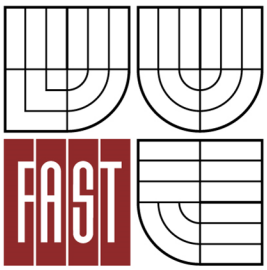
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

ANALÝZA DĚJŮ PŘI SPOJOVÁNÍ DOPRAVNÍCH PROUDŮ

ANALYSIS OF TRAFFIC LANES JOINING PROCESSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — IGOR MIKOLÁŠEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. PETR HOLCNER, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2014

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Igor Mikolášek
Název	Analýza dějů při spojování dopravních proudů
Vedoucí bakalářské práce	doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2013
Datum odevzdání bakalářské práce	30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

.....
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

Zákon č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích
ČSN 73 6101 Projektování pozemních komunikací
ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací
ČSN 73 6102 Projektování křižovatek na silničních komunikacích
Manuály Aimsun
Mapové podklady
Ortofotomapy

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Proveďte dostupnými prostředky dopravní průzkumy v místě spojování jízdních pruhů na komunikaci Žabovřeská. Zaměřte se na základní charakteristiky dopravního proudu - hustotu, rychlost a intenzitu. Vyhodnoťte, jak řidiči dodržují pravidla pro "zipování". Popište a analyzujte děje při spojování dopravních proudů a pokuste se posoudit možnosti ovlivnění kapacity v místě zúžení.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....

doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Cílem práce je analýza chování dopravního proudu v místě spojování dvou jízdních pruhů, kde se předpokládá aplikace pravidla zipu dle zákona č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích. Pro pozorování a sběr dat byla zvolena ulice Žabovřeská na VMO Brno ve směru od Královopolských tunelů k MÚK Hlinky. Pro sběr dat bylo použito pozorování, ruční měření, radary a další dostupné prostředky. Na základě analýzy změřených dat jsou uvedeny návrhy na zvýšení kapacity dopravního hrdla v době, kdy je vytvořena kolona. Jedno z navržených řešení je otestováno v simulačním programu Aimsun.

KLÍČOVÁ SLOVA

dopravní proud, zipování, kapacita, kongesce, měření, dopravní průzkum, hustota, rychlost, intenzita

ABSTRACT

The aim of this paper is to analyse the behaviour of the traffic flow at an area of merging traffic lanes where an application of the zip rule is expected, accoding to the law no. 361/2000 Sb. “o provozu na pozemních komunikacích”. Žabovřeská street, part of the VMO Brno, in the direction from Královopolské tunely to Hlinky interchange was chosen for observation and measuring. Observation, first-hand measurement, radars, and other available means were used for data collection. On the basis of data analysis, several suggestions for improvements are made. These are aimed at increasing the bottleneck capacity. One of the suggestions is tested in a simulation program Aimsun.

KEY WORDS

traffic flow, zip rule, capacity, congestion, measuring, traffic survey, density, speed, intensity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

MIKOLÁŠEK, Igor. *Analýza dějů při spojování dopravních proudů.* Brno, 2014. 72 s., 8 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25.5.2014

……

podpis autora

Igor Mikolášek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Petru Holcnerovi, Ph.D. za to, že mě přivedl k tomuto zajímavému tématu práce a za cenné rady a poznámky k její tvorbě. Děkuji také Ing. Martinu Všetečkovi za úvod do vytváření modelu v programu Aimsun.

OBSAH

ÚVOD 11

1 DOPRAVNÍ PROUD 12

1.1 Základní charakteristiky dopravního proudu 12
1.1.1 Hustota 12
1.1.2 Rychlost 12
1.1.3 Intenzita 12

1.2 Vztahy základních veličin 13
1.2.1 Greenshieldsův model 15
1.2.2 Model konstatního časového odstupu 16
1.2.3 Car-following model 17

2 ZÁKONY A NORMY 22

2.1 Zákon o provozu na pozemních komunikacích 22
2.1.1 Postoj zákona ke spojování jízdních pruhů 22
2.1.2 Aplikace zákona v praxi 22
2.1.3 Zahraniční zákony 23

2.2 ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic 24

3 MĚŘENÍ DOPRAVNÍHO PROUDU 26

3.1 Lokalita měření 26

3.2 Měření hustoty 27

3.3 Měření rychlosti 27
3.3.1 Měření soustavou radarů 28
3.3.2 Měření plovoucím vozidlem 30
3.3.3 Ruční měření 30

3.4 Měření intenzity 31
3.4.1 Ruční měření 31
3.4.2 Měření soustavou radarů 32

3.5 Délka kolony 32

4 ZPRACOVÁNÍ A ANALÝZA MĚŘENÍ 33

4.1 Hustota 33

4.2 Rychlost 35
4.2.1 Měření soustavou radarů 36
4.2.2 Měření plovoucím vozidlem 39
4.2.3 Ruční měření 41
4.3 Intenzita 43
4.3.1 Měření soustavou radarů 43
4.3.2 Ruční měření 45
4.4 Délka kolony 51
4.5 Závěry z provedených měření a pozorování 54
4.5.1 Kapacita místa spojení jízdních pruhů 54
4.5.2 Ztráty způsobené stáním v koloně 54
5 MOŽNOSTI OVLIVNĚNÍ DOPRAVNÍHO PROUDU ZA ÚČELEM ZVÝŠENÍ KAPACITY SPOJENÍ JÍZDNÍCH PRUHŮ 56
5.1 Omezení rychlosti před místem spojování 56
5.2 Řízení světelným signalizačním zařízením 56
5.3 Aplikace technologie V2V 57
6 MIKROSIMULACE 59
6.1 Simulační software Aimsun 59
6.1.1 Výpočet rychlosti vozidla 60
6.1.2 Odhad decelerace předchozího vozidla 60
6.1.3 Požadovaná rychlost vozidla 61
6.2 Cíle simulace 62
6.3 Podoba a nastavení modelu 62
6.4 Závěry simulace 63
7 ZÁVĚR 64
POUŽITÁ LITERATURA 66
SEZNAM TABULEK 68
SEZNAM OBRÁZKŮ 69
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 71

SEZNAM PŘÍLOH 72

PŘÍLOHA A 73

PŘÍLOHA B 77

ÚVOD

V posledních desetiletích neustále roste intenzita silniční dopravy a tento trend se očekává i v budoucnu. Zvyšující se intenzita však klade stále větší nároky na dopravní infrastrukturu, která často nedostačuje poptávce. Jednou z možností je stavět stále nové a velkorysé komunikace či rozšiřovat stávající. Tato varianta je však velmi nákladná a ne vždy je žádoucí. Kapacita sítě však není zpravidla omezena počtem jízdních pruhů, který je na většině komunikace, ale naopak těmi několika místy, kde je tento počet omezen, případně je doprava omezena jiným způsobem – zejména úrovňovými křižovatkami.

Tato místa, ať už křižovatky nebo místa spojování jízdních pruhů, omezují kapacitu komunikace a tvoří dopravní hrdla (bottleneck). Jedno takové významné hrdlo je například v Brně na ulici Žabovřeská. Je zde svedena doprava v podstatě ze tří pruhů do jednoho a pravidelně se zde tvoří kolony. Ještě významnějším důvodem ke studiu spojování jízdních pruhů pak jsou současné opravy dálnice D1, které budou probíhat i v následujících letech a přináší značné komplikace a zdržení uživatelům dálnice. Tyto časové ztráty uživatelům generují obrovské ztráty z ušlé příležitosti, kdy čas strávený čekáním v koloně mohli využít k nějaké činnosti.

Cílem této práce je pokusit se objasnit některé jevy v dopravním proudu v oblasti spojování dopravních proudů, změřit kapacitu takového místa a případně navrhnout opatření, která by mohla vést ke zvýšení propustnosti takových míst. Pro sběr dat bylo zvoleno výše zmíněné spojení pruhů na ulici Žabovřeská v Brně, která je součástí VMO Brno.

1 DOPRAVNÍ PROUD

1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY DOPRAVNÍHO PROUDU

Stav dopravního proudu je popisován třemi základními veličinami závislými na místě a čase, ve kterém je pozorujeme: hustotou $\rho(x,t)$, rychlostí $v(x,t)$ a intenzitou $q(x,t)$.

1.1.1 Hustota

Jednou ze základních veličin dopravního proudu je jeho hustota udávající počet vozidel na jednom kilometru komunikace. Podle potřeby se vztahuje k jednomu, dvěma, či více jízdním pruhům, případně k oběma směrům současně. V této práci je hustota vždy vztažena pouze k jednomu jízdnímu pruhu.

Hustota se někdy zobrazuje jako nezávislá proměnná a hledá se závislost rychlosti a intenzity na ní. Ve skutečnosti se ale všechny tři veličiny ovlivňují vzájemně, zejména pak při vysoké intenzitě, kdy v reálném provozu nelze dosáhnout nízké hustoty.

1.1.2 Rychlost

Další z charakteristik dopravního proudu je jeho rychlost. Stejně jako rychlost čehokoli jiného udává vzdálenost uraženou za jednotku času. Základní jednotkou jsou metry za sekundu, v dopravní praxi se ale užívá spíše jednotka kilometry za hodinu, respektive míle za hodinu v případě zemí používajících imperiální systém jednotek.

Dopravní proud není jeden objekt, který by mohl mít konkrétní rychlost. Rychlost dopravního proudu udává průměrnou rychlost vozidel, které dopravní proud v daném úseku tvoří. Při nízké hustotě tak rychlost dopravního proudu odpovídá rychlosti jednotlivých vozidel, naopak v koloně, kde se vozidla pohybují způsobem „stop and go“ (stůj a jeď) je nutné rychlost dopravního proudu dopočítat z ujeté vzdálenosti a času dle vzorce

$$v = \frac{s}{t}, \tag{1.1}$$

kde v je rychlost [m/s]
s je dráha [m]
t je čas [s]

Vzhledem k tomu že dopravní proud se v kolonách pohybuje ve vlnách stop and go, je nutné změřit rychlost více vozidel a rychlosti zprůměrovat, abychom eliminovali extrémy, kdy se v měřeném úseku vozidla pohybují plynule, nebo naopak dlouho stojí. Druhou možností je měřit jedno vozidlo po dostatečně dlouhou dobu respektive na dostatečně dlouhém úseku.

1.1.3 Intenzita

Z pohledu posuzování komunikací je nejdůležitější vlastností dopravního proudu jeho intenzita. Ta udává počet vozidel, které projedou určitým profilem komunikace za danou časovou jednotku. Nejčastěji se intenzita udává za hodinu nebo 24 hodin. Při kapacitních výpočtech se běžně používá tzv. špičková hodina, tedy nejvyšší hodinová intenzita naměřená během dne, zpravidla v ranní nebo odpolední špičce. Špičková intenzita se také často odhaduje jako zhruba 1/12 – 1/10 denní intenzity.

Nejvyšší hodinová intenzita, která je v daném profilu dosažitelná, se považuje za jeho kapacitu. Ta je důležitá při návrhu komunikací, které se navrhují v závislosti na předpokládaných budoucích intenzitách tak, aby jejich kapacita při požadovaném stupni úrovně kvality dopravy (viz kapitola 2.2) byla vyšší, než předpokládaná výhledová intenzita. Zvyšování intenzity, respektive kapacity v místech, kde bývá kapacity dosaženo a dochází tak ke vzniku kongescí, je jedním ze základních úkolů dopravního inženýrství. V současnosti dochází k rozvoji telematiky, která se zabývá řízením dopravního proudu za účelem právě zvýšení kapacity těchto problematických míst. Jedním z cílů této práce je zjistit, zda by telematika mohla pomoci ke zvýšení kapacity hrdel při spojování jízdních pruhů.

Jakkoli je intenzita významná z hlediska dopravního výkonu, nepopisuje přímo jeho kvalitu. Pro účastníky provozu je intenzita jako taková v podstatě bezvýznamná, pro ně je rozhodující veličinou jejich vlastní rychlost, což se projevuje určitou sobeckostí, což hraje roli např. při zipování (viz kapitola 2.1.2).

1.2 VZTAHY ZÁKLADNÍCH VELIČIN

Jestliže definice jednotlivých veličin dopravního proudu se zdá být poměrně triviální, potom definice jejich vztahu je naprostým opakem. Hledáním a popisem tohoto vztahu, tzv. teorií dopravního proudu, se dopravní inženýři zabývají více či méně úspěšně již od počátku rozvoje silniční dopravy. Dopravní proud je nelineární dynamický jev a jako takový je definován jednoduchými pravidly, ale navzdory tomu je velmi složitý a proměnlivý.

Při ustáleném dopravním proudu platí:

$$q = v * \rho \tag{1.2}$$

kde q je intenzita [voz/h]
v je rychlost [km/h]
ρ je hustota [voz/km]

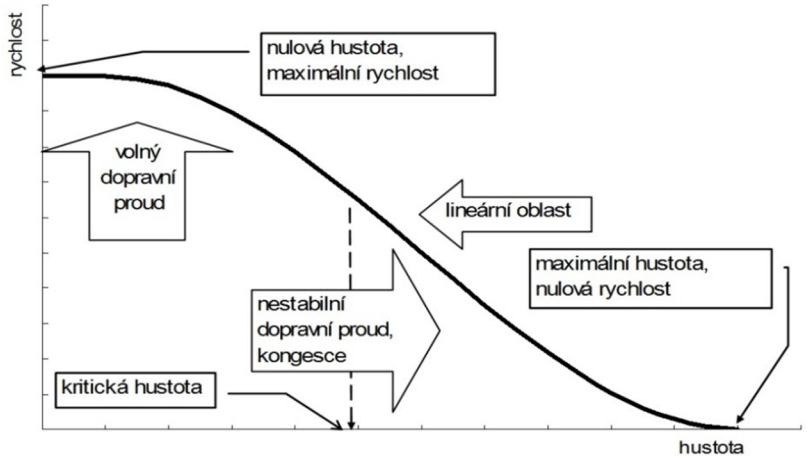
Rychlost dopravního proudu je však zároveň závislá na jeho hustotě:

$$v = v(\rho) \tag{1.3}$$

z čehož plyne vztah:

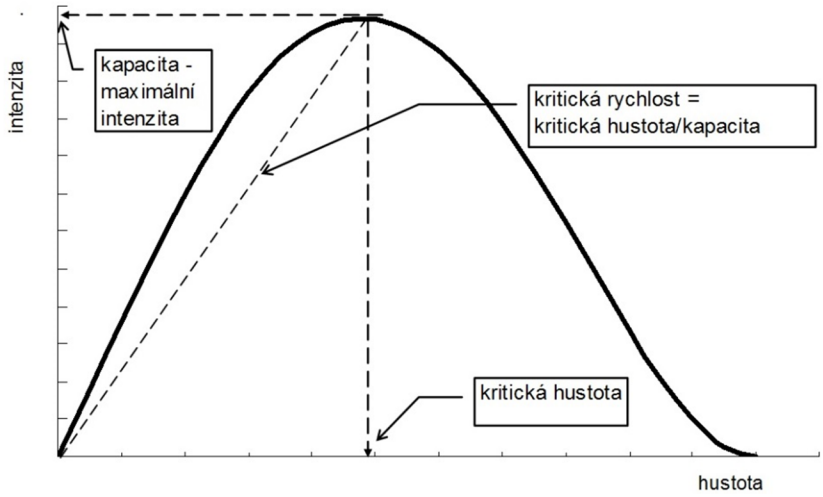
$$q(\rho) = v(\rho) * \rho \tag{1.4}$$

Kromě této závislosti je ale dopravní proud závislý na mnoha dalších vnitřních (vlastnosti a schopnosti jednotlivých řidičů a vozidel) a vnějších (stav a parametry komunikace, klimatické podmínky) okolnostech a mnohých náhodných jevech. Všechny tyto okolnosti ovlivňují vztah závislost rychlosti na hustotě (1.3). Vztah rychlosti a hustoty je součástí nebo přímo definicí jednotlivých modelů dopravního proudu. V souladu s empirií panuje všeobecná shoda v tom, že mezi krajními body závislost monotónně a spojitě klesá.



Obr. 1.1 Obecný fundamentální diagram závislosti rychlosti a hustoty [1]. Od tohoto diagram se přímo odvozují diagramy uvedené na obr. 1.2 a 1.3.

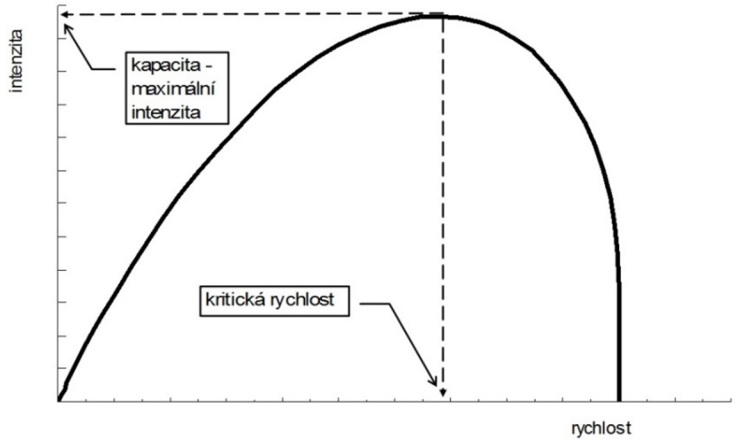
Pro zobrazení vztahů mezi veličinami dopravního proudu se používají fundamentální diagramy. Jak bylo řečeno, pro definici modelu je primární vztah rychlost – hustota. Od něj jsou odvozeny vztahy hustota – intenzita (často bývá jako fundamentální označován právě tento) a intenzita – rychlost.



Obr. 1.2 Obecný fundamentální diagram závislosti intenzity a hustoty. [1]

Při popisu dopravního proudu fundamentálními diagramy tohoto typu se většinou implicitně přijímají tyto předpoklady [1]:

- Dopravní proud má tendenci dospět do ustáleného stavu, který odpovídá fundamentálnímu diagramu.
- Pokud měříme v reálném dopravním proudu dostatečně dlouhou dobu, zjistíme hodnoty odpovídající fundamentálnímu diagramu.
- Případné odchylky hustoty, intenzity a rychlosti, které vždy naměříme (pro kratší intervaly měření jsou odchylky větší), mají příčinu pouze v odlišných charakteristikách vozidel (technické parametry vozidla, schopnosti, momentální psychický stav a svobodná vůle řidiče,…) Tyto odlišné charakteristiky lze do modelu zavést statisticky. Tím se model stane úplným.



Obr. 1.3 Obecný fundamentální diagram závislosti intenzity a rychlosti. [1]

1.2.1 Greenshieldsův model

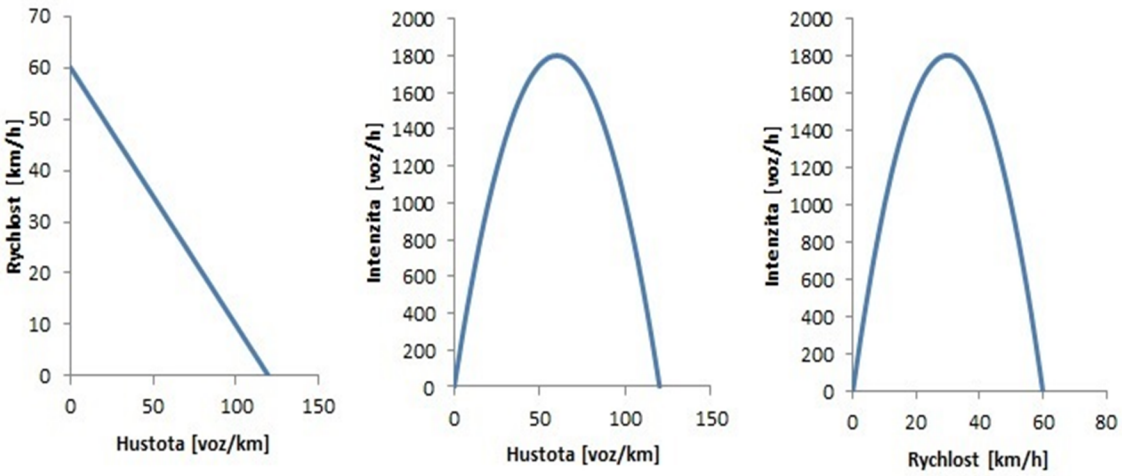
Greenshieldsův model předpokládá ustálený a homogenní proud, kde rychlost jednotlivých vozidel a hustota dopravního proudu jsou konstantní. Je charakteristický lineární závislostí rychlosti dopravního proudu na jeho hustotě. Z této lineární závislosti $v(\rho)$ potom vyplývá parabolická závislost intenzity na hustotě $q(\rho)$. Při zavedení okrajových podmínek v podobě maximální rychlosti a hustoty lze lineární závislost rychlosti na hustotě definovat jako:

$$v(\rho) = v_{max} * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right) \tag{1.5}$$

Dosazením do rovnice 1.4 získáme kvadratickou závislost intenzity na hustotě:

$$q(\rho) = v(\rho) * \rho = v_{max} * \left(\rho - \frac{\rho^2}{\rho_{max}}\right) \tag{1.6}$$

Greenshieldsův model je jednoznačně popsán parametry maximální hustota a maximální rychlost. S ohledem na ovlivnění charakteristik dopravního proudu vlastnostmi vozidel a řidičů a vnějším prostředím je nastavení těchto parametrů komplikované a neexistuje jednoznačná shoda, na jaké hodnoty by se měly modely kalibrovat. Je nutné zdůraznit, že maximální rychlost ve smyslu Greenshieldsova modelu nemusí odpovídat nejvyšší dovolené rychlosti na komunikaci.



Obr. 1.4 Fundamentální diagramy podle Greenshieldsova modelu pro maximální rychlost odpovídající zkoumanému úseku komunikace (viz kapitola 3.1) a naměřené hustotě (viz kapitola 4.1).

Greenshieldsův model byl dlouhou dobu běžně využíván navzdory své značné nerealističnosti. Ta se projevuje zejména v oblasti nízkých hustot, kde se ve skutečnosti vozidla vzájemně neovlivňují a rychlost zůstává až do určité hustoty na maximální hodnotě či v její blízkosti. Druhou významnou odlišností od reality je symetrie grafu intenzita – hustota. Ve skutečnosti jsou při hustotě $\rho_{max}/2$ rychlosti výrazně nižší a kapacity je dosahováno při nižších hustotách.

1.2.2 Model konstatního časového odstupu

Tento model nevychází z teoretického popisu dopravního proudu, ale z doporučení pro bezpečnou jízdu. Známé pravidlo říká, že by vozidlo mělo bez ohledu na rychlost dodržovat bezpečnostní odstup Δt od předcházejícího vozidla dvě sekundy. Tato hodnota vychází z reakční doby řidiče a zpoždění brzdného systému, zároveň může eliminovat vliv nižší decelerace následujícího vozidla.

Při zanedbání délky vozidla je tímto požadavkem definována konstantní intenzita v celém rozsahu hustot, přičemž by rychlost pro nízké hustoty rostla do nekonečna.

$$q = \frac{1}{\Delta t} = konst. \qquad (1.7)$$
$$\Delta t = 2\ s \text{ odpovídá } q = 1800 \text{ [voz/h]}$$

Takový model je zcela nerealistický. Je proto potřeba zahrnout délku vozidla a minimální odstup od nárazníku. Při průměrné délce vozidla 4,5 m (při zanedbání nákladních vozidel) a odstupu 1,5 m lze uvažovat minimální vzdálenost čel následujících vozidel d_{min} = 6 m. Vzdálenost vozidel d je potom

$$d = d_{min} + v * \Delta t \qquad (1.8)$$

Hustota je inverzní hodnotou vzdálenosti, proto

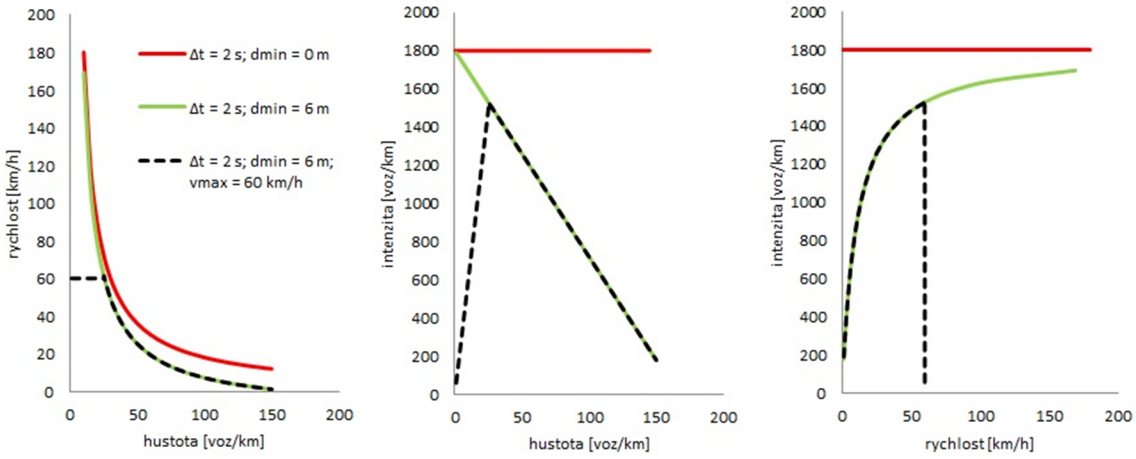
$$\rho(v) = \frac{1}{d_{min} + v * \Delta t} \qquad (1.9)$$

Ze vztahu dále můžeme vyjádřit běžně užívanou závislost rychlosti na hustotě:

$$v(\rho) = \frac{1}{\Delta t} * \left(\frac{1}{\rho} - d_{min}\right) \tag{1.10}$$

Závislost intenzity na hustotě má lineární průběh:

$$q(\rho) = v(\rho) * \rho = \frac{1}{\Delta t} * (1 - d_{min} * \rho) \tag{1.11}$$



Obr. 1.5 Fundamentální diagramy modelu konstantního časového odstupu. Zároveň odpovídají i fundamentálním diagramům lineárního car-following modelu.

Zavedením délky vozidla získáme limitní hustotu ρ_{max}, při které se dopravní proud zastaví, což je v souladu se skutečností. Naopak v oblasti nízkých hustot se model s realitou neshoduje – i přes zavedení nenulové délky vozidla rychlost při nízkých hustotách konverguje k nekonečnu. Tento nesoulad lze odstranit zavedením rychlostního limitu, čímž získá fundamentální diagram *ρ(q)* tvar alespoň v okrajových oblastech hustot přibližně odpovídající skutečnosti. V rozporu s empirií zůstává dosažení maximální intenzity při maximální rychlosti.

1.2.3 Car-following model

Lineární CFM

Lineární „car-following model“ (CFM; model následování vozidla) je ekvivalentní s modelem konstantního časového odstupu. Vychází z předpokladu, že akcelerace *i*-tého vozidla je závislá na jeho relativní rychlosti k předcházejícímu *i-1* vozidlu. Při zavedení reakční doby *T* lze vyjádřit akceleraci vozidla diferenciální rovnicí

$$\frac{d^2 x_i(t+T)}{dt^2} = -\lambda * \left(\frac{dx_i(t)}{dt} - \frac{dx_{i-1}(t)}{dt}\right) \tag{1.12}$$

kde λ [s^{-1}] udává „citlivost“ interakce následujících vozidel. Integrací získáme rovnici vyjadřující vztah mezi rychlostí vozidel ve zpožděném čase a vzdáleností vozidel

$$\frac{dx_i(t+T)}{dt} = -\lambda * \left(x_i(t) - x_{i-1}(t)\right) + d_i \tag{1.13}$$

kde d_i je integrační konstanta s rozměrem rychlosti. Pro stacionární situaci, kdy mají všechna vozidla stejné rozestupy i rychlost, platí, že rychlost vozidel je stejná v čase t i $t+T$:

$$\frac{dx_i(t+T)}{dt} = \frac{dx_i(t)}{dt} \tag{1.14}$$

a tedy také $d_i=d_{i-1}=d=konst$. Dosazením do vztahu (1.13) získáme rovnici

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = -\lambda * \left(x_i(t) - x_{i-1}(t)\right) + d \tag{1.15}$$

Lokální hustotu dopravního proudu lze definovat v inverzní podobě jako vzdálenost vozidel

$$|x_i(t) - x_{i-1}(t)| = \frac{1}{\rho} \tag{1.16}$$

Abychom získali kladné hodnoty hustoty, je nutné odečítat pozici předního vozidla *i-1* od následujícího vozidla *i*, respektive rozdíl uvažovat v absolutní hodnotě, jak je pro lepší přehlednost uvedeno ve vztahu (1.16). Pro rychlost $v = \frac{x_i(t)}{dt}$ získáme dosazením rovnice (1.16) do rovnice (1.15) závislost rychlosti na hustotě

$$v = \frac{\lambda}{\rho} + d \tag{1.17}$$

Při předpokladu nulové rychlosti při maximální hustotě

$$0 = \frac{\lambda}{\rho_{max}} + d \tag{1.18}$$

můžeme vyjádřit d:

$$d = -\frac{\lambda}{\rho_{max}} \tag{1.19}$$

Zpětným dosazením do rovnice (1.17) dostaneme vztah rychlost – hustota

$$v = \lambda * \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{\max}}\right) \tag{1.20}$$

Tento vztah je ekvivalentní se vztahem (1.9) přičemž

$$\lambda = \frac{1}{\Delta t} \tag{1.21}$$

a tedy je daná časovým odstupem vozidel a dále platí, že

$$d_{min} = \frac{1}{\rho_{max}} \tag{1.22}$$

Z výše uvedených odvození vyplívá, že předpoklady konstantního časového odstupu a akcelerace přímo úměrné relativní vzdálenosti vozidel jsou si rovnocenné. Citlivost λ je

inverzní hodnotou reakční doby Δt a minimální vzdálenost čel vozidel d_{min} je inverzní hodnotou maximální hustoty ρ_{min}.

S ohledem na totožnost modelů i v případě CFM roste rychlost při hustotě jdoucí k nule do nekonečna a proto je nutné ji taktéž omezit.

Nelineární CFM

Lineární CFM lze vylepšit zahrnutím předpokladu, že řidič je citlivější na chování předcházejícího vozidla při menší relativní vzdálenosti. Tento předpoklad můžeme do modelu zavést tím, že citlivost λ vyjádříme pomocí konstanty c jako nepřímo úměrnou vzdálenosti vozidel:

$$\lambda = \frac{c}{x_i(t) - x_{i-1}(t)} \tag{1.23}$$

Dosazením do vzorce (1.12) získáme popis nelineárního CFM:

$$\frac{d^2x_i(t+T)}{dt^2} = -\frac{c}{x_i(t) - x_{i-1}(t)} * \left(\frac{dx_i(t)}{dt} - \frac{dx_{i-1}(t)}{dt}\right) \tag{1.24}$$

Tento vztah je ekvivalentní zápisu

$$a_i = \frac{c}{\Delta s} * \Delta v \tag{1.25}$$

kde a_i je zrychlení vozidla, Δs je relativní vzdálenost a Δv relativní rychlost následujících dvou vozidel.

Integrací vztahu (1.24) získáme rovnici

$$\frac{dx_i(t+T)}{dt} = c * \ln|x_i(t) - x_{i-1}(t)| + d_i \tag{1.26}$$

Při uvažování stacionárního stavu dopravního proudu lze obdobně jako u lineárního CFM vyjádřit tuto rovnici jako

$$v = -c * \ln \rho + d \tag{1.27}$$

a zvolit integrační konstantu d tak, aby pro maximální hustotu byla rychlost rovna nule:

$$v = -c * \ln \frac{\rho}{\rho_{max}} \tag{1.28}$$

Dále můžeme vyjádřit intenzitu:

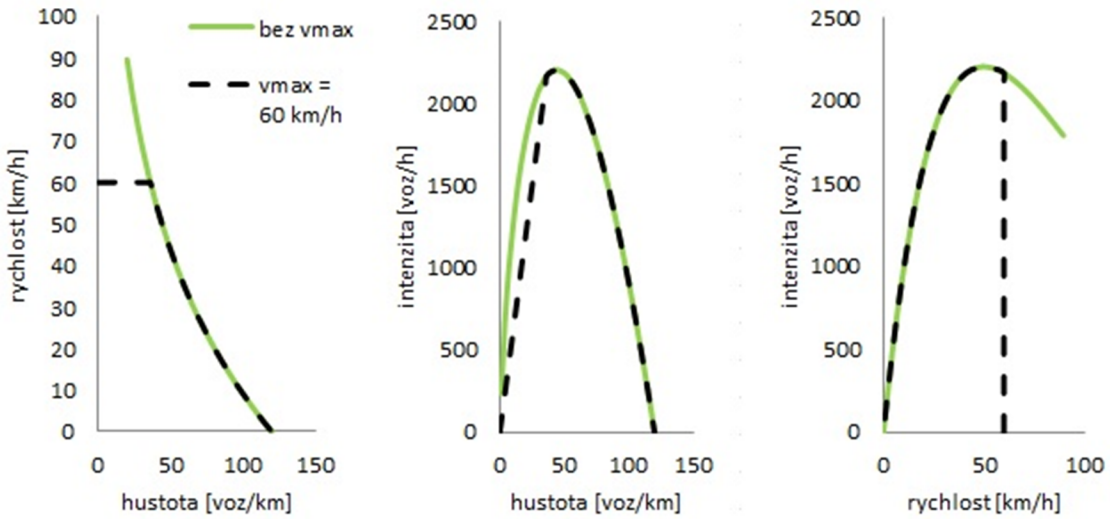
$$q = \rho * v = -\rho * c * \ln \frac{\rho}{\rho_{max}} \tag{1.29}$$

Z derivace rovnice podle hustoty a faktu, že tato derivace bude rovná nule v bodě maximální intenzity, můžeme zjistit, při jaké hustotě bude maximální intenzity dosaženo:

$$\frac{dq_{max}}{d\rho} = -c * (\ln \frac{\rho}{\rho_{max}} + 1) = 0 \tag{1.30}$$

Z uvedeného vztahu plyne, že maximální intenzity bude dosaženo při hustotě $\rho = \rho_{max} / e$. Dosazením do rovnice (1.29) zjistíme, že při maximální intenzitě má dopravní proud rychlost $v_{qmax} = c$. Konstanta c tedy odpovídá rychlosti při maximální intenzitě. Volíme ji na základě empirických dat.

Pro nízké hustoty je stejně jako u lineárního CFM nutné omezit maximální rychlost.

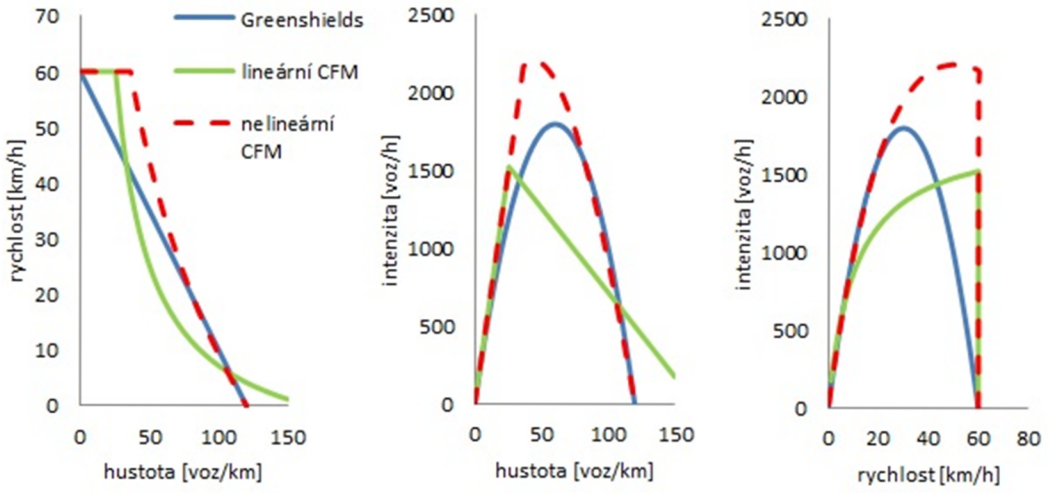


Obr. 1.6 Fundamentální diagramy nelineárního CFM pro konstantu c = 50 km/h a maximální hustotu ρ_{max} = 120 voz/km bez omezení rychlosti a při omezení rychlosti na v_{max} = 60 km/h.

Existuje několik nelineárních CFM, které lze rozdělit do tří základních skupin [2]:

- Gazis-Herman-Rothery modely (GHR), které vychází z výše popsaných předpokladů o závislosti akcelerace vozidla na relativní rychlosti a vzdálenosti od vozidla předcházejícího.
- Modely bezpečné vzdálenosti vycházející z požadavku na dodržení dostatečné vzdálenosti od předcházejícího vozidla tak, aby vozidlo bylo schopné včas zabrzdit.
- Modely psycho-fyzikální, které spojují fyzikální zákony s psychologií řidiče. Zavádějí limity pro vnímání rozdílů rychlostí a poloh vozidel, zavádí zóny chování v závislosti na relativní vzdálenosti a rychlosti vozidel a další parametry závisející na psychologii řidiče.

Všechny tyto typy se v současnosti využívají v používaných simulačních softwarech jako AIMSUN (model bezpečné vzdálenosti), Paramics (psycho-fyzikální), VISSIM (psycho-fyzikální) či MITSIM (GHR a psycho-fyzikální).



Obr. 1.7 Srovnání fundamentálních diagramů Greenshieldsova modelu, modelu konstantního časového odstupu respektive lineárního CFM a nelineárního CFM.

2 ZÁKONY A NORMY

2.1 ZÁKON O PROVOZU NA POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH

2.1.1 Postoj zákona ke spojování jízdních pruhů

Základním předpokladem plynulé dopravy v místě spojování dopravních pruhů respektive proudů je efektivní organizace spojovaných dopravních proudů a určení přednosti v jízdě. V České Republice platí zákon č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích (silniční zákon), ve kterém je uvedeno: „Přejíždět z jednoho jízdního pruhu do druhého smí řidič jen tehdy, neohrozí-li a neomezí-li řidiče jedoucího v jízdním pruhu, do kterého přejíždí; přitom musí dávat znamení o změně směru jízdy. Při souběžné jízdě umožní řidiči vozidel jedoucích v průběžném pruhu řidičům vozidel do tohoto pruhu přejíždějících z pruhu, který přestal být průběžným, vjet tak, aby se vozidla jedoucí v průběžném pruhu a vozidla do něho přejíždějící mohla řadit střídavě po jednom do jízdního proudu průběžného pruhu. Tam, kde se dva jízdní pruhy sbíhají v jeden, aniž by bylo zřejmé, který z nich je průběžný, nesmí řidič jedoucí v levém jízdním pruhu ohrozit řidiče jedoucího v pravém jízdním pruhu.“ [3] Pro správné pochopení zákona je nutné doplnit definici souběžné jízdy, již zákon udává následovně: „Je-li na pozemní komunikaci o dvou nebo více jízdních pruzích v jednom směru jízdy taková hustota provozu, že se vytvoří souvislé proudy vozidel, v nichž řidič motorového vozidla může jet jen takovou rychlostí, která závisí na rychlosti vozidel jedoucích před ním, mohou jet motorová vozidla souběžně (dále jen ‚souběžná jízda‘); přitom se nepovažuje za předjíždění, jedou-li vozidla v jednom z jízdních pruhů rychleji než vozidla v jiném jízdním pruhu.“ [4]

2.1.2 Aplikace zákona v praxi

Ze zákona vyplývá, že se pravidlo zipu vztahuje na situaci, kdy jsou vedle sebe dva, případně více, souběžných pruhů a jeden z nich končí, nezávisle na tom, zda se jedná o trvalý či dočasný stav způsobený například dopravním omezením z důvodu opravy krajnice apod. V místě, kde neprůběžný jízdní pruh končí, má docházet ke střídavému řazení vozidel do průběžného pruhu s tím, že první má jet vozidlo v průběžném pruhu, za něj se zařadí vozidlo z pruhu neprůběžného a dále se všechna další vozidla po jednom střídají.

V praxi ovšem dochází ke dvěma velkým nešvarům v aplikaci pravidla zipu. Největší chybou řidičů, se kterou se na silnicích běžně setkáváme, je to, že se snaží řadit do průběžného pruhu již před koncem svého neprůběžného. To samo o sobě nemusí vytvářet příliš významné zpomalení dopravního proudu, jelikož při nízké hustotě je to podobné běžnému přejíždění z pruhu do pruhu, jako při předjíždění, nebo přejezdu do odbočovacího pruhu a při vysoké hustotě sice zpomalí vozidla v průběžném pruhu, ale protože vozidla před ním se pohybují pomalu, mezera se buď vůbec nevytvoří, nebo se velmi rychle zacelí bez vlivu na intenzitu v místě zúžení. To však nemusí platit, pokud se zařazuje do průběžného pruhu v relativní blízkosti místa spojení, avšak zároveň ne přímo před ním, jak by měl. Problém vzniká zpravidla až sekundárně, kdy se prodlužuje kolona v průběžném pruhu a naopak zkracuje kolona v pruhu neprůběžném. V extrémních případech u menších kolon pak může dojít až k tomu, že v neprůběžném jízdním pruhu stojí jen jedno či dvě auta, čímž vniká dojem, že se snaží kolonu předjíždět a ostatní řidiči je nechtějí nechat zařadit, ačkoli právě tyto vozidla aplikují pravidlo zipu

správně. To vede k nepravidelnému řazení vozidel, tlačenicím a následnému zpomalení dopravního proudu. Zároveň, vzhledem k definici souběžné jízdy, vzniká paradoxní situace, kdy se podle zákona již nemusí jednat o souběžnou jízdu a tím pádem se ani neaplikuje pravidlo zipu.

Druhým častým nešvarem řidičů je objíždění kolon po zpevněné krajnici nebo odbočovacím pruhem. Jezdit po krajnici není běžně povoleno a problém s odbočovacím pruhem, odhlédneme-li od jeho blokace pro vozidla, která skutečně chtějí odbočit, je v tom, že se nejedná o souběžnou jízdu, která je pro aplikaci zipu zákonem vyžadována. Tyto situace sice obdobně jako výše zmíněné předčasné řazení do průběžného pruhu zpravidla nezpomalí dopravní proud přímo, ale vedou ke zvýšení nervozity ostatních řidičů, což následně vede k tomu, že jsou více sobečtí, agresivní a nedodržují pravidla zipování, což narušuje plynulost dopravního proudu a snižuje bezpečnost.

Zipování vyžaduje pro svoji optimální funkci nejen jeho znalost, ale také nesobeckost a zejména zvýšenou pozornost a pohotovost zúčastněných řidičů. Tyto dva požadavky však v praxi naráží na běžné lidské chování. Jednotlivé řidiče nezajímá, kolik vozidel projede komunikací za hodinu, ale pouze za jak dlouho ji projede on. Tento požadavek je přitom zcela logický a oprávněný. Je proto důležité, aby si řidiči uvědomovali, že důsledným dodržováním pravidla zipu se nezlepší jen kapacita a tím obecný prospěch, ale přeneseně i jejich vlastní cestovní rychlosti. Zároveň by měli brát na zřetel, že efektivitu zipování narušují nejen svojí sobeckostí, ale i přehnanou nesobeckostí a pouštění vozidel, která pravidla porušují. Posledním a možná nejdůležitějším požadavkem na řidiče je udržování maximální pozornosti v místě spojování dopravních proudů, která umožní minimalizovat odstupy vozidel při zachování rychlosti a tím zvýší kapacitu. Ve skutečnosti však bohužel řidiči otupení z jízdy v koloně a uspokojeni tím, že se z kolony konečně dostali, v kritickém místě často reagují pomalu a začínají akcelerovat až ve chvíli, kdy už má vozidlo před nimi dostatečný odstup s tím, že ho stejně hned dojedou a nemají tedy kam spěchat. Výjimkou není ani psaní SMS zpráv či sledování notebooku na sedadle spolujezdce, což nejen značně snižuje reakční dobu řidiče, ale také zvyšuje riziko nehody a kompletního zastavení dopravy.

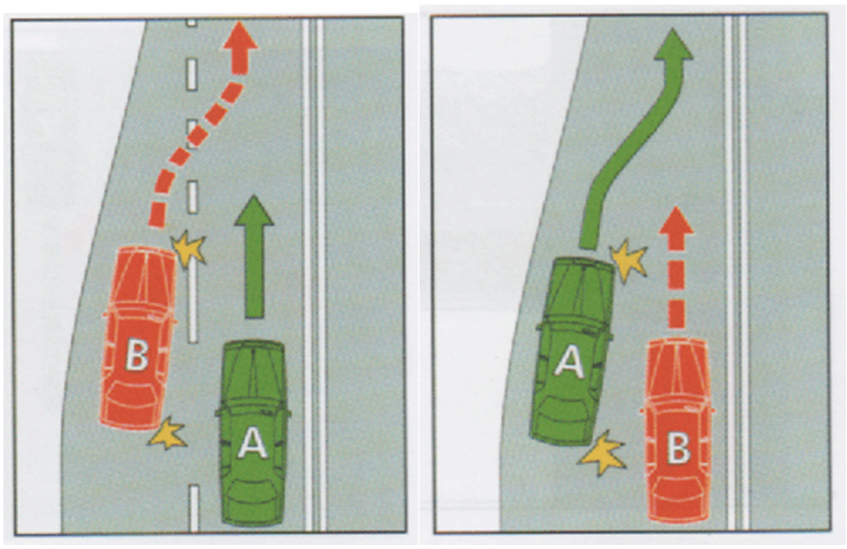
Diskutabilní je formulace pomocí souběžné jízdy, která na jednu stranu vhodně vymezuje jeho aplikaci, ale také může vést ke zmiňovaným situacím, kdy by se teoreticky zipovat nemělo, ačkoli logika situace říká opak. Druhou diskutabilní formulací je použití slova „umožní“ místo obdobné formulace s využitím spojení s „předností v jízdě“, které by přesněji a přísněji determinovalo povinnost pustit vozidlo, které je na řadě.

2.1.3 Zahraniční zákony

Naproti tomu v Německu zákon hovoří přímo o přednosti v jízdě [5]. Pro aplikaci pravidla v praxi zřejmě tento rozdíl není příliš významný, jelikož nelze předpokládat doslovnou znalost zákona řidiči, nicméně může hrát roli při případném sporu. Nikde totiž není specifikováno, co znamená „umožnit vjet do pruhu“ a ačkoli se může zdát, že jde o slovíčkaření, při sporu může hrát roli.

Ne všude ve světě však platí zcela stejné pravidla pro spojování jízdních pruhů jako u nás nebo v Německu, ačkoli tato varianta je nejrozšířenější. V Austrálii [6] rozlišují dvě situace. Pokud je při spojování pruhů nutné přejet přerušovanou či tečkovanou čáru vodorovného značení, potom má přednost vozidlo v průběžném pruhu. Toto pravidlo je od našeho zipování zcela odlišné, protože u nás pravidlo zipu platí nezávisle na vodo-

rovném značení. Rozdíl je však v australském zákoně i v případě bližším našemu zipu. Pokud je v místě spojování pruhů čára vodorovného značení přerušena, přednost má to vozidlo, jež má jakoukoli svoji část před vozidlem v sousedním jízdním pruhu.



Obr. 2.1 Varianty spojování jízdních pruhů v Austrálii. [6]

2.2 ČSN 73 6101 PROJEKTOVÁNÍ SILNIC A DÁLNIC

V současnosti je v ČR platná norma ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic [7]. Norma se zabývá návrhem komunikací, a proto z pochopitelných důvodů neobsahuje žádný návod k chování řidičů v místě spojování jízdních pruhů. Její součástí je nicméně příloha A Výpočet kapacit a úrovňových intenzit komunikací. Tato příloha zavádí pojem úroveň kvality dopravy (ÚKD). Rozlišuje šest stupňů ÚKD označených písmeny A–F, kde A je nejlepší, F nejhorší. Pro dvoupruhové obousměrné komunikace jednotlivým stupňům přiřazuje maximální hustotu dopravního proudu uvažovanou jako součet hustot v obou směrech.

Tab. 2.1 Tabulka ÚKD dle ČSN 73 6101 udávající limitní hustoty vztažené k oběma směrům obousměrné dvoupruhové komunikace. V závorce jsou hustoty přepočtené na jeden jízdní pruh.

UKD		hustota dopravy [voz/km]
označení	charakteristika kvality dopravy	
A	velmi dobrá	≤5 (2,5)
B	dobrá	≤12 (6)
C	uspokojivá	≤20 (10)
D	dostatečná	≤30 (15)
E	nestabilní	≤40 (20)
F	nevyhovující	>40 (20)

Norma taktéž udává kapacity jednotlivých stupňů ÚKD v závislosti na typu komunikace a jejím šířkovém uspořádání, poměru pomalých vozidel, křivolakosti a třídě stoupání. Kapacitou v místech spojování jízdních pruhů se norma nezabývá. Taktéž neudává předpokládané kapacity pro stupeň ÚKD F (ani pro stupně A a B, ale ty nejsou

z pohledu této práce významné), ovšem stupeň E je popsán: „Je dosaženo kapacity jízdního pásu,“ z čehož lze usuzovat, že při stupni F se očekává kapacita nižší.

Je nutno podotknout, že norma je určena pro návrh silnic a dálnic, norma ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací se na ni však při výpočtu kapacity na městských komunikacích funkční skupiny A v části 17 Výkonnost místních komunikací pro motorová vozidla odkazuje. [8]

Vzhledem k tomu, že norma se nezabývá kapacitou v místě zipování, jako nejbližší udávanou hodnotu můžeme uvažovat kapacitu jednoho jízdního pruhu obousměrné dvoupruhové komunikace, případně jako kapacitu jednoho pruhu dvoupruhového jízdního pásu obousměrné čtyřpruhové komunikace. Norma udává kapacitu v součtu obou směrů, respektive obou pruhů jízdního pásu, proto je nutné tyto kapacity vydělit dvěma. Tyto hodnoty jsou pro ideální podmínky (nízká křivolakost a stoupání) a podíl pomalých vozidel 5% při stupni ÚKD E 1250 voz/h respektive 1350 voz/h (při návrhové rychlosti v_n = 70 km/h).

3 MĚŘENÍ DOPRAVNÍHO PROUDU

3.1 LOKALITA MĚŘENÍ

Pro sběr dat byla zvolena část ulice Žabovřeská ve směru od Královopolských tunelů k MÚK Hlinky, která je součástí velkého městského okruhu Brno (VMO). V současnosti VMO funguje ve velmi provizorní podobě, dokončeno je pouze několik úseků (32% celkové plánované délky) a plánovaný termín dokončení je v roce 2035 [9]. Ulice Žabovřeská byla zvolena, protože se na ní nachází zúžení jízdního pásu, dochází ke spojení dvou jízdních pruhů do jednoho a navíc se na komunikaci v místě zúžení napojuje ulice Kníničská. Úsek se nachází bezprostředně za dokončenou částí VMO, která sahá od Husovického tunelu až k inkriminovanému zúžení na ulici Žabovřeská. Komunikace má v tomto úseku dva až tři jízdní pruhy v každém směru, dovolená rychlost se pohybuje mezi 60 a 80 km/h. Konkrétně v úseku před zúžením je ve vzdálenosti cca 300 m rychlost omezena z 80 km/h na 60 km/h, bezprostředně za ním je však kvůli dvěma přechodům dále omezena na 50 km/h. Za přechody je opět dovolená rychlost 60 km/h. Toto uspořádání dovoluje po komunikaci převádět vysoké intenzity, které se však nedokáží dostat přes zúžený profil a pravidelně se zde v dopravních špičkách tvoří dlouhé kolony, které dosahují často až ke Královopolským tunelům. Připojení ulice Kníničská do oblasti zúžení navíc slibovala možnost udělat si i určitou představu o situaci, kdy se spojují tři jízdní pruhy do jednoho.

Obr. 3.1 Letecký pohled na hlavní část zkoumané lokality a její popis.

Na obr. 3.1 je uveden popis oblasti zúžení s použitím terminologie užívané ve zbytku práce. Za místo spojení jízdních pruhů potažmo dopravních proudů byl uvažován znázorněný profil. Dopravní proudy se nespojují v jednom bodě, ale na určitém úseku, proto pro definici místa spojení byla použita podmínka, že proudy jsou spojeny tam, kde se vedle sebe bezpečně nevejdou dvě osobní vozidla. Konkrétní profil uvažovaný za místo spojení byl z důvodu jednoznačné identifikace zvolen v místě pracovní spáry obrusné vrstvy vozovky.

Obr. 3.2 Detail uvažovaného místa spojení dopravních proudů.

3.2 MĚŘENÍ HUSTOTY

Vzhledem k tomu, že měřit hustotu přímo bez pomoci techniky je nemožné, bylo měření provedeno pouze jednou v době kolony za pomoci malé dálkově řízené helikoptéry, tzv. kvadrokoptéry, s připnutou kamerou. Kvadrokoptéra byla navedena do prostoru nad místem spojování pruhů, odkud připevněná kamera nasnímala video zachycující kolonu a zipování a v pravidelných intervalech pořizovala také fotografie. Z těch byl následně spočítán počet vozidel ve zvoleném změřeném úseku v jednom jízdním pruhu a ten byl následně přepočítán na délku úseku 1 km.

Druhým zdrojem fotografií pro výpočet hustoty byly dostupné letecké záběry z mapového serveru www.mapy.cz [12]. Zde byly ovšem snímky zachycující kongesci pouze z období výstavby předcházejícího úseku, kdy byla doprava v celém úseku stavby svedena do jednoho pruhu a spojoval se pouze tento jeden pruh s připojovacím pruhem z ulice Kníničské.

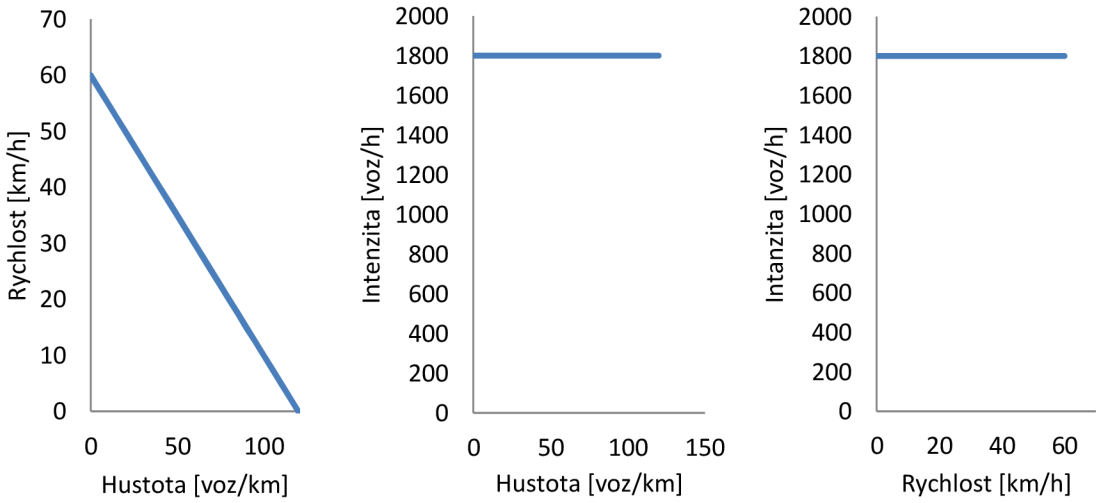
3.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTI

Jednou ze základních veličin dopravního proudu je jeho rychlost. Její měření bylo prováděno třemi různými metodami. Tyto metody se od sebe výrazně liší jak použitým vybavením, tak svými výstupy, jelikož každá se na rychlost dívá trochu z jiného úhlu. Měření radarem bylo zaměřeno na oblast za místem zúžení, plovoucí vozidlo mělo zaznamenat průběh rychlosti před i za zúžením, ruční měření pak sloužilo pro zjištění

rychlosti dopravního proudu v koloně. Z důvodu dostupnosti měřící techniky byla měření radary a měření plovoucím vozidlem provedena pouze jednou, naopak ruční měření, které vyžaduje pouze měření času s přesností na vteřiny, bylo opakováno několikrát během měření intenzit.

3.3.1 Měření soustavou radarů

Jedna z použitých metod měření rychlosti bylo měření za pomoci soustavy radarů SIERZEGA SR4. Cílem tohoto měření bylo ověřit chování dopravního proudu po průjezdu místem spojení jízdních pruhů v době, kdy je vytvořená kolona. Výchozím předpokladem bylo postupné snižování hustoty a tomu odpovídající růst rychlosti až na hranici rychlosti dovolené, tedy dosažení stejné intenzity při různých hustotách respektive rychlostech dle zákona zachování.



Obr. 3.3 Předpokládané fundamentální diagramy za místem spojení dopravních proudů.

Za místem zúžení se v jeho relativní blízkosti nacházejí dva přechody pro chodce, které mají zejména v době vysokých intenzit vliv na dopravní proud. Kromě grafu závislosti rychlosti na vzdálenosti od místa spojení jízdních pruhů byl tedy dalším potenciálním výstupem vliv těchto přechodů na rychlost dopravního proudu.

Obr. 3.4 Radar SIERZEGA SR4. [10]

Cílem tohoto měření bylo zjistit, jak se mění hustota a rychlost za místem spojení jízdního pruhů v době, kdy je hrdlo ucpané, je vytvořená kolona a vozidla se zipují do průběžného pruhu, proto byl pro měření zvolen čas odpolední špičky, kdy v místě pravidelně vzniká kolona. Z důvodu potřeby hlídání jednotlivých radarů a kontrolního měření byla prostřednictvím vedoucího práce zajištěna spolupráce studentů předmětu Dopravní inženýrství, kteří si mohli v rámci výuky prakticky vyzkoušet dopravní sčítání a práci s radary. Ke každému radaru byla přiřazena dvojce či trojice studentů, která radar hlídala a zároveň prováděla kontrolní měření intenzity. Jedna dvojice byla navíc vyslána zaznamenávat změny délky kolony (viz kapitola 3.5).

Obr. 3.5 Poloha měřených profilů při měření rychlosti radary.

K dispozici bylo pět radarů, které byly rozestavěny v určených místech na úseku necelých 600 m za dopravním hrdlem. Radary snímají rychlost několik metrů proti směru jízdy vozidel, proto byla jejich fyzická poloha posunutá oproti měřeným profilům. Těmi bylo místo spojení dopravních proudů (viz kapitola 3.1), profil za prvním přechodem pro chodce, střed vzdálenosti mezi oběma přechody, profil za druhým přechodem a poslední měřený profil byl o 220 m dále ve směru jízdy, kde byl již očekáván více méně plynulý provoz rychlostí blízkou maximální dovolené.

Výrobce radarů udává [11] přesnost měření rychlosti ±3 % při rozsahu 8-254 km/h. Z důvodu spodní hranice 8 km/h lze očekávat, že radary nezachytí všechna projíždějící vozidla, zejména potom radar v místě zúžení. Radary kromě rychlosti projíždějících vozidel zaznamenávají také další veličiny, jako délka a časový odstup vozidel (přesnost měření délky vozidla udává výrobce ±20 %, zároveň však udává, že je nutná důkladná kalibrace a i přes ni radar udává větší délku u krátkých, respektive menší délku u dlouhých vozidel, než je reálná; pro časový odstup má být odchylka ±0,2 s, opět při

důkladné kalibraci) a zejména pak čas průjezdu, díky čemuž je možné určit i intenzitu. Detailněji se měření intenzit věnuje kapitola 3.4. Díky tomu, že intenzitu naměřenou radary je možné srovnat s intenzitou naměřenou kontrolním ručním měřením, poskytuje zároveň nepřímo kontrolu validity dat použitých pro zkoumání rychlosti.

3.3.2 Měření plovoucím vozidlem

Dalším použitým způsobem zjišťování rychlosti dopravního proudu bylo měření pomocí tzv. plovoucího vozidla. Plovoucí vozidlo je vžité označení pro vozidlo pohybující se přímo v dopravním proudu zaznamenávající určitá data. V tomto případě byla ve vozidle spuštěna GPS navigace, která zaznamenávala v pravidelných intervalech polohu vozidla a z ní plynoucí aktuální rychlost. Cílem tohoto měření bylo zaznamenat průjezd vozidla kolonou, zejména pak průběh jeho rychlosti ve volném proudu před kolonou, v koloně a v oblasti jejího rozpouštění za místem spojení jízdních pruhů. Tím, že v koloně je vozidlo zcela závislé na pohybu okolních vozidel, lze jeho rychlost uvažovat jako rychlost dopravního proudu. Toto platí i pro oblast za místem zúžení, kde je hustota stále příliš vysoká na to, aby vozidlo mohlo volit svoji rychlost. Obecně by sice vozidlo mohlo jet pomaleji než předcházející vozidlo, ale řidič se z důvodu měření snažil udržovat na vzdálenost pro bezpečné zastavení od vozidla před ním. Rychlost vozidla tedy odpovídá rychlosti dopravního proudu. Pokud by nedošlo k vnějšímu ovlivnění dopravního proudu například přecházejícími chodci, průběh rychlosti za místem zúžení by měl korespondovat s údaji z měření radary.

3.3.3 Ruční měření

Ruční měření rychlosti je v zásadě velmi primitivní metodou, v podstatě se ani nejedná přímo o měření rychlosti, která je určena až na základě jednoduchého výpočtu. Při tomto měření byly určeny dva pevné body (například sloupy veřejného osvětlení), byla změřena jejich vzdálenost a byl měřen čas průjezdu konkrétního zvoleného vozidla mezi těmito body. Jeho rychlost byla následně vypočítána dosazením vzdálenosti a doby průjezdu vozidla mezi body do vzorce (1.1).

Tento postup měření rychlosti byl prováděn ve dvou různých lokalitách vždy v době kolony. První byla v místě připojovacího pruhu z ulice Kníničské, těsně před místem, kde se oba pruhy začínají spojovat, navíc se do pravého pruhu řadí vozidla z připojovacího pruhu. V tomto místě byla rychlost měřena několikrát, při každém měření byla měřena rychlost v obou pruzích vždy na několika vozidlech z důvodu značné proměnlivosti okamžité rychlosti z důvodu vln „stop and go“ a proměnlivé hustoty. Druhým měřeným místem byl most přes ulici Horovu, zhruba 700 m před místem spojování jízdních pruhů. Zde měření probíhalo pouze jednou ve všech třech jízdních pruzích (včetně pruhu, který se odpojuje a stává se ulicí Kníničskou), vždy na několika vozidlech.

Obr. 3.6 Poloha měřených úseků při ručním měření rychlosti.

3.4 MĚŘENÍ INTENZITY

Měření intenzity bylo prováděno primárně ručně počítáním projíždějících vozidel ve zvoleném časovém intervalu bez rozlišování typu vozidel. Rozměry a akcelerační schopnosti vozidla sice ovlivňují vlastnosti dopravního proudu, skladbu vozidel však nejsme schopni příliš ovlivnit, proto dostalo přednost pozorování dopravního proudu, které by při časově náročném rozlišování typu vozidel nebylo možné. Ruční měření bylo doplněno radarovým měřením, které však taktéž bylo doprovázeno souběžným kontrolním ručním sčítáním dopravy.

3.4.1 Ruční měření

Měřený profil nebyl vždy ve stejném místě, posouval se v cca 100m úseku před místem spojení v závislosti na tom, zda byl sledován úsek před, nebo za místem spojení, vzhledem k tomu, že v místě spojování pruhů se nachází směrový oblouk poměrně malého poloměru. Vždy však byl měřený profil v takovém místě, aby všechna vozidla, která jím projela, musela projet i místem spojení pruhů a zároveň aby místem spojení pruhů nemohlo projet žádné vozidlo, které neprojelo měřeným profilem. Vzhledem k tomu, že v době kolony je intenzita v celém úseku kolony přibližně totožná (nemohou-li vozidla kolonu opustit, což bylo v tomto případě splněno), lze všechny naměřené intenzity ztotožnit s intenzitami, které byly přímo v místě spojení pruhů. Výjimkou byla dvě měření zaměřená na vznik kolony, při kterých měření probíhalo přímo v profilu uvažovaném jako místo spojení pruhů, jelikož pokud není vytvořená kolona, intenzita v okolních profilech nemusí odpovídat intenzitě přímo v místě spojení.

Časový interval byl pro většinu měření 10 minut. Pro potřeby zkoumání vzniku kolony a krátkodobých intenzit byl zkrácen na pět minut, což se ukázalo nedostatečné, a proto byl následně zkrácen na jednu minutu. V průběhu měření byla v rámci možností snaha o zachycení relevantních okolností ovlivňujících dopravní proud, subjektivních dojmů z chování dopravního proudu, vývoje délky kolony a zdůvodnění některých pozorovaných jevů. Tyto poznámky přispěly k lepšímu pochopení chování jednotlivých vozidel a dopravního proudu jako celku v místě spojování jízdních pruhů.

3.4.2 Měření soustavou radarů

Doplňkovým produktem radarového měření rychlosti popsaného v kapitole 3.3.1 byl kontinuální záznam intenzit po celou dobu měření ze všech pěti radarů. Pro kontrolu relevantnosti naměřených dat bylo prováděno ruční kontrolní sčítání.

3.5 DÉLKA KOLONY

Délka kolony byla zaznamenávána zejména v přestávkách během ručních měření intenzit a rychlostí. Vzhledem k obtížné definici a značné proměnlivosti konce kolony nebyla přesnost záznamů nijak vysoká, zpravidla byly k záznamu délky použity sloupy veřejného osvětlení apod. Následně byla na internetových mapách změřena vzdálenost zaznamenaných bodů od místa uvažovaného spojení dopravních proudů (vzhledem k přesnosti a povaze měření délky kolony je tato metoda dostatečně přesná) a to i v případě měření délky odbočovacího pruhu, aby byla snáze porovnatelná relativní poloha konců kolony v jednotlivých jízdních pruzích. Tato vzdálenost je považována za délku kolny.

Jediné soustavné měření délky kolony probíhalo současně s radarovým měřením. V kombinaci s naměřenými intenzitami v místě spojení pruhů lze tato data použít k odhadu intenzity přijíždějících vozidel. Přitom je nicméně nutné přihlédnout k faktu, že mezi místem spojení pruhů a koncem kolony se nachází v závislosti na aktuální délce kolony jedno až tři připojení z okolních komunikací a také jedno odpojení. Na druhou stranu lze počítat s tím, že vliv připojení není příliš významný, neboť vozidla z nich se zapojí do kolony a tím ji nepřímo prodlouží a vozidla, která stojí v koloně na připojovacích větvích, a tedy na její délku nemají vliv, naopak částečně vykompenzují vozidla, která se z kolony odpojila.

4 ZPRACOVÁNÍ A ANALÝZA MĚŘENÍ

Výsledkem výše popsaných měření byl soubor dat, která bylo nutno zpracovat a zanalyzovat. Kromě zisku samotných dat měření sloužilo k pozorování dopravního proudu. To mělo sloužit k lepšímu pochopení vzniku kolony, zhodnocení dodržování pravidla zipu řidiči a obecně lepšímu porozumění dějů v oblasti spojování jízdních pruhů. Tyto zkušenosti se průběžně uplatnily zejména při analýze měření, ale i v mnoha dalších částech této práce.

4.1 HUSTOTA

Výsledkem „měření“ hustoty kvadrokoptérou v odpolední dopravní špičce 10. 3. 2014 zhruba v 16 hodin byl asi šestiminutový videozáznam a soubor několika fotografií, které byly kamerou pořizovány každých pět vteřin v průběhu natáčení. Vzhledem k tomu, že 5 s není dostatečně dlouhá doba, aby došlo k významnému pohybu vozidel v koloně a tím ke změně hustoty, bylo ze souboru vybráno šest fotografií po zhruba jedné minutě, ze kterých byla způsobem popsaným v kapitole 3.2 spočítána hustota.

Obr. 4.1 Foto 203 z kamery umístěné na kvadrokoptéře použité pro výpočet hustoty proudu.

Tab. 4.1 Tabulka hustot spočítaných z fotografií pořízených kvadrokoptérou.

Zdroj	Vozidel [-]		Délka úseku [m]		Hustota [voz/km]	
	levý pruh	pravý pruh	levý pruh	pravý pruh	levý pruh	pravý pruh
foto 203	49	39	450	370	108,9	105,4
foto 210	49	40	450	370	108,9	108,1
foto 220	47	43	450	370	104,4	116,2
foto 230	48	41	450	370	106,7	110,8
foto 240	47	43	450	370	104,4	116,2
foto 247	50	42	450	370	111,1	113,5
Maximální hustota					111,1	116,2
Minimální hustota					104,4	105,4
Průměrná hustota					107,4	111,7

Z naměřených hodnot lze říct, že hustota v koloně se s vysokou pravděpodobností bude pohybovat mezi 100 a 120 vozidly na kilometr v jednom jízdním pruhu. To je 5 – 6 násobek hustoty udávané v ČSN 73 6101 jako hranice mezi ÚKD E a ÚKD F (viz kapitola 2.2).

Druhým zdrojem pro výpočet hustoty byly letecké snímky na www.mapy.cz. Tyto snímky byly pořízeny ještě v době před dokončením současného stavu. Samotné místo spojování pruhů má současnou podobu, avšak cca 300 m proti směru jízdy začíná, respektive končí, svedení dopravy do jednoho jízdního pruhu. To redukuje spojování jízdních proudů na spojování průběžného pruhu s připojovacím, kde je výrazně nižší intenzita. Tím pádem místo není takovým úzkým hrdlem a provoz se zde do jisté míry chová jako za hrdlem, kterým by mohlo být naopak místo, kde se doprava svádí do jednoho pruhu kvůli probíhající stavbě. Tyto faktory jsou zřejmě důvodem, proč hustota spočítaná z těchto záběrů nedosahuje takových hodnot, jako hustota naměřená v předchozím měření v koloně.

Obr. 4.2 „Ptačí pohled“ ve směru na západ. [12]

Tab. 4.2 Tabulka hustot odečtených z leteckých fotografií na mapy.cz. Písmena S, Z a V označují směr pohledu.

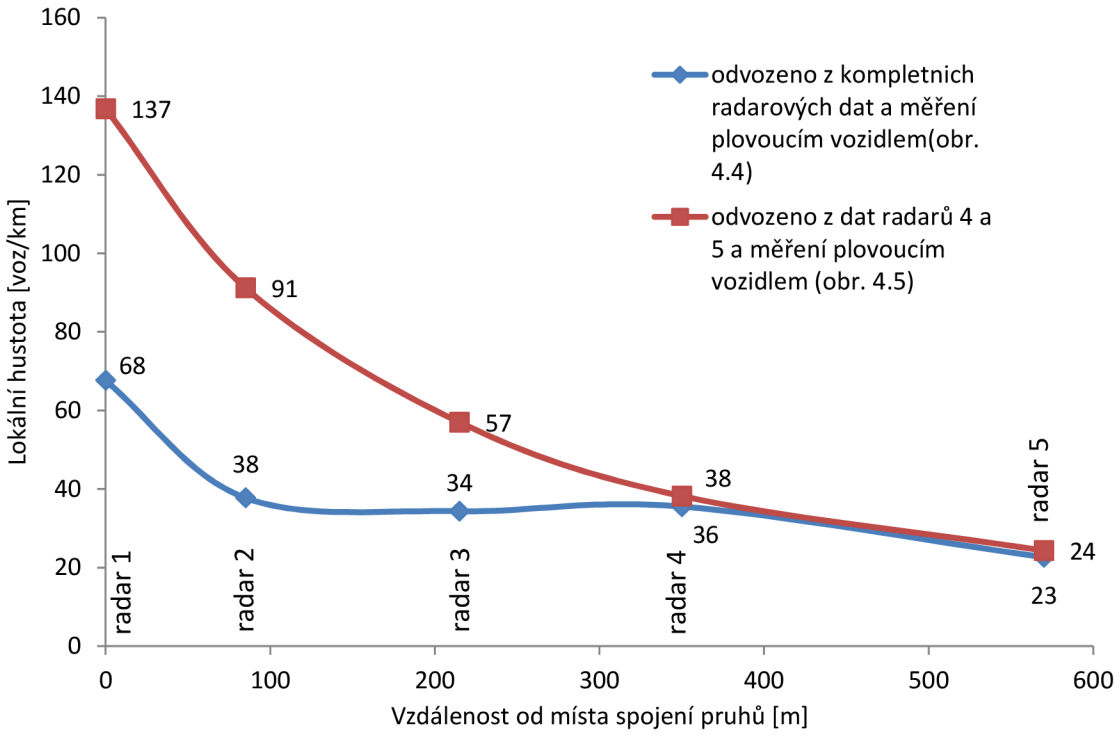
Zdroj	Vozidel [-]	Délka úseku [m]	Hustota [voz/km]
mapy.cz S1	34	450	76
mapy.cz S2	39	450	87
mapy.cz Z	38	450	84
mapy.cz V	34	370	92
Maximální hustota			92
Minimální hustota			76
Střední hustota			85

Naměřené hustoty mají kromě celkově nižších hodnot také vyšší rozptyl. To je zřejmě dáno tím, že nižší hustota skýtá větší prostor pro její zvýšení.

Vzhledem k často poměrně velkým rozestupům mezi vozidly souvisejícími s nižší hustotou se lze domnívat, že pohyb dopravního proudu nemusel nutně mít charakter stop and go, ale je možné, že se vozidla pohybovala do jisté míry plynule.

Během měření intenzit 7. 3. 2014 byla také odhadována hustota vozidel v koloně na mostě přes ulici Horova z počtu vozidel mezi dvěma pevnými body. Hustota se pohybovala mezi 7 až 10 osobními vozidly na vzdálenosti zhruba 70 m, čemuž by odpovídalo 100 – 140 vozidel na kilometr. To odpovídá hustotě spočítané z fotografií z kvadrokoptéry.

Pro doplnění lze uvést graf průměrné lokální hustoty v závislosti na vzdálenosti od hrdla ve směru jízdy získaný z měření radary výpočtem z naměřených rychlostí a intenzit podle vzorce (1.2). Je nutné brát v úvahu, že tento graf je zatížen chybou měření popsanou v kapitole 4.3.1. Radary 1 – 3 zřejmě nezaznamenávaly velmi pomalá vozidla, čímž se značně zvýšila jimi naměřená průměrná rychlost. Protože hustota je odvozena z rychlosti, i ona je touto chybou zatížena.



Obr. 4.3 Závislost lokální hustoty na vzdálenosti od hrdla odvozená z naměřené rychlosti a intenzity. Modře nereálný průběh odvozený z dat všech radarů, která jsou zatížena chybou. Červeně realističtější průběh odvozený z rychlostí zobrazených v grafu na obr 4.5, pro jehož vykreslení byla použita pouze data z radarů 4 a 5, které zachytily většinu vozidel a rychlost v koloně naměřená plovoucím vozidlem. V grafu jsou popsány polohy jednotlivých radarů, radar 1 je v uvažovaném místě spojení pruhů ve staničení 0,000 km (viz kapitola 3.1). Hustota v hrdle vychází nerealisticky vysoká, protože pro rychlosti blízké nule roste při použití vzorce (1.2) hustota k nekonečnu.

4.2 RYCHLOST

Rychlost byla měřena třemi různými způsoby. Každý z těchto způsobů měření se zaměřoval na jiný jev, přičemž se však zároveň doplňovaly a jejich výsledky se prolínají:

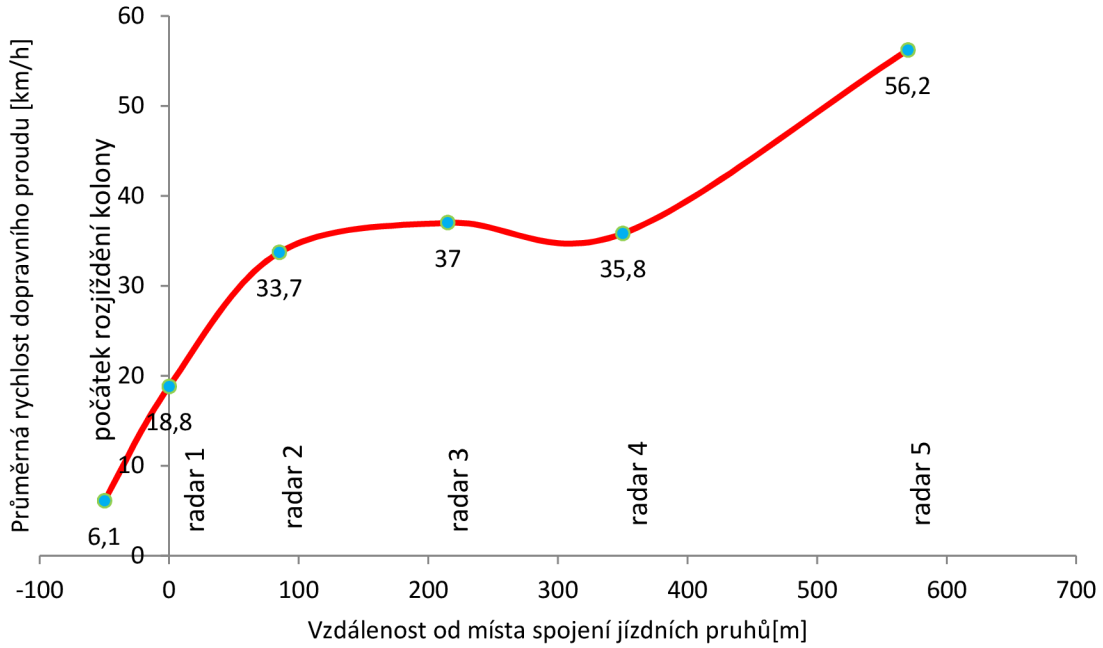
- Měření soustavou radarů (popsané v kapitole 3.3.1) bylo zaměřeno na změny hustoty a rychlosti při zachování intenzity za místem spojení.

- Měření plovoucím vozidlem (popis viz kapitola 3.3.2) zmapovalo průběh rychlosti v celém okolí spojování – před kolonou, v koloně i za místem spojení.
- Ruční měření (popis viz kapitola 3.3.3) bylo zaměřeno na porovnání rychlosti dopravního proudu v jednotlivých jízdních pruzích v době kolony.

4.2.1 Měření soustavou radarů

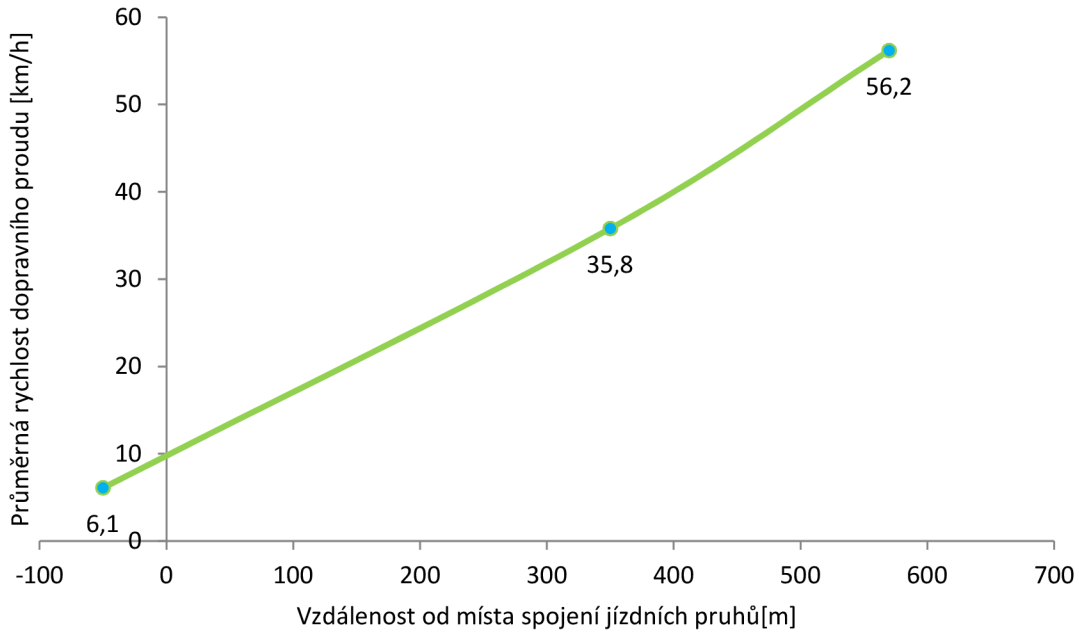
Měření probíhalo soustavou pěti radarů, jejichž rozestavení je detailněji popsáno v kapitole 3.3.1. Měření probíhalo kontinuálně v pondělí 10. 3. 2014 po dobu 2 – 2,5 hodin v dopravní špičce. Výstupem byly tabulky se záznamem z jednotlivých radarů obsahující informace o čase průjezdu vozidla, jeho délce, rychlosti a kategorii a časovém odstupu od předchozího vozidla.

Zprůměrováním rychlostí všech vozidel za celou dobu záznamu, který celý probíhal v době, kdy byla před hrdlem vytvořena kolona, byla získána průměrná rychlost dopravního proudu v profilu měřeném daným radarem. Tyto průměrné rychlosti byly vyneseny do grafu průběhu rychlosti za místem spojení. Pro větší názornost byl graf doplněn o rychlost v koloně získanou měřením plovoucím vozidlem, které proběhlo současně. Přitom bylo na základě pozorování uvažováno, že vozidla se začnou rozjíždět zhruba 50 m před uvažovaným místem spojení pruhů.



Obr. 4.4 Graf průběhu rychlosti dopravního proudu za místem spojení vynesený z radarových dat doplněných o rychlost dopravního proudu v koloně převzatou z měření plovoucím vozidlem. Poloha radarů platí i pro obr. 4.5 a 4.6.

V grafu je vidět neočekávaný průběh rychlosti, který neodpovídá předpokladům o monotónním růstu průměrné rychlosti. Nečekaný pokles rychlosti je s velkou pravděpodobností způsoben tím, že radary 1 až 3 nezaznamenaly velkou část pomalých vozidel, protože se pohybovaly rychlostí menší, než 8 km/h, což je minimální rychlost vozidla, kterou je radar dle výrobce schopen zaznamenat [11]. Tuto domněnku podporuje srovnání radarových intenzit s kontrolním měřením popsané v kapitole 4.3.1. Ve skutečnosti se tedy nejedná ani tak o pokles rychlosti u radaru 4, ale spíše o nerealisticky zvýšené rychlosti v místech radarů 1 až 3.

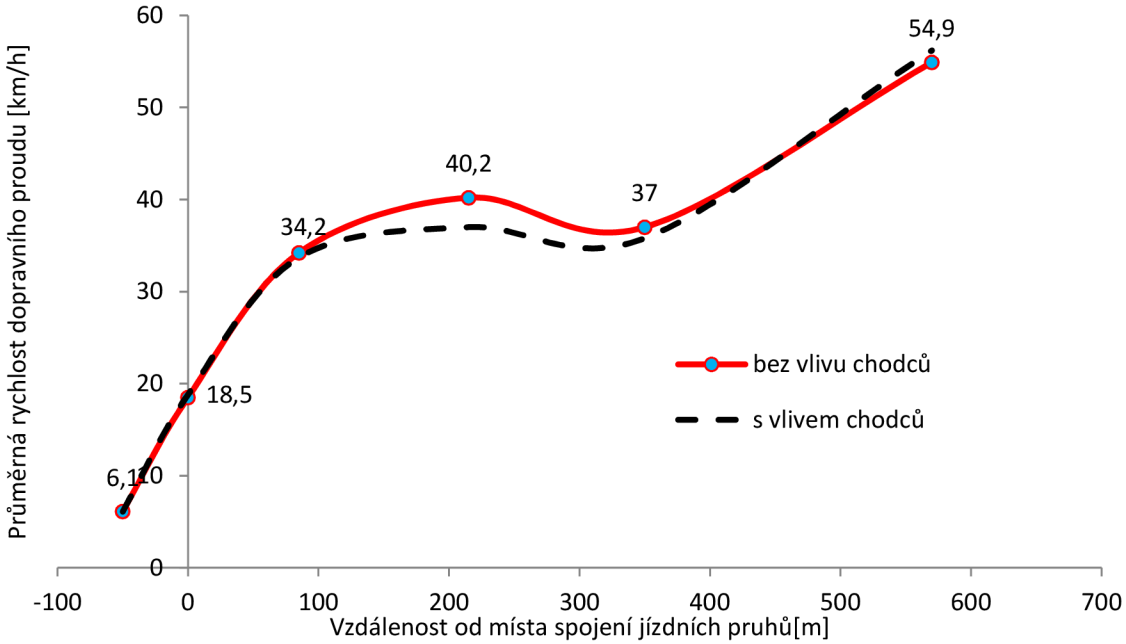


Obr. 4.5 Realističtější graf průběhu rychlosti dopravního proudu za místem spojení vynesený pouze z průměrných rychlostí zaznamenaných radary 4 a 5 a z průměrné rychlosti kolony. Popis zadaných bodů grafu je totožný s obr. 4.4, pouze jsou vynechány radary 1 – 3.

Realističtější průběh rychlosti dostaneme, pokud graf vyneseme pouze z hodnot naměřených radary 4 a 5 a z rychlosti naměřené v koloně plovoucím vozidlem. Výsledkem je téměř lineární závislost rychlosti a vzdálenosti od místa spojení dopravních proudů. Vzhledem k ne zcela přesnému měření nemusí konkrétní hodnoty úplně přesně odpovídat skutečnosti, nicméně je zjevné, že rychlost roste monotónně až k rychlostnímu limitu. Tři vynesené body, u kterých je navíc nutné počítat s určitou odchylkou, nejsou dostatečný počet, aby bylo možné prohlásit závislost s jistotou za lineární, či lineární blízkou. Navíc chybí ještě jedno měření dále po směru jízdy, které by ukázalo tvar křivky závislosti v místech, kde proud dosahuje maximální dovolené rychlosti. Na základě pozorování a záznamu z plovoucího vozidla se zdá, že tvar křivky může být spíše mírně zakřivený, nicméně jedno vozidlo není dostatečný statistický vzorek.

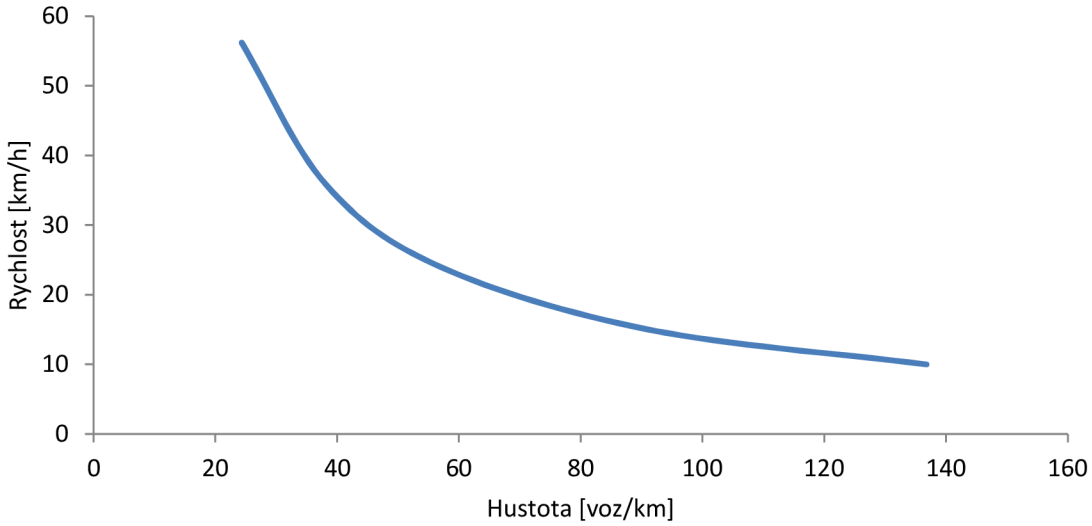
Data z radarů 1 – 3 nelze použít pro popis průběhu rychlosti, ale pokud použijeme pouze časový úsek, kdy nikdo nepoužíval přechod pro chodce, mohou nám dát alespoň základní představu o vlivu přechodů na rychlost dopravního proudu. Přitom je však nutné brát v úvahu, že zpomalení nebo zrychlení proudu se nemusí vlivem (ne)zaznamenaných vozidel na radarových datech projevit snížením, respektive zvýšením průměrné rychlosti. Zobrazený graf proto nelze brát s jistotou jako 100% zobrazení skutečnosti, ale spíše jako její pravděpodobnou podobu.

Spolu s kontrolním měřením intenzity byly po většinu měření zaznamenávány také časy, kdy chodci přecházeli po druhém přechodě pro chodce. Na základě těchto záznamů byl vybrán desetiminutový časový úsek, kdy by dopravní proud neměl být přechodem nijak ovlivněn. Rychlosti zaznamenané radary v tomto úseku byly opět zprůměrovány a použity pro vykreslení grafu průběhu rychlosti za hrdlem.



Obr. 4.6 Grafy průběhu rychlosti dopravního proudu za místem spojení pruhů bez vlivu respektive s vlivem chodců na druhém přechodu (u radaru 4). Popis zadaných bodů (poloha radarů) grafu je stejný jako v obr. 4.4. Průběh průměrné rychlosti s vlivem chodců (černá, čárkovaná) je totožný s grafem na obr. 4.4.

Z grafu porovnávajícího data z celého měřeného úseku s daty z desetiminutového úseku, kdy nebyl používán přechod pro chodce v místě 4. radaru je vidět, že přechod má zřejmě nezanedbatelný vliv na rychlost dopravního proudu a tím i na jeho intenzitu. Jak bylo řečeno, vykreslený graf nemusí zcela odpovídat skutečnosti, trend se ovšem zdá být jasný a v souladu s předpoklady – přítomnost přechodu negativně ovlivňuje průměrnou rychlost a intenzitu dopravního proudu.



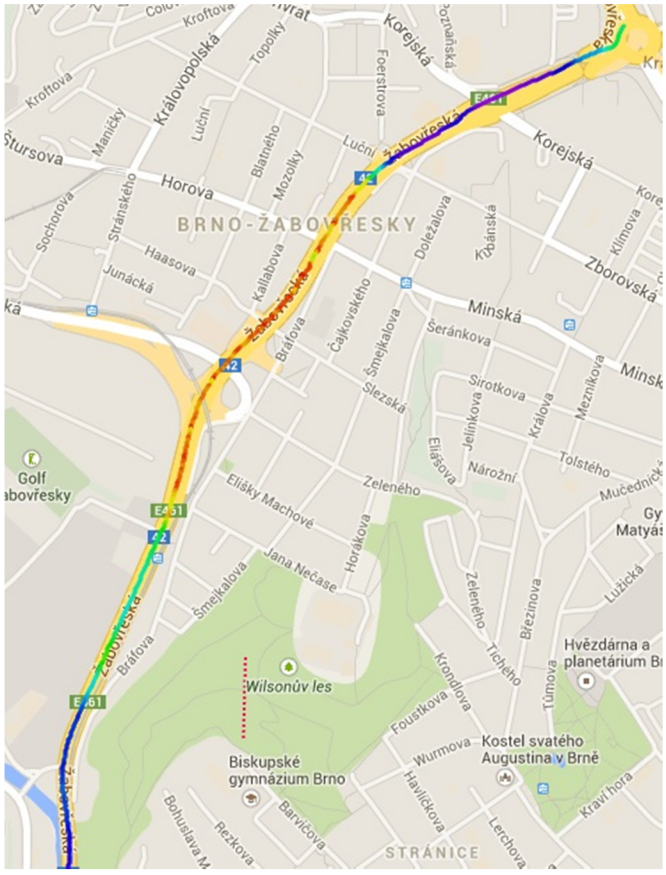
Obr. 4.7 Závislost rychlosti na hustotě dopravního proudu získaná z rychlostí a intenzit naměřených radary 4 a 5 a z rychlosti v koloně.

Z naměřené průměrné rychlosti v místech radarů 4 a 5 a průměrné rychlosti v koloně byl vykreslen graf průběhu rychlosti 4.5. Z něj byly odečteny průměrné rychlosti

v místech radarů 1 – 3. Na základě těchto rychlostí a průměrné intenzity zaznamenané radarem 4 byla dle vzorce (1.2) spočítána průměrná lokální hustota v místech jednotlivých radarů (znázorněna na obr. 4.3). Z lokálních hustot odečtených z grafu 4.3 a průměrných rychlostí odečtených z grafu 4.5 byl vykreslen graf závislosti rychlosti na hustotě. Při průměrné rychlosti menší než cca 20 km/h se dopravní proud hroutí a vozidla se začínají pohybovat způsobem stop and go. Neplatí předpoklad ustáleného proudu a použitý vzorec (1.2) dává pro nízké rychlosti nerealistické výsledky (jak je popsáno u obr. 4.3, hustota se pro nízké rychlosti asymptoticky blíží nekonečnu).

4.2.2 Měření plovoucím vozidlem

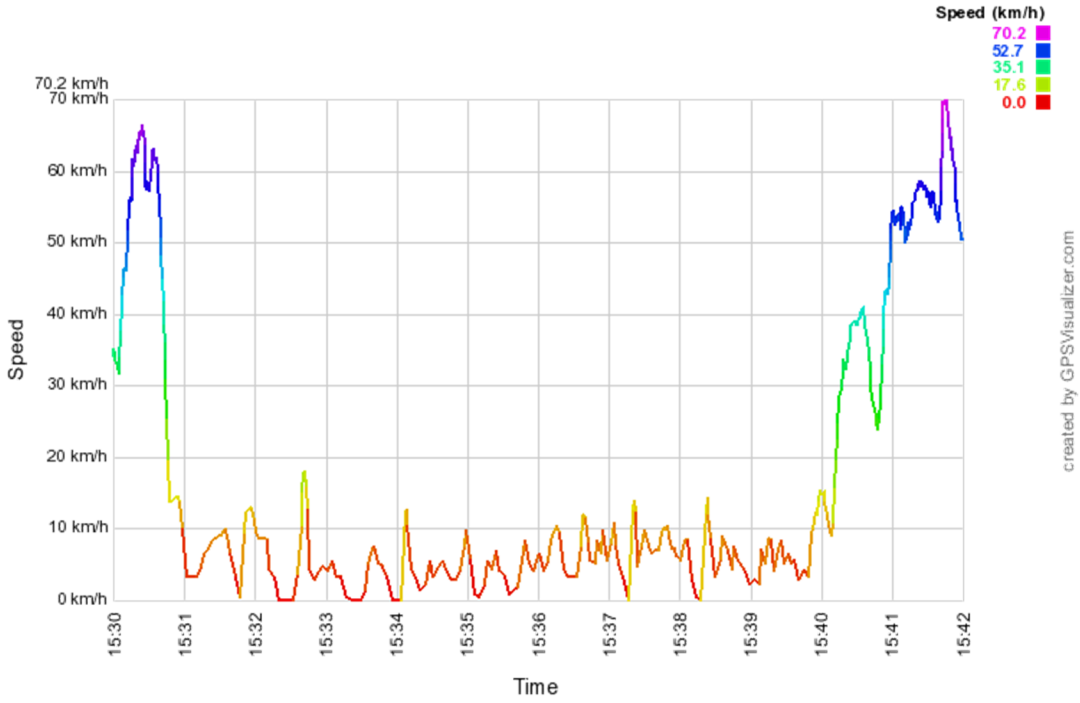
Vozidlo se zapnutým přístrojem GPS projelo v době měření radary, tedy v době kolony, úsek od Královopolských tunelů ke křižovatce Hlinky. GPS zaznamenávalo polohu a rychlost vozidla. Datový soubor z GPS byl následně zpracován v internetové aplikaci GPS Visualizer [13], která umí ze souboru GPS vykreslit trasu, profil, různé závislosti a mnohé další. Pro potřeby práce byly použity mapa průběhu rychlosti a grafy závislosti rychlosti na čase a vzdálenosti.



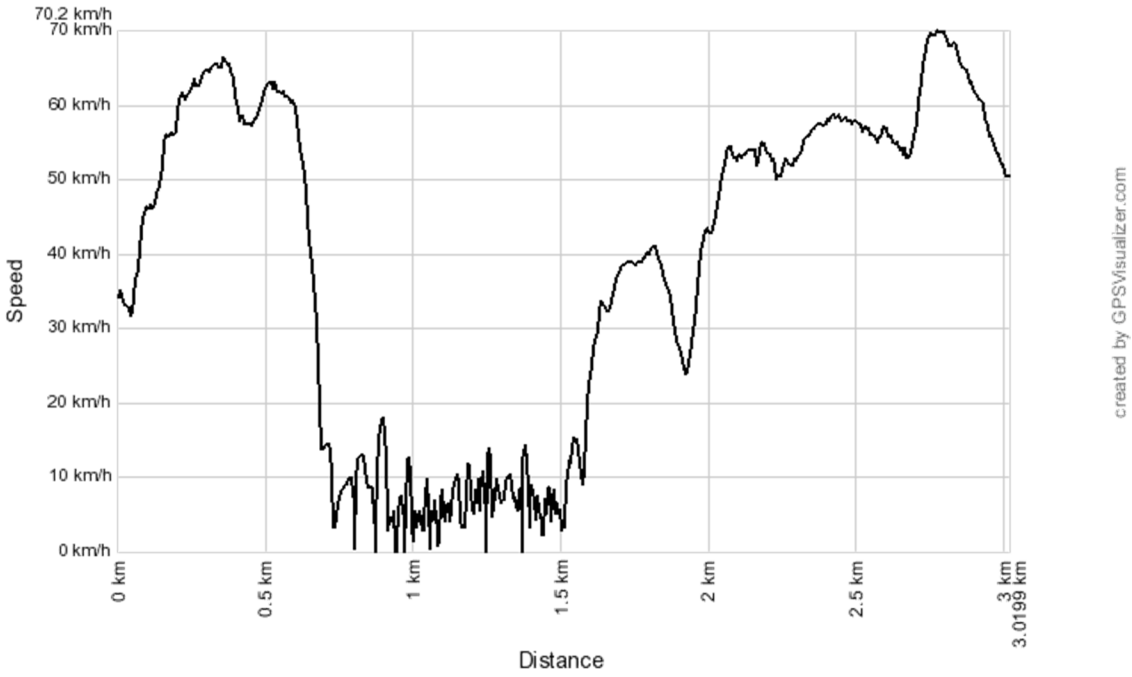
Obr. 4.8 Průběh rychlosti plovoucího vozidla v době kolony v úseku mezi Královopolskými tunely a MÚK Hlinky. Barevná škála zobrazení rychlosti je shodná se zobrazením v grafu rychlost – čas (speed – time) na obr. 4.9.

Na mapě je barevnou křivkou názorně zobrazen průběh rychlosti plovoucího vozidla při průjezdu ulicí Žabovřeskou. Před příjezdem ke koloně vozidlo jelo rychlostí okolo 60 km/h, což je v místě maximální dovolená rychlost. Krátce za křižovatkou s ul. Korejskou se sice dovolená rychlost zvedá na 80 km/h, pravděpodobně s ohledem na kolonu začínající jen o pár set metrů dál však vozidlo nezrychlilo. Dále je patrný prudký pokles

rychlosti až k nule ve chvíli, kdy vozidlo dojelo na konec kolony. V koloně je vidět kolísání rychlosti tak, jak se kolonou pohybovaly větší či menší vlny stop and go. Za hrdlem je pak vidět plynulý nárůst rychlosti v souladu s měřením radary. Malá část části záznamu použité pro vykreslení grafů není na mapě zobrazena.



Obr. 4.9 Graf průběhu rychlosti v závislosti na čase.



Obr. 4.10 Graf průběhu rychlosti v závislosti na ujeté vzdálenosti.

Pohled na grafy rychlost – čas a rychlost – vzdálenost jasně odhaluje, že navzdory tomu, že v koloně vozidlo neujelo ani třetinu vzdálenosti, strávilo v ní zhruba ¾ času jízdy. Z grafu na obrázku 4.8 můžeme odečíst, že délka kolony v době průjezdu plovoucího vozidla byla zhruba 0,9 km. Z grafu na obrázku 4.7 naopak vyplývá, že vozidlo v koloně strávilo zhruba devět minut. Dosazením těchto hodnot do rovnice (1.1) můžeme spočítat průměrnou rychlost vozidla v koloně, která odpovídá rychlosti dopravního proudu. Výsledkem je rychlost 1,7 m/s neboli 6,1 km/h.

Pokud budeme uvažovat, že by se vozidlo pohybovalo v úseku, kde stála kolona maximální dovolenou rychlostí 80 respektive 60 km/h (viz kapitola 3.1) průjezd daným úsekem by trval zhruba 45 s. Při délce kolony 900 m tedy časová ztráta způsobená kolonou činí více než 8 minut. Jinými slovy průjezd úseku v době kolony trval jedenáctkrát déle, než kdyby vozidlo jelo maximální dovolenou rychlostí.

Na grafech je dále patrný charakter jízdy v koloně, kde se střídá jízda se stáním, tedy typická jízda stop and go. Také je možné si všimnout prudkého poklesu rychlosti zhruba v místě druhého přechodu. Nelze však s jistotou říct, že tento pokles byl skutečně způsoben vlivem přechodu.

4.2.3 Ruční měření

Ruční měření rychlosti bylo zaměřeno na zjišťování rychlosti dopravního proudu v době kolony v jednotlivých jízdních pruzích. Vzhledem k tomu, že do pravého pruhu se řadí též vozidla z připojovacího pruhu, bylo očekáváno, že rychlost proudu bude v tomto pruhu o něco nižší. Taktéž tomu naznačoval fakt, že kolona bývá zpravidla o něco delší v levém pruhu. Měření probíhalo několikrát v úseku připojovacího pruhu a jednou též na mostě přes ulici Horovu.

Výsledky měření jednoznačně potvrdily domněnku, že levý, průběžný, jízdní pruh je výrazně rychlejší než pravý. Minimální naměřené časy se v obou pruzích pohybují shodně okolo jedné minuty, při posledním měření dokonce pouhých 40 s. Maximální naměřené časy průjezdu jsou však dosahovány v pravém pruhu. V době, kdy se nepřipojují vozidla z připojovacího pruhu, je rychlost v obou pruzích podobná. Ve chvíli, kdy se začne připojovat více vozidel, však rychlost proudu v pravém pruhu značně klesá. Je pravděpodobné, že řidiči si tohoto jevu všimli a proto mají tendenci se více řadit rovnou do průběžného levého pruhu, ve kterém tak bývá kolona často o několik desítek metrů delší.

Tab. 4.3 Ruční měření rychlosti dopravního proudu v úseku 240 – 100 m před místem spojení.

Datum měření	Rychlost u připojovacího pruhu délka měřeného úseku 140 m			
	levý pruh		pravý pruh	
	čas [s]	Rychlost [m/s]	čas [s]	Rychlost [m/s]
28.2.2014	72	1,94	92	1,52
	57	2,46	109	1,28
	56	2,50	126	1,11
	54	2,59	66	2,12
	67	2,09	105	1,33
	64	2,19	123	1,14
	63	2,22	86	1,63
	68	2,06	67	2,09
	57	2,46	62	2,26
	77	1,82	96	1,46
			90	1,56
			83	1,69
			121	1,16
	průměr	2,23	průměr	1,56
7.3.2014	64	2,19	92	1,52
	57	2,46	70	2,00
	60	2,33	101	1,39
	80	1,75		
	průměr	2,18	průměr	1,64
5.5.2014	95	1,47	45	3,11
	40	3,50	90	1,56
	63	2,22	102	1,37
	průměr	2,40	průměr	2,01
celkový průměr		2,25		1,65

Tab. 4.4 Ruční měření rychlosti dopravního proudu v úseku 760 – 600 m před místem spojení.

Datum měření	Rychlost na mostě přes ulici Horova délka měřeného úseku 160 m					
	levý pruh		pravý pruh		odbočovací pruh	
	čas [s]	rychlost	čas [s]	rychlost	čas [s]	rychlost
7.3.2014	105	1,52	105	1,52	62	2,58
	93	1,72	106	1,51	34	4,71
	116	1,38	70	2,29	36	4,44
	90	1,78	130	1,23	70	2,29
	76	2,11	102	1,57	42	3,81
	průměr	1,70	průměr	1,62	průměr	3,57

Je patrné, že při větší vzdálenosti od spojení připojovacího a pravého pruhu se rozdíl rychlostí proudu v levém a pravém pruhu značně zmenšuje. Protože měření na mostě přes ulici Horova proběhlo ve stejný den jen o hodinu až dvě později než jedno z měření v místě připojovacího pruhu, nelze očekávat, že by byl menší rozdíl v rychlosti způsoben výrazným snížením intenzity v připojovacím pruhu. Vliv připojovacího pruhu je tedy zřejmě omezen na určitou vzdálenost a dále jeho vliv klesá, až zcela vymizí.

Porovnáním rychlostí v levém pruhu těsně před hrdlem a dál proti směru jízdy je zjevné, že před hrdlem se rychlost proudu značně zvyšuje. Tento efekt je zřejmě přirozený a v pravém pruhu se „vyruší“ s vlivem připojovacího pruhu, protože rychlost v pravém pruhu je velmi podobná v obou místech měření.

Rychlost v odbočovacím pruhu je zhruba dvojnásobná oproti rychlostem v levém a pravém pruhu. To je dáno pravděpodobně tím, že do tohoto pruhu se řadí převážně vozidla, která chtějí z VMO odbočit na ulici Kníničskou, kde není důvod k totálnímu ucpání komunikace. Proud v tomto pruhu je však přesto značně zpomalen, protože se do něj napojuje další nájezd a některá vozidla se z něj chtějí před odpojením zařadit do pruhů pokračujících po VMO. Průpletová vzdálenost mezi vjezdovou a výjezdovou větví je zde zcela nevyhovující.

Při měření 5. 5. 2014 byla naměřena výrazně vyšší rychlost proudu než při ostatních měřeních. To je s největší pravděpodobností způsobeno tím, že při tomto měření byla vytvořená kolona kratší než při dalších dvou měřeních. To by naznačovalo, že v krátké koloně mají řidiči tendenci nechávat mezi vozidly větší rozestupy, tedy se snižuje hustota a v reakci na to se naopak zvyšuje rychlost. Délka kolony se v době měření 5. 5. 2014 pohybovala mezi 250 a 300 m, poté muselo být měření ukončeno, jelikož kolona se zkrátila natolik, že její konec nedosahoval ani k začátku měřeného úseku. Naopak při měření 28. 2. 2014 byla vytvořena stabilní kolona, jejíž délka dosahovala 350 – 400 m a 7. 3. 2014 dosahovala kolona v době měření na úseku u připojovacího pruhu 300 – 350 m.

4.3 INTENZITA

Měření intenzit bylo stěžejní pro stanovení kapacity místa spojování dopravních proudů. Z tohoto důvodu mu byl věnován největší prostor, což bylo též podpořeno nulovými nároky na techniku při ručním sčítání. To bylo doplněno o data z radarů použitých při měření rychlosti dopravního proudu za hrdlem. Podrobnější popis je uveden v kapitole 3.4.

4.3.1 Měření soustavou radarů

Vzhledem k tomu, že radary neměly synchronizovaný čas, bylo kvůli kontrole srovnáním intenzit naměřených radary s kontrolním ručním měřením nutné nejprve čas radarů synchronizovat. Synchronizace byla provedena na základě měření rozdílu času jednoho z radarů od ostatních radarů pomocí stopek. Po jejich spuštění byl zaznamenáván čas na stopkách a čas radaru ve stejném okamžiku. Z těchto údajů bylo možné dopočítat čas na radarech v jeden okamžik („kalibrovaný čas“). Po změření rozdílu skutečného času od času udávaného radarem 4147 lze spočítat rozdíly jednotlivých radarů od času skutečného. O tento rozdíl pak byly opraveny všechny záznamy jednotlivých radarů.

Tab. 4.5 Časová synchronizace radarů.

Radar	Čas od počátku stopování	Čas na radaru	Kalibrovaný čas	Rozdíl času radaru od reálného
4145	0:00:00	18:08:10	18:09:40	0:09:45
4147	0:01:30	18:13:05	18:13:05	0:13:10
6170	0:03:00	18:11:58	18:10:28	0:10:33
3972	0:04:25	18:15:09	18:12:14	0:12:19
9373	0:07:45	18:18:11	18:11:56	0:12:01

Údaje o intenzitě byly z upravených záznamů průjezdů získávány jako součet zaznamenaných vozidel v požadovaném časovém intervalu. Intenzity naměřené radary byly porovnány s kontrolním ručním měřením.

Tab. 4.6 Tabulka intenzit naměřených jednotlivými radary doplněná o kontrolní měření pro kontrolu validity měření. Hodnoty intenzity jsou uvedeny jako počet vozidel za 15 minut.

Radar	Interval							
	15:15-15:30	15:30-15:45	15:45-16:00	16:00-16:15	16:15-16:30	16:30-16:45	16:45-17:00	17:00-17:15
1	225	179	209	212	218	215	208	218
2	317	317	340	324	315	317	344	304
3	239	313	273	315	278	307	326	279
4	344	332	340	337	342	343	349	340
5	-	336	343	337	331	342	341	327
MAX	344	336	343	337	342	343	349	340
kontrolní	355	335	329	344	340	333	367	347

Tabulka jasně poukazuje na zásadní problém celého měření radary. Radary 1, 2, a 3, které byly nejblíže hrdlu, a tedy okolo nich dopravní proud projížděl nejpomaleji, měly nezanedbatelný problém s registrováním pomalých vozidel. Tento problém byl očekáván, jak je naznačeno v kapitole 3.3.1, nicméně skutečný rozsah tohoto nedostatku měření se ukázal významnější, než se čekalo. Data z radarů 1 – 3 jsou touto chybou měření zásadně ovlivněna. Tato chyba se bohužel neprojeví pouze u měření intenzit, kde lze data použít s radarů 4 a 5 a z kontrolního měření, ale zejména u měření rychlosti, jak je popsáno v kapitole 4.2.1.

Měření radarů 4 a 5 a kontrolního ručního měření se dobře shodují zejména v intervalu 15:30 – 15:45. U ostatních intervalů jsou taktéž patrné rozdíly mezi radary vzájemně a také mezi radary a kontrolním měřením. Tyto odchylky však nejsou již tak extrémní a data lze považovat za poměrně hodnověrná. V některých případech jsou intenzity změřené radary dokonce vyšší než při kontrolním měření. Tato chyba jde zřejmě na vrub nepozornosti či komplikacím při provádění kontrolního měření. U radaru 4 existuje též možnost, že kromě vozidel někdy zachytil i některého cyklistu přejíždějícího po přechodu. Pro výpočet intenzit však bude v každém intervalu uvažována nejvyšší z naměřených hodnot.

Tab. 4.7 Výpočet intenzity uvažované jako skutečná intenzita v daném časovém intervalu.

Interval	Intenzita [voz/15 min]				Intenzita [voz/h]
	Radar 4	Radar 5	Kontrolní měření	Maximum	
15:15-15:30	344	-	355	355	1420
15:30-15:45	332	336	335	336	1344
15:45-16:00	340	343	329	343	1372
16:00-16:15	337	337	344	344	1376
16:15-16:30	342	331	340	342	1368
16:30-16:45	343	342	333	343	1372
16:45-17:00	349	341	367	367	1468
17:00-17:15	340	327	347	347	1388

Dosažené intenzity jsou znatelně menší než intenzity naměřené ručním měřením. Důvodem bude pravděpodobně velmi vysoký poměr nákladních vozidel v kombinaci s vysokým počtem chodců využívajících přechod. Intenzita sice nebyla měřena v místě hrdla, všechna vozidla projíždějící hrdlem však musela projet i okolo radarů, intenzita je tedy zhruba stejná, pomineme-li odchylky způsobené zpožděním. Krátkodobě se může intenzita lišit v závislosti na tom, jak se zrovna vozidla lokálně více či méně nahustí, nebo čekají na přechodu pro chodce, 15 minut je však dostačující doba na to, aby tyto vlivy nehrály významnou roli.

4.3.2 Ruční měření

Ruční sčítání intenzit probíhalo nepravidelně několikrát v průběhu devíti měsíců. V první fázi byla měření zaměřena na měření intenzity v hrdle v době kolony. Ve druhé fázi se zájem přesunul na vytváření kolony a hledání teoretické kapacity hrdla.

Výsledkem první fáze měření je tabulka 4.8. Ačkoli byla tato fáze zaměřena na kapacitu v době trvání kolony, dvě měření proběhla v době bez kolony. Ukázalo se, že o víkendech zřejmě zpravidla nebývá dosaženo intenzit potřebných ke vzniku kolony. Pokud dojela současně větší skupina vozidel utvořená za pomalejšími vozy, poslední vozidla byla někdy nucena v hrdle výrazně zpomalit či zastavit, okamžitě však došlo k opětovnému uvolnění.

Průměrná intenzita v koloně se pohybuje okolo 1550 voz/h při vynásobení intenzity z 10min intervalu. Při měření 10. 3. 2014 se pohybovala okolo 1400 voz/h, naopak 28. 2. dosáhla na 1675 voz/h. Tuto hodnotu můžeme považovat za dlouhodobě udržitelnou kapacitu daného úseku komunikace v době trvání kolony, nicméně při nízkém poměru nákladních vozidel je pravděpodobně možné dosáhnou i intenzity okolo 1700 voz/h. Nižší intenzita může mít několik příčin. Zřejmě největší vliv má intenzita nákladních vozidel. Ta jednak svojí délkou narušují pravidelné zipování, navíc pomalu akcelerují. Dalším negativním vlivem může být vyšší intenzita chodců na přechodech. Význam má také to, jak řidiči dodržují pravidlo zipu a jak plynule se řadí. Pozorování dále odhalilo, že kolona se při měření 5. 9. několikrát utvořila i dále po směru jízdy a její konec někdy dostoupil až k hrdlu, čímž omezila intenzitu zde na intenzitu v místě jejího vzniku. Není však jasné, zda důvodem vzniku těchto kolon bylo používání druhé-

ho přechodu pro chodce, nebo jiných vlivů dále po směru jízdy. Žádná zjevná příčina nebyla v dohledu.

Tab. 4.8 Ruční měření intenzit zaměřené na současnou reálnou kapacitu hrdla v době trvání kolony. Při prvním měření 25. 8. 2013 byl použit delší patnáctiminutový interval měření oproti pozdějším 10 minutám. Ve čtvrtém sloupci je intenzita počítána jako násobek počtu vozidel v daném intervalu, v pátém sloupci je pak průměrná intenzita za celé měření. V průměrné intenzitě uvedené na konci tabulky jsou zahrnuta pouze měření uvedená v této tabulce.

Datum	Interval	Počet vozidel [-]	Intenzita [voz/hod]	Intenzita [voz/hod]
Ne 25.8.2013 (bez kolony)	15:00-15:15	279	1116	1155
	15:17-15:32	256	1024	
	15:34-15:49	300	1200	
Čt 5.9.2013 (kolona)	14:34-14:44	255	1530	1479
	14:44-14:54	240	1440	
	14:54-15:04	250	1500	
	15:11-15:21	233	1398	
	15:51-15:31	236	1416	
	15:31-15:41	265	1590	
St 25.9.2013 (kolona)	12:47-12:57	258	1548	1605
	13:10-13:20	277	1662	
So 15.2.2014 (bez kolony)	16:17-16:27	167	1002	1086
	16:31-16:41	170	1020	
	16:41-16:51	162	972	
	16:51-17:01	217	1302	
	17:04-17:14	189	1134	
Pá 28.2.2014 (kolona)	14:47-14:57	290	1740	1675
	15:44-15:54	282	1692	
	15:54-16:04	264	1584	
	16:12-16:22	277	1662	
	16:40-16:50	283	1698	
Pátek 7.3.2014 (kolona)	12:56-13:06	268	1608	1615
	13:13-13:25	271	1626	
	13:25-13:35	269	1614	
	13:59-14:09	258	1548	
	14:13-14:23	278	1668	
	14:47-14:57	263	1578	
	16:23-16:33	277	1662	
Průměrná intenzita v hrdle v době vytvořené kolony				1588

Z pozorování v průběhu měření se zdálo, že vyšší intenzita než v koloně by mohla být dosažena před jejím vznikem, kdy k hrdlu přijíždí velké množství vozidel, ale ještě nedošlo ke zhroucení dopravního proudu a k zastavování vozidel před hrdlem. Proto byl vytipován čas vzniku kolony a byla provedena dvě měření zachycující průběh intenzit v místě spojení dopravních proudů v době vzniku kolony. Cílem bylo nalezení určité teoretické maximální dosažitelné intenzity, která je za běžných podmínek dosažitelná

jen krátkodobě. Proto byl interval měření zkrácen na pět a později na jednu minutu. Během měření byly taktéž zaznamenávány významné okolnosti ovlivňující intenzitu jako ucpání jednopruhového úseku za hrdlem, vznik kolony. Pokud byla během měření 5. 5. 2014 zaznamenána vysoká intenzita a přitom byla nějak negativně ovlivněna – zejména pokud profilem v době intervalu projíždělo neobvyklé množství nákladních vozidel nebo pokud byly mezi vozidly mezery evidentně větší než způsobené dodržováním bezpečného odstupu – tento negativní vliv byl také zaznamenán. Tyto vlivy nebyly zaznamenávány, pokud byla naměřena nízká intenzita. Zároveň byla snaha zaznamenávat i ještě krátkodobější špičky intenzit v intervalech řádově desítek sekund.

Naměřené výsledky byly zpracovávány dvěma různými způsoby:

1. Prosté násobení minutových intenzit pro získání teoretické maximální hodinové intenzity. Výsledky získané tímto způsobem však nejsou použitelné pro data naměřená v době kolony, jelikož pokud dochází k zipování, nejsou takové intenzity udržitelné dlouhodobě, což dokazují výsledky první fáze měření intenzit. Naopak slouží ke zjištění, jaké intenzity by bylo teoreticky možné dosáhnout při vhodné regulaci dopravního proudu tak, aby nedocházelo k tvorbě kolony bezprostředně před hrdlem a vozidla by zipovala při nižší hustotě a vyšší rychlosti.
2. Sečtením pěti či deseti po sobě následujících minutových intervalů byly spočítány skutečné intenzity za 5 nebo 10 minut, tedy hodnoty, které byly získávány i v první fázi měření a jsou poměrně relevantním výchozím bodem pro přepočet na hodinovou intenzitu. Tento způsob nevypovídá o teoretických kapacitních možnostech, ale slouží k získání reálné intenzity v koloně a tedy k doplnění výsledků první fáze měření intenzit.

Tabulka 4.9 je zpracována první metodou, ukazuje tedy teoretické kapacity. Nejvyšší naměřenou intenzitou bylo 32 voz/min což odpovídá 1920 voz/h. Čtyřminutový úsek s průměrnou intenzitou 1815 voz/h naznačuje, že vyšších intenzit než v koloně lze dosahovat po delší dobu, pouze je nutné zajistit homogenní dopravní proud, který nevytvoří kolonu již při nižších intenzitách. To je v neřízeném provozu těžko dosažitelné, ale při využití telematiky a vhodného ovlivnění dopravního proudu by to mohlo být možné. Katalyzátorem vzniku kolony byly dva průchody chodců po prvním přechodu pro chodce. První způsobil zvýšení hustoty před hrdlem, kdy před ním bylo vždy několik vozidel v průběžném pruhu. Přijíždějící vozidla se řadila rovnou na konec a nedocházelo tak k zipování, které by způsobilo zastavení proudu. Další průchod chodců o zhruba 5 minut později již však znamenal kolaps tohoto nestabilního stavu a vytvoření kolony. Protože intenzita v hrdle vznikem kolon poklesla, pro rozpuštění kolony by byl nutný pokles intenzity přijíždějících vozidel pod úroveň intenzity v hrdle. Druhá polovina tabulky ukazuje teoretické intenzity po vytvoření kolony. Nejvyšší naměřená intenzita byla 29 voz/min neboli 1740 voz/h. To představuje výrazný pokles oproti situaci před vznikem kolony. Zároveň je tato intenzita v koloně dlouhodobě neudržitelná.

Tab. 4.9 Naměřené intenzity v době okolo vzniku kolony při měření v pátek 18. 4. 2014 zpracované metodou pro hledání teoretické kapacity. Hodnoty jsou získávány násobením minutových intenzit.

Vozidel za interval				Poznámky
1 min	5 min	10 min	1 hod	
	136	272	1632	
	123	246	1476	
	136	272	1632	
	147	294	1764	
	134	268	1608	
31	155	310	1860	
23	115	230	1380	
29	145	290	1740	
18	90	180	1080	
30	150	300	1800	
28	140	280	1680	
26	130	260	1560	
23	115	230	1380	chodci
30	150	300	1800	1815 voz/hod po dobu 4 min
32	160	320	1920	
28	140	280	1680	
31	155	310	1860	
17	85	170	1020	chodci → kolona
27	135	270	1620	
26	130	260	1560	
27	135	270	1620	
27	135	270	1620	
28	140	280	1680	
29	145	290	1740	
26	130	260	1560	
26	130	260	1560	
24	120	240	1440	
29	145	290	1740	
28	140	280	1680	
29	145	290	1740	
16	80	160	960	
28	140	280	1680	
29	145	290	1740	
26	130	260	1560	
27	135	270	1620	
24	120	240	1440	
28	140	280	1680	
24	120	240	1440	

Tab. 4.10 Naměřené intenzity v době okolo vzniku kolony při měření v Pátek 18. 4. 2014 zpracované metodou pro výpočet kapacity v době kolony. Hodnoty jsou získávány jako součet vozidel za pět nebo deset minut následně přepočítaný na hodinovou intenzitu. Hodnoty pod tlustou čarou jsou dopočítávány z menšího počtu měření.

Vozidel za interval					Poznámky
1 min	5 min	1 hod	10 min	1 hod	
	136	1632	259	1554	
	123	1476	259	1554	
	136	1632	283	1698	
	147	1764	281	1686	
	134	1608	265	1590	
31	131	1572	270	1620	
23	128	1536	267	1602	
29	131	1572	275	1650	
18	125	1500	263	1578	
30	137	1644	272	1632	
28	139	1668	268	1608	
26	139	1668	267	1602	
23	144	1728	268	1608	chodci
30	138	1656	273	1638	1815 voz/hod po dobu 4 min
32	135	1620	272	1632	
28	129	1548	266	1596	
31	128	1536	264	1584	
17	124	1488	257	1542	chodci → kolona
27	135	1620	269	1614	
26	137	1644	270	1620	
27	137	1644	273	1638	
27	136	1632	262	1572	
28	133	1596	263	1578	
29	134	1608	264	1584	
26	133	1596	261	1566	
26	136	1632	262	1572	
24	126	1512	260	1560	
29	130	1560	264	1584	
28	130	1560	259	1554	
29	128	1536	257	1540	
16	126	1512	253	1515	
28	134	1608	266	1594	
29	134	1608	263	1580	
26	129	1548	258	1548	
27	129	1545	258	1545	
24	127	1520	253	1520	
28	130	1560	260	1560	
24	120	1440	240	1440	

V tabulce 4.10 je měření zpracováno druhou metodou. Udává tedy skutečně naměřené intenzity v pěti- nebo desetiminutových intervalech tak jako měření v první fázi. Nejvyšší intenzita naměřená před vznikem kolony za 10 minut je 283 vozidel, tedy 1698 voz/h. To je o víc než 100 vozidel vyšší intenzita, než uvažovaná kapacita v době kolony určená v první fázi měření. To lze považovat za dostatečný důkaz toho, že přinejmenším v horizontu 10 minut je i v neřízeném provozu dosahováno větších intenzit před vznikem kolony než potom v ní. V době kolony pak byla nejvyšší naměřená intenzita 273 voz/10 min neboli 1638 voz/h. V průměru pak za celou dobu měření byla v koloně intenzita 1584 voz/h, což odpovídá předchozím měřením z první fáze.

5. 5. 2014 proběhlo druhé měření zaměřené na vznik kolony, jehož cílem bylo ověřit závěry prvního měření a získat více dat. Po zkušenostech z prvního měření byl také kladen větší důraz na vedení poznámek k pozorovaným jevům. Vzhledem k většímu rozsahu měření jsou kompletní tabulky uvedeny jako přílohy A a B. Výjimkou je tabulka 4.11 krátkodobých mimořádných intenzit. Ty byly během měření zaznamenávány, pokud na počátku minutového intervalu projelo za určitý časový úsek neobvykle vysoký počet vozidel.

Tab. 4.11 Tabulka krátkodobých intenzit zaznamenaných při měření 5. 5. 2014 zpracovaná metodou pro hledání teoretické kapacity.

Mimořádné krátkodobé intenzity			
vozidel [-]	interval [s]	intenzita [voz/min]	intenzita [voz/hod]
7	9	47	2800
12	16	45	2700
10	15	40	2400
13	20	39	2340
26	40	39	2340
26	45	35	2080
20	35	34	2057
27	50	32	1944
24	45	32	1920

Tak jako vždy u podobných měření se zkracujícím se intervalem získáváme vyšší extrémy hodnot, které se v dlouhodobém průměru „ztratí“. Maximální naměřená teoretická intenzita je 2800 voz/h dosažená v intervalu 9 s. Takovéto intenzity jistě není možné dlouhodobě dosáhnout ani při ovlivnění dopravního proudu. V tomto směru je nadějnější hodnota 2340 voz/h naměřená v intervalu 40 s, ale ani ta pravděpodobně není dlouhodobě udržitelná.

Jako problém se u těchto vysokých intenzit totiž ukazuje také úsek, kde je komunikace vedena pouze jedním pruhem v každém směru. V něm totiž při vysokých intenzitách vozidla často spontánně zpomalí a začnou omezovat intenzitu i v místě hrdla, kterým by jinak bylo schopno projet více vozidel. Lze předpokládat, že pokud by se podařilo dlouhodobě udržet vysokou intenzitu v místě spojení pruhů, dopravním hrdlem by se stal následující jednopruhový úsek, jelikož vozidla nejsou schopná dlouhodobě udržet tak malé rozestupy jako bezprostředně za místem spojení pruhů.

Z tabulky v příloze A věnující se teoretické kapacitě místa spojení stojí za povšimnutí několik hodnot. Maximální vypočítaná hodnota je 1980 voz/h (33 voz/min). Dosažena

byla během měření dvakrát, v jednom z těchto případů bylo současně krátkodobě dosaženo dříve zmiňované intenzity 2340 voz/h (29 vozidel za 40 s), ve zbývajících 20 vteřinách minutového intervalu však už projela pouhá čtyři vozidla. Několikrát se dopravní proud pohyboval na hraně mezi kolonou a plynulým řazením do průběžného pruhu. V této situaci byla dosažena intenzita až 32 voz/min tedy 1920 voz/h. Po vzniku kolony byla opakovaně naměřena intenzita 30 voz/min, tedy teoreticky 1800 voz/h.

V tabulce v příloze B je měření zpracováno do podoby reálných intenzit. Zde bylo bez kolony dosaženo maxima 1548 voz/h v 10min intervalu. To je o mnoho méně než v předchozím měření, nicméně pokud není vytvořená kolona, je intenzita zcela závislá na intenzitě přijíždějících vozidel. Proto tato metoda zpracování nijak nevypovídá o kapacitě před vznikem kolony. V 5min intervalu bylo dosaženo intenzity 1728 voz/h. Nejvyšší intenzity za 10 minut bylo dosaženo v době přechodu mezi volným hrdlem a kolonou – v přepočtu 1620 a 1614 voz/h. V koloně bylo dosažené maximum 1668 voz/h v 5min intervalu a 1566 voz/h v 10min intervalu. V průměru byla intenzita v koloně 1540 voz/h.

Výsledky z druhého měření víceméně potvrdily závěry z měření prvního. Bylo naměřeno několik mírně vyšších intenzit jak mimo kolonu, tak v koloně a byly získány údaje o krátkodobých intenzitách v časovém intervalu kratším než jedna minuta.

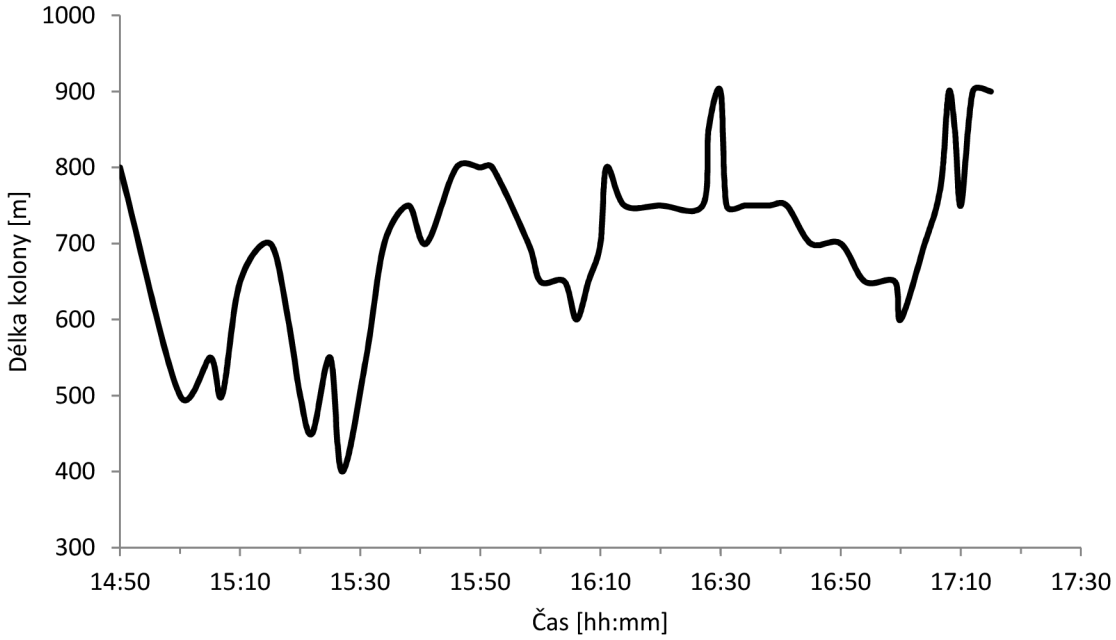
4.4 DÉLKA KOLONY

Délka kolony byla sledována nepravidelně v průběhu měření způsobem popsaným v kapitole 3.5. Jedno z měření bylo dostatečně dlouhodobé a pravidelné pro vytvoření grafu průběhu délky kolony. Druhý podobný graf byl vytvořen na základě měření probíhajícího 10. 3. 2014 současně s radarovým měřením.

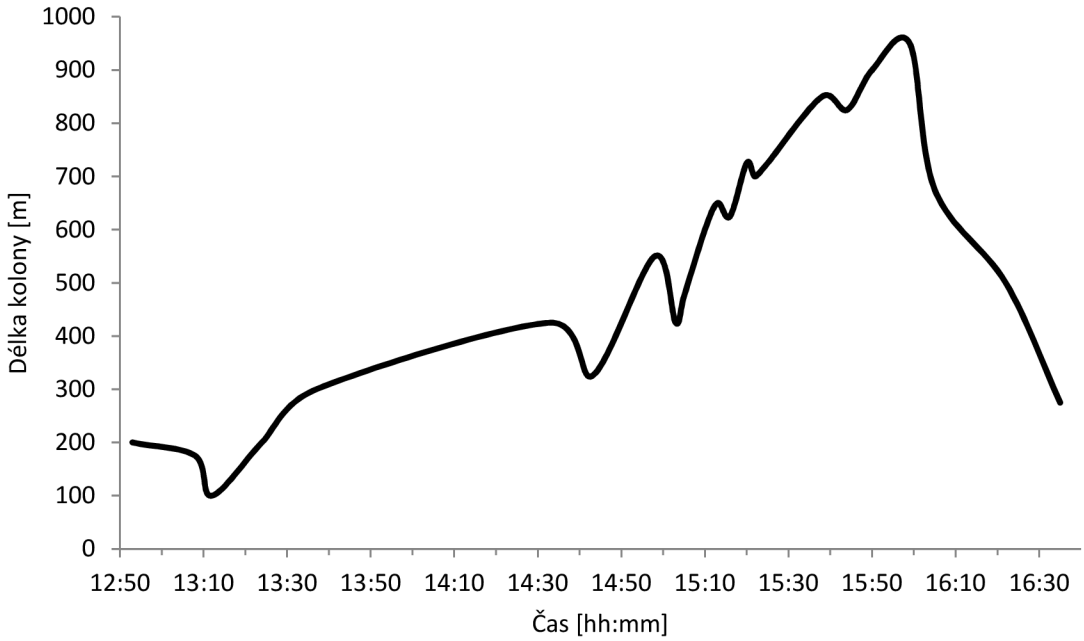
Tab. 4.12 Naměřené délky kolny v jednotlivých pruzích. Pro všechny pruhy včetně odbočovacího je vzdálenost měřena od uvažovaného místa spojení jízdních pruhů.

Datum	Čas	Délka kolony [m]		
		Levý pruh	Pravý pruh	Odboč. pruh
Ne 25. 8. 2013	15:00	0	0	-
	15:45	0	0	-
Čt 5. 9. 2013	14:25	350	300	-
	15:21	450	400	-
Ne 8. 9. 2013	14:10	0	0	-
So 15. 9. 2013	12:29	0	0	-
St 25. 9. 2013	12:43	100	50	-
	do 13:20	0-150	0-100	-
Pá 18. 10. 2013	17:07	450	450	-
Po 11. 11. 2013	17:30	900	900	900
Pá 20. 12. 2013	11:35	250	200	-
So 15. 2. 1014	16:17	0	0	-
	17:14	0	0	-

Datum	Čas	Délka kolony [m]		
		Levý pruh	Pravý pruh	Odboč. pruh
Pá 28. 2. 2013	15:03	400	350	-
	16:05	350	350	-
	16:24	400	350	-
	16:51	250	250	-
	16:54	200	150	-
Pá 7. 3. 2014	12:53	200	200	-
	13:08	200	150	-
	13:12	150	50	-
	13:24	200	200	-
	13:37	300	300	-
	14:33	500	350	-
	14:43	350	300	-
	14:58	550	550	-
	15:03	500	350	-
	15:05	500	450	-
	15:10	600	600	600
	15:13	700	600	600
	15:16	650	600	600
	15:20	750	700	650
	15:22	750	650	600
	15:25	750	700	850
	15:38	900	800	1000
	15:44	850	800	850
	15:50	900	900	900
	15:59	950	???	900
	16:05	700	650	650
	16:22	550	450	-
	16:35	300	250	-
Pá 18. 4. 2014	11:20	300	300	-
	11:36	0	0	-
	12:04	100	50	-
	12:09	150	150	-
	12:38	200	200	-
Po 5. 5. 2014	11:16	0	0	-
	13:15	100	100	-
	13:22	100	100	-
	13:27	150	100	-
	13:35	300	300	-
	13:39	150	150	-
	13:45	300	300	-
	13:58	300	300	-
	14:02	150	100	-
	14:12	150	150	-



Obr. 4.11 Průběh délky kolony 10. 3. 2014.



Obr. 4.12 Průběh délky kolony 7. 3. 2014.

Z naměřených údajů lze říct, že o víkendech a svátcích se kolona netvoří. Naopak v pracovních dnech ji lze očekávat s naprostou jistotou. Pravidelně byla zachycena mezi jednou a pátou hodinou odpoledne. Měření však byla ukončena před jejím rozpuštěním, lze se tedy domnívat, že často zůstává i déle. Zachycena byla i kolona v 11:20. Lze předpokládat, že kolony vznikají i v ranní špičce a zkušenosti řidičů pravidelně komunikaci užívajících to potvrzují. Tato kolona tedy mohla být pozůstatkem ještě z ranní špičky.

Průměrná délka kolony 7. 3. byla 530 m, 10. 3. potom dokonce 700 m. V ostatních měřeních jsou zachyceny pouze krátké časové intervaly. Platí, že po obědě většinou vznikne kolona a dále narůstá. Vrcholu dosahuje mezi půl čtvrtou a půl šestou. Za průměrnou délku kolony se dají považovat hodnoty okolo 500 m.

4.5 ZÁVĚRY Z PROVEDENÝCH MĚŘENÍ A POZOROVÁNÍ

4.5.1 Kapacita místa spojení jízdních pruhů

Z naměřených hodnot vyplívá, že průměrná intenzita dopravy v měřeném úseku je v době trvání kolony mezi 1500 a 1600 vozidly za hodinu, někdy však klesá i na hodnoty okolo 1400 voz/h. Maximální naměřená hodnota, kterou lze zároveň považovat za kapacitu, byla 1675 voz/h. Zároveň se podařilo ověřit, že před vznikem kolony a ucpáním hrdla vedoucímu k zipování z nulové rychlosti lze dosáhnout znatelně vyšších intenzit. Podařilo se naměřit průměrnou intenzitu 1815 voz/h po dobu 4 minut. Poté došlo ke kolapsu dopravy vlivem chodce přecházejícího po přechodu, který na několik vteřin zastavil dopravu, což stačilo k tomu, aby se před hrdlem nashromáždila vozidla a utvořila kolonu.

Pokud by se podařilo efektivně regulovat intenzitu vozidel přijíždějících k místu spojování jízdních pruhů a zároveň se podařilo udržet proud homogenní, je velmi pravděpodobné, že by došlo k významnému zvýšení kapacity hrdla v době, kdy by v současnosti vznikla kolona. Na základě této úvahy bylo navrženo několik možností čí hypotéz (viz kapitola 5), jak dopravní proud vhodně ovlivnit, aby došlo ke zvýšení intenzity.

4.5.2 Ztráty způsobené stáním v koloně

Ministerstvo dopravy v technickém předpise HDM-4 [14] uvádí průměrnou hodnotu času pro nákladní a osobní vozidla. ŘSD [15] poskytuje některá data o intenzitách dopravy ze sčítání dopravy v roce 2010. Z těch vyplývá, že po řešené komunikaci jezdí cca 14 % těžkých motorových vozidel a 86% osobních vozidel. Pokud budeme zjednodušeně uvažovat, že polovina těžkých motorových vozidel jsou střední nákladní vozidla s hodnotou času 283 Kč/h a polovina těžká nákladní vozidla s hodnotou času 660 Kč/h a u osobních vozidel budeme uvažovat uvedenou průměrnou hodnotu 272 Kč/h, při časové ztrátě 8 minut (odpovídá délce kolony 900 m) pro každé vozidlo jsou celkové ztráty za čekání v koloně zhruba 65000 Kč/h (při uvažované intenzitě 1600 voz/h). Výpočet byl proveden podle vzorce

$$Z = t_w * q * (q_t * p_t + q_s * p_s + q_o * p_o) \tag{4.1}$$

kde Z je finanční ztráta způsobená čekáním v koloně [Kč]
t_w je čas strávený vozidlem v koloně [h]
q je intenzita [voz/h]
q_t je podíl těžkých nákladních vozidel [-]
q_s je podíl středních nákladních vozidel [-]
q_o je podíl osobních vozidel [-]
p_t je hodnota času těžkých nákladních vozidel [Kč/h]
p_s je hodnota času středních nákladních vozidel [Kč/h]
p_o je hodnota času osobních vozidel [Kč/h]

Tyto ztráty však zahrnují pouze hodnotu času nákladních vozidel odvozenou od množství převáženého nákladu a hodnotu času osob v osobním automobilu. Skutečné ztráty zahrnující spotřebu paliva, zvýšené množství emisí, hluku nebo namáhání vozovky statickou dopravou jsou mnohem vyšší.

Z průměrné délky kolony odhadnuté v kapitole 4.4 na 500 m, průměrné rychlosti dopravního proudu v koloně 6,1 km/h změřené plovoucím vozidlem a dovolené rychlosti v místě kolony lze spočítat průměrnou časovou ztrátu, která činí zhruba čtyři a půl minuty. Dosazením této ztráty do vzorce (4.1) a dosazením průměrné intenzity naměřené v koloně cca 1550 voz/h vychází ztráta okolo 35 tis. Kč/h. V kapitole 4.4 je dále popsáno, kdy lze kolony očekávat. Na základě toho lze odhadnout celkové roční ztráty způsobené pouze ztrátou času v koloně.

Při značně minimalistickém odhadu lze uvažovat, že kolona vznikne pouze v odpolední špičce na čtyři hodiny každý pracovní den (pondělí – pátek). Při zanedbání svátků to je 260 dní. Pokud bude 10 svátků připadat na pracovní dny, kolona se vytvoří 250 dní v roce. V tom případě činí odhad ročních ztrát 35 mil. Kč.

Pokud budeme uvažovat, že kolona vznikne i dopoledne mezi 7. a 11. hodinou a odpoledne bude mezi 13. a 18. hodinou, tedy celkem 9 hodin denně, odhad ztrát dosahuje 79 mil Kč. Pokud budeme předpokládat, že kolona dosahuje kilometrových délek častěji a zvýšíme průměrnou délku kolony na 600m, odhad ztráty se zvýší o dalších 20 % a dosáhne 100 mil. Kč/rok.

Tyto ztráty jdou na vrub majitelům vozidel. Další náklady pak jdou na vrub městu potažmo státu vlivem zvýšeného znečištění ovzduší, vyššího opotřebení konstrukce vozovky atd.

5 MOŽNOSTI OVLIVNĚNÍ DOPRAVNÍHO PROUDU ZA ÚČELEM ZVÝŠENÍ KAPACITY SPOJENÍ JÍZDNÍCH PRUHŮ

Měření v souladu s teoriemi dopravního proudu prokázalo, že kapacita komunikace v místě spojení jízdních pruhů není dosažena v době kolony, kdy má dopravní proud velmi vysokou hustotu a naopak velmi nízkou rychlost, ale někdy před vznikem kongesce. Na základě tohoto zjištění bylo navrženo několik hypotéz, zabývajících se možnostmi ovlivnění dopravního proudu tak, aby bylo dosaženo zvýšení kapacity takovýchto míst.

5.1 OMEZENÍ RYCHLOSTI PŘED MÍSTEM SPOJOVÁNÍ

Touto možností se zabývá Apeltauer pro aplikaci na dálnicích v pracovních zónách [16]. Předmětem jeho zkoumání je dynamické řízení dopravního proudu pomocí systému detektorů rychlosti a intenzity a proměnného dopravního značení v oblastech pracovních zón na dálnicích, kde dochází ke spojování jízdních pruhů. Výsledky naznačují, že systém přináší po většinu času zkrácení cestovního času a snížení počtu vozidel stojících v koloně. Systém prošel taktéž pilotním testováním na dálnici D1, jeho výsledky však byly vyhodnocovány až po vydání práce.

I pokud by pilotní provoz prokázal efektivitu systému, není možné ho bez značných úprav aplikovat na jiných typech komunikací, než jsou dálnice. V navržené podobě vyžaduje osazení několika měřících zařízení v průběhu 7 km před místem zúžení. To je na jakémkoli jiném typu nepoužitelné, jelikož během této vzdálenosti je mnoho křižovatek, které naměřená data znehodnotí tím, že některá vozidla se odpojí a jiná naopak připojí. Dalším důvodem proč systém nelze bez dalšího testování použít mimo dálnice je fakt, že byl modelován a testován na dálnici s dovolenou rychlostí 130 km/h. Použití tohoto systému na místních komunikacích je tedy bez dalších úprav a testů vyloučeno.

5.2 ŘÍZENÍ SVĚTELNÝM SIGNALIZAČNÍM ZAŘÍZENÍM

Tato hypotéza vychází z předpokladu, že maximální intenzity v hrdle je dosaženo před vznikem kolony. Pokud by se tedy podařilo zajistit, aby hustota vozidel před místem spojování pruhů byla nižní než v koloně, případně pokud by se ji podařilo udržet na určité optimální hodnotě, kapacita v hrdle by se zvýšila.

Podstatou této hypotézy je způsob, jakým zajistit dosažení této optimalizované hustoty. Návrh předpokládá osazení světelného signalizačního zařízení (SSZ) ve vhodné vzdálenosti od hrdla (řádově desítky až stovky metrů) v kombinaci se zařízením sledujícím stav dopravního proudu. SSZ by zůstávalo po většinu času vypnuté a spouštělo by se až ve chvíli, kdy by k němu dosáhl konec kolony. Ve chvíli, kdy by systém vyhodnotil, že došlo k vytvoření kolony a ta by dosáhla až k SSZ, spustilo by se SSZ za účelem regulace dopravního proudu.

V první fázi by pro oba (případně všechny) jízdní pruhy svítila červená, aby došlo k opětovnému vyprázdnění úseku mezi hrdlem a SSZ. Ve druhé fázi by SSZ začalo střídavě pouštět vozidla v jednotlivých pruzích tak, aby se vozidla v místě spojení jízdních pruhů plynule řadila. SSZ řídí intenzitu a tím do značné míry i hustotu, jeho odsazení umožní vozidlům dosažení vyšší rychlosti. Kombinace těchto faktorů by měla vést

k dosažení optimální hustoty a rychlosti v místě spojování jízdních pruhů a tím ke zvýšení kapacity.

Pro správné fungování je nutná kalibrace celého systému. SSZ musí být osazena ve vhodné vzdálenosti od místa spojování jízdních pruhů, aby mohla vozidla dostatečně akcelerovat, ale zároveň aby neměla tendenci se předjíždět a tím narušovat systém daný SSZ. Druhým klíčovým bodem je nastavení SSZ. Jednou možností je nastavit velmi rychlé střídání červené a zelené v jednotlivých pruzích tak, aby vozidla vyjížděla na střídačku z jednoho a druhého pruhu. Druhou možností je nastavení delších intervalů přičemž by vždy chvíli jezdila vozidla pouze z jednoho a následně pouze z druhého pruhu.

Obě varianty se potýkají s několika problémy, které by mohly v praxi snížit efektivitu systému pod úroveň neřízeného dopravního proudu. Teoreticky by mohla být efektivnější varianta rychlého střídání červené a zelené střídavě v obou pruzích. Intervalová varianta totiž celý systém převádí de facto na jízdu v jednom jízdním pruhu, přičemž je intenzita dána zejména reakcí řidičů na rozjezd předcházejícího vozidla. Při variantě rychlého střídání lze využít dvou zdrojů – pruhů – vozidel pro zvýšení intenzity. Zásadní pro správné fungování této varianty je reakce řidičů na signalizaci SSZ. Holcner [1] na základě empirických měření i simulací uvádí, že reakce řidičů na SSZ je o něco lepší, než na rozjezd předcházejících vozidel. Navíc lze předpokládat, že při pravidelném rychlém střídání červené a zelené budou řidiči připraveni se rozjet velmi brzy po rozsvícení zelené, případně se budou pomalu rozjíždět ještě předtím. Je však otázkou, zda je v praxi reálné nastavit signalizaci tak, aby na ni řidiči stíhali reagovat, respektovali ji a zároveň regulace vedla ke zvýšení intenzity. Dalším problémem, který sice platí pro obě varianty, avšak u této se jeví jako závažnější, je vliv pomalých, zejména tedy nákladních, vozidel. Tato vozidla budou svojí menší akcelerací nutně narušovat homogennost dopravního proudu a zvyšují pravděpodobnost opětovného vzniku kongesce v úseku mezi hrdlem a SSZ. Pro případ, že by se hrdlo opět ucpalo, by bylo nutné monitorovat stav dopravního proudu i mezi hrdlem a semafory. Pokud by došlo k obětovnému vzniku kolony v hrdle, SSZ by se v obou pruzích opět nastavilo na červenou, dokud by se hrdlo neuvolnilo.

Šance na úspěch tohoto systému zvedá vzdálená podobnost se systémem označovaným jako ramp metering (někdy také on-ramp metering či pouze ramp meter), který poměrně úspěšně funguje [17][18]. Tento systém se používá v zahraničí na nájezdech na dálnice k omezení vzniku kongescí na dálnicích. Na vjezdových větvích je osazeno SSZ, které je za běžné situace vypnuté. V případě zvýšení hustoty provozu na dálnici a nebezpečí vzniku kongescí je SSZ zapnuto a slouží k omezení intenzity vozidel najíždějících na dálnici. „Dávkování“ vozidel umožnuje jejich plynulé řazení do dopravního proudu na dálnici a nenutí vozidla na ní zpomalovat, aby umožnila jejich zařazení. Hodnotící studie [17] prokázala, že systém zvyšuje intenzitu na dálnici, bezpečnost provozu a stabilitu dopravního proudu při současném snížení cestovního času pro většinu vozidel (u vozidel, která po dálnici jedou jen malou vzdálenost, převáží negativní vliv čekání na vjezdové větvi).

5.3 APLIKACE TECHNOLOGIE V2V

Vehicle-to-vehicle [19] (V2V) je technologie vyvíjená firmou General Motors ve spolupráci s dalšími výrobci automobilů. V2V je technologie vzájemné komunikace vozidel na bázi Wi-Fi podobné technologii přenosu dat. Vozidla vybavená tímto systémem mají

v reálném čase sdílet informace o své poloze, rychlosti, směru jízdy, akceleraci či ztrátě stability. Na základě těchto dat z okolních vozidel, přičemž dosah technologie má být až 300m (odpovídá času přes 8 s na dálnici při rychlosti 130 km/h a více než 20 s ve městě při rychlosti 50 km/h), má systém varovat řidiče před hrozícím nebezpečím nebo sám zareagovat.

Předpokládá se, že v první fázi bude systém zřejmě pouze varovat řidiče, později by měl moci sám převzít kontrolu nad řízením a v konečné fázi by mohl být schopen autonomního řízení vozidla. Vzhledem k tomu, že technologie je stále ve vývoji a její aplikace není možná bez příslušných zákonů, které by ji povolily a regulovaly, konkrétní podobu lze momentálně jen předvídat, navíc se může, a pravděpodobně bude, vyvíjet a stejně tak se budou upravovat zákony s ní spojené.

Základem této hypotézy ovlivnění dopravního proudu v oblasti spojování jízdních pruhů, či obecně dopravních proudů, je určitá nadstavba této technologie, která by umožnila na základě sdílených dat synchronizovat jednotlivá vozidla tak, aby se efektivněji spojily dopravní proudy. Synchronizace by ideálně probíhala autonomně převzetím řízení vozidla systémem V2V, což se ostatně předpokládá v konečné fázi vývoje technologie po celou dobu jízdy, v raných fázích by systém mohl alespoň navádět řidiče podle aktuální situace. Kromě synchronizace, která sama o sobě může přinést značné zvýšení intenzity, umožňuje technologie výrazně snížit bezpečnostní odstup mezi vozidly při zachování rychlosti jízdy, čímž se opět zvedne intenzita. Předpokládá se, že na dálnici by tato technologie mohla přinést až trojnásobné zvýšení kapacity a není důvod se domnívat, že v oblasti spojování jízdních pruhů by měla být neefektivní, spíše zde lze očekávat ještě větší rozdíl.

Efektivita technologie už z principu jejího fungování významně roste s tím, jak roste počet vozidel, které jsou jí vybaveny. Zároveň nelze očekávat, že dosáhne plné efektivity ve chvíli, kdy bude pouze dávat řidiči varování, případně rady, jak se chovat. Technologie navíc ani ještě není nikde schválená, nejblíže k tomu je v USA, kde byla snaha ji zavést povinně do všech nově vyráběných vozů, zatím však nedošlo ke schválení a není ani jasné, od jakého roku by nařízení platilo.

Z výše uvedeného jasně vyplívá, že technologie V2V není metodou použitelnou v nejbližších letech, nicméně při jejím vývoji a aplikaci by bylo vhodné zvážit její možné přínosy i v oblasti spojování dopravních proudů například schválením větší autonomie v takových situacích. Samozřejmě by bylo též nutné technologii rozšířit o schopnost v těchto situacích efektivně vyhodnocovat data z okolních vozidel a použít je k vzájemné synchronizaci. Vzhledem k možným přínosům by ale zřejmě stálo za to brát existenci technologie na zřetel a umožnit její rozvoj a aplikaci v řízení dopravního proudu.

6 MIKROSIMULACE

Rozvoj výpočetní techniky v posledních letech umožnil poměrně efektivně nasimulovat mnoho jevů a problémů matematickým modelem. Toho lze s výhodou využít kromě jiného k testování hypotéz. Výsledky simulace nelze považovat za rovné praktickému experimentu, nicméně mohou nám dát určitou více či méně přesnou představu, na základě které je možné se rozhodnout buď provést praktický experiment, nebo rovnou označit hypotézu za neplatnou. Výstupy simulací jsou úzce spjaty se vstupními daty, jejichž kvalita determinuje kvalitu výstupu. Pokud chceme získat výsledky blízké realitě, je nutné zadat na vstupu co nejpřesnější data a případně provést kalibraci modelu.

V dopravním inženýrství se simulace využívají k simulacím dopravního proudu. Rozlišujeme tři základní typy simulací dopravního proudu podle jejich detailnosti a rozsahu modelu – mikro-, meso- a makrosimulace [20]. Makrosimulace slouží pro rozsáhlé simulace na úrovni měst, regionů a i celých států. Jejich detailnost je však značně omezená, slouží zejména k vyhledávání významných dopravních proudů a optimalizaci dopravní infrastruktury. Nízká detailnost však neznamená menší množství vstupních dat, naopak k dosažení relevantních výsledků je potřeba mnohdy dlouhodobých průzkumů a sledování dopravní poptávky. Na opačném konci spektra stojí mikro-simulace, které jsou vhodné pro simulaci omezeného území – křižovatky, bloku, maximálně několika desítek ulic. Tyto simulace se detailně zaobírají interakcí jednotlivých vozidel. Jsou založeny na mikroskopických modelech dopravního proudu založených na nelineárním CFM, berou tedy v úvahu skutečnou podobu komunikace a vlastnosti vozidla i jeho řidiče. Jsou však také velmi závislé na kvalitně vytvořeném modelu a přesných vstupních datech, bez nichž jsou výstupy velmi nepřesné. Proto je nutná kalibrace takových modelů. Mesosimulace pak stojí uprostřed mezi makro- a mikrosimulacemi a z obou extrémů si něco berou. Podobně jako mikrosimulace sledují chování jednotlivých vozidel, nicméně v souladu s makroskopickými modely jejich chování zobecňují.

Obecně platí, že volba modelu závisí na rozsahu modelované oblasti. Při zkoumání rozsáhlých oblastí není reálné tvořit tak detailní model, jaký je vyžadován pro mikrosimulace. Nicméně se zvětšujícím se rozsahem modelu je možné snižovat jeho detailnost a zanedbat mnohé aspekty, například uspořádání křižovatek či z modelu zcela vypustit méně významné komunikace.

K zadávání vstupních dat mají modely dva přístupy. Deterministický, který u zadávaných parametrů neuvažuje žádné odchylky od zadané hodnoty a zanedbává odchylky, které se v reálném provozu vyskytují; naproti tomu stochastické modely uvažují s rozptylem hodnot v daných mezích s určitou pravděpodobností konkrétních hodnot, případně uvažují s pravděpodobností určitých jevů.

Vzhledem k povaze a rozsahu zkoumané oblasti v této práci, jedinou relevantní možností pokusit se o namodelování situace je mikrosimulace. Pro ni byl zvolen software AIMSUN.

6.1 SIMULAČNÍ SOFTWARE AIMSUN

Aimsun je jedním z běžně používaných software pro simulaci dopravního proudu. Je založen na Gippsově modelu bezpečné vzdálenosti [21]. Je však modifikován tak, že jednotlivé parametry modelu nejsou globální, ale jsou ovlivňovány lokálními parametry jako vlastnosti řidiče, geometrie, vliv vozidel v sousedních pruzích atd.

Model je založen na dvou protichůdných požadavcích akcelerace a decelerace. Akcelerace vyjadřuje požadavek vozidla na dosažení jím požadované rychlosti v daném úseku komunikace. Proti tomuto požadavku působí omezení daná předcházejícím vozidlem.

6.1.1 Výpočet rychlosti vozidla

Tento model říká, že maximální rychlost, které je vozidlo *i* schopné dosáhnout v čase *t+T*, která je dále použita jako konstantní v intervalu $(t, t+T)$ je dán vzorcem

$$V_{a,i}(t+T) = V_i(t) + 2{,}5 * a_i * T * \left(1 - \frac{V_i(t)}{V'_i}\right) * \sqrt{0{,}025 + \frac{V_i(t)}{V'_i}} \qquad (5.1)$$

kde $V_{a,i}(t+T)$ je rychlost vozidla *i* v čase *t+T* [m/s]
$V_i(t)$ je rychlosti vozidla *i* v čase *t* [m/s]
V'_i je požadovaná rychlost vozidla *i* v daném úseku komunikace [m/s]
a_i je maximální akcelerace vozidla *i* [m/s^2]
T je reakční čas [s]

Při zahrnutí omezení akcelerace daných vlivem předcházejícího vozidla dostává vzorec podobu:

$$V_{b,i}(t+T) = d_i * T + \sqrt{d_i^2 * T^2 - d_i * \left\{2 * [x_{i-1}(t) - s_{i-1} - x_i(t)] - V_i(t) * T - \frac{V_{i-1}^2(t)}{d'_{i-1}}\right\}} \qquad (5.2)$$

kde $V_{b,i}(t+T)$ je rychlost vozidla *i* v intervalu *t+T* [m/s]
d_i (< 0) je maximální decelerace požadovaná vozidlem *i* [m/s^2]
$x_i(t)$ je pozice vozidla *i* v čase *t* [m]
$x_{i-1}(t)$ je pozice předcházejícího vozidla *i-1* v čase *t* [m]
s_{i-1} je efektivní délka vozidla *i-1* [m]
$V_i(t)$ je rychlosti vozidla *i* v čase *t* [m/s]
$V_{i-1}(t)$ je rychlosti vozidla *i-1* v čase *t* [m/s]
d'_{i-1} je decelerace předcházejícího vozidla *i-1* odhadnutá vozidlem *i*
T je reakční čas [s]

Výsledná rychlost vozidla i v intervalu $(t, t+T)$ je potom

$$V_i(t+T) = \min\{V_{a,i}(t+T);\ V_{b,i}(t+T)\} \qquad (5.3)$$

Tato rychlost vozidla *i* se potom použije při výpočtu nové polohy vozidla *i* v jízdním pruhu dosazením do pohybové rovnice

$$x_i(t+T) = x_i(t) + V_i(t+T) * T \qquad (5.4)$$

6.1.2 Odhad decelerace předchozího vozidla

V předchozích verzích modelu v4.1 a v4.2 byla decelerace odhadována jako její skutečná hodnota, respektive jako průměr skutečných decelerací vozidla *i* a předcházejícího vozidla *i-1*. Ve verzi v4.1 měla vozidla tendenci jezdit příliš blízko předcházejícímu

vozidlu, což model verze v4.2 částečně eliminoval. Model v6.0 představil nový způsob výpočtu odhadu decelerace pomocí parametru a – citlivost. Odhad decelerace pak vychází ze vzorce

$$d'_{i-1} = d_{i-1} * a \tag{5.5}$$

Pokud je parametr $a > 1$, vozidlo přeceňuje deceleraci vozidla předcházejícího, je opatrnější a zvětšuje svůj odstup od předcházejícího vozidla. Naopak, pokud $a < 1$, vozidlo podceňuje deceleraci předcházejícího vozu, je agresivnější a snižuje svůj odstup.

Model v6.0 zároveň představil minimální časový odstup od předcházejícího vozidla jako nový prvek pro výpočet decelerace. Tato podmínka se aplikuje před změnou polohy a rychlosti vozidla dle vzorce (5.4). Podmínka minimálního odstupu je definována následovně:

$$\begin{aligned} &\text{Jestliže} && [x_{i-1}(t+T) - s_{i-1}] - [x_i(t) + V_i(t+T) * T] < \\ & && < V_i(t+T) * minHW_i \\ &\text{potom} && V_i(t+T) = \frac{[x_{i-1}(t+T) - s_{i-1}] - x_i(t)}{minHW_i + T} \end{aligned} \tag{5.6}$$

kde $x_i(t)$ je pozice vozidla *i* v čase *t* [m]
$x_{i-1}(t+T)$ je pozice vozidla *i-1* v čase *t*+*T* [m]
s_{i-1} je efektivní délka vozidla *i-1* [m]
$V_i(t+T)$ je rychlosti vozidla *i* v čase *t*+*T* [m/s]
$minHW_i$ je minimální časový odstup vozidla *i* od předcházejícího vozidla [s]
T je reakční čas [s]

6.1.3 Požadovaná rychlost vozidla

Model je definován tak, že vozidla se snaží pohybovat maximální rychlostí, kterou jsou ochotna v daném úseku komunikace akceptovat – požadovanou rychlostí vozidla v daném úseku $v_{max,i,s}$, která odpovídá rychlosti V'_i v rovnici (5.1). Touto rychlostí se po jejím dosažení pohybují vedoucí vozidla, která nejsou omezována vozidlem předcházejícím. Požadovaná rychlost vozidla v daném úseku vychází ze tří parametrů:

1. Maximální požadovaná rychlost vozidla *i*: $v_{max,i}$
2. Akceptace rychlostních limitů (speed acceptance) vozidlem *i*: θ_i
3. Rychlostního limitu v daném úseku komunikace *s*: $v_{lim,s}$

Rychlostní limit vozidla v daném úseku se spočítá jako

$$v_{lim,i,s} = v_{lim,s} * \theta_i \tag{5.7}$$

Požadovaná rychlost vozidla v úseku komunikace je potom dána:

$$v_{max,i,s} = \min\{v_{lim,i,s};\ v_{max,i}\} \tag{5.8}$$

6.2 CÍLE SIMULACE

Cílem simulace bylo velmi zjednodušeně ověřit funkčnost hypotézy popsané v kapitole 5.2, týkající se zvýšení kapacity v místech, ve kterých dochází ke spojování dopravních proudů. Vzhledem k tomu, že kalibrace modelu značně převyšuje zadání a rozsah této práce, která si ani neklade za cíle ověřit funkčnost navržených opatření, nelze brát dosažené výsledky jako směrodatné. Parametry vozidel byly nastaveny odhadem dle zkušenosti, na základě některých dat v literatuře a na základě předpokládaného chování řidičů. Pro získání určité představy o možnostech reálného fungování tohoto systému by však mohla postačovat.

6.3 PODOBA A NASTAVENÍ MODELU

Pro simulaci byl vytvořen model místa spojení dvou jízdních pruhů. Protože semafory lze umístit pouze do křižovatky, model byl vytvořen z několika částí v následujícím pořadí:

1. Příjezdový dvoupruhový úsek, do kterého přijíždí vozidla a ve kterém se tvoří kolona. V úseku je zakázané předjíždění.
2. „Křižovatka“ se semaforem pro každý pruh.
3. 50m spojovací úsek. V jeho první části je znemožněno přejíždění z pruhu do pruhu.
4. Odjezdový jednopruhový úsek, ve kterém vozidla akcelerují a odjíždí pryč.

V modelu byla zjednodušeně uvažována pouze osobní vozidla. Nastavení jejich parametrů je uvedeno v tabulce 6.1.

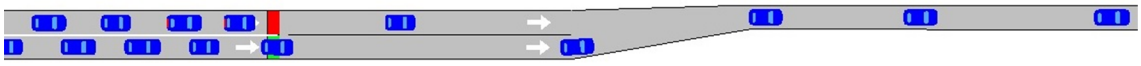
Tab. 6.1 Použité nastavení modelového vozidla v simulačním software Aimsun.

Name	Mean	Deviation	Min	Max	Units
Length	4	0,5	3,4	4,6	m
Width	2	0	2	2	m
Max Desired Speed	110	10	80	150	km/h
Max Acceleration	2,8	0,5	2	3,5	m/s^2
Normal Deceleration	3,5	0,25	3	4,5	m/s^2
Max Deceleration	6	0,5	5	7	m/s^2
Speed Acceptance	1,1	0,1	0,9	1,3	-
Min Distance Veh	1	0,4	0,5	2	m
Give Way Time	10	2,5	5	15	s
Guidance Acceptance	75	10	65	90	%
Sensitivity Factor	1	0,05	0,9	1,1	-
Minimum Headway	1,5	0,4	0,8	2,2	s

Kromě nastavení vozidla je zásadní také nastavení reakční doby řidiče. Tato doba byla nastavena na 0,8 s jak pro reakce při jízdě, tak pro reakce na semaforech. Lze očekávat, že ve skutečnosti by byla reakce na semaforech rychlejší, protože světla se mění rychle a pravidelně, proto by řidiči byli připraveni vyrazit vzápětí po rozsvícení zelené. Aimsun však neumožňuje nastavit reakční domu na semaforech nižší, než v provozu.

Klíčovým pro funkčnost celého systému, ale také samotné simulace je nastavení semaforů. Jako vhodné se alespoň v simulaci ukázalo střídat na obou semaforech červenou a

zelenou ve 2s intervalech. Tedy vždy v jednom pruhu zelená, ve druhém červená. Tento interval umožňuje průjezd právě jednoho vozidla, což je podmínkou pro optimální fungování systému. Výsledkem jsou pravidelné zhruba dvousekundové rozestupy mezi vozidly, které umožňují pravidelné a plynulé zipování v místě hrdla při vysoké rychlosti. Dvouvteřinové odstupy teoreticky determinují intenzitu 1800 voz/h. Tomu odpovídají i výsledky simulace, kde bylo naměřeno 1812 voz/h. Pravděpodobně několikrát projela dvě vozidla na jednu zelenou. Vzhledem k nastavení a podobě modelu byla intenzita počítána jako rozdíl počtu vozidel, která modelem projela za celou simulovanou hodinu a vozidly, která projela během první půl hodiny. Celkový počet vozidel, která modelem během simulované hodiny provozu projely, byl zatížen chybou, jelikož několik minut trvá, než první vozidlo projede na konec modelu a další čas zabere vytvoření kolony.



Obr. 6.1 Snímek z průběhu simulace zachycuje plynulé řazení vozidel v místě spojování pruhů.

Simulační software neumožňuje nastavovat semafory po desetinách sekundy, je však možné, že při nastavení intervalu ještě o několik desetin kratšího by vedlo ke zvýšení intenzity při zachování plynulosti zipování. Jaký časový interval se na semaforech nastaví, teoreticky závisí pouze na reakcích řidičů a na naší ochotě snižovat časové odstupy mezi vozidly. Při nastavení cyklu 2 s (střídání barev po 1 s) však modelová vozidla nestíhala na zelenou projet ani při nastavení reakční doby 0,5 s.

6.4 ZÁVĚRY SIMULACE

Simulace s výše popsaným nastavením prokázala, že popsaný systém by mohl fungovat i ve skutečnosti, problémem je však validita nastavení simulačního modelu, který nebyl kalibrován. Přesto lze však do simulovaného systému vkládat naděje, protože i při drobných změnách nastavení se jeho funkčnost zachovala. Jako kritické se ukázalo nastavení reakční doby řidiče. Při nastavení 1 s se vozidla začala po určité době opět hromadit před hrdlem, protože vozidla při spojování začala brzdit. Pravděpodobným důvodem je to, že při spojování už berou vozidlo, které se řadí před nimi podobně jako vozidlo ve svém pruhu a v souladu s modelem se snaží zachovat odstup, který je ovlivněn kromě jiného právě reakční dobou. Použitý model chování řidiče však nemusí odpovídat chování skutečného řidiče při zipování, proto ani toto omezení není nutné brát jako příliš omezující.

7 ZÁVĚR

Na začátku práce jsou popsány základní charakteristiky dopravního proudu – hustota, rychlost a intenzita. Hledáním závislostí mezi těmito veličinami se zabývá teorie dopravního proudu. Několik nejběžnějších modelů je popsáno. Se spojováním jízdních pruhů úzce souvisí pravidlo zipu popsané v zákoně č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích (silniční zákon), které je popsáno a je zmapováno jeho dodržování řidiči v praxi.

Hlavní část práce tvoří popis a analýza dopravního průzkumu prováděného ve zvolené lokalitě na ulici Žabovřeská v Brně. Měření bylo zaměřeno na základní veličiny dopravního proudu – hustotu, rychlost a intenzitu. Kromě nich však byly prováděny záznamy délky kolony a bylo pozorováno chování vozidel v oblasti spojování dopravních proudů.

Na základně měření je možné udělat několik závěrů:

- Nejvýznamnějším výsledkem práce je prokázání toho, že maximální intenzity lze dosáhnout před vznikem kolony. Na základě tohoto zjištění byly navrženy možnosti ovlivnění dopravního proudu tak, aby došlo k navýšení kapacity hrdla v době, kdy v současnosti dojde k vytvoření kolony, následkem čehož klesne kapacita. Jednou z navržených variant je omezování rychlosti před místem spojování pruhů, které bylo testováno pro použití na dálnici. Druhou, spíše vizionářskou variantou je aplikace vyvíjeného systému vehicle-to-vehicle, který umožnuje sdílení informací o poloze, směru a rychlosti mezi vozidly. Třetí variantou je odsunutí začátku kolony dál od samotného hrdla a řízení intenzity a hustoty vozidel přijíždějících k hrdlu pomocí světelné signalizace. Tím umožníme zipování jako by kolona nebyla, čímž zvýšíme kapacitu a pouštění vozidel v pravidelných intervalech umožní zvýšit intenzitu bez toho, že by došlo k opětovnému vzniku kolony bezprostředně před hrdlem.
- Stání v kolonách generuje majitelům či uživatelům vozidel značné nepřímé finanční ztráty způsobené ztrátou času. V tomto konktním případě spojení jízdních pruhů na ulici Žabovřeská se odhad ztrát pohybuje mezi 35 a 100 mil. Kč/rok v závislosti na tom, jak dlouhé uvažujeme trvání kolony a jakou předpokládáme její průměrnou délku. Skutečné ztráty se zřejmě pohybují někde uprostřed tohoto rozpětí.
- Intenzity uvedené v ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic jako kapacita komunikace se zdají být podhodnocené. Udávané hodnoty hustoty pro jednotlivé stupně ÚKD platí pouze pro rychlost 90 km/h, při nižší dovolené rychlosti je však kapacity dosahováno při vyšších hustotách. Na tuto normu se odvolává také norma ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací, neudává však očekávanou kapacitu pro návrhové rychlosti menší než 70 km/h s odůvodněním, že na městských komunikacích mimo funkční skupinu A je kapacita daná křižovatkami. Podhodnocení kapacity však může být záměrné kvůli zajištění rezervy.
- Negativní vliv na kapacitu mají přechody umístěné v blízkosti spojení pruhů. Chodci mohou být katalyzátorem vzniku kolony a s jejich rostoucí intenzitou se zvyšuje jejich vliv na kapacitu komunikace v době trvání kolony.
- Do určité délky kolony (zhruba 100 – 200 m) se vozidla řadí rovnou do průběžného pruhu a z neprůběžného se do něj zipují pouze vozidla z pruhu připojovacího. Po vytvoření kolony v obou pruzích tento připojovací pruh nepříznivě

ovlivňuje rychlost dopravního proudu v přilehlém neprůběžném pruhu. Následkem toho se více vozidel snaží zařadit do průběžného pruhu dříve, než přikazuje zákon a než je žádoucí pro optimální fungování zipu.

- Značný vliv na intenzitu v místě hrdla v době trvání kolony má dodržování pravidla zipu řidiči a neméně významná je jejich pozornost a reakční doba při řazení do průběžného pruhu. Dalším významným faktorem, který však nelze příliš ovlivnit, je poměr nákladních vozidel, která svými rozměry a pomalou akcelerací narušují pravidelnost a plynulost zipování.

Největším přínosem práce je zjištění, že existuje prostor pro navýšení kapacity v místě spojování jízdních pruhů. Bylo navrženo několik variant řízení dopravního proudu, které by mohly přispět k navýšení kapacity. Ověření jejich efektivity je námětem pro další výzkum. Zpracovaná simulace však naznačila, že řízení SSZ by mohlo být efektivní, avšak nebyla dostatečně kalibrována, aby na jejím základě šlo dělat definitivní závěry. Také se podařilo vyčíslit odhad ztrát, které za rok způsobí řidičům čekání v koloně. To může být signálem pro příslušné orgány taková místa urychleně odstranit. Kromě toho se podařilo ověřit některé předpoklady ohledně chování dopravního proudu.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] HOLCNER, Petr. *Modelování a simulace dopravního proudu*. Brno, 2012. Habilitační práce. FAST VUT.

[2] OLSTAM, Johan Janson a Andreas TAPANI. *Comparison of car-following models*. Linköping, 2004. Dostupné z: http://www.vti.se/en/publications/pdf/comparison-of-car-following-models.pdf

[3] ČESKO. Zákon č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích § 12 odst. 5. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2013. Dostupné z: http://www.zakonycr.cz/seznamy/361-2000-Sb-zakon-o-provozu-na-pozemnich-komunikacich-a-o-zmenach-nekterych-zakonu.html

[4] ČESKO. Zákon č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích § 12 odst. 3. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2013. Dostupné z: http://www.zakonycr.cz/seznamy/361-2000-Sb-zakon-o-provozu-na-pozemnich-komunikacich-a-o-zmenach-nekterych-zakonu.html

[5] ŠVEC, Petr. Ani za 12 let se řidiči nenaučili pravidlo zipu. [online]. 17.2.2012 [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/ani-za-12-let-se-ridici-nenaucili-pravidlo-zipu-fam-/automoto.aspx?c=A111208_1697523_ak_aktual_sko

[6] AUSTRÁLIE. Zákon 1999.219 Australian Road Rules reg. 148,149. 2014. Dostupné z: http://www.legislation.sa.gov.au/lz/c/r/australian%20road%20rules/current/1999.219.un.pdf

[7] ČSN 73 6101. *Projektování silnic a dálnic*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[8] ČSN 73 6110. *Navrhování městských komunikací*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

[9] ŘSD ČR. *Velký městský okruh Brno* [online]. © 2012–2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.mestsky-okruh-brno.cz/

[10] www.sierzega.com [online]. 2013 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: http://www.sierzega.com/

[11] *Brochure Traffic Detection 2010 - English*. Austria, 2010. Dostupné z: http://www.sierzega.com/LinkClick.aspx?fileticket=14-Q4tWbSIE%3d&tabid=71&mid=501&language=en-US

[12] mapy.cz [online] . Dostupné z: http://www.mapy.cz/

[13] *GPS Visualizer* [online]. ©2003-2013 [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: http://www.gpsvisualizer.com/

[14] HDM-4. *Prováděcí pokyny pro hodnocení ekonomické efektivnosti projektů silničních a dálničních staveb: Příloha C - 2012*. ŘSD ČR, prosinec 2012. Dostupné z: http://www.rsd.cz/rsd/rsd.nsf/a3eda25d005dc6bec125737e0045602e/f6965540595261bdc1257b2500335a23/$FILE/Priloha%20C%20-%202012.pdf

[15] Celostátní sčítání dopravy 2010. *Ředitelství silnic a dálnic ČR* [online]. 2011 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: http://scitani2010.rsd.cz/pages/map/default.aspx

[16] APELTAUER, Tomáš. *Mikroskopické modely dopravy v pracovních zónách*. Brno, 2013. Habilitační práce. FAST VUT.

[17] CAMBRIDGE SYSTEMATICS INC. *Twin cities ramp meter evaluation*. USA, 1.2.2001. Dostupné z: http://www.dot.state.mn.us/rampmeter/pdf/executivesummary.pdf

[18] Ramp Meters. *Washington State Department of Transportation* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-22]. Dostupné z: http://www.wsdot.wa.gov/Traffic/Congestion/rampmeters/

[19] V2V: What are vehicle-to-vehicle communications and how do they work?. *Extremetech* [online]. 2.6.2014 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: http://www.extremetech.com/extreme/176093-v2v-what-are-vehicle-to-vehicle-communications-and-how-does-it-work

[20] KŘIVDA, Vladislav, Václav ŠKVAIN. *Městské komunikace a křižovatky: Učební texty: Modelování v dopravě* [online]. 2011-2013 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://kds.vsb.cz/mkk/

[21] TSS - TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS. *Microsimulator and Mesosimulator Aimsun 6.1 User's Manual*. December 2010.

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Tabulka ÚKD dle ČSN 73 6101 udávající limitní hustoty vztažené k oběma směrům obousměrné dvoupruhové komunikace. V závorce jsou hustoty přepočtené na jeden jízdní pruh. 24

Tab. 4.1 Tabulka hustot spočítaných z fotografií pořízených kvadrokoptérou. 33

Tab. 4.2 Tabulka hustot odečtených z leteckých fotografií na mapy.cz. Písmena S, Z a V označují směr pohledu. 34

Tab. 4.3 Ruční měření rychlosti dopravního proudu v úseku 240 – 100 m před místem spojení. 42

Tab. 4.4 Ruční měření rychlosti dopravního proudu v úseku 760 – 600 m před místem spojení. 42

Tab. 4.5 Časová synchronizace radarů. 44

Tab. 4.6 Tabulka intenzit naměřených jednotlivými radary doplněná o kontrolní měření pro kontrolu validity měření. Hodnoty intenzity jsou uvedeny jako počet vozidel za 15 minut. 44

Tab. 4.7 Výpočet intenzity uvažované jako skutečná intenzita v daném časovém intervalu. 45

Tab. 4.8 Ruční měření intenzit zaměřené na současnou reálnou kapacitu hrdla v době trvání kolony. Při prvním měření 25. 8. 2013 byl použit delší patnáctiminutový interval měření oproti pozdějším 10 minutám. Ve čtvrtém sloupci je intenzita počítána jako násobek počtu vozidel v daném intervalu, v pátém sloupci je pak průměrná intenzita za celé měření. V průměrné intenzitě uvedené na konci tabulky jsou zahrnuta pouze měření uvedená v této tabulce. 46

Tab. 4.9 Naměřené intenzity v době okolo vzniku kolony při měření v pátek 18. 4. 2014 zpracované metodou pro hledání teoretické kapacity. Hodnoty jsou získávány násobením minutových intenzit. 48

Tab. 4.10 Naměřené intenzity v době okolo vzniku kolony při měření v Pátek 18. 4. 2014 zpracované metodou pro výpočet kapacity v době kolony. Hodnoty jsou získávány jako součet vozidel za pět nebo deset minut následně přepočítaný na hodinovou intenzitu. Hodnoty pod tlustou čarou jsou dopočítávány z menšího počtu měření. 49

Tab. 4.11 Tabulka krátkodobých intenzit zaznamenaných při měření 5. 5. 2014 zpracovaná metodou pro hledání teoretické kapacity. 50

Tab. 4.12 Naměřené délky kolny v jednotlivých pruzích. Pro všechny pruhy včetně odbočovacího je vzdálenost měřena od uvažovaného místa spojení jízdních pruhů. 51

Tab. 6.1 Použité nastavení modelového vozidla v simulačním software Aimsun. 62

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Obecný fundamentální diagram závislosti rychlosti a hustoty [1]. Od tohoto diagram se přímo odvozují diagramy uvedené na obr. 1.2 a 1.3. 14

Obr. 1.2 Obecný fundamentální diagram závislosti intenzity a hustoty. [1] 14

Obr. 1.3 Obecný fundamentální diagram závislosti intenzity a rychlosti. [1] 15

Obr. 1.4 Fundamentální diagramy podle Greenshieldsova modelu pro maximální rychlost odpovídající zkoumanému úseku komunikace (viz kapitola 3.1) a naměřené hustotě (viz kapitola 4.1). 16

Obr. 1.5 Fundamentální diagramy modelu konstantního časového odstupu. Zároveň odpovídají i fundamentálním diagramům lineárního car-following modelu. 17

Obr. 1.6 Fundamentální diagramy nelineárního CFM pro konstantu c = 50 km/h a maximální hustotu ρ_{max} = 120 voz/km bez omezení rychlosti a při omezení rychlosti na v_{max} = 60 km/h. 20

Obr. 1.7 Srovnání fundamentálních diagramů Greenshieldsova modelu, modelu konstantního časového odstupu respektive lineárního CFM a nelineárního CFM. 21

Obr. 2.1 Varianty spojování jízdních pruhů v Austrálii. [6] 24

Obr. 3.1 Letecký pohled na hlavní část zkoumané lokality a její popis. 26

Obr. 3.2 Detail uvažovaného místa spojení dopravních proudů. 27

Obr. 3.3 Předpokládané fundamentální diagramy za místem spojení dopravních proudů. 28

Obr. 3.4 Radar SIERZEGA SR4. [10] 28

Obr. 3.5 Poloha měřených profilů při měření rychlosti radary. 29

Obr. 3.6 Poloha měřených úseků při ručním měření rychlosti. 31

Obr. 4.1 Foto 203 z kamery umístěné na kvadrokoptéře použité pro výpočet hustoty proudu. 33

Obr. 4.2 „Ptačí pohled“ ve směru na západ. [12] 34

Obr. 4.3 Závislost lokální hustoty na vzdálenosti od hrdla odvozená z naměřené rychlosti a intenzity. Modře nereálný průběh odvozený z dat všech radarů, která jsou zatížena chybou. Červeně realističtější průběh odvozený z rychlostí zobrazených v grafu na obr 4.5, pro jehož vykreslení byla použita pouze data z radarů 4 a 5, které zachytily většinu vozidel a rychlost v koloně naměřená plovoucím vozidlem. V grafu jsou popsány polohy jednotlivých radarů, radar 1 je v uvažovaném místě spojení pruhů ve staničení 0,000 km (viz kapitola 3.1). Hustota v hrdle vychází nerealisticky vysoká, protože pro rychlosti blízké nule roste při použití vzorce (1.2) hustota k nekonečnu. ... 35

Obr. 4.4 Graf průběhu rychlosti dopravního proudu za místem spojení vynesený z radarových dat doplněných o rychlost dopravního proudu v koloně převzatou z měření plovoucím vozidlem. Poloha radarů platí i pro obr. 4.5 a 4.6. 36

Obr. 4.5 Realističtější graf průběhu rychlosti dopravního proudu za místem spojení vynesený pouze z průměrných rychlostí zaznamenaných radary 4 a 5 a z průměrné

rychlosti kolony. Popis zadaných bodů grafu je totožný s obr. 4.4, pouze jsou vynechány radary 1 – 3. 37

Obr. 4.6 Grafy průběhu rychlosti dopravního proudu za místem spojení pruhů bez vlivu respektive s vlivem chodců na druhém přechodu (u radaru 4). Popis zadaných bodů (poloha radarů) grafu je stejný jako v obr. 4.4. Průběh průměrné rychlosti s vlivem chodců (černá, čárkovaná) je totožný s grafem na obr. 4.4. 38

Obr. 4.7 Závislost rychlosti na hustotě dopravního proudu získaná z rychlostí a intenzit naměřených radary 4 a 5 a z rychlosti v koloně. 38

Obr. 4.8 Průběh rychlosti plovoucího vozidla v době kolony v úseku mezi Královopolskými tunely a MÚK Hlinky. Barevná škála zobrazení rychlosti je shodná se zobrazením v grafu rychlost – čas (speed – time) na obr. 4.9. 39

Obr. 4.9 Graf průběhu rychlosti v závislosti na čase. 40

Obr. 4.10 Graf průběhu rychlosti v závislosti na ujeté vzdálenosti. 40

Obr. 4.11 Průběh délky kolony 10. 3. 2014. 53

Obr. 4.12 Průběh délky kolony 7. 3. 2014. 53

Obr. 6.1 Snímek z průběhu simulace zachycuje plynulé řazení vozidel v místě spojování pruhů. 63

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

VMO – velký městský okruh
CFM – car-following model
ÚKD – úroveň kvality dopravy
MÚK – mimoúrovňová křižovatka
SSZ – světelné signalizační zařízení
V2V – vehicle-to-vehicle
ρ– hustota dopravního proudu
v – rychlost dopravního proudu
q – intenzita dopravního proudu
x – poloha vozidla
t – čas
s – dráha
v_{max} – maximální rychlost
ρ_{max} – maximální hustota
Δt – časový odstup
d_{min} – minimální odstup čel následujících vozidel
T – reakční doba
λ – citlivost interakce následujících vozidel
d – integrační konstanta s rozměrem rychlosti
c – konstanta
a – zrychlení
Δs – relativní vzdálenost následujících vozidel
Δv – relativní rychlost následujících vozidel
v_{qmax} – rychlost dopravního proudu při maximální intenzitě
Z – finanční ztráta způsobená čekáním v koloně
t_w – čas strávený vozidlem v koloně
q_t – podíl těžkých nákladních vozidel
q_s – podíl středních nákladních vozidel
q_o – podíl osobních vozidel
p_t – hodnota času těžkých nákladních vozidel
p_s – hodnota času středních nákladních vozidel
p_o – hodnota času osobních vozidel
d – maximální decelerace požadovaná vozidlem
d' – odhad decelerace vozidla vozidlem následujícím
a – citlivost odhadu decelerace předchozího vozidla
s – efektivní délka vozidla
minHW – minimální časový odstup od předchozího vozidla
θ – úroveň akceptace (dodržování) rychlostních limitů
v_{lim} – dovolená rychlost v daném úseku komunikace

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha A – Tabulka minutových intenzit v době okolo doby vzniku kolony z měření 5. 5. 2014 zpracovaná metodou pro hledání teoretické kapacity
- Příloha B – Tabulka minutových intenzit v době okolo doby vzniku kolony z měření 5. 5. 2014 zpracovaná metodou pro výpočet reálných intenzit
- Příloha C – Soubor se simulačním modelem programu Aimsun ve formátu .ang (uloženo na přiloženém CD)
- Příloha D – Soubor s použitou částí GPS měření plovoucím vozidlem ve formátu .gpx (uloženo na přiloženém CD)
- Příloha E – Tabulky záznamů z radarů 1 – 5 ve formátu .xlsx (uloženo na přiloženém CD)

PŘÍLOHA A

Tabulka minutových intenzit v době okolo doby vzniku kolony z měření 5. 5. 2014 zpracovaná metodou pro hledání teoretické kapacity

Vozidel za interval				Poznámky
1 min	5 min	10 min	1 hod	
26	130	260	1560	
28	140	280	1680	26 voz/45 s
22	110	220	1320	
28	140	280	1680	27 voz/50 s
16	80	160	960	
21	105	210	1260	
19	95	190	1140	
25	125	250	1500	
28	140	280	1680	mezery
33	165	330	1980	
30	150	300	1800	
26	130	260	1560	ucpáno
27	135	270	1620	
23	115	230	1380	
19	95	190	1140	uvolněno
20	100	200	1200	
25	125	250	1500	13 voz/20 s
27	135	270	1620	
26	130	260	1560	ucpáno
24	120	240	1440	uvolněno
21	105	210	1260	
25	125	250	1500	10 voz/15 s
17	85	170	1020	
16	80	160	960	
22	110	220	1320	
24	120	240	1440	
19	95	190	1140	
14	70	140	840	
23	115	230	1380	
26	130	260	1560	chodci
23	115	230	1380	chodci
26	130	260	1560	chodci
13	65	130	780	
23	115	230	1380	
17	85	170	1020	
23	115	230	1380	
14	70	140	840	
24	120	240	1440	

Vozidel za interval				Poznámky
1 min	5 min	10 min	1 hod	
27	135	270	1620	
18	90	180	1080	
25	125	250	1500	
17	85	170	1020	
20	100	200	1200	
23	115	230	1380	
19	95	190	1140	
30	150	300	1800	20 voz/35 s; nákl. vozy; mezery
21	105	210	1260	
17	85	170	1020	
29	145	290	1740	24 voz/45 s
20	100	200	1200	
17	85	170	1020	
19	95	190	1140	
18	90	180	1080	
17	85	170	1020	
22	110	220	1320	7 voz/9 s
21	105	210	1260	
19	95	190	1140	0 voz/15 s
22	110	220	1320	
26	130	260	1560	
26	130	260	1560	
20	100	200	1200	
21	105	210	1260	
17	85	170	1020	0 voz/15 (30) s
16	80	160	960	0 voz/15 (30) s
17	85	170	1020	
20	100	200	1200	
15	75	150	900	
17	85	170	1020	
15	75	150	900	
23	115	230	1380	
13	65	130	780	
15	75	150	900	
23	115	230	1380	
18	90	180	1080	
32	160	320	1920	26 voz/40 s; mezery
23	115	230	1380	chodci

Vozidel za interval				Poznámky
1 min	5 min	10 min	1 hod	
24	120	240	1440	vznik kolony
30	150	300	1800	
29	145	290	1740	zánik kolony
26	130	260	1560	
18	90	180	1080	
31	155	310	1860	nákl. vozy
27	135	270	1620	
21	105	210	1260	
25	125	250	1500	
22	110	220	1320	
23	115	230	1380	
24	120	240	1440	
29	145	290	1740	nákl. vozy
18	90	180	1080	
29	145	290	1740	mezery
28	140	280	1680	mezery
28	140	280	1680	nákl. vozy
21	105	210	1260	chodci
25	125	250	1500	ucpání
30	150	300	1800	vznik kolony
25	125	250	1500	bez kolony
31	155	310	1860	
21	105	210	1260	ucpání
24	120	240	1440	kolona s proměnlivou mírou zipování
32	160	320	1920	
28	140	280	1680	
26	130	260	1560	
24	120	240	1440	
29	145	290	1740	bez kolony; chodci
24	120	240	1440	vznik kolony
27	135	270	1620	
24	120	240	1440	
26	130	260	1560	
29	145	290	1740	
23	115	230	1380	
23	115	230	1380	
22	110	220	1320	
30	150	300	1800	
26	130	260	1560	

Vozidel za interval				Poznámky
1 min	5 min	10 min	1 hod	
25	125	250	1500	
30	150	300	1800	
26	130	260	1560	
23	115	230	1380	
27	135	270	1620	
28	140	280	1680	
22	110	220	1320	
24	120	240	1440	
25	125	250	1500	
27	135	270	1620	kolona 300m
25	125	250	1500	
28	140	280	1680	
18	90	180	1080	chodci
24	120	240	1440	kolona 100 m
31	155	310	1860	
26	130	260	1560	
27	135	270	1620	
27	135	270	1620	
28	140	280	1680	
25	125	250	1500	kolona 250 m

PŘÍLOHA B

Tabulka minutových intenzit v době okolo doby vzniku kolony z měření 5. 5. 2014 zpracovaná metodou pro výpočet reálných intenzit

Vozidel za interval					Poznámky
1 min	5 min	1 hod	10 min	1 hod	
26	120	1440	246	1476	
28	115	1380	250	1500	26 voz/45 s
22	106	1272	248	1488	
28	109	1308	253	1518	27 voz/50 s
16	109	1308	248	1488	
21	126	1512	251	1506	
19	135	1620	250	1500	
25	142	1704	256	1536	
28	144	1728	258	1548	mezery
33	139	1668	256	1536	
30	125	1500	247	1482	
26	115	1380	238	1428	ucpáno
27	114	1368	237	1422	
23	114	1368	227	1362	
19	117	1404	220	1320	uvolněno
20	122	1464	223	1338	
25	123	1476	227	1362	13 voz/20 s
27	123	1476	221	1326	
26	113	1356	208	1248	ucpáno
24	103	1236	205	1230	uvolněno
21	101	1212	207	1242	
25	104	1248	209	1254	10 voz/15 s
17	98	1176	210	1260	
16	95	1140	206	1236	
22	102	1224	213	1278	
24	106	1272	208	1248	
19	105	1260	207	1242	
14	112	1344	202	1212	
23	111	1332	212	1272	
26	111	1332	216	1296	chodci
23	102	1224	208	1248	chodci
26	102	1224	210	1260	chodci
13	90	1080	201	1206	
23	101	1212	208	1248	
17	105	1260	208	1248	
23	106	1272	210	1260	
14	108	1296	217	1302	
24	111	1332	224	1344	

Vozidel za interval					Poznámky
1 min	5 min	1 hod	10 min	1 hod	
27	107	1284	217	1302	
18	103	1236	219	1314	
25	104	1248	221	1326	
17	109	1308	213	1278	
20	113	1356	215	1290	
23	110	1320	213	1278	
19	116	1392	207	1242	
30	117	1404	210	1260	20 voz/35 s; nákl. vozy; mezery
21	104	1248	201	1206	
17	102	1224	199	1194	
29	103	1236	204	1224	24 voz/45 s
20	91	1092	201	1206	
17	93	1116	207	1242	
19	97	1164	210	1260	
18	97	1164	212	1272	
17	101	1212	211	1266	
22	110	1320	210	1260	7 voz/9 s
21	114	1368	205	1230	
19	113	1356	204	1224	0 voz/15 s
22	115	1380	200	1200	
26	110	1320	195	1170	
26	100	1200	184	1104	
20	91	1092	181	1086	
21	91	1092	174	1044	
17	85	1020	168	1008	0 voz/15 (30) s
16	85	1020	174	1044	0 voz/15 (30) s
17	84	1008	176	1056	
20	90	1080	191	1146	
15	83	996	194	1164	
17	83	996	203	1218	
15	89	1068	216	1296	
23	92	1104	230	1380	
13	101	1212	233	1398	
15	111	1332	238	1428	
23	120	1440	254	1524	
18	127	1524	258	1548	
32	138	1656	261	1566	26 voz/40 s; mezery
23	132	1584	254	1524	chodci

Vozidel za interval					Poznámky
1 min	5 min	1 hod	10 min	1 hod	
24	127	1524	253	1518	vznik kolony
30	134	1608	252	1512	
29	131	1572	246	1476	zánik kolony
26	123	1476	246	1476	
18	122	1464	238	1428	
31	126	1512	249	1494	nákl. vozy
27	118	1416	246	1476	
21	115	1380	247	1482	
25	123	1476	247	1482	
22	116	1392	247	1482	
23	123	1476	255	1530	
24	128	1536	257	1542	
29	132	1584	264	1584	nákl. vozy
18	124	1488	256	1536	
29	131	1572	262	1572	mezery
28	132	1584	265	1590	mezery
28	129	1548	265	1590	nákl. vozy
21	132	1584	263	1578	chodci
25	132	1584	266	1596	ucpání
30	131	1572	270	1620	vznik kolony
25	133	1596	264	1584	bez kolony
31	136	1632	266	1596	
21	131	1572	259	1554	ucpání
24	134	1608	264	1584	kolona s proměnlivou mírou zipování
32	139	1668	269	1614	
28	131	1572	260	1560	
26	130	1560	255	1530	
24	128	1536	251	1506	
29	130	1560	257	1542	bez kolony; chodci
24	130	1560	254	1524	vznik kolony
27	129	1548	255	1530	
24	125	1500	258	1548	
26	123	1476	260	1560	
29	127	1524	257	1542	
23	124	1488	255	1530	
23	126	1512	260	1560	
22	133	1596	259	1554	
30	137	1644	261	1566	
26	130	1560	256	1536	

Vozidel za interval					Poznámky
1 min	5 min	1 hod	10 min	1 hod	
25	131	1572	257	1542	
30	134	1608	257	1542	
26	126	1512	255	1530	
23	124	1488	247	1482	
27	126	1512	248	1488	
28	126	1512	252	1512	
22	123	1476	250	1500	
24	129	1548	255	1530	
25	123	1476	258	1548	
27	122	1464	261	1566	kolona 300m
25	126	1512	259	1554	
28	127	1524	260	1560	
18	126	1512	258	1545	chodci
24	135	1620	269	1611	kolona 100 m
31	139	1668	273	1640	
26	133	1596	266	1596	
27	134	1605	268	1605	
27	133	1600	267	1600	
28	133	1590	265	1590	
25	125	1500	250	1500	kolona 250 m
Průměrná intenzita v koloně				1540	