

papír pro razítko ústavu K611

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta dopravní

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Miroslav Vaniš

Ověření mikroskopických modelů dopravy na reálných dopravních datech

Ústav aplikované matematiky

Vedoucí bakalářské práce: Dr. Ing. Jan Přikryl

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Inženýrská informatika v dopravě a spojích

Praha 2015

Papír se zadáním diplomové práce

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mně pomohli při psaní této diplomové práce.

Na prvním místě jsou to mí rodiče, kteří mě neustále podporovali během mého dlouhého studia.

Dále bych chtěl poděkovat mému vedoucímu Janu Přikrylovi, který se mnou moji diplomovou práci neustále konzultoval, kamarádovi Mikuláši Dítěti, který mi pomohl v prvních krocích se softwarem SUMO, Tomáši Třasákovi za diskuse nad tématy v diplomové práci, Krzysztofovi Urbaňcovi za pomoc při hledání chyb a diskusích nejen o diplomové práci, Ivanovi Nagyovi při konzultacích o statistických metodách a celému Ústavu aplikované matematiky za prostředí k psaní diplomové práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Podpis autora

Abstract

In this diploma thesis we have studied selected mathematical models developed to mimic the behavior of the real traffic flow. In the theoretical part we introduced some basic ideas related to the models of the traffic flow. We introduce basic microscopic models which are used for traffic simulations. Next we familiarize with validation and calibration of these models, which are assumption for properly working model. In the practical part of the thesis we perform simulations in SUMO software. This software includes some of the models, the other ones will be implemented. After that, we started the simulations for each model. The results from these simulations we analyse with statistical methods and graphically.

Abstrakt

V této diplomové práci studujeme vybrané mikroskopické modely, které se snaží napodobit chování dopravního toku. V teoretické části představíme základní principy spojené s těmito modely. Představíme skupinu hlavních mikroskopických modelů, které se v dnešní době používají k simulaci dopravy. Dále se seznámíme s validací a kalibrací těchto modelů, které jsou předpokladem pro správně fungující model. V praktické části budeme provádět simulace v softwaru SUMO. Ten již některé z modelů obsahuje, ostatní do něj budou implementovány. Poté spustíme samotné simulace pro všechny modely. Výsledky z těchto modelů na základě statistických metod či graficky vyhodnotíme.

Obsah

Úvod	4
Cíle práce	4
1 Mikroskopické modely	6
1.1 Newellův model	6
1.1.1 Popis modelu	6
1.1.2 Parametry Newellova modelu	11
1.2 Gippsův model	11
1.2.1 Popis modelu	12
1.2.2 Parametry Gippsova modelu	14
1.3 Kraussův model	14
1.3.1 Obecný přístup	15
1.3.2 Interakce mezi vozidly	15
1.3.3 Diskretizace modelu	17
1.3.4 Rovnice modelu	18
1.3.5 Parametry Kraussova modelu	18
1.4 Rozšířený Kraussův model	19
1.4.1 Proces brždění	19
1.4.2 Matematický popis	20
1.4.3 Parametry Rozšířeného Kraussova modelu	21
1.5 Intelligent Driver Model	22
1.5.1 Matematický popis	22
1.5.2 Parametry IDM	23
1.6 Wiedemannův model	24
1.7 Shrnutí	27
2 Simulační a podpůrný software	28
2.1 SUMO	28
2.1.1 Jak to funguje	29
2.1.2 Konfigurační soubor	29
2.1.3 Soubor s podkladem	29
2.1.4 Vozidla pro simulaci	29
2.1.5 Další soubory	30
2.2 Příprava a vyhodnocení simulace - program	30
2.2.1 Třída AllInOne	30
2.2.2 Převedení formátu dat - třída MatlabToXML	31
2.2.3 Vytvoření souboru vozidel pro simulaci - třída XMLCreator	31
2.2.4 Výstupy ze simulací	34
2.2.5 Časová řada - třída XMLReader	34
2.2.6 Počet vozidel za daný čas - třída XMLReaderHist	35

2.2.7	Histogram - třída Histogram	36
2.3	Shrnutí práce s programem	36
3	Implementace nového modelu	38
3.1	MSCFModel.h	38
3.2	Implementace Gippsova modelu	39
4	Kalibrace modelů	44
4.1	Stručný úvod do simulačních modelů	44
4.2	Validace modelů	45
4.3	Kalibrace modelů	48
4.4	Statistické metody pro validaci a porovnání modelů	48
4.4.1	Statistický test střední hodnoty	48
4.4.2	F-test podílů rozptylů	50
4.4.3	Střední absolutní chyba	50
4.4.4	GEH	50
5	Simulace	52
5.1	Gippsův model	55
5.1.1	Rozdíly oproti teorii	55
5.1.2	Nastavení parametrů a simulace	55
5.1.3	Simulace	55
5.2	Kraussův model	56
5.2.1	Rozdíly oproti teorii	56
5.2.2	Nastavení parametrů a simulace	56
5.2.3	Simulace	57
5.3	Rozšířený Kraussův model	58
5.3.1	Rozdíly oproti teorii	58
5.3.2	Nastavení parametrů a simulace	58
5.3.3	Simulace	59
5.4	Intelligent Driver Model	59
5.4.1	Rozdíly oproti teorii	59
5.4.2	Nastavení parametrů a simulace	60
5.4.3	Simulace	61
5.5	Wiedemannův model	61
6	Porovnání modelů	64
6.1	Střední hodnota	64
6.2	Rozptyl a směrodatná odchylka	64
6.3	Střední absolutní chyba	65
6.4	Grafická znázornění	65
	Literatura	70

Seznam obrázků	73
Seznam tabulek	74
A Hodnoty GEH pro jednotlivé modely	I
B Kompilace simulačního softwaru SUMO	V
B.1 SUMO	V
B.1.1 SUMO download	V
B.2 Visual Studio	V
B.3 Ostatní závislosti	V
B.3.1 Xerces-C	VI
B.3.2 FOX	VI
B.3.3 FWTools	VII
B.3.4 SUMO	VII
C Vytvoření sítě pro simulaci v SUMO	VIII
C.1 OpenStreetMap	VIII■
C.2 netConvert	VIII■
D Vytvoření souborů pro nový model	X
D.1 Implementace nového modelu	X
D.2 Implementace nových parametrů	XI

Úvod

V dnešní době je na dálnicích velká snaha o dynamické řízení dopravy obzvláště v místech s uzavírkami jízdních pruhů či při vysoké hustotě provozu. Uzavření jízdního pruhu může nastat prakticky kdykoliv a to plánovaně (např. při pravidelné údržbě) a nebo neplánovaně (dopravní nehoda). Z toho vyplývá úkol pokusit se v tento moment řídit dopravu jak nejlépe to jde. Ani experti se ovšem neshodují, co znamená slovo nejlépe z předchozí věty. Může to být např. konkrétní hodnota intenzity či rychlosti, dojezdový čas či další parametry dopravního proudu.

Pokud jsme schopni získat surová data z daného úseku, např. intenzitu vztaženou na minutu pro každý pruh, a následně je vyhodnotíme, dostaneme přesné informace o úseku. Poté můžeme také tyto data vzít a pokusit se nasimulovat danou oblast. Otázkou zůstává jak. Ideálně tak, aby simulace byla blízká k již získaným informacím o úseku. V této práci se zaměříme na mikroskopické modely, podle kterých budeme simulace provádět. To znamená, že budeme simulovat každé jednotlivé vozidlo.

Po simulacích vyhodnotíme jednotlivé modely a zjistíme, které modely odpovídají reálným situacím. Předpoklad je takový, že některé modely budou přesnější např. při vysokých hustotách, některé zase naopak.

Ve chvíli, kdy získáme tento přehled modelů, můžeme již přesněji analyzovat danou situaci a do budoucna budeme vědět, že daný model simuluje tento stav nejlépe.

Hlavní cíle práce tedy spočívají v simulaci dálničního provozu na základě získaných reálných dat, a to pomocí různých mikroskopických modelů. Dalším krokem je porovnat výsledky z těchto simulací s reálnými daty. Tento způsob lze využít jako další možnost při řízení dané dálniční oblasti či při predikování např. plánovaných uzavírek.

Cíle práce

Cíle práce lze chronologicky formulovat následovně:

- seznámení se se základními typy mikroskopických modelů (hlavně jejich matematickým popisem) v dopravě pro použití na dálnicích,
- seznámit se s kalibrací těchto modelů,
- seznámit se simulačním softwarem SUMO a možnostmi jeho využití v dané problematice.

Tato témata jsou náplní první, teoretické části práce. V druhé, praktické, části jsou cíle práce následující:

- implementace všech mikroskopických modelů z teoretické části do simulačního softwaru SUMO,
- kalibrace mikroskopických modelů z teoretické části,

- nasimulování reálných dat, případně vytvoření vlastních scénářů pro mikroskopické modely,
- Makroskopický popis výsledků simulace.

1. Mikroskopické modely

Hlavní skupinou mikroskopických modelů jsou tzv. „Car Following“ modely. Tyto modely vycházejí z předpokladu, že pokud n -té vozidlo následuje $n - 1$ vozidlo na homogenní dálnici, trajektorie n -tého vozidla bude stejná jako vozidla před ním (tedy vozidla $n - 1$) až na posuny v čase a místě. (Vozidlo bude ve stejném místě jako předcházející v jiný čas a ve stejný čas bude na jiném místě.) Všechny další dispozice jednotlivých modelů v sobě tento předpoklad obsahují.

Na konci každého modelu budou pro přehlednost shrnuty parametry modelu, které se vyskytují v závěrečné rovnici.

1.1 Newellův model

V teorii dopravního proudu je Newellův model jeden ze základních modelů popisujících chování vozidla na základě vozidla před ním. Řidič se snaží držet za vozidlem jedoucím před ním v konstantní vzdálenosti. Tento model vznikl již v roce 1961. Zde jej zmiňujeme hlavně z důvodu, že z Newellových úvah vychází mnohé novější modely, například *Intelligent Driver Model* (IDM), který si popíšeme později.

V článku [16] je přesně popsán nejen model, ale i jeho verifikace a porovnání s ostatními modely. Pro nás je důležitý popis modelu.

1.1.1 Popis modelu

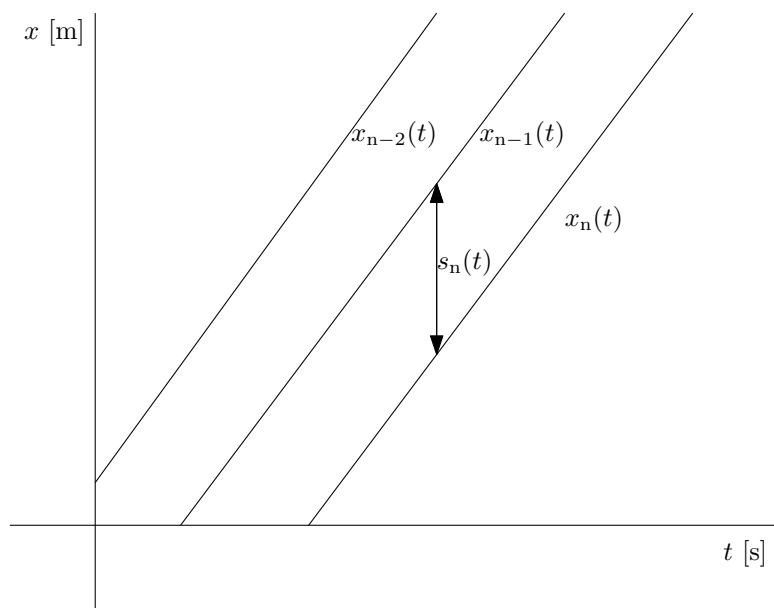
Jestliže n -té vozidlo jede za $n - 1$ vozidlem (které jede za $n - 2$ vozidlem atd.), cíl každého Car following modelu je zjistit závislost trajektorie n -tého vozidla $x_n(t)$ jeho pozice v čase t na $n - 1$ vozidle, viz obrázek 1.1. To také znamená, že není žádná náhodná spojitost mezi těmito vozidly. Jestliže se $n - 1$ vozidlo pohybuje konstantní rychlostí v ,

$$x_{n-1} = x_n + vt,$$

n -té vozidlo také pojede průměrnou rychlostí v . Pokud by n -té vozidlo zrychlovalo, tak by došlo ke kolizi s $n - 1$ vozidlem a naopak pokud by zpomalovalo, tak by se n -té vozidlo neustále vzdalovalo. Totéž platí pro všechna vozidla jedoucí za n -tým. Tento model se nezabývá zjištěním hodnoty rychlosti v , předpokládá se, že je určena buďto na základě omezení rychlosti či možnostech vozidla.

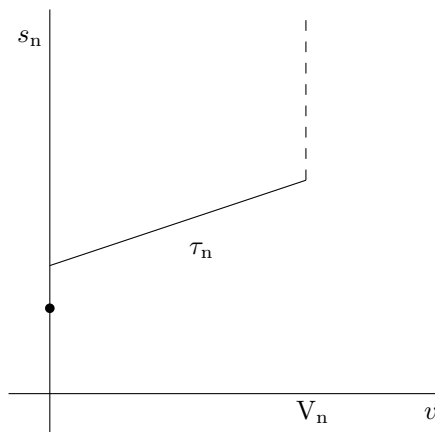
Vzdálenost $s_n = x_{n-1}(t) - x_n(t)$ mezi vozidly n a $n - 1$ se může měnit v čase. Pokud je dálnice homogenní, tato vzdálenost zůstane konstantní okolo hodnoty s_n . Tato hodnota se mění na základě typu vozidla a také závisí na rychlosti v .

Předpokládejme, že existuje nějaký empirický vztah mezi rychlostí v a vzdáleností mezi vozidly s_n . Pokud rychlost v roste, je logické, že řidiči chtějí dosáhnout většího rozestupu mezi vozidly. Tato závislost mezi v a s_n je znázorněna na obrázku 1.2. Každý řidič má svoji preferovanou rychlost V_n . Jestliže rychlost v je u $n - 1$ vozidla je vyšší než



Obrázek 1.1: Trajektorie vozidel s konstantní rychlostí, zdroj: [16]

preferovaná rychlost u n -tého, tedy $v > V_n$, znamená to, že n -té vozidlo pojede svoji preferovanou rychlostí (na obrázku 1.2 znázorněna čárkovanou čarou) a $n - 1$ vozidlo mu ujede. Hodnota rychlosti v nemůže být záporná a vzdálenost mezi vozidly při nulové rychlosti by měla být níže než polopřímka lineární závislosti, viz černá tečka na obrázku 1.2 při rychlosti $v = 0$.



Obrázek 1.2: Vztah mezi rychlostí v a vzdáleností mezi vozidly s_n , zdroj: [16]

Nyní předpokládejme, že se $n - 1$ vozidlo nějakou dobu t pohybuje konstantní rychlostí

v ¹ a potom náhle změni rychlost na hodnotu v' . Trajektorie vozidel n a $n - 1$ mohou poté vypadat jako na obrázku 1.3. Z obrázku lze také vypočítat jak časovou τ_n , tak prostorovou d_n mezeru mezi vozidly n a $n - 1$. Z čárkovaného obdelníku poté dostáváme vztah vzdálenost mezi vozidly před změnou rychlosti s_n a po změně rychlosti s'_n ,

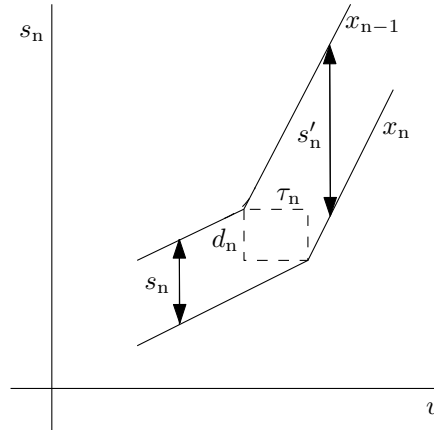
$$s_n = d_n + v\tau_n, \quad s'_n = d_n + v'\tau_n.$$

Z toho vyplývá, že pokud leží v a v' na polopřímce z obrázku 1.2, sklon této přímky je právě τ_n a hodnota s_n při rychlosti $v = 0$ je d_n .

Ze vztahu mezi v a s_n , jak je zobrazeno na obrázku 1.2, plyne nezávislost mezer d_n a τ_n na rychlostech v , resp. v' . Pokud se tedy změni rychlost z hodnoty v' na v'' , d_n a τ_n zůstanou při této změně rychlosti stejné. Lineární trajektorie vozidla $x_n(t)$ potom bude jednoduše posun v čase τ_n a místě d_n ,

$$x_n(t + \tau_n) = x_{n-1}(t) - d_n. \quad (1.1)$$

U Newellova modelu platí, že n -té vozidlo bude (přibližně) kopírovat trajektorii $n-1$ vozidla dle vztahu (1.1) při vhodných hodnotách d_n a τ_n . Tím, jak se přesně dokáže n -té vozidlo dodržovat vztah (1.1), se Newellův model nezabývá, pouze předpokládá, že řidič je schopen se tímto vztahem řídit. To není tak těžké, protože pokud se změni rychlost vozidla $n - 1$, n -tý řidič nemusí zareagovat okamžitě, ale může počkat dokud se vzdálenost s_n nezvýší (neklesne) na hodnotu, která odpovídá nové rychlosti vozidla $n - 1$ (viz obrázek 1.2).



Obrázek 1.3: Lineární aproximace při změně rychlosti vozidel, zdroj: [16]

Při pozorování se došlo k závěru, že každý řidič nezkoumá všechna vozidla na komunikaci, ale pouze vozidla na vhodné „makroskopické“ části komunikace.

¹hodnota rychlosti osciluje okolo hodnoty v

Hodnoty τ_n a d_n jsou přirozené, to vychází ze vztahu (1.1), kde postupným iterováním dostaneme

$$x_n(t + \tau_n + \tau_{n-1} + \dots + \tau_1) = x_0(t) - d_n - d_{n-1} - \dots - d_1. \quad (1.2)$$

Hodnoty τ_n a d_n se značně liší mezi jednotlivými vozidly v závislosti na typu řidiče. První skupina řidičů raději jede blíže vozidlu před sebou ($n - 1$) až na minimální bezpečnou vzdálenost, zatímco druhá skupina naopak preferuje delší vzdálenost pro klidnou reakci na nenadálou událost. Je rozumné, aby se hodnoty τ_n a d_n lišily, a to tak, že každému jednotlivému vozidlu budou hodnoty vygenerovány z nějakého pravděpodobnostního rozdělení, jehož variační koeficient se bude blížit jedné. Při generování rychlostí vozidel by naopak měl být variační koeficient zanedbatelný.

Položíme-li

$$\bar{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \tau_k, \quad \bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_k, \quad (1.3)$$

kde $\bar{\tau}$ a \bar{d} jsou průměrné posuny v čase resp. místě, potom průměrnou vlnovou rychlost spočteme jako podíl $\bar{d}/\bar{\tau}$.

Tento model se dá ovšem popsat nejen mikroskopicky (rychlost, mezera mezi vozidly), ale i makroskopicky (hustota k , intenzita q). Stacionární stav nastane ve chvíli, kdy se všechna vozidla budou pohybovat stejnou konstantní rychlostí s rozdílnými posuny (časovými i prostorovými).

Jestliže

$$s_n = d_n + v\tau_n,$$

a rychlost vozidel je konstantní, tak platí

$$\bar{s} = \bar{d} + v\bar{\tau}.$$

Hustotu k lze potom vypočítat jako převrácenou hodnotu průměrné mezery mezi vozidly $k = 1/\bar{s}$ a rychlost jako podíl intenzity a hustoty, to jest $v = q/k$. Tudíž platí

$$q = \frac{1}{\bar{\tau}} - \frac{\bar{d}}{\bar{\tau}} k, \quad (1.4)$$

za předpokladu, že rychlost v je menší než preferovaná rychlost jakéhokoliv vozidla V_k .

Rovnice (1.4) propojuje Newellův model s klasickými makroskopickými modely. Problém nastává ve chvíli, kdy průměrná rychlost v je vyšší, než některá s preferovaných rychlostí jednotlivých vozidel. Vozidla se v tomto modelu nemohou předjíždět a proto vznikne kongesce za vozidlem s malou preferovanou rychlostí. V následujících řádcích předpokládáme, že aktuální rychlost vozidla bude menší než preferovaná rychlost V_n .

Uvažujme, že se vozidlo n pohybuje přesně podle rovnice (1.1) a vozidlo za ním ($n - 1$) jede plynule za ním.

Rovnici (1.1) můžeme přepsat do tvaru

$$x_n(t + \tau_n) = x_n(t) + \tau_n v_n(t + T), \quad (1.5)$$

kde T značí reakční čas řidiče. Tvar rovnice (1.5) plyne z matematické analýzy², přičemž hodnota T se nachází někde mezi nulou a τ_n . Pokud je funkce hladká bude přibližně

$$T = \frac{\tau_n}{2}. \quad (1.6)$$

Rovnici (1.5) lze přepsat na přibližný tvar

$$x_n(t + \tau_n) = x_n(t) + \tau_n v_n(t) + \tau_n T a_n(t), \quad (1.7)$$

který uvažuje zrychlení vozidla a_n ³. Kombinací rovnic (1.7) a (1.1) dostáváme vztah pro rychlost

$$v_n(t + \tau_n) = \frac{1}{\tau_n} [x_{n-1}(t) - x_n(t)] - \frac{d_n}{\tau_n}. \quad (1.8)$$

Po zderivování rovnice (1.8) dostáváme vztah pro zrychlení vozidla

$$a_n(t + \tau_n) = \frac{1}{\tau_n} [v_{n-1}(t) - v_n(t)]. \quad (1.9)$$

Z rovnic (1.8) a (1.9) je vidět zřejmá závislost na vozidle, které jede před aktuálním, členem $v_{n-1}(t)$, resp. $x_{n-1}(t)$. Řidič volí svoji rychlost na základě odstupu od předchozího vozidla, resp. zrychlení na základě rychlostí.

Konečný vztah pro Newellův model je tedy

$$a_n(t) = \frac{\frac{1}{\tau_n} [v_{n-1}(t) - v_n(t)] - \frac{d_n}{\tau_n} - v_n(t)}{T}, \quad (1.10)$$

kde vztah mezi τ_n a T vychází z rovnice (1.6).

U Newellova modelu není vůbec definované čelní vozidlo a jeho vlastnosti. Je např. možné nastavit mu konstantní rychlost a vlastnosti následujících vozidel vypočítat poté rovnice (1.10).

²věta o střední hodnotě

³Předpokládejme vozidlo v klidu, které se rozjíždí. Na začátku zvolíme $\tau_n = 5s, t = 0s, T = \tau_n/2 = 2,5s$, potom platí

$$x_n(5) = x_n(0) + 5v_n(0 + 2,5).$$

Pro výpočet dráhy bereme hodnotu rychlosti v čase 2,5s. Nemůžeme vzít hodnotu v nule, vozidlo by v tomto případě stálo na místě. Přibližná hodnota bude tedy opravdu v polovině hodnoty τ_n .

1.1.2 Parametry Newellova modelu

Všechny proměnné a parametry Newellova modelu potom jsou:

- τ_n - časová mezera mezi vozidly,
- T - reakční čas řidiče,
- d_n - odstup mezi vozidly v metrech,
- $v_n(t)$ - rychlost vozidla n v čase t ,
- $a_n(t)$ - zrychlení vozidla v čase t .

Všechny parametry s indexem $n - 1$ mají stejný význam, ale vztahují se k vozidlu jedoucímu před aktuálním.

1.2 Gippsův model

Další model, kterým se zde budeme zabývat, se jmenuje Gippsův. Tento model byl poprvé popsán v roce 1981 a odvolává se i na zmíněný Newellův model. I v dnešní době se tento model využívá pro simulaci dopravy. Hlavním zdrojem pro tuto podkapitolu je článek P.G. Gippse[8]. Většina modelů (Newellův ovšem ne), které vznikly před Gippsovým, jsou různé variace na rovnici

$$a_n(t + T_n) = l_n \frac{[v_{n-1}(t) - v_n(t)]^k}{[x_{n-1}(t) - x_n(t)]^m}, \quad (1.11)$$

kde jednotlivé proměnné mají stejný význam jako při popisu Newellova modelu 1.1. Proměnné l_n , k a m jsou parametry, které je nutno empiricky odhadnout. Tyto modely se nazývají Modely General Motors a jsou blíže rozebrány v [22].

Ačkoliv podávají tyto modely dobré výsledky v mnoha situacích, je žádoucí, aby během přepočtů poloh, rychlostí a zrychlení nějakým způsobem byl zahrnut reakční čas řidiče T_n . To si vyžaduje značné množství historických dat, pokud model bude použit v simulačním programu. Navíc, parametry l_n , k a m nemají přímou souvislost s vlastnostmi vozidla či řidiče.

Gipps se proto rozhodl, že vytvoří model, který bude splňovat následující podmínky:

- model by měl napodobovat chování opravdového provozu,
- parametry modelu by měly odpovídat vlastnostem řidiče a vozidla,
- model by se měl chovat správně i v případě, že doba mezi přepočítáváním polohy a rychlosti je stejná, jako reakční čas řidiče.

1.2.1 Popis modelu

Následující model je odvozen z omezení jak řidiče, tak i vozidla a pomocí těchto omezení se dopočítávají bezpečná rychlost podle předcházejícího vozidla. Předpokládá se přitom, že řidič volí svoji rychlost tak, aby zajistil bezpečné zastavení nebo aby dokázal náhle rychle zastavit při nenadálé události.

První podmínka, kterou aplikujeme na vozidlo n , souvisí s rychlostí vozidla. Ta nepřekročí jeho preferovanou rychlost V_n a jeho zrychlení na volné komunikaci⁴ se zvyšuje stejně tak jako rychlost, dokud se také zvyšuje kroutící moment motoru vozidla a poté začne klesat na nulovou hodnotu a té nabude ve chvíli, kdy se vozidlo bude pohybovat svoji preferovanou rychlostí V_n

$$v_n(t + T_n) \leq v_n(t) + 2,5 a T_n \left(\frac{1 - v_n(t)}{V_n} \right) \sqrt{\left(0,025 + \frac{v_n(t)}{V_n} \right)}. \quad (1.12)$$

Koeficienty v nerovnici (1.12) byly stanoveny na základě z měření na hlavních dopravních komunikacích při průměrném provozu. Využití nerovnice (1.12) pro tento model je považované za přijatelné až do chvíle, kdy se vozidlo přiblíží vozidlu jedoucím před ním. Od té chvíle důraz na tuto podmínku klesá, naopak největší důležitost je ve chvíli, kdy vozidlo nemá před sebou žádné vozidlo či vozidlo před ním se nachází velmi daleko.

Další omezení, které je nutno zmínit, se týká brždění. Jestliže $n - 1$ (první) vozidlo zahájí brždění v čase t , zpomalí a následně zastaví v místě x_{n-1}^* , které dostáváme rovnicí

$$x_{n-1}^* = x_{n-1}(t) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}}, \quad (1.13)$$

kde člen b_{n-1} označuje nejvyšší kritickou decelaci, kterou je řidič vozidla $n - 1$ schopen vykonat. Její hodnota je vždy záporná.

Vozidlo n jedoucí za ním nebude reagovat na toto zpomalení ihned, ale až v čase $t + T_n$ a tudíž zastaví až v místě x_n^* , daném rovnicí

$$x_n^* = x_n(t) + [v_n(t) + v_n(t + T_n)] \frac{T_n}{2} - \frac{v_n(t + T_n)^2}{2b}. \quad (1.14)$$

Pro vlastní bezpečnost musí řidič vozidla n zajistit, že bude splněna podmínka

$$x_{n-1}^* - s_{n-1} < x_n^*, \quad (1.15)$$

kde s_{n-1} je délka vozidla $n - 1$, sečtena s bezpečnou vzdáleností následujícího (n -tého) vozidla. Pokud podmínka (1.15) neplatí, n -té vozidlo nemá žádný prostor pro případnou řidičovu chybu. Z toho důvodu obsahuje Gippsův model ještě další podmínku: bezpečný odstup s další časovou rezervou, θ . Jak již víme, řidič začne reagovat na vozidlo před sebou až v čase $t + T_n$. Od této chvíle tedy máme reakční čas T_n a bezpečný reakční

⁴tj. komunikace, na které se nevyskytuje žádné další vozidlo

čas $T_n + \theta$, který budeme ve výpočtech dále využívat. S využitím rovnic (1.13) a (1.14) můžeme podmínku (1.15) přepsat do nerovnice

$$x_{n-1}(t) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}} - s_{n-1} \geq x_n(t) + [v_n(t) + v_n(t + T_n)] \frac{T_n}{2} + v_n(t + T_n)\theta - \frac{v_n(t + T_n)^2}{2b}. \quad (1.16)$$

Bez parametru θ by řidič vozidla byl nucen brzdít až ve chvíli, kdy opravdu musí, to znamená na maximální výkon brzd. Do té chvíle by se stále pohyboval svoji preferovanou rychlostí. Parametr θ slouží k dřívějšímu a přitom ne tak prudkému brždění.

Při skutečném pozorování dopravy jsme schopni změřit všechny parametry vozidla n v rovnici (1.16) kromě členu b_{n-1} . Tento člen nahradíme odhadnutou hodnotou \hat{b} , upravíme tuto rovnici a dostáváme

$$-\frac{v_n(t + T_n)^2}{2b_n} + v_n(t + T_n) \left(\frac{T_n}{2} + \theta \right) - [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] + v_n(t) \frac{T_n}{2} + \frac{v_{n-1}(t)^2}{2\hat{b}} \leq 0. \quad (1.17)$$

Relativní hodnoty T_n a θ jsou důležité v určování chování vozidel. Za normálních okolností se dosazuje za $\theta = T_n/2$. Díky tomu můžeme rovnici (1.17) přepsat do tvaru

$$-\frac{v_n(t + T_n)^2}{2b} + v_n(t + T_n)T_n - [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] + v_n(t) \frac{T_n}{2} + \frac{v_{n-1}(t)^2}{2\hat{b}} \leq 0. \quad (1.18)$$

Z toho po složitých úpravách plyne

$$v_n(t + T_n) \leq bT_n + \sqrt{\left(b^2T_n^2 - b \left(2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)T_n - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2\hat{b}} \right) \right)}. \quad (1.19)$$

Z nerovnice (1.18) vychází, že bezpečné rychlosti v_n budou ležet mezi dvěma kořeny této nerovnice, ale pokud bude mít spodní kořen zápornou hodnotu můžeme ho ignorovat, protože nás zajímají pouze kladné hodnoty rychlostí. Podcenění plynulého brždění řidiče vozidla n nastane ve chvíli, kdy

$$v_n(t + T_n) < v_n(t) + b_nT_n.$$

V tuto chvíli musí vozidlo začít brzdít rychleji, než by sám řidič chtěl. Řidič tedy volí rychlost na základě preferované decelace, ale může brzdít i rychleji pokud by to bylo nutné.

Nerovnice (1.12) pro vozidlo n na volné komunikaci a (1.19) pro vozidlo n před kterým se nachází vozidlo $n - 1$ představují dvě hlavní podmínky pro rychlost v_n v čase $t + T_n$

a jestliže řidič přizpůsobí rychlost parametrům vozidla a tak, aby jízda byla bezpečná, dostáváme **konečný vztah pro Gippsov model**:

$$v_n(t+T_n) = \min \left(v_n(t) + 2, 5aT_n \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n} \right) \sqrt{\left(0,025 + \frac{v_n(t)}{V_n} \right)}, \right. \\ \left. bT_n + \sqrt{\left(b^2T_n^2 - b \left(2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)T_n - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2\hat{b}} \right) \right)} \right) \quad (1.20)$$

Pokud platí pro téměř všechna vozidla nižší hodnota v rovnici (1.20), vychází se z nerovnice (1.19), vozidla jedou blízko sebe, z čehož vyplývá vysoká hustota provozu. Pokud platí opak, tz. nerovnice (1.12), dopravní proud je volný.

1.2.2 Parametry Gippsova modelu

Všechny proměnné a parametry Gippsova modelu potom jsou:

- T_n - reakční čas řidiče,
- $v_n(t)$ - rychlost vozidla n v čase t ,
- a - maximální hodnota zrychlení, kterým je řidič ochoten zrychlovat - **nikoliv zrychlení vozidla v čase t !**,
- V_n - preferovaná rychlost vozidla n ,
- b - maximální decelerace vozidla, kterým je řidič ochoten brzdit,
- x_n - poloha vozidla n
- s_{n-1} - délka vozidla $n-1$ sečtena s bezpečnou vzdáleností následujícího (n) vozidla
- \hat{b} - odhadnutá hodnota decelerace b_{n-1}

1.3 Kraussův model

Kraussův model byl vytvořen v rámci disertační práce stejnojmenného autora. V popisu tohoto modelu budeme vycházet z této práce[14].

Tento model se hlavně zaměřuje na vlastnosti dopravního proudu, zkoumání chování řidiče zde není primární. Myšlenka autora je taková, že existují obecné vlastnosti dopravního proudu, ze kterých vyplývá chování jednotlivých účastníků silničního provozu a není to chování jednotlivce, které hlavně ovlivňuje vlastnosti dopravního proudu.

1.3.1 Obecný přístup

Pokud se dopravní proud modeluje mikroskopicky, musí být brány v úvahu dva typy pohybu vozidla. Prvním typem pohybu je vozidlo jedoucí po vozovce osamoceno, zatímco ve druhém případě vozidlo interaguje s ostatními vozidly. Na základě těchto pohybů předpokládáme následující podmínky. První podmínka má přímo souvislost s rychlostí vozidla. Ta je omezena nějakou maximální rychlostí v_{\max} ,

$$v \leq v_{\max}. \quad (1.21)$$

Za maximální rychlost může být například zvolena preferovaná rychlost vozidla.

Hlavní důvod, proč mezi sebou vozidla interagují, je fakt, že řidiči nemají v úmyslu srážet se s ostatními vozidly. Další podmínkou tedy bude tzv. „nekoliznost“ systému. Budeme předpokládat, že řidič vozidla zvolí tedy takovou rychlost vozidla, která nebude vyšší než maximální bezpečná rychlost v_{safe} ,

$$v \leq v_{\text{safe}}. \quad (1.22)$$

Z maximální bezpečné rychlosti poté plyne interakce mezi vozidly. Její stanovení bude uvedeno dále.

Je možné formulovat modely na základě podmínek (1.21) a (1.22). Nicméně je vcelku vhodné předpokládat také omezující podmínky pro akceleraci a a deceleraci b ,

$$\begin{aligned} -b &\leq \frac{dv}{dt} \leq a, \\ a, b &> 0. \end{aligned} \quad (1.23)$$

Později bude ukázáno, že vztah (1.23) je nezbytnou podmínkou správného modelování dopravního proudu.

Předchozí podmínky můžeme shrnout do následující nerovnice

$$v(t + \Delta t) \leq \min(v_{\max}, v_{\text{safe}}, v(t) + a\Delta t), \quad (1.24)$$

kde se maximální bezpečná rychlost v_{safe} musí splňovat podmínku

$$v(t + \Delta t) \geq v(t) - b\Delta t. \quad (1.25)$$

Celkové povědomí o tom, jak se jednotlivá vozidla pohybují a interagují mezi sebou závisí na výpočtu maximální bezpečné rychlosti v_{safe} . Jakmile je stanovena hodnota v_{safe} , nerovnice (1.24) představuje aktualizované schéma pro simulace dopravního proudu, pokud jsou splněny všechny podmínky zmíněné výše.

1.3.2 Interakce mezi vozidly

Každý sofistikovaný dopravní model by měl obsahovat interakci mezi vozidly. Představme si dvě vozidla na komunikaci, první vozidlo se nachází v bodě x_1 a jede rychlostí v_1 ,

vozidlo, které ho následuje je v bodě x_f a pohybuje se rychlostí v_f . Jestliže délka prvního vozidla bude l , tak mezera mezi vozidly se vypočte vztahem

$$g = x_1 - x_f - l. \quad (1.26)$$

Jak již bylo zmíněno, hlavním důvodem, proč mezi sebou vozidla interagují, je fakt, že řidiči nemají v úmyslu srážet se s ostatními vozidly. Z toho plyne, že mezera mezi vozidly musí být nezáporná. Narozdíl od jiných modelovaných přístupů, zde nezačneme s předpokladem jak může být zrychlení vozidla vypočteno z vozidla jedoucí před ním, protože nekoliznost stejně není splněna automaticky a někdy je velice složité ji dokázat.

Místo toho zavedeme pravidlo, že se ve spojitých modelech spolu interagující vozidla nesrazí tehdy, pokud je mezera mezi vozidly g větší než nějaká preferovaná mezera mezi vozidly g_{des} a splňuje tuto dynamickou nerovnici

$$\frac{dg}{dt} \geq \frac{g_{\text{des}} - g}{\tau_{\text{des}}}. \quad (1.27)$$

Preferovaný bezpečný časový odstup mezi vozidly τ_{des} a preferovaná mezera g_{des} by mohly být funkcemi odstupů mezi vozidly či jejich rychlostmi. Fakt, že v tomto modelu nemohou nastat kolize je zřejmé, protože pokud položíme g rovné nule, časová derivace bude vždy nezáporná a preferovaná mezera g_{des} také.

Předpokládejme případ dvou vozidel jedoucích rychlostmi v_1 resp. v_f s odstupem g . Druhé vozidlo jede svoji bezpečnou rychlostí a řidič tohoto vozidla může zastavit za jakýkoliv okolností tak, aby nedošlo ke kolizi s prvním vozidlem. To znamená, že pokud řidič má reakční čas T a brzdná vzdálenost vozidel jedoucích rychlostí v je dána funkcí $f(v)$, je situace bezpečná právě tehdy když

$$f(v_f) + v_f T \leq f(v_1) + g. \quad (1.28)$$

Hodnota funkce $f(v)$ nemusí být nutně minimální možná brzdná vzdálenost, ale může to být jiná funkce závisající na způsobu řízení řidiče a pohodlné jízdy. To samé platí pro reakční čas T .

Úprava nerovnice 1.28 vede k bezpečnostnímu pravidlu pro rychlost druhého vozidla. Nicméně my toto pravidlo neodvozujeme ze dvou důvodů. První z nich je ten, že po úpravě bychom potřebovali znát přesný předpis funkce $f(v)$, který jak uvidíme, není možné zjistit. Druhým je zbytečné a výpočetně náročné používat typ řízení, které potřebuje předvídat nenádalou událost a vypočítávat decelaci až k úplnému zastavení každý jednotlivý krok. Proto zavedeme Taylorův rozvoj brzdné vzdálenosti $f(v)$ okolo průměrné rychlosti obou vozidel,

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_f}{2}, \quad (1.29)$$

který budeme v dalším odvození dále používat. Sudé členy tohoto rozvoje se vyruší a zanedbáním členů vyšších řádů dostáváme

$$f'(\bar{v})v_f + v_f T \leq f'(\bar{v})v_1 + g. \quad (1.30)$$

Smysl derivace $f(\bar{v})$ vysvětlíme jednoduše. Pokud se podíváme na decelaci vozidla b z rychlosti v na nulu (nemusí být nutně konstantní), tedy $\dot{v} = -b(v)$, kdy $b(v) > 0$, obdržíme vztah

$$f'(v) = -\frac{d}{dv} \int_v^0 \frac{v'}{b(v')} dv' = \frac{v}{b(v)} \quad (1.31)$$

Nyní můžeme přepsat podmínku bezpečnosti do tvaru

$$v_1 - v_f \geq \frac{v_1 T - g}{\frac{\bar{v}}{b(\bar{v})} + T}, \quad (1.32)$$

kde

$$v_1 - v_f = \frac{dg}{dt}. \quad (1.33)$$

Nerovnice (1.32) se v podstatě rovná nerovnici (1.27), kde preferovaný odstup $g_{\text{des}} = v_1 t$ a preferovaný bezpečný časový odstup mezi vozidly $\tau_{\text{des}} = \tau_b + T$, kde $\tau_b = \bar{v}/b(\bar{v})$ je stanoven na základě decelerací, které řidič využije.

1.3.3 Diskretizace modelu

Pro možnost simulace na počítači je potřeba převést nerovnice v části 1.3.1 na diskrétní rovnice pro dráhy, rychlosti a zrychlení.

Vhodná cesta pro vytvoření rovnic dynamického systému z bezpečnostní podmínky (1.27) je převést spojitou rychlost v_f ve výrazu $\dot{g}(t) = v_1(t) - v_f(t)$ jako rychlost diskrétní s diferencí či integračním krokem $t + \Delta t$. Potom rovnici (1.27) přepíšeme do tvaru

$$v_f(t + \Delta t) \leq v_1(t) + \frac{g(t) - g_{\text{des}}}{\tau_{\text{des}}}. \quad (1.34)$$

Rovnice pro polohu vozidla se potom na stejném principu převede na

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t + \Delta t)\Delta t. \quad (1.35)$$

Víme, že při $\Delta t \rightarrow 0$ a $g_{\text{des}} \geq 0$ rovnice (1.34) a nerovnice (1.35) garantují bezpečnost. Pro konečný čas Δt musí být tato garance opět dokázána.

Mezera $g(t)$ mezi dvěma vozidly je diskretizována vztahem

$$g(t + \Delta t) = g(t) + \Delta t(v_1(t + \Delta t) - v_f(t + \Delta t)). \quad (1.36)$$

Přidáním rovnice (1.34) dostáváme

$$\xi(t + \Delta t) = \xi(t) + \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_b + T}\right) + \Delta t \frac{g_{\text{des}} - v_1(t)\Delta t}{\tau_b + T}, \quad (1.37)$$

kde

$$\xi(t) = g(t) - v_1(t)\Delta t.$$

Bezpečnost ($g \geq 0$) je tedy garantována tehdy, když platí:

$$\begin{aligned} \xi(t=0) &\geq 0, \\ \Delta t &\leq T, \\ g_{\text{des}} &\geq v_1\Delta t. \end{aligned} \tag{1.38}$$

To je výsledek, který se ovšem dal předpokládat. Záleží pouze na tom, zda je i po provedení iteračního kroku stále splněna podmínka bezpečnosti, tzn. kontrolovat jestli je náš iterační krok menší než reakční čas řidiče T .

1.3.4 Rovnice modelu

Předpokládáme tedy, nezávisle na náhodném kolísání, že se každé vozidlo pohybuje nejvyšší rychlostí na základě podmínek, které jsou stanoveny níže. **Kraussův model tedy stanovíme následujícími rovnicemi:**

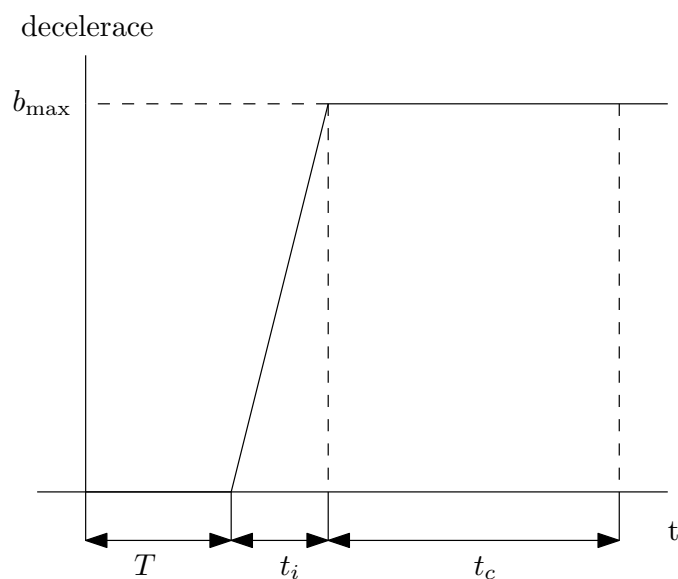
$$\begin{aligned} v_{\text{safe}}(t) &= v_1(t) + \frac{g(t) - g_{\text{des}}}{\tau_b + T}, \\ v_{\text{des}} &= \min[v_{\text{max}}, v(t) + a(t)\Delta t, v_{\text{safe}}(t)], \\ v(t + \Delta t) &= \max[0, v_{\text{des}} - \eta]. \end{aligned} \tag{1.39}$$

Preferovaná mezera g_{des} může být zvolena různě. Většinou se volí $g_{\text{des}} = v_1\tau$, kde τ je reakční čas řidiče. Hodnota τ_b je definována jako podíl \bar{v}/b , kde \bar{v} plyne ze vztahu (1.29). Nově zde také zavádíme proměnnou η , která je náhodnou výchylkou od běžného řízení. Volba integračního kroku Δt a preferované mezery g_{des} je závislá na podmínkách (1.38).

1.3.5 Parametry Kraussova modelu

Všechny proměnné a parametry Kraussova modelu potom jsou:

- $g(t)$ - mezera mezi vozidly v čase t ,
- g_{des} - preferovaná mezera mezi vozidly,
- τ_b - čas závislý na rychlosti decelerace,
- T - reakční čas řidiče,
- $v_1(t)$ - rychlost aktuálního vozidla v čase t ,
- $a(t)$ - zrychlení v čase t ,
- ΔT - integrační krok,
- η - náhodná výchylka od běžného řízení.



Obrázek 1.4: Fáze brždění, zdroj: [19]

1.4 Rozšířený Kraussův model

Hlavní zdroj pro vylepšení Kraussova modelu je přímo článek pro implementaci Rozšířeného Kraussova modelu [19]. Základem pro toto vylepšení Kraussova modelu plyne z procesu brždění.

1.4.1 Proces brždění

Fáze brzdícího procesu na sebe plynule navazují, první z nich se nazývá doba reakce řidiče T , dále zvyšování decelarace t_i a maximální brždění t_c . Vše je graficky znázorněno na obrázku 1.4.

Doba reakce řidiče: Řidič potřebuje určitý čas T na to, aby zareagoval na vozidlo před sebou. V době této reakce se pohybuje rychlost vozidla v_0 na konstantní hodnotě, případně se lehce mění. Posunutí aktuálního vozidla je potom dán rovnicí

$$S_r = v_0 T. \quad (1.40)$$

Zvyšování decelarace: Decelarace aktuálního vozidla se ve druhé fázi zvyšuje z nuly na hodnotu b_{\max} , která představuje nejvyšší hodnotu decelarace vozidla. Předpokládáme lineární zvyšování decelarace, tz.

$$b = b_{\max} \frac{t}{t_i}.$$

Aktuální rychlost vozidla se potom vypočte jako

$$v_i = v_0 - \int b_{\max} \frac{t}{t_i} dt = v_0 - \frac{b_{\max}}{2t_i} t^2, \quad (1.41)$$

a pohyb vozidla v této části

$$S_i = \int_0^{t_i} \left(v_0 - \frac{b_{\max}}{2t_i} t^2 \right) dt = v_0 t_i - b_{\max} \frac{b_{\max} t_i^2}{6}. \quad (1.42)$$

Maximální brždění: V tuto chvíli již vozidlo brzdí svoji maximální decelerací b_{\max} , pohyb vozidla je potom dán vzorcem

$$S_c = \frac{v_0^2}{2b_{\max}} - \frac{v_0 t_i}{2} + \frac{b_{\max} t_i^2}{8}. \quad (1.43)$$

Celková dráha při brždění: Celková dráha při brždění vozidla se vypočítá jako součet tří předcházejících částí, tedy

$$S = S_r + S_i + S_c = v_0 T + v_0 t_i - b_{\max} \frac{b_{\max} t_i^2}{6} + \frac{v_0^2}{2b_{\max}} - \frac{v_0 t_i}{2} + \frac{b_{\max} t_i^2}{8},$$

a po úpravách dostaneme vztah

$$S = v_0 T + \frac{1}{2} v_0 t_i + \frac{v_0^2}{2b_{\max}} - \frac{b_{\max} t_i^2}{24} \approx v_0 \left(t_r + \frac{1}{2} t_i \right) + \frac{v_0^2}{2b_{\max}}, \quad (1.44)$$

kde člen $-\frac{b_{\max} t_i^2}{24}$ zanedbáme, jelikož má několikanásobně menší hodnotu než ostatní.

1.4.2 Matematický popis

Klíč ke správnému Car-Following modelu je dle Krausse je hlavně bezpečná rychlost. Pokud čelní vozidlo sníží rychlost, aktuální vozidlo musí začít brzdit. Pokud obě vozidla zastaví, jejich polohu bude možno vypočítat na základě vztahu

$$S_l + g(t) = S_f, \quad (1.45)$$

kde S_l představuje polohu čelního vozidla, $g(t)$ mezeru mezi oběma vozidly a S_f polohu aktuálního vozidla.

Pokud pomineme reakční čas čelního řidiče, brždění se skládá ze dvou částí probíhajících v čase: zvyšování decelace t_{li} a maximální brždění t_{lc} .

Poloha čelního vozidla je v celém brzdícím průběhu dána rovnicí

$$S_l = S_{li} + S_{lc} = \frac{1}{2} v_l t_{li} + \frac{v_l^2}{2a_{\max}} - \frac{b_{\max} t_{li}^2}{24} \approx \frac{1}{2} v_l t_{li} + \frac{v_l^2}{2a_{\max}}, \quad (1.46)$$

kde a_{\max} je maximální decelerace čelního vozidla.

Poloha aktuálního vozidla (vozidla jedoucího za čelním) je v celém brzdícím procesu rovna

$$S_f = S_r + S_i + S_c = v_{\text{safe}}T + \frac{1}{2}v_{\text{safe}}t_i + \frac{v_{\text{safe}}^2}{2b_{\text{max}}} - \frac{b_{\text{max}}t_{fi}^2}{24} \approx v_{\text{safe}}\left(T + \frac{1}{2}t_{fi}\right) + \frac{v_{\text{safe}}^2}{2b_{\text{max}}}. \quad (1.47)$$

Pokud do rovnice (1.45) dosadíme za S_l (rovnice (1.46)) a za S_f (rovnice (1.47)) dostáváme

$$v_{\text{safe}}\left(t_r + \frac{1}{2}t_{fi}\right) + \frac{v_{\text{safe}}^2}{2b_{\text{max}}} - \frac{1}{2}v_l t_{li} - \frac{v_l^2}{2a_{\text{max}}} - g = 0. \quad (1.48)$$

Z rovnice (1.48) už můžeme přes výpočet diskriminantu vyjádřit v_{safe} :

$$v_{\text{safe}} = -b\left(T + \frac{t_{fi}}{2}\right) + \sqrt{b^2\left(t_r + \frac{t_{fi}}{2}\right)^2 + b\left(v_l t_{li} + \frac{v_l^2}{a} + 2g\right)}. \quad (1.49)$$

V simulaci je potom čas decelerace stejný $t_i = t_{li} = t_{fi}$, z toho plyne

$$v_{\text{safe}} = -b\left(T + \frac{t_i}{2}\right) + \sqrt{b^2\left(T + \frac{t_i}{2}\right)^2 + b\left(v_l t_i + \frac{v_l^2}{a} + 2g\right)}, \quad (1.50)$$

pokud čelní vozidlo stojí, je jeho rychlost $v_l = 0 \text{ ms}^{-1}$ a jeho poloha se nemění $S_l = 0$, potom můžeme zjednodušit rovnici (1.50) na

$$v_{\text{safe}} = -b\left(T + \frac{t_i}{2}\right) + \sqrt{b^2\left(T + \frac{t_i}{2}\right)^2 + 2bg}. \quad (1.51)$$

Tato rovnice (1.51) je jakýmsi doplňkem ke Kraussovmu modelu, pouze přesněji definuje bezpečnou rychlost. Princip Kraussova modelu stále zůstává ve volbě preferované rychlosti, kterou se vozidlo bude pohybovat. Tato volba je dána minimální hodnotou, viz rovnice v_{des} v (1.39).

1.4.3 Parametry Rozšířeného Kraussova modelu

Všechny proměnné a parametry Kraussova modelu potom jsou:

- g - aktuální mezera mezi vozidly,
- b - aktuální decelerace,
- t_i - čas, při kterém je zvyšována decelerace,
- T - reakční čas řidiče.

1.5 Intelligent Driver Model

Intelligent Driver Model (dále jen IDM) je poměrně nový matematický model z roku 2000, který byl vymyšlen v Německu. Snaží se vylepšit některé nedostatky předcházejících modelů, ale i přispět novými myšlenkami v této oblasti.

V této sekci budeme primárně vycházet z práce [22] a [21], ve které je IDM do značné míry rozebrán. Využijeme hlavně podkapitulu 5.1 z [22], kterou doplníme o poznatky, které jsou uplatněny z kapitoly 1.

1.5.1 Matematický popis

Pro výpočet zrychlení v IDM je použit vztah

$$v_n(t + \Delta T) = v_n(t) + a_{\text{free}} + a_{\text{int}}, \quad (1.52)$$

kde $v_n(t)$ značí rychlost vozidla v čase t a ΔT je simulační krok. Aktuální zrychlení vozidla se tedy vypočítá jako součet zrychlení při volném proudu a_{free} a zrychlení, ve kterém je zahrnut i vozidlo jedoucí před ním a_{int} . Zde je vidět určitá paralela s Gippsovým modelem (kapitola 1.2), kde se ovšem vybírá pouze jedna z těchto dvou hodnot. Navíc i rovnice se od IDM odlišují. Pro volný proud je tedy zrychlení $a_{\text{int}} = 0$.

Zrychlení při volném proudu je definováno vztahem

$$a_{\text{free}} = a \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_{n\text{free}}} \right)^\delta \right], \quad (1.53)$$

kde a je maximální zrychlení, δ je exponent zrychlení, v_n je aktuální rychlost vozidla a $v_{n\text{free}}$ je rychlost, které chce vozidlo dosáhnout.

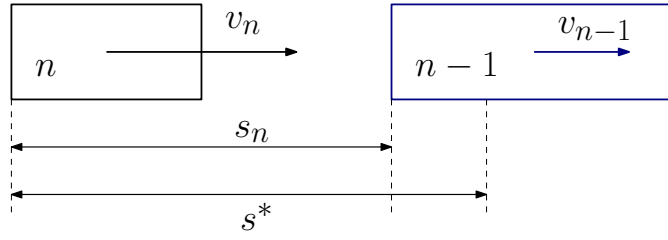
Pokud v rovnici (1.53) bude zlomek v_n/v_{free} roven jedné, auto se již dostalo na svou preferovanou rychlost v_{free} a celkové zrychlení a_{free} bude rovno nule. Naopak pokud bude v_n rovno nule, znamená to, že a_{free} bude přímo rovno a , a auto pojede svým maximálním zrychlením. Pokud v_n bude menší než v_{free} , pak platí že, čím vyšší hodnotu bude mít nastavenou parametr δ , tím se dosáhne vyšší hodnota a_{free} . Pokud v_n bude větší než v_{free} , bude platit pravý opak.

Auto jedoucí při volném proudu je ale nereálná představa, proto se do rovnice (1.52) přidává interakční člen, který přímo závisí na parametrech vozidla jedoucí před naším účastníkem. Tento člen je roven

$$a_{\text{int}} = -a \left(\frac{s_n^*}{s_n} \right)^2, \quad (1.54)$$

kde a je maximální zrychlení, $s_n = x_{n-1} - x_n$ je rozdíl poloh vozidel a s_n^*

$$s_n^* = s_0 + v_n \tau + \frac{v_n(v_n - v_{n-1})}{2\sqrt{ab}} \quad (1.55)$$



Obrázek 1.5: Proměnné jednotlivých vozidel, zdroj: [22]

je preferovaný odstup. Hodnota s_0 se vypočte jako součet minimální bezpečné vzdálenosti mezi vozidly a délkou následujícího vozidla, τ je bezpečnostní časový odstup mezi vozidly a b je konstanta brzdění. Situace je schématicky znázorněna na obrázku 1.5.

Člen úměrný $v_n - v_{n-1}$ je kvadratický v proměnné v_n a obsahuje součin $v_n v_{n-1}$. Tyto nelineární členy popisují interakci, v tomto případě dvou vozidel. Pokud tedy bude vzdálenost s_n mezi auty vysoká, potom zlomek s_n^*/s_n bude mít velmi malou hodnotu a interakční člen a_{int} lze zanedbat, takže vozidlo se pohybuje jako ve volném proudu.

Pokud rychlost auta v_n bude vyšší než rychlost auta v_{n-1} , pak interakční člen s_n^* bude kladný a požadovaný odstup se zvětší, takže zrychlení auta \dot{v}_n se musí snížit.

Dosažením do rovnice (1.52) za a_{int} z rovnice (1.54) a a_{free} z rovnice (1.53) dostáváme **konečný vztah pro zrychlení vozidla**:

$$v_n(t + \Delta T) = v_n(t) + a \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_{n\text{free}}} \right)^\delta \right] - a \left(\frac{s_0 + v_n \tau + \frac{v_n(v_n - v_{n-1})}{2\sqrt{ab}}}{s_n} \right)^2. \quad (1.56)$$

1.5.2 Parametry IDM

Všechny proměnné a parametry IDM potom jsou:

- s_n - aktuální odstup mezi vozidly,
- τ - časová mezera mezi vozidly,
- v_n - rychlost aktuálního vozidla,
- v_{n-1} - rychlost $n - 1$ vozidla,
- a - maximální hodnota zrychlení, kterým je řidič ochoten zrychlovat,
- b - maximální decelerace,
- s_0 - bezpečnostní mezera mezi vozidly,
- $v_{n\text{free}}$ - preferovaná rychlost vozidla.

1.6 Wiedemannův model

V programu SUMO je také připraven Wiedemannův model, jehož první verze vznikla již v roce 1974 jako disertační práce tehdejšího studenta R. Wiedemanna. Tento model byl posléze několikrát vylepšován, v roce 1992 o tomto modelu vyšel aktualizovaný článek. Tyto práce ovšem bohužel nejsou k dispozici. V této sekci budeme hlavně vycházet z článku [10]. V něm najdeme poměrně přesný popis Wiedemannova modelu⁵.

Tento model je odlišný oproti předcházejícím tím, že pracuje v tzv. režimech. Nejprve je nutné zjistit, v jakém režimu se vozidlo vlastně nachází a podle toho se určuje výpočet akcelerace či decelace, která je pro každý režim jiná.

Klíčové pro pochopení Wiedemannova modelu je obrázek 1.6. Osa x zobrazuje rozdíl rychlostí vozidel Δv (aktuálního a následujícího) a na ose y se nachází vzdálenost mezi těmito vozidly Δx . Znamená to, že pokud rozdíl rychlostí a zároveň rozdíl poloh vozidel dosahuje určitých hodnot, vždy náleží jednomu konkrétnímu režimu, podle kterého je vozidlo dále zpracováváno. K tomu abychom mohli určit příslušný režim vozidla, musíme si určit prahové hodnoty křivek AX , ABX , SDX , $CLDV$, $OPDV$ a SDV .

Preferovaný odstup mezi stacionárními⁶ vozidly značíme AX . Tento práh sestává s délky čelního vozidla sečtenou s preferovanou vzdáleností mezi vozidly. Je definován vztahem

$$AX = L_{n-1} + AXadd + RND1_n \cdot AXmult, \quad (1.57)$$

kde $AXadd$ a $AXmult$ jsou parametry modelu a $RND1_n$ značí parametr závislý na řidiči generovaný z normálního rozdělení.

ABX je preferovaná maximální vzdálenost mezi vozidly při malých rozdílech. Ten se vypočítá následovně:

$$ABX = AX + BX, \quad (1.58)$$

kde

$$BX = (BXadd + BXmult \cdot RND1_n) \cdot \sqrt{v}, \quad (1.59)$$

kde $BXadd$ a $BXmult$ jsou opět parametry modelu. Rychlost v určujeme v závislosti na základě následujícího vozidla,

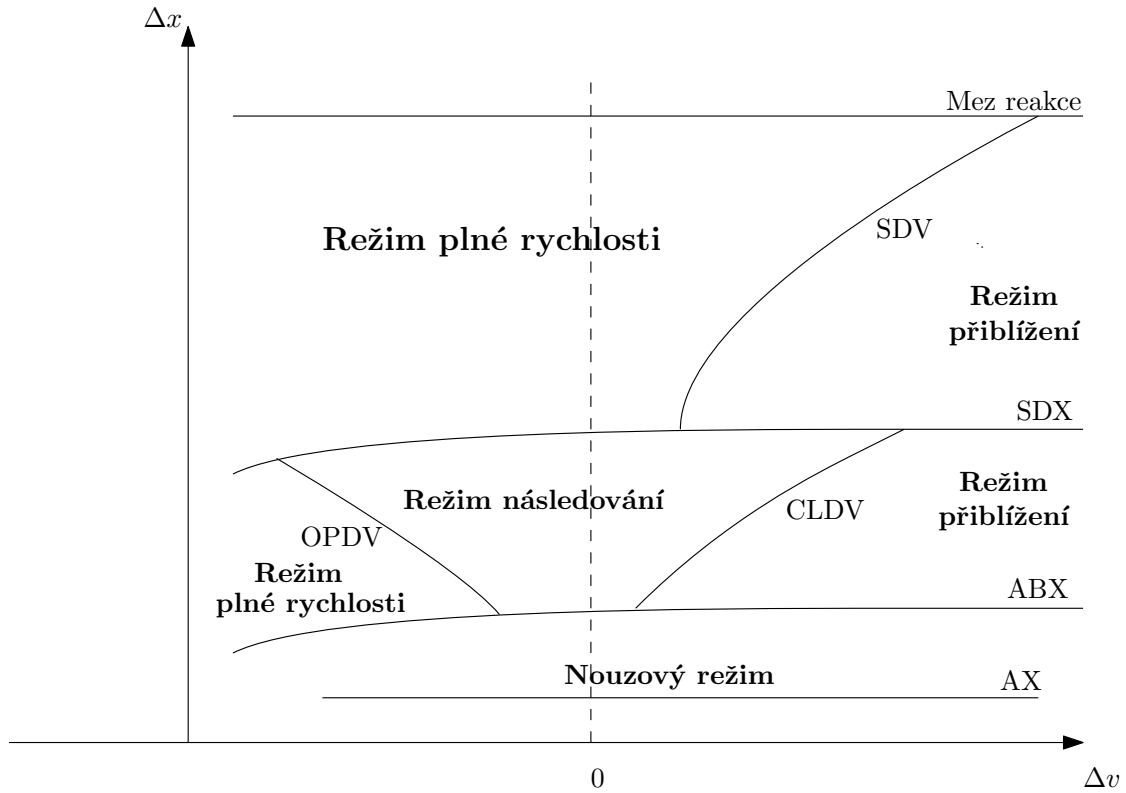
$$v = \begin{cases} v_{n-1} & \text{pro } v_n > v_{n-1}, \\ v_n & \text{pro } v_n \leq v_{n-1}. \end{cases} \quad (1.60)$$

Maximální vzdálenost při které bere vozidlo na zřetel vozidlo před sebou se značí SDX . SDX se pohybuje mezi 1,5 až 2,5 násobkem hodnoty ABX a je definována následovně:

$$SDX = AX + EX \cdot BX, \quad (1.61)$$

⁵Tento článek se přímo odkazuje na článek z roku 1992.

⁶nezávislé na čase



Obrázek 1.6: Režimy Wiedemannova modelu, zdroj: [10]

kde EX stejně jako u ostatní členů je roven

$$EX = EX_{add} + EX_{mult} \cdot (NRND - RND2_n). \quad (1.62)$$

Parametry EX_{add} a EX_{mult} se používají pro zpřesnění výpočtů, hodnota $NRND$ je generována z normálního rozdělení a $RND2_n$ značí parametr závislý na řidiči generovaný také z normálního rozdělení.

Další důležitou křivku určující práh, kdy řidič zjistí, že se přibližuje pomalejšímu vozidlu před sebou, značíme SDV . Vypočítá se vztahem:

$$SDV = \left(\frac{\Delta x - L_{n-1} - AX}{CX} \right)^2, \quad (1.63)$$

kde CX zavedeme jako

$$CX = CX_{const} \cdot (CX_{add} + CX_{mult} \cdot (RND1_n + RND2_n)), \quad (1.64)$$

Parametry CX_{const} , CX_{add} a CX_{mult} jsou zde opět pro zpřesnění výpočtů při určování režimu.

Pokud se jedná o klesající rozdíl rychlostí $CLDV$, v [10] je uvedeno, že v článku z roku 1992 od Wiedemanna a Reitera je stejná jako křivka SDV .

Při zvyšujícím se rozdílu rychlostí, OPDV, řidič zjišťuje, že jede rychlostí nižší než vozidlo před ním. Práh OPDV se vypočítá jako součin SDV a parametrů modelu $OPDV_{add}$, $OPDV_{mult}$ a $NRND$, což je náhodné číslo z normálního rozdělení,

$$OPDV = CLDV \cdot (-OPDV_{add} - OPDV_{mult} \cdot NRND) = SDV \cdot (-OPDV_{add} - OPDV_{mult} \cdot NRND). \quad (1.65)$$

Na základě těchto práhů stanovujeme příslušný režim Wiedemanna modelu. Tyto režimy jsou taktéž zobrazeny na obrázku 1.6.

Režim následování: Hodnota zrychlení vozidla je vždy počítána každou iteraci znovu od nuly. Důvodem je nepřesné zacházení s plynovým pedálem ve vozidle. Pokud vozidlo překoná práh SDV či ABX , jeho hodnota akcelerace bude rovna $-b_{null}$. Naopak při dosažení práhů $OPDV$ či SDX bereme kladnou hodnotu b_{null} . Akcelerace či decelerace je definována jako

$$b_{null} = BNULLMult \cdot (RND4_n + NRND), \quad (1.66)$$

kde $BNULLMult$ je parametr modelu, hodnota $NRND$ je generována z normálního rozdělení a $RND4_n$ značí parametr závislý na řidiči; je generován také z normálního rozdělení.

Režim plné rychlosti: Vozidlo je umístěno nad všemi prahy v obrázku 1.6 a jede nezávisle na okolní dopravě. Vozidlo jede s maximálním zrychlením tak, aby dosáhlo své preferované rychlosti. Nepřesné zacházení s plynem ve vozidle je modelováno přiřazením akcelerace b_{null} či $-b_{null}$. Maximální zrychlení je definováno jako

$$b_{\max} = BMAXmult \cdot (v_{\max} - v \cdot FaktorV), \quad (1.67)$$

kde $FaktorV$ zavedeme jako

$$FaktorV = \frac{v_{\max}}{v_{des} + FAKTORVMult \cdot (v_{\max} - v_{des})}, \quad (1.68)$$

kde v_{\max} je maximální rychlost vozidla a $FAKTORVMult$ parametr modelu.

Režim přiblížení: Pokud přesáhne vozidlo práh SDV , řidič zjišťuje, že se přibližuje pomalejšímu vozidlu. Řidič tedy začne zpomalovat, aby zabránil kolizi. Decelerace se vypočítá vztahem

$$b_n = \frac{1}{2} \frac{(\Delta v)^2}{ABX - (\Delta x - L_{n-1})} + b_{n-1}, \quad (1.69)$$

kde b_{n-1} je decelerace následujícího vozidla.

Nouzový režim: Jestliže vzdálenost čela aktuálního vozidla s nárazníkem vozidla před aktuálním je menší než ABX , decelerace se vypočítá následovně

$$b_n = \frac{1}{2} \frac{(\Delta v)^2}{AX - (\Delta x - L_{n-1})} + b_{n-1} + b_{\min} \frac{ABX - (\Delta x - L_{n-1})}{BX}, \quad (1.70)$$

kde b_{\min} je maximální decelace vozidla a zavedeme ji jako

$$b_{\min} = -BMINadd - BMINmult \cdot RND3_n + BMINmult \cdot v_n, \quad (1.71)$$

kde $BMINadd$ a $BMINmult$ jsou parametry modelu a $RND3_n$ značí parametr závislý na řidiči generovaný z normálního rozdělení.

1.7 Shrnutí

Časově spojitě mikroskopické modely jsou v zásadě definovány funkcí zrychlení. V nejstarších modelech může zrychlení $a(t + T_r)$ vozidla α zapsáno jako

$$a(t + T_r) = \frac{-\lambda v_\alpha^m \Delta v_\alpha}{s_\alpha^l}, \quad (1.72)$$

kde λ , l a m jsou parametry modelu, s je odstup mezi vozidly a Δv_α rozdíl rychlostí.

Kromě toho může zrychlení může také záviset na vlastní rychlosti vozidla v_α a klesá se vzdáleností s_α k vozidlu před ním,

$$s_\alpha = x_{\alpha-1} - x_\alpha - l_\alpha, \quad (1.73)$$

kde l_α je délka vozidla α .

V závislosti na rovnici (1.72), kdy zrychlení závisí na vedoucím vozidle, tyto modely není možné použít při velmi nízkých hustotách provozu. Pokud není určeno vedoucí vozidlo ($s_\alpha \rightarrow \infty$), zrychlení buďto není možné stanovit (pro hodnotu $l = 0$) nebo je rovno nule ($l > 0$) bez ohledu na rychlost vozidla. Dá se předpokládat, že v tuto chvíli se vozidla budou snažit dosáhnout své preferované rychlosti. Chování vozidel v hustém provozu je ovšem poněkud nerealistické. Především odstup mezi vozidly s týkající se vedoucího vozidla nemusí nutně směřovat k rovnovážnému stavu. Ani malé mezery nepřimějí vozidlo k brždění pokud je rozdíl rychlostí Δv_α roven nule.

Tyto problémy byly vyřešeny v Newellově modelu (viz podkapitola 1.1), kde je z rovnice (1.10) vidět, že zrychlení není závislé pouze na rozdílu rychlostí. Newellův model je nekolizní, ale okamžitá závislost na rychlosti na hustotě provozu vede k velmi vysokým hodnotám zrychlení.[20]

Kromě Newellova modelu a dalších modelů pro základní výzkum existují také vysoce komplexní modely jako Wiedemannův (viz. odstavec 1.6). Bohužel tyto modely vyžadují mnoho parametrů.

Další model, který obsahuje realistické brzděné reakce řidičů, je Gippsův model 1.2 a Kraussův model 1.3. Navzdory své jednoduchosti, tyto modely ukazují realistické chování řidiče a jsou nekolizní. Toto chování se bohužel ztrácí ve chvíli, kdy modelujeme dopravu deterministicky⁷. V těchto případech není možné simulovat nestabilní stavy dopravy.

⁷např. když vozidla vjíždí do určité oblasti každých 5 sekund

2. Simulační a podpůrný software

Po předchozím uvedení modelů nastává otázka dalšího postupu. Nabízí se následující možnosti:

- pokračovat v aplikaci, kterou autor vytvořil pro svoji bakalářskou práci,
- využití softwaru AIMSUN,
- opensource simulační software SUMO.

Po vyhodnocení všech hledisek se autor rozhodl zvolit platformu softwaru SUMO. Autor si je vědom toho, že software SUMO je pouze podpůrným nástrojem pro jeho práci, nicméně pro pochopení některých dílčích problémů, které jsou zde řešeny, je nutné zde vysvětlit i některé činnosti vlastního fungování tohoto softwaru.

V této kapitole rozebereme simulační software SUMO¹ a další, ať již naprogramované autorem či volně dostupné nástroje z nichž bude patrné proč autor vybral právě tento postup.

2.1 SUMO

SUMO je open-source nástroj pro dopravní simulace. Ve výzkumu se dá SUMO využít v mnoha oblastech např. vyhledání nejkratší cesty², možnost zkoušení signálních plánů nebo simulace komunikace mezi vozidly. SUMO bylo a je využíváno na mnoha zajímavých projektech³.

Od roku 2001 se SUMO postupně rozšiřovalo a nyní je z něj již soubor několika programů. Umožňuje na základě dopravních měření, matic vzdáleností využívat různé routovací algoritmy, simulování křižovatek. Obsahuje také rozhraní TraCI pro online simulaci.

Při vývoji SUMO existovaly dva hlavní důvody, proč by měl být opensource. První z nich je snaha podporovat společenství, které se zabývá simulacemi, volně dostupným nástrojem ve kterém již budou zahrnuty základní algoritmy. Existují některé další volně dostupné simulační softwary, které se však dále nerozvíjely a přestaly být dříve či později podporovány. Druhým důvodem je neexistující porovnatelnost implementovatelnost modelů a algoritmů.

Tento druhý důvod a také možnost vlastní implementace modelů vedly autora k volbě SUMO. K tomu, aby bylo možné vlastní modely vůbec implementovat, bylo nejprve nutné vlastní SUMO zkompileovat, to znamená, že nestačí pouze verze SUMO, které obsahuje spustitelné soubory, ale přímo zdrojové kódy. Více o tom, jak SUMO zkompileovat, je uvedeno v příloze B.

¹Simulation of Urban MObility

²či jiného kritéria

³např. předpověď dopravních proudů v době MS v Německu v roce 2006 v Kolíně nad Rýnem, využití komunitou V2X pro zjišťování dráhy vozidla atd.

2.1.1 Jak to funguje

Po zjištění, čeho všeho je SUMO přibližně schopno, je k tomu, aby byla spuštěna simulace, mít zapotřebí připraveny minimálně tři typy souborů, a to:

- konfigurační soubor,
- soubor s podkladem (dopravní síť),
- soubor s vozidly,
- další soubory.

2.1.2 Konfigurační soubor

V konfiguračním souboru je možné nastavit všechny možnosti, které se bez tohoto souboru musí zapsat při spuštění SUMO jako parametry příkazové řádky. To lze využít, když se SUMO spouští s mnoha parametry.

2.1.3 Soubor s podkladem

Pro diplomovou práci obdržel autor data, a to konkrétně intenzity a průměrné rychlosti z mýtných bran Pražského okruhu. Bylo proto vhodné mít jako podklad pro simulaci síť v konkrétních úsecích mezi mýtnými branami. Pro mapu oblasti bylo využito volně dostupných map ze serveru OpenStreetMap, kde se konkrétní úsek stáhnul ve formátu OSM a vymazaly se všechny prvky nesouvisející s Pražským okruhem. Posléze byl použit jeden z nástrojů SUMO a to konkrétně netconvert, který převádí data z předem definovaného formátu do SUMO formátu. Více k tomuto tématu v příloze C.

SUMO navíc také umožňuje využít vlastní nástroj na generování sítí, JTRrouter či DFrouter.

2.1.4 Vozidla pro simulaci

Vozidla mají v SUMO několik parametrů, které mimo jiné závisí také na volbě mikroskopického modelu. Mezi základní patří

- id vozidla,
- typ vozidla,
- dráha, po které se bude vozidlo pohybovat,
- čas vjezdu do oblasti,
- místo vjezdu do oblasti,
- rychlost při vjezdu do oblasti,
- jízdní pruh při vjezdu do oblasti.

Můžeme tedy na začátku definovat typ vozidla, což znamená jeho parametry jako např. délka vozidla, zrychlení, max. rychlost atp. Poté u každého vozidla nastavíme tento typ a vozidlo automaticky dostane všechny přiřazené parametry.

Dráha, po které se bude vozidlo pohybovat, souvisí s podkapitolou 2.1.3, kde přímo tyto jízdní úseky vytváříme. Tento parametr může obsahovat více hodnot (např. jednotlivé úseky, po kterých se dané vozidlo bude pohybovat), v případě Pražského okruhu minimálně část mezi dvě mýtnými branami.

2.1.5 Další soubory

Další soubor, který vytvoříme, se týká informací o indukčních smyčkách. Definujeme zde její polohu a také informace, které má ukládat. Ty se dají nastavit stejně jako z dat, které máme k dispozici, tzn. počet vozidel za minutu a průměrná rychlost vozidel za minutu.

2.2 Příprava a vyhodnocení simulace - program

Aby bylo možné dostat se k jádru celé práce, je nutná příprava dat pro simulaci a také jejich následné vyhodnocení. K tomuto účelu byla vytvořena konzolová aplikace jménem *AllInOne.jar*. Pro její správnou funkčnost je nutné mít nainstalované rozhraní pro Java aplikace (JRE), která umožňuje 4 základní operace,

1. převedení formátu dat (MATLAB) z Pražského okruhu na formát podporovaný softwarem SUMO (XML),
2. vytvoření souboru vozidel pro simulaci (viz podkapitola 2.1.4),
3. vytvoření výstupů ze simulace (viz dále)

Tato aplikace byla vytvořena v jazyku JAVA z důvodu nalezení balíčku pro možnost práce s daty ze softwaru MATLAB. Dále se autor rozhodl, že vytvoří raději jednu přehlednou aplikaci než 5 malých.

2.2.1 Třída AllInOne

V hlavní třídě se nachází konstruktor, který na základě vstupních parametrů zavolá příslušnou třídu, případně vytiskne chybovou hlášku s problémem. Dále je zde funkce na zjištění, zda zadaný parametr je číslo.

- *public AllInOne(String args[])* - konstruktor, větvení na základě vstupního pole *args*
- *public static boolean isInteger(String s)* - funkce na kontrolu, zda je vstupní řetězec *s* číslo

2.2.2 Převedení formátu dat - třída MatlabToXML

Pro SUMO je možné vytvořit si jakýkoliv soubor vozidel. SUMO obsahuje přímo manuál, jak tento soubor vytvořit. Není ovšem vhodné vytvářet ho ručně, nýbrž použít nějaký nástroj pro XML.

Třída, která toto umí v Javě, je nazvána *MatlabToXML*. V konstruktoru se vytvoří soubor, jehož název je jeden ze vstupních parametrů a poté ve funkci *createLoopDocument* se přímo vytváří jeho obsah.

- *public MatlabToXML(String fileNameMatlab, String fileNameCars)* - první vstupní parametr určuje soubor ve formátu .mat, který má předem definovanou strukturu, která je shodná s mýtnými branami z Pražského okruhu. Výstupní soubory se potom budou jmenovat na základě vstupní proměnné *fileNameCars*, kde dále bude následovat potržítko a číslo pruhu⁴, ve kterém budou informace o rychlostech a intenzitách pouze pro ten daný pruh.
- *public Document createLoopDocument(int lane)* - vstupní parametr *lane* určuje pruh, pro který se právě obsah souboru vytváří.

Výstupní soubor bude shodný s výstupním souborem po simulaci SUMO, takže bude možné přesně jednotlivé hodnoty z mýtných bran porovnat s nasimulovanými.

Příkaz, kterým lze program spustit aby vytvořil tento dokument, je následující

```
1 java -jar AllInOne.jar -m sokp-0187-20121031.mat det0187.xml
```

Ze souboru *sokp-0187-20121031.mat* vytvoří v závislosti na počtu pruhů pod touto mýtnou branou stejný počet souborů, tedy *det0187-0.xml*, *det0187-1.xml* atd.

Tyto soubory lze následně použít jako vstup pro vytvoření souboru s vozidly pro SUMO a nebo pro vytvoření grafů nebo histogramů pro porovnání výsledků se simulací.

2.2.3 Vytvoření souboru vozidel pro simulaci - třída XMLCreator

Další funkcí, kterou aplikace disponuje, je vytvoření vozidel pro simulaci. Tento soubor je plně kompatibilní se vstupními soubory pro SUMO. Vstupním souborem pro generování vozidel bude opět soubor s příponou .mat, výstupním souborem potom jeden soubor obsahující za sebou seřazená vozidla dle vjezdu do oblasti s rychlostí vygenerovanou z Gaussova rozdělení. Další parametry jsou předem dané či generované v aplikaci a určují se na základě volby modelu, který lze nastavit z příkazové řádky.

Jediný problém nastává ve chvíli, kdy musíme jednotlivým vozidlům nastavit jejich cestu v simulaci. Pokud všechna vozidla pojedou po stejné dráze, stačí, když se každému vozidlu přiřadí cesta, která je shodná s názvy hran podkladu (viz. podkapitola 2.1.3 a C.1 poslední odstavec).

⁴Např. pro vstupní parametr *detektorkm0201.xml*, budou výstupní soubory *detektorkm0201_0.xml* a *detektorkm0201_1.xml*

Pro naší simulaci cestu pro vozidlo předem připravíme tak, aby všechna vozidla projela úsekem, který chceme simulovat. V konzolové aplikaci v tomto směru není nutné nic dalšího nastavovat.

Třída XMLCreator obsahuje následující konstruktor a metody

- *public XMLCreator(String fileNameMatlab, String fileNameCars, String model, String type)* - konstruktor, který přijímá název souboru, ze kterých budeme vozidla generovat, název výstupního souboru a způsob generování vozidel,
- *public Document createRouteEqualDocument(String model)* - naplnění souboru při konstantní časové vzdálenosti vozidel,
- *public Document createRouteExpDocument(String model)* - naplnění souboru při generování vozidel z exponenciálního rozdělení,
- *public Element createVType(Element element, int actualCar, String model, int iTime, int lane)* - vytvoření parametrů pro konkrétní vozidlo, v závislosti na modelu
- *public Element createVehicle(Element element, int actualCar, double time, int iTime, int lane, String type)* - vytvoření jednoho exempláře vozidla s příslušnými parametry, *actualCar* je pořadí vozidla od začátku simulace, *lane* pruh do kterého bude vozidlo vygenerováno, *time* je čas ve kterém vozidlo bude vpuštěno do simulace.

Lze přidat konkrétní model, třetí parametr příkazu, podle kterého chceme aby SUMO simulovalo provoz. Tento parametr je nepovinný a pokud ho nezadáme, program předpokládá volbu Kraussova modelu.

Základními parametry jsou:

- zrychlení a ,
- decelerace b ,
- reakční čas řidiče T .

Zatím jsou k dispozici 4 modely a k nim příslušné parametry:

- Gippsův model [1.2](#)
 - desiredSpeed (V_n) - preferovaná rychlost daného vozidla, rychlost je generovaná z normálního rozdělení se střední hodnotou 130 a směrodatnou odchylkou

1

```
java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml Gipps
```

- Kraussův model a Rozšířený Kraussův model [1.3](#)
 - η - náhodná výchylka od běžného řízení - hodnota 0,5.

```
1 java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml Krauss
```

```
1 java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml
    KraussOrig
```

- IDM - Intelligent Driver Model [1.5](#)

- delta (δ) - exponent akcelerace (rovnice [\(1.53\)](#)) - hodnota 4
- stepping - počet iterací při výpočtu rychlosti - hodnota 1

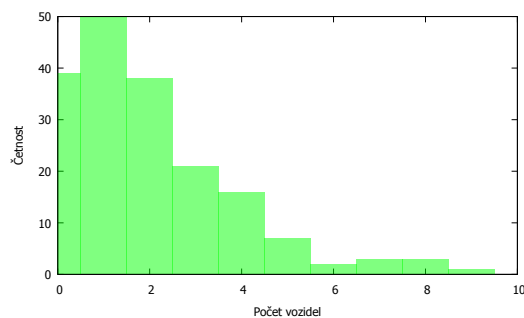
```
1 java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml IDM
```

- Wiedemannův model - parametry použity pro výpočet prahových hodnot

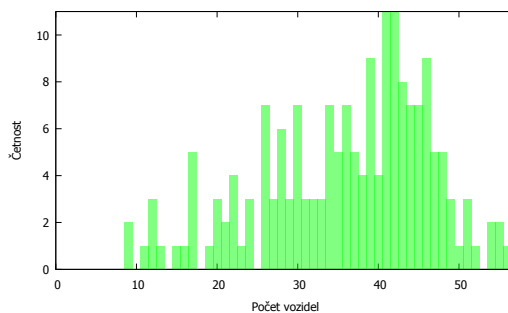
- estimation - hodnota 0.5
- security - hodnota 0.5

Výsledný soubor bude mít název vozidla.rou.xml - .rou je povinná druhá přípona, která pokud není uvedena, SUMO nespustí simulaci.

Výchozí generování vozidel je deterministické. Pokud nám v jedné minutě projede např. 10 vozidel, tak vozidla budou mít vstupní čas rovnoměrně rozdělen po 1/10. Tato varianta se zde nachází proto, aby bylo možné zkontrolovat správné generování vozidel, či případné chování jednotlivých modelů.



Obrázek 2.1: Četnosti pro čas od 2:00-5:00



Obrázek 2.2: Četnosti pro čas od 6:00-9:00

Další varianta využívá znalost, že pokud rozdělení počtu vozidel za nějaký čas je Poissonovo, potom odstupy mezi vozidly mají exponenciální rozdělení. Z pohledu na obrázek [2.1](#) a [2.2](#)⁵ lze předpokládat, že se opravdu jedná o Poissonovo rozdělení.

Pro variantu generování souboru vozidel deterministicky si můžeme nechat poslední parametr prázdný, výsledný příkaz tedy bude:

⁵vytvořeny také tímto programem

```
1 java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml Gipps
```

Pokud chceme, aby se nám vozidla generovala z exponenciálního rozdělení, kde se každou minutu bude měnit jeho parametr λ (v závislosti na počtu vozidel za minutu), zvolíme možnost spuštění s parametrem `exp`:

```
1 java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml Krauss exp
```

Je možné vynechat jeden či dva poslední parametry. V tu chvíli budou vozidla do simulace pouštěna s deterministickým časovým odstupem a budou se pohybovat na základě Kraussova modelu. Je možné také vynechat jeden z těchto dvou parametrů, tz.

```
1 java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml Gipps
```

generuje vozidla, která se budou pohybovat dle Gippsova modelu a budou mít deterministický časový odstup. Je možné vynechat i model, tz.

```
1 java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml exp
```

generuje vozidla z exponenciálního rozdělení. Pohyb bude na základě Kraussova modelu.

Výstupní soubor lze rovnou použít jako vstupní soubor vozidel pro simulaci v SUMO.

2.2.4 Výstupy ze simulací

Po simulaci SUMO vytvoří několik souborů. Hlavní soubor XML obsahuje informace o vozidlech, které se nacházejí v simulaci každou sekundu. Pro naše výstupy budou nejdůležitější soubory, které vzniknou pomocí dalšího souboru (viz 2.1.5). Tento soubor se bude zpracovávat stejně jako soubor vzniklý pomocí nástroje uvedeného v 2.2.2.

Pro porovnání reálných a nasimulovaných dat program nabízí tři možnosti vyhodnocení:

- časová řada počtu vozidel každou minutu,
- počet vozidel za časový úsek, jehož délku je možné nastavit,
- histogram četností vozidel. Zde je možnost nastavení časového intervalu, ve kterém nás četnosti zajímají.

2.2.5 Časová řada - třída XMLReader

Jednou z možností, jak zobrazit výstupy ze souborů, je pomocí časové řady. Program vyhodnotí všechny vstupní soubory a předpřipraví soubor *gnuplot.txt* pomocí kterého je potom možné vykreslit tuto řadu. Program vytvoří tento soubor pro každý pruh zvlášť a poté souhrnný soubor, který obsahuje každý pruh a součet vozidel v jednom grafu.

Třída XMLReader obsahuje následující konstruktor a metody

- *public XMLReader(String fileNameInput, String fileNameOutput) throws DocumentException* - první parametr je vstupní soubor ve formátu XML (buďto vytvořený programem z Matlab souboru nebo ze simulace SUMO), druhý parametr je potom název souboru, který po spuštění gnuplot vygeneruje. Po spuštění našeho programu je tedy nutné spustit ještě program gnuplot.
- *public static void timeSeries(String fileNameInput, String fileNameOutput, int numberOfFiles) throws DocumentException* - stejné parametry jako u konstruktoru + navíc počet souborů, které je nutné zpracovat
- *private static Calendar setStart(Calendar cal)* - nastavení časové řady od půlnoci do půlnoci
- *public static Document parse(String fileName) throws DocumentException* - rozdělení XML dokumentu na jednotlivé části

Je potřeba si uvědomit, že zadáváme jeden vstupní soubor, ale vstup je vlastně několik souborů zároveň. Např. příkaz

```
1 java -jar AllInOne.jar -x detektor.xml graf.pdf
```

prochází aktuální složku a kontroluje všechny XML soubory mající tvar *detektor_0.xml*, *detektor_1.xml* atd. Poté vytvoří pomocné soubory, které obsahují sadu příkazů pro vykreslení grafu gnuplotem. Pomocné textové soubory jsou vždy pro každý pruh dva, a to *pocetvozidelpruh_1.txt* a *gnuplot_1.txt* pro 1. pruh atd. Hlavní soubor, kde jsou obsaženy všechny pruhy, má název *gnuplot.txt* a ke svému spuštění potřebuje *pocetvozidelpruh.txt*.

2.2.6 Počet vozidel za daný čas - třída XMLReaderHist

Další variantou je vykreslení počtu vozidel za čas. Je možné vykreslit počet vozidel za minutu, kde výsledek bude stejný jako časová řada s tím rozdílem, že grafem bude histogram. Program tudíž umí nastavit i jinou časovou délku úseku - např. počet vozidel za hodinu.

Třída XMLReaderHist obsahuje následující konstruktory a metody

- *public XMLReaderHist(String fileNameInput, String fileNameOutput, String w) throws DocumentException* - stejná situace jako u XMLReaderu (viz 2.2.5), poslední parametr je potom délka úseku, za který chceme počítat vozidla
- *public static void hist(String fileNameInput, String fileNameOutput, int numberOfFiles, String w) throws DocumentException* - úplně stejná funkce jako u XMLReaderu doplněna o délku časového úseku

Všechny ostatní funkce, které třída obsahuje, již byly vysvětleny v předcházejících třídách.

Pokud chceme histogram počtu vozidel během celého dne, necháme poslední parametr volání prázdný, tedy

```
1 java -jar AllInOne.jar -xh detektor.xml histogram.pdf
```

Další možností je nastavit si délku časového úseku. Tato délka musí být dělitelná počtem minut dne (1440) a udává se v minutách. Jinak program argument ignoruje a vytvoří histogram, jako kdyby žádný parametr nebyl zadán. Příkaz

```
1 java -jar AllInOne.jar -xh detektor.xml histogram.pdf 60
```

tedy vytvoří histogram, kde se sčítají vozidla za hodinu.

2.2.7 Histogram - třída Histogram

Poslední možností analýzy výstupu je histogram četností počtu vozidel.⁶ Tento histogram můžeme udělat jak pro celý den, tak i pro určitou časovou oblast (např. ranní špička). Pokud nejsou zadány parametry od a do, histogram se vytvoří pro celý den. Je možné také vytvořit histogram přes půlnoc - tz. od 22:00 do 3:00.

Třída Histogram obsahuje následující konstruktor a metody:

- *public Histogram(String fileNameInput, String fileNameOutput, String from, String to) throws DocumentException* - opět stejné parametry jako v předchozích třídách, tz. název vstupního a výstupního souboru, který bude vytvořen po spuštění gnuplotu, a dále časové hodnoty od kdy a do kdy chceme histogram vykreslit,
- *public static void hist(String fileNameInput, String fileNameOutput, int numberOfFiles, String from, String to) throws DocumentException* - vytvoření souborů pro gnuplot, všechny parametry jsou stejné jako u předchozích tříd.

Pokud chceme vytvořit histogram počtu vozidel za celý den, příkaz vypadá následovně

```
1 java -jar AllInOne.jar -h detektor.xml histogram.pdf
```

Pokud nás zajímá pouze určitý časový úsek, např. ranní špička, na konec příkazu zadáme příslušné meze

```
1 java -jar AllInOne.jar -h detektor.xml histogram.pdf 2:00 5:00
```

pro vytvoření histogramů počtu vozidel od 2 do 5 ráno.

2.3 Shrnutí práce s programem

Program byl vytvořen v jazyce JAVA jako podpůrný prostředek pro vytvoření jak vstupů, tak výstupů pro program SUMO při daném typu vstupních dat z Pražského okruhu. Program se spouští s příkazové řádky příkazem

```
1 java -jar AllInOne.jar
```

⁶Obrázky 2.1 a 2.2 vznikly právě díky tomuto modulu.

a dále zadáním příslušných parametrů.

Program se dělí na hlavních 5 částí a pro každou z nich je uveden příklad pro spuštění:

- vytvoření vstupního souboru vozidel pro SUMO

- pravidelné rozložení - např. IDM model

```
1 java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml IDM
```

- z exponenciálního rozdělení - Kraussův model (není nutno uvádět)

```
1 java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml exp
```

- z exponenciálního rozdělení - Wiedemannův model

```
1 java -jar AllInOne.jar -c sokp-0201-20121001.mat vozidla.rou.xml  
  Wiedemann exp
```

- převedení formátu dat z Matlabu do formátu SUMO

```
1 java -jar AllInOne.jar -m sokp-0187-20121031.mat det0187.xml
```

- vytvoření grafu časové řady

```
1 java -jar AllInOne.jar -x detektor.xml graf.pdf
```

- vytvoření histogramu počtu vozidel za časový úsek - v tomto případě 1 hodina

```
1 java -jar AllInOne.jar -xh detektor.xml histogram.pdf 60
```

- vytvoření histogramu četností vozidel - v tomto případě od 2 do 5 hodin ráno

```
1 java -jar AllInOne.jar -xh detektor.xml histogram.pdf 2:00 5:00
```

3. Implementace nového modelu

V simulačním nástroji SUMO jsou již některé z modelů uvedených v kapitole 1 implementovány. V tuto chvíli bych zde uvedl obecné informace, které s implementací nového modelu souvisí bez ohledu na to, o jaký model se konkrétně jedná.

Než začneme, je nutné mít připravené soubory pro nový model, pro Gippsův model jsou to soubory *MSCFModel_Gipps.cpp* a *MSCFModel_Gipps.h*. Postup, jak nové soubory vytvořit a implementovat do SUMO je uveden v příloze D.

3.1 MSCFModel.h

V souboru *MSCFModel.h* (ne *MSCFModel_Gipps.h*) se nacházejí definice základních funkcí, které posléze v přidaném modelu implementujeme. Některé z nich použijeme u našeho implementovaného modelu. Ty, které nepoužijeme, zůstanou stejné a při použití našeho modelu během simulace se budou volat funkce implementované v *MSCF.cpp*, případně *MSCF.h*.

Při procházení zdrojových kódů je na první pohled vidět, že většina obecných funkcí je primárně vytvořena z Kraussova modelu. Zbytek funkcí počítá nějakou obecnou vlastnost, která přímo nesouvisí s modelem. Tyto funkce nemají u své definice klíčové slovo `virtual`, které značí, že tuto funkci je možno nahradit při vlastní implementaci nového modelu. Dále jsou zde proměnné, které při vytvoření nového modelu automaticky přístupné. **Tyto proměnné se používají i při jiných výpočtech jako je např. vjezd vozidla do oblasti. Je proto nutné dbát na to, abychom v implementaci nového modelu neuložili špatnou hodnotu (např. decelerace).**

Funkce obsahují většinou následující vstupní proměnné:

- *const MSVehicle* const veh* - ukazatel na aktuální vozidlo, přes něj je možné zjistit detailnější informace o vozidle
- *SUMOReal speed* - rychlost aktuálního vozidla
- *SUMOReal gap2pred* - vzdálenost mezi aktuálním a vedoucím vozidlem
- *SUMOReal predSpeed* nebo *SUMOReal vL* - rychlost vedoucího vozidla
- *SUMOReal predMaxDecel* nebo *SUMOReal vL* - maximální decelerace vedoucího vozidla

Ostatní vlastnosti vedoucího vozidla nejsme schopni jednoduše zjistit, nicméně rychlost a vzdálenost by při implementaci nových modelů měly plně postačit.

Seznam funkcí, které je možné přepsat, je následující:

- *virtual SUMOReal freeSpeed(const MSVehicle* const veh, SUMOReal speed, SUMOReal seen, SUMOReal maxSpeed, const bool onInsertion = false) const;* - výpočet rychlosti vozidla, které jede jako první, tj. jeho poloha je nejdále od začátku simulace a nejede před ním žádné vozidlo

- *virtual SUMOReal followSpeed(const MSVehicle* const veh, SUMOReal speed, SUMOReal gap2pred, SUMOReal predSpeed, SUMOReal predMaxDecel) const* - výpočet rychlosti vozidla na základě vlastností vedoucího vozidla
- *virtual SUMOReal insertionFollowSpeed(const MSVehicle* const veh, SUMOReal speed, SUMOReal gap2pred, SUMOReal predSpeed, SUMOReal predMaxDecel) const* - výpočet rychlosti vozidla při vjezdu do oblasti na základě vozidla, které se nachází před ním. **SUMO nenechá vjet vozidlo do oblasti, pokud není zajištěna bezpečná vzdálenost pro zabrždění vozidla.**
- *virtual SUMOReal stopSpeed(const MSVehicle* const veh, const SUMOReal speed, SUMOReal gap2pred)* - výpočet rychlosti ve chvíli, kdy se před vozidlem nachází statický objekt¹
- *virtual SUMOReal interactionGap(const MSVehicle* const veh, SUMOReal vL) const;* - výpočet mezery, kdy ovlivňuje vedoucí vozidlo aktuální

Můžeme také využít další podpůrné funkce, které přímo nezávisí na modelu. Dají se použít při např. při kontrole bezpečné rychlosti. Tyto funkce nelze primárně přepsat v novém modelu. Jsou to:

- *SUMOReal maximumSafeFollowSpeed(SUMOReal gap, SUMOReal predSpeed, SUMOReal predMaxDecel) const;* - výpočet maximální bezpečné rychlosti pro aktuální vozidlo na základě vedoucího
- *SUMOReal maximumSafeStopSpeed(SUMOReal gap) const;* - výpočet maximální bezpečné rychlosti pro zastavení

3.2 Implementace Gippsova modelu

K tomu abychom mohli přidat do SUMO Gippsův model, je nejprve nezbytné vytvořit soubory pro nový model - viz příloha D. Pokud vše funguje jak má, spustíme kompilaci SUMO a pokud vše proběhne bez problémů můžeme postoupit dále. Jinak je ovšem chyba v nedodržení postupu v příloze a není možné postupovat dále.

Ve chvíli, kdy se nám SUMO zkompilevalo a máme k dispozici soubory *MSCFModel_Gipps.cpp* a *MSCFModel_Gipps.h*, můžeme začít programovat Gippsův model. V příloze D v sekci D.2 je k dispozici návod na vytvoření vlastních parametrů, my ho použijeme pouze pro preferovanou rychlost vozidla *desiredSpeed* a tím pádem při tvorbě konstruktoru by nám měla být k dispozici hodnota proměnné *desiredSpeed*, kterou můžeme přidat jako parametr při vytváření souboru vozidel.

Prvně zakomponujeme do souboru *MSCFModel_Gipps.h* všechny naše nové proměnné, které budou k dispozici našemu modelu. Uložíme je do sekce *protected*, aby k nim měl přístup pouze Gippsův model, případně jeho potomek.

¹objekt, který má nulovou rychlost

```

1 protected:
2     SUMOReal myDesiredSpeed;
3     SUMOReal myGippsDecel;

```

Kromě *myDesiredSpeed* jsme zde přidali ještě jednu proměnnou a to z důvodu zpřehlednění (viz dále).

Nyní již vytvoříme konstruktor, který bude naplní proměnné zděděné od obecného modelu a zároveň naše nově přidané proměnné.

```

1 MSCFModel_Gipps::MSCFModel_Gipps(const MSVehicleType* vtype, SUMOReal accel,
    SUMOReal decel,
2     SUMOReal headwayTime, SUMOReal desiredSpeed)
3     : MSCFModel(vtype, accel, decel, headwayTime), myDesiredSpeed(desiredSpeed)
4     {
5         myGippsDecel = -decel;
6     }

```

Je také nutné v hlavičkovém souboru *MSCFModel_Gipps.h* upravit definici stávajícího konstruktoru na

```

1 MSCFModel_Gipps(const MSVehicleType* vtype, SUMOReal accel, SUMOReal decel,
    SUMOReal headwayTime, SUMOReal desiredSpeed);

```

MSCFModel_Gipps.h Tento kód zavolá konstruktor obecného modelu, uloží nám hodnoty zadané při generování vozidel do simulace do jednotlivých proměnných. My si potom přidáme ještě hodnotu *desiredSpeed* do proměnné *myDesiredSpeed* a do proměnné *myGippsDecel* uložíme zápornou hodnotu decelerace.

Není možné uložit do *myDecel* hodnotu *-decel*, protože na hodnotu *myDecel* se ptá SUMO v různých situacích a byla by v něm uložena záporná hodnota namísto kladné, které SUMO očekává.

V tuto chvíli bychom měli mít k dispozici následující proměnné v celém těle Gippsova modelu. Uvedeme zde také proměnnou odpovídající parametrům Gippsova modelu - viz 1.2.2:

- *myAccel* - akcelerace a_n ,
- *myGippsDecel* - decelerace b_n ,
- *myDesiredSpeed* - preferovaná rychlost V_n ,
- *myHeadwayTime* - reakční čas T_n .

Ostatní proměnné se mění v čase a vždy jsou vstupními parametry dané funkce.

Gippsův model pracuje tak, že vybírá minimální hodnotu z dvou možností: z rychlosti ve volném proudu či rychlosti při interakci z vedoucím vozidlem - viz rovnice 1.20. My si obě části této rovnice naprogramujeme, každá část rovnice bude jedna funkce. V souboru *MSCFModel_Gipps.h* je obě zdefinujeme,

```

1     private:
2     virtual SUMOReal vFree(SUMOReal speed) const;
3         virtual SUMOReal vInteraction(SUMOReal speed, SUMOReal
4             predSpeed, SUMOReal gap2pred) const;
5         virtual SUMOReal chooseBrakeConst(SUMOReal decel) const;

```

parametry těchto funkcí přímo odpovídají tomu, co pro výpočet daného členu potřebujeme. K funkci *chooseBrakeConst* se dostaneme za chvíli. Funkce *vFree* potom vypadá následovně:

```

1 SUMOReal MSCFModel_Gipps::vFree(SUMOReal speed) const {
2     SUMOReal actualSpeed = speed;
3     SUMOReal result = actualSpeed + 2.5*myHeadwayTime*myAccel*(1-actualSpeed
4         /myDesiredSpeed)*sqrt(0.025 + actualSpeed/myDesiredSpeed);
5     return result;
6 }

```

Funkce přesně kopíruje vzorec 1.12, který je u Gippsova modelu vzorec pro rychlost při volném proudu. Pokud je preferovaná rychlost V_n rovna aktuální rychlosti $v_n(t)$, celý člen za proměnnou *actualSpeed* se vyruší a dostáváme, že rychlost v následujícím kroku bude přímo stejná jako aktuální.

Interakční člen nám dokumentuje funkce *vInteraction* obsahující výpočet rychlosti na základě vedoucího vozidla. Její kód je následující:

```

1 SUMOReal MSCFModel_Gipps::vInteraction(SUMOReal speed, SUMOReal predSpeed,
2     SUMOReal gap2pred) const{
3     SUMOReal wholeGap = (gap2pred+myType->getMinGap())*2;
4     SUMOReal speeds = speed*myHeadwayTime + ((predSpeed*predSpeed)/(2*
5         chooseBrakeConst(myGippsDecel)));
6     SUMOReal sqrtPart = sqrt(myGippsDecel*myGippsDecel*myHeadwayTime*
7         myHeadwayTime - myGippsDecel*(wholeGap - speeds));
8     SUMOReal rV = myGippsDecel*myHeadwayTime + sqrtPart;
9     if (rV < 0)
10         rV = 0;
11     return rV;
12 }

```

Proměnná *wholeGap* odpovídá části $[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)]$. Tu bylo potřeba upravit pro účely SUMO. Nemáme totiž možnost zjistit parametr s_{n-1} , jenž závisí na délce vedoucího vozidla a k této informaci se jednoduše nedostaneme. Proto jsme upravili tento člen jako součet vzdálenosti mezi vozidly (předek aktuálního vozidla a zadek vedoucího vozidla) a k ní jsme přičetli minimální bezpečnostní odstup. Tím bychom měli dostat stejný výsledek jako je uvedeno v Gippsově modelu.

Další zajímavostí je výpočet členu \hat{b} . Při kalibraci Gippsova modelu vyšla nejlépe varianta brzdná konstanta vedoucího vozidla bude rovna:

$$\hat{b} = \min \left(-3.0, \frac{b_n - 3.0}{2} \right) m/sec^{-2}. \quad (3.1)$$

Tato rovnice přepsaná do funkce se rovná přesně obsahu funkce *chooseBrakeConst* definovanou v části *private*, viz výše. Její kód je poměrně jednoduchý:

```

1 SUMOReal MSCFModel_Gipps::chooseBrakeConst(SUMOReal decel) const{
2     return MIN2(-3.0, (- decel - 3.0)/2);
3 }

```

Funkce *MIN2* je vlastní funkce SUMO, která hledá minimum ze dvou hodnot.

Pro větší přehlednost jsme kód funkce *vInteraction* rozdělili na více částí. Podstatná je proměnná *myGippsDecel*, kterou jsme na začátku nastavili jako zápornou a proto zde figuruje s kladným znaménkem.

V tuto chvíli máme připravené obě funkce pro výpočet rychlostí pro vozidla vjíždějící do simulace.

V další fázi je potřeba tyto funkce využít pro výpočty. Všechny následující funkce budeme pouze nahrazovat již stávajícími, které obsahuje *MSCFModel*. Vždycky je otázkou, zda je nutné danou funkci přepisovat a nebo nechat její stávající verzi.

Začneme funkcí *freeSpeed*. Tato funkce nám vypočítává rychlost při volném proudu, tj. ve chvíli kdy před aktuálním vozidlem nejede žádné další. Mohli bychom tuto funkci nechat stejnou, tak jak je implementována v SUMO, ovšem daleko lepší bude tuto funkci přepsat a to z toho důvodu, že Gippsův model přímo uvažuje o rychlosti při volném proudu. Definice přepisovaných funkcí necháme vždy stejné jako v *MSCFModel.h*, pro *freeSpeed* by definice² vypadala takto:

```

1 virtual SUMOReal freeSpeed(const MSVehicle* const /* veh */, SUMOReal /* speed
    */, SUMOReal seen, SUMOReal maxSpeed, const bool onInsertion) const;

```

Implementace naší vlastní funkce *freeSpeed* bude následující

```

1 SUMOReal
2 MSCFModel_Gipps::freeSpeed(const MSVehicle* const veh , SUMOReal speed,
    SUMOReal seen, SUMOReal maxSpeed, const bool onInsertion) const {
3     return vFree(speed);
4 }

```

Je vidět, že většina vstupních parametrů funkce nejsou vůbec využity, nicméně musejí zde zůstat z důvodu kompatibility s ostatními modely. Gippsův model při výpočtu jednoduše tyto parametry jednoduše neřeší.

Další funkcí, kterou je nutné přepsat, bude zcela jistě *followSpeed*. Ta počítá rychlost v závislosti na vedoucím vozidle. My již víme, že tato funkce by měla vracet stejný výsledek jako rovnice 1.20. Její implementace vypadá následovně:

```

1 SUMOReal
2 MSCFModel_Gipps::followSpeed(const MSVehicle* const veh, SUMOReal speed,
    SUMOReal gap, SUMOReal predSpeed, SUMOReal predMaxDecel) const {
3     return MIN2(vFree(speed), vInteraction(speed, predSpeed, gap));
4 }

```

²Každá definice zde zmiňována bude umístěna do souboru *MSCFModel_Gipps.h* do části *public*. Tato definice je shodná s definicí uvedenou v souboru *MSCFModel.h*

Bylo vyzkoušeno změnit i funkci *insertionFollowSpeed*, nicméně zatím se zdá, že stávající verze implementována v SUMO je plně postačující.

Další funkcí k přepsání je *stopSpeed*. Tato funkce má stejné parametry jako *followSpeed* až na parametr *predSpeed*, který je v tuto chvíli nulový, protože tato funkce počítá rychlost, pokud se před ní nachází statický objekt. Proto voláme stejné funkce jako u *followSpeed* s tím, že *predSpeed* má hodnotu nula.

```
1 SUMOReal
2 MSCFModel_Gipps::stopSpeed(const MSVehicle* const veh, const SUMOReal speed,
   SUMOReal gap) const {
3     return MIN2(vFree(speed), vInteraction(speed, 0, gap));
4 }
```

Tímto je nový model implementován.

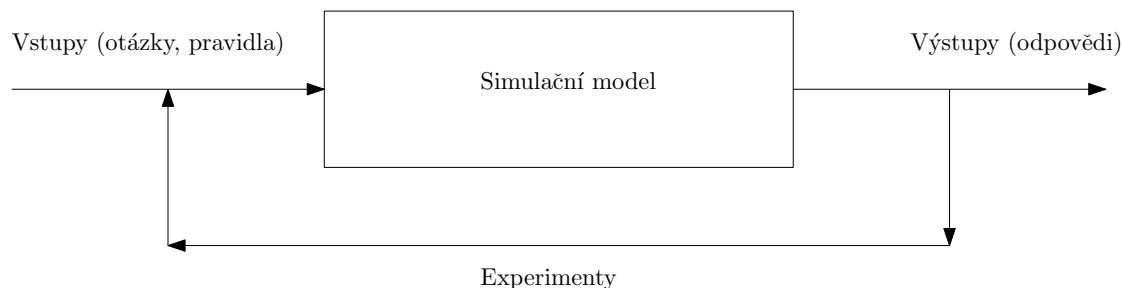
4. Kalibrace modelů

4.1 Stručný úvod do simulačních modelů

Často se stávají situace, že je potřeba vyzkoušet určitou možnost, a není možné zkoumat chování systému ve skutečnosti. Takovým systémem může být v našem případě dálnice a možnosti uzavření jednoho pruhu při dopravní nehodě. Model, který vytváříme, je jakési zjednodušení skutečnosti se snahou zachování co nejvíce vlastností systému.

V tuto chvíli se simulace jeví jako vhodná varianta jak provést experimentální test. Obecně je totiž daleko lepší možnost provést pokus na modelu v počítači než na reálném systému a riskovat jeho poškození či zničení, navíc na některých reálných systémech nelze ani pokus provést. Výsledky tohoto pokusu na počítači mohou poskytnout mnoho užitečných informací, na jejichž základě je např. možné zvolit optimální variantu při rozhodování. Podle tohoto konceptu je tedy simulační model počítač, který je určen k řízení pokusů s modelem systému s cílem sestavení platných výsledků i pro reálný systém.

Simulace je tedy experiment na modelu reálného systému.[18]. Za předpokladu, že vývoj modelu systému v čase vhodně napodobuje vývoj reálného systému, můžeme sbírat informace o modelu (např. proměnné) a posléze při použití statistickým metod či jiného vhodného matematického aparátu a následných dalších experimentů můžeme díky tomu navrhnout i budoucí chování systému. Typickým příkladem může být lini-ové řízení na dálnici, kde model neustále zpracovává naměřené parametry dopravního proudu (proměnné) a na jejich základě může změnit rychlost proměnným dopravním značením (budoucí chování systému). Tato myšlenka je znázorněna na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Simulační model, zdroj:[1]

Spolehlivost procesu rozhodování závisí na schopnosti vytvořit takový simulační model, který reprezentuje chování reálného systému s dostatečnou přesností. Ve chvíli, kdy je již model dostatečně přesný, může být reálný systém nahrazen modelem a na modelu je možné provádět různé experimenty. Proces určující, zda je simulační model dostatečně podobný reálnému systému, se nazývá **validace modelu** - iterativní proces zahrnující **kalibraci parametrů modelu** a porovnání chování modelu s chováním reálného

systému (pokud je to možné). Nesoulady mezi systémem a modelem nutí systémového analytika k zjišťování dalších informací o systému. Tyto informace jsou potom použity k vylepšení modelu. Je nutné si uvědomit, že model by mohl být vylepšován neustále. Je proto nezbytné určit práh, kdy model již dává postačující výsledky, tj. kdy je jeho přesnost akceptována. Tento práh je právě dán validací. V tu chvíli již není nezbytné model dále vylepšovat. Validace simulačního modelu by měla být brána v potaz během celého procesu vytváření modelu.

4.2 Validace modelů

Hlavní zdroj informací k validaci modelů je použito [12]. V [2] je ještě více podrobně rozebrána problematika validace a verifikace modelů.

Verifikace je v první řadě rozhodnutí zda simulační program vykonává přesně to, co bylo zamýšleno, to jest odstranění chyb z programu. Verifikace tedy kontroluje „přenesení“ simulačního modelu do správně fungujícího programu.

Verifikace obvykle znamená spuštění programu s implementovaným simulačním modelem s různým nastavením vstupních parametrů a kontrolou, zda jsou výsledky simulace přijatelné. V některých případech je možné některé výpočty provádět analyticky a posléze numerickou simulací výsledky porovnat a tím zjistit přijatelnost výstupů. To bohužel není případ Car-following modelů.

Validace modelu je hotova tehdy, pokud simulační model je přesná reprezentace zkoumaného systému. Pokud je model validní, mohou být rozhodnutí, která byla provedena na základě simulačního modelu stejná, jako kdyby se prováděl experiment na reálném systému.

Model je **věrohodný** tehdy, když jsou jeho výsledky přijaty uživatelem a použity v rozhodovacím procesu.

Při validaci simulačního modelu by analytik neměl zapomenout, že

- simulační model je systém, který ovšem může být pouze aproximací reálného systému, bez ohledu na to, kolik práce bylo vloženo do vývoje modelu,
- simulační model by měl být vždy vyvíjen pro specifické účely,
- simulační model by měl být validován vzhledem k perfomačním indikátorům souvisejícím s účely modelu a mohl být použit pro rozhodování
- vývoj a validace modelu by měly probíhat zároveň během celé analýzy systému a vytváření simulačního modelu.

Law and Kelton [12] dále navrhli postup, jak vyvinout validní a věrohodné simulační modely. Dělí se na tři části:

- vytvoření modelu se „zjevnou“ validitou¹,

¹z anglického face validity

- testování předpokladů modelu empiricky,
- rozhodnutí, jak moc jsou výstupní data ze simulace reprezentativní.

Vytvoření modelu se zjevnou validitou Při vytváření modelu je důležité, aby model prozkoumal odborník, resp. člověk, které rozumí dané problematice. Pokud uzná, že simulační model vypadá racionálně, potom můžeme tvrdit že jde o model se zjevnou validitou.

Aby byl model označen za model se zjevnou validitou je dle [12] nutné, aby

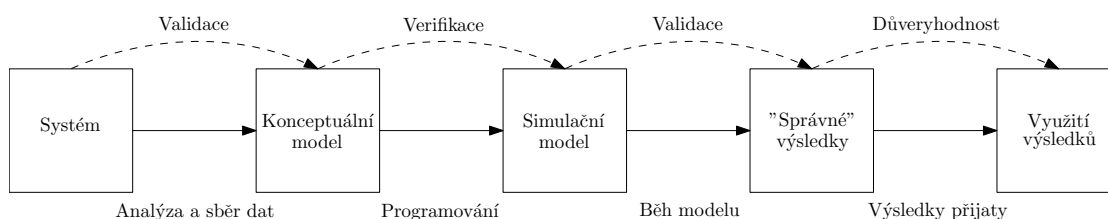
- analytik by měl spolupracovat s lidmi, kteří jsou důvěrně obeznámeni s reálným systémem,
- analytik musí být důsledný při získávání všech požadovaných informací,
- pokud existují historická data, měla by být získána a použita při tvorbě modelu,
- dávat pozor, aby tato data byla správná a znázorňovala to, co je modelováno.

Testování předpokladů modelu empiricky Jestliže je použito pravděpodobností rozdělení jako vstupní parametr simulačního modelu na základě shody s reálnými daty, u výstupu musí být tyto okolnosti zohledněny.

Z dalších okolností musí být zohledněna citlivost na počáteční podmínky. To nastává tehdy, když nepatrná změna vstupních parametrů způsobí signifikantní změnu dat.

Tyto dvě podmínky musí být při vyhodnocení testování také zahrnuty.

Rozhodnutí, jak moc jsou výstupní data ze simulace reprezentativní Hlavní test, kterým se posuzuje validita simulačního modelu, je porovnání výstupních dat. Pokud se data ze simulačního modelu porovnají s výstupními daty a výsledek je příznivý, lze model označit za validní. Model ovšem vždy zůstane pouhou aproximací systému.



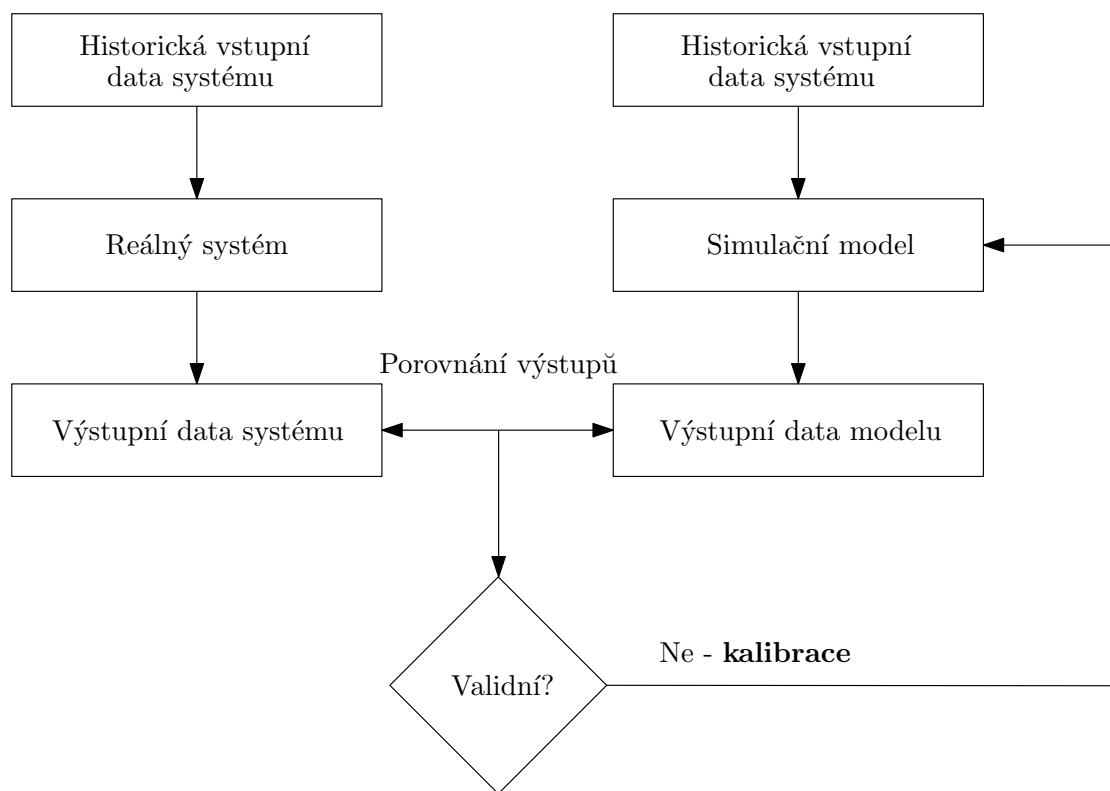
Obrázek 4.2: Vztahy mezi validací, verifikací a důveryhodností, zdroj:[1]

Shrnutí této části o validaci je názorně zobrazeno na obrázku 4.2. Obdelníky v tomto diagramu znázorňují stavy modelu a jejich vztah k procesu studia simulace. Přerušované čáry nad obdelníky ukazují, ve kterých situacích dochází k validaci, verifikaci a důveryhodnosti. ■

Ačkoliv to není v obrázku 4.2 zahrnuto, je důležité nezapomínat, že celý proces modelování je nutné brát jako iterativní a že některé postupy se můžou opakovat a to i několikrát.

Validace modelu tedy znamená proces testování, že model skutečně představuje uskutečnitelnou a použitelnou alternativu k experimentování se systémem. Jednou z částí je kalibrace modelu, což znamená přizpůsobování parametrů modelu do té chvíle, kdy se výstupní data nepodobají datům pozorovaným na systému. Další otázkou potom je, zda je model nakalibrován pouze na určitou sadu vstupních dat či je nakalibrován všeobecně pro různé typy vstupních dat. Simulační model je validován na základě porovnání dat mezi pozorovanými výstupními daty systému a výstupními daty vytvořenými počítačovým modelem.

Tento proces je schématicky znázorněn na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Diagram validace modelu na základě porovnání dat systému a modelu, zdroj:[1]

4.3 Kalibrace modelů

K tomu, jak správně nakalibrovat model neexistuje jednotný postup a většinou je to obecné know-how jednotlivých autorů kalibrace. Existuje několik článků o kalibraci např. [4], kde se hlavně dozvíme informace o kalibrace modelů General motors, které pracují na principu rovnice (1.11), více viz. [22, str.11-13].

Je zde popsána část kalibrace věnující se i nekolizním Car-Following modelům, jako je např. Gippsův model, nicméně je zde stručně uvedeno, že Gipps model nekalibroval, nýbrž použil reálné hodnoty z provozu a jeho model s nimi rovnou fungoval, tím pádem neměl důvod se kalibrací nějakým způsobem dál zabývat.

V článku [11] se autoři snaží nakalibrovat jednotlivé modely metodou pokus omyl. Řeší zde posléze pouze různé možnosti kontroly validity (viz dále). Kalibrace parametrů na principu optimalizace je složitá z toho důvodu, že účelová funkce nemá analytické řešení.

Další možnost, jak kalibrovat modely, byla vyzkoušena institutem pro výzkum dopravy v Berlíně [5], kde vyzkoušely Nelder-Mead² metodu, která se numericky snaží najít maximum nelineárních problému v několikarozměrném prostoru. Výhodou pro autory byla informace o rychlosti a poloze vozidla na testovacím okruhu každou 0.1s s tím, že nepřesnost určení rychlosti a polohy byla zanedbatelná.

4.4 Statistické metody pro validaci a porovnání modelů

Statistické metody pro validaci modelů jsou vysvětleny hlavně v [12], [1] a [13]. Jako hlavní zdroj pro GEH formuli jsou použity zdroje [7] a [6]. F-test je obsažen v [17, str.111]. Střední absolutní chyba je dobře popsána v [23].

4.4.1 Statistický test střední hodnoty

Statistickým testem střední hodnoty budeme kontrolovat, zda model nemá střední hodnotu rozdílnou od nuly. V tom případě by to značilo nepřesnost v modelu či v jeho kalibraci.

Výstupem simulace bude soubor hodnot proměnných, v našem případě nejspíše intenzit, které zaznamenáváme každou vzorkovací periodu. Například, předpokládejme, že simulace má vzorkovací periodu 1 minuta - to znamená, že každou minutu přibývají hodnoty intenzit. Proměnná, která nás zajímá každou vzorkovací periodu, je intenzita w , výsledek simulačního modelu tedy bude soubor hodnot w_{ij} , kde indexem i značíme konkrétní detektor a j je čas zaznamenání. Index i probíhá od 1 do n ,

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

kde n je celkový počet detektorů a čas j probíhá od 1 do m ,

$$j = 1, 2, \dots, m,$$

²též pojmenována Downhill simplexová metoda

kde m je počet vzorkovacích period v simulaci.

Pokud v_{ij} označíme naměřenou intenzitu, v případě Pražského okruhu mýtnou branou, kde indexy i a j budou stejné jako v případě modelu, klasická statistická technika k validaci modelu bude porovnání hodnot v_{ij} a w_{ij} a zjištění zda jsou u sebe dostatečně blízko.

Pro detektor i bude porovnání založeno na testování zda rozdíl

$$d_i = w_{ij} - v_{ij} \quad (4.1)$$

má střední hodnotu \bar{d}_i významně vzdálenou od nuly či nikoliv. K tomu se využívá t-statistika

$$\bar{t}_{m-1} = \frac{\bar{d}_i - \delta_i}{\frac{\bar{s}_d}{\sqrt{m}}}, \quad (4.2)$$

kde \bar{s}_d je směrodatná odchylka od \bar{d}_i .

Jako nulovou hypotézu označíme

$$H_0 : \delta_i = 0. \quad (4.3)$$

Pokud zamítneme hypotézu (4.3) na hladině významnosti α , soudíme, že model není dostatečně přesný v chování. Musíme vyzkoušet jiné kombinace vstupních parametrů modelu.

Naopak pokud nezamítneme tuto hypotézu, tvrdíme, že chování simulace a systému jsou již natolik blízké, že simulaci považujeme za validní.

Tento proces musí být proveden pro každý z detektorů. Model je možné označit za validní ve chvíli, kdy hypotézu nezamítneme pro žádný z detektorů³.

Pokud jde o tuto statistickou metodu validace, jsou zde další okolnosti, které je nutné vzít v úvahu [13] konkrétně při dopravních simulacích.

- Tento postup předpokládá stejná a nezávisle rozdělená pozorování⁴. Reálný systém a příslušné nasimulované výstupy nemusí tento předpoklad splňovat. Jednou z možností je vzít hodnoty z několika časových období a navíc zprůměrovat tyto hodnoty pro výpočet (4.1).
- Čím vyšší je vzorkovací perioda, tím nižší je kritická hodnota pro zamítnutí. To naznačuje, že simulační model má větší šanci být zamítnut, čím jak roste vzorkovací perioda. To znamená, že test za těchto podmínek není vhodný nástroj pro validaci daného modelu.

³Záleží ovšem na dalších okolnostech, musí být vzato v úvahu, o jaká data se jedná či že model nikdy nemůže být stejný jako simulovaný systém.

⁴i.i.d - independent and identically distributed random variables

4.4.2 F-test podílů rozptylů

Díky F-testu podílu rozptylů můžeme zjistit zda se rozptyl nasimulovaných hodnot významně liší od hodnot z mytných bran. Nejprve je nutné vypočíst rozptyl z nasimulovaných hodnot s_1^2 a rozptyl z reálných dat s_2^2 . Nulová hypotéza bude definovaná takto:

$$H_0 : s_1^2 = s_2^2. \quad (4.4)$$

Budeme testovat podíl rozptylů

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}. \quad (4.5)$$

Jestliže platí, že

$$F > F_{\text{krit}} \quad (4.6)$$

zamítáme H_0 a rozptyl z nasimulovaných dat se významně liší od rozptylu z reálných dat. V opačném případě se rozptyly statisticky významně neliší. Hodnota F_{krit} také závisí na volbě hladiny významnosti a počtu stupňů volnosti obou rozptylů.

4.4.3 Střední absolutní chyba

Dalším důležitým ukazatelem je střední absolutní chyba⁵, která je definována jako

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |f_i - y_i|, \quad (4.7)$$

kde f_i je v našem případě nasimulovaná a y_i naměřená intenzita.

Nemůžeme bohužel použít střední procentuální chybu⁶, protože některé naměřené hodnoty obsahují nulu.

4.4.4 GEH

GEH byla vymyšlena v 70. letech v Anglii. Jmenuje se dle iniciálů svého objevitele Geoffreyho E. Haverse a používá se pro zjištění informace o tom, zda je model dobře nakalibrován. Bere v úvahu absolutní i relativní rozdíly hodnot intenzit. GEH formule vypadá takto:

$$GEH_i = \sqrt{\frac{2(m-c)^2}{m+c}}, \quad (4.8)$$

kde c je reálná intenzita provozu a m intenzita nasimulovaná modelem a i je počet hodinových period přes který se počítá GEH.

⁵v odborné literatuře označována jako MAE (z angl. Mean absolute error)

⁶v odborné literatuře označována jako MAPE (z angl. Mean absolute percentage error)

Rovnice (4.8) je stejná, jako rovnice pro chí-kvadrát test, ale toto není test v pravém slova smyslu. Je to empirický vzorec vhodný pro analýzu dopravy. Ideálně funguje pro hodinové intenzity provozu, pro jiné časové úseky je doporučeno intenzity přepočítat.

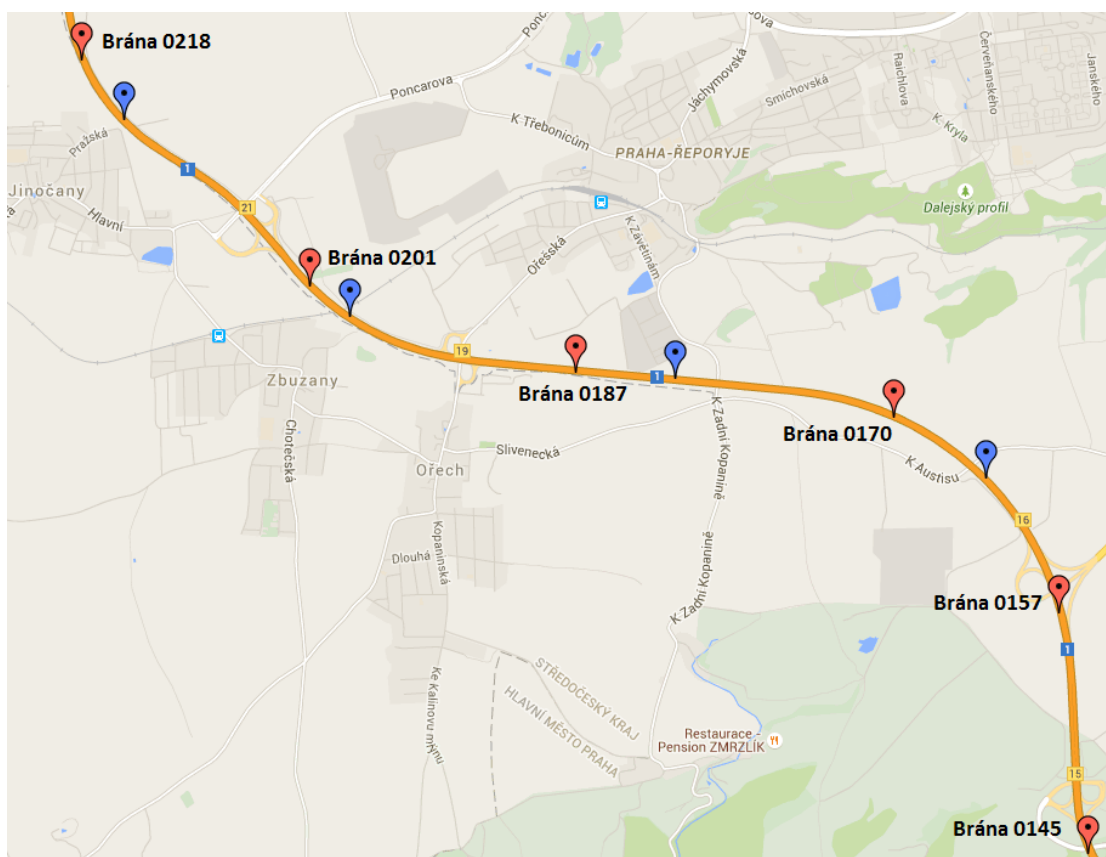
Dle hodnoty GEH rozlišujeme tyto tři stavy:

- $GEH < 5$ - přijatelné, model je nakalibrován správně,
- $GEH > 5$ a $GEH < 10$ - možná chyba v kalibraci či v datech,
- $GEH > 10$ - vysoká pravděpodobnost chyby v kalibraci či v datech.

Na tomto základě je možné rozhodnout, zda výsledky, které dostaneme pomocí modelů jsou věrohodné či nikoliv.

5. Simulace

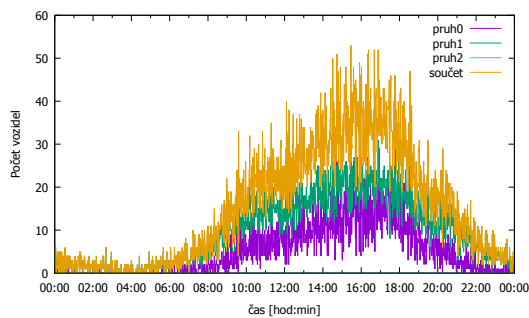
V této kapitole se pokusíme zhodnotit nasimulované výsledky z modelů. Simulován bude osmikilometrový úsek na Pražském okruhu mezi 22. a 14. kilometrem. Data z mýtných brán máme k dispozici přibližně po dvou kilometrech, celkem jich je 6 - viz obrázek 5.1.



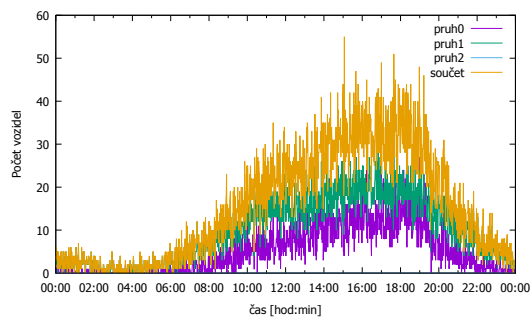
Obrázek 5.1: Simulovaný úsek dálnice–Pražský okruh km 22–14, Zdroj: [9]

Grafický podklad byl naimportován s OSM dle obrázku 5.1 - viz příloha C, nicméně po převedení do formátu SUMO některé úseky nejsou zobrazeny pro simulaci úplně přesně. Z důvodu nepřesnosti převodu infrastruktury mezi OSM a SUMO je u mýtné brány 201 o jeden jízdní pruh více než ve skutečnosti.

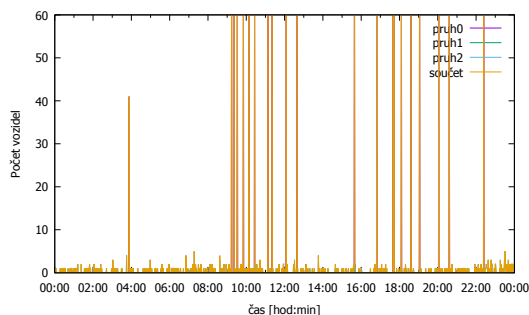
Nejprve jsme provedli kontrolu dat z mýtných bran. Bohužel touto kontrolou bylo zjištěno, že brána 157 (viz obrázky 5.4 a 5.5) a brána 145 (viz obrázky 5.6 a 5.7) obsahují nekvalitní data. Obrázek znázorňuje časovou osu, kde na ose x je čas (počítán po minutách) a na ose y je vynášen počet vozidel. Problém u brány 145 není na první pohled vidět, nicméně pokud se podíváme na intenzitu provozu na bráně 170 (viz obrázky 5.2



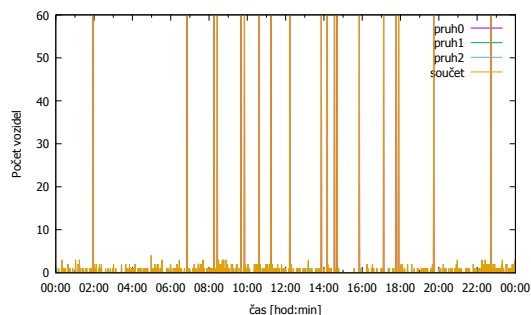
Obrázek 5.2: Brána 0170, 28.10.2012



Obrázek 5.3: Brána 0170, 7.10.2012



Obrázek 5.4: Brána 0157, 28.10.2012

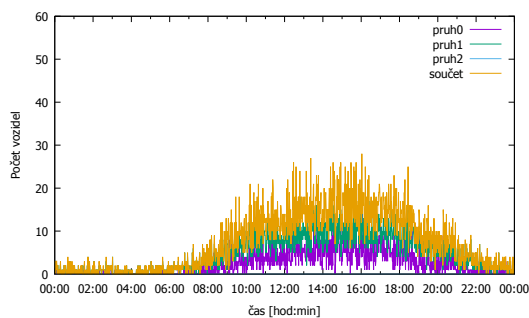


Obrázek 5.5: Brána 0157, 7.10.2012

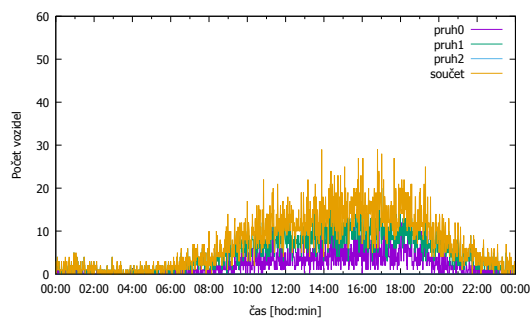
a 5.3), vidíme, že více jak o 50% vyšší než u brány 157, což je zjevný nesmysl.

Zaměříme se proto hlavně na úsek mezi branami 218 a 170, což je pro zkoumání modelů plně postačující. Velmi důležité je ovšem data zkontrolovat ještě předtím, než mají být použity např. pro simulaci, aby se nehledala chyba někde, kde nakonec vůbec není.

Postupně nasimulujeme tento úsek Gippsovým, Kraussovým, IDM a Wiedeman-



Obrázek 5.6: Brána 0145, 28.10.2012



Obrázek 5.7: Brána 0145, 7.10.2012

novým modelem a poté porovnáme jednotlivé modely. Tyto modely začneme kalibrovat tak, že vezmeme hodnoty doporučené pro simulaci autory a dále je budeme zpřesňovat.

Jako kritérium pro validní model použijeme formuli GEH uvedený v podkapitole 4.4.4. Máme totiž k dispozici data z detektorů (c) a nasimulovaná data pomocí jednotlivých modelů (m) z rovnice (4.8). Intenzity počítáme jako součet počtu vozidel za hodinu pro reálná i nasimulovaná data.

Čas vjezdu vozidel byl vždy generován z exponenciálního rozdělení, kde parametr rozdělení byl počet vozidel v danou minutu.

V programu SUMO je implementován vlastní předjížděcí model „DK2008“, který je primárně naprogramován pro Kraussův model. Nicméně i ostatní modely dávaly uspokojivé výsledky, proto nebylo nutné se tímto modelem přímo zabývat.

Ve všech obrázcích je zobrazena intenzita provozu v každém pruhu a dále také součet všech intenzit. Pruh 0 odpovídá pruhu nejvíce napravo při vícepruhové dálnici a každý další má vždy o jedničku vyšší hodnotu. Pruh 2 tedy odpovídá pruhu nejvíce vlevo na třípruhové dálnici.

Generovány byly dva typy rychlostí, preferovaná a při vjezdu do oblasti. Preferovaná rychlost byla vždy generována z normálního rozdělení se střední hodnotou $36,11\text{ms}^{-1}$ ¹ bez ohledu na rychlosti na mýtné bráně. Naopak rychlosti vozidel při vjezdu do oblasti byly generovány z náhodného rozdělení se střední hodnotou rovné hodnotě průměrné rychlosti na mýtné bráně.

Některé parametry modelů či vozidel jsou pro všechny modely stejná, konkrétně

- reakční čas $T_n = 1s$,
- délka vozidla $l = 4,5m$,
- bezpečnostní odstup (minimální mezera mezi vozidly) $s = 2m$.

Pro vyzkoušení funkčnosti simulací a správné kalibrace modelů byl jako první den zvolen svátek 28.10.2012.

Pokud se jedná o samotné simulace, tato kapitola bude rozdělena na simulace podle jednotlivých modelů. Nejprve budou uvedeny rozdíly mezi teorií (kapitola 1) a implementací daného modelu, dále budou následovat hodnoty parametrů a poté výsledky samotné simulace s informacemi o hodnotách GEH.

Rozdíly mezi definicí a implementací modelů jsou většinou způsobeny samotným simulačním nástrojem či velkým množstvím parametrů. SUMO umožňuje jednoduše zjistit pouze rychlost předního vozidla a odstup mezi aktuálním a předním vozidlem, kdežto v modelech může být tato vzdálenost skryta v určitém členu rovnice.

¹to odpovídá rychlosti 130 kmh^{-1}

5.1 Gippsův model

5.1.1 Rozdíly oproti teorii

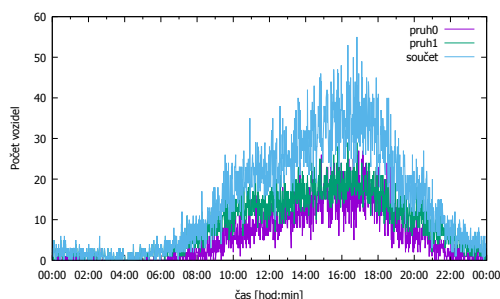
Gippsův model je naimplementován stejně tak, jak zní rovnice (1.20). Jediná drobná změna nastává u výpočtu členu $[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)]$, kde není možné získat parametr s_{n-1} . Proto jsme upravili tento člen jako součet vzdálenosti mezi vozidly (předek aktuálního vozidla a zadek vedoucího vozidla) a k ní jsme přičetli minimální bezpečnostní odstup.

5.1.2 Nastavení parametrů a simulace

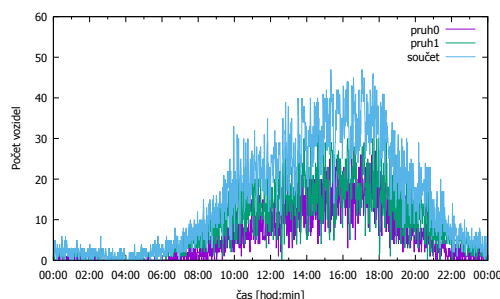
Nejprve jsme nechali parametry stejné jako u Kraussova modelu, nicméně to nevedlo k úspěchu. Podstatná byla informace z [4], kde bylo řečeno pokusit se nastavit hodnoty „reálné“, což v tomto případě přineslo úspěch a po dalším zpřesnění GEH nepřesáhlo nikde hodnotu 5. Simulační krok zůstal na výchozí hodnotě 1s.

Hodnoty parametrů tedy byly následující:

- zrychlení $a = 1,5\text{ms}^{-1}$
- decelerace $b = 5\text{ms}^{-1}$



a) Reálná data

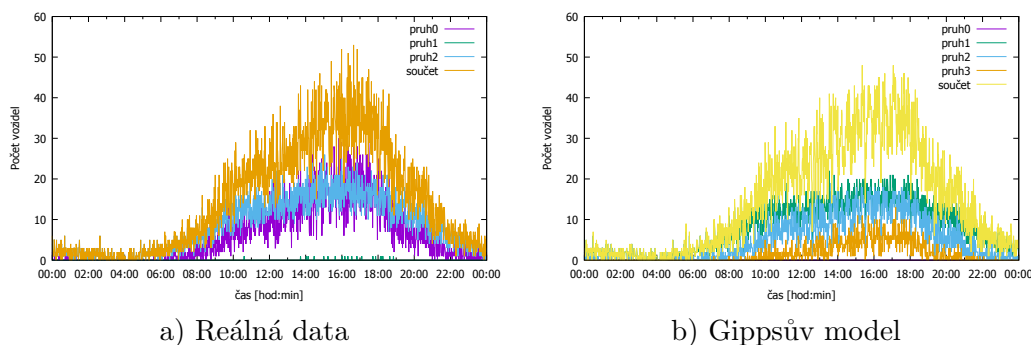


b) Gippsův model

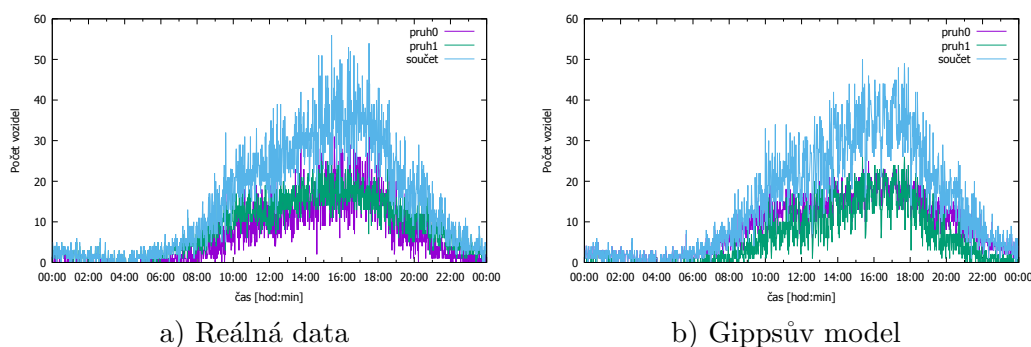
Obrázek 5.8: Brána 0218, 28.10.2012

5.1.3 Simulace

Na levé straně je vykreslena časová řada dle detektoru a na pravé časová řada nasimulovaná Gippsovým modelem. Na obrázcích 5.8a) a 5.8b) je přímo vidět určitá nepřesnost vjezdu vozidel při vysokých intenzitách. To je způsobeno podmínkou SUMO pro vjezd do oblasti. Mohli bychom např. zvýšit deceleraci k přesnění tohoto rozdílu, ovšem tím



Obrázek 5.9: Brána 0201, 28.10.2012



Obrázek 5.10: Brána 0187, 28.10.2012

bychom snížili reálnost simulace. Na dalších mýtných branách (např. obrázky 5.9a) a 5.9b) tento jev přetrvává, což je očekávatelné.

Koeficient GEH má nejvyšší hodnotu v době mezi 15. a 16. hodinou - viz tabulka A.1, nicméně hodnota nedosahuje ani 4, čímž se dá konstatovat, a tím pádem model dává uspokojivé výsledky.

5.2 Kraussův model

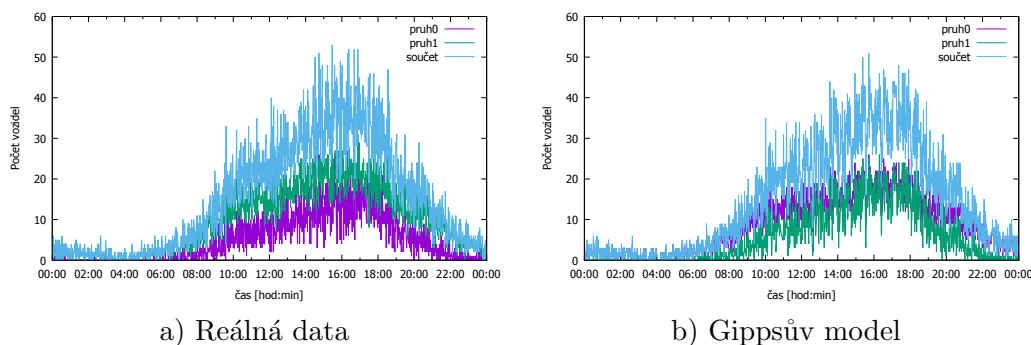
5.2.1 Rozdíly oproti teorii

Kraussův model je přímo implementován v SUMO. Byl to vůbec první model, který bylo možné v SUMO vyzkoušet. Nicméně přes zkoumání se nepodařilo nalézt přímou implementaci shodnou s (1.39), konkrétně výpočet hodnoty v_{safe} .

5.2.2 Nastavení parametrů a simulace

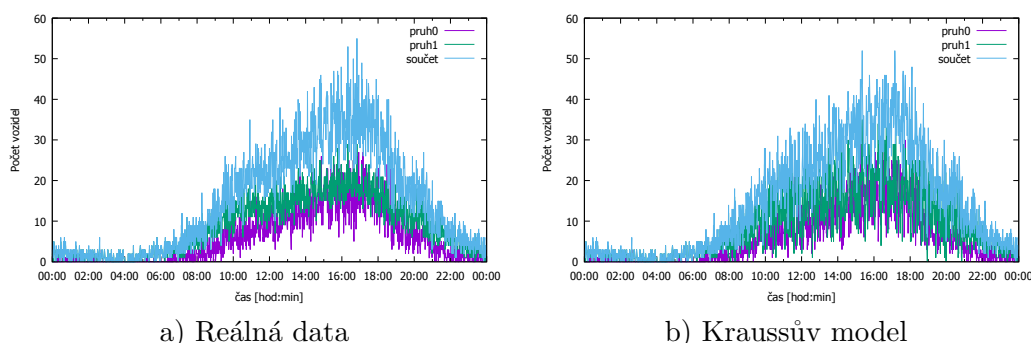
Simulace běžela s iteračním krokem 1s. Výsledné hodnoty nakalibrovaného Kraussova modelu byly:

- zrychlení $a = 0,8\text{ms}^{-1}$



Obrázek 5.11: Brána 0170, 28.12.2012

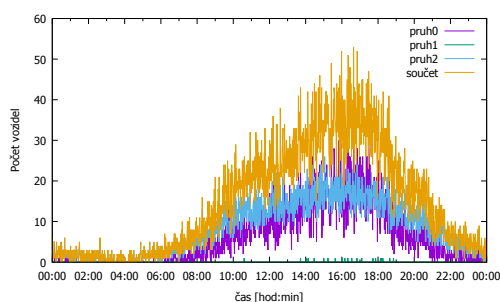
- decelerace $b = 5\text{ms}^{-1}$
- náhodná výchylka η - nenastavována dopředu, generována programem SUMO, hodnota mezi 0 a 1



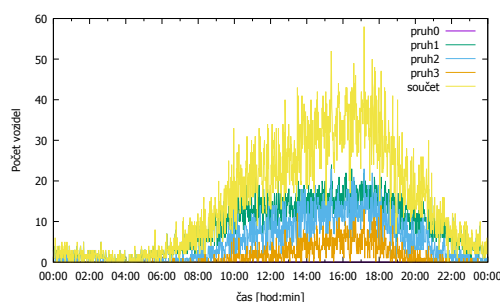
Obrázek 5.12: Brána 0218, 28.10.2012

5.2.3 Simulace

Z obrázků časových řad je jasné vidět, že Kraussův model dokázal věrně kopírovat provoz a to i v poměrně vysokých intenzitách. Jak již bylo řečeno, velkou výhodou pro Kraussův model je implementace do SUMO jako vůbec prvního modelu. Jak bude dále řečeno, nebyl úplně nejlepší z uvedených modelů. To je způsobeno tím, že intenzita, která je nasimulována Kraussem může i odpovídat skutečné intenzitě, ovšem až o 2-3 minuty, což je problém, protože brána má v tu chvíli už skutečnou hodnotu jinou. Může to být dáno generováním vozidel s exponenciálního rozdělení či generováním preferované

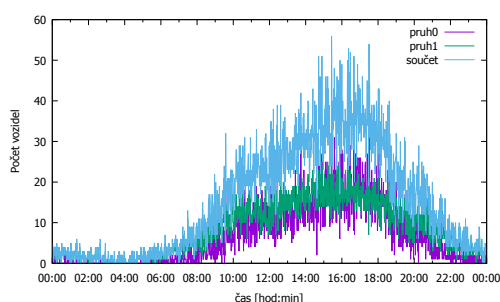


a) Reálná data

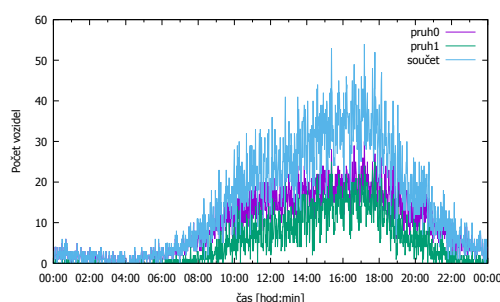


b) Kraussův model

Obrázek 5.13: Brána 0201, 28.10.2012



a) Reálná data



b) Kraussův model

Obrázek 5.14: Brána 0187, 28.10.2012

rychlosti nižší, než aktuálně byla. Co se týká maximální hodnoty GEH - viz tabulka A.2, pouze jednou překročila hodnotu nepatrně hodnotu 3, což je velmi dobrý výsledek.

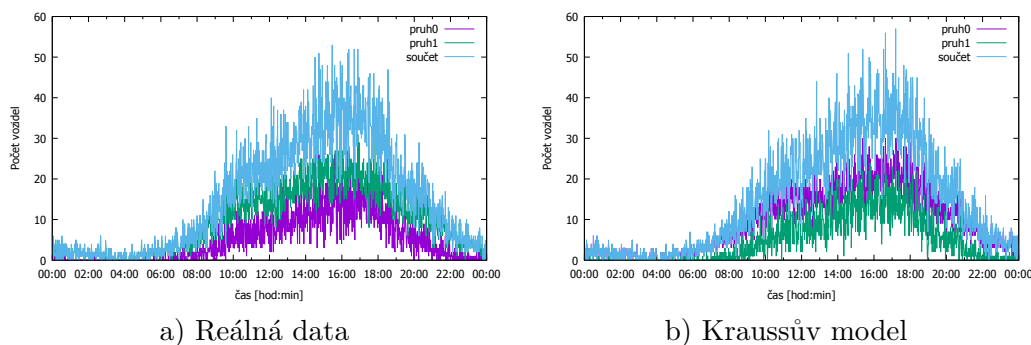
5.3 Rozšířený Kraussův model

5.3.1 Rozdíly oproti teorii

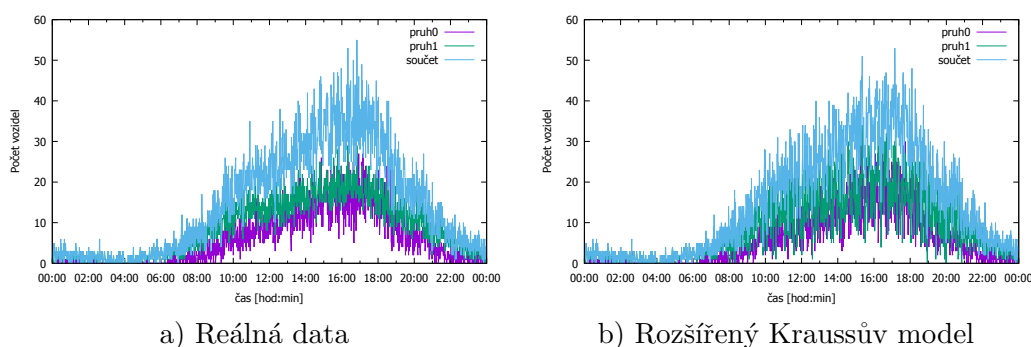
Rozšířený Kraussův model je naimplementován naprosto stejně jako v odstavci 1.4, konkrétně výpočet v_{safe} – rovnice (1.51).

5.3.2 Nastavení parametrů a simulace

Všechny parametry byly ponechány stejné jako u Kraussova modelu. Kraussův a Rozšířený Kraussův model pracují se stejnými parametry a zároveň není doporučeno měnit jejich hodnoty. [19]



Obrázek 5.15: Brána 0170, 28.10.2012



Obrázek 5.16: Brána 0218, 28.10.2012

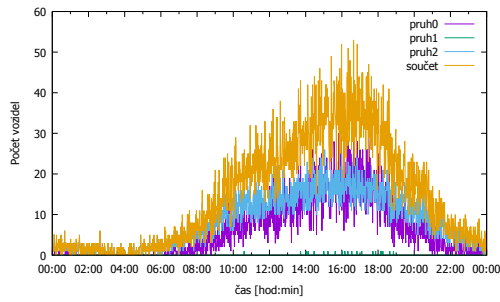
5.3.3 Simulace

Ze všech modelů dokázal Rozšířený Kraussův model dosahovat nejvyšších intenzit, až k 60 vozidlům, a to bez toho, aby byla narušena podmínka bezpečnosti. Bohužel to bylo často na základě snížení přesnosti modelu, protože skutečná intenzita nikdy tuto hodnotu nedosáhla. Je otázkou, čím je takto vysoká intenzita způsobena. Může to být z důvodu nahuštění provozu při předjíždění dvou vozidel a následně krátký silný provoz, nicméně hlavní průběh průjezdu vozidel je generován v normě – viz hodnoty GEH v tabulce A.3.

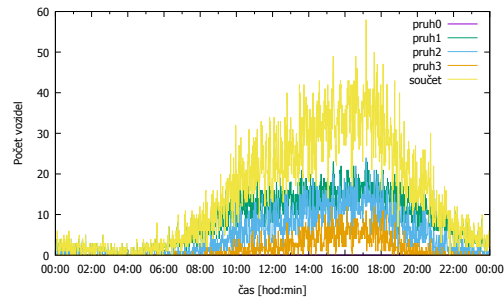
5.4 Intelligent Driver Model

5.4.1 Rozdíly oproti teorii

IDM v SUMO bylo naimplementováno poměrně nešťastně. Nebyla tam totiž uvedena verze z teoretické sekce, pouze některé její části. IDM byl naprogramován ještě se smyčkou, která mohla zrychlení vozidla počítat až několikrát. Výsledky neodpovídaly realitě a model i při sníženém simulačním kroku způsoboval kolize. Po vyzkoušení tohoto modelu jsem došel k závěru, že lepší bude naprogramovat IDM přesně tak, jak je uveden v teoretické části v podkapitole 1.5 a to i z toho důvodu, že jsem ho již zkoušel v [22].

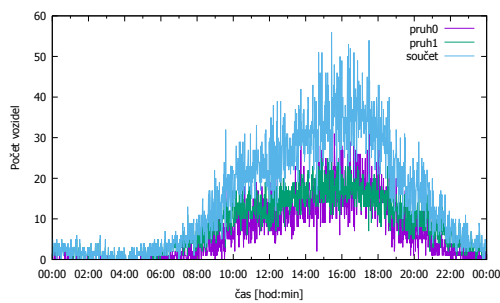


a) Reálná data

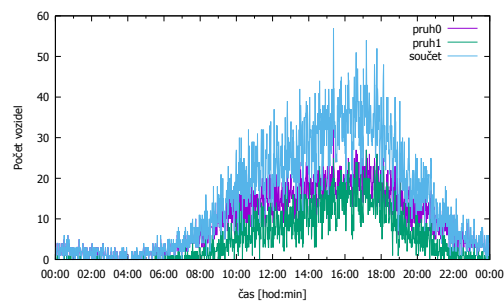


b) Rozšířený Kraussův model

Obrázek 5.17: Brána 0201, 28.10.2012



a) Reálná data



b) Rozšířený Kraussův model

Obrázek 5.18: Brána 0187, 28.10.2012

Přeprogramována je pouze ta část modelu, která počítá interakční zrychlení. Posléze již byly výsledky postačující.

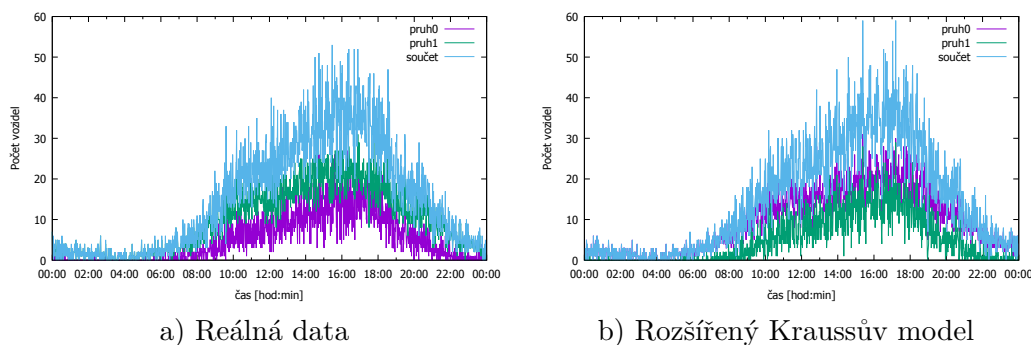
5.4.2 Nastavení parametrů a simulace

Velmi zajímavým poznatkem pro mě byla skutečnost, že když jsem si programoval IDM ve svém vlastním programu, vjezd vozidel jsem si řídil jednoduchou podmínkou, aby se mi vozidla nesrazila. Naopak v SUMO existuje sofistikovaná kontrola vjezdu vozidel a tím pádem jsem musel zvýšit hodnotu decelerace na $b = 5\text{ms}^{-1}$.

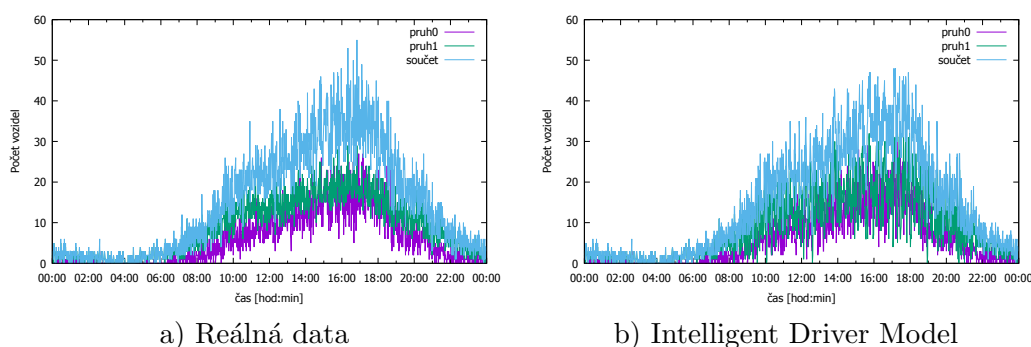
Simulační krok jsem tentokrát zvolil 0,1 s. Byl to kompromis mezi 1 s nastavenou SUMO a 0,01 s stanevou v [22]. Na logaritmické stupnici se tato hodnota nachází přes v polovině. U IDM se tímto způsobem velice zlepšily výsledky, ale také i doba výpočtu se zvýšila desetinásobně.

Parametry modelu byly stanoveny na hodnoty:

- zrychlení $a = 0,8\text{ms}^{-1}$,
- decelerace $b = 5\text{ms}^{-1}$,
- exponent zrychlení $\delta = 4$.



Obrázek 5.19: Brána 0170, 28.10.2012



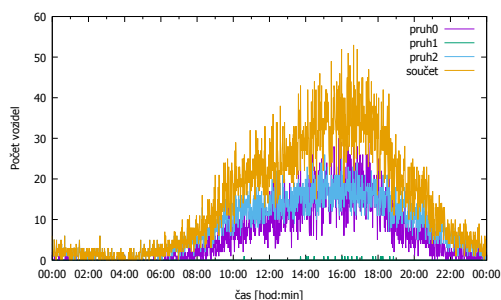
Obrázek 5.20: Brána 0218, 28.10.2012

5.4.3 Simulace

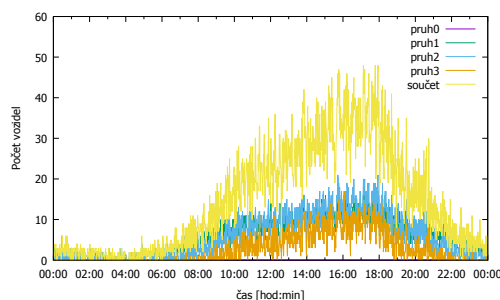
Maximální počet vozidel, která vjíždí do oblasti, se za minutu při těchto parametrech pohybuje okolo 40, viz obrázek 5.20. V další části se již tento počet zvýšil až k 50 vozidlům. Je to zaprvé způsobeno vjezdovou podmínkou a dle mého názoru předjízďecím modelem, který není zcela přizpůsoben IDM modelu. IDM model pracuje ideálně s předjízďecím modelem MOBIL [22]. Obrázek brány 5.21 vypadá tak, že součet pruhů neodpovídá celkovému součtu vozidel. Je to zapříčiněno nepřesností v infrastruktuře (viz výše), křivka pruhu 1 je skoro totožná s pruhem 2. Na další bráně, obrázek 5.22, jsou výsledky nepřesné primárně z důvodu předjízďecího modelu. U poslední brány, zobrazené na 5.23, se intenzity již zpřesnily. Nicméně stále nastává situace, že intenzita je nejdříve poměrně malá, náhle se velmi zvýší a následně opět sníží a to pro oba pruhy. Dle hodnot GEH je IDM v normě – viz A.4.

5.5 Wiedemannův model

Wiedemannův model je v SUMO naimplementován skoro stejně jako v teoretické části. Jediná ale zároveň velmi podstatná změna nastává při zadávání parametrů – Wiedemannův model jich má sám o sobě mnoho. SUMO dokázalo těchto více jak 10 parametrů

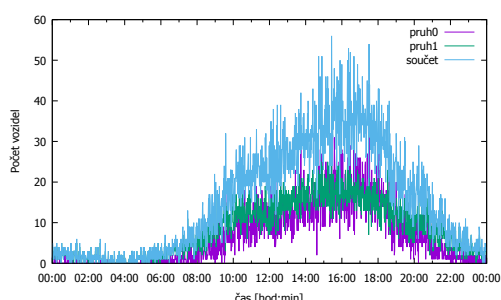


a) Reálná data

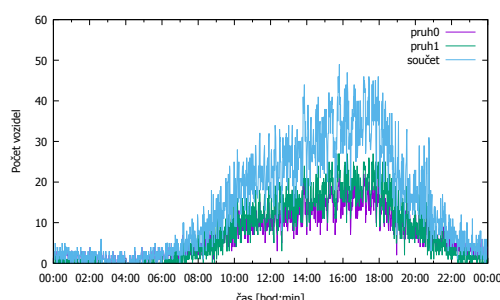


b) Intelligent Driver Model

Obrázek 5.21: Brána 0201, 28.10.2012



a) Reálná data

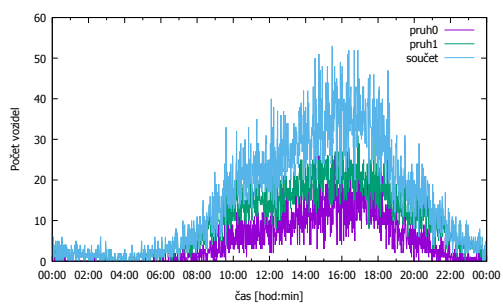


b) Intelligent Driver Model

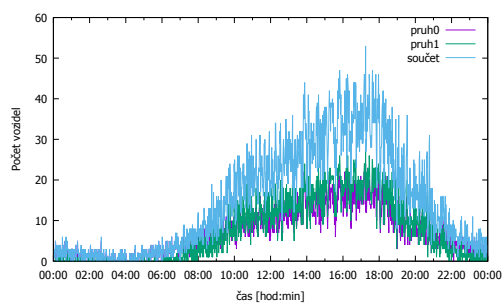
Obrázek 5.22: Brána 0187, 28.10.2012

modelu shrnout pouze do dvou. Bohužel pouze nastavení těchto parametrů nepostačuje k tomu, abychom byli schopni spustit simulaci na přijatelné úrovni. Navíc nikde není vysvětleno, jak tyto dva parametry souvisí s hranicemi režimů. Proto bohužel výpočty křivek AX, SDX atd. nejsou v SUMU tak přesné, aby bylo možné simulovat reálný provoz. Jinak zde existují stejné podmínky pro určení režimu jako v obrázku 1.6. Vozidla se během simulace sráží a nepodařilo se mi přesně zjistit, kde se nachází problém. Jednou z variant je výpočet decelerace, protože Wiedemannův model ji jako jediný z modelu nemá přímo jako parametr.

Některé hodnoty v GEH tabulce přesahují hodnotu 17, což také dokazuje, že v modelu je někde chyba. Pro ilustraci přikládám na obrázku 5.24 počty vozidel na detektorech u mýtných bran 170 resp. 187, kde je jasně vidět, že model selhává a to bohužel i při nízkých intenzitách.

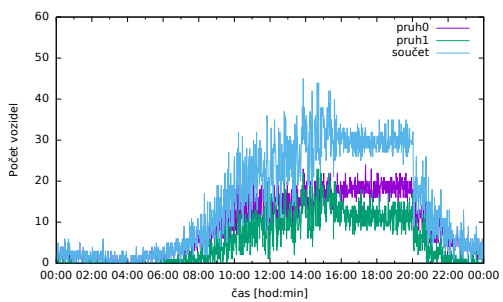


a) Reálná data

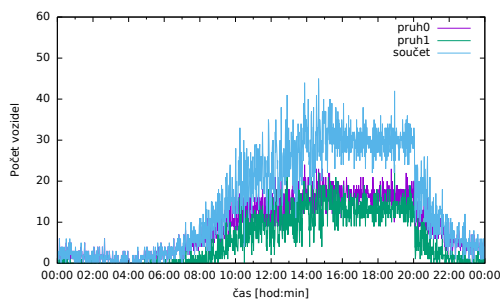


b) Intelligent Driver Model

Obrázek 5.23: Brána 0170, 28.10.2012



a) Brána 0187



b) Brána 0170

Obrázek 5.24: Wiedemannův model

6. Porovnání modelů

Hlavním cílem této práce je porovnání mikroskopických modelů s reálnými daty. Nástroje, které k tomu využijeme, jsou uvedeny v podkapitole 4.4. Dalšími možnostmi porovnání modelů jsou grafická znázornění intenzit či absolutních chyb v průběhu dne.

Jednotlivé modely budeme porovnávat na nasimulovaných datech uvedených v kapitole 5. Wiedemannův model není v tomto porovnání vůbec obsažen, protože vozidla se v tomto modelu srážejí a výsledky by neměly žádnou vypovídající hodnotu.

6.1 Střední hodnota

Prvním nutným testem byla kontrola nulové střední hodnoty u absolutní chyby modelů, tzn. že ji model nemá vychýlenou do kladných či záporných hodnot.

Díky výsledkům od všech modelů nebylo ani nutné tento test provádět, protože průměr absolutní chyby ze všech hodnot ze dne 28.10.2012 vychází nulový.

Jak již bylo řečeno, pokud by byla hypotéza (4.3) zamítnuta, tj. že střední hodnota absolutní chyby nebude rovna nule, značilo by to nepřesnost v modelu či v jeho kalibraci.

6.2 Rozptyl a směrodatná odchylka

Z důvodu kontroly, zda se rozptyl naměřených intenzit modelů významně neliší od rozptylu naměřených dat, byl proveden F-test podílu rozptylů vysvětlený v podkapitole 4.4.2. Pro hladinu významnosti 95% má kritická hodnota F-testu hodnotu

$$F_{\text{krit}} = 1,090. \quad (6.1)$$

Výsledky jednotlivých modelů jsou shrnuty v tabulce 6.1.

Model:	Hodnota F
Gipps	1,0124
Krauss	1,0233
Rozšířený Krauss	1,0234
IDM	1,0187

Tabulka 6.1: Výsledná statistika pro jednotlivé modely

Je tedy patrné, že pro všechny modely rovnice (4.6) neplatí a tím pádem se rozptyly jednotlivých modelů významně statisticky neliší. Je to také kontrola dávající modely přijatelné výsledky.

Směrodatné odchylky σ rozdílů mezi naměřenými a nasimulovanými daty jednotlivých modelů jsou znázorněny v tabulce 6.2. Je tedy vidět, že nejlepší výsledky podle

tohoto ukazatele měl Gippsův model před IDM a Kraussovými modely, které jsou vyrovnané.

Model	σ [voz]
Gipps	5,97601
Krauss	6,26314
Rozšířený Krauss	6,26967
IDM	6,02885

Tabulka 6.2: Směrodatné odchylky jednotlivých modelů

6.3 Střední absolutní chyba

Pro všechny modely jsme posléze vypočítali střední absolutní chybu mezi skutečnou a nasimulovanou intenzitou dle rovnice (4.7). Výsledné hodnoty pro všechny modely jsou shrnuty v tabulce 6.3.

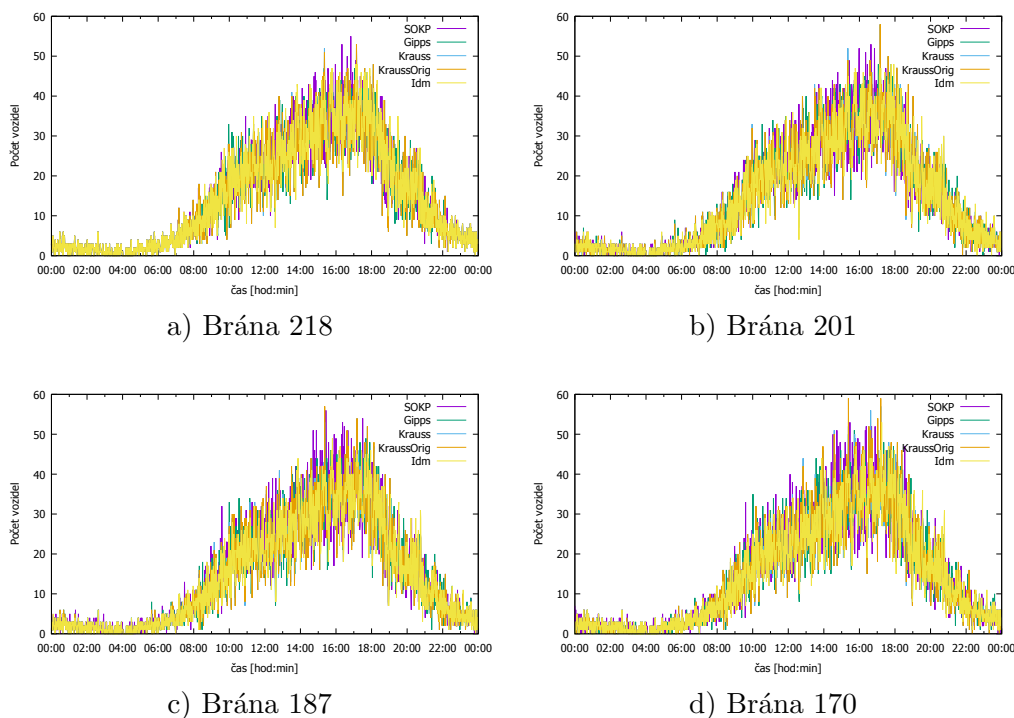
Model	MAE [voz]
Gipps	3,579
Krauss	3,665
Rozšířený Krauss	3,665
IDM	3,590

Tabulka 6.3: Střední absolutní chyba (MAE) jednotlivých modelů

I podle tohoto ukazatele je nejlepší Gippsův model, nicméně rozdíly hodnot chyb nejsou nějak vysoké, což značí možnost použití všech modelů. Mezní hodnota střední absolutní chyby, kdy už model neposkytuje data v požadované přesnosti, není striktně stanovena. Dle mého názoru by chyba neměla přesahnout 25%. Pokud budeme uvažovat průměrnou intenzitu 30 voz/s, jedná se o hodnotu 7,5 vozidla.

6.4 Grafická znázornění

Jako další variantu porovnání modelů jsme zvolili průběhy intenzit na jednotlivých mytných branách, viz obrázek 6.1. Z těchto obrázků vyplývá jistá podobnost modelů, žádný z nich se výrazně nevymyká. Nejvíce nepřesný v počtu vozidel dle obrázků je Rozšířený Kraussův model, což je matematicky doloženo v předchozích podkapitolách (směrodatná odchylka, střední absolutní chyba).

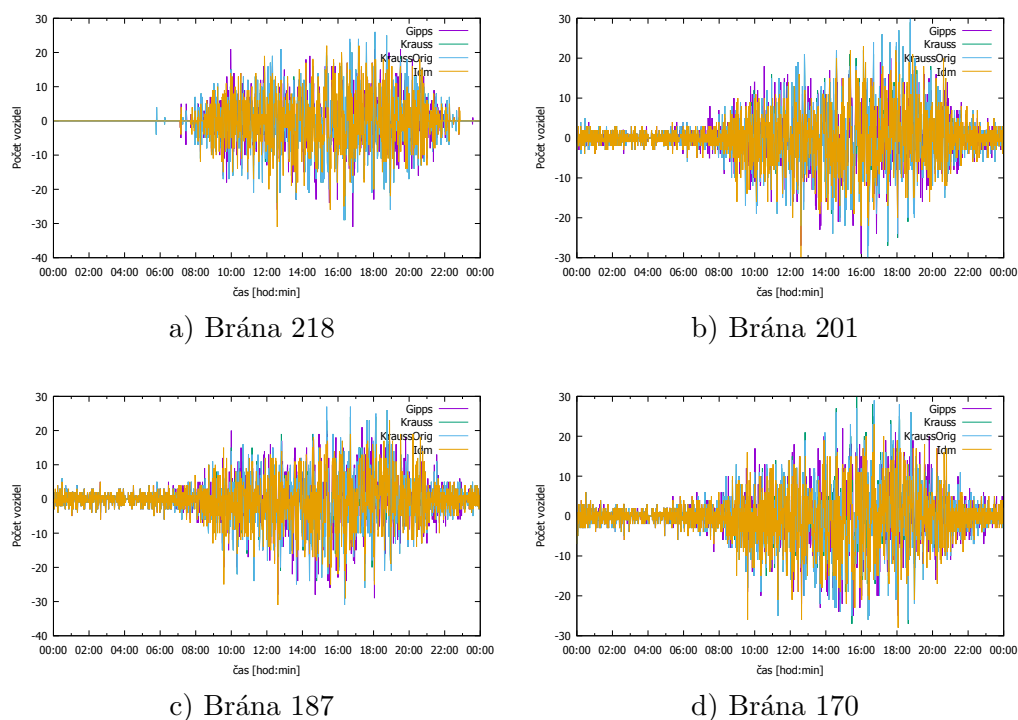


Obrázek 6.1: Porovnání jednotlivých modelů mezi sebou - konkrétní hodnoty

Dále jsme vynesli absolutní chybu jako časovou řadu a to nejprve pro všechny brány, obrázek 6.2 a také pro každý jednotlivý model zvlášť na poslední mýtné bráně 170 - obrázky 6.3. Pokud se zaměříme na výsledky modelů na bráně 170 je vidět i pouhým okem, že Gippsův model dává asi nejlepší výsledky. IDM by mohl jistě dávat lepší výsledky, pokud by chyba někdy až příliš často nestoupala do kladných hodnot, a hned potom rychle klesla a to až o 30 vozidel. Tento problém je souhrou několika okolností. Hlavní dvě z nich jsou již zmíněny výše, a to předjíždění vozidel a zároveň vjíždění vozidel do oblasti. Kraussovy modely jsou poměrně dost rozkmitány, což by se postupným dalším kalibrováním mohlo částečně vylepšit.

O trochu větší chyby během první noční hodiny u mýtné brány 170 jsou způsobeny tím, že ještě nejsou žádná vozidla v simulaci. Simulace startuje o půlnoci, ale v reálných datech zde již nějaká vozidla projela. Ta ale vyjela ještě před půlnocí minulého dne.

Dalším důvodem vzniku chyb jsou nájezdy a výjezdy z Pražského okruhu, které neměříme a nejsme schopni je ani realisticky simulovat. Další nepřesností je generování vozidel do simulace z exponenciálního rozdělení - viz podkapitola 2.2.3. Dále nesmíme zapomenout na ne úplně přesný import podkladových dat. Ovlivnění výsledků také může plynout z předjížděcího modelu, který je v SUMO implementován. Závěrečný vliv, který nesouvisí přímo se samotným modelem, je vjezd vozidel do simulace na základě vstupní podmínky, tedy pouze v okamžiku, kdy má vozidlo dostatečný časový i bezpečnostní

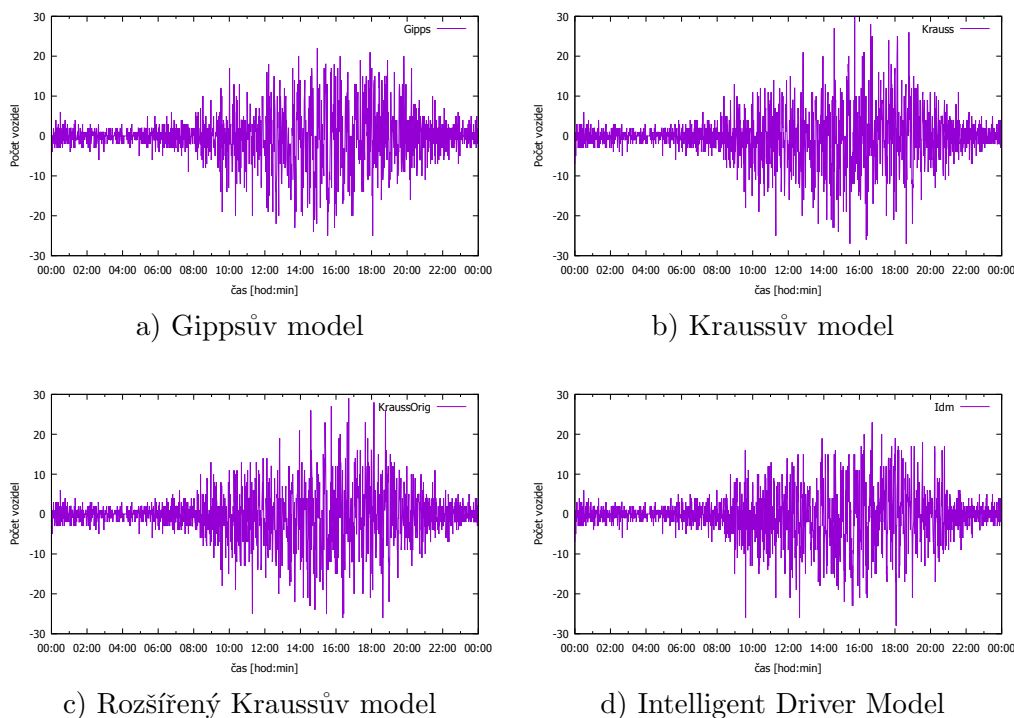


Obrázek 6.2: Porovnání jednotlivých modelů mezi sebou - absolutní chyby

odstup a neohrozí vozidlo před sebou.

Pokud se podíváme na průběhy všech modelů, vidíme, že absolutní chyba se zvyšuje se zvyšující se intenzitou dopravy. To je také dáno i tím, že je velice těžké do modelů zakomponovat chování řidiče. Řidič má z tohoto pohledu nepředvídatelné chování a je velice těžké ho do výpočtů zahrnout. Jako příklad můžeme uvést omezenou rychlost na Pražském okruhu na 130 km/h. Pokud bychom nastavili podmínku, že vozidlo nemůže jet rychleji, než je tato rychlost, potom by naše výsledky byly ještě více zkreslující. Ne každý řidič totiž maximální povolenou rychlost na dálnici dodržuje. U nízkých intenzit (do 8 hodiny ranní) všechny modely simulovaly dopravu poměrně dobře – absolutní chyba není větší než 5 vozidel.

První větší chybu u Gippsova modelu pozorujeme až před 10. hodinou, nicméně tuto chybu (ať už o trochu větší či menší) mají všechny modely – nejvíce pak Rozšířený Kraussův. I pokud se pozorně podíváme do obrázku 6.3 d) vidíme, že intenzity se snaží nekolísat, zatímco intenzita reálné dopravy se mění z minuty na minutu i o desítky vozidel. Jak již bylo řečeno, aby modely nezpůsobily srážku vozidel, raději vozidla nepustí do oblasti pokud není zajištěn dostatečný odstup. Před 10. hodinou tedy vjelo do oblasti méně vozidel než ve skutečnosti. Tím pádem hned, jak to bude možné, se do simulace posílají další vozidla. To ale trvá řádově minuty a v tu chvíli už má brána jiný údaj o intenzitě – většinou nižší než pro stejnou minutu nasimuluje model. Díky tomu se



Obrázek 6.3: Porovnání jednotlivých modelů mezi sebou. Mýtná brána 0170

chyba modelu o počtu vozidel překlopí ze záporných (větší počet reálných vozidel než nasimulovaných) do kladných hodnot. Z toho důvodu byl pro validaci modelů zvolen jako primární ukazatel GEH. Je totiž vidět, že pokud se počty vozidel sečtou hodinově, problémy vyjmenované výše v tuto chvíli nemají velkou váhu a ovlivní GEH pouze na začátku a konci dané hodiny.

Všechny modely nicméně poměrně přesvědčivě potvrdily tvrzení, že je v podstatě jedno, který z nich použijeme. V našem případě ukazuje nejlepší výsledky Gippsův model. Ze všech modelů, které byly uvedeny v teoretické části, má takové parametry, které se dají přímo nastavit na reálné hodnoty (je to také z důvodu určených koeficientů u jednotlivých členů rovnice (1.20)). Při stejně nastavených hodnotách, jako má Gippsův model, nedosahuje žádný z modelů stejně kvalitní výsledky.

Jak již bylo řečeno v podkapitole 5.4.1, IDM byl v SUMO primárně naprogramován v určitém módu, kde ovšem dosahoval velmi špatných výsledků. Jak již bylo řečeno, bylo nutné model přeprogramovat, aby dosahoval přijatelných výsledků. Přeprogramování proběhlo nahrazením výpočtu interakčního zrychlení v SUMO za interakční zrychlení dle rovnice (1.54). Po přeprogramování již IDM dosahoval poměrně kvalitních výsledků. Na obrázku 6.3d) pozorujeme zajímavý jev a to sice, že u tohoto modelu jsou daleko vyšší hodnoty výchylek do záporná, částečně to může být způsobeno problémem s vjížděním vozidel do oblasti. Střední hodnota po velkém výkyvu do záporných čísel se u IDM na pár minut zvýší o 2–3 vozidla.

Oproti tomu porovnání podle GEH, který zkoumá hodinové intenzity, je vidět, že si v určitých částech dne vedly jednotlivé modely různě. Nejlepších výsledků dosáhl Kraussův model, jehož maximální hodnota GEH byla 3,25. Je také vidět, že největší problém měly modely mezi 17. a 18. hodinou. Toto tvrzení ovšem neplatí pro Gippsův model, který měl největší problémy mezi 14. a 15. hodinou.

Literatura

- [1] *Aimsun 7 Dynamic Simulators User's Manual*. TSS-Transport Simulation Systems, 2012.
- [2] Balci, Osman. Verification, validation, and accreditation. *Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*. IEEE Computer Society Press, 1998.
- [3] Behrisch M, Bieker L, Erdmann J, Krajzewicz D, *SUMO - Simulation of Urban MObility*, Dokořán, Praha, 2008
- [4] MARK, Brackstone a McDonald MIKE. Car-following: a historical re-view. *Transportation Research Part F 2 (1999)*. 2000.
- [5] BROCKFELD, Elmar, Reinhart D. KÜHNE a Peter WAGNER. Calibration and validation of microscopic traffic flow models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2004.
- [6] Model Calibration. *Microsimulation Guidelines* [online]. 2014. Dostupné z: http://www.wisdot.info/microsimulation/index.php?title=Model_Calibration
- [7] Feldman, Olga. The GEH Measure and Quality of the Highway Assignment Models. *European Transport Conference 2012*. 2012.
- [8] Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), 105-111.
- [9] Mapy Google. *Mapy Google* [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps>
- [10] HIGGS, Bryan; ABBAS, M.; MEDINA, Alejandra. *Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using Naturalistic Data*. Road Safety and Simulation, Indianapolis, Indiana, 2011.
- [11] KANAGARAJ, Venkatesan a Gowri ASATHAMBI. Evaluation of Different Vehicle Following Models under Mixed Traffic Conditions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104. 390 – 401. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com/S1877042813045230/1-s2.0-S1877042813045230-main.pdf?_tid=fdf19d26-f011-11e4-97be-00000aacb35e&acdnat=1430492259_b7e70449c1b8d5805fd032cf131ac585
- [12] KELTON, David a Averill LAW. *Simulation modeling and analysis*. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [13] Kleijnen, Jack PC. *Statistical validation of simulation models*. European Journal of Operational Research 87.1 (1995): 21-34.

- [14] KRAUSS, Stefan. *Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics*. Köln, 1998. PhD. Thesis. Universität Köln.
- [15] May A D, *Traffic flow fundamentals*, Prentice Hall, 1989
- [16] Newell, G. F. (2002). A simplified car-following theory: a lower order model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(3), 195-205.
- [17] Pavlík, Jiří. Aplikovaná statistika. Vysoká škola chemicko-technologická, 2005.
- [18] Pidd, M. *Computer Simulation in Management Science*. 3. vyd. Chichester: John Wiley & Sons.
- [19] Song, Jie, et al. *Research on car-following model based on SUMO*. Advanced Infocomm Technology (ICAIT), 2014 IEEE 7th International Conference on. IEEE, 2014.
- [20] Treiber M, Hennecke A, Helbing D, *Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations*, Physical Review E, **62** (2), pp. 1805–1824, 2000
- [21] Treiber M, *Microsimulation of road traffic flow* [online], dostupné z <http://www.traffic-simulation.de/>
- [22] VANIŠ, Miroslav. *Matematické modelování vybraných problémů v dopravě v jazyce Java*. Praha, 2013. Bakalářská práce. FD ČVUT.
- [23] Willmott, Cort J., and Kenji Matsuura. *Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance*. Climate research 30.1 (2005): 79.

Seznam obrázků

1.1	Trajektorie vozidel s konstantní rychlostí - Newellův model	7
1.2	Vztah mezi rychlostí v a vzdáleností mezi vozidly s_n - Newellův model . .	7
1.3	Lineární aproximace při změně rychlosti vozidel - Newellův model	8
1.4	Fáze brždění - Rozšířený Kraussův model	19
1.5	Proměnné jednotlivých vozidel - Intelligent Driver Model	23
1.6	Režimy Wiedemannova modelu	25
2.1	Četnosti pro čas od 2:00-5:00	33
2.2	Četnosti pro čas od 6:00-9:00	33
4.1	Simulační model	44
4.2	Vztahy mezi validací, verifikací a důveryhodností	46
4.3	Diagram validace modelu na základě porovnání dat systému a modelu . .	47
5.1	Simulovaný úsek dálnice – Pražský okruh km 22–14	52
5.2	Brána 0170, 28.10.2012	53
5.3	Brána 0170, 7.10.2012	53
5.4	Brána 0157, 28.10.2012	53
5.5	Brána 0157, 7.10.2012	53
5.6	Brána 0145, 28.10.2012	53
5.7	Brána 0145, 7.10.2012	53
5.8	Brána 0218, 28.10.2012	55
5.9	Brána 0201, 28.10.2012	56
5.10	Brána 0187, 28.10.2012	56
5.11	Brána 0170, 28.12.2012	57
5.12	Brána 0218, 28.10.2012	57
5.13	Brána 0201, 28.10.2012	58
5.14	Brána 0187, 28.10.2012	58
5.15	Brána 0170, 28.10.2012	59
5.16	Brána 0218, 28.10.2012	59
5.17	Brána 0201, 28.10.2012	60
5.18	Brána 0187, 28.10.2012	60
5.19	Brána 0170, 28.10.2012	61
5.20	Brána 0218, 28.10.2012	61
5.21	Brána 0201, 28.10.2012	62
5.22	Brána 0187, 28.10.2012	62
5.23	Brána 0170, 28.10.2012	63
5.24	Wiedemannův model	63
6.1	Porovnání jednotlivých modelů mezi sebou - konkrétní hodnoty	66
6.2	Porovnání jednotlivých modelů mezi sebou - absolutní chyby	67

6.3	Porovnání jednotlivých modelů mezi sebou. Mýtná brána 0170	68
-----	----------------------------------------------------------------------	----

Seznam tabulek

6.1	Výsledná statistika pro jednotlivé modely	64
6.2	Směrodatné odchyly jednotlivých modelů	65
6.3	Střední absolutní chyba (MAE) jednotlivých modelů	65
A.1	Vyhodnocení GEH pro Gippsův model - 28.10. 2012	I
A.2	Vyhodnocení GEH pro Kraussův model - 28.10. 2012	II
A.3	Vyhodnocení GEH pro Rozšířený Kraussův model - 28.10. 2012	III
A.4	Vyhodnocení GEH pro Intelligent Driver Model - 28.10. 2012	IV

A. Hodnoty GEH pro jednotlivé modely

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty GEH pro všechny brány. Výpočet byl proveden pro každou bránu v daném časovém úseku. GEH 218 značí hodnotu GEH pro bránu 218, GEH 201 pro bránu 201 atd.

Čas od:	Čas do:	GEH 218	GEH 201	GEH 187	GEH 170
0:00	0:59	0	0,346844	0,86711	1,549193
1:00	1:59	0	0,603023	0,594089	0,591198
2:00	2:59	0	0,322562	0,106904	0
3:00	3:59	0	0,149906	0,14825	0,149906
4:00	4:59	0	0	0,27735	0,966092
5:00	5:59	0	0,569495	0,654177	0,188144
6:00	6:59	0	0,439941	0,799076	0,511208
7:00	7:59	0	0,274618	0,054841	0,111629
8:00	8:59	0,470541	0,685994	2,281916	1,872764
9:00	9:59	0,372828	1,519109	2,578874	1,920924
10:00	10:59	0,465581	1,132697	3,132882	2,334866
11:00	11:59	0,027592	0,497131	0,683586	0,164584
12:00	12:59	0,446365	1,051903	1,700837	2,278846
13:00	13:59	0,786595	1,203928	2,100061	1,738182
14:00	14:59	1,730314	1,943682	3,123043	3,374375
15:00	15:59	1,697956	1,389913	2,034519	1,101632
16:00	16:59	0	0,043581	1,409219	1,323431
17:00	17:59	1,99029	2,789693	2,247377	2,289925
18:00	18:59	2,041722	1,739164	1,80896	2,524103
19:00	19:59	1,299185	1,888078	1,348284	1,055179
20:00	20:59	0,710047	0,707107	0	0
21:00	21:59	0	0,593199	0,625271	0,579821
22:00	22:59	0	0,053877	0,107058	0,322097
23:00	23:59	0	0,065026	0,458094	0,525226

Tabulka A.1: Vyhodnocení GEH pro Gippsův model - 28.10. 2012

Čas od:	Čas do:	GEH 218	GEH 201	GEH 187	GEH 170
0:00	0:59	0	0,346844	0,86711	1,549193
1:00	1:59	0	0,603023	0,594089	0,591198
2:00	2:59	0	0,428845	0,106904	0
3:00	3:59	0	0,149906	0,14825	0,149906
4:00	4:59	0	0	0,27735	0,966092
5:00	5:59	0	0,569495	0,654177	0,188144
6:00	6:59	0	0,439941	0,799076	0,585018
7:00	7:59	0	0,16502	0,275033	0,279727
8:00	8:59	0,427569	0,599694	1,936949	1,483664
9:00	9:59	0,202375	1,076276	2,544668	2,092399
10:00	10:59	0,758175	1,337978	2,693421	2,100774
11:00	11:59	0,248708	0,276606	1,207407	0,688233
12:00	12:59	0,525407	1,184416	2,072142	2,358641
13:00	13:59	0,860728	1,030849	1,976492	1,515806
14:00	14:59	1,118398	1,353604	2,390506	2,853913
15:00	15:59	1,631207	1,434386	2,522452	1,390251
16:00	16:59	0,65341	0,590102	1,540387	1,323431
17:00	17:59	2,464982	3,28581	2,0748	1,879809
18:00	18:59	1,375215	1,097602	1,66181	2,255698
19:00	19:59	1,794506	2,496224	1,724512	1,490044
20:00	20:59	0,388311	0	0,513994	0,192154
21:00	21:59	0,209703	0,928841	0,290785	0,496564
22:00	22:59	0	0,053877	0,160701	0,322097
23:00	23:59	0	0,065164	0,393073	0,590243

Tabulka A.2: Vyhodnocení GEH pro Kraussův model - 28.10. 2012

Čas od:	Čas do:	GEH 218	GEH 201	GEH 187	GEH 170
0:00	0:59	0	0,346844	0,86711	1,549193
1:00	1:59	0	0,603023	0,594089	0,591198
2:00	2:59	0	0,428845	0,106904	0
3:00	3:59	0	0,149906	0,14825	0,149906
4:00	4:59	0	0	0,27735	0,966092
5:00	5:59	0	0,569495	0,654177	0,188144
6:00	6:59	0	0,439941	0,799076	0,585018
7:00	7:59	0	0,16502	0,275033	0,279727
8:00	8:59	0,427569	0,599694	1,936949	1,483664
9:00	9:59	0,202375	1,076276	2,544668	2,092399
10:00	10:59	0,758175	1,337978	2,693421	2,100774
11:00	11:59	0,248708	0,276606	1,207407	0,688233
12:00	12:59	0,525407	1,184416	2,072142	2,358641
13:00	13:59	0,860728	1,030849	1,976492	1,515806
14:00	14:59	1,118398	1,353604	2,390506	2,853913
15:00	15:59	1,631207	1,434386	2,522452	1,390251
16:00	16:59	0,65341	0,590102	1,540387	1,323431
17:00	17:59	2,464982	3,28581	2,0748	1,879809
18:00	18:59	1,375215	1,097602	1,66181	2,255698
19:00	19:59	1,794506	2,496224	1,724512	1,490044
20:00	20:59	0,388311	0	0,513994	0,192154
21:00	21:59	0,209703	0,928841	0,290785	0,496564
22:00	22:59	0	0,053877	0,160701	0,322097
23:00	23:59	0	0,065164	0,393073	0,590243

Tabulka A.3: Vyhodnocení GEH pro Rozšířený Kraussův model - 28.10. 2012

Čas od:	Čas do:	GEH 218	GEH 201	GEH 187	GEH 170
0:00	0:59	0	0,346844	0,955619	1,460425
1:00	1:59	0	0,603023	0,594089	0,691411
2:00	2:59	0	0,428845	0,106904	0
3:00	3:59	0	0,149906	0,14825	0,149906
4:00	4:59	0	0	0,27735	0,966092
5:00	5:59	0	0,381385	0,749269	0
6:00	6:59	0	0,513956	0,799076	0,511208
7:00	7:59	0	0,16502	0,38563	0,279727
8:00	8:59	0,513553	0,945854	2,804071	2,265081
9:00	9:59	0,168694	1,144191	2,442168	1,886688
10:00	10:59	0,670266	1,484982	2,898162	2,188467
11:00	11:59	0,16571	0,22137	1,207407	0,715898
12:00	12:59	0,736587	1,503387	2,365147	2,812383
13:00	13:59	0,910188	1,253446	1,902439	1,441815
14:00	14:59	1,048072	1,37713	2,696945	3,35065
15:00	15:59	1,475649	1,323243	2,233815	1,013009
16:00	16:59	0,697136	0,524348	1,649836	1,498408
17:00	17:59	2,894384	3,672186	2,57008	2,655313
18:00	18:59	1,151801	0,79975	0,971515	1,593046
19:00	19:59	1,445245	1,391715	0,882353	0,705273
20:00	20:59	0,549388	0,547108	0,064018	0,287128
21:00	21:59	0	0,719345	0,583333	0,704976
22:00	22:59	0	0,107833	0,214423	0,161398
23:00	23:59	0	0,065026	0,393073	0,655122

Tabulka A.4: Vyhodnocení GEH pro Intelligent Driver Model - 28.10. 2012

B. Kompilace simulačního softwaru SUMO

B.1 SUMO

SUMO je volně šiřitelný dopravní simulátor, který vznikl v roce 2001. SUMO umožňuje modelování intermodálních dopravních systémů. Ty mohou obsahovat dopravní prostředky, městskou hromadnou dopravu či chodce. Dále v SUMO existují nástroje pro vyhledávání cesty, vizualizace, import či export map, počítání emisí a další. Nejdůležitější vlastností pro nás je možnost implementování vlastního dopravního modelu. SUMO samo o sobě již obsahuje některé modely - Kraussův model 1.3, Intelligent Driver Model 1.5 a Wiedemannův model.

B.1.1 SUMO download

Na stránkách projektu SUMO¹ se stáhne aktuální verze SUMO na pravé straně. Uvažujeme pouze případ dopravního simulátoru SUMO pod Windows, v době vzniku byla na světě verze SUMO 0.22. Ideální je varianta stáhnutí tří zkomprimovaných souborů. Pro potřeby kompilace stačí pouze soubor SUMO 0.22 sources (sumo-src-0.22.0, 14 MB). V souboru SUMO 0.22 manual, tutorial and examples (sumo-doc-0.22.0.zip, 35 MB) se nachází podrobná dokumentace ke všem naprogramovaným součástem SUMO a SUMO 0.22 for Windows (sumo-winbin-0.22.0.zip, 33 MB) obsahuje již zkompilevané SUMO, které je možné rovnou použít. V tomto souboru se ve složce *docs/userdoc* nachází uživatelská příručka, která obsahuje i návod na zkompilevání SUMO pod Windows. Tento návod ovšem v některých částech není dostatečně přesný.

B.2 Visual Studio

Pro zkompilevání SUMO je zapotřebí mít nainstalované Visual Studio. To je možné získat přímo na stránkách Visual Studia² a po zaregistrování je možno získat Express edici Visual Studia. Autor pracuje s Visual Studio 2010 Pro. Kompilace SUMO je tedy vyzkoušena na této verzi. **Pro správné fungování Visual Studia je nutné mít nainstalován Microsoft .NET Framework verze 4 ne vyšší!**

B.3 Ostatní závislosti

SUMO ke svému zkompilevání potřebuje další knihovny. V první řadě je to **Xerces-C** (xerces-c-3.1.1-x86-windows-vc-10.0.zip, 23 MB)³, které už je samo o sobě zkompilevané.

¹<http://www.dlr.de/ts/sumo/en>

²<http://www.visualstudio.com>

³<http://mirror.hosting90.cz/apache//xerces/c/3/binaries/xerces-c-3.1.1-x86-windows-vc-10.0.zip>

Podstatné je stáhnout verzi x86 a ne 64bitovou, aby s ní byly schopni další součásti pracovat.

Další závislostí jsou **knihovny FOX**, kterou si budeme muset ve Visual Studiu zkompilevat sami. V návodu u SUMO je uvedeno, že je vyzkoušena pouze verze 1.6.36⁴. Přesně pro tuto jedinou verzi se mi povedlo provést kompilaci v pořádku.

Poslední částí pro zdárnou kompilaci jsou FWTools. Verze doporučená SUMO ovšem nefunguje a ani nikde na internetu se ji nepodařilo nalézt. Funkční je ovšem verze 2.4.7⁵.

Důrazně se doporučuje ani jednu z těchto částí neinstalovat do klasického adresáře Program Files, může to způsobit problémy.

Nutné je také mít nainstalovaný Python (pro něj neplatí předchozí odstavec), ovšem pozor rozhodně ne nejnovější verzi⁶, nýbrž verzi 2.7⁷. U Pythonu není nutné žádné další nastavení.

B.3.1 Xerces-C

Nejprve rozbalíme obsah archivu a posléze přkopírujeme ze složky *bin* obě dll knihovny⁸ do složky *Windows/System32*. Přes veškerou snahu se nepodařilo XERCES naimportovat všem projektům. Tím pádem se musí celý obsah složky *include* přkopírovat do složky, kde je nainstalované Visual Studio do složky *vc/include*⁹. Výsledkem tedy bude přkopírovaná složka *Xercesc* ze složky *Xerces/include/* do složky */vc/include*. Pro kompilaci a následné spuštění zkompilevaných programů je nutno vytvořit systémovou proměnnou XERCES¹⁰, jejíž hodnota bude nastavena na kořenový adresář Xerces. Poté vyhledáme v systémových proměnných proměnnou PATH a nakonec hodnoty této proměnné přidáme %XERCES%/bin/.

B.3.2 FOX

FOX klasicky rozbalíme z archivu a poté musíme Visual Studiem zkompilevat. Otevřeme v rozbaleném archivu složku *windows/vcpp* a v ní otevřeme Visual Studiem soubor *win32.dsw*. Dle verze Visual Studia se může objevit hlášení o nutnosti konvertování. Potvrdíme pro všechny (možno zaškrtnout) a necháme Visual Studio načíst FOX. Po načtení musíme vybrat možnost kompilace **Release** a zkompileujeme **pouze** projekt foxdll. Pak provedeme to samé s tím rozdílem, že vybereme možnost **Debug**. Při kompilaci můžou vzniknout chyby, ty nás ovšem netrápí, protože to důležité by se mělo vytvořit. V kořenovém adresáři se vytvoří složka *lib* ve které se nacházejí zkompilevané knihovny FOXDLL-1.6.dll a FOXDLLD-1.6.dll, které také přkopírujeme do složky *Windows/System32*. Do systémových proměnných je nutné přidat proměnnou z názvem FOX16 s ces-

⁴<http://ftp.fox-toolkit.org/pub/fox-1.6.36.zip>

⁵<http://home.gdal.org/fwtools/FWTools247.exe>

⁶3 a výše

⁷<https://www.python.org/ftp/python/2.7.8/python-2.7.8.msi>, 16 MB

⁸xerces-c-3.1.dll a xerces-c-3.1D

⁹např. c:/Program Files/Microsoft Visual Studio 10.0/VC/include/

¹⁰Start - Počítač - Vlastnosti systému - Upřesnit nastavení systému (nabídka na pravé straně) - Proměnné prostředí... - Systémové proměnné - Nová...

tou do kořenového adresáře FOX¹¹ a následně na konec hodnoty systémové proměnné PATH přidat %FOX16%/lib.

B.3.3 FWTools

FWTools klasicky nainstalujeme (ideálně ne do složky Program Files). Vytvoříme stejně jako pro FOX systémovou proměnnou s názvem PROJ_GDAL, která bude opět odkazovat do kořenového adresáře FWTools. Poté vyhledáme v systémových proměnných proměnnou PATH a nakonec hodnoty této proměnné přidáme %PROJ_GDAL%/bin.

B.3.4 SUMO

V kořenovém adresáři SUMO ve složce **/build/msvc10** se nachází soubor s názvem *prj.sln*. Ten otevřeme Visual Studiem. Pokud je vše nastaveno správně, je možno spustit kompilaci¹² SUMO, to znamená zkompilovat všechno (všech 54 projektů). Pokud kompilujeme v režimu Release, dostaneme výstup, který se nachází v kořenovém adresáři ve složce *bin*. Tento výstup je v sumo-winbin-0.22.0.zip.

¹¹např. C:/fox-1.6.36/

¹²Build → Build Solution

C. Vytvoření sítě pro simulaci v SUMO

C.1 OpenStreetMap

Pro vytvoření sítě bylo využito serveru OpenStreetMap, který obsahuje kromě pozemních komunikací spoustu dalších objektů. Nejdříve bylo na tomto serveru vybrána oblast, ve které se nacházejí mytné brány. Posléze tato mapa byla vyexportována do souboru OSM. Ten ovšem obsahoval i další objekty, které nemají pro simulování žádnou relevanci. Tyto objekty bylo nutné odstranit.

K tomu se využil free software JOSM¹, kde se vybraly všechny prvky, které bylo nutné odstranit. Tyto prvky byly sice odstraněny, ovšem velikost souboru se ještě zvýšila, protože ke každému objektu byl pouze přiřazen parametr skrytí.

Aby se prvky opravdu smazali byl využit software XMLStarlet², který přímo pracuje se souborem XML. Ve stejné složce, kde se nachází XMLStarlet se překopíruje soubor OSM s již odstraněnými prvky (*input.osm*) a s příkazové řádky se spustí příkaz

```
1 xmlstarlet ed -d "/osm/*[@action='delete']" < input > output.osm
```

kde *output.osm* je název výstupního souboru s přímo smazanými prvky.

C.2 netConvert

Pokud máme připravený soubor z odstavce C.1, zkopírujeme ho do složky se souborem *netconvert.exe*. Z příkazové řádky spustíme příkaz

```
1 netconvert --guess-ramps --remove-geometry --junctions.join --osm-files output.osm --output-file nodes.net.xml
```

Tento příkaz nám vytvoří soubor *nodes.net.xml*, který obsahuje již přesnou strukturu sítě, kterou bude možné otevřít v SUMO. Existuje mnoho parametrů *netconvert*, po několika zkouškách autor usoudil, že tyto parametry jsou nejbližší tomu, čeho se chce dosáhnout. Program *netconvert.exe* se pokusí uhádnout nájezdy a sjezdy s Pražského okruhu (*-guess-ramps*), které nejsou zřejmé ze souboru *output.osm*, s tím souvisí vytvoření propojení (*-junctions.join*) těchto nájezdů a sjezdů a vytvoření dalších uzlů (*-remove-geometry*). V tuto chvíli máme již použitelný soubor jako podklad pro simulaci.

SUMO pouští vozidla do oblasti tak, že vezme jeden z parametrů vozidla, který určuje vjezd do oblasti, v dalším parametru jsou informace o dalších hranách, které vozidlo projíždí. Problém výstupního souboru *nodes.net.xml*, se kterým jsou tyto parametry vozidla srovnávány, spočívá v tom, že hrany a uzly jsou 8 až 9ti místná čísla, která nemají na první pohled danou spojitost. Je tedy nutné je přejmenovat.

¹<https://josm.openstreetmap.de/>

²<http://xmlstar.sourceforge.net/>

Nejlepší způsob je asi v použití SUMO-GUI, kde při najetí na prvek zjistíme jeho ID a potom v souboru *nodes.net.xml* nahradíme předem vymyšleným ID z nějakého vlastního systému. Autor zvolil číslování od 1 a v závislosti na směru buď písmeno a nebo b. Takže hrana má např. název 1a, 3b.

D. Vytvoření souborů pro nový model

D.1 Implementace nového modelu

Ideální volbou pro implementaci nového modelu je začít s modelem, který již existuje. Pokud se nacházíme v kořenovém adresáři simulačního nástroje SUMO, potom ve složce `/src/microsim/cfmodels` nalezneme všechny dosud naprogramované modely.

Nejjednodušší způsob je zkopírování souborů s již existujícím modelem (např. *MSCFModel_KraussOrig2.h* a *MSCFModel_KraussOrig2.cpp* a jejich následné přejmenování na jméno našeho modelu (např. Gipps). Výsledkem tedy budou dva soubory *MSCFModel_Gipps.h* a *MSCFModel_Gipps.cpp*. Nyní otevřeme postupně oba soubory a nahradíme každý výskyt *MSCFModel_KraussOrig1* za *MSCFModel_Gipps*.

Velmi důležitá věc je potom přidat tyto soubory do projektu¹. To se ve Visual Studiu provede volbou *Project* → *Add Existing Item* a vyberou se námi vytvořené soubory, tedy např. *MSCFModel_Gipps.h* a *MSCFModel_Gipps.cpp*.

Posléze otevřeme soubor `/src/utis/xml/SUMOXMLElementDefinitions.h` a přidáme do seznamu parametrů².

V souboru `/src/utis/xml/SUMOXMLElementDefinitions.cpp` poté přidáme opět k sekci modelů Gippsův:

```
1 { "carFollowing-GIPPS", SUMO_TAG_CF_GIPPS},
```

Závěrečnou fází přidání modelu je otevření souboru `/src/microsim/MSVehicleType.cpp`, kde se ve funkci *build* nachází dělení, podle toho jaký model je nadefinován v souboru `.rou.xml`. Na tomto základě je zvolen vybraný model. Do tohoto dělení je nutné vložit následující kód:

```
1 case SUMO_TAG_CF_GIPPS:
2     vtype->myCarFollowModel = new MSCFModel_Gipps(vtype, accel, decel, sigma
        , tau);
```

Pokud chceme zvolit náš model při generování vozidel, existuje více možností jak to udělat. Nejjednodušší je vložit mezi tagy v souboru s příponou `.rou.xml` `<vtype>` a `</vtype>` tag `<carFollowing-Gipps>`. V něm poté budou následovat jednotlivé parametry modelu.

¹Postup, jak se otevírá a kompiluje projekt SUMO, se nachází v příloze B v sekci B.3.4

²ideálně vyhledat nějaký stávající model - pro Krausse `SUMO_TAG_CF_KRAUSS_ORIG1` a za něj (ne místo něj!) přidat `SUMO_TAG_CF_GIPPS`

D.2 Implementace nových parametrů

Např. u Gippsova modelu 1.2 je nutné přidat parametr preferované rychlosti V_n . Proto je zde uveden stručný návod pro přidání jednoho parametru. To je nezávislé na modelu do té doby dokud při volání konstruktoru nepřipojíme tento parametr jako vstupní.

Pokud se nacházíme v kořenovém adresáři SUMO, potom ve složce `/src/Utils/xml/` otevřeme soubory `SUMOXMLElementDefinitions.h` a `SUMOXMLElementDefinitions.cpp`. V prvně jmenovaném souboru `SUMOXMLElementDefinitions.h` do části `enum SumoXMLElementAttr` přidáme název nového atributu ve tvaru³

```
1 SUMO_ATTR_DESIREDSPED,
```

V souboru `SUMOXMLElementDefinitions.cpp` v sekci `StringBijection<int>::Entry SUMOXMLElementDefinitions::attrs[]` přiřadíme tyto parametry proměnným pro SUMO a to ve tvaru

```
1 { "desiredSpeed", SUMO_ATTR_DESIREDSPED},
```

Další částí nutnou vykonat je přidání parametrů do souboru `/src/Utils/xml/SUMO-VehicleParserHelper.cpp`, konkrétně do metody `getAllowedCFModelAttr()`. Pro Gippsův model bude kód následující:

```
1 std::set<SumoXMLElementAttr> gippsParams;  
2 gippsParams.insert(SUMO_ATTR_ACCEL);  
3 gippsParams.insert(SUMO_ATTR_DECEL);  
4 gippsParams.insert(SUMO_ATTR_TAU);  
5 gippsParams.insert(SUMO_ATTR_CF_DESIREDSPED);  
6 allowedCFModelAttrs[SUMO_TAG_CF_GIPPS] = gippsParams;
```

³Je vhodné najít sekci parametrů Car Following Modelů a přidat ji tam, nicméně při vložení např. hned na začátek to bude fungovat také. Ideální je vyhledat text „SUMO_ATTR_CF.“