.
- 9) Definice veřejné hromadné dopravy.
- 10) Definice ostatních účastníků dopravního provozu.
- 11) Definice vizuálních prvků.

### 3.3.1 Odstranění chyb, ladění modelu

Při tvorbě mohou nastat určité chyby, které je nutné odhalit ještě před vlastní kalibrací. Jedná se o sérii testů zejména v těchto oblastech:

- *síťová konzistence:*

Ověření spojitosti modelu, funkčnosti tras. Na některé tyto chyby upozorní samotný program.

- *interakce:*

Správná aplikace pravidel přednosti v jízdě, změny pruhu, ověření správnosti interakcí v křižovatkách (signální plány, vozidla nejezdí přes sebe)

- *dopravní zatížení:*

Kontrolní součty na vstupu a výstupu z modelu.

### 3.3.2 Verifikace, kalibrace a validace modelu

Dalším kontrolním stupněm při tvorbě modelů je verifikace, kalibrace a validace.

*Verifikací modelu* se rozumí jakýsi vhodný výběr nástroje, před samotnou tvorbou modelu, který nám umožní zrealizovat všechny požadavky, které klademe na model. V současnosti je na trhu široké spektrum softwarových nástrojů, ale nelze automaticky předpokládat, libovolný z nich bude nabízet požadované nástroje.

*Kalibrace modelu* už řeší vazbu mezi modelem a reálnými daty. Upravujeme dílčí parametry modelu tak, abychom docílili co největší shody s reálným chováním dopravního proudu. V softwarech se nachází ohromné množství upravitelných parametrů, tudíž je zcela nereálné všechny kalibrovat, takže se snažíme omezit kalibraci na zpracovatelné množství parametrů a zbylé hodnoty nechat na výchozím nastavení.

Následující kroky jsou doporučovány pro kalibraci mikroskopických modelů.

- 1) *Kontrola dopravní sítě:*

Potřeba provést kontrolu geometrických atributů sítě, signálních plánů, zastávek veřejné hromadné dopravy atd.

2) *Kalibrace kapacity:*

Kapacitu můžeme kalibrovat pomocí parametrů jako reakční doba řidiče, zdržení při rozjezdu na světelných křižovatkách nebo kritická mezera pro změnu jízdního pruhu.

3) *Kalibrace dopravního zatížení:*

Kalibrace dopravního zatížení se obvykle provádí na vybraných úsecích komunikací.

4) *Kalibrace dopravního výkonu:*

Posledním krokem je kalibrace parametrů, jako zdržení, cestovní čas, či délka kolony a musí se provádět s ohledem na předchozí kroky kalibrace, protože může dojít např. ke změně kapacity komunikace.

*Validace modelu* je finální testem vytvořeného modelu, který by měl být oddělen od procesu kalibrace a to především typem použitých testovacích dat, abychom zpětně neohrozili proces kalibrace. V tabulce níže jsou uvedeny možné validační veličiny.

formulace úlohy	možná validační veličina
vjezdové chování	rozdělení časových mezer
	akceptované časové mezery
	vytížení jednotlivých pruhů
	místo a počet změn pruhů
volba trasy a přiřazování na síť	profilové zatížení
	délka kolony
	procentuální efektivnost/atraktivita trasy
	intenzita odbočujících
	cestovní čas
kapacita hlavní komunikace	intenzita dopravy
	rychlost
dopravní provoz na úrovňové křižovatce	vstupní čas
	délka kolony
	cestovní čas
	zdržení
	kritické časové mezery
dopravní chování v koridoru	rychlostní profil
	počet zastavení
kapacita silničních zařízení	doba pobytu
	délka kolony

**Tabulka 3-1:** Možné validační veličiny pro jednotlivé úlohy

Je nutné mít na paměti, že díky stochastické povaze řady prvků se upravená data nikdy nebudou přesně shodovat s realitou. Nelze však tuto neshodu zcela ignorovat. Hladinu spolehlivosti okolo 70 % považujeme již za nízkou a naopak 95 % je velmi dobrá shoda. Doporučuje se tedy hladina spolehlivosti 90 %.

### 3.3.3 Čas k překonání stavu nulové saturace

Při vytvoření nového modelu a spuštění simulace dojde ke stavu, kdy v síti nejsou žádná vozidla, model má nulovou saturaci. Časový úsek od startu simulace nazýváme „zahřívací“ periodou a její doba trvání by měla být až do okamžiku, kdy dojde k rovnovážnému stavu na síti a počet vozidel se nebude příliš měnit.

## 3.4 Interpretace výstupů

- *Popisná interpretace:*

Důkladný popis výsledků jednotlivých variant a sledovaných veličin formou slovního popisu

- *Tabelární interpretace:*

Obvykle je využívána pro srovnání návrhových variant s variantou nulovou, nebo současným stavem, případně srovnání návrhových variant za pomoci absolutních a relativních hodnot veličin.

- *Grafická interpretace:*

Grafy, obrázky, schémata, diagramy výsledných hodnot.

- *Dynamická interpretace:*

Animované obrázky, grafy; videozáznamy zobrazující reálný pohyb vozidel v dopravním proudu se zaměřením na konkrétní aspekt simulace (délka kolony).



## 4 Popis řešené lokality Zemského stadionu Brno

Pro praktické implementování poznatků týkajících se tvorby mikrosimulačních modelů dopravy byla vybrána lokalita sportovišť za Lužánkami v Brně, kde je uvažováno s její komplexní rekonstrukcí a rozšířením, a vznikem souboru sportovišť pod názvem Sportovní areál Ponava (fotbalový stadion, víceúčelová hala, akvapark, plavecký stadion).

Areál o celkové ploše cca 25,72 ha se nachází v sousedství městského parku Lužánky a je ohraničen ze západu ulicí Sportovní, z jihu ulicí Drobného, z východu arboretum Mendelovy univerzity v Brně a ze severu areálem výtopny Červený mlýn a NC Královo Pole. [8]



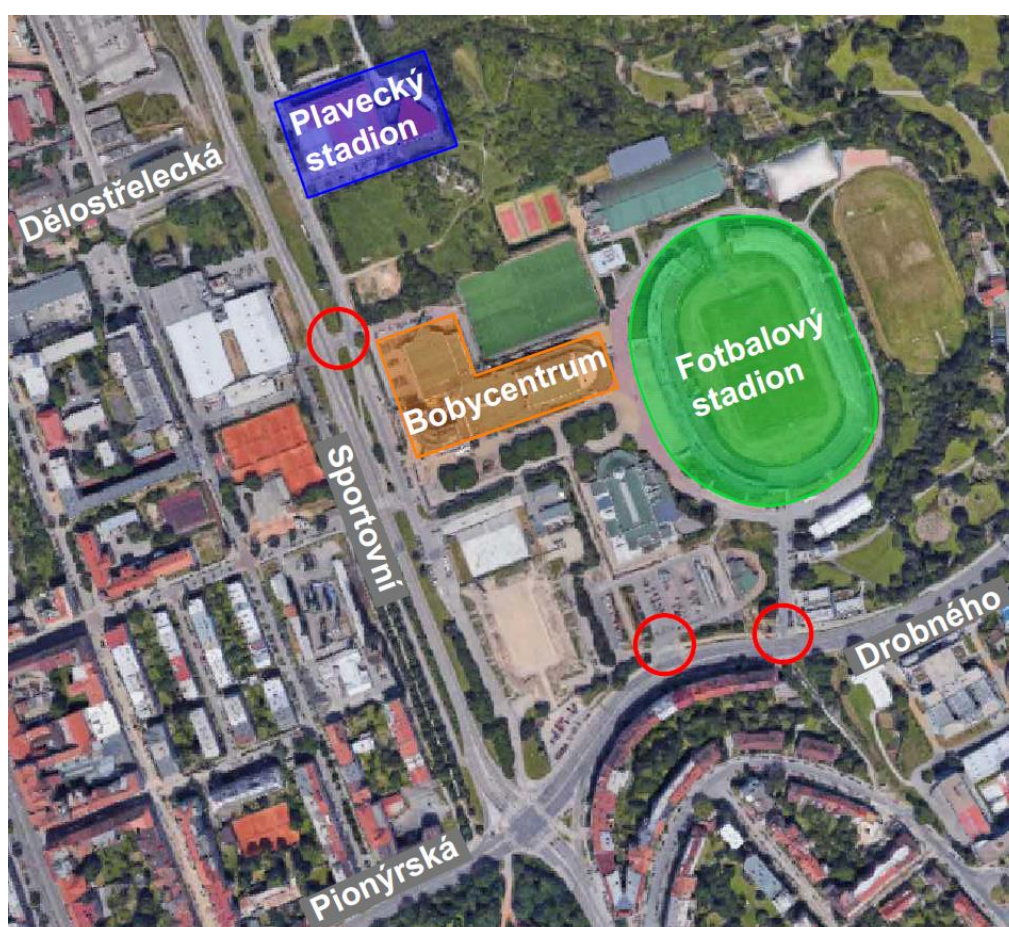
*Obrázek 4-1: Řešené území sportovního areálu Ponava*

Přestavba tohoto areálu je dlouholetým diskutovaným tématem. První urbanistická studie vznikla již v roce 2005 a od té doby bylo vytvořeno několik variant. Pro zkoumání byly vybrány 2 varianty, z roku 2014 (varianta A) a z roku 2017 (varianta B), přičemž se zejména liší v uspořádání připojení výjezdů z areálu na přiléhající komunikace.

Právě testování kapacity výjezdů v době ukončení akcí, kdy se očekává výjezd všech vozidel z plně obsazených parkovacích ploch, je předmětem dalších kapitol.

## 4.1 Současný stav

V současnosti je areál jako celek má celkem 3 výjezdy na přiléhající komunikace. Jeden na ulici Sportovní, mezi Bobycentrem a plaveckým stadionem za Lužánkami, a zbývající dva na ulici Drobného, z čehož jeden slouží jako výjezd z parkovacích ploch a druhý připojuje fotbalový stadion a přilehlá sportoviště.



*Obrázek 4-2: Detail řešeného území s vyznačenými výjezdy*

## 4.2 Návrhový stav

V obou návrhových variantách se předpokládá souběh akcí v základních objektech areálu a to na fotbalovém stadionu, ve víceúčelové hale, v akvaparku i plaveckém stadionu.

Dopravní zatížení je uvažováno pro horizont 2030 a to pro jak automobilovou a nákladní dopravu, tak veřejnou hromadnou dopravu. Ulice Sportovní je již v současnosti intenzivně zatížena a je tudíž uvažováno s jejím zkapacitněním na čtyřpruhovou směrově dělenou komunikaci, na které budou vloženy nové křižovatky, případně upraveny stávající dle variant projektu. Na Ulici Drobného budou zásahy pouze úpravou stávajících křižovatek.

### 4.2.1 Varianta A

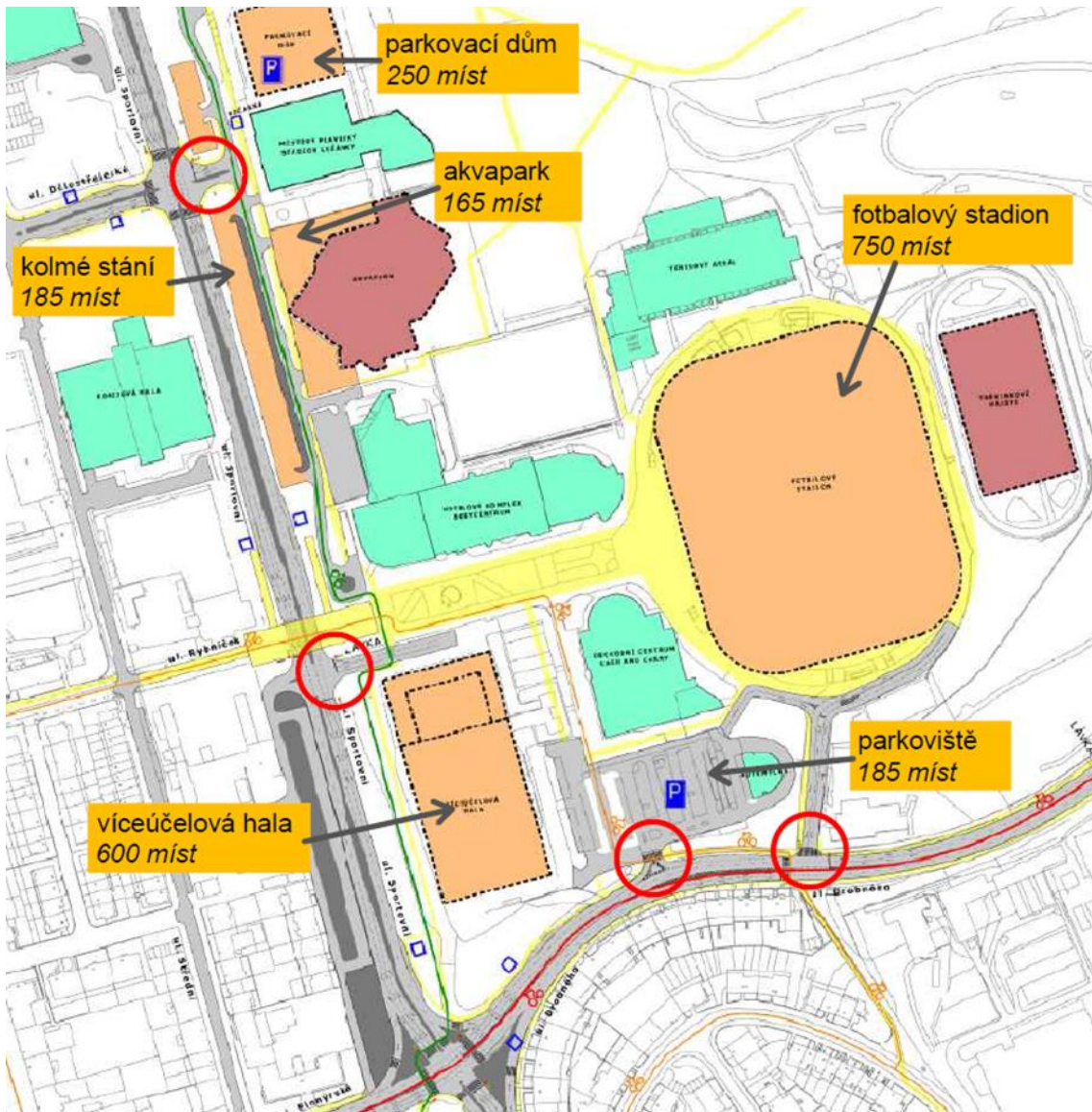
Ve variantě z roku 2014 se předpokládá naplnění kapacit na těchto parkovacích plochách:

fotbalový stadion	750 míst
víceúčelová hala	600 míst
akvapark	165 míst
parkovací dům	250 míst
parkovací plochy – kolmé stání	180 míst
parkoviště u „Cash & Carry“	185 míst
<hr/>	<hr/>
celkem	2130 míst

**Tabulka 4-1:** Počet parkovacích míst ve variantě A

Tento počet vozidel je rozdělen do čtyř výjezdů. Fotbalový stadion je připojen na ulici Drobného výjezdem na křižovatku se světelnou signalizací. Parkoviště u „Cash & Carry“ je připojeno taktéž na ulici Drobného 95 metrů od SSZ formou přídavných pruhů. Víceúčelová hala je navržena se samostatným výjezdem na ulici Sportovní, křižovatka taktéž řízena světelnou signalizací. Zbylé parkovací místa (595 míst) je svedeno ke křižovatce Sportovní – Dělostřelecká, která je upravena ze stykové na průsečnou.





Obrázek 4-3: Situace varianty A s vyznačenými výjezdy z areálu

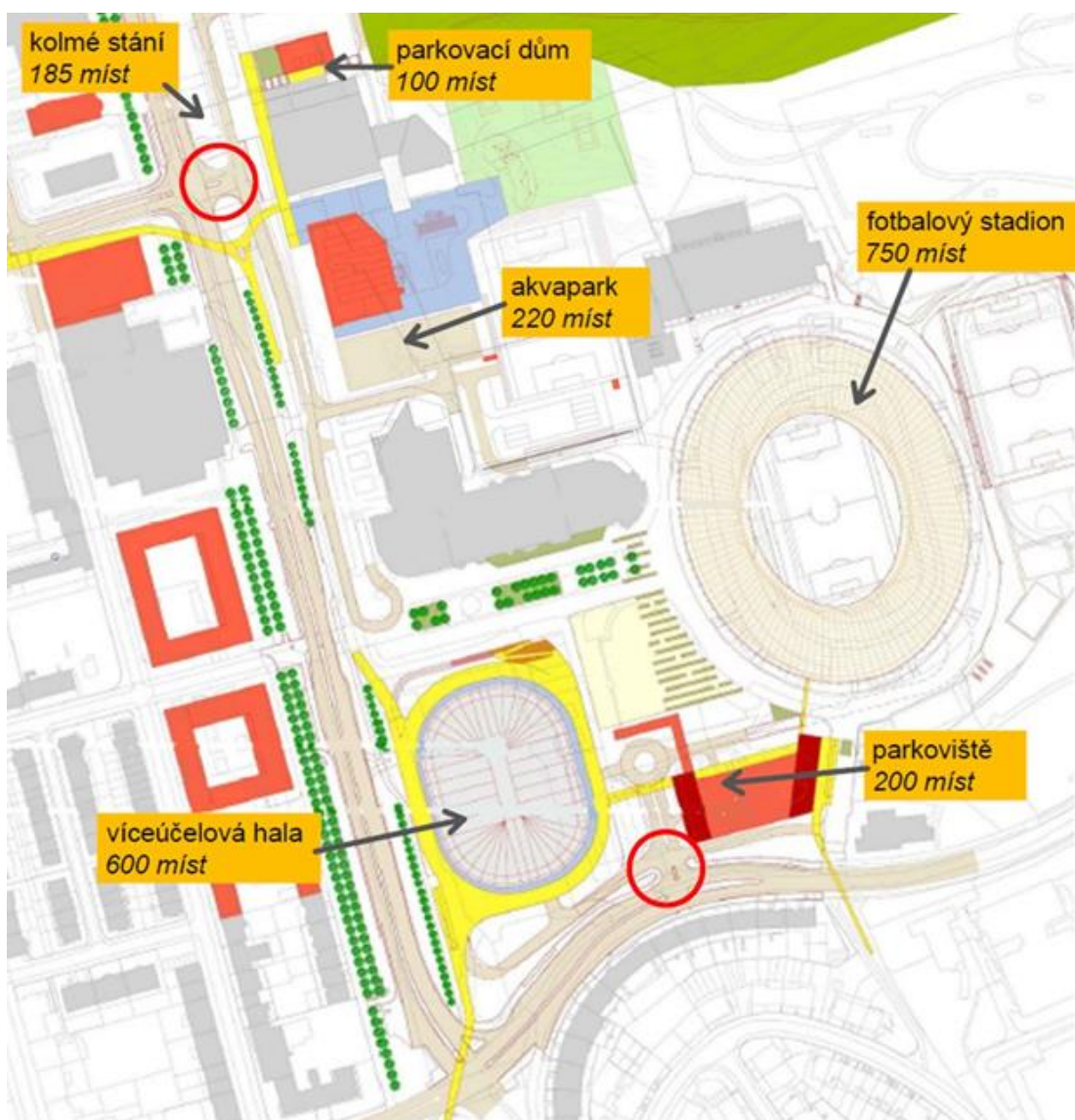
## 4.2.2 Varianta B

Ve variantě z roku 2017 se předpokládá naplnění kapacit na těchto parkovacích plochách:

fotbalový stadion	750 míst
víceúčelová hala	600 míst
akvapark	220 míst
parkovací dům	100 míst
parkovací plochy – kolmé stání	180 míst
parkoviště u „Cash & Carry“	200 míst
<hr/>	<hr/>
celkem	2 050 míst

**Tabulka 4-2:** Počet parkovacích míst ve variantě B

Tento počet přerozdělen pouze do dvou výjezdů z areálu. Parkovací místa u fotbalového stadionu, víceúčelové haly a parkoviště u „Cash & Carry“ mají společný světelně řízený výjezd na ulici Drobného v místě současného výjezdu pro toto parkoviště. Akvapark, parkovací dům u plaveckého stadionu a kolmé parkovací stání mají výjezd na křižovatku Sportovní – Dělostřelecká, která je i v této variantě řešena jako průsečná.



*Obrázek 4-4: Situace varianty B s vyznačenými výjezdy z areálu*

## **5 Aimsun**

### **5.1 Úvod**

Pro zpracování dopravního modelu pro tuto bakalářskou práci byl vybrán simulační nástroj od španělské firmy TSS – Aimsun (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban Networks). Tento software je velmi účinným nástrojem v oblasti dopravního inženýrství, který dokáže simulovat dopravní proud na úrovni jak makroskopické, tak mikroskopické. Jeho největší předností je snadná a rychlá tvorba modelu a následný grafický a numerický výstup. Pro složité dopravní modely disponuje širokým spektrem upravitelných parametrů. Základní parametry jsou přednastaveny, takže vzhledem z rozsahu práce, budou tyto výchozí hodnoty převzaty. [7]

### **5.2 Tvorba modelu**

#### **5.2.1 Mapový podklad**

Pro tvorbu dopravního modelu současného stavu bylo využito mapy od společnosti Google, dostupné online ve webové aplikaci. Postupně byly snímány díly mapy řešeného území v dostatečně podrobném měřítku, aby byla zřetelná geometrie dopravní sítě a stávající vodorovné dopravní značení. Tyto díly byly následně pomocí programu Adobe Photoshop Elements 13 spojeny do jednoho rastrového souboru.

Dalším krokem bylo zajištění správného rozměru a korektní souřadnicové lokalizaci v systému S-JTSK. K tomu bylo využito programu QGIS 2.18 a jeho funkce georeferencování, která zajistí výše uvedené parametry. Výstupem byl rastrový soubor ve formátu GeoTIFF.

Proces georeferencování byl proveden i pro mapový podklad pro návrhové varianty, které byly dostupné ve formátu PDF.



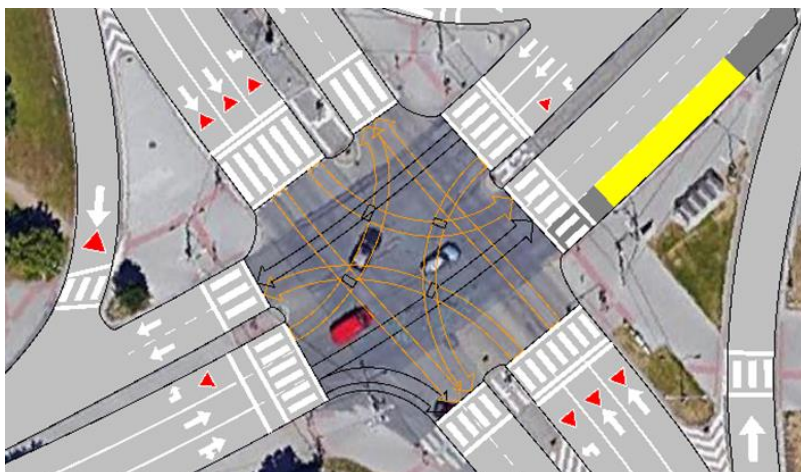
*Obrázek 5-1: Ukázka georeferencovaného mapového podkladu*

Před vložením mapového podkladu do nástroje Aimsun musíme zajistit, aby modelační prostředí bylo taktéž v souřadnicovém systému S-JTSK. To zajistíme změnou parametru EPSG na hodnotu 5514, což je mezinárodní kód identifikující systém S-JTSK v Křovákově zobrazení.

### **5.2.2 Geometrie modelu**

Přes mapový podklad lze snadno umisťovat geometrické prvky sítě. Základem jsou úseky „*sections*“, které jsou spojeny pomocí uzlů „*nodes*“. Parametry jsou upravovány podle podkladu, jedná se zejména o počty jízdních pruhů, umístění přechodů pro chodce, vodorovné značení (plné čáry), případně zastávky veřejné hromadné dopravy. V uzlech (křižovatkách) upravujeme odbočovací směry, na nichž přidáme místa zastavení „*stop lines*“ v případě, že odbočovací směr kříží směr protijedoucí.





**Obrázek 5-2:** Ukázka kompletní geometrie křižovatky

### 5.2.3 Zadání řídicích plánů křižovatek

Signální plány křižovatek pro současný stav byly získány přímým měřením, vyhodnocením videozáznamu. Poté byly upraveny počátky cyklu tak, aby bylo zachováno spolupůsobení křižovatek na dopravu. Důležitým aspektem v modelu současného stavu je přechod pro chodce na ulici Sportovní, který spíná v závislosti na poptávce pěších. Z pozorování vyplynulo, že při stálé poptávce světelná signalizace spíná průměrně 1x za minutu s červenou pro dopravu na komunikaci v trvání 17s.

Pro návrhovou variantu A byly signální plány poskytnuty společností Brněnské komunikace a.s. v rámci jejich dopravní studie této varianty.

Pro variantu B byly tyto signální plány převzaty z varianty A a upraveny počátky cyklů v závislosti na odlišné vzájemné vzdálenosti křižovatek. Navíc obdobně jako v současném stavu je zde přechod pro chodce řízený aktuální poptávkou pěších. Vzhledem k tomu, že simulace bude probíhat v době ukončení akcí, se očekává plné vytížení tohoto světelně řízeného přechodu. Délka jeho cyklu je nastavena na 100s, s červenou pro dopravu na komunikaci v trvání 31s.

Zadání signálních plánů do nástroje Aimsun je uskutečněno pomocí nejprve definováním všech směrů jízdy v křižovatce a poté pomocí funkcí „*control plan*“, do kterého se zadávají časy a doby trvání jednotlivých zelených signálů, a „*master control plan*“, který jednotlivé řídicí plány spojuje.

## 5.2.4 Zadání dopravního zatížení

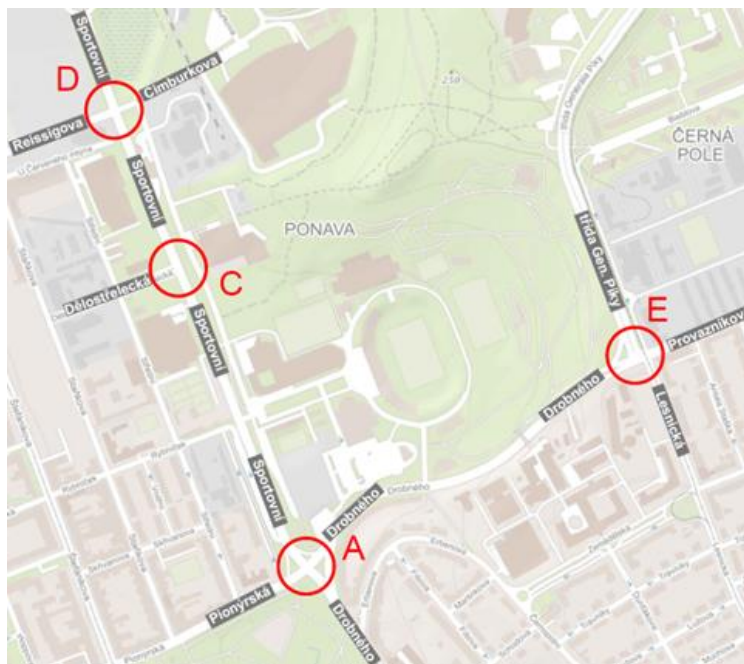
Nástroj umožňuje zadání dopravního zatížení ve dvou formách: matici přepravních vztahů „*OD Matrix*“ a dopravním stavem „*traffic state*“. Druhá možnost je v řešeném případě výhodnější, protože přímo známe intenzity dopravy a procenta odbočujících vozidel na jednotlivých křižovatkách.

Čas simulace byl nastaven na odpolední špičkovou hodinu od 17:00 do 18:00, kdy je intenzita dopravy druhá nejvyšší po ranní špičce, a kdy se v návrhových variantách očekává výjezd vozidel účastníků v po skončení akcí ve sportovním areálu Ponava.

### 5.2.4.1 Automobilová a nákladní doprava

Dopravní data pro současný stav byla použita z kartogramů křižovatek, reálného sčítání z let 2015, resp. 2016 (poskytovatel ÚDI Brněnské komunikace, a.s.). Tyto kartogramy však byly vytvořeny pouze pro křižovatky Drobného – Pionýrská – Sportovní (A) a Drobného – Tř. Gen. Píky – Provozničkova (E).

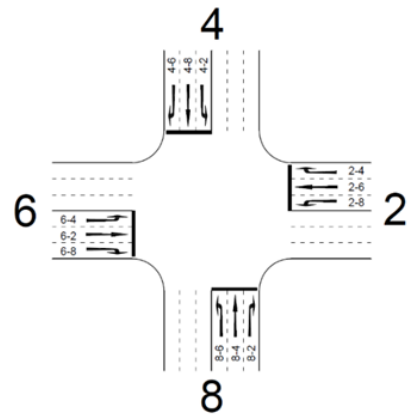
Pro křižovatky Sportovní – Dělostřelecká (C) a Sportovní – Cimburkova – Reissigova (D) byly data dostupná pouze ze sčítání dopravy na indukčních smyčkách.



**Obrázek 5-3:** Situace světelně řízených křižovatek pro model současného stavu s jejich pracovním označením

Při bližším zkoumání však bylo zjištěno, že data z indukčních smyček nesedí s daty získaných z kartogramů, viz tabulka 1, tudíž bylo přistoupeno k manuálnímu sčítání dopravy, jehož výsledek s nimi mnohem lépe korespondoval, viz tabulka 2.

Pro snadnější orientaci v křižovatkových směrech je zde následující schéma.



Z logiky věci je patrné, že hodnoty na začátku a konci mezikřižovatkového úseku musí být stejné, nebo v podobné z důvodu stochastického charakteru počtu vozidel.

**Obrázek 5-4:** Schéma pracovního značení jednotlivých směrů jízdy v křižovatce

intenzity dopravy						oprav. koef.	
↑	A4	877	=	732	C8	↑	1,20
↓	A4	798	=	870	C8	↓	1,18
↑	C4	827	=	700	D8	↑	1,18
↓	C4	894	=	947	D8	↓	0,94

**Tabulka 5-1:** Porovnání intenzit dopravy křižovatek C a D vůči křižovatce A získaných z indukčních smyček

intenzity dopravy						oprav. koef.	
↑	A4	877	=	863	C8	↑	1,02
↓	A4	798	=	747	C8	↓	1,07
↑	C4	946	=	962	D8	↑	0,98
↓	C4	801	=	952	D8	↓	0,84

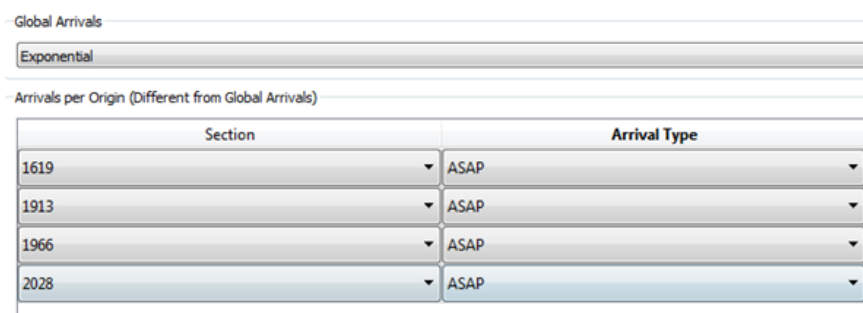
**Tabulka 5-2:** Porovnání intenzit dopravy křižovatek C a D vůči křižovatce A získaných pomocí manuálního sčítání

Zadávání dat do modelačního nástroje Aimsun probíhá zvláště pro osobní automobilovou dopravu „car“ a nákladní dopravu „truck“, přičemž technické parametry těchto druhů vozidel byly ponechány výchozí. Poté jsou zadány intenzity a procenta odbočovacích vozidel pro oba druhy vozidel do funkce „traffic state“ a následně do funkce „traffic demand“.

#### Návrhové varianty

Dopravní data pro návrhové varianty byla získána z obdobné prověřovací studie dopravní infrastruktury v řešené oblasti od společnosti Brněnské komunikace a.s., kde je uvažováno s výhledovými intenzitami pro časový horizont roku 2030. Mimo jiné jsou zde stanoveny i procenta odbočujících vozidel na jednotlivých výjezdech sportovního areálu Ponava. Data byla použita pro variantu A i variantu B.

Kromě běžné skladby dopravního proudu pro špičkovou odpolední hodinu je v návrhových variantách třeba vytvořit novou kategorii osobních automobilů, která bude definovat vozidla vyjíždějící z parkovacích míst v areálu. Počet vyjíždějících vozidel byl zadán pomocí hodinové intenzity na výjezdových úsecích v kombinaci s možností způsobu příjezdu „ASAP“.



Section	Arrival Type
1619	ASAP
1913	ASAP
1966	ASAP
2028	ASAP

**Obrázek 5-5:** Změna parametru výjezdových úseků na typ příjezdu „ASAP“

Tímto způsobem je zajištěno, že počet vozidel na výjezdu během simulace bude souhlasit s počtem příslušných parkovacích míst.

#### 5.2.4.2 Veřejní hromadná doprava

V rozsahu modelovaného území se vyskytují všechny tři složky městské hromadné dopravy – tramvaje, trolejbusy, autobusy. V programu Aimsun je přednastaven jako typ vozidla MHD pouze autobus. Model tramvaje a trolejbusu musel být dodatečně přidán.

Pro model tramvaje byla vybrána dvoudílná tramvajová souprava o celkové délce 30m. Vzhledem k tomu, že tramvajová doprava je pouze v okrajové části modelu a neovlivňuje silniční dopravu, tak její jízdní parametry byly převzaty typu vozidla autobus. Trolejbusová doprava je naopak v zájmovém území klíčovým prvkem. Je uvažováno s nasazením dvoučlánkových kloubových trolejbusů o délce 17,8m (dle aktuálního vozového parku Dopravního podniku města Brna).

### 5.3 Spuštění simulace

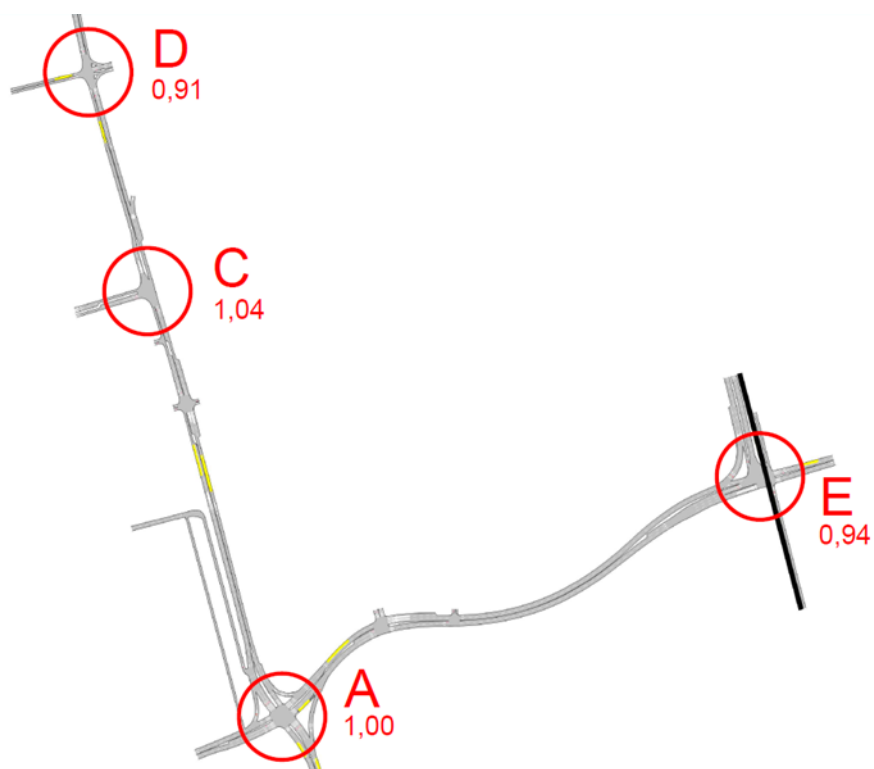
Byla tedy stanovena geometrie sítě, řídicí plány křižovatek, dopravní zatížení a trasy veřejné hromadné dopravy. Pomocí funkce „*Dynamic scenario*“ může být simulace spuštěna. Avšak pro korektnost výsledků je zde důležitý parametr s názvem „*Warm – Up*“, tedy funkce, která slouží k překonání stavu nulové saturace. Tento parametr byl v našem případě nastaven na hodnotu 5 minut.

### 5.4 Kalibrace a validace modelu

#### *Kalibrace*

Na vstupu jsou známy intenzity dopravy na všech ramenech jednotlivých křižovatek. Měření dopravních veličin však na každé křižovatce probíhalo v jiném časovém období. To má za následek značnou nekonzistenci v mezikřižovatkových úsecích, kdy intenzita dopravy na výjezdu z křižovatky na začátku úseku se nerovná intenzitě dopravy na příjezdu do křižovatky na konci úseku.

Tato nerovnost byla vyrovnána pomocí opravných koeficientů pro jednotlivé křižovatky. Křižovatka Drobného-Sportovní (A) byla určena jako referenční. Hodnota tohoto koeficientu je zobrazena na obrázku 5-6.



*Obrázek 5-6: Situace modelu současného stavu s vyznačenými křižovatkami s jejich pracovním označením a opravnými koeficienty*

## Validace

Jako validační veličina byla zvolena délka kolony, tedy počet vozidel stojících na červenou ve všech pruzích na křižovatce Drobného - Sportovní - Pionýrská (A) na rameni číslo 4 ve směru do centra města. Reálné měření pro validaci probíhalo po dobu deseti cyklů světelného signalizačního zařízení, v časovém rozmezí od 17:15 do 17:30. Ve stejném časovém úseku bylo sledováno také chování vytvořeného modelu.

pruh 1		pruh 2		pruh 3		
model	skut.	model	skut.	model	skut.	
2	4	2	2	2	7	
1	0	4	7	5	7	
2	2	7	5	6	6	
2	1	5	8	6	7	
2	0	5	7	6	6	
0	2	4	3	4	3	
1	1	4	3	5	5	
0	0	6	6	6	3	
2	3	6	4	6	3	
3	1	5	7	5	7	
průměr:	1,5	1,4	4,8	5,2	5,1	5,4
shoda:	<b>92,86 %</b>		<b>92,31 %</b>		<b>94,44 %</b>	

**Tabulka 5-3:** Srovnání modelových a skutečných hodnot pro validační účely

Hladina spolehlivosti modelových výsledků přesáhla 90 %, tedy pro naše účely můžeme proces validace považovat za úspěšný.

## 6 Vyhodnocení výsledků simulace

### 6.1 Stav běžného provozu

Dopravně-technické řešení současné komunikační sítě v řešeném území je poplatné době a se zvyšující se intenzitou dopravy by byla kapacita zejména ulice Sportovní pro horizont roku 2030 nedostačující. Proto je v návrhových variantách uvažováno s jejím rozšířením na čtyřpruhovou komunikaci, tj. zlepšením dopravních parametrů. Na druhou stranu jsou zde navrženy nové světelně řízené křižovatky na ulici Sportovní i na ulici Drobného. Změny v parametrech celé modelované sítě ukazuje následující tabulka.

	současný stav	varianta A	varianta B
doba zdržení [sec/km]	82,67	171,99	153,65
délka kolony [voz.]	37,99	92,12	67,77
prům. rychlost [km/h]	29,05	22,46	25,05
cestovní čas [sec/km]	155,38	192,62	227,70

*Tabulka 6-1: Srovnání dopravních parametrů celé sítě*

Z hodnot je patrný nárůst dopravního zatížení ve výhledových variantách, přičemž varianta B vykazuje ve většině parametrů lepší výsledky než varianta A, co se týče plynulosti běžného provozu v pracovní den při odpolední špičkové hodině.

### 6.2 Srovnání návrhových variant

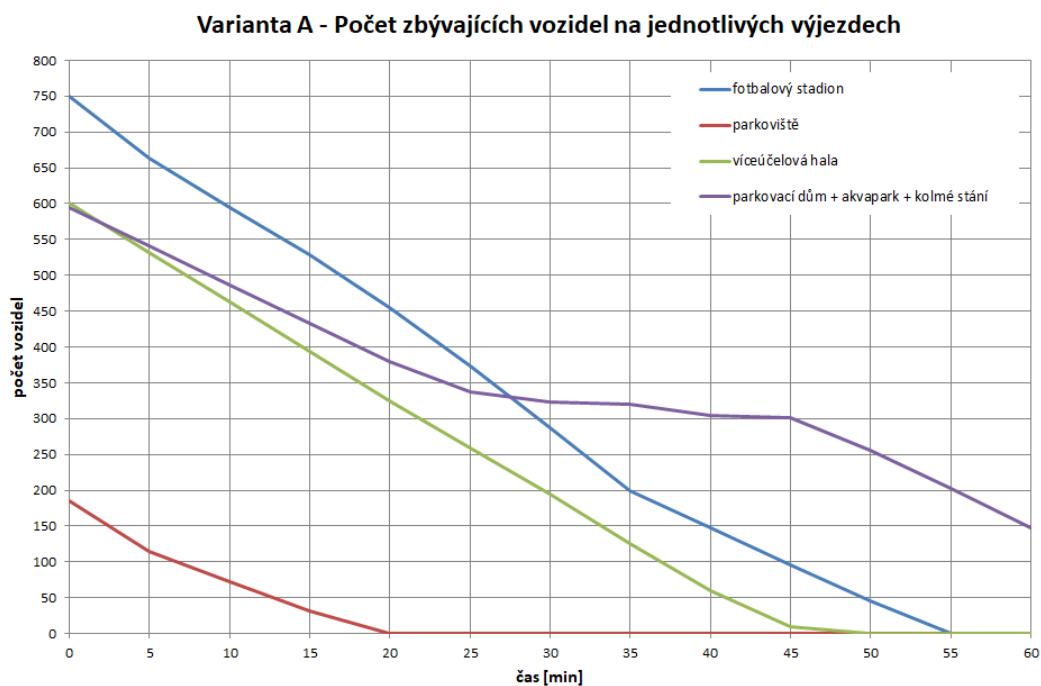
Návrhové varianty byly testovány za předpokladu ukončení sportovních akcí, a tedy koncentrovaného výjezdu vozidel na přiléhající komunikace, který značně ovlivňuje běžnou dopravu.

	varianta A	varianta B
doba zdržení [sec/km]	212,65	167,83
délka kolony [voz.]	188,86	96,32
prům. rychlost [km/h]	18,54	24,08
cestovní čas [sec/km]	289,04	241,59

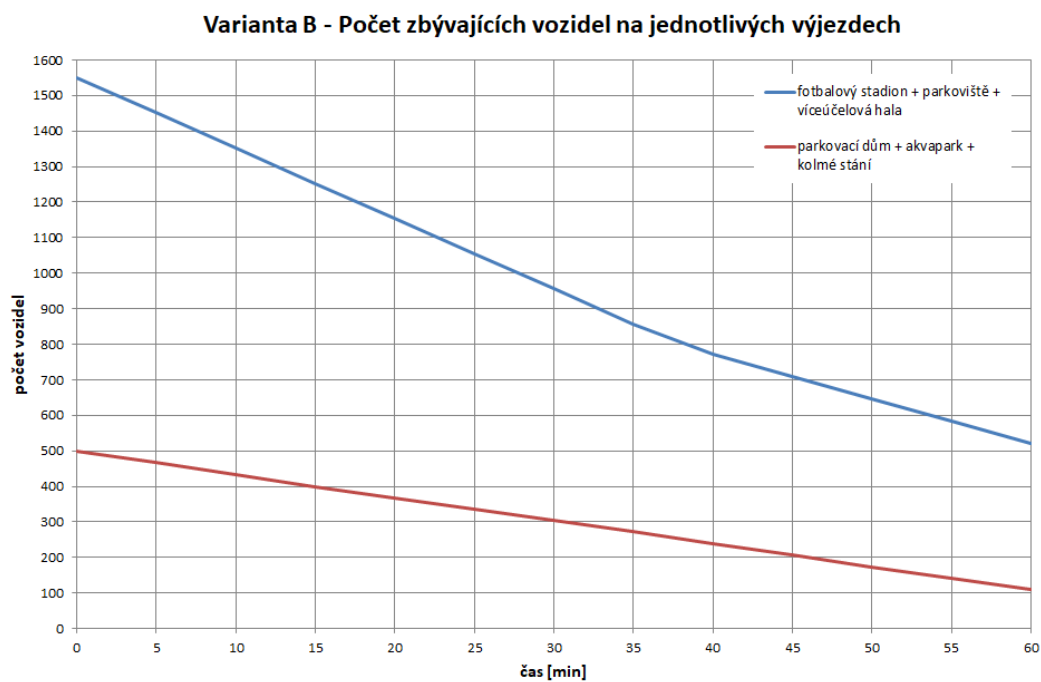
*Tabulka 6-2: Srovnání dopravních parametrů celé sítě v době ukončení sportovních akcí*



Varianta B vykazuje lepší celkové výsledky, jelikož varianta A obsahuje neřízený výjezd. Na tento faktor se váže důležitý parametr – čas potřebný k výjezdu všech vozidel z areálu.



**Graf 6-1:** Počet zbývajících vozidel na výjezdech ve variantě A



**Graf 6-2:** Počet zbývajících vozidel na výjezdech ve variantě B

Je zřejmé, že větší počet napojení areálu ve variantě A zabezpečuje rychlejší výjezd vozidel, jak je také vidět z grafů 6-1 a 6-2. Ve variantě A během simulované hodiny odjelo z areálu **93 %** všech vozidel, zatímco ve variantě B pouhých **69 %**.

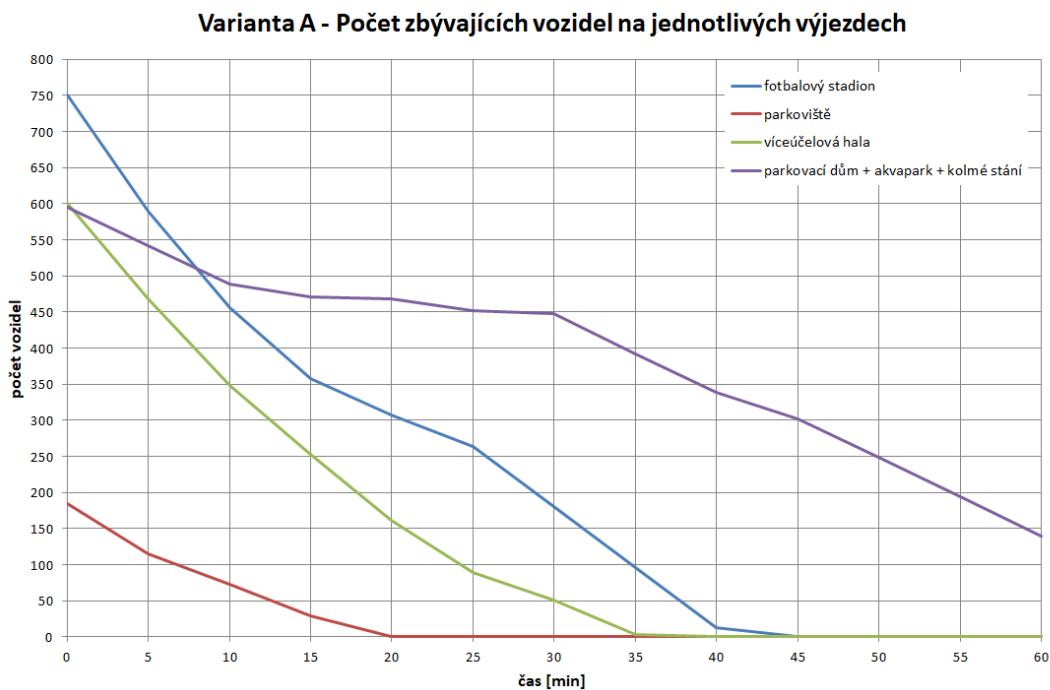
### Úprava řídicích plánů

Jednou z možností, jak korigovat celkovou dopravní situaci, je úprava signálních plánů. Pro zkoumanou situaci byly upraveny tak, aby byl zajištěn co nejrychlejší výjezd vozidel z areálu, i za cenu zhoršení celkové dopravní situace.

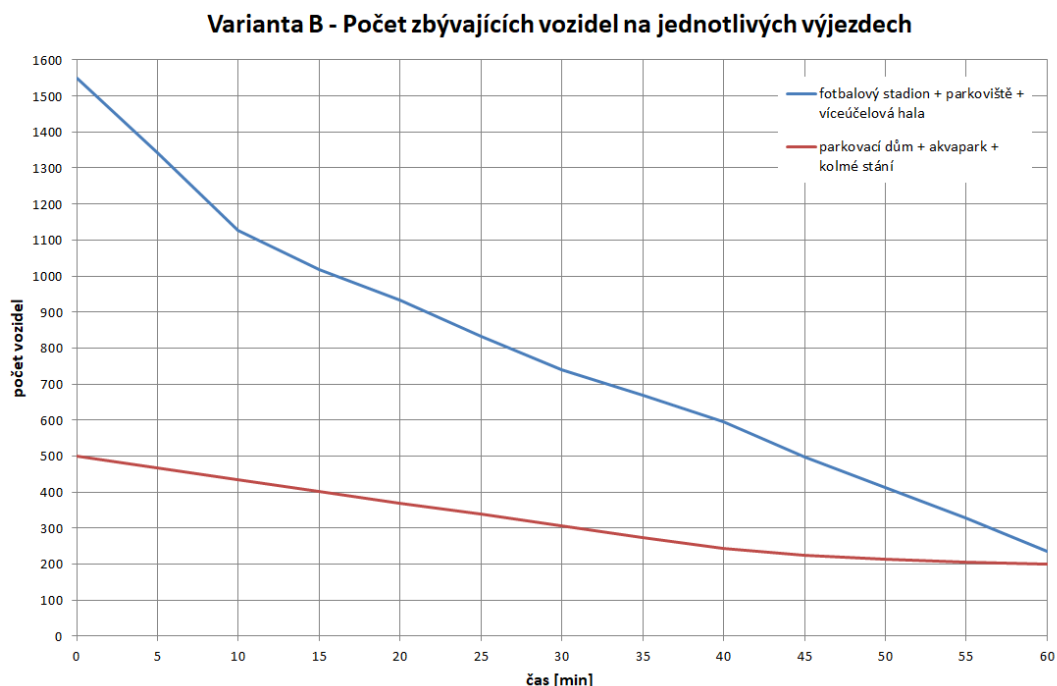
	varianta A	varianta B
doba zdržení [sec/km]	208,51	199,53
délka kolony [voz.]	193,59	154,12
prům. rychlost [km/h]	18,23	20,37
cestovní čas [sec/km]	284,71	274,03

**Tabulka 6-3:** Srovnání dopravních parametrů celé sítě v době ukončení sportovních akcí po úpravě řídicích plánů

Úpravou signálních plánů došlo v obou případech ke vzájemnému přiblížení parametrů celého modelu pro obě varianty.



**Graf 6-3** Počet zbývajících vozidel na výjezdech ve variantě A po úpravě signálních plánů



**Graf 6-4** Počet zbývajících vozidel na výjezdech ve variantě B po úpravě signálních plánů

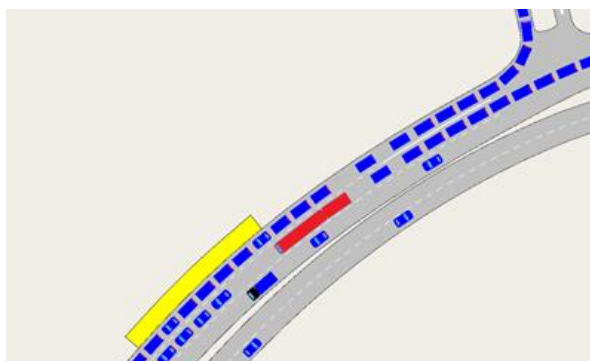
Úpravou signálních plánů bylo ve variantě A bylo dosaženo zkrácení doby výjezdu vozidel z areálu v průměru o **10 minut**, kromě výjezdu naproti ulici Dělostřelecké, kde změna signálního plánu nebyla možná z důvodu vysokých intenzit dopravy na hlavní komunikaci.

Ve variantě B úpravou došlo ke zlepšení času výjezdu a během modelované hodiny poměr vozidel, která skutečně odpustila areál vůči celkovému počtu vozidel v areálu, vzrostl na **79 %**. Ovšem za cenu výrazného zhoršení dopravní situace na okolních komunikacích.

Celkový pohled na intenzity dopravy pro všechny modelové případy v přílohách 1 – 4.

### *Vliv na městskou hromadnou dopravu*

Vysoká intenzita dopravy na ulici Drobného také velmi ovlivňuje páteřní trolejbusové linky 25 a 26, které jsou pro obsluhu řešeného území zásadní. V některých případech dochází dokonce k zablokování příjezdu trolejbusu na zastávku.



**Obrázek 6-1:** Ukázka vlivu dopravy na trolejbus

Následující tabulka ukazuje změny v dopravních parametrech trolejbusů na trase Pionýrská - Drobného - Provazníková.

	zdržení [sec/km]	cestovní čas [sec/km]	rychlost [km/h]
Současný stav	50,16	160,94	24,39
Varianta A - bez výjezdu vozidel	98,54	212,65	17,41
Varianta A - s výjezdem vozidel	123,54	256,90	15,15
Varianta A - s výjezdem vozidel a úpravou signálních plánů	122,82	271,09	14,75
Varianta B - bez výjezdu vozidel	85,48	199,03	18,50
Varianta B - s výjezdem vozidel	87,05	204,46	17,96
Varianta B - s výjezdem vozidel a úpravou signálních plánů	107,18	235,95	15,63

**Tabulka 6-4:** Srovnání celkových parametrů pro trolejbus

V řešeném území je tedy třeba hledat kompromis mezi rychlostí výjezdu vozidel z areálu a přípustným vlivem na trolejbusovou dopravu. Z tohoto důvodu by výjezdy z areálu bylo vhodné řídit světelnou signalizací.

## Závěr

Mikroskopické modelování dopravy je již nezbytnou součástí při projektování dopravních staveb, zejména v intravilánu města. Simulací lze snadno a rychle otestovat několik variant řešení projektu a vybrat tak to nejvhodnější.

Cílem mé práce bylo porozumět problematice principu fungování modelů dopravy a následně jejich tvorby.

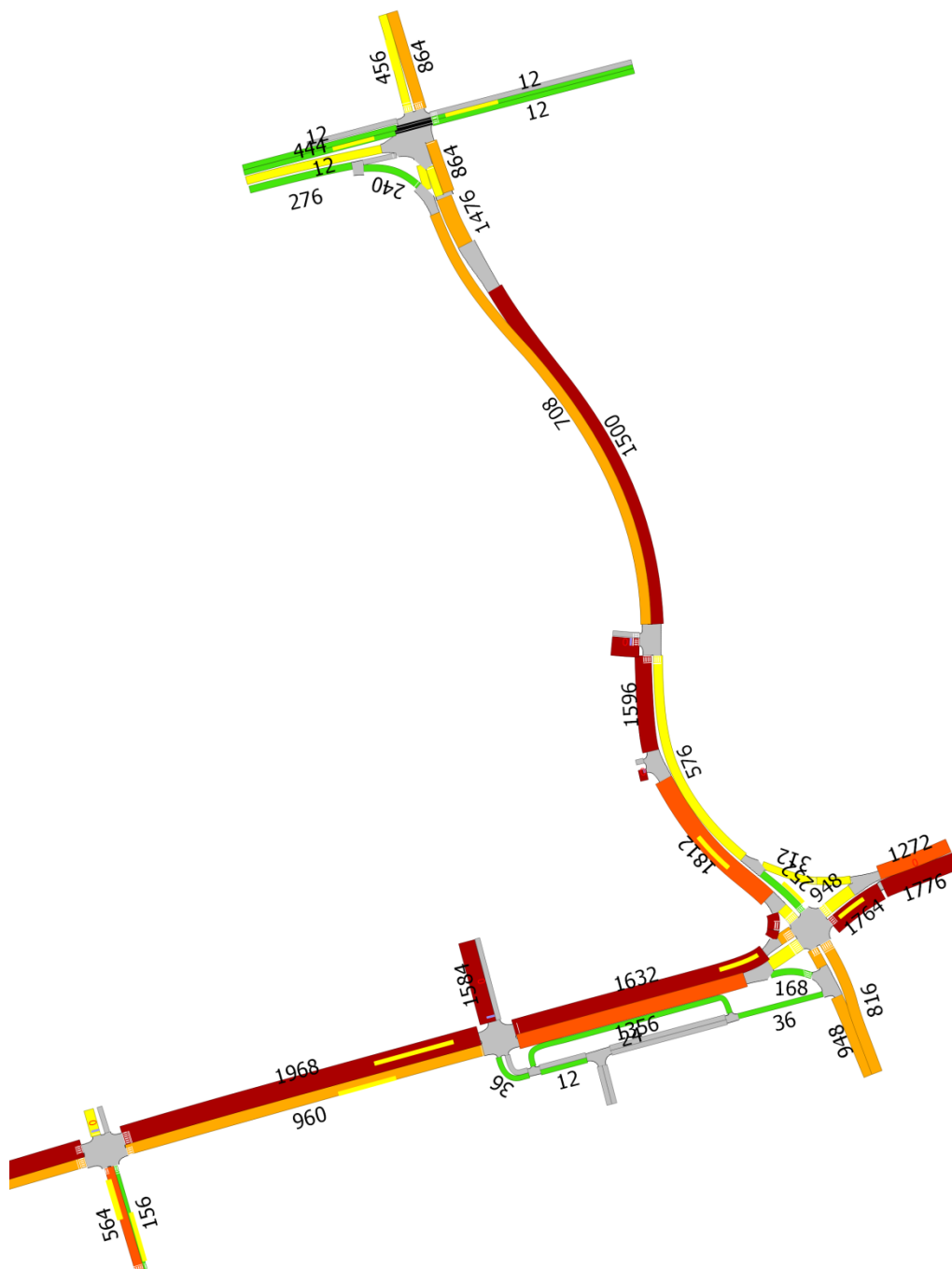
Na základě těchto poznatků byl sestaven model, ve kterém byl za pomoci mikroskopického simulačního nástroje zhodnocen vliv koncentrovaného výjezdu vozidel ze sportovního areálu po ukončení sportovních akcí na provoz na přilehlých komunikacích. Dvě posuzované varianty se od sebe lišily dopravně-technickým řešením připojení na navazující komunikace.

Varianty byly posuzovány podle doby výjezdů vozidel z areálu a podle parametrů dopravního proudu. Varianta A je výhodnější, pokud upřednostníme dobu výjezdu vozidel z areálu, negativně však více ovlivní plynulost dopravy, a to včetně veřejné hromadné dopravy. Ve variantě B se sice prodlouží doba výjezdu vozidel z areálu, avšak pro plynulost dopravy je toto řešení vhodnější.

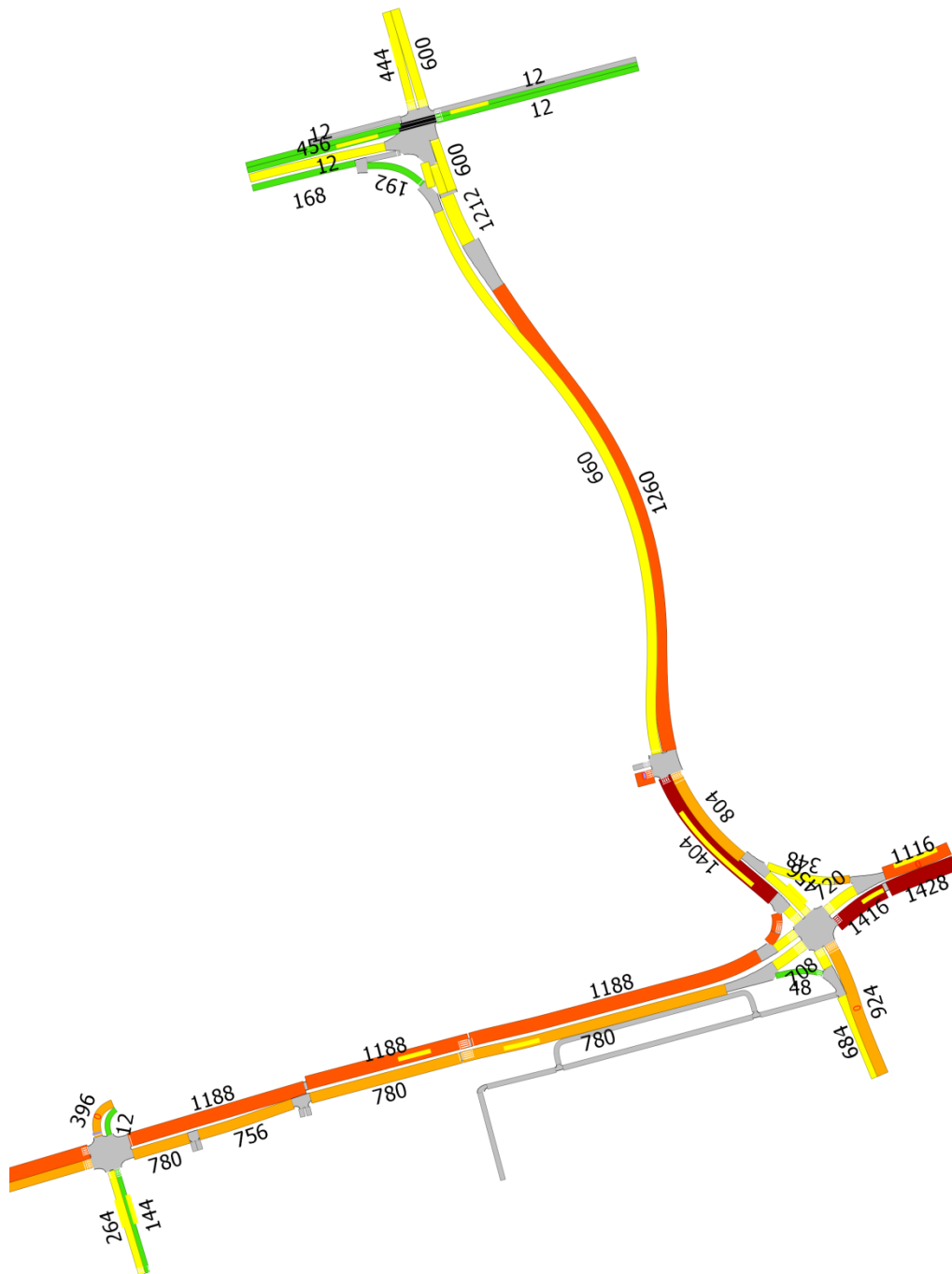
# Přílohy



*Příloha č. 1: Intenzity dopravy ve variantě A*

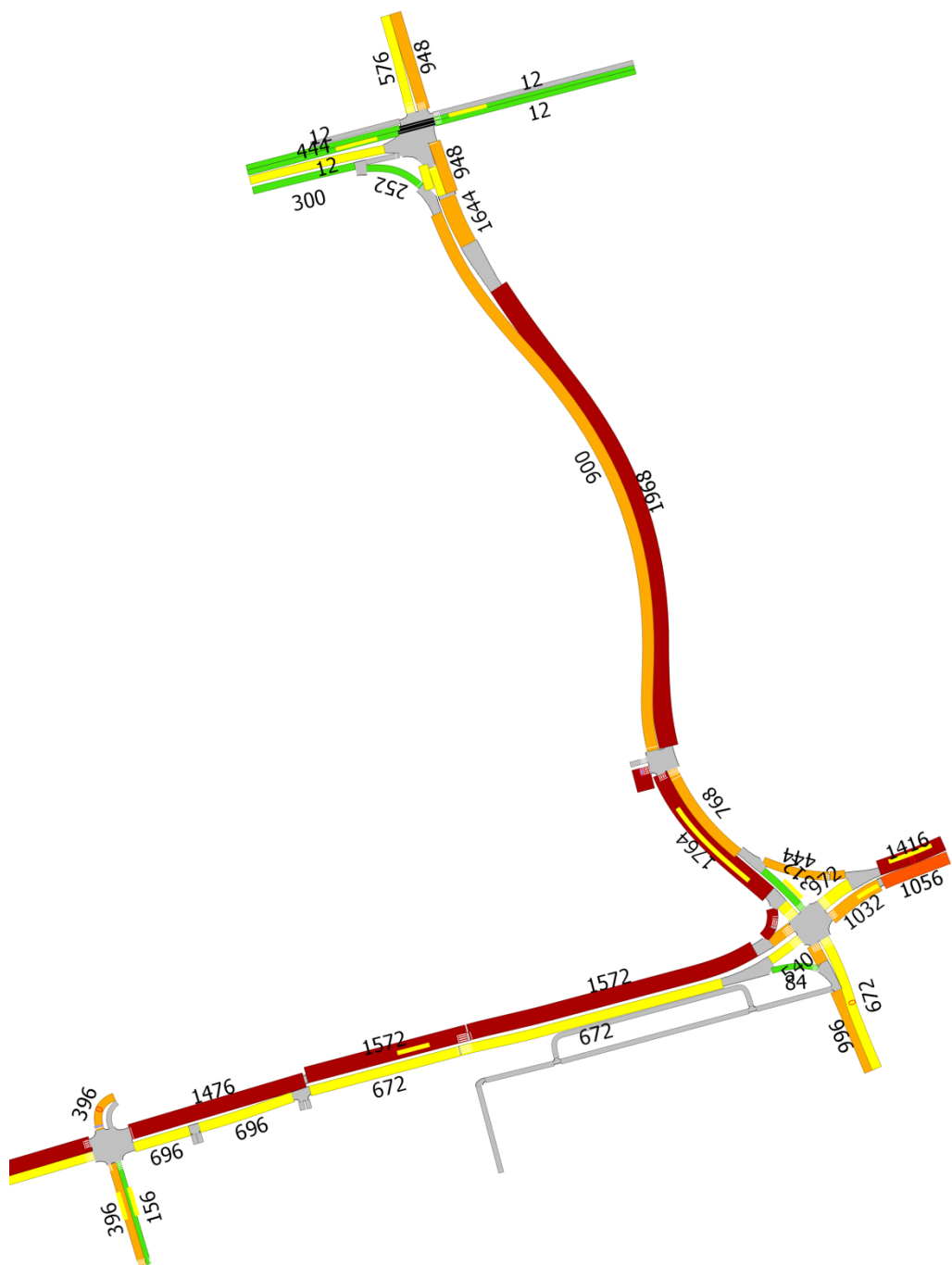


*Příloha č. 2: Intenzity dopravy ve variantě A – po úpravě řídicích plánů*



*Příloha č. 3: Intenzity dopravy ve variantě B*





*Příloha č. 4. Intenzity dopravy ve variantě B – po úpravě řídicích plánů*

## Použité zdroje

- [1] APELTAUER T. *Generické vlastnosti modelů dopravního proudu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky, 2010. 133 s., 26 s. příloh. Doktorská práce. Vedoucím práce byl doc. RNDr. Jiří Macur, CSc.
- [2] BARCELÓ, J., ed. *Fundamentals of Trac Simulation. International Series in Operations Research & Management Science*. Springer, 2010.
- [3] WIEDEMANN, R. a U. REITER. *Microscopic traffic simulation: the simulation system MISSION, background and actual state*. PTV, 1992.
- [4] GIPPS, P. *A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research Part B: Methodological*. 1981.
- [5] AF-CITYPLAN spol. s r. o.; Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. *Příručka pro tvorbu a hodnocení mikroskopických simulací dopravy*, 2013.
- [6] *Vědecké modelování* [online]. ©2017 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vědecké\\_modelování](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vědecké_modelování)
- [7] *Aimsun* [online]. ©2017 [cit. 2018-05-12] Dostupné z: <https://www.aimsun.com>
- [8] *Satelitní snímky* [online]. ©2018 [cit. 2018-05-05] Dostupné z: <https://www.google.cz/maps>
- [9] *Základní mapa* [online]. ©2018 [cit. 2018-05-05] Dostupné z: <https://www.mapy.cz>

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 2-1:</b> Schéma Wiedemanna modelu .....	17
<b>Obrázek 2-2:</b> Prahové hodnoty Wiedemanna modelu.....	18
<b>Obrázek 2-3:</b> Grafické znázornění průběhu rychlosti a zrychlení pro situaci volného pohybu, kdy sledované vozidlo není omezováno okolními vozidly. ...	20
<b>Obrázek 2-4:</b> Znázornění vlivu parametru $\delta$ na rychlost a zrychlení vozidla pro případ, že sledované vozidlo není omezeno žádnými vnějšími vlivy. ....	23
<b>Obrázek 3-1:</b> Schéma průběhu simulační studie .....	26
<b>Obrázek 4-1:</b> Řešené území sportovního areálu Ponava .....	33
<b>Obrázek 4-2:</b> Detail řešeného území s vyznačenými výjezdy.....	34
<b>Obrázek 4-3:</b> Situace varianty A s vyznačenými výjezdy z areálu .....	36
<b>Obrázek 4-4:</b> Situace varianty B s vyznačenými výjezdy z areálu .....	38
<b>Obrázek 5-1:</b> Ukázka georeferencovaného mapového podkladu.....	40
<b>Obrázek 5-2:</b> Ukázka kompletní geometrie křižovatky .....	41
<b>Obrázek 5-3:</b> Situace světelně řízených křižovatek pro model současného stavu .....	42
<b>Obrázek 5-4:</b> Schéma pracovního značení jednotlivých směrů jízdy v křižovatce.....	43
<b>Obrázek 5-5:</b> Změna parametru výjezdových úseků na typ příjezdu „ASAP“ .....	44
<b>Obrázek 5-6:</b> Situace modelu současného stavu s vyznačenými křižovatkami s jejich pracovním označením a opravnými koeficienty .....	46
<b>Obrázek 6-1:</b> Ukázka vlivu dopravy na trolejbus.....	52

## Seznam příloh

<b>Příloha č.1:</b> Intenzity dopravy ve variantě A.....	54
<b>Příloha č.1:</b> Intenzity dopravy ve variantě A - po úpravě řídicích plánů .....	55
<b>Příloha č.1:</b> Intenzity dopravy ve variantě B .....	56
<b>Příloha č.1:</b> Intenzity dopravy ve variantě B - po úpravě řídicích plánů.....	57

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 2-1:</b>	Přehled parametrů IDM modelu při $\delta=4$ .....	25
<b>Tabulka 3-1:</b>	Možné validační veličiny pro jednotlivé úlohy .....	31
<b>Tabulka 4-1:</b>	Počet parkovacích míst ve variantě A .....	35
<b>Tabulka 4-2:</b>	Počet parkovacích míst ve variantě B .....	37
<b>Tabulka 5-1:</b>	Porovnání intenzit dopravy křižovatek C a D vůči křižovatce A získaných z indukčních smyček .....	43
<b>Tabulka 5-2:</b>	Porovnání intenzit dopravy křižovatek C a D vůči křižovatce A získaných pomocí manuálního sčítání.....	43
<b>Tabulka 5-3:</b>	Srovnání modelových a skutečných hodnot pro validační účely .....	47
<b>Tabulka 6-1:</b>	Srovnání dopravních parametrů celé sítě .....	48
<b>Tabulka 6-2:</b>	Srovnání dopravních parametrů celé sítě v době ukončení sportovních akcí .....	48
<b>Tabulka 6-3:</b>	Srovnání dopravních parametrů celé sítě v době ukončení sportovních akcí po úpravě řídicích plánů .....	50
<b>Tabulka 6-4:</b>	Srovnání celkových parametrů pro trolejbus.....	51

## Seznam grafů

<b>Graf 6-1:</b>	Počet zbývajících vozidel na výjezdech ve variantě A .....	49
<b>Graf 6-2:</b>	Počet zbývajících vozidel na výjezdech ve variantě B.....	49
<b>Graf 6-3:</b>	Počet zbývajících vozidel na výjezdech ve variantě A po úpravě signálních plánů.....	50
<b>Graf 6-4:</b>	Počet zbývajících vozidel na výjezdech ve variantě B po úpravě signálních plánů.....	51