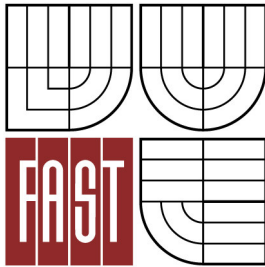


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE INŽENÝRSKÝCH ÚLOH A
INFORMATIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF COMPUTER AIDED ENGINEERING AND
COMPUTER SCIENCE

POPIS CHARAKTERISTIK DOPRAVNÍHO PROUDU DESCRIPTION OF TRAFFIC FLOW CHARACTERISTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Mgr. TOMÁŠ APELTAUER, Ph.D

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Martin Novák
Název	Popis charakteristik dopravního proudu
Vedoucí diplomové práce	Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	16. 1. 2015
V Brně dne 31. 3. 2014	

.....
doc. Ing. Aleš Krejčí, CSc.
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

- APELTAUER T. Generické vlastnosti modelů dopravního proudu. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky, 2010. 133 s., 26 s. příloh. Doktorská práce. Vedoucím práce byl doc. RNDr. Jiří Macur, CSc.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. 2005. Revised Monograph on Traffic Flow Theory.
- HCM2010: highway capacity manual. 2010. 5th ed. Washington, D.C.: Transportation Research Board, ISBN 978-0-309-16077-3.
- Data z měření radary Sierzega, Wavetronix, Asim a Stalker v dispozici VUT v Brně

Zásady pro vypracování

Na základě naměřených dat zkoumejte vztah mezi charakteristikami dopravního proudu, které jsou podstatné např. pro řízení dopravy. Použijte již existující data, která má FAST VUT k dispozici a případně data z vlastních měření. Zohledněte publikované výsledky jiných autorů. Zjistěte, jak danou problematiku řeší jednotlivé mikrosimulační nástroje.

Požadované přílohy:

- Popis použitých dat (termíny a místa měření, použité měřicí přístroje)
- Tabelované a grafické výsledky analýzy dat

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na sledování chování dopravního proudu a ověření či vyvrácení tradičních tzv. fundamentálních vztahů. Konkrétně jde o analýzu dat ze starších měření, z vlastního měření na silnici I/43 a z matematických modelů. Pro modelování bylo použito kromě tří nástrojů, které má Fakulta stavební VUT v Brně k dispozici, také vlastního nástroje založeného na celulárním automatu.

KLÍČOVÁ SLOVA

dopravní proud; fundamentální diagramy; simulace; mikroskopické modely dopravy; celulární automat; jazyk VBA

ABSTRACT

The aim of this thesis is to observe behavior of traffic flow and to verify or refute traditional so called fundamental relationships. It analyzes data based on older measurements, personal measurements executed on the I/43 road, and mathematical models. There were three tools used provided by Brno university of technology as well as own developed tool based on cellular automata.

KEYWORDS

traffic flow; fundamental diagram; simulations; microscopic traffic models; cellular automata; VBA language

NOVÁK, Martin *Popis charakteristik dopravního proudu*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky, 2015. 109 s. Vedoucí práce Doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D

Prohlášení:

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

V Brně dne 13.1.2015

.....
podpis autora
Bc. Martin Novák

Poděkování:

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Mgr. Tomáši Apeltauerovi, Ph.D. za odborné vedení a pomoc s programem GNUplot, Ing. Martinu Všetečkovi za konzultace, podnětné návrhy k práci a pomoc při měření, Ing. Janu Eliášovi, Ph.D. a Ing. Václavu Sadílkovi, Ph.D. za úspořádání kurzu sazby v \LaTeX u a v neposlední řadě mé rodině a mé přítelkyni za jejich trpělivost a podporu, kterou mi poskytovali, nejen při psaní této práce, ale po celou dobu studia.

Vysázeno v \LaTeX 2 ϵ

OBSAH

Úvod	13
1 Dopravní proud	14
1.1 Základní charakteristiky dopravního proudu	15
1.1.1 Rychlost	15
1.1.2 Intenzita	15
1.1.3 Hustota	16
1.2 Základní vztahy mezi charakteristikami dopravního proudu	17
1.2.1 Rovnice kontinuity	17
1.2.2 Fundamentální diagramy	18
2 Teoretické možnosti odstupů	24
2.1 Konstantní časový odstup	24
2.2 Konstantní vzdálenostní odstup	25
2.3 Bezpečný odstup	26
3 Vztah normy k dané problematice	28
3.1 Česká norma navrhování silnic a dálnic	28
3.2 Slovenská norma	29
3.3 Porovnání	30
4 Způsoby sledování dopravního proudu	33
4.1 Získávání těchto charakteristik z měření	33
4.1.1 Měření pomocí mikrovlnných radarů Sierzega	34
4.1.2 Hybridní radary ASIM	34
4.1.3 Měření pomocí plovoucích vozidel	35
5 Hromadné zpracování již naměřených dat	38
5.1 Data z radarů ASIM	41
6 Vlastní měření	44
6.1 Zpracování dat	46
7 Modelování dopravního proudu	52
7.1 Mikrosimulační modely	52
7.1.1 Mikrosimulační model s proměnnou rychlostí	53
7.1.2 Mikrosimulační model s proměnnou intenzitou	54
7.2 Celulární automat	56

7.2.1	Nagelův-Schreckenbergův model	58
7.2.2	Programování CA dle NaSch	61
8	Závěr	65
	Literatura	67
	Literatura	67
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	70
	Seznam příloh	72
A	Programy psané v programovacím jazyce VBA	73
A.1	Kód programu pro třídění dat z radarů Sierzega	73
A.2	Kód programu pro agregaci dat pomocí klouzavého průměru	85
A.3	Kód programu pro simulaci dopravního proudu pomocí CA dle Nagen- Schenkenberga	87
B	Data	96
B.1	Intenzity na radarech	96
B.2	Data k porovnání norem	97
B.3	Data z mikrosimulačních modelů	98
C	Diagramy	102
D	Fotografie	106
E	Elektronické přílohy	109
E.1	Data z radarů Sierzega a ASIM	109
E.2	Programy v jazyce VBA	109
E.3	Grafy vytvořené z dat z radarů pomocí programu Sierzega_GNUPlot.xlsm	109

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Časový odstup mezi vozidly.	16
1.2	Délkový odstup mezi vozidly.	17
1.3	Třídídimenzionální model charakteristik dopravního proudu [11].	18
1.4	Tři po sobě zaznamenané snímky, které použil Greenshields [13].	19
1.5	Fotografie z Greenshieldsova měření [13].	20
1.6	Fundamentální diagramy pro Greenshieldsův lineární model, na kterých je vidět lineární závislost rychlosti v na hustotě ρ . Vychází ze vztahů 1.13 a 1.14, do nichž jsem nastavil $v_0 = 130$ a $\rho_0 = 100$	21
1.7	Fundamentální diagramy dle Traffic flow theory [22].	21
1.8	Fundamentální diagramy dle HCM[7], na kterých jsou vidět dvě fáze, nepřesycený a přesycený dopravní proud.	22
1.9	Fundamentální diagramy dle HCM[7] vypracované na základě skutečného měření v Los Angeles a San Diegu, na kterých je vidět, že do přesáhnutí kapacity nemá intenzita nijak zásadní vliv na rychlost.	22
1.10	Fundamentální diagram z měření na německé dálnici A40, na kterém jsou dobře patrné všechny tři stavy dopravního proudu, ve kterých se může dopravní proud nacházet. Graf převzatý z [8].	23
2.1	Teoretické možnosti odstupů.	24
2.2	Obrázek znázorňující fungování projektu SARTE [14].	25
2.3	Vztah intenzity, hustoty a rychlosti pro různé možnosti odstupů. Časový odstup byl nastaven jako $t = 2$ s a pro vzdálenostní $l = 5$ m. Horní grafy zobrazují to stejné, jen je zvoleno jiné měřítko intenzity. Barvy grafů se schodují s těmi z obrázku 2.1. Zelená je konstantní délkový odstup, modrá konstantní časový odstup a červená bezpečnostní odstup dle ČSN.	27
3.1	Fundamentální diagramy vytvořené na podkladech z normy ČSN 73 6101 a tabulky A.4-1, která udává pro jednotlivé stupně ÚKD průměrnou cestovní rychlost a hustotu dopravy jízdního pásu. Část grafu, která je provedena jako tečkovaná, ovšem není v normě zahrnuta, proto jsem jí dopracoval dle zákonitostí definovaných Greenshieldsem.	28
3.2	Fundamentální diagramy vytvořené na podkladech z normy ČSN 73 6101 a tabulek A.3-2 až A.4-7, které udávají pro návrhové rychlosti jejich mezní kapacity v závislosti na podélném sklonu, délce stoupání a podílu pomalých vozidel. Vyznačil jsem zde jak nejpříznivější variantu (5 % TNV), tak tu nejméně příznivou (15 % TNV).	29

3.3	Fundamentální diagramy vykreslené dle slovenského TP 10/2010 Technické podmienky výpočet kapacit pozemných komunikácií a dle kapitoly 3.2.4 funkční úroveň pohybu dopravy.	30
3.4	Fundamentální diagramy převzaté ze slovenského TP 10/2010 Technické podmienky výpočet kapacit pozemných komunikácií.	31
3.5	Zobrazení kapacit pro jednotlivé typy komunikací jak jsou definovány v české, slovenské normě a v HCM. Brány vždy ty nejlepší hodnoty, tedy nejmenší podíl pomalých vozidel a nejnižší sklon. Toto jsem udělal proto, aby bylo možné vzájemné porovnání.	32
4.1	Na fotografii je umístění radaru Sierzega, přesně se jedná o radar č.3 z měření před Lipůvkou (viz kapitola 6) a vpravo je zobrazení pracovního prostředí pro práci s radarem v mobilním telefonu s OS Android.	35
4.2	Umístění radaru ASIM na portálu nad dálnicí. Radar obsahuje dopplerovský radar, ultrazvukovou a infračervenou pasivní detekci [2]. . .	36
5.1	Diagram zobrazující způsob fungování programu pro hromadné vyhodnocování data a tvorbu grafů. Žlutě jsou zobrazena vstupní data a červeně výstupy.	39
5.2	Grafy znázorňující fundamentální diagramy pro data z měření na dálnici D1 u Rousínova. Druhý graf znázorňuje, stejně jako první, graf vztah intenzity a rychlosti, jen je použito procentuální zobrazení ze všech zastoupených hodnot, jelikož z prvního obrázku není zcela jasné, jakých hodnot zde bylo dosahováno nejčastěji při takovémto množství zobrazovaných dat. Jedná se o grafy vyhodnocené programem. Upravené a porovnané s Greenshieldsem jsou v příloze C.2. . .	40
5.3	Grafy zobrazující všechny sady čtveřice grafů, které byly vypracovány. U těchto grafů jsou data agregovaná po jedné minutě. Pro jejich velké množství jsou zde zobrazeny jen miniatury a ve velkém rozlišení jsou zobrazeny v elektronické příloze.	41
5.4	Diagramy z radarů ASIM, jejichž data se sbírala ode dne 14. 9. 2012 do 24. 9. 2012. Data jsou z radarů na dálnici D1 na staničení 145 km a jedná se o pravý jízdní pruh. Více grafů v příloze C.4.	42
5.5	Diagramy z radarů ASIM, jejichž data se sbírala ode dne 14. 9. 2012 do 24. 9. 2012. Data jsou z radaru na dálnici D1 na staničení 145 km a jedná se o levý jízdní pruh. Jsou zde dobře viditelné dvě rychlosti pro jednu intenzitu. Více grafů v příloze C.4.	43
6.1	Mapa možných míst pro umístění radarů vytipovaných přes aplikaci StreetView a konečné místo umístění všech čtyř radarů [6].	44

6.2	Zobrazení rychlostí a intenzit změřených na radaru číslo 4 v průběhu měření. Graf zobrazuje hodnoty od úterý 26. 8. 2014 do pondělí 1. 9. 2014 a to vždy od 12 hodin. Data jsou agregovaná po 15 minutách.	46
6.3	Průběh rychlostí a intenzit v nejzatíženější den - pátek 29. 8. 2014.	46
6.4	Zobrazení rozdílu klasické agregace a klouzavého průměru.	48
6.5	Viditelný Stop-and-Go efekt, data jsou vypočtena pomocí klouzavého průměru s délkou 2 minuty a 5 minut. Posunem o 1 s. Jedná se o nejzatíženější den - pátek 29. 8. 2014 v čase 11:00-12:00 hod.	49
6.6	Diagramy z dat ze dne 29. 8. 2014. Data zpracována klasickou agregací (nahore) a klouzavým průměrem (dole).	50
6.7	Graf závislosti obsazenosti a zdržení. Vlevo je graf z [1] a vpravo můj vypracovaný pomocí polynomicke regrese 2. stupně.	51
7.1	Výsledky prvního testu s proměnnou rychlostí.	54
7.2	Výsledky prvního testu s proměnnou rychlostí a nastavením různého podílu TNV a některé s podélným sklonem komunikace. Jen v programu PTV.	55
7.3	Výsledky druhého testu s proměnnou intenzitou.	56
7.4	Prostředí mikrosimulačních programů. Vlevo S-paramics a vpravo VISSIM.	57
7.5	Zobrazení prognózy dopravy s 30-ti minutovým výhledem v oblasti Kolína zpracované pomocí CA. Dostupné na: http://www.autobahn.nrw.de/ (kopírováno 8. 9. 2014).	58
7.6	Zobrazení kroků při postupně paralelním updatu, který se používá pro CA dle NaSch.	59
7.7	Princip fungování CA dle Nagel-Schreckenberga.	59
7.8	Popis jednotlivých veličin v CA pro sledované vozidlo <i>a</i>	59
7.9	Graficky zobrazené možnosti okrajových podmínek pro CA. Vlevo periodické a vpravo otevřené.	60
7.10	Ukázka části kódu pro výpočet rychlosti z programu CA dle Nagel-Schreckenberga. Vychází ze vzorců 7.2. Celý kód je v příloze A.3.	62
7.11	Ukázka naprogramovaného celulárního automatu, kde je vidět posun kolony proti směru jízdy rychlostí 9,36 km/h. Na tomto konkrétním příkladu je vidět 200 s (tedy kroků) simulace a byly nastaveny hodnoty intenzity 1500 voz/h a rychlost 130 km/h. Každý řádek značí komunikaci v jednom výpočetním kroku a každý sloupec je jeden dílek komunikace, tedy 7,5 m (program viz příloha A.3).	63
7.12	Výřez ze zobrazení vizualizace. Vlevo je model při vyšší intenzitě a vpravo při nižší.	63
7.13	Fundamentální diagramy vzešlé z CA.	64

B.1	Mapa jako výstup z programu GPS Visualizer. Barevně je prokreslena aktuální rychlost vozidla v daném místě. Místo s nejnižší rychlostí je místo těsně před nehodou.	101
C.1	Grafy ze stejných dat jako na obrázku 5.2 jen porovnané se vztahy dle Greenshieldse.	102
C.2	Grafy ze stejných dat jako na obrázku 5.2 jen porovnané se vztahy dle Greenshieldse.	103
C.3	Diagramy z radarů ASIM, jejichž data se sbírala ode dne 14. 9. 2012 do 24. 9. 2012. Data jsou z radarů na dálnici D1 na staničení (shora) 145 km, 151 km, 214 km, 218 km. Jedná se o radar nad levým pruhem.	104
C.4	Diagramy z radarů ASIM, jejichž data se sbírala ode dne 14. 9. 2012 do 24. 9. 2012. Data jsou z radarů na dálnici D1 na staničení (shora) 145 km, 151 km, 214 km, 218 km. Jedná se o radar nad pravým pruhem.	105
D.1	Umístění radaru č.1.	106
D.2	Umístění radaru č.2.	106
D.3	Umístění radaru č.3.	107
D.4	Umístění radaru č.4.	107
D.5	Fotografie při průjezdu kolem nehody při měření pomocí plovoucího vozidla s použitím přístroje MobiTex [®] (na fotce vpravo na palubní desce).	108

SEZNAM TABULEK

4.1	Zobrazení dat, které poskytuje radar Sierzega.	34
4.2	Ukázka části dat, které jsou dostupné z radarů ASIM.	36
4.3	Ukázka nejdůležitějších dat, která zobrazuje přístroj MobiTex.	37
6.1	Tabulka zobrazující počasí ve dnech, kdy probíhalo měření [3].	45
6.2	Data procentuálně vyjádřených rozdílů intenzit na jednotlivých radarech k průměru.	47
6.3	Celkové počty vozidel dle druhu zaznamenané na jednotlivých radarech a jejich rozdílů od průměrných hodnot ze všech radarů. Číselné hodnoty s počty jednotlivých vozidel jsou v příloze v tabulce B.4.	48
B.1	Data z kontroly intenzit na jednotlivých radarech.	96
B.2	Data procentuálně vyjádřených rozdílů intenzit na jednotlivých radarech k průměru.	96
B.3	Data procentuálně vyjádřených rozdílů intenzit na jednotlivých radarech k průměru s vyloučením radaru č.3, který vykazoval stále záporné odchylky a byl ovlivněn sjezdem k čerpací stanici.	96
B.4	Celkové počty vozidel dle druhu, zaznamenané na jednotlivých radarech. V druhé tabulce znázorněny odchylky od průměrné hodnoty ze všech radarů. Jedná se o počet všech vozidel změřených za celé měření.	97
B.5	Data pro graf na obrázku 3.5.	97
B.6	Data pro graf na obrázku 7.1.	98
B.7	Data pro graf na obrázku 7.3.	99
B.8	Data pro graf na obrázku 2.3.	100

ÚVOD

Ke zkoumání dopravního proudu jsem se dostal již při vypracovávání své bakalářské práce, týkající se modelování dopravy v dálničních uzavírkách. Tato práce měla za cíl zvýšit kapacitu úzkých hrdel při opravách komunikace. To znamenalo pomocí PDZ co nejvíce usměrnit dopravní proud a tím se pokusit navýšit kapacitu hrdla, což jsem prováděl pomocí změny maximální dovolené rychlosti, tedy změnou rychlosti dopravního proudu. Zde vyvstanula otázka, zda je aktuální intenzita dopravního proudu nějak závislá na jeho rychlosti, tedy při jaké rychlosti lze dosáhnout největší kapacity komunikace. Proto mne studium dopravního proudu zaujalo a já se rozhodl na toto téma vypracovat svoji diplomovou práci.

Zajímal mě dopravní proud na mezikřižovatkovém úseku a jeho možné řízení. Na tuto problematiku jsem se podíval hned z několika pohledů. Prvním z nich bylo vyhodnocení co největšího množství dat, která byla naměřena na naší fakultě a poté provedení vlastního měření, které co nejvíce odpovídalo mým požadavkům. Dalším bylo provedení několika simulací ve všech mikrosimulačních programech dostupných na fakultě stavební VUT v Brně a naprogramování vlastního modelu celulárního automatu založeného na pravidlech dle Nagel-Schreckenberga. Nakonec jsem se podíval, jak se k danému tématu staví česká a slovenská norma, a jaké jsou teoretické možnosti odstupu.

Všechna tato data jsem zpracoval do digramů intenzita–rychlost, hustota–rychlost a hustota–intenzita. Poté jsem je podrobil porovnání s dnes používanými konvenčními vztahy.

1 DOPRAVNÍ PROUD

Dopravní proud je proud jednotlivých vozidel, která se pohybují v určitých podmínkách a v určitém směru. Záleží tedy na šířkovém uspořádání a celkovém vedení trasy. Pohyb vozidel v dopravním proudu je ovlivněn ostatními vozidly v proudu, a proto je sledován jako celek, a ne jako pohyb jednotlivého vozidla. Jeho zkoumání je velmi zajímavý a aktuální problém.

Dopravní proud je nelineární dynamický jev. Toto nelineární chování je nejvíce patrné při vysokých hustotách dopravního proudu.

Základní důvody zvýšeného zájmu o teorii dopravního proudu jsou dle [8] tyto:

- Všeobecně rostoucí dopravní intenzity zvyšují zatížení dopravní sítě do nepříznivých hodnot a posouvají využití dopravních cest směrem k maximálními kapacitám. Vzrůstá požadavek na účinné řízení a ovlivňování dopravního proudu, a to není možné bez poznání jeho zákonitostí.
- Zvyšuje se dostupnost přiměřeně výkonné výpočetní techniky, která umožňuje simulaci v reálném čase a zobrazení výsledků v pochopitelné a názorné podobě.
- Hardwarový pokrok směřuje k tzv. „inteligentním dopravním (telematickým) systémům“, je nutné vytvořit pro ně funkční a spolehlivý software, založený na důkladném poznání jevů v dopravním proudu.
- Automatizované řízení se začíná prosazovat už i do jednotlivých standardních vozidel, např. systémy ACC (Adaptive Cruise Control), ADR (Automatic Distance Regulation), inteligentní tempomat, což se blíží podmínkám počítačové simulace převedené do reality. V experimentální podobě už existují vozidla schopná zcela autonomního provozu.
- Dopravní proud (podobně jako jiné nelineární dynamické systémy) je jev definovaný jednoduchými deterministickými pravidly a přitom složitý a pestrý.

Jak je z těchto bodů vidět, je opravdu hodně důvodů pro sledování dopravního proudu v této době. Tento zvýšený zájem už má za sebou několik prakticky používaných aplikací (ACC, ADR), ale také ty, které jsou ještě ve výzkumu. Třeba jako projekt SARTE, jehož aplikací by se rapidně zvětšila kapacita komunikace (viz 2.2). Další výhody tohoto projektu jsou i ekologické, jelikož se předpokládá úspora paliva až 20 % [18].

1.1 Základní charakteristiky dopravního proudu

Za tyto charakteristiky jsou považovány tři na sobě závislé veličiny, a to rychlost $v(x,t)$, intenzita $q(x,t)$ a hustota $\rho(x,t)$. Všechny tyto veličiny jsou závislé na místě a čase. Kvantitou dopravního proudu je jeho intenzita a kvalitu vyjadřuje rychlost a plynulost v daných podmínkách. Za plynulost dopravního proudu lze považovat změnu jeho akcelerace a decelerace, rychlostní gradient či změnu vlnění dopravního proudu. Toto vlnění je určeno jako změna intenzity a hustoty v čase. Pokud toto vlnění označíme jako $w(x,t)$, pak bude tento vztah:

$$w(x,t) = \frac{\partial q(x,t)}{\partial \rho(x,t)} \quad (1.1)$$

1.1.1 Rychlost

Rychlost je závislá přímo na dráze d a nepřímo na čase t . Nejčastěji se uvádí v základních jednotkách soustavy SI, tedy v m/s či v běžněji užívaných jednotkách km/h.

$$v(x,t) = \frac{\partial x}{\partial t} [km/h] \quad (1.2)$$

Pro tento příklad je nejlepší agregovat rychlost za určitý čas a vypočítat z nich průměrné rychlosti. Většinou se data agregují po jedné minutě. Jde to zjistit dvěma způsoby. První možností je vypočítat střední profilovou rychlost:

$$\bar{v}_L = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} v_{L_i} [km/h] \quad (1.3)$$

Kde:

N_1 ... počet vozidel na daném profilu za časový úsek t

Další možností je vypočítat střední momentální rychlost, ta se ovšem z principu našeho měření nedala spočítat, jelikož by bylo třeba znát rychlost všech vozidel v daném čase na daném úseku.

$$\bar{v}_M = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} v_{M_i} [km/h] \quad (1.4)$$

Kde:

N_2 ... počet vozidel na daném úseku L v daném momentu

1.1.2 Intenzita

Intenzita je nejdůležitější vlastnost dopravního proudu a to proto, že největší intenzita, kterou dokáže komunikace přenést, je kapacita komunikace. Ta je důležitá pro

její návrh a posouzení. Intenzita je definována jako počet vozidel, která za jednotku času projdou daným profilem a to buď v jednom, či v obou směrech.

$$q(x,t) = \frac{\text{počet vozidel}}{t} [\text{voz}/h] \quad (1.5)$$

Nejčastěji se udává jako denní, tedy za 24 hodin, či jako hodinová. Proto je její jednotka většinou voz/h či voz/den , tuto jednotku využívá například ŘSD pro roční průměr denních intenzit.

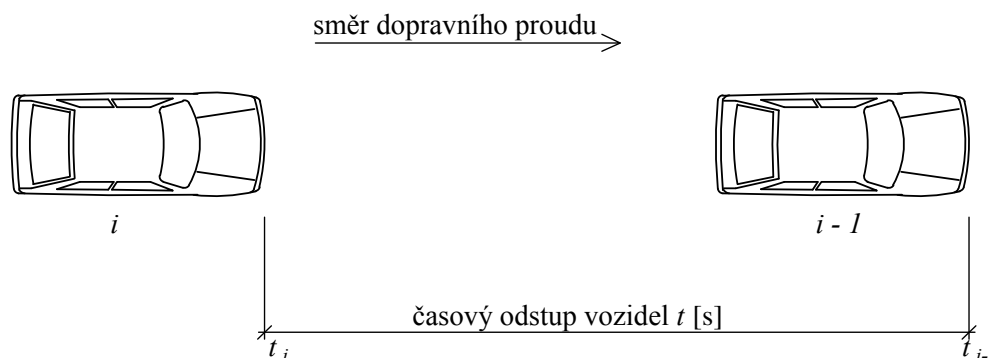
$$RPDI = \frac{1}{365} \sum_{i=1}^{365} I_i [\text{voz}/\text{den}] \quad (1.6)$$

Kde:

I_i ... celodenní (24h) intenzita dopravy na komunikaci za den i

Odvozené parametry od intenzity:

a) Časový odstup t (s) - je časový odstup mezi čely po sobě jdoucích vozidel



Obr. 1.1: Časový odstup mezi vozidly.

b) Střední časový odstup \bar{t} (m)

$$\bar{t} = \frac{3600}{q} [s/\text{voz}] \quad (1.7)$$

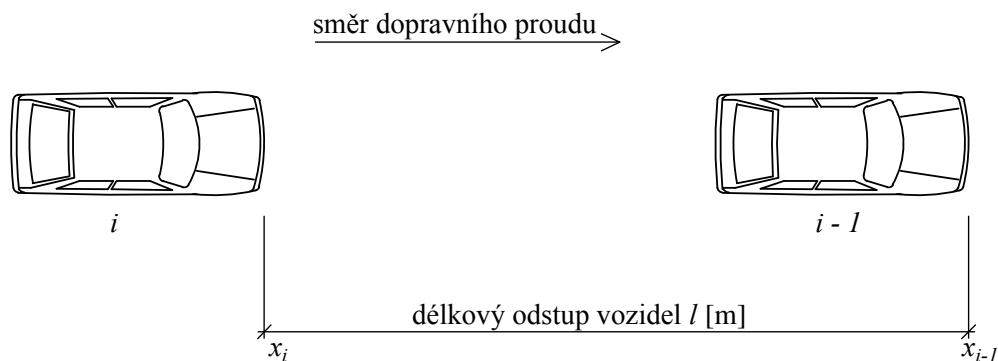
1.1.3 Hustota

Hustota je počet vozidel, která se nachází na jednotkovém úseku d , v daném okamžiku t . Při nízké hustotě je umožněn volný pohyb vozidel a řidiči si mohou volit rychlost dle svého uvážení. Naopak při velké hustotě je řidič ovlivněn ostatními účastníky provozu a vznikají kongesce.

$$\rho(x,t) = \frac{\text{počet vozidel}}{\text{jednotková délka komunikace}} [\text{voz}/\text{km}] \quad (1.8)$$

Odvozené parametry od hustoty:

- a) Délkový odstup l - je vzdálenost mezi čely po sobě jdoucích automobilů (viz obr. 1.2)



Obr. 1.2: Délkový odstup mezi vozidly.

- b) Střední délkový odstup \bar{l} [12]

$$\bar{l} = \frac{3600 \cdot v_{[m/s]}}{q} = \frac{1000 \cdot v_{[km/h]}}{q} = \frac{1000}{\rho} [m/voz] \quad (1.9)$$

1.2 Základní vztahy mezi charakteristikami dopravního proudu

1.2.1 Rovnice kontinuity

Mezi základními charakteristikami existuje určitý vztah a udává ho rovnice kontinuity, a to za předpokladu, že tyto charakteristiky byly získány prostorově časovým sledováním.

$$q(x, t) = v(x, t) \cdot \rho(x, t) \quad (1.10)$$

$$q = v \cdot \rho$$

Empiricky je ověřený přirozený vztah rychlosti na hustotě, jelikož existuje maximální rychlost při minimální hustotě a naopak maximální hustota, při níž je rychlost nulová. Z toho vyplývá, že i hustota je závislá na intenzitě.

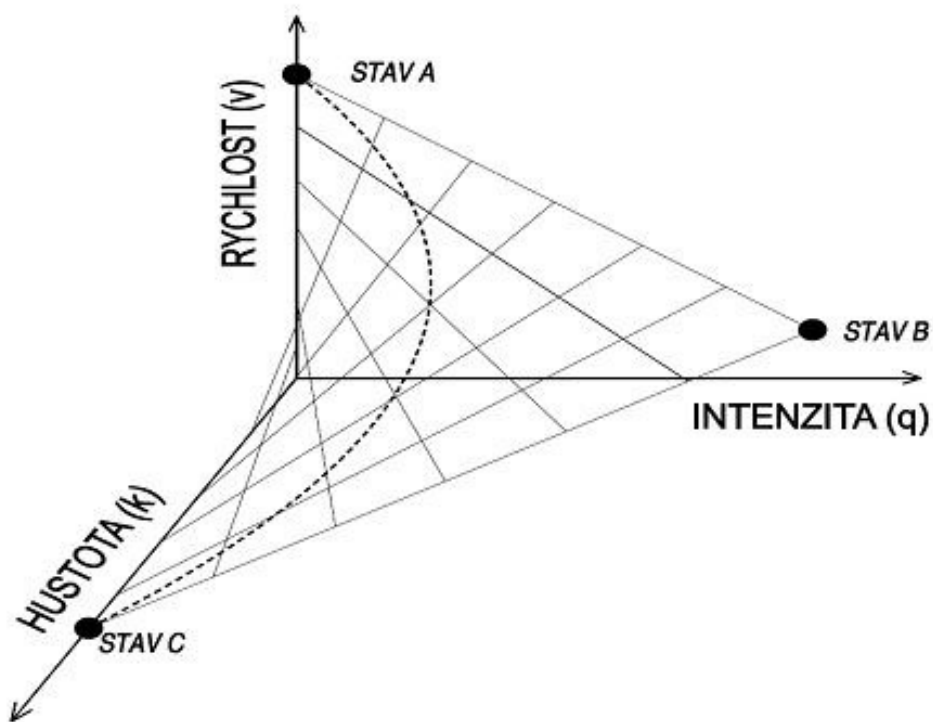
$$v = v(\rho) \quad (1.11)$$

$$q(\rho) = v(\rho) \cdot \rho \quad (1.12)$$

1.2.2 Fundamentální diagramy

Tyto diagramy jsou běžně používané pro vyjádření vztahů v ustáleném dopravním proudu, tedy pro popis vztahu mezi základními veličinami dopravního proudu dané rovnicí kontinuity (1.12). Základním diagramem je vztah hustota $\rho(x,t)$ – rychlost $v(x,t)$, z něhož vychází vztahy hustota $\rho(x,t)$ – intenzita $q(x,t)$ a rychlost $v(x,t)$ – intenzita $q(x,t)$.

Vztah těchto charakteristik je dobře znázorněn na obrázku 1.3. Toto zobrazení v 3D grafu není zcela přehledné, a proto se používá zobrazení pomocí tří grafů, které jsou průmětem této křivky do všech tří rovin.



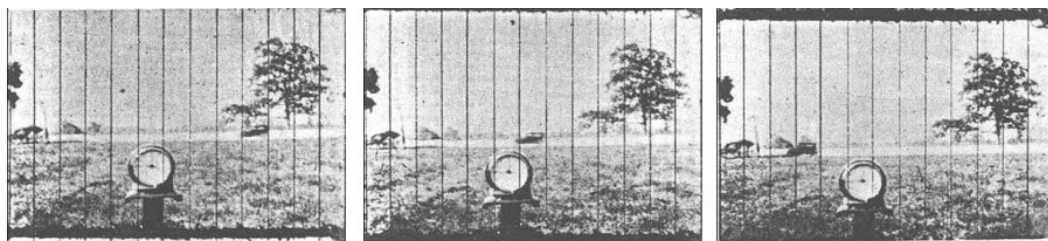
Obr. 1.3: Třídímní model charakteristik dopravního proudu [11].

Greenshieldsův lineární model

Tento model je jeden z nejstarších (1935) a nejjednodušších. Předpokládá lineární závislost $v(\rho)$ rychlosti na hustotě (vzorec 1.13), ustálený dopravní proud, stejné rychlosti vozidel a hustota je také všude stejná. Z toho plynou diagramy s parabolickou závislostí $q(\rho)$ intenzity na rychlosti či hustotě (vzorec 1.14). Diagramy lze vidět na obrázku 1.6. Tyto diagramy jsou dnes brány jako konvenční a proto s nimi budu vše porovnávat.

Bruce D. Greenshields

- V roce 1934 vystudoval doktorát v oboru stavebního inženýrství na University of Michigan
- Učil na různých vysokých školách
- Napsal řadu článků o chování dopravy a bezpečnosti silničního provozu
- Vynalezl "Drivometer"
- Byl průkopník v použití fotografie týkající se dopravních záležitostí a v aplikaci matematiky na dopravním proudu
- V roce 1956 nastoupil na University of Michigan a stal se vedoucím dopravního institutu
- V roce 1976 obdržel Matson Memorial Award



Obr. 1.4: Tři po sobě zaznamenané snímky, které použil Greenshields [13].

Měření dopravního proudu prováděl tak, že postavil fotoaparát 300 stop (91,44 m) od komunikace a tu fotografoval. Fotografie zabírala zhruba 125 stop (38,1 m). Fotografoval v konstantním časovém intervalu pomocí elektromotoru poháněného autobaterií. Aby věděl, kdy byly snímky pořízeny, vložil do záběru fotoaparátu stopky [13].

$$v(\rho) = v_0 \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \quad (1.13)$$

Tuto rovnici lze dosadit do rovnice 1.12 a vzejde vztah:

$$q(\rho) = v(\rho) \cdot \rho = v_0 \cdot \left(\rho - \frac{\rho^2}{\rho_0}\right) \quad (1.14)$$

Kde:

v_0 ... rychlost volného proudu

ρ_0 ... kritická hustota, při níž dojde k zastavení proud



Obr. 1.5: Fotografie z Greenshieldsova měření [13].

Jak je vidět, je možné pro jednu intenzitu dosáhnout dvou možných rychlostí, a to buď ve stabilním, či nestabilním režimu. Ovšem obě tyto hodnoty jsou počítány z jednoho vztahu, jedná se tedy o jednorozměrný model.

Nyní již platí, že lineární vztah neodpovídá skutečnosti, přesto je dnes Greenshieldsův model brán jako konvenční. Dalšími typy modelů jsou Greenbergův logaritmický model (přesnější), Underwoodův exponenciální model (vhodný pro nízké hustoty) nebo Pipesův zobecněný model (vychází z Greenshieldsova lineárního modelu), ty ovšem taky nemohou být univerzálně použity [2].

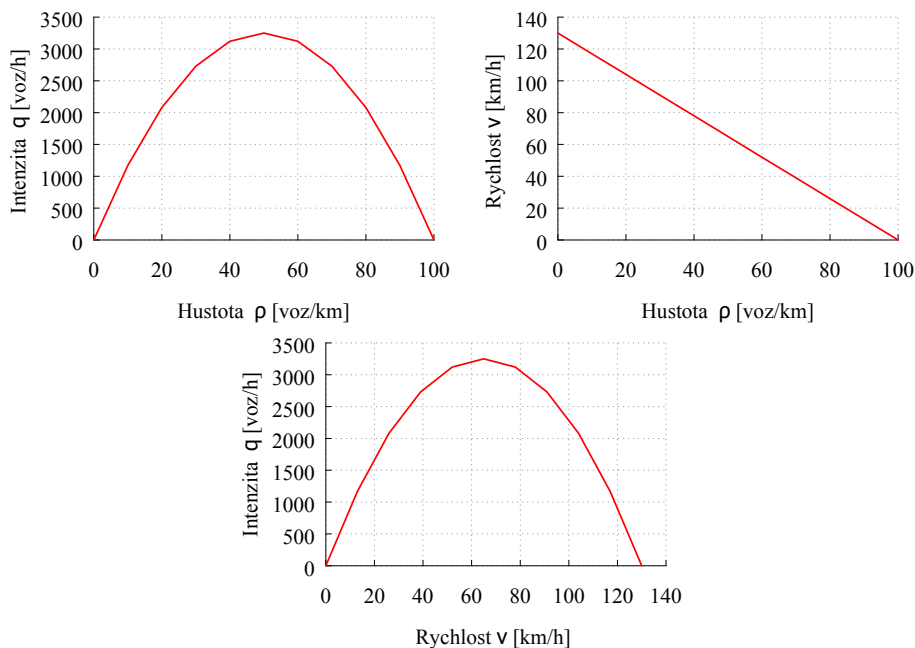
Traffic flow theory

Traffic flow theory vychází z měření, které probíhalo v centrálním Londýně po dobu 14 let, a to jak ve špičce, tak mimo ni [22]. Měřily se průměrné rychlosti a intenzity vozidel. Ovšem takovéto měření muselo být ovlivněno křižovatkami, a proto neudává pravý obraz o chování dopravního proudu.

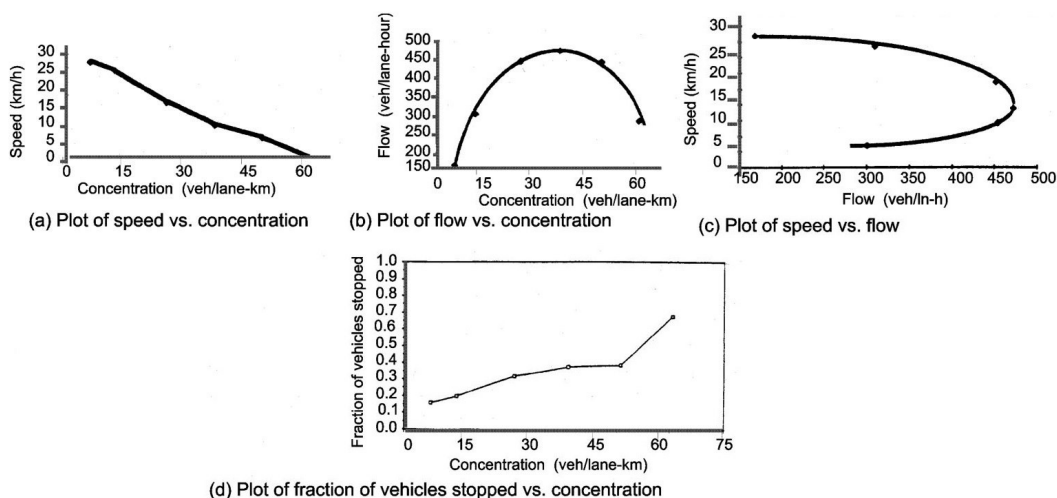
Highway capacity manual

Highway capacity manual (HCM) 2010 se zabývá dopravním proudem komplexně. Popisuje jak dopravní proud na dálnicích, tak na komunikacích v intravilánu, ovlivněných SSZ. V kapitole 4 jsou fundamentální diagramy vycházející z lineárního předpokladu dle Greenshieldse, jak je vidět na obrázku 1.8. Ovšem jsou zde spíše jen na ukázkou. Je zde totiž psáno, že je velmi nepravděpodobné, aby na určitém místě byly tyto vztahy takovéto a v plném rozsahu. Popisuje, že tyto vztahy závisí na převládajícím provozu, na stavu vozovky, na podmínkách provozu a na délce jednotlivých

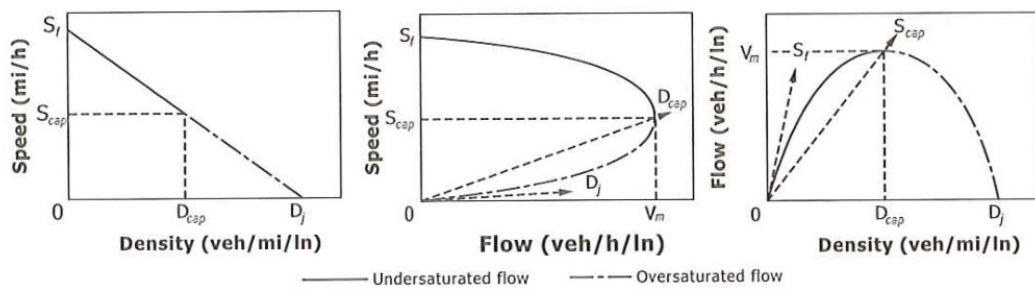
dílčích úseků. Reálná data obvykle vykazují nespojitost – části křivek nejsou k dispozici. Vztah rychlost–intenzita z dat získaných měření je zobrazen na obrázku 1.9. Jak je na těchto diagramech vidět, je zde již zmíněná nespojitost. Ovšem je zajímavé, že ke změně (snížení) rychlosti dochází až při přesycení dopravního proudu, ale že k poklesu nedochází již dříve a lineárně. Naznačují tedy, že intenzita nemá na rychlost žádný podstatný vliv, dokud nedojde k přesycení komunikace.



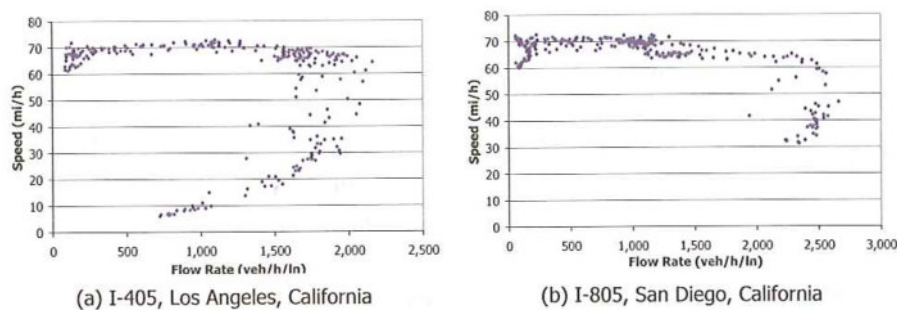
Obr. 1.6: Fundamentální diagramy pro Greenshieldsův lineární model, na kterých je vidět lineární závislost rychlosti v na hustotě ρ . Vychází ze vztahů 1.13 a 1.14, do nichž jsem nastavil $v_0 = 130$ a $\rho_0 = 100$.



Obr. 1.7: Fundamentální diagramy dle Traffic flow theory [22].



Obr. 1.8: Fundamentální diagramy dle HCM[7], na kterých jsou vidět dvě fáze, nepřesycený a přesycený dopravní proud.



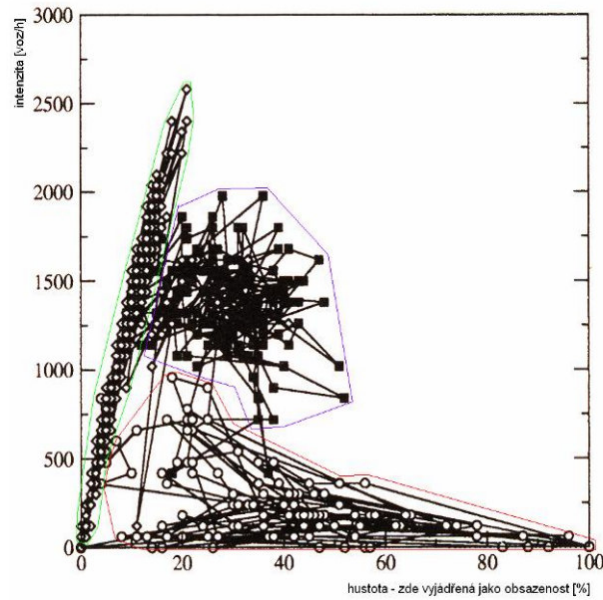
Obr. 1.9: Fundamentální diagramy dle HCM[7] vypracované na základě skutečného měření v Los Angeles a San Diegu, na kterých je vidět, že do přesáhnutí kapacity nemá intenzita nijak zásadní vliv na rychlost.

Na obrázku 1.8 se rozděluje dopravního proudu na dvě části (nepřesycený a přesycený). V některých publikacích, které jsem prostudoval (např. [2] a [8]), se fáze dopravního proudu dělí na tři části, respektive přesycený dopravní proud se dělí na další dvě fáze. Proto jsem si z jedné této publikace půjčil obrázek (obr. 1.10), který tyto fáze pěkně popisuje. Jedná se o měření z dálnice A40, na kterém se při zobrazení do diagramu hustota(zde jako obsazenost)–intenzita zobrazují tři rozdílné stavy. Každý ze stavů byl označen jinou barvou. Dopravní proud má tedy tyto tři vztahy:

- *Volný* – zelená barva
- *Synchronizovaný* – fialová barva
- *Úplná zácpa* – červená barva

Toto rozdělení se mi hodilo v dalších kapitolách k jednoduchému popisu dopravního proudu. Také je z obrázku 1.10 patrné, že přechod z volného do synchronizovaného dopravního proudu vyvolá výrazné snížení intenzity a to při nezměněné

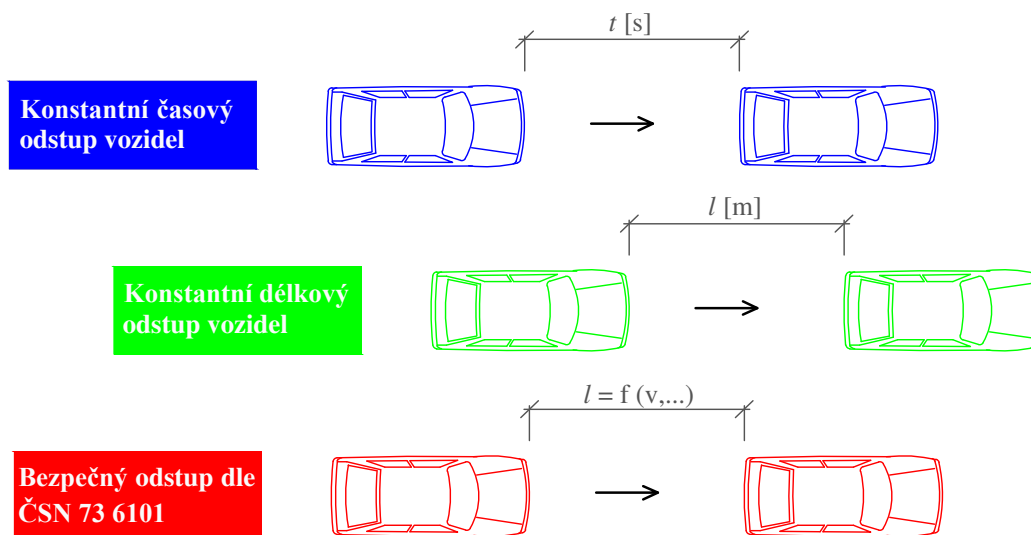
hustotě, z toho plyne, že se snížila rychlost. Při dalším zvyšování hustoty nastane zácpa. Z obrázku je také patrné, že hustota umožňující návrat do předcházejícího stavu vyvolá menší hustota, než která zapříčinila přechod do stavu horšího.



Obr. 1.10: Fundamentální diagram z měření na německé dálnici A40, na kterém jsou dobře patrné všechny tři stavy dopravního proudu, ve kterých se může dopravní proud nacházet. Graf převzatý z [8].

2 TEORETICKÉ MOŽNOSTI Odstupu

Možností, podle kterých si řidiči drží odstup od předcházejícího vozidla, je jistě celá řada, ovšem pro porovnání a ukázkou jejich základních odlišností mi postačí tři druhy odstupů, které jsou dle [23] ty základní. U dvou nezáleží na aktuální rychlosti vozidla. Je to **konstantní časový odstup**, kde počítáme s tím, že si vozidla budou držet stále stejný časový odstup od předcházejícího vozidla a **konstantní vzdálenostní odstup**, kde si vozidla budou dodržovat stále stejný vzdálenostní odstup. Třetí možnost **bezpečného odstup** již zohledňuje aktuální rychlost. Tato možnost je založena na délce rozhledu pro zastavení dle ČSN 73 6101 (viz 2.3) a měla by se asi nejvíce podobat skutečné situaci. Na rozdíl od kapitoly 1.1 jsem použil světlé odstupy vozidel, které odpovídají těm, jež si řidiči opravdu udržují při provozu.



Obr. 2.1: Teoretické možnosti odstupů.

2.1 Konstantní časový odstup

Zde se počítá s tím, že si vozidla budou držet stále stejný časový odstup od předcházejícího vozidla bez ohledu na aktuální rychlost. Tím pádem při zvyšující se rychlosti bude lineárně vzrůstat vzdálenostní odstup mezi vozidly. Tento předpoklad jsem založil na veřejně známém pravidle (dle [15]) minimální bezpečné vzdálenosti $t = 2$ s od předcházejícího vozidla. Tento předpoklad „bezpečného odstup“ je založen na předpokladu, že vozidla za sebou jedoucí, budou mít stejnou deceleraci a čas t by měl zohlednit reakční dobu řidiče a prodlevu brzdného systému. Na tomto způsobu odstupů fungují i systémy jako ACC [8]. Pro tento předpoklad jsem použil tyto vzorce:

$$\begin{aligned}
 t &= \text{const} \\
 l &= \frac{v \cdot t}{3,6} \\
 q &= \frac{1000 \cdot v}{l + l_v}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Kdyby se zanedbala délka vozidla, tak by intenzita byla konstantní, neboť $q = \frac{1}{t} = \frac{1}{\text{const}} = \text{const}$, což by při odstupu 2 s bylo $q = \frac{1}{2\text{s}} = 1\,800 \text{ voz/h}$.

2.2 Konstantní vzdálenostní odstup

Tento odstup počítá s tím, že vozidla budou držet stále stejný vzdálenostní odstup. Při zvyšující se rychlosti se tedy lineárně zvyšuje i intenzita na komunikaci (viz obr. 2.3). Tento systém by byl ideální z hlediska kapacity. Ovšem je velmi nevhodný z hlediska bezpečnosti dopravy, kdy například při konstantním odstupu 5 m je časový odstup 2 s dosažen při rychlosti 9 km/h a při rychlosti 130 km/h je časový odstup 0,138 s. Za tento čas nemá člověk žádnou šanci zareagovat na podněty okolí.

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{l \cdot 3,6}{v} \\
 l &= \text{const} \\
 q &= \frac{1000 \cdot v}{l + l_v}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$



Obr. 2.2: Obrázek znázorňující fungování projektu SARTE [14].

Na tomto principu se snaží pracovat projekt SARTE od společnosti Volvo. Vozidla by v tomto případě měla následovat předcházející vozidla v konstantním vzdálenostním odstupem a měla by být sama řízena. Tvořila by tzv. silniční vlak. Tento vlak by byl řízen pouze řidičem prvního vozu, další vozidla by ho pouze následovala.

2.3 Bezpečný odstup

Výpočet tohoto odstupem závisí na délce rozhledu pro zastavení a na rozdíl od předchozích dvou příkladů se při zvyšující rychlosti zvyšuje jak vzdálenostní, tak časový odstup.

$$D_z = \frac{1,5 \cdot v_{n(s)}}{3,6} + \frac{v_{n(s)}^2}{2g_n \cdot 3,6^2 \cdot (f_v \pm 0,01s)} \quad (2.3)$$

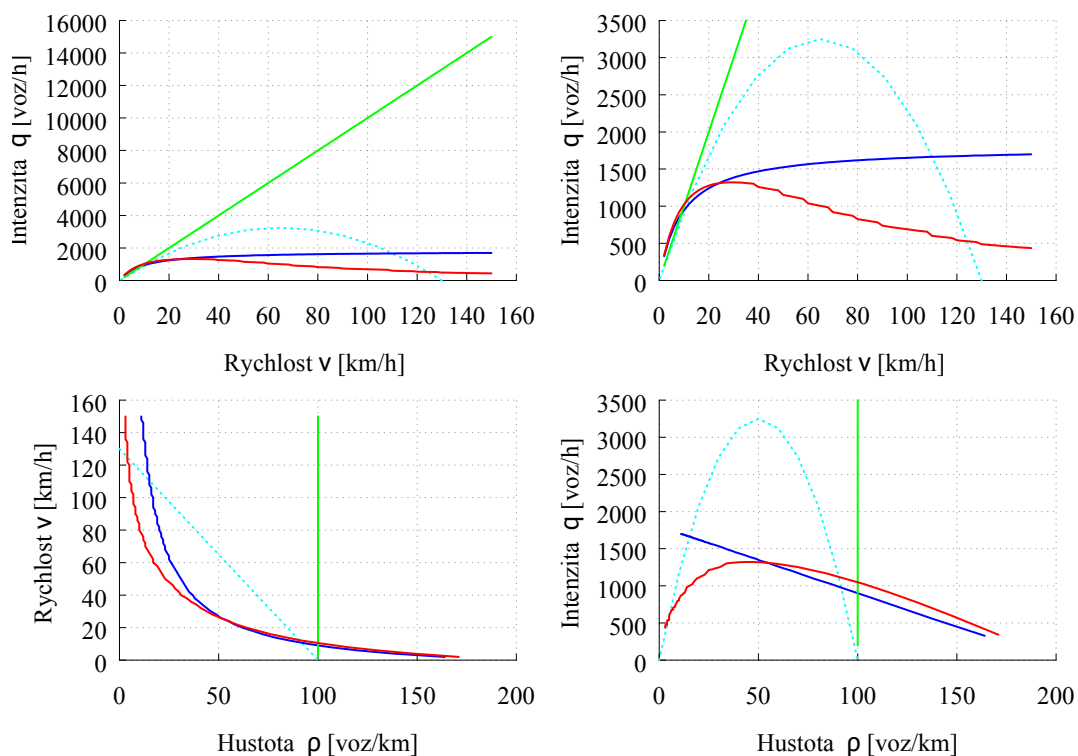
Kde:

g_n ... normální tíhové zrychlení; $g_n \cong 9,81m/s^2$

f_v ... výpočtový součinitel brzdného tření, v závislosti na rychlosti a podélném sklonu komunikace s , $f_v = 0,68 - 0,32$ zvolil jsem $s = 0$

Všechny tyto možnosti jsem zpracoval (viz příloha B.8) a vypracoval pro ně fundamentální diagramy (obr 2.3). Ve výpočtu byla také zahrnuta délka vozidla, kterou jsem zadal pro všechna vozidla 5 m. Takováto homogenní skladba dopravního proudu není reálná. Stejně tak to, že si všechna vozidla drží stejný odstup. Toto je možné snad jen v případě automatického řízení odstupem, například jako silniční vlaky, které byly zmíněny již v kapitole 2.2. Jedná se tedy jen o vypočítané hodnoty.

Jak je na vypracovaných grafech vidět, je na tom z hlediska intenzit nejhůře model s bezpečnostním odstupem a nejlépe model s konstantním odstupem. V tomto modelu, ve kterém je hustota konstantní, roste intenzita lineárně s rychlostí a při vysokých rychlostech je dosaženo obrovských intenzit. Například pro rychlost 130 km/h je to 13 000 voz/h. Také je z těchto dat dobře patrné, že při nižších rychlostech je neefektivnější bezpečnostní odstup dle normy. Například v porovnání s časovým odstupem to platí až do rychlosti 24 km/h, kdy začne vykazovat větší intenzitu časový odstup.



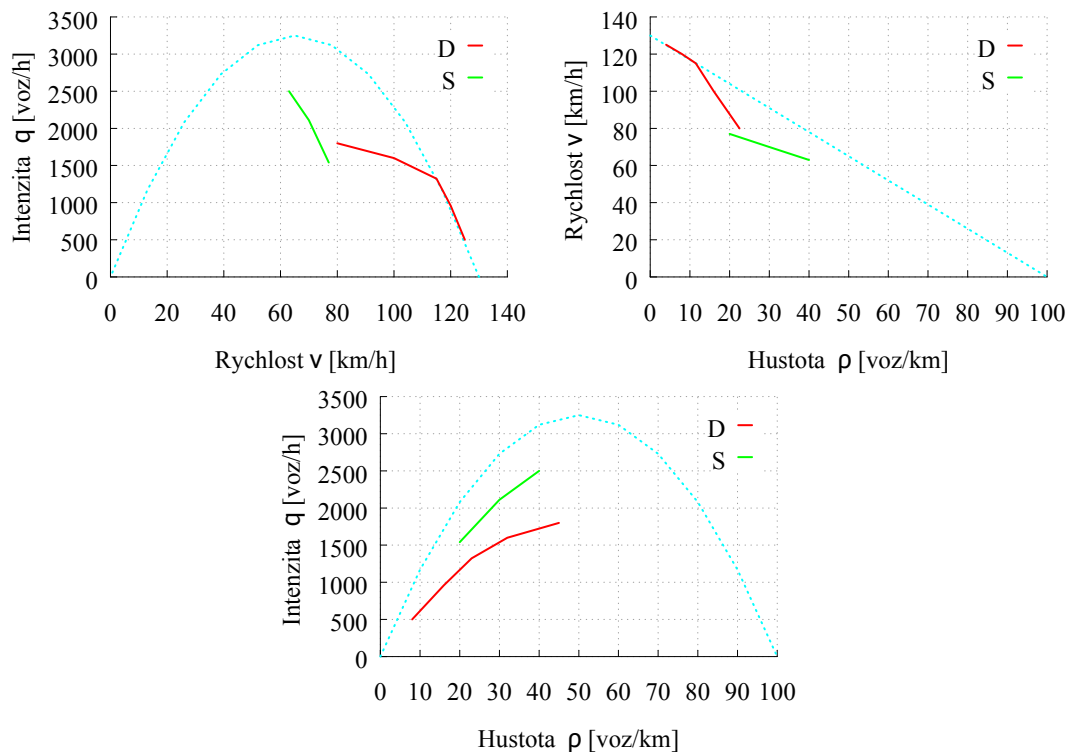
Obr. 2.3: Vztah intenzity, hustoty a rychlosti pro různé možnosti odstupů. Časový odstup byl nastaven jako $t = 2$ s a pro vzdálenostní $l = 5$ m. Horní grafy zobrazují to stejné, jen je zvoleno jiné měřítko intenzity. Barvy grafů se schodují s těmi z obrázku 2.1. Zelená je konstantní délkový odstup, modrá konstantní časový odstup a červená bezpečnostní odstup dle ČSN.

3 VZTAH NORMY K DANÉ PROBLEMATICE

3.1 Česká norma navrhování silnic a dálnic

V této kapitole jsem se zaměřil na to, jak se dané problematice vztahu intenzita – rychlost – hustota staví naše norma. Vypracoval jsem tedy fundamentální diagramy na základě české normy ČSN 73 6101 navrhování silnic a dálnic.

První sadu grafů jsem vypracoval na základě tabulky A.4-1 z dané normy, která udává pro jednotlivé úrovně kvality dopravy ÚKD průměrnou cestovní rychlost a hustotu dopravy jízdního pásu. Intenzitu jsem poté do počítal dle vztahu 1.12. Dále jsem do počítal okrajové podmínky, a to pro nulovou a maximální hodnotu, které jsem v grafu zobrazil tečkovaně. Tím jsem vytvořil fundamentální diagramy odpovídající normě (obr. 3.1).

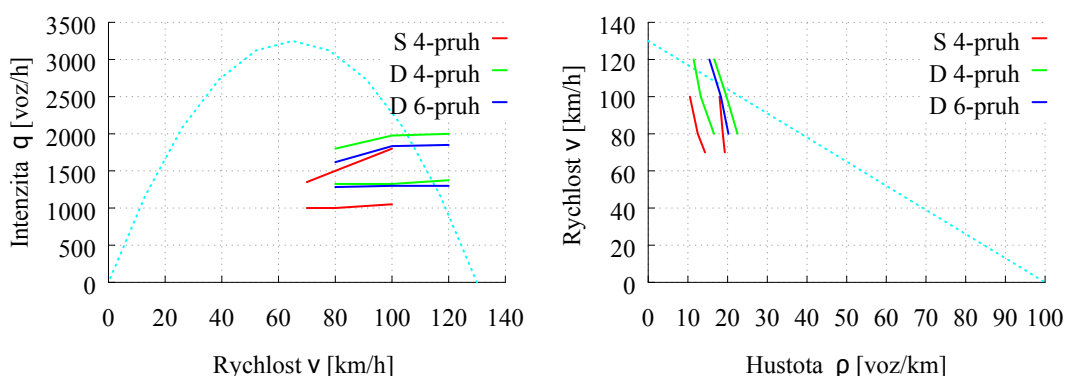


Obr. 3.1: Fundamentální diagramy vytvořené na podkladech z normy ČSN 73 6101 a tabulky A.4-1, která udává pro jednotlivé stupně ÚKD průměrnou cestovní rychlost a hustotu dopravy jízdního pásu. Část grafu, která je provedena jako tečkovaná, ovšem není v normě zahrnuta, proto jsem jí dopracoval dle zákonitostí definovaných Greenshieldsem.

Druhou sadu grafů jsem vytvořil na základě tabulek A.3-2 až A.4-7, které udávají pro návrhové rychlosti jejich mezní kapacity v závislosti na podélném sklonu, délce

stoupání a podílu pomalých vozidel. Vypracoval jsem dvě mezní varianty. Tedy jednu s nejmenším sklonem a nejmenším podílem TNV a největším sklonem a největším podílem TNV. Intenzitu jsem převedl na jeden jízdní pruh, aby bylo možné porovnat 4 a 6 pruhové komunikace.

Největší vliv na kapacitu komunikace má dle normy podíl pomalých vozidel. A to hlavně při velké třídě stoupání. Při třídě stoupání jedna při podílu pomalých vozidel 0% a 25% je rozdíl mezi intenzitami 11,2%, ale při třídě stoupání 5, je tento rozdíl již 49,6% (na dvoupruhové komunikaci).

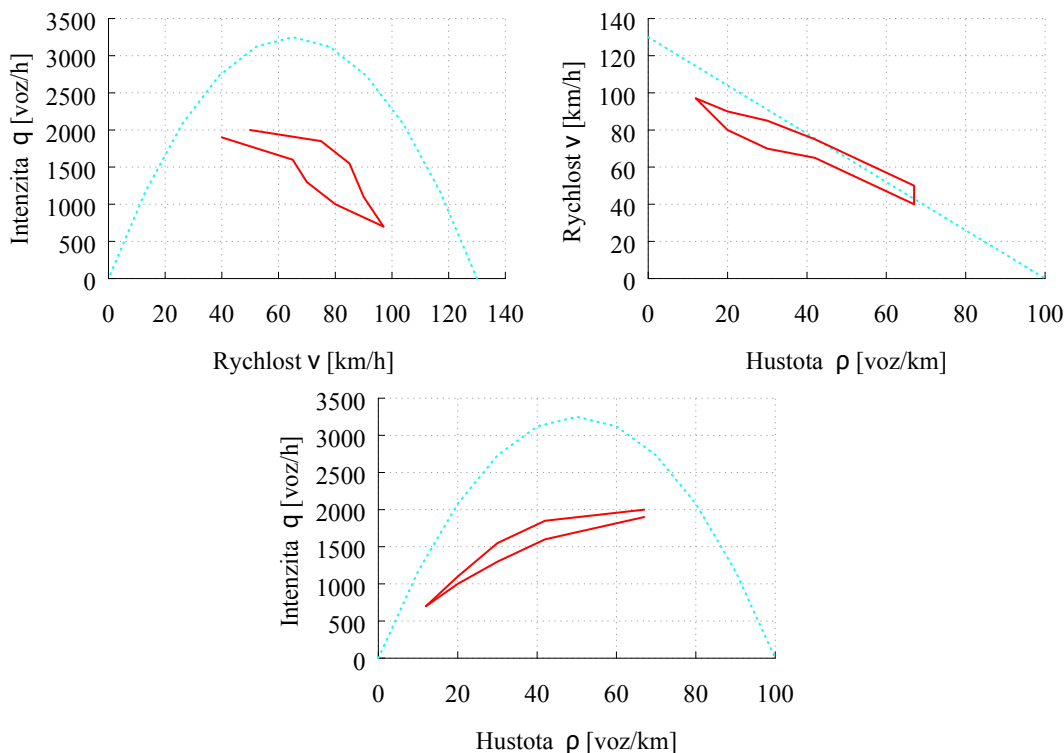


Obr. 3.2: Fundamentální diagramy vytvořené na podkladech z normy ČSN 73 6101 a tabulek A.3-2 až A.4-7, které udávají pro návrhové rychlosti jejich mezní kapacity v závislosti na podélném sklonu, délce stoupání a podílu pomalých vozidel. Vyznačil jsem zde jak nejpříznivější variantu (5% TNV), tak tu nejméně příznivou (15% TNV).

3.2 Slovenská norma

V této kapitole jsem pracoval se slovenským technickým předpisem TP 10/2010 a zaměřil jsem se na kapitolu 3 Dopravní průzkumy a vypracoval jsem diagramy pomocí tabulky v podkapitole 3.2.4 funkční úrovně (stupeň kvality) pohybu dopravy. Tabulky pro jednotlivé funkční úrovně obsahují maximální hodnoty hustoty a rozptyl rychlostí a intenzit na jeden jízdní pruh. Skutečná rychlost je, dle slovenské normy, přesně definovaná jako hodnota skutečné změřené rychlosti vozidel projíždějícím sčítacím stanovištěm. Tato rychlost se udává klasicky v jednotkách km/h .

Dále jsou v tomto TP v kapitole 3.12 okamžité rychlosti vozidel dopravního proudu již rovnou graficky zobrazeny vztahy intenzita–okamžitá rychlost, okamžitá rychlost–hustota a intenzita–hustota.



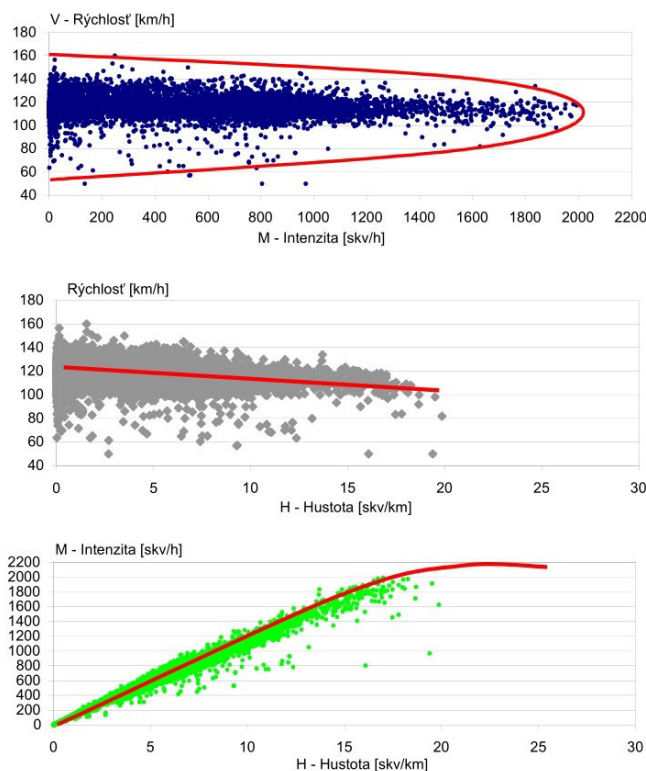
Obř. 3.3: Fundamentální diagramy vykreslené dle slovenského TP 10/2010 Technické podmienky výpočet kapacit pozemných komunikácií a dle kapitoly 3.2.4 funkční úroveň pohybu dopravy.

3.3 Porovnání

Jak je vidět ze všech těchto grafů, tak částečně odpovídají konvenčním vztahům dopravního proudu, ale jen v oblasti stabilního dopravního proudu. V oblasti přetíženého dopravního proudu nejsou žádná data. Dále z tohoto zkoumání vyplynulo, že největší vliv na kapacitu má skladba dopravního proudu a to hlavně při nepříznivých podélných sklonech.

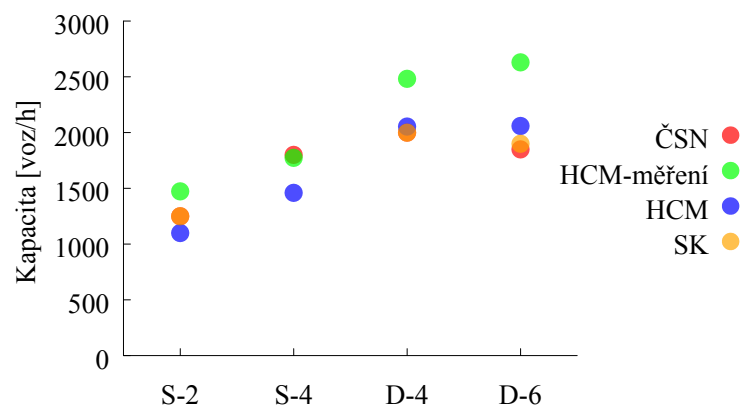
Nakonec jsem ještě vypracoval graf, který zobrazuje kapacitu jednoho pruhu jednotlivých druhů komunikací dle dostupných norem a předpisů. Jak je vidět z grafu na obrázku 3.5, tak rozptyl naměřených hodnot nebo hodnot standardních z normy je opravdu velký. Rychlost či hustota je ve všech předpisech definována různě. Například rychlost volného proudu pro ÚKDA je od 70 do 120 km/h a hustota, buď zadaná či dopočítaná, pro ÚKDF je od 50 do 85 voz/km/pruh. Někde tyto hodnoty bohužel nejsou uvedeny. Největší dosažitelná hustota je daná délkou vozidel a nezbytným odstupem (5,0+2,0 m) při stání, což dává 143 voz/km při nulové rychlosti a to je v některých případech skoro trojnásobná hodnota.

Rozptyl těchto hodnot (1 000–2 700 voz/h/pruh) ukazuje, že je nemožné kom-



Obr. 3.4: Fundamentální diagramy převzaté ze slovenského TP 10/2010 Technické podmienky výpočet kapacit pozemných komunikácií.

plexně určit kapacitu jízdního pruhu, neboť je závislá na mnoha proměnných. Například ČSN zohledňuje tyto projekční parametry: *podélný sklon, podíl pomalých vozidel, křivolakost, omezená možnost předjíždění, příčné uspořádání*. Tyto parametry samozřejmě nejsou pro všechny typy komunikací. Ovšem i když jsem vzal hodnoty z norem pro nejlepší stav, tedy nejnižší podélný sklon a podíl pomalých vozidel a vynesl je do grafu, tak byl jejich rozptyl velký. Například u čtyřpruhové silnice byl rozdíl 540 vozidel, což dělalo rovných 30 %.



Obr. 3.5: Zobrazení kapacit pro jednotlivé typy komunikací jak jsou definovány v české, slovenské normě a v HCM. Brány vždy ty nejlepší hodnoty, tedy nejmenší podíl pomalých vozidel a nejnižší sklon. Toto jsem udělal proto, aby bylo možné vzájemné porovnání.

4 ZPŮSOBY SLEDOVÁNÍ DOPRAVNÍHO PROUDU

Základní způsoby sledování dle[20]:

- *Profilové sledování* – v určitém profilu komunikace po určitý čas
- *Momentální sledování* – v určitém momentu na určitém úseku komunikace
- *Prostorově-časové sledování* – v určité časoprostorové ploše
- *Úsekové sledování* – sledování trajektorie vybraného vozidla

4.1 Získávání těchto charakteristik z měření

Nejstarším způsobem zjišťování těchto charakteristik je *letecké snímkování*, což je metoda **momentálního sledování**. Tato metoda je ovšem velmi komplikovaná a dává nám sice celkový přehled, ale jednotlivé charakteristiky, jako je rychlost jednotlivých vozidel, se dají zjistit až po analýze obrazu. Analýza je ovšem velmi náročná a výsledky nejsou přesné, proto se metoda nyní moc nevyužívá.

Druhou možností je použití detektorů, které jsou na jednom místě (profilu), což znamená, že jde o **profilové měření** a získávají průjezd každého vozidla, u kterého si zaznamenají jeho rychlost, délku (kategorii), časový odstup atd. Pro to je možné použít například *indukční smyčky* (intruzivní detektor) či *mikrovlnné radary* (neintruzivní detektor).

Další možnost je využít tzv. *plovoucí vozidlo*, které nám může dát informace o jeho poloze v čase. Z toho lze získat například rychlost či cestovní čas. V dnešní době se nejvíce využívá měření polohy dle navigačního systému GPS či pomocí celulární sítě GSM. Tento typ měření se nazývá **úsekové sledování** [2].

Nejlépe z uvedených možností vychází použití mikrovlnných radarů pro zjištění všech charakteristik a jejich kontrola pomocí plovoucího vozidla. Výhodou je, že zařízení pro tyto způsoby měření jsou na ústavu pozemních komunikací (PKO) k dispozici. PKO disponuje mikrovlnnými radary Sierzega SR4 a přístroji MobiTest[®] pro zaznamenávání polohy GPS. Spojení těchto dvou metod je výhodné i u jiných využití. Podobný postup jsem aplikoval u své bakalářské práce, kde jsem pomocí mikrovlnných radarů měl v zadaných profilech zjištěnou rychlost a intenzitu. Pomocí těchto dat jsem vytvořil mikrosimulační model a provedl jeho kalibraci. Pomocí cestovních časů z plovoucích vozidel jsem provedl validaci modelu.

4.1.1 Měření pomocí mikrovlnných radarů Sierzega

Radary zaznamenávají při průjezdu každého vozidla aktuální čas, rychlost vozidla, délku vozidla a směr jízdy vozidla (tuto hodnotu zaznamenávají, jen když je zapnuto obousměrné měření, které je při vyšších intenzitách ovšem velmi nepřesné). Proto moje měření probíhalo jen se zaznamenáváním vozidel v jednom směru. Tyto zobrazované hodnoty jsou vidět v tabulce 4.1. Nejpřesnější výsledky jsou dosahovány pro jednopruhové komunikace. Pro vícepruhové komunikace s narůstajícím provozem přesnost klesá, neboť se vozidla překrývají. A to hlavně z důvodu malé výšky radaru (viz obr. 4.1). Přesnost je také nižší kvůli tomu, že měření probíhá pod úhlem cca 30° a jakékoliv odchýlení snižuje přesnost, např. určení délky vozidla. Odchyly přesnosti měření jsou dle výrobce: u rychlosti $\pm 3\%$, u délky vozidla $\pm 20\%$, u odstupu $\pm 0,2$ sec. Další nevýhodou je rozsah měření. Dle výrobce je deklarován v rozsahu 8–254 km/h, ovšem při nižších rychlostech je velká odchylka měření v počtu zaznamenaných vozidel. Výhodou tohoto zařízení je mobilita při jeho malých rozměrech jen 400/400/200 mm a velký rozsah provozních teplot od -20°C až do 60°C [16].

Datum	Čas	dl. [dm]	v [km/h]	kat.	odst. [s]
10.3.2014	15:20:20	37	33	2	3
10.3.2014	15:20:23	50	30	2	1,9
10.3.2014	15:20:25	28	33	2	1,7
10.3.2014	15:20:27	29	30	2	1,5
10.3.2014	15:20:29	65	29	3	1,2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

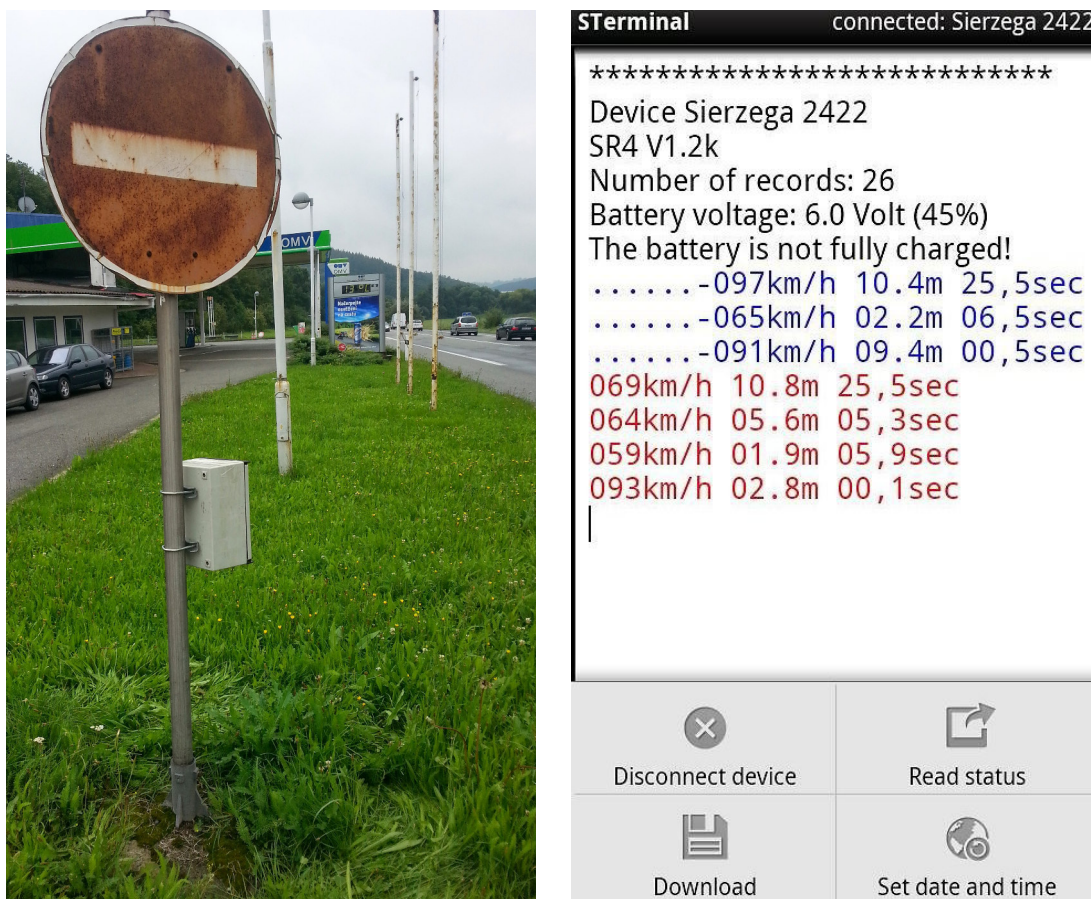
Tab. 4.1: Zobrazení dat, které poskytuje radar Sierzega.

Získané údaje z radaru:

- *Intenzita* – zobrazuje počet vozidel v čase
- *Rychlost* – detekována aktuální rychlost každého vozidla
- *Klasifikační třídy* — je detekována délka vozidla a poté jsou vozidla rozdělena do 4 klasifikačních tříd

4.1.2 Hybridní radary ASIM

Celým názvem jsou to radary ASIM TT 295 od firmy XTRALIS Ltd. Jedná se o neintruзивní hybridní radary, které jsou nainstalovány na dálnicích D1, D2 a D5

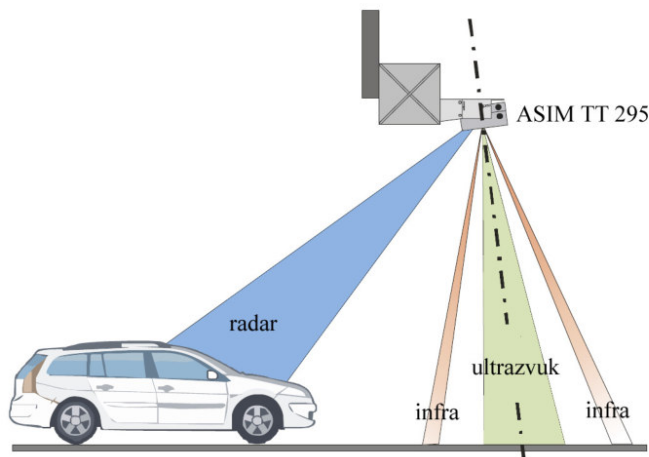


Obr. 4.1: Na fotografii je umístění radaru Sierzega, přesně se jedná o radar č.3 z měření před Lipůvkou (viz kapitola 6) a vpravo je zobrazení pracovního prostředí pro práci s radarem v mobilním telefonu s OS Android.

v rozmezí cca 10 km. Zařízení v sobě kombinuje dopplerovský radar společně s ultrazvukovou a infračervenou pasivní detekcí. Radar zaznamenává průjezd každého vozidla a to se zařazením do 6 kategorií (osobní automobil, motocykl, dodávka, nákladní automobil, nákladní automobil s přívěsem nebo návěsem, autobus, osobní automobil s přívěsem, neidentifikováno). Přesnost detekce vozidel je 95 %. Jedinou nevýhodou dat z tohoto radaru je, že jsou data agregována po 5 minutách a to pro každý pruh a kategorii zvlášť. Nevýhodou je, že při této agregaci nemohou být zaznamenávány odstupy, které bych pro svou analýzu také potřeboval. Ukázku těchto dat lze vidět v tabulce 4.2

4.1.3 Měření pomocí plovoucích vozidel

Plovoucí vozidla (floating cars – FC) jsou vozidla v dopravním proudu, která zaznamenávají určitá data. Nejčastěji se využívá kombinace GPS a GSM modulů v mobilním telefonu, či jinak implementovaných ve vozidle. Těmito systémy jsou vy-



Obr. 4.2: Umístění radaru ASIM na portálu nad dálnicí. Radar obsahuje dopplerovský radar, ultrazvukovou a infračervenou pasivní detekci [2].

id	veh	speed	cat.	Description	Day	Hour	dtStartTime	...
1371	8	136	16	OA	15	10	2012-09-15 10:30:00	...
1371	8	95	17	Nakl.	15	10	2012-09-15 10:30:00	...
1371	3	120	18	Bus	15	10	2012-09-15 10:30:00	...
1371	3	134	19	Neidentif.	15	10	2012-09-15 10:30:00	...
1371	4	109	20	Nakl.+přív.	15	10	2012-09-15 10:30:00	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tab. 4.2: Ukázka části dat, které jsou dostupné z radarů ASIM.

baveny velké flotily firemních vozidel, které systém používají např. pro kontrolu pohybu jejich vozidel. Například společnost CE Traffic nakupuje data od společností Secar/Sherlock z jejich vozidlových jednotek, která jsou velmi ceněna a jejich cena není zanedbatelná. Další společnost Google se rozhodla pro jinou cestu a data v České republice nevykupuje. Pro aplikaci Google Traffic, která zobrazuje hustotu na pozemních komunikacích, používá vlastní data od svých uživatelů, kteří využívají operační systém Android s aktivním GPS a mobilním internetem [10]. Možné výstupy z měření jsou:

- *Rychlost* – v daném místě či v průběhu trasy
- *Cestovní čas* – na daném úseku komunikace
- *Jednoduchý grafický výstup* – např.: zobrazení dráhy vozidla i s možností zobrazení barvy dle rychlosti či jiného parametru

Nevýhodou měření je, že jím nejsou postihnuta všechna vozidla na komunikaci, takže nelze zjistit intenzitu či hustotu.

Já jsem k tomuto měření využil přístroj MobiTex[®] (přístroj lze vidět v příloze D.5), který zaznamenává 5x za sekundu svoji pozici a další údaje, jako rychlost, datum, čas, ujetou vzdálenost od posledního záznamu, či data o kvalitě signálu. To je jak počet aktuálně připojených družic, tak odchylky ve všech třech směrech. Ukázka těchto dat je v tabulce 4.3. Pro jejich stažení je třeba programu MobiTest Data Explorer, který se dá použít i pro jejich zpracování. Popřípadě se dají upravit a poté použít program od jiné firmy. Tak tomu bylo i v mém případě, použil jsem pro zpracování mapy program GPSvizualizer¹[5]. Výstup z programu je vidět na obrázku B.1, na kterém je zobrazení aktuální rychlosti a pozice zakreslená do ortofotomapy. Toto mělo sloužit jako kontrola k naměřeným datům z radarů a mělo je doplnit o další údaje jako cestovní čas či průběh rychlosti v trase. Pomocí měření a dat z radarů by se dal již vytvořit prostorově časový diagram.

č. řádku	zeměpisná délka	zeměpisná šířka	nadmořská výška	rychlost	čas	...
ID	LONG	LAT	HMSL	SPD	TTIME	...
303609	16.5839434	49.2194027	262.04	65.4	16:38:18	...
303610	16.5839238	49.2194355	263.76	65.3	16:38:18	...
303611	16.5839024	49.2194681	265.03	65.9	16:38:18	...
303612	16.5838786	49.2194948	265.34	65.6	16:38:19	...
303613	16.5838534	49.2195215	265.5	65.5	16:38:19	...
303614	16.5838289	49.2195498	265.85	66.3	16:38:19	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tab. 4.3: Ukázka nejdůležitějších dat, která zobrazuje přístroj MobiTex.

¹Tento program se dá použít online a je zdarma. Další výhodou je velké množství nastavení, podkladových map či různé možnosti výstupů.

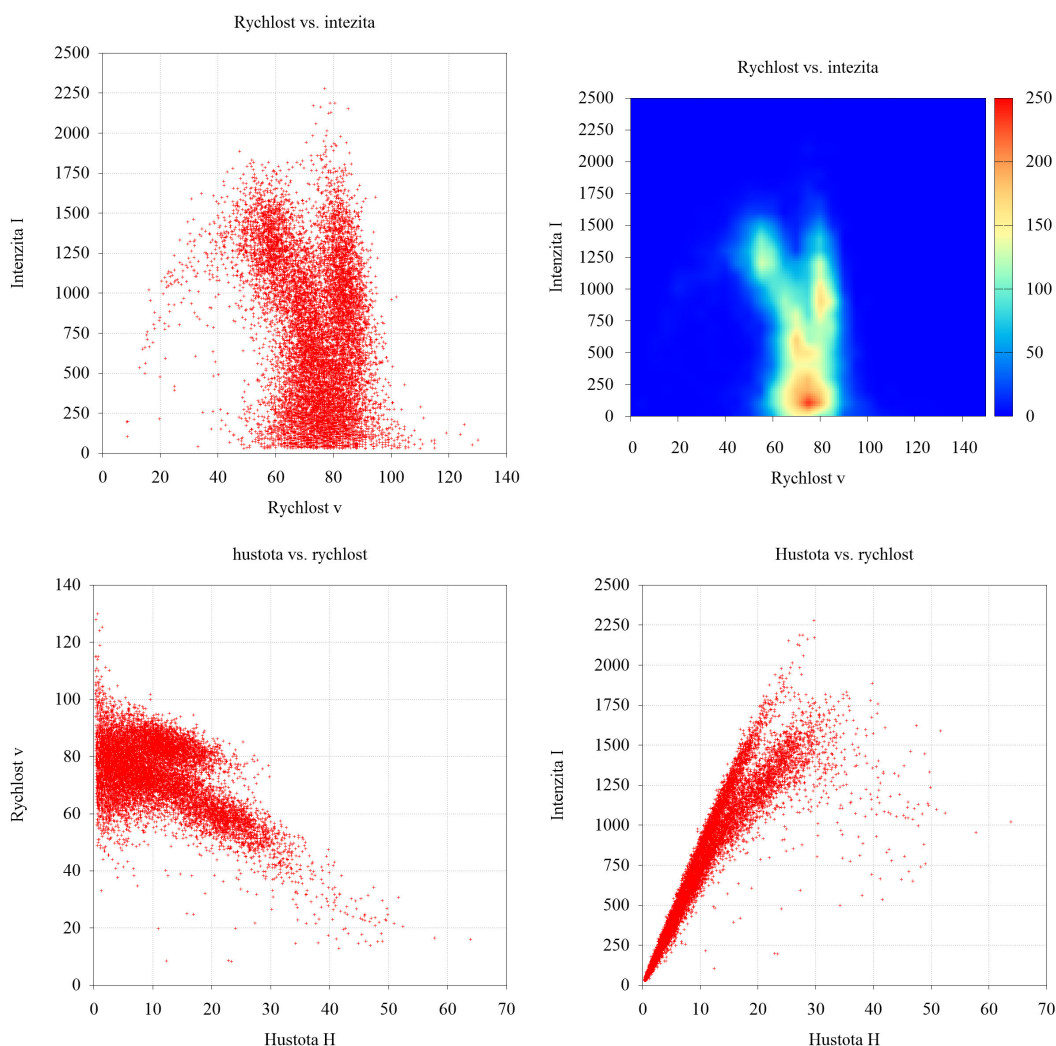
5 HROMADNÉ ZPRACOVÁNÍ JIŽ NAMĚŘENÝCH DAT

Pro své první zkoumání jsem použil data již naměřená a dostupná na ústavu pozemních komunikací.

Tato měření obsahovala velké množství údajů. Zpracoval jsem celkem 8 měření, přičemž nejobsáhlejší z nich zaznamenalo celkem 1 505 448 vozidel. Proto jsem se rozhodl pro napsání programu v jazyce Visual basic for applications (VBA), který mi toto vyhodnocení zautomatizoval (kód programu viz příloha A.1). Programu stačí zadat, kde se nachází složka se zdrojovými soubory z radaru (ve formátu **.txt*) a po jakém čase agreguje veličiny dopravního proudu. Běžně po 1 min, 2 min, 5 min, 15 min. Poté již sám vytvoří výsledný soubor s agregovanými hodnotami a připraví soubory pro vytvoření grafů v programu GNUplot. A to jak textové, tak se zadaným stylem grafu (**.gp*), i soubor pro vytvoření grafů (*_plot.bat*). Poté již stačí spustit *_plot.bat* a GNUplot nám vytvoří grafy (fundamentální diagramy). K tomuto postupu jsem se uchýlil z důvodu, že program Microsoft Excel nedokáže zpracovat takové množství dat jen v zadaných sloupcích, neboť Excel 2003 má jen 65 536 řádků. Excel 2010 sice již 1 048 576 řádků, ale i toto je stále málo. Proto by se data musela rozdělit do více sloupců a i tak je problém tolik hodnot zobrazovat v grafu. Úprava je poté velmi zdoluhavá oproti programu GNUplot, kde je toto mnohem snadnější. Stačí mít jeden soubor se styly (*style.gp*), který po jednoduchém upravení potřebných hodnot a opětovném spuštění souboru *_plot.bat* vyhotoví všechny grafy se zadaným nastavením. Všechny soubory jsou jen textové a jejich úprava je velmi jednoduchá. Celý tento postup je zobrazen na diagramu, který je na obrázku 5.1.

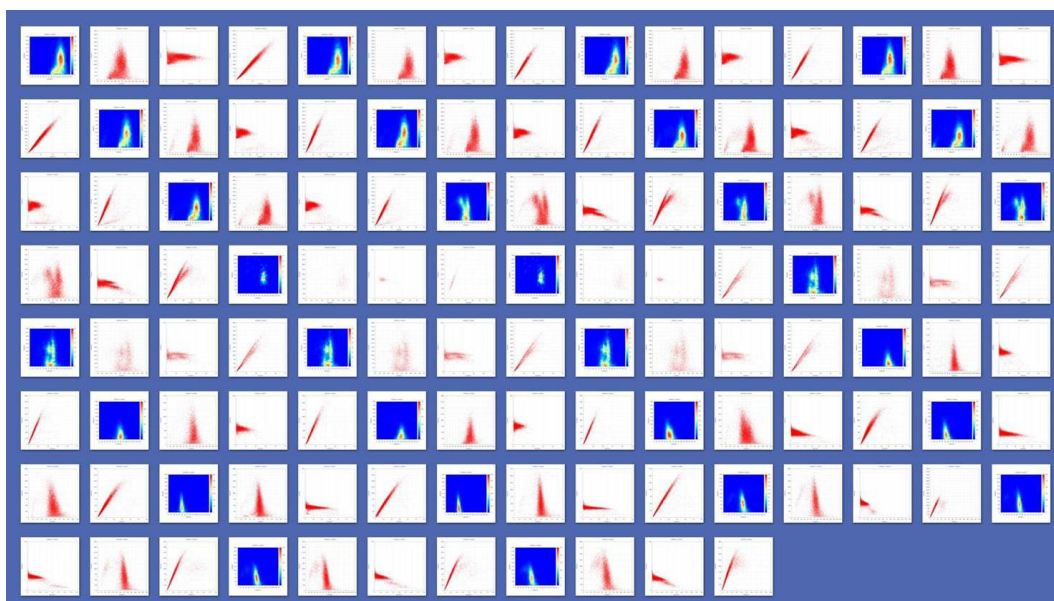
Samotný program pracoval tak, že všechna data naměřená na daném radaru agregoval za zadaný čas t_a (1 minuta, 5 minut, 15 minut). Pro tento zadaný čas se tedy vypsaly průměrné rychlosti na radaru, počet zaznamenaných vozidel se přenásobil na hodinovou intenzitu a hustota byla vypočtena ze vztahu 1.12. Intenzita se tedy vypočítala takto $q = \frac{60 \cdot \text{počet zaznamenaných vozidel} [voz/t_a]}{t_a} [voz/h]$.

Celkem jsem vypracoval desítky grafů. Ukázka jedné sady grafů je na obrázku 5.2. Jelikož se jedná o velké množství dat, jak grafů, tak tabulek s daty, která jsou všechna uložena jen v elektronické příloze E.3. Tyto grafy mi ukázaly jakousi závislost v oblasti volného dopravního proudu. V oblasti synchronizovaného dopravního proudu jsem žádnou závislost nenašel. Ukázalo se, že se nedá jednoznačně určit kapacita jízdniho pruhu, jelikož je závislá na mnoha proměnných, jak jsem ukázal již v předchozích kapitolách a tato analýza to jen prokázala. Úseky na silnicích dvoupruhových a směrově rozdělených dosahovaly maximálních intenzit 1 250–1 800 voz/h a



Obr. 5.2: Grafy znázorňující fundamentální diagramy pro data z měření na dálnici D1 u Rousínova. Druhý graf znázorňuje, stejně jako první, graf vztah intenzity a rychlosti, jen je použito procentuální zobrazení ze všech zastoupených hodnot, jelikož z prvního obrázku není zcela jasné, jakých hodnot zde bylo dosahováno nejčastěji při takovémto množství zobrazovaných dat. Jedná se o grafy vyhodnocené programem. Upravené a porovnané s Greenshieldsem jsou v příloze C.2.

Ve většině případů se v grafech objevují pouze data z volného dopravního proudu a v některých případech nastala kolona bez části synchronizovaného proudu. Na obrázku 5.2 je vidět, že při vyšších intenzitách chování dopravního proudu rozděljuje a při jedné intenzitě se dopravní proud uchyluje ke dvěma rychlostem. Na toto jsem se tedy zaměřil dále při zpracování dat z radarů ASIM, která pro zkoumání dálničních komunikací poskytují lepší data.

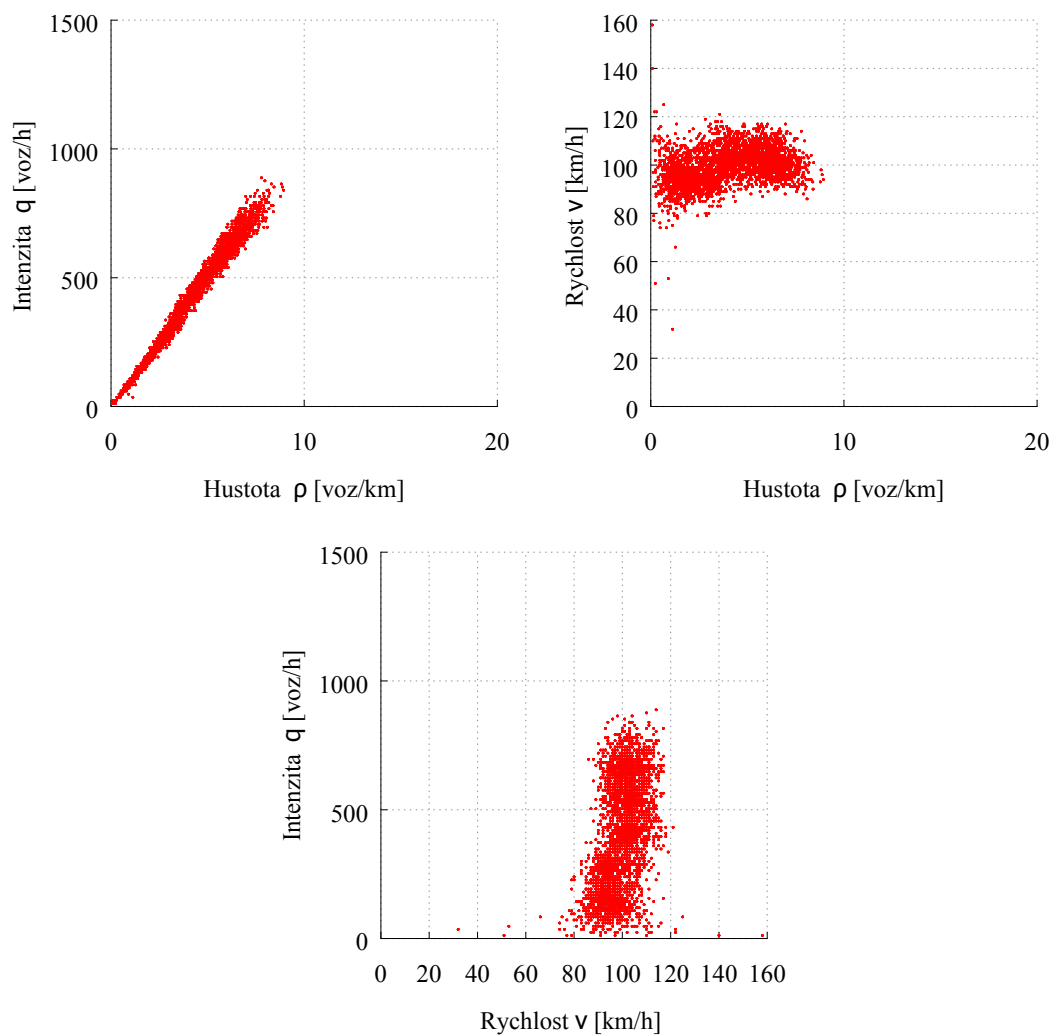


Obr. 5.3: Grafy zobrazující všechny sady čtveřice grafů, které byly vypracovány. U těchto grafů jsou data agregovaná po jedné minutě. Pro jejich velké množství jsou zde zobrazeny jen miniatury a ve velkém rozlišení jsou zobrazeny v elektronické příloze.

5.1 Data z radarů ASIM

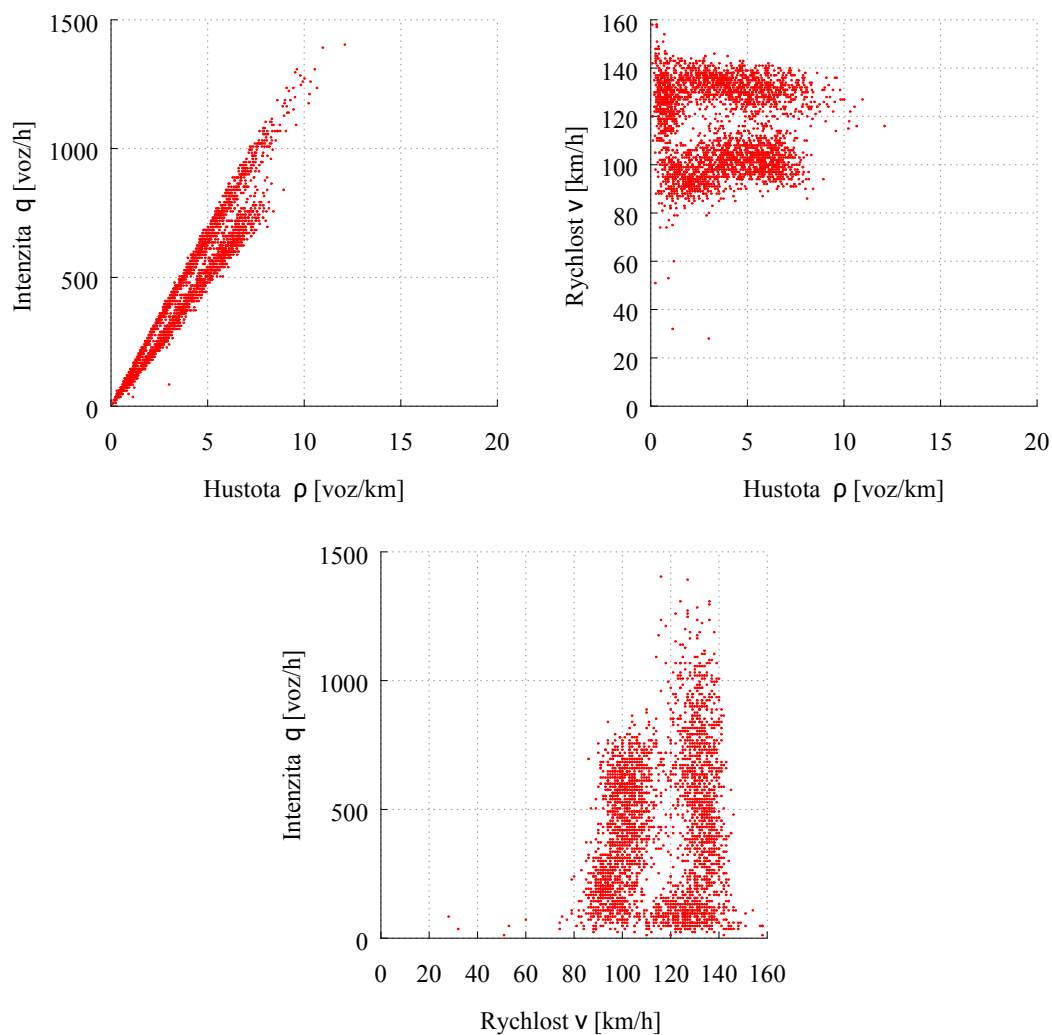
Tato data nebylo třeba zvlášť zpracovávat, jelikož, jak bylo řečeno v kapitole 4.1.2, tak radary ASIM data agregují do intervalů po pěti minutách. Agregace mi bohužel znemožnilo některé provést některé analýzy, například zjištění jaký si řidiči drží odstup v závislosti na rychlosti a to porovnat s možnostmi odstupů, které jsem zkoumal v kapitole 2. Data jsem měl z radarů ASIM umístěných na dálnici D1 z kilometrů 145, 151, 214, 218. Jednalo se tedy o data z okolí Vyškova a Velkého Meziříčí. Data byla sbírána od pátku 14. 9. 2012 do pondělí 24. 9. 2012, tedy deset dní. Jak jsem zjistil, v tomto období probíhala rekonstrukce mostu Vysočina a tedy data z radarů 145 a 151 byla tímto ovlivněna.

Data jsem tedy jen rozdělil dle jízdních pruhů a vygeneroval si rychlosti a intenzity pro všechny druhy vozidel dohromady. Z nich jsem poté vypracoval fundamentální diagramy, které jsou vidět na obrázku v příloze C.4 a jedna sada je zde přímo na obrázku 5.5. Jako z ostatních měření byla viditelná lineární závislost hustoty a intenzity. Intenzita ani hustota neměla na rychlost žádný významný vliv. Ovšem nejzajímavější bylo, že v levém jízdním pruhu byly pro jednu intenzitu dvě rychlosti. Příčinou tohoto chování je, dle mého názoru, předjíždění nákladních vozidel. Při této situaci celý dopravní proud sníží svoji rychlost, protože je k tomu donucen. Jelikož se jedná o již agregovaná data, tak se dá jen těžko zjistit, co je pravou příči-



Obr. 5.4: Diagramy z radarů ASIM, jejichž data se sbírala ode dne 14. 9. 2012 do 24. 9. 2012. Data jsou z radarů na dálnici D1 na staničení 145 km a jedná se o pravý jízdní pruh. Více grafů v příloze C.4.

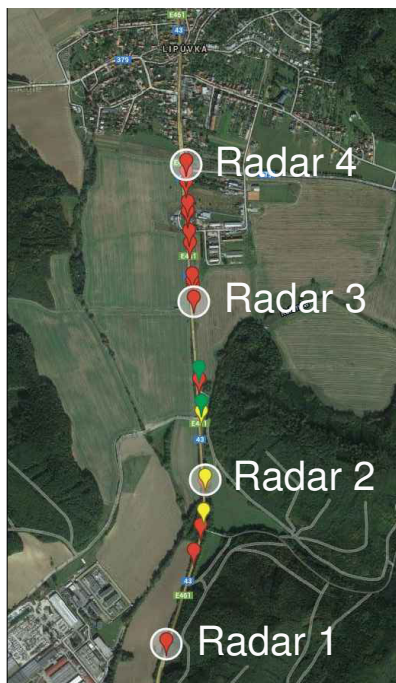
nou. Dobré by bylo tuto situaci ověřit pomocí kamerového systému, poté by se dalo dohledat, co stálo za snížením rychlosti celého dopravního proudu. Na obrázku 5.4 jsou vidět zpracovaná data z radaru nad pravým pruhem a na obrázku 5.5 data z levého radaru. Všechny vypracované grafy jsou v příloze C.4.



Obr. 5.5: Diagramy z radarů ASIM, jejichž data se sbírala ode dne 14. 9. 2012 do 24. 9. 2012. Data jsou z radaru na dálnici D1 na staničení 145 km a jedná se o levý jízdní pruh. Jsou zde dobře viditelné dvě rychlosti pro jednu intenzitu. Více grafů v příloze C.4.

6 VLASTNÍ MĚŘENÍ

Některá tato data byla měřena na dálnici v době, kdy probíhala rekonstrukce, a provoz byl veden ve směru 2+1. Dalším problémem byla neschopnost radaru zařadit vozidla do jízdních pruhů, takže data neodpovídala mým požadavkům (toto lze vidět zpracované na obrázku 5.2) a data z jednopruhových komunikací byla pořízena na místech s nízkou intenzitou, což také nevyhovovalo mým potřebám. Proto jsem se rozhodl pro vlastní měření, pro které jsem našel silně zatížený úsek dvoupruhové směrově nerozdělené silnice první třídy. Najít vhodný úsek s dobrou dostupností do Brna nebylo zrovna jednoduché. Vybral jsem úsek I/43 mezi Kuřimí (napojení ulicí Blanenskou) a Lipůvkou. Měření¹ probíhalo v jednom směru a to ve směru na Lipůvku.



Obr. 6.1: Mapa možných míst pro umístění radarů vtipovaných přes aplikaci StreetView a konečné místo umístění všech čtyř radarů [6].

Možná místa pro umístění radarů Sierzega a jejich konečné umístění je zobrazeno na obrázku 6.1. Toto předběžné určení vhodných míst pro umístění radaru jsem provedl pomocí aplikace StreetView dostupné v GoogleMaps². Tato místa jsou většinou sloupky od svislého dopravního značení, reklamních billboardů nebo, jako v tomto případě, například stožáry pro reklamní vlajky u benzínové pumpy. Kvůli upevňovacímu mechanismu, který je u radarů používá, se také nehodí všechny sloupky pro

¹S tímto měřením mi pomohl ing. Martin Vsetečka za což mu tímto velmi děkuji.

²Dostupné na <https://www.google.cz/maps>

jejich umístění. Toto se ovšem již ze StreetView určit nedá. Umístění radaru bylo provedeno tak, aby rozdíl mezi vzdálenostmi jednotlivých radarů byl co nejmenší. Vzdálenosti radarů byly od 490 m do 580 m. Fotografie přesného umístění jsou vidět v příloze D. Samotné měření probíhalo od úterý 26. 8. 2014 do pondělí 1. 9. 2014. Počasí v tyto dny je vidět v tabulce 6.1. Počasí jsem zjišťoval z důvodů, abych popřípadě vyřadil dny, kdy by počasí mohlo jakkoliv ovlivnit chování řidičů. Popřípadě by se tato data dala porovnat s chováním za dobrého počasí, ovšem žádná situace, kdy bylo počasí jakkoliv extrémní, nenastala. Dne 1. 9. 2014 proběhlo měření pomocí plovoucího vozidla.

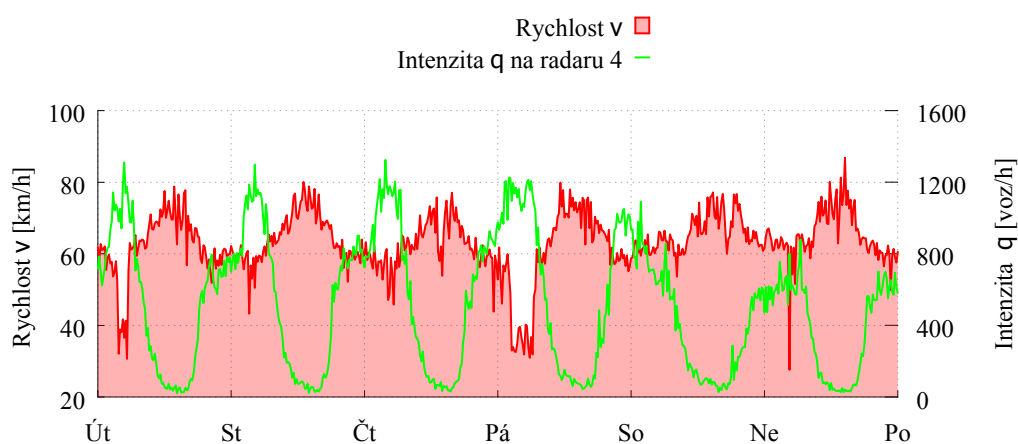
Den	Datum	Max. teplota	Min. teplota	Srážky	Popis počasí
Út	26.8.2014	18.5 °C	12.7 °C	19.3 mm	Zataženo s deštěm
St	27.8.2014	18.7 °C	7.5 °C	4.8 mm	Zataženo s deštěm
Čt	28.8.2014	22.8 °C	8.7 °C	0 mm	Jasno až polojasno
Pá	29.8.2014	23.2 °C	11.3 °C	0.5 mm	Polojasno
So	30.8.2014	20.9 °C	14.9 °C	0.9 mm	Polojasno až oblačno
Ne	31.8.2014	21.1 °C	13.7 °C	9.3 mm	Oblačno až zataženo
Po	1.9.2014	16.2 °C	13.3 °C	28.9 mm	Oblačno až zataženo

Tab. 6.1: Tabulka zobrazující počasí ve dnech, kdy probíhalo měření [3].

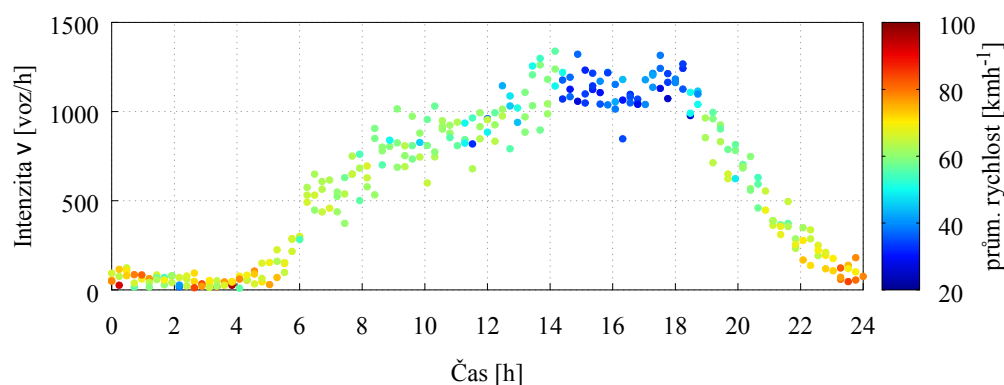
Celkem bylo při tomto měření zaznamenáno 265 288 průjezdů vozidel. Kompletní fotodokumentace s umístěním každého radaru je v příloze D a veškerá data získaná během tohoto měření jsou v elektronické příloze E.1.

6.1 Zpracování dat

Vlastní měření u Lipůvky jsem nejdříve zpracoval stejně jako všechna předešlá data. Vypracoval jsem tedy fundamentální diagramy (obr. 6.6) z agregovaných hodnot a vykreslil jsem intenzity a rychlosti v průběhu týdne (obr. 6.2) a zaměřil jsem se na nejzatíženější den, tedy pátek.



Obr. 6.2: Zobrazení rychlostí a intenzit změřených na radaru číslo 4 v průběhu měření. Graf zobrazuje hodnoty od úterý 26. 8. 2014 do pondělí 1. 9. 2014 a to vždy od 12 hodin. Data jsou agregovaná po 15 minutách.



Obr. 6.3: Průběh rychlostí a intenzit v nejzatíženější den - pátek 29. 8. 2014.

Při zpracování dat z mého měření jsem přišel na to, že radary vykazují větší odchylky. Proto jsem provedl vlastní kontrolu měření a to intenzity vozidel. Kontroloval jsem celkové počty všech vozidel v průběhu měření a intenzity v náhodně vybraných hodinách. Porovnával jsem hodnoty intenzit s průměrnými hodnotami intenzit ze všech 4 radarů. Největší odchylky od průměru vykazoval radar č.3 a to -3,45 % až -6,08 % (viz tabulka 6.2). Odchylky byly tedy vždy záporné a radar zabíral menší procento vozidel. Tyto odchylky byly vysvětleny umístěním radaru u

benzínové pumpy (viz obrázky v příloze D.3), kdy část vozidel sjížděla z komunikace na benzínovou stanici. Odchytky na ostatních radarech sice byly, ale neměly stále stejné znaménko a nebyly tak velké. Průměrné odchytky byly v kontrolovaných intenzitách do 1,5 % (tato tabulka je v příloze B.3). To je při 1200 voz/h 18 vozidel, která radar mohl vynechat z důvod, že měla vozidla malý odstup a radar zaregistroval dvě vozidla jako jedno. Bohužel výrobce nedeklaruje žádnou odchylku od počtu zaznamenaných vozidel, ale jen odchylku od zaznamenané délky, rychlosti či odstupu. Proto jsem nemohl posoudit, zda je tato odchylka adekvátní.

Č. rad	26.8.		29.8.		Celkem za měření 26.8. - 1.9.	ϕ
	12:00-13:00	13:00-14:00	13:00-14:00	14:00-15:00		
1	-0,96%	0,27%	-0,09%	2,82%	-1,49%	0,11%
2	5,02%	1,76%	1,68%	2,48%	3,18%	2,82%
3	-5,09%	-5,43%	-3,45%	-6,08%	-3,70%	-4,75%
4	1,03%	3,39%	1,86%	0,78%	2,01%	1,82%

Tab. 6.2: Data procentuálně vyjádřených rozdílů intenzit na jednotlivých radarech k průměru.

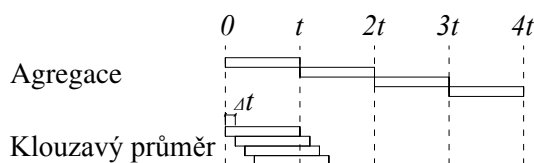
Skladba dopravního proudu byla zjištěna dle průměrných hodnot za celé měření. Osobní automobily 87,4 %, jednostopá vozidla 4,5 %, lehká nákladní vozidla 4,4 % a těžká nákladní vozidla 3,7 %. Ovšem i u tohoto nastal stejný problém. Skladba by měla být na všech radarech stejná. Z naměřených dat bohužel toto nebylo patrné. Jak je vidět v tabulce 6.3, odchylky počtu vozidel dle druhu na jednotlivých radarech v porovnání s průměrnými hodnotami vykazovaly obrovské rozdíly. A to v některých případech až o 76 %. To mi jen potvrdilo, že data nejsou použitelná pro prostorově časovou analýzu a ani není vhodné pomocí těchto dat zkoumat vztah kapacity v závislosti na skladbě dopravního proudu. To bylo způsobeno dle mého názoru již zmíněným velkým rozptylem při zaznamenávání délek, který je v případě radarů Sierzega dle výrobce $\pm 20\%$, což se mi potvrdilo i při zkoušce o ruční vypracování prostorově-časového diagramu, jelikož jsem chtěl nalézt stejné vozidlo na všech radarech. Pokoušel jsem se nalézt skupinku delších vozidel, která byla zaznamenána na radaru č.1 v malém sledu. Ovšem na dalších radarech již tyto vozy nebyly dále zaznamenány. Byla zde vozidla s jinými délkami a to s rozdíly až 50 %. Radary jsem sledoval v ranních hodinách, kdy byly intenzity nejmenší. Pro pomoc s hledáním těchto vozidel jsem provedl v den, kdy jsem odinstalovával radary, měření pomocí plovoucího vozidla s využitím přístroje MobiTex. Fotografie z tohoto měření je v příloze na obrázku D.5. Přístroj MobiTex je vidět na palubní desce vpravo. Na stejné fotografii je vidět i nehoda, která se stala kousek před měřeným úsekem. Celé měření bylo tímto velice ovlivněno a výsledná data se nedala použít. Jak tato ne-

hoda ovlivnila celé měření je vidět v příloze na obrázku B.1, který byl vygenerován programem GPS Vizualizer na základě mého měření. Je na něm graficky zobrazena rychlost, která je nejnižší v oblasti před nehodou. Toto měření mi tedy bohužel neposkytlo potřebné údaje pro vypracování prostorově-časového diagramu.

Č. rad	Jednostopá	Osobní	Nákladní	Soupravy
1	-2,7%	-4,1%	6,5%	51,6%
2	47,9%	5,6%	-24,9%	-76,3%
3	-12,8%	-2,5%	-22,6%	0,0%
4	-32,4%	0,9%	40,9%	24,7%

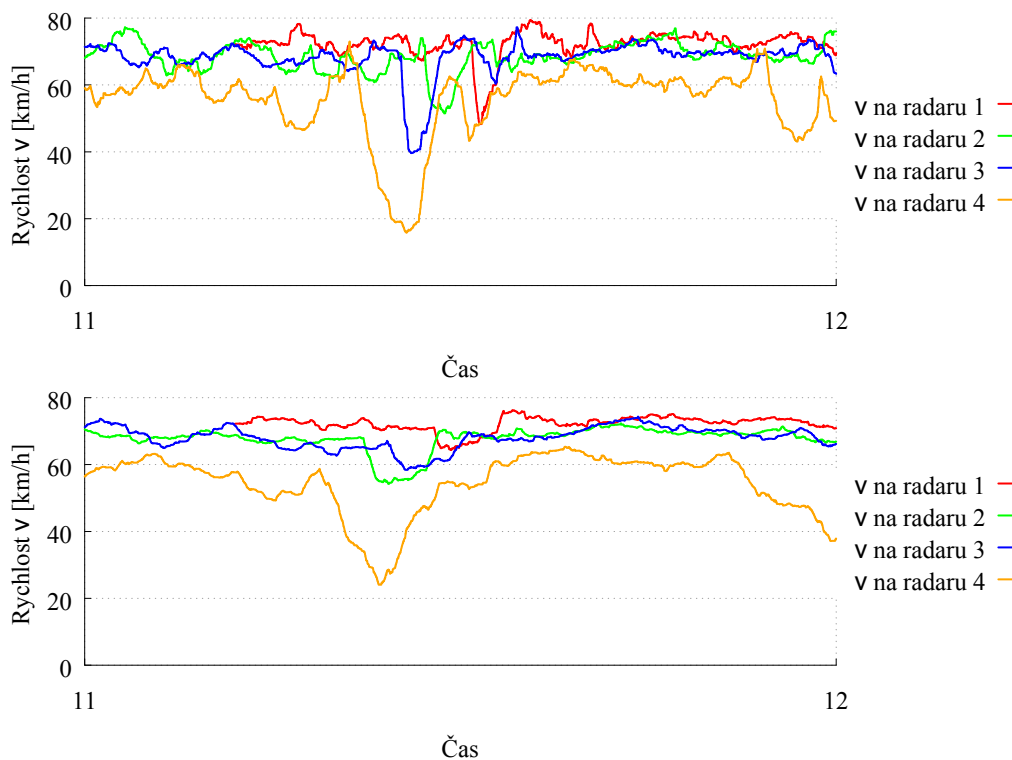
Tab. 6.3: Celkové počty vozidel dle druhu zaznamenané na jednotlivých radarech a jejich rozdíly od průměrných hodnot ze všech radarů. Číselné hodnoty s počty jednotlivých vozidel jsou v příloze v tabulce B.4.

Skript pro vyhodnocení dat a vytvoření grafů jsem upravil (viz příloha A.2) pro agregaci pomocí klouzavého průměru. Klouzavý průměr je v technické analýze s oblibou používán zejména kvůli jednoduchosti svého výpočtu, jelikož dobře zobrazuje vývoj trendu. Základní princip výpočtu je ve zvolení n časových period, za které budeme počítat průměry. Existují čtyři druhy - jednoduchý (SMA), klouzavý (EMA), vážený (WMA) a lineárně vážený (LWMA). Já jsem použil jednoduchý klouzavý průměr kvůli jeho jednoduchosti a dostatečné vypovídací hodnotě. Při jeho výpočtu jsem postupoval tak, že jsem data agregoval dle zadaného intervalu (délka klouzavého průměru t) a to 1 min, 2 min a 5 min. Ovšem další data, která jsem agregoval, nebyla následující časový interval, ale pouze posunutý časový interval a daný posun Δt . Poté tedy intervaly, ve kterých se zjišťovaly dané hodnoty, byly $(0 \div t)$, $(\Delta t \div t + \Delta t)$, $(2p \div d + 2 \cdot \Delta t)$, \dots , na rozdíl od klasické agregace, kdy byly intervaly $(0 \div t)$, $(t \div 2t)$, $(2t \div 3t)$, \dots



Obr. 6.4: Zobrazení rozdílu klasické agregace a klouzavého průměru.

Grafy vypracované pomocí klouzavého průměru nám dávají jasnější obraz o chování dopravního proudu. U agregovaných hodnot může docházet k velkým skokům mezi hodnotami, které jsou způsobeny jen způsobem měření a nereflktují přesně danou situaci. Tento nedostatek klouzavý průměr odstraňuje a již dává plynulý obraz o situaci. Rozdíl mezi těmito metodami je patrný z obrázku 6.6. Důležité je

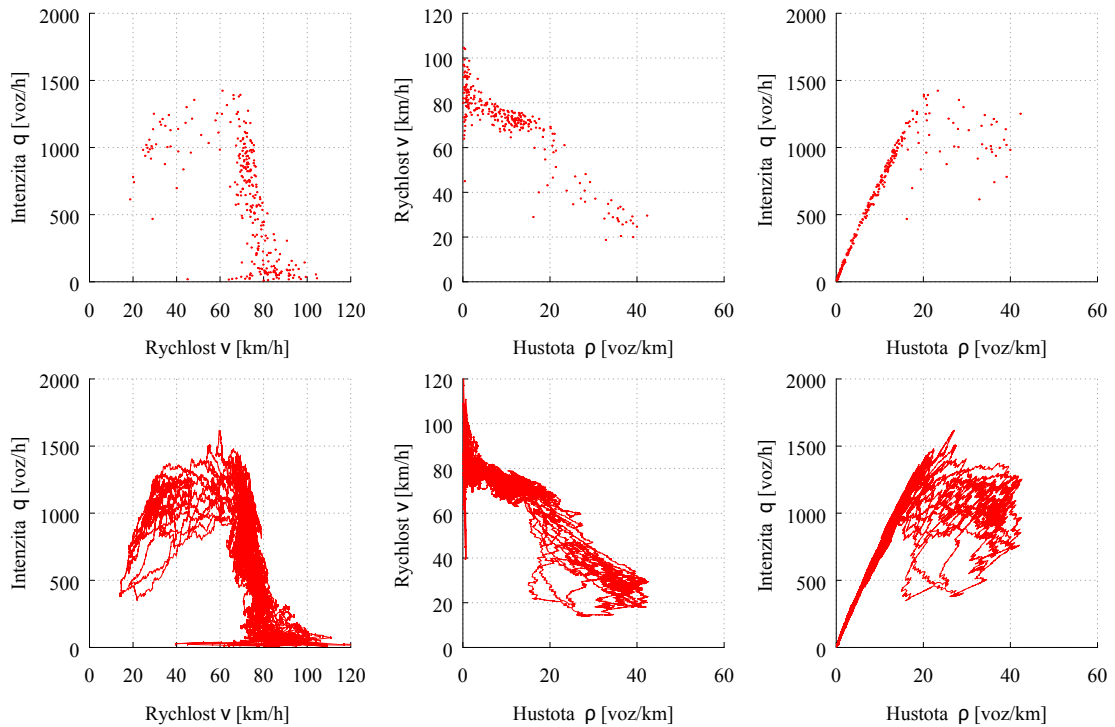


Obr. 6.5: Viditelný Stop-and-Go efekt, data jsou vypočtena pomocí klouzavého průměru s délkou 2 minuty a 5 minut. Posunem o 1 s. Jedná se o nejzatíženější den - pátek 29. 8. 2014 v čase 11:00-12:00 hod.

také nastavení délky klouzavého průměru. Co způsobí rozdílné nastavení délky s průběhy rychlostí, je dobře viditelné v grafech na obrázku 6.5. Jsou zde grafy s nastavenou délkou klouzavého průměru 2 a 5 min. Nižší hodnota se hodí pro zobrazení všech dějů, ovšem větší délka se hodí pro zobrazení delšího časového období, na kterém jsou vidět jen ty nejvýraznější děje v chování dopravního proudu. Přímo na tomto obrázku je zobrazena jedna hodina ze dne 29. 8. 2014 a při délce 5 minut se zde zobrazí na každém z radarů jen jedna výrazná výchylka a ostatní data jsou více vyhlazená. Posun vozidel proti směru jízdy, který je na tomto obrázku patrný, postupoval rychlostí cca 12 km/h. Což je o něco méně, než se běžně uvádí. Běžná rychlost posunu kolony je protisměru jízdy 14 km/h [19].

Dle [1] jsem vypracoval graf závislosti obsazenosti a zdržení. Tento graf se používá pro plánování dopravy a vyjadřuje, jaký bude nárůst zdržení při zvětšující se intenzitě dopravy.

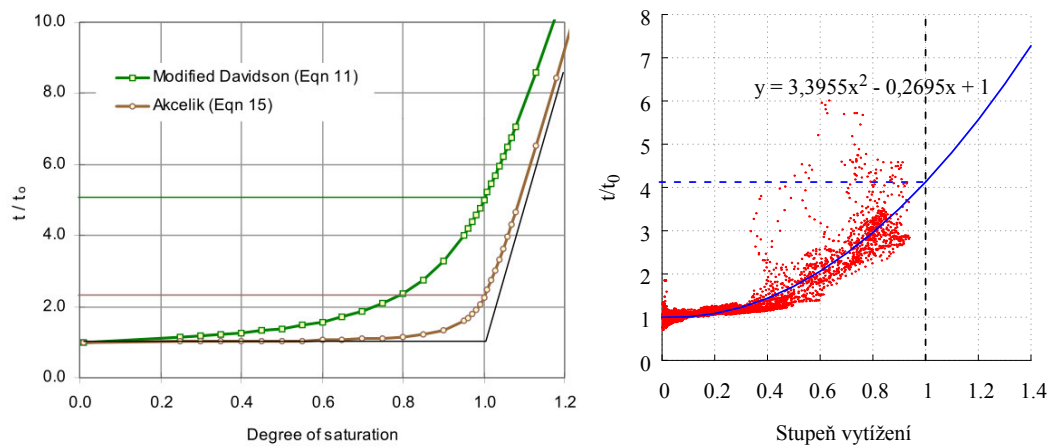
Množinou všech změřených bodů jsem proložil křivku pomocí polynomicke regrese 2. stupně. Cílem regrese je proložit hodnotami $x_i, y_i = 1, \dots, n$ polynom 2. stupně $P_k(x) = p_0 + p_1x + p_2x^2$. Koeficienty p_0, p_1, p_2 jsou voleny tak, aby součet



Obr. 6.6: Diagramy z dat ze dne 29. 8. 2014. Data zpracována klasickou agregací (nahore) a klouzavým průměrem (dole).

kvadrátu odchylek $e_i = y_i - P_k(x_i)$ byl minimální, tedy $F = \sum_{i=1}^n e_i^2 \rightarrow \min$. Tento vypracovaný graf v porovnání s [1] je vidět na obrázku 6.7. Křivka bohužel neodpovídá žádnému z modelů a to je způsobeno malým množstvím dat. Chybí totiž data z přetížené komunikace.

Pro tento úsek jsem také spočítal kapacitu dle TP 7361 01. Podle průběhu nivelety jsem určil rychlost pomalého návrhového vozidla 50 km/h a tedy třídu stoupání 3. Z tohoto a nízké křivolakosti vyplynula kapacita úseku 2 090 voz/h na oba směry, tedy 1 045 voz/h a pro ÚKD C, která by na této komunikaci měla být dodržena, to je 652 voz/h. Ovšem tento úsek nikdy nedosáhl své kapacity, tedy hustoty přesahující přes 40 voz/h. Intenzita, při níž došlo ke zpomalení dopravního proudu, byla cca 1 100 vozidel.



Obr. 6.7: Graf závislosti obsazenosti a zdržení. Vlevo je graf z [1] a vpravo můj vypracovaný pomocí polynomické regrese 2. stupně.

7 MODELOVÁNÍ DOPRAVNÍHO PROUDU

Pro liniové řízení dopravy se začalo hojně využívat PDZ. Například v ČR je nejvíce využíváno na pražském okruhu, či je použito při modernizaci dálnice D1. Je zde tedy otázka, při jaké rychlosti je největší intenzita, či jak změna rychlosti ovlivňuje intenzitu. Bohužel úsek silnice s dostatečnou intenzitou a možností měnit max. dovolenou rychlost není, tak jsem se uchýlil k modelování této situace. Je zde tedy shrnuto, jak se k dané problematice staví programy pro modelování dopravního proudu. A to jak mikrosimulační programy **Aimsun**¹, **Vissim** a **S-Paramics**, které má naše univerzita licencovány, tak celulární automat dle Nagel-Schreckenberga.

7.1 Mikrosimulační modely

Mikrosimulační modely jsou v dnešní době nejvíce využívané pro simulaci dopravního proudu. Jsou založeny na popisu chování jednotlivých vozidel v dopravním proudu v interakci s jeho blízkým okolím. Vozidla mohou mít stejné předem definované vlastnosti, ovšem do podmínky, jak reaguje každé vozidlo na své okolí, je vnášena již určitá náhodnost.

Jak jsem již napsal výše, použil jsem tři mikrosimulační programy. Tyto programy jsou založeny na typu Car following models (CFM), které jsou nejrozšířenějším typem mikrosimulačních programů. PTV-Vissim používá pro výpočet Wiedemannův model, který je ovšem ve výpočetním jádru software modifikovaný a jeho přesná podoba není známa a S-Paramics Fritzscheho. Tyto dva modely jsou typu optimální akcelerace (OAM). Program Aimsun využívá jako výpočetní jádro Gippsův model, který je model optimální rychlosti (OVM). Tyto tři jsou již celkem staré (Wiederman 1974[24]), ale i přesto se stále používají. Novější model je IDM (Intelligent Driver Model), který je odborníky považován za nejlepší v oblasti mikrosimulace [2]. Tento model ovšem zatím není zabudován jako výpočetní jádro v žádném komerčním softwaru, takže jsem se jím v této práci zabýval, ale zabýval jsem se jen modely následujícího vozidla (CFM). Tyto pracují tak, že se snaží zjistit rychlost (Gipps) či akceleraci (Wiederman, Fritzsche) z podmínek v okolí. Nejjednodušším příkladem je, že se snaží zjistit tuto hodnotu pouze z aktuálního stavu přecházejícího vozidla.

$$a = f(v, \Delta v, \Delta x) \quad (7.1)$$

¹Data z tohoto programu mi poskytla Ing. Radka Matuszkova z ústavu pozemních komunikací VUT v Brně

Kde:

v ... rychlost vozidla

Δv ... relativní rychlost vozidla vzhledem k předcházejícímu vozidlu

Δx ... vzdálenost k předcházejícímu vozidlu

Nastavení programů jsem zachoval ve výchozích hodnotách. Délka simulace byla dvě hodiny a sledovaný úsek byl 1 km. Pro záznam dat z modelu jsem použil detektory, které zaznamenávaly rychlost a průjezd vozidla. Tyto hodnoty jsem poté agregoval po jedné minutě. Hustotu jsem dopočítal dle 1.12. Použil jsem tedy stejný styl jako v případě vlastního měření. Takovéto nastavení bylo ve všech programech stejné.

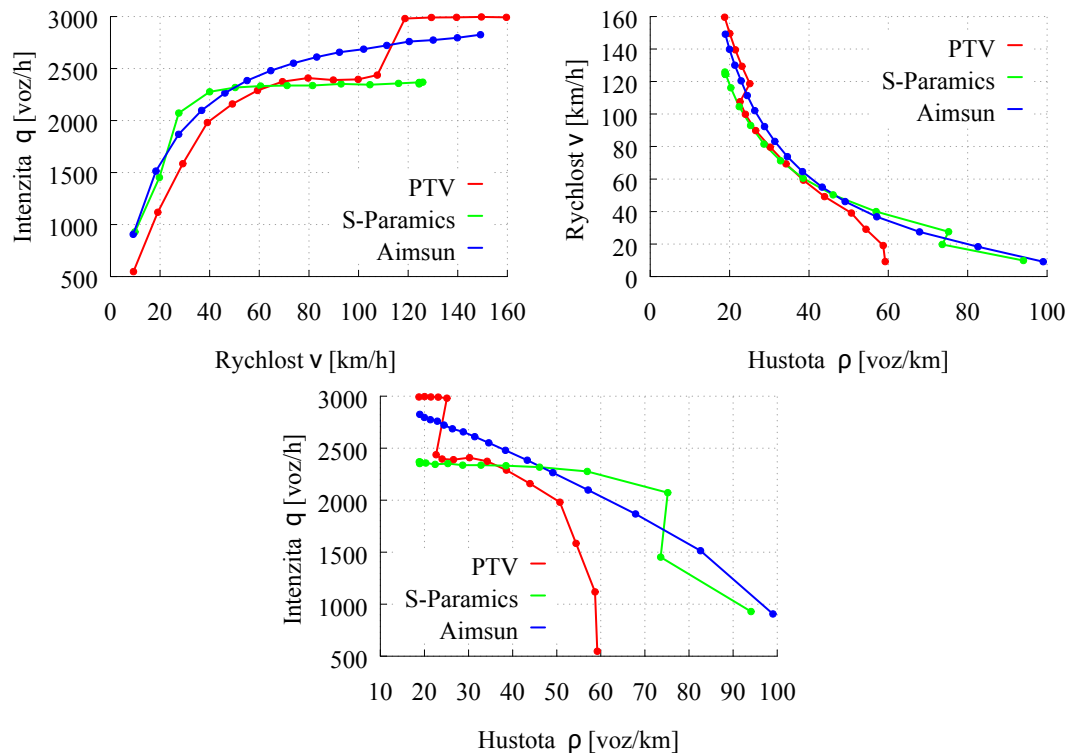
Provedl jsem dva testy, které měly naznačit, jak se k této problematice staví mikrosimulační programy. Výstupy mohou ukázat podobnost či odlišnost všech programů. I přes jednoduchý příklad a základní nastavení jsem očekával rozdílné výsledky dané již tím, že každý z programů používá jiný výpočetní model. Tyto testy ovšem neměly jen porovnat programy, ale měly i nastínit díky těmto dvěma testům, které mají opačný přístup, zda je rychlost závislá na intenzitě, či opačně.

7.1.1 Mikrosimulační model s proměnnou rychlostí

V tomto modelu jsem vytvořil modelovou situaci, kdy jsem měl jednopruhovou komunikaci o délce 2 km se vstupní intenzitou 3 000 voz/h a poté jsem měnil rychlost na komunikaci lineárně po 10 km/h a to od 10 km/h do 160 km/h. Dále jsem již jen v programu (PTV-Vissim) provedl tento test s různými skladbami dopravy a také různým podélným sklonem (viz obr. 7.2).

Tyto grafy se velmi schodovaly s grafy konstantního časového odstupu. A nejvíce se mu podobal program Aimsun. Byl zde jasně patrný nárůst intenzity při zvýšení povolené rychlosti. Dále bylo zajímavé, že nedošlo při tak velkých intenzitách ke kolapsu komunikace, což bylo způsobeno tím, že do modelu nebyla všechna vozidla puštěna.

Dále zde byla dobře viditelná spojitost u dat z programu Aimsun a nespojitost z dat z PTV-Vissim a S-Paramicsu. Tato nespojitost byla způsobena právě rozdílnými výpočetními modely. Fritzeho a Wiedermannuv model patří do kategorie tzv. psycho-fyziologických modelů, které předpokládají, že se řidič v každé situaci chová jinak a tedy mají pro různé obory hodnot nadefinované různé chování. Tyto modely nastavují okrajové podmínky, při jejichž překročení dojde k odlišnému chování řidiče a tedy nespojitému průběhu reakce řidiče. Z tohoto se dá usuzovat, že skok intenzit



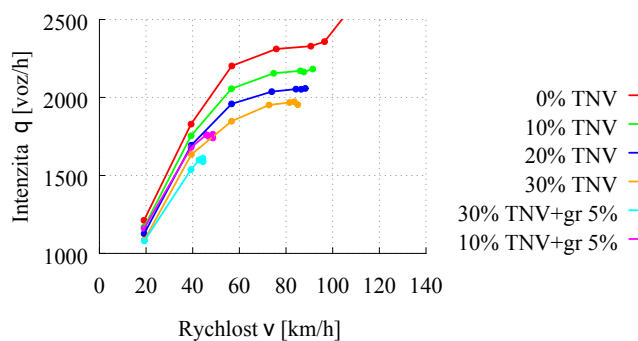
Obr. 7.1: Výsledky prvního testu s proměnnou rychlostí.

v programu PTV-Vissim při změně rychlosti ze 110 km/h na 120 km/h je způsoben právě tímto. Oproti tomuto Gippsův model nepoužívá k popisu při různých podmínkách sadu rovnic, ale má ryze analytický přístup a předepisuje pro celé spektrum rychlostí stejný předpis pro akceleraci (decelerace). Gippsův model je založen na požadavku udržovat si vzdálenost od předchozího vozidla v rozumných mezích.

7.1.2 Mikrosimulační model s proměnnou intenzitou

V tomto příkladě jsem postupoval opačně. Nastavil jsem neomezenou rychlost komunikace a intenzitu jsem měnil od 1 000 do 3 000 po 200 vozidlech/h a poté po 1 000 až do 7 000. Tyto vyšší hodnoty jsem dělal již navíc, jelikož jsem myslel, že 3 000 vozidel/h bude konečná intenzita. Proto jsem zvolil tento širší interval.

I v tomto testu se opět projevila nespojitost, která je dobře patrná na obrázku 7.3. Pokud bych nebral v potaz intenzity nad 3 000, tak intenzita nemá žádný významný vliv na rychlost. V programech PTV-Vissim a S-Paramics dokonce žádnou, jen v Aimsunu dojde ke snížení, a to ze 159 km/h při 1 000 vozidlech/h na 149 km/h při 3 000 vozidlech/h. Což je pokles pouhých 6,3 %, který je zanedbatelný při nárůstu intenzit na šestinásobek. Dále je zde patrný vztah hustota–intenzita, který je pro všechny tři programy velmi podobný. Je v celém svém rozsahu lineární a se vzrůstající tendencí. Jelikož vzrůstající intenzita nijak neovlivňuje rychlost je logické, že

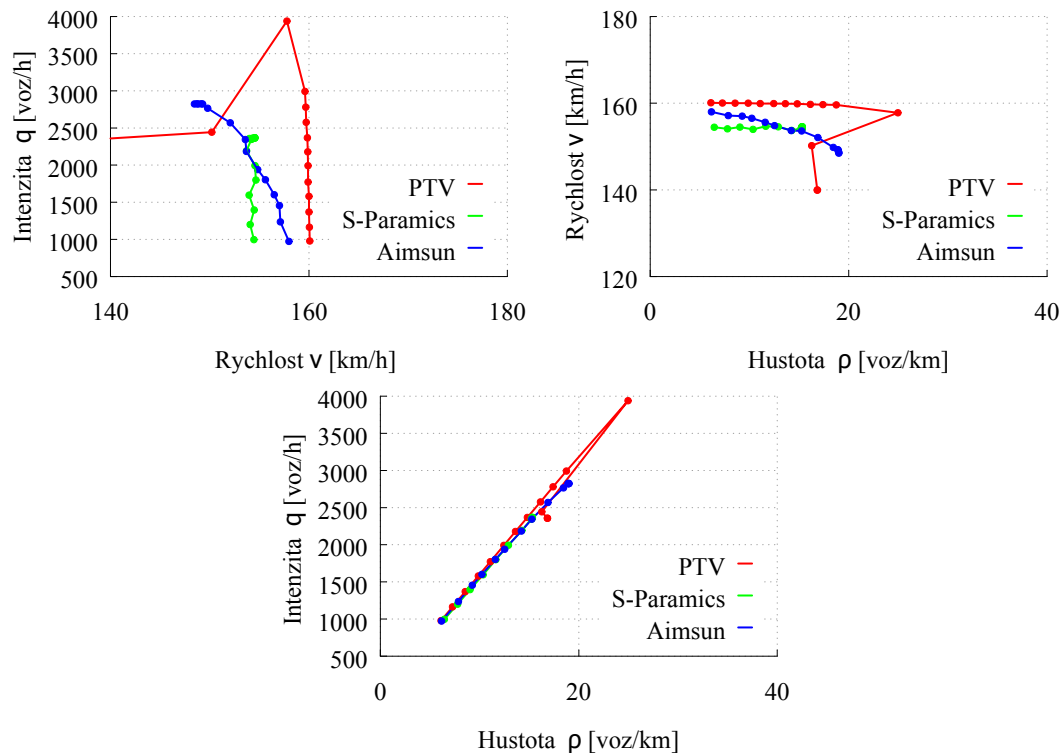


Obr. 7.2: Výsledky prvního testu s proměnnou rychlostí a nastavením různého podílu TNV a některé s podélným sklonem komunikace. Jen v programu PTV.

s jejím nárůstem bude zároveň růst i hustota.

Tyto dva relativně jednoduché testy mi poskytly informace, které by se v reálném provozu jen velmi těžko prováděly. Popřípadě by bylo třeba velké množství měření na podobných místech s velkou intenzitou, ale různou povolenou rychlostí. V tomto případě by ovšem musely být měřené úseky co nejvíce podobné a měla by být podobná skladba dopravního proudu. Nejzásadnějším výsledkem je, že intenzita závisí na rychlosti, nikoliv obráceně. Dalším výsledkem bylo samotné seznámení, používání těchto programů a jejich porovnání. Data z obou testů jsou vidět v příloze B.

Relativně jednoduché testy jsem napsal proto, že byly sice velmi jednoduché, ale muselo být provedeno celkem 132 simulací s různým nastavením a to ve 3 různých programech. Každý má odlišné uživatelské prostředí, různé možnosti nastavení a různé výstupy. O své „přívětivosti“ vás S-Paramics přesvědčí již při instalaci. Návod na instalaci o 26 stranách například říká, že S-paramics běží na počítačích se systémem Microsoft Windows 7, XP, 2000 a NT 4.x ovšem v systému Windows Vista nebo Windows ME jej nespustíte. Sám o sobě S-Paramics také není použitelný na jakémkoliv systému Windows, jelikož na něj nebyl programován. Pro spuštění je nejprve potřeba nainstalovat podpůrné programy Exceed & Exceed 3D a NuTCRACKER COE. Poté již při samotném používání programu je poznat, díky jeho ovládání, že nebyl vytvořen pro Windows. Například odzoomování probíhá při držení levého a prostředního tlačítka, přizoomování při přidržení levého a pravého tlačítka myši. Takovým to způsobem probíhá celá práce s programem. Tento program vznikl již v 90 letech na skotské University of Edinburgh ve spolupráci s firmou SIAS Transport Planners a na počátku své existence patřil S-Paramics mezi absolutní špičku zejména v oblasti modelování ITS infrastruktury [4]. Přes všechny svoje nedostatky je v některých ohledech velmi otevřeným a snadno integrovatelným nástrojem a to hlavně díky svojí otevřené datové struktuře, s níž lze ovládat



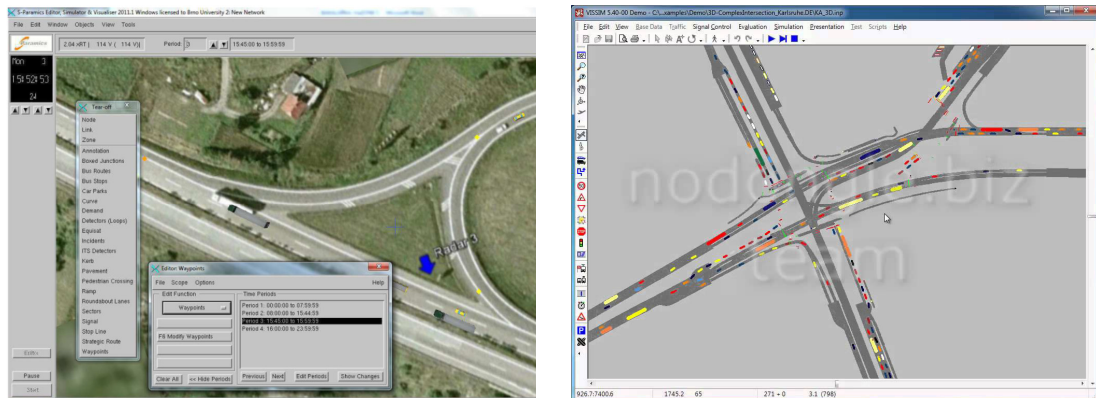
Obr. 7.3: Výsledky druhého testu s proměnnou intenzitou.

program pomocí textových souborů. Další zajímavostí tohoto programu je, že ještě před samotným vydáním programu se vývojový tým rozpadl na dvě společnosti S-Paramics a Quadstone Paramics a obě tyto firmy nyní sídlí v Edinburghu nedaleko od sebe. Společnost SIAS nyní pracuje ovšem na novém programu, založeném na stejném výpočetním jádru. Jedná se o Paramics Discovery, který jsem si mohl také vyzkoušet a je o mnoho přívětivější. Ovšem tento program ještě nedisponoval všemi možnostmi nastavení jako S-Paramics. Oproti tomu práce v programu Vissim od PTV byla velmi jednoduchá, jelikož byl program velmi intuitivní.

7.2 Celulární automat

Celulární automat (CA), někdy též buněčný automat, je dynamický systém, který je diskrétní v hodnotách, prostoru a čase. Vývoj CA začal v polovině 20. století a první, kdo se jím začal zabývat, byl maďarský matematik John von Neumann, který vypracoval model pro reprodukci mikroorganismů [21].

Nejčastěji se používají 2D automaty, kdy jsou data rozmístěna do čtvercové či šestiúhelníkové mřížky. Každá buňka může nabývat pouze K možných stavů, kdy ten nejjednodušší a často používaný systém je, že $K = 2$, tedy že buňka může nabývat pouze dvou stavů 0 a 1, kde 0 - mrtvá buňka a 1 - živá buňka (systém binární). CA



Obr. 7.4: Prostředí mikrosimulačních programů. Vlevo S-paramics a vpravo VIS-SIM.

pracují tak, že se v každém kroku přečtou vstupní hodnoty, ty na základě kombinace svého vztahu (každá buňka reaguje pouze na stav svého okolí) přemění na nový stav. Krása CA spočívá v tom, že nejsou popsány žádným systémem složitých rovnic, ale jen na vzájemném působení buněk dle určitých pravidel. Jejich nevýhody spočívají (dle [17]) v tom, že:

- Nejsou příliš rozšířené (je nedostatek praktických výsledků).
- Jsou „příliš jednoduché“ pro modelování.
- Je nedostatek vhodných metod a nástrojů pro kalibraci CA.

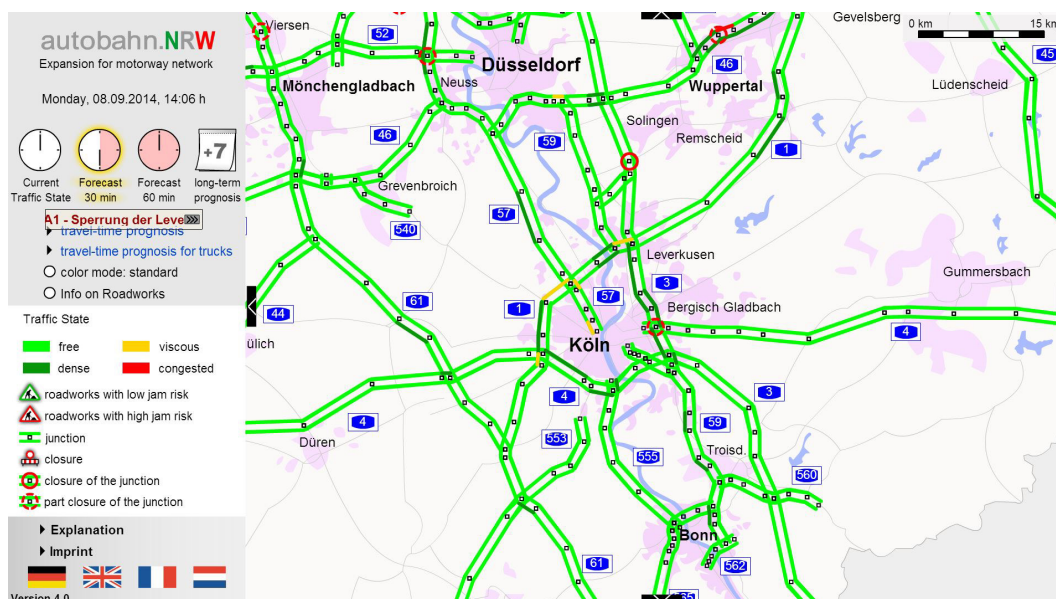
Ovšem první bod v dnešní době vyvrací (v oboru dopravy) systém OLSIM, který díky 8 000 indukčních smyček sbírá data ze silnic a poté je celulární automat zpracovává a vytváří 15 minutovou a 30 minutovou predikci dopravy pro dálniční síť v Severním Porýní-Vestfálsko. Jejich „jednoduchost“ je zároveň jejich výhodou, jelikož jsou málo náročné na výpočetní techniku a vytvoření takového modelu není složitou záležitostí a lze jej zvládnout se základy nějakého programovacího jazyku (viz 7.2.2).

Možnosti updatu pro modely s diskretním časem:

- **Náhodný update** – náhodně vybere jednu z buněk $i \in \{0, 1, \dots, L\}$ a tu posune s pravděpodobností λ_i
- **Plně paralelní update** – všechny buňky se aktualizují současně
- **Postupně paralelní update:**

Dopředný – aktualizace mezi buňkami v pořadí $(0 \rightarrow 1); (1 \rightarrow 2); \dots; (L \rightarrow L + 1)$

Zpětný – aktualizace mezi buňkami v pořadí $(L \rightarrow L + 1); \dots; (1 \rightarrow 2); (0 \rightarrow 1)$



Obr. 7.5: Zobrazení prognózy dopravy s 30-ti minutovým výhledem v oblasti Kolína zpracované pomocí CA. Dostupné na: <http://www.autobahn.nrw.de/> (kopírováno 8. 9. 2014).

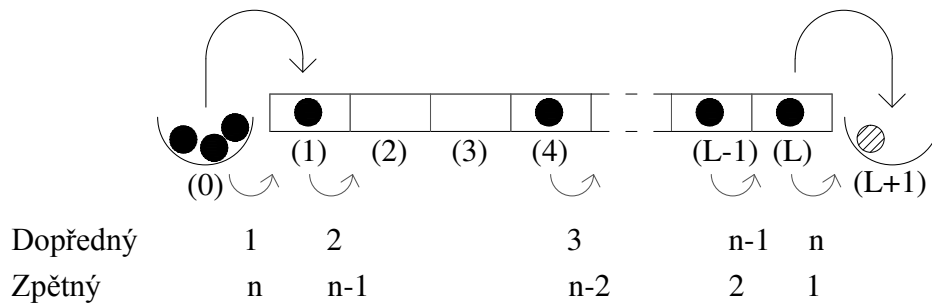
7.2.1 Nagelův-Schreckenbergův model

Pro celulární automaty v oblasti modelování dopravy se používají 1D celulární automaty. Je to tedy jednorozměrná lineární mřížka tvořená buňkami, kde každá má dva sousedy.

Nejrozšířenějším v dopravním modelování je model od autorů Kai Nagel a Michael Schreckenberg. Proto tedy název Nagel-Schreckenberg (NaSch). Tento model vznikl v roce 1990 a genialita tohoto modelu nebyla ještě překonána (používané modely jsou pouze modifikacemi NaSch). Velmi jednoduchá pravidla tohoto modelu generují složité chování.

Základem tohoto modelu je rozdělení komunikace na úseky (buňky) po 7,5 m (obr. 7.7). Tato hodnota nebyla vybrána náhodně, ale je to obrácená hodnota střední hustoty při dopravní kongesci, tedy při zastavení dopravního proudu. Proto nemá smysl dělat jemnější síť buněk, ledaže bychom potřebovali jemnější nastavení rychlosti. Buňka může být buď volná nebo obsazená. Pokud je buňka obsazená zapisuje se do ní její aktuální rychlost.

Tento model již není binární, ale může nastat více stavů u každé buňky (tzv. konečný počet). V případě obsazené buňky je její hodnota závislá na rychlosti v_i a její maximální dosažitelná hodnota je daná maximální rychlostí v_{max} a může tedy dosahovat hodnot $v_i = 0, 1, \dots, v_{max}$ a značí posun vozidla o v_i v jednom kroku. Proto se tedy nyní budeme bavit o rychlosti místo hodnoty buňky.



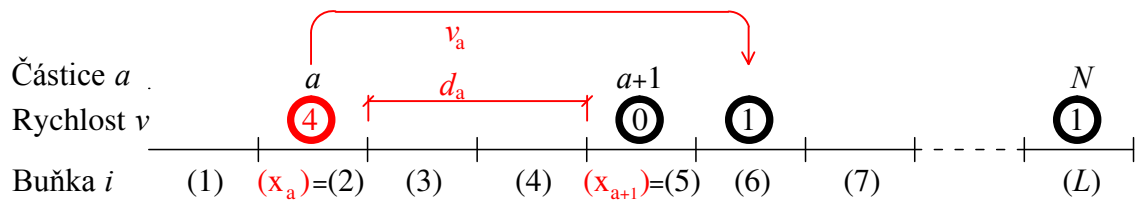
Obr. 7.6: Zobrazení kroků při postupně paralelním updatu, který se používá pro CA dle NaSch.



Obr. 7.7: Princip fungování CA dle Nagel-Schreckenberga.

Základní značení a vlastnosti částice a v CA (všechny tyto vlastnosti jsou prakticky znázorněny na obr. 7.8):

- **Buňky** $i = 1, 2 \dots, L$
- **Částice** $a = 1, 2 \dots, N$
- **Poloha částice** $x_a(t)$
- **Rychlost** $v_a(t) \in \{0, 1 \dots v_{max}\}$ – celočíselná rychlost
- **Odstup** $d_a(t) = x_{a-1} - x_a$ – odstup částice a od částice $a + 1$



Obr. 7.8: Popis jednotlivých veličin v CA pro sledované vozidlo a .

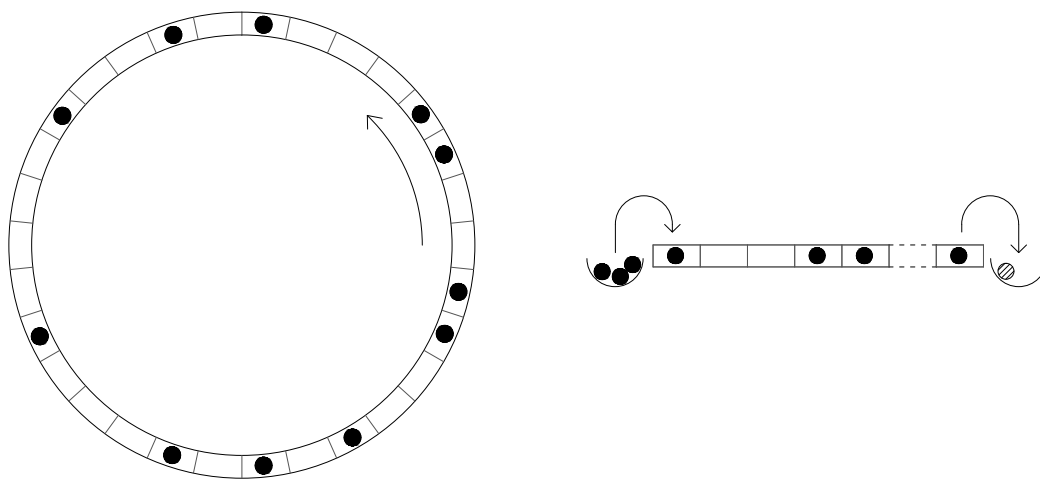
V každém výpočetním kroku, tedy při změně času t na $t + 1$, dojde k přechodu mezi jednotlivými buňkami a to na základě čtyřech kroků (tzv. přechodová pravidla). Tyto čtyři kroky jsou **akcelera**ce, při které se k aktuální rychlosti vozidla v_i přičte jednička, pokud je tato rychlost menší jak v_{max} . Dalším krokem je **decelera**ce, kde se zkontroluje, zda není rychlost větší jak vzdálenost od předcházejícího vozidla d_a

a pokud ano, vezme se tato vzdálenost jako aktuální rychlost. Třetím krokem je **náhodné zpomalení**, ve kterém se od rychlosti odečte hodnota p_a , která nabývá hodnot $\langle 0; 1 \rangle$ s danou pravděpodobností. Poslední je vlastní **pohyb** vozidla, při kterém vozidlo změní svoji polohu v závislosti na vypočítané rychlosti. Pro výpočet rychlosti při změně času z t na $t + 1$ jsou tedy jednotlivé kroky zapsány matematicky takto:

$$\begin{aligned} v_{a,akc} &= \min\{v_a(t) + 1, v_{max}\} \\ v_{a,dec} &= \min\{v_{a,akc}(t), d_a(t)\} \\ v_{a,nz} &= \max\{v_{a,dec}(t) - p_a, 0\} \\ x_a(t + 1) &= x_a(t) + v_{a,nz}(t) \end{aligned} \tag{7.2}$$

Okrajové podmínky pro NaSch automat:

- *Periodické* – generické vlastnosti pro $L \rightarrow \infty$
- *Otevřené*:
 - Vstup na první pozici s rychlostí v_{max}
 - Výstup „vykročením z mřížky“



Obr. 7.9: Graficky zobrazené možnosti okrajových podmínek pro CA. Vlevo periodické a vpravo otevřené.

NaSch model má další modifikace jako Velocity-Dependent-Randomization Model, Benjamin-Johnson-Hui Slow-to-Start Rule, Brake-Light Model, Kerner-Klenov-Wolf ... [9]. Ovšem NaSch model pro tento účel poslouží dobře.

7.2.2 Programování CA dle NaSch

Jelikož je samotný princip CA dle NaSch velmi jednoduchý, rozhodl jsem se, že si jej vytvořím sám. Pro tvorbu modelu CA jsem použil program Microsoft Excel s využitím programovacího jazyku VBA.

Vytvořil jsem CA s diskretním časem a výpočetním krokem 1 s. Jako nejjednodušší a nejvhodnější jsem volil postupným update, kdy se aktualizuje každá buňka zvlášť. Tato volba pomohla k zrychlení výpočtu oproti plně paralelnímu updatu. Zvolil jsem zpětný update, při kterém se buňky aktualizují od poslední buňky směrem k první. Okrajové podmínky pro tento model jsem zvolil jako otevřené. Vozidlo tedy při vstupu získá svoji maximální rychlost v_{max} a z modelu vystoupí tak, že se přesune na pozici za koncem simulovaného úseku, takže se již nezaznamená. Pravděpodobnost, že se vloží do sítě vozidlo, jsem vyjádřil v závislosti na intenzitě. Vložení proběhne, pokud $Rnd \leq q/3600$, kde Rnd je náhodné číslo a nabývá hodnot $\langle 0, 1 \rangle$.

Hodnoty dle [9] zkalibrované pro simulaci reálného provozu:

- 1 krok ~ 1 s
- 1 buňka $\sim 7,5$ m
- $v_{max} = 5$ buňek/s $\sim 37,5$ m/s = 135 km/h

Tuto simulaci jsem prováděl jen na jednopruhovém modelu, jehož naprogramování a kalibrace je jednodušší a odpovídá mým požadavkům na výsledky. Pravidla pro dvoupruhovou komunikaci směrově nerozdělenou definoval Karimipour, jehož definice je vcelku jednoduchá. Dále ji definoval NaSch v roce 1998, ovšem tato definice je již velmi komplikovaná a má dost pravidel (pro přejíždění mezi pruhy či zákaz předjíždění zprava) a jejíž zavedení do modelu ho výrazně zpomaluje. Tento model mám ovšem pro jiné účely taky naprogramován s pravidly dle NaSch. Skladbu dopravního proudu jsem volil 70 % osobních automobilů a 30 % nákladních automobilů. Nákladní automobil byl rozdílný jen v tom, že jsem mu nastavil menší maximální rychlost.

Kontrolu funkčnosti jsem si mohl potvrdit reálným chováním CA, které je vidět na obrázku 7.12, kde je krásně vidět posun kolony proti směru jízdy. Tento posun měl rychlost 10 – 15 km/h, což odpovídá reálnému měření i [19]. Výsledky jsem chtěl zpracovat stejně jako v případě mikrosimulačního programu, ovšem toto nebylo možné z důvodu velkého zjednodušení celého modelu. Například maximální rychlost je zadávána v krocích 1–5 dílků/s, což znamená krok cca 27 km/h, který je pro analýzu závislou na maximální povolené rychlosti opravdu velký. Proto jsem pro zobrazení použil klasické diagramy, které zobrazují jednotlivé veličiny (rychlost, intenzita, hustota) agregované po jedné minutě. Tyto grafy jsou na obrázku

```

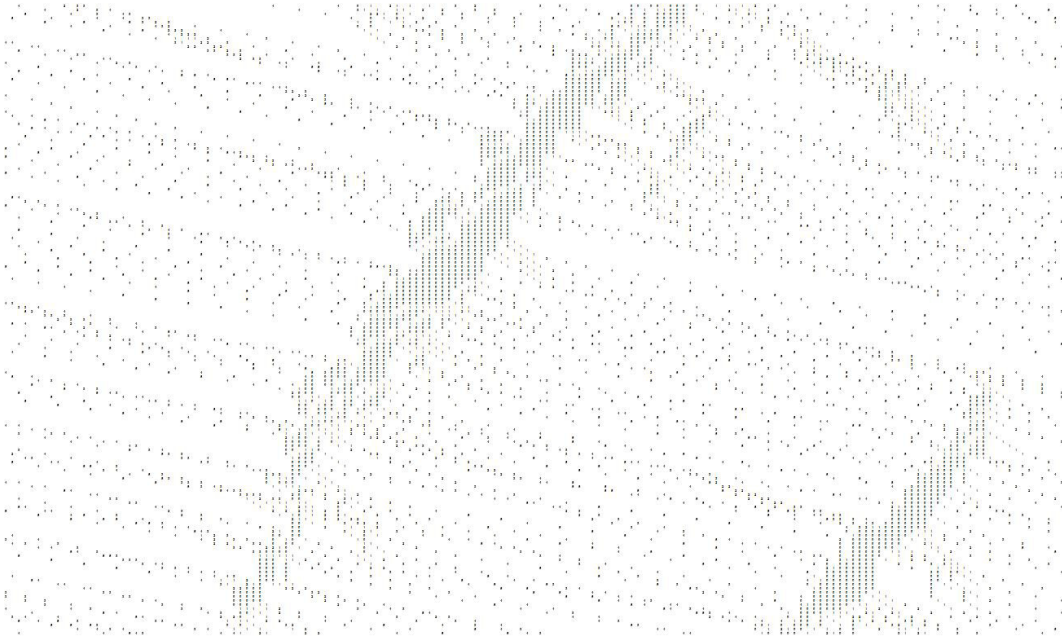
1 'Zjištění vzdálenosti od předchozího vozidla
2 Do While DRychlost = "" And Y <= 5
3   Y = Y + 1
4   HSloupec = HSloupec + 1
5   DRychlost = PoleJizda(Pruh, HSloupec)
6 Loop
7 If NormalniJizda = "True" Then  '''Klasická jízda
8   If Druh = "0" Then 'Max rychlost A0
9     Akcelerace = WorksheetFunction.Min(Rychlost + 1, ←
        AktualniMax0A)
10  ElseIf Druh = "N" Then 'Max rychlost TNV
11    Akcelerace = WorksheetFunction.Min(Rychlost + 1, ←
        AktualniMaxN)
12  End If
13 'Posun vozidel
14 Decelerace = WorksheetFunction.Min(Akcelerace, Y)
15 NahodneZpomaleni = WorksheetFunction.Max(Decelerace - Round←
        (Rnd(), 0), 0)
16 NovaPoloha = NahodneZpomaleni + Sloupec
17 PoleJizda(Pruh, Sloupec) = ""
18 PoleJizda(Pruh, NovaPoloha) = NahodneZpomaleni
19 PoleJizda(Pruh + 2, Sloupec) = ""
20 PoleJizda(Pruh + 2, NovaPoloha) = Druh
21 SoucetRychlosti = SoucetRychlosti + NahodneZpomaleni
22 PocetRychlosti = PocetRychlosti + 1
23 End If

```

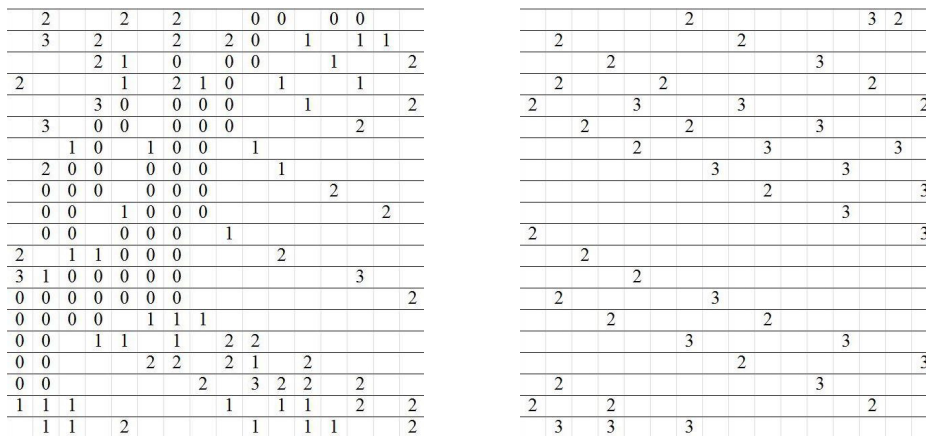
Obr. 7.10: Ukázka části kódu pro výpočet rychlosti z programu CA dle Nagel–Schreckenberga. Vychází ze vzorců 7.2. Celý kód je v příloze A.3.

7.13 a vytvořil jsem je pomocí několika simulací s různými intenzitami a skladbami dopravního proudu.

Ač je tento model založen na velmi jednoduchých pravidlech, jeho naprogramování nebylo jednoduché, což ukazuje i 284 řádků dlouhý kód programu (viz A.1). Pro kontrolu simulace je program napsán tak, že může vykreslit jednotlivé kroky (1 krok = 1 s) simulace na řádky pod sebe. Toto vykreslení je vidět na obrázku 7.12. Také lze zobrazovat posun vozidel v reálném čase. To znamená, že se zobrazují data na jednom řádku (či dvou u dvoupruhové komunikace) a každou sekundu se data pře-



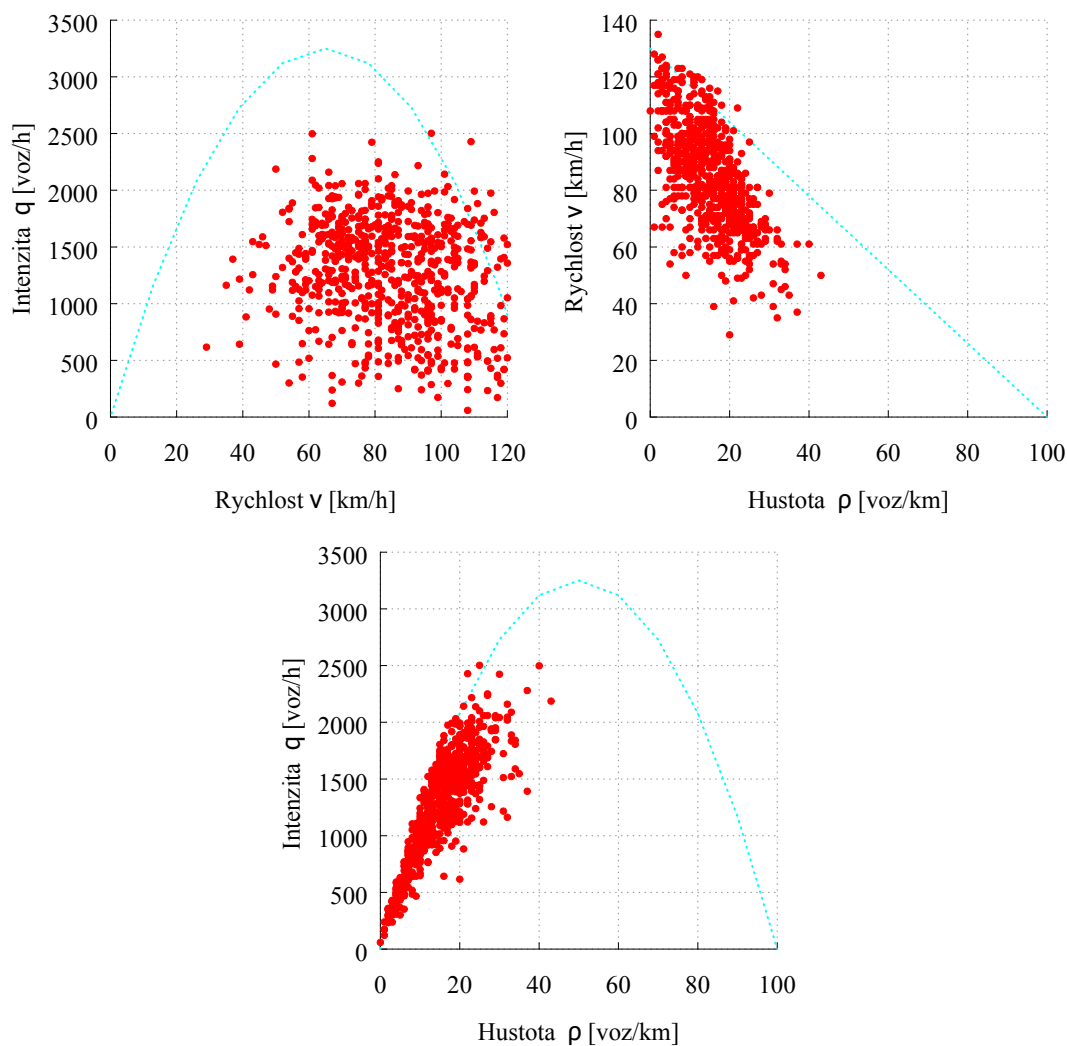
Obr. 7.11: Ukázka naprogramovaného celulárního automatu, kde je vidět posun kolony proti směru jízdy rychlostí 9,36 km/h. Na tomto konkrétním příkladu je vidět 200 s (tedy kroků) simulace a byly nastaveny hodnoty intenzity 1500 voz/h a rychlost 130 km/h. Každý řádek značí komunikaci v jednom výpočetním kroku a každý sloupec je jeden dílek komunikace, tedy 7,5 m (program viz příloha A.3).



Obr. 7.12: Výřez ze zobrazení vizualizace. Vlevo je model při vyšší intenzitě a vpravo při nižší.

kreslují dle dané polohy. Tato dvě zobrazení sloužila ke kontrole modelu a hledání chyb.

Jak je vidět na vypracovaných diagramech na obrázku 7.13, je chování tohoto modelu totožné s reálným provozem, který jsem analyzoval svým měřením, což je velmi zajímavé, jelikož je tento model takto jednoduchý. Do výpočtu vstupují jen



Obr. 7.13: Fundamentální diagramy vzešlé z CA.

4 hodnoty a to aktuální rychlost, maximální rychlost, odstup od předcházejícího vozidla a náhodné zpomalení. To jako jedině udává modelu jakousi náhodnost a je to jediný člen, kterým se dá model kalibrovat. Němečtí fyzikové Kai Nagel a Michael Schreckenberg ho definovali již roku 1990 a jeho genialita nebyla zatím překonána. Jeho výhodou je, že si ho každý může sestavit sám se základními znalostmi programování. Funkčnost nepotvrzují jen tyto výsledky, ale již zmíněná aplikace tohoto modelu na predikci stavu na dálniční síti v severním Porýní. Bohužel ale CA poskytl nejméně informací o dopravním proudu a nepomohl mi k zodpovězení žádné mé otázky.

8 ZÁVĚR

I přesto, že jsem prozkoumal velké množství dat a udělal vlastní měření, tak se tímto nedalo zjistit vše, co jsem chtěl zjistit o dopravním proudu. Proto jsem se na toto podíval z pohledu norem a použil jsem simulační nástroje, a to jak komerční mikrosimulační programy, tak vlastní celulární automat. Tyto různé pohledy mi pomohly a zodpověděly mi další otázky ohledně chování dopravního proudu.

Pro zpracování dat jsem si vytvořil vlastní program a analyzoval jsem všechna data, která jsem měl k dispozici. Po tomto vyhodnocení jsem se rozhodl k vlastnímu měření na silnici I/43 a zpracování dat z radarů ASIM pro přesnější pozorování dopravního proudu na dálničních komunikacích. Z tohoto všeho vyplynulo, že hustota je lineárně závislá na intenzitě. Rychlost je závislá na intenzitě jen na silnicích a to přibližně lineárně. Rozdíl mezi rychlostmi při nulové a maximální zaznamenané intenzitě byl 10 – 20 %. U dálničních komunikací nemá intenzita žádný vliv na rychlost komunikace. Ovšem se u nich objevuje velmi zajímavý jev, kdy dopravní proud při jedné intenzitě může dosahovat dvou rychlostí. Tento jev byl markantní na všech měřeních provedených radary ASIM, které jsem měl k dispozici. Tento jev nastával ovšem jen v levém pruhu a, dle mého názoru, byl způsoben předjížděním nákladních vozidel. Ovšem pro přesné určení by bylo dobré tento jev ještě hlouběji prozkoumat. Také si myslím, že dosažení kapacity mezikřižovatkového úseku je způsobeno překročením kapacity v nějaké přilehlé oblasti. Tím myslím křižovatku či snížení počtu pruhů na dálnici. Po všech těchto analýzách jsem si potvrdil, že chování dopravního proudu nelze popsat pro všechny komunikace, ale že každý typ vykazuje jiné chování.

Dle diagramů vypracovaných na základě českých a slovenských norem je vidět podobnost s naměřenými daty a to hlavně v tom, že jsou hodnoty jen v oblasti volného dopravního proudu. Nejzajímavější pro mne bylo to, že slovenské TP obsahovalo již vypracované fundamentální diagramy, které se shodují s daty z mého měření a to opět v oblasti volného dopravního proudu. Je zde vidět, že intenzita má jen velmi malý vliv na změnu rychlosti, což jsem si potvrdil i mikrosimulací. Také je zajímavý rozptyl mezi kapacitami komunikací v našich a zahraničních předpisech. Dále jsem zjistil, že největší vliv na kapacitu má dle normy počet pomalých vozidel v kombinaci s velkým příčným sklonem. Toto jsem si později ověřili simulací.

Testy provedené ve třech mikrosimulačních modelech (typu následného vozidla) mi potvrdily, že je intenzita závislá na rychlosti a naopak, že vzrůstající intenzita nijak razantně neovlivňuje rychlost. Toto mi potvrdilo jen to, co jsem si myslel, že kapacitní problémy nevznikají na samotné komunikaci, ale na křižovatkách či jiných omezeních. V neposlední řadě bylo zajímavé porovnání samotných programů, jelikož každý pracuje na jiném výpočetním modelu a měl tedy různé výsledky, či porovnání

ovládání programů, které je diametrálně odlišné. Při programování CA (jazykem VBA v MS Excel) jsem byl fascinován jeho jednoduchostí, neboť do samotného výpočtu vstupují tři proměnné a jedna náhodná veličina, proto jsem byl při analýze dat překvapen, že i přes tuto jednoduchost vykazuje stejné chování, jako při reálné situaci. Toto vyplynulo nejen z podobnosti diagramů, ale i z toho, že se v modelu šířil stop-and-go efekt a jeho rychlost při šíření směrem vzad byla podobná, jako při měření.

Bohužel i přes komplexnost této práce jsem nezodpověděl všechny otázky, na které bych chtěl. A to hlavně kvůli tomu, že mi moje měření neposkytlo všechny potřebné údaje. A to ze dvou důvodů. Prvním z nich bylo, že radary špatně určují délku a rozestupy vozidel, díky čemuž nebylo možné zjistit, jaký odstup si vozidla drží při jakých rychlostech a druhým, že není známo, proč došlo v pátek k tak razantnímu snížení rychlosti v odpoledních hodinách. Mohlo to být způsobeno jak přesáhnutím kapacity komunikace nebo toto ovlivnil průjezd křižovatkou a obcí Lipůvka. K této variantě se přikláním já. Měření u Lipůvky tedy nebylo zcela ideální, ovšem v okolí Brna jsem nenašel lepší úsek, který by byl stejně zatížen a délka mezikřižovakového úseku by byla delší. Kvůli těmto úskalím bych pro sledování dopravního proudu doporučil spíše kamerový záznam a to nejlépe z kvadrokoptéry. Z videa se totiž dají zjistit všechny charakteristiky a video z velké výšky zabírá komunikaci délky až 500 m, což by při měření ze země nikdy nebylo možné dosáhnout. A jelikož mě dopravní proud zaujal, chtěl bych se jeho zkoumáním dále zabývat.

LITERATURA

- [1] AKCELIK, R. *Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function*. Akcelik and Associates Pty Ltd. 2000. 14 s.
- [2] APELTAUER, Tomáš. *Generické vlastnosti modelů dopravního proudu*. Brno, 2010. 170 s., 200 s. příl. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh informatiky. Vedoucí práce doc. RNDr. Jiří Macur, CSc.
- [3] *Archiv počasí, klima České republiky*. In počasí [online]. 2014 [cit. 2014-09-02]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/archiv>.
- [4] BOXIL, Sharon Adam a Lei YU. *An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development*. Technická zpráva, Center for Transportation Training and Research, Texas Southern University, 3100 Cleburne Avenue, Houston, TX 77004, 2000.
- [5] *GPS Visualizer* [online]. 2014 [cit. 2014-09-10]. Dostupné z: <http://www.gpsvisualizer.com/>.
- [6] *Google Maps* Google [online]. 2012 [cit. 2014-09-03]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/>.
- [7] *HCM2010: Highway Capacity Manual*. 5th ed. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2010, sv. ISBN 978-0-309-16077-3.
- [8] HOLCNER, Petr. *Modelování a simulace dopravního proudu*. Brno, 2012. 184 s. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací.
- [9] HRABÁLEK, Pavel. *Celulární modely systémů se sociální interakcí*. Modelování dopravy. Praha, 2013. 214 s. FJFI ČVUT v Praze.
- [10] HRUBEŠ, Pavel. *Dopravní studie: Možnosti zlepšení plynulosti a bezpečnosti dopravy v ČR (především v Praze)*. Praha, 2012. 62 s.
- [11] Kapitola IV. Modelování dopravy na pozemních komunikacích (ČÁST 2). *Projekt 150* [online]. 2009 [cit. 2014-08-18]. Dostupné z: <http://projekt150.ha-vel.cz/node/95>.
- [12] KŘIVDA, Vladislav. *Městské komunikace a křižovatky. Makroskopické simulační modely* [online]. 2014 [cit. 2014-01-08]. Dostupné z: <http://kds.vsb.cz/mkk/modelovani-06.htm>.

-
- [13] KÜHNE, Reinhart. *Foundations of Traffic Flow Theory I: Greenshields' Legacy – Highway Traffic*. [online]. Berlin, 2012. 8 s. [cit. 2014-08-19]. Dostupné z: http://www.krbalek.cz/For_students/mds/clanky/Greenshields.pdf.
- [14] *Los futuros trenes de carretera de Volvo* [online]. 2010. [cit. 2014-11-02]. Dostupné z: <http://noticias.coches.com/noticias-motor/los-futuros-trenes-de-carretera-de-volvo/32046>.
- [15] MIČUNEK, Tomáš a Petr SMILEK. Analýza dodržování bezpečného odstupu mezi vozidly. *Silnice železnice* [online]. 2012 [cit. 2014-08-19]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/analyza-dodrzovani-bezpecneho-odstupu-mezi-vozidly/>.
- [16] NOVÁK, Martin. *Modelování dopravy v dálničních uzavírkách*. Brno, 2013. 42 s., 58 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D..
- [17] RUŽIČKOVÁ, Kateřina. *Celulární automaty*. Prezentace. 2010. 37 s.
- [18] *Silniční vlak přijíždí Projekt SARTRE vstupuje do finální fáze*. Doprava v praxi [online]. 2012 [cit. 2014-08-19]. Dostupné z: <http://www.doprava.vpraxi.cz/zprava-silnicni-vlak.html>.
- [19] *Silniční obzor: Měsíčník pro otázky výstavby a údržby silnic, dálnic, místních komunikací, letišť, mostů, tunelů a silničního a městského dopravního inženýrství*. roč. 2014, č. 5. ISSN 0322-7154.
- [20] *Teorie dopravního proudu*. Přednáška [online]. ČVUT v Praze Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů [cit. 2014-08-01]. Dostupné z: [http://k612.fd.cvut.cz/predmety/12DOP/\(1\)Prednasky/\(11\)Teoriedopravnihoproudu.pdf](http://k612.fd.cvut.cz/predmety/12DOP/(1)Prednasky/(11)Teoriedopravnihoproudu.pdf).
- [21] TOMAŠTÍK, Marek. *Celulární automaty (Game of life)*. Brno, 2010. 35 s., 37 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ing. Radomil Matoušek. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/9151/BakalarskaPraceTomastik.pdf?sequence=1>.
- [22] *Traffic Flow Theory*, chapter 6. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1975. 33 s.
- [23] VŠETEČKA, Martin. *Teoretické možnosti odstupu*. Prezentace, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. 2013.

- [24] WIEDEMANN, Rainer. *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, ročník 8. Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, 1974.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- v Rychlost dopravního proudu
- q Intenzita dopravního proudu
- ρ Hustota dopravního proudu
- Rnd* Náhodné číslo s normálním rozdělením nabývající hodnot $\langle 0 - 1 \rangle$
- ACC Adaptivní tempomat – Adaptive cruise control
- ADR Systém automatické regulace odstupu – Automatic distance regulatio
- CA Celulární automat – Cellular automat
- CFM Model následujícího vozidla – Car following models
- ČSN České technické normy
- EMA Exponenciální klouzavý průměr – Exponential moving average
- GNU Všeobecná veřejná licence – General public licens
- GPS Globální poziční systém – Global position system
- GSM Globální Systém pro Mobilní komunikaci – Global system for mobile communications
- HCM Manuál kapacity dálnic – Highway capacital manual
- IDM Model inteligentního řidiče – Intelligent driver model
- LOS Úroveň kvality dopravy – Level of service
- LWMA Lineárně vážený klouzavý průměr – Linear weighted moving average
- NaSch Nagel-Schreckenberg
- OAM Model optimální akcelerace – Optimal acceleration mode
- OS Operační systém – Operating system
- OVM Model optimální rychlosti – Optimal velocity mode
- PDZ Proměnné dopravní značení
- PKO Ústav pozemních komunikací

SARTE Bezpečné silniční vlaky chránící životní prostředí – Safe road trains for the environment

SI Soustava základních jednotek – Le Système International d'Unités

SMA Jednoduchý klouzavý průměr – Simple moving average

SKV Skutečná vozidla – Skutečná vozidla

SSZ Světelné signalizační zařízení

TNV Těžké nákladní vozidlo

TP Technické podmínky Ministerstva dopravy (někdy označované jen zkráceným názvem Technické podmínky)

ÚKD Úroveň kvality dopravy

VBA Visual basic for applications

WMA Vážený klouzavý průměr – Weighted moving average

SEZNAM PŘÍLOH

A	Programy psané v programovacím jazyce VBA	73
A.1	Kód programu pro třídění dat z radarů Sierzega	73
A.2	Kód programu pro agregaci dat pomocí klouzavého průměru	85
A.3	Kód programu pro simulaci dopravního proudu pomocí CA dle Nagen-Schenkenberga	87
B	Data	96
B.1	Intenzity na radarech	96
B.2	Data k porovnání norem	97
B.3	Data z mikrosimulačních modelů	98
C	Diagramy	102
D	Fotografie	106
E	Elektronické přílohy	109
E.1	Data z radarů Sierzega a ASIM	109
E.2	Programy v jazyce VBA	109
E.3	Grafy vytvořené z dat z radarů pomocí programu Sierzega_GNUPlot.xlsm	109

A PROGRAMY PSANÉ V PROGRAMOVACÍM JAZYCE VBA

A.1 Kód programu pro třídění dat z radarů Sierzega

```
1 Public PoleSoubory(1 To 1000) As String
2 'Public Nazev As String
3 Public Nazev2 As String
4 Public SloIntenzita As Byte
5 Public SloRychlost As Byte
6 Public Cislo As Byte
7 Public CestaAdresare As String
8 Public PosledniPlnyRadek As Double
9 Dim NazevMuj As String
10
11 Sub Sierzega()
12 PravdaMatice = Range("C6")
13 Cislo = 1
14 NazevMuj = ThisWorkbook.Name
15
16 'Výběr složky se kterou budeme pracovat
17 If Range("B6") = True Then
18     CestaAdresare = ThisWorkbook.Path
19 Else
20
21     'víceúčelový dialog, zde pro výběr složky
22     With Application.FileDialog(msoFileDialogFolderPicker)
23         .Title = "Výběr složky" 'titulek, běžně "Procházet"
24         .InitialView = msoFileDialogViewLargeIcons 'výchozí styl ↵
                'zobrazení, zde velké ikony 'Windows 7, 64 bit, nefunkční
25         .InitialFileName = ThisWorkbook.Path 'výchozí zobrazená ↵
                'složka
26         .ButtonName = "Vybrat" 'popis tlačítka, běžně "OK"
27         .Show 'zobrazení dialogu
28         'byla vybrána složka?
29         If .SelectedItems.Count > 0 Then
30             'výpis do okna Immediate
```



```
70 MsgBox ("Nastala chyba nenašli se žádné soubory *.txt")
71 End If
72 .....
73 For soubor = 1 To i - 1
74   Nazev = PoleSoubory(soubor)
75   DelkaNazvu = Len(Nazev) - 4
76   PrvniMezera = InStr(1, Nazev, " ")
77   If PrvniMezera = 0 Then PrvniMezera = 99
78
79   If DelkaNazvu < PrvniMezera Then
80     DelkaKratka = DelkaNazvu
81   Else
82     DelkaKratka = PrvniMezera - 1
83   End If
84   NazevBezTXT = Left(Nazev, DelkaNazvu)
85   NazevOrez = Left(Nazev, DelkaKratka) '& "xlsx"
86   Nazev2 = NazevOrez
87   Workbooks(NazevMuj).Activate
88
89   If Range("B5") = False Then 'If pokud to má kopírovat txt ↔
      do listu excelu
90     Workbooks.Open Filename:=CestaAdresare & "/" & Nazev, ↔
      Local:=True
91     Workbooks(Nazev).Activate
92     Sheets(NazevBezTXT).Copy After:=Workbooks(JmenoSouboru).↔
      Sheets(2)
93     ActiveSheet.Name = NazevOrez
94   Else
95     Workbooks(JmenoSouboru).Activate
96   End If
97   PosledniPlnyRadek = Range("D1").End(xlDown).Row
98   Den = Cells(1, 2)
99   PocatecniCas = Cells(1, 3)
100  i = 0
101
102  Do Until i > PocatecniCas - i0
103    i = i + i0
104  Loop
105  SoucetRychlosti = 0
106  PocetVozidel = 0
107  RadekZapisu = 1
```



```
108
109 For Radek = 1 To PosledniPlnyRadek
110     AktualniDen = Cells(Radek, 2)
111     Cas = Cells(Radek, 3)
112     Rychlost = Cells(Radek, 5)
113
114     If Cas <= (i + i0) And Den = AktualniDen Then
115         SoucetRychlosti = SoucetRychlosti + Rychlost
116         PocetVozidel = PocetVozidel + 1
117     Else
118         Cells(RadekZapisu, 9) = Den
119         Cells(RadekZapisu, 10) = i
120         Cells(RadekZapisu, 11) = i + i0
121         Cells(RadekZapisu, 12) = (PocetVozidel + 0.5 - Rnd()) * ←
            i1
122
123     If PocetVozidel = 0 Then
124         Cells(RadekZapisu, 12) = ""
125         Cells(RadekZapisu, 13) = ""
126     Else
127         Cells(RadekZapisu, 13) = SoucetRychlosti / PocetVozidel
128         Cells(RadekZapisu, 14) = Cells(RadekZapisu, 12) / Cells(←
            RadekZapisu, 13)
129     End If
130     i = i + i0
131     SoucetRychlosti = 0
132     PocetVozidel = 0
133     RadekZapisu = RadekZapisu + 1
134     If Den <> AktualniDen Then
135         i = 0
136         Den = AktualniDen
137     End If
138 End If
139
140 If Cells(Radek, 7) = 0 Then
141     Cells(Radek, 8) = 0
142 Else
143     Cells(Radek, 8) = 1
144     Cells(Radek, 8) = 3600 / Cells(Radek, 7)
145 End If
146 Next Radek
```

```
147 SoucetRychlosti = SoucetRychlosti + Rychlost
148 PocetVozidel = PocetVozidel + 1
149 Cells(RadekZapisu, 10) = i
150 Cells(RadekZapisu, 11) = i + i0
151 Cells(RadekZapisu, 12) = (PocetVozidel + 0.5 - Rnd()) * i1
152
153 If PocetVozidel = 0 Then
154 Else
155     Cells(RadekZapisu, 13) = SoucetRychlosti / PocetVozidel
156     Cells(RadekZapisu, 14) = Cells(RadekZapisu, 12) / Cells(↵
        RadekZapisu, 13)
157 End If
158
159 If PravdaMatice = True Then
160     Call Matice
161 End If
162
163 SloIntenzita = 12
164 SloRychlost = 13
165 Heslo = I_R
166 Call PrintAsTxt
167
168 SloIntenzita = 13
169 SloRychlost = 14
170 Heslo = H_R
171 Call PrintAsTxt
172
173 SloIntenzita = 12
174 SloRychlost = 14
175 Heslo = H_I
176 Call PrintAsTxt
177
178 Call GNUPlot
179
180 If Range("B5") = False Then
181     Workbooks(Nazev).Activate
182     ActiveWorkbook.Close False
183 End If
184 Next soubor
185
186 If Range("B5") = False Then
```

```
187 Workbooks(JmenoSouboru & ".xls").Activate
188 Sheets("List1").Select
189 Application.DisplayAlerts = False
190 ActiveWindow.SelectedSheets.Delete
191 Application.DisplayAlerts = False
192 Sheets("List2").Select
193 ActiveWindow.SelectedSheets.Delete
194 Application.DisplayAlerts = False
195 Sheets("List3").Select
196 ActiveWindow.SelectedSheets.Delete
197 Application.DisplayAlerts = False
198 End If
199 ActiveWorkbook.Save
200 ActiveWorkbook.Close
201 Application.ScreenUpdating = True
202 MsgBox ("Konec")
203
204 End Sub
205
206 ''' Vytvří textáky ze zadaných sloupečku
207 Function PrintAsTxt()
208 'With print command you can write text files in any format
209 'Declaring variables
210 Dim DataRadku As String
211 Dim sFName As String
212 Dim intFNumber As Integer
213 Dim RadekF As Long
214 Dim lLastRow As Long
215 Dim PosledniRadekAktual As Long
216 PosledniRadekAktual = Cells(Rows.Count, "L").End(xlUp).Row
217 'Setting the name and the path of text file based on ↵
    workbook path
218 sFName = CestaAdresare & "/txt/" & Navez2 & Cislo & "(Print↵
    ).txt"
219 'Get an unused file number
220 intFNumber = FreeFile
221 'Create a new file (or overwrite an existing one)
222 Open sFName For Output As #intFNumber
223
224 For RadekF = 1 To PosledniRadekAktual
225 DataRadku = Cells(RadekF, SloRychlost) & vbTab
```

```
226 DataRadku = DataRadku & Cells(RadekF, SloIntenzita)
227 Print #intFNumber, DataRadku 'Write data to file
228 Next RadekF
229 Close #intFNumber 'Close the file
230 'http://www.myengineeringworld.net/2012/06/excel-vba-↵
    read-and-write-text-files.html
231 Cislo = Cislo + 1
232 End Function
233
234 ''''''''''Vytvoří textáky pro GNUplot
235 ''nejdříve vytvořý soubor plot
236 Function GNUPlot()
237 Dim PoleSouboryGNU(1 To 1000) As String
238 Dim DataPlot As String
239 Dim A1 As String, A2 As String, A3 As String, A4 As String, ↵
    A5 As String, A6 As String, A7 As String, A8 As String, ↵
    A9 As String, A10 As String, A11 As String
240
241 If CestaAdresare = "" Then
242 CestaAdresareGNU = ThisWorkbook.Path & "/txt"
243 Else
244 CestaAdresareGNU = CestaAdresare & "/txt"
245 End If
246 'Provedena zmena disku
247 ZmenaDisku = Left(CestaAdresareGNU, 1)
248 ChDrive ZmenaDisku "C" pokud se přepíná na jiný disk
249 NazevPlot = "_plot.bat"
250
251 ' Vepsání všech souborů ve složce do pole
252 ChDir CestaAdresareGNU
253 SouboryKtereGNU = Dir("*.txt")
254 iGNU = 1
255
256 Do While SouboryKtereGNU <> ""
257 PoleSouboryGNU(iGNU) = SouboryKtereGNU
258 iGNU = iGNU + 1
259 SouboryKtereGNU = Dir
260 Loop
261
262 '' Kontrola načtení souborů
263 If iGNU = 1 Then
```



```
339 "set key right outside vert" & vbCrLf & _
340 "set format x "%.f"" & vbCrLf & _
341 "set format y "%.f"" & vbCrLf & _
342 "set grid" & vbCrLf & _
343 "set xlabel "Rychlost v"" & vbCrLf & _
344 "set ylabel "Intenzita I"" & vbCrLf & _
345 "set title "Rychlost vs. intezita"" & vbCrLf & _
346 "set key off" & vbCrLf & _
347 "unset pm3d" & vbCrLf & _
348 "#set xrange[*,*]" & vbCrLf & _
349 "#set yrange[*,*]" & vbCrLf & _
350 "set autoscale xy" & vbCrLf & _
351 "set yrange [] writeback" & vbCrLf & _
352 "set xrange [] writeback" & vbCrLf & _
353 "set style line 1 lc rgb "green" pt 7 ps 0.8" & vbCrLf & ←
    & _
354 "plot "" & NazevGP & "" using (($1)):(($2)*1) with ←
    points pt 1"
355 Print #intFNumber, DataPlot
356 Close #intFNumber
357
358 End If
359 Next RadekGNU
360 End Function
361
362 ''' Vytvoří matici
363 Sub Matice()
364 Dim Matice() As Double
365
366 MaxV = 155
367 MaxInt = 2600
368 StepV = 5
369 StepInt = 100
370 Radek = 1
371 Sloupec = 1
372
373 PocetRadku = MaxInt / StepInt
374 PocetSloupce = MaxV / StepV
375
376 ReDim Matice(1 To PocetRadku + 1, 1 To PocetSloupce + 1)
377
```

```
378 For Radek = 1 To PosledniPlnyRadek
379   AktualniRychlost = Cells(Radek, 13)
380   AktualniInt = Cells(Radek, 12)
381   RadekTabulky = 1
382
383   For Intenzita = 0 To MaxInt Step StepInt
384     Sloupec = 1
385     For Rychlost = 0 To MaxV - StepV Step StepV
386       If RadekTabulky = 0 Then
387         Else
388           If AktualniRychlost >= Rychlost And AktualniRychlost < ↵
Rychlost + StepV Then
389             If AktualniInt >= Intenzita And AktualniInt < Intenzita↵
+ StepInt Then
390               Matice(RadekTabulky, Sloupec) = Matice(RadekTabulky, ↵
Sloupec) + 1
391             End If
392           End If
393           Sloupec = Sloupec + 1
394         End If
395       Next Rychlost
396     RadekTabulky = RadekTabulky + 1
397   Next Intenzita
398 Next Radek
399 Matice(1, 1) = 0
400
401 ''' Vytvří textáky z matice
402 Dim DataRadku As String
403 Dim sFName As String
404 Dim intFNumber As Integer
405 Dim RadekF As Long
406 Dim lLastRow As Long
407 Dim PosledniRadekAktual As Long
408
409
410 sFName = CestaAdresare & "/txt/" & Nazev2 & Cislo & "(matice↵
).txt"
411 intFNumber = FreeFile
412 Open sFName For Output As #intFNumber
413 For Radek = 1 To PocetRadku
414   For Sloupec = 1 To PocetSloupcu
```



```
415     If DataRadku = "" Then
416         DataRadku = Matice(Radek, Sloupec)
417     Else
418         DataRadku = DataRadku & vbTab & Matice(Radek, Sloupec)
419     End If
420 Next Sloupec
421 Print #intFNumber, DataRadku
422 DataRadku = ""
423 Next Radek
424 Close #intFNumber
425 Cislo = Cislo + 1
426 End Sub
427
428 Sub Trideni()
429
430 MaxV = 120
431 MaxInt = 60
432 StepV = 10
433 StepInt = 5
434 PocetV = MaxV / StepV
435 PocetI = MaxInt / StepInt + 1
436 MaxRadek = PocetV * PocetI - 1
437 Sloupec = 15
438 Rychlost = StepV
439 Intenzita = StepInt
440 Cislo1 = 1
441 Cislo2 = 1
442
443 For Radek = 1 To MaxRadek
444     Cells(Radek, Sloupec) = Cislo1
445     Cells(Radek, Sloupec + 1) = Cislo2
446     If Cislo2 = PocetI - 1 Then
447         Cislo2 = 1
448         Radek = Radek + 1
449         Cislo1 = Cislo1 + 1
450     Else
451         Cislo2 = Cislo2 + 1
452     End If
453 Next Radek
454
455 Sloupec = 17
```

```
456 For Radek = 1 To 24000
457   AktualniRychlost = Cells(Radek, 13)
458   AktualniInt = Cells(Radek, 19)
459   RadekTabulky = 1
460   For Rychlost = StepV To MaxV Step StepV
461     For Intenzita = StepInt To MaxInt Step StepInt
462       If Cells(RadekTabulky, Sloupec) = "" Then
463         Cells(RadekTabulky, Sloupec) = 0
464       End If
465
466       If AktualniRychlost >= Rychlost - StepV And ↵
         AktualniRychlost < Rychlost Then
467         If AktualniInt >= Intenzita - StepInt And AktualniInt <↵
           Intenzita Then
468           Cells(RadekTabulky, Sloupec) = Cells(RadekTabulky, ↵
             Sloupec) + 1
469         End If
470       End If
471       RadekTabulky = RadekTabulky + 1
472     Next Intenzita
473   RadekTabulky = RadekTabulky + 1
474 Next Rychlost
475 Next Radek
476 End Sub
```

A.2 Kód programu pro agregaci dat pomocí klouzavého průměru

```
1 Sub KlouzavyPrumer()
2   i0 = 1 / 24 / 60 * 5 'Délka klouzavého průměru
3   i_sec = 1 / 24 / 60 * 1 / 60 'Posun průměru
4   i1 = 1 / 24 / i0
5   'Hledani'
6   Application.ScreenUpdating = False
7   PosledniPlnyRadek = Range("D1").End(xlDown).Row
8   Den = Cells(1, 2)
9   PocatecniCas = Cells(1, 3)
10  i = 0
11
```

```
12 Do Until i > PocatecniCas - i0
13   i = i + i0
14 Loop
15 SoucetRychlosti = 0
16 PocetVozidel = 0
17 RadekZapisu = 1
18 zapis = False
19 Radek_0 = 1
20
21 For beh = 1 To 86400
22   Radek = Radek_0
23   AktualniDen = Cells(Radek, 2)
24   Cas = Cells(Radek, 3)
25   Rychlost = Cells(Radek, 5)
26
27   Do While Cas < i + i0
28     If Cas >= i And Cas < i + i0 Then
29       SoucetRychlosti = SoucetRychlosti + Rychlost
30       PocetVozidel = PocetVozidel + 1
31     Else
32       Radek_0 = Radek
33     End If
34     Radek = Radek + 1
35     Cas = Cells(Radek, 3)
36     Rychlost = Cells(Radek, 5)
37   Loop
38   'zapis
39   PrvniRadek = True
40   Cells(RadekZapisu, 9) = Den
41   Cells(RadekZapisu, 10) = i
42   Cells(RadekZapisu, 11) = i + i0
43   Cells(RadekZapisu, 12) = (PocetVozidel + 0.5 - Rnd()) * i1
44
45   If PocetVozidel = 0 Then
46     Cells(RadekZapisu, 12) = ""
47     Cells(RadekZapisu, 13) = ""
48   Else
49     Cells(RadekZapisu, 13) = SoucetRychlosti / PocetVozidel
50     Cells(RadekZapisu, 14) = Cells(RadekZapisu, 12) / Cells(←
51     RadekZapisu, 13)
51 End If
```

```
52 i = i + i_sec
53 SoucetRychlosti = 0
54 PocetVozidel = 0
55 RadekZapisu = RadekZapisu + 1
56 Cells(RadekZapisu, 15) = AktualniRadek
57 Cells(RadekZapisu, 16) = Radek_0
58 Cells(RadekZapisu, 17) = Radek
59
60 If Radek = PosledniPlnyRadek Then
61     MsgBox ("Program proběhl v pořádku")
62     Application.ScreenUpdating = True
63     Exit Sub
64 End If
65 Next beh
66 End Sub
```

A.3 Kód programu pro simulaci dopravního proudu pomocí CA dle Nagen-Schenkenberga

```
1 Option Explicit 'Všechny proměnné musí být deklarovány
2 Public RadekVizual As Integer
3 Public TriDelkySimulace As Integer
4 Public SlupecVizual As Integer
5 Public PocetDilku As Integer
6 Public PoleZapisi(1 To 5000, 1 To 500)
7 Public PoleJizda(1 To 12, 1 To 5000)
8 Public PoleRadek As Byte
9 Public PoleSloupec As Integer
10 Public Rychlosti As Integer
11 Public PocyVozidel As Integer
12 Public PrumerneRychlosti As Single
13 Public Krok As Integer
14 Public SloupecVizual As Integer
15 Public Rychlost
16 Public AktualniMaxOA As Byte
17 Public DelkaSimulace As Integer
18 Sub CeluarniAutomat()
19     Application.ScreenUpdating = False
20     .....
```

```
21 '      CELULÁRNÍ AUTOMAT '
22 '.....'
23 '      Vytvořil:      '
24 '      Martin Novák  '
25 '      novak.mates@gmail.com  '
26 '.....'
27 Dim Intenzita As Integer
28 Dim MaxRychlostOA_dilek As Byte
29 Dim MaxRychlostN_dilek As Byte
30 Dim RychlostUsek_1 As Integer
31 Dim RychlostUsek_2 As Integer
32 Dim RychlostUsek_3 As Integer
33 Dim Pravdepodobnost As Single
34 Dim Pravdepodobnost2 As Single
35 Dim DelkaUseku As Integer
36 Dim Sloupec As Integer
37 Dim HSloupec As Integer
38 Dim Pruh As Byte
39 Dim Drychlost As Integer
40 Dim Y As Byte
41 Dim YY As Byte
42 Dim RychlostAktualni As Byte
43 Dim SloupecP As Integer
44 Dim Pru As Byte
45 Dim Vzdalenost As Byte
46 Dim NSloupec As Integer
47 Dim Oznaceni As String
48 Dim AktualniMaxN As Byte
49 Dim Druh As String
50 Dim DRychlost
51 Dim DDRychlost
52 Dim SoucetRychlosti As Long
53 Dim PocetRychlosti As Integer
54 Dim yyy
55 Dim MaxRychlostOA_dilek_uprava As Byte
56 Dim MaxRychlostN_dilek_uprava As Byte
57 Dim X 'As Byte
58 Dim Z As Single
59 Dim PoleRadekZapis 'As Integer
60 Dim Zip As String
61 Dim i
```



```
102 Else
103     HSloupec = Sloupec + 1
104     DRychlost = PoleJizda(Pruh, HSloupec)
105     Y = 0
106     'Hledání max volného místa před automobilem
107     Do While DRychlost = "" And Y <= 5
108         Y = Y + 1
109         HSloupec = HSloupec + 1
110         DRychlost = PoleJizda(Pruh, HSloupec)
111     Loop
112     .....
113
114     If Druh = "0" Then
115         Akcelerace = WorksheetFunction.Min(Rychlost + 1, ←
AktualniMaxOA)
116     ElseIf Druh = "N" Then 'Posun nákladních vozidel
117         Akcelerace = WorksheetFunction.Min(Rychlost + 1, ←
AktualniMaxN)
118     End If
119     'Posun vozidel
120     Decelerace = WorksheetFunction.Min(Akcelerace, Y)
121     NahodneZpomaleni = WorksheetFunction.Max(Decelerace - ←
Round(Rnd(), 0), 0) 'Upravene NahodneZpomaleni
122     NovaPoloha = NahodneZpomaleni + Sloupec
123     PoleJizda(Pruh, Sloupec) = ""
124     PoleJizda(Pruh, NovaPoloha) = NahodneZpomaleni
125     PoleJizda(Pruh + 2, Sloupec) = ""
126     PoleJizda(Pruh + 2, NovaPoloha) = Druh
127     SoucetRychlosti = SoucetRychlosti + NahodneZpomaleni
128     PocetRychlosti = PocetRychlosti + 1
129
130     If Sloupec = 101 And NahodneZpomaleni >= 1 Or Sloupec = ←
102 And NahodneZpomaleni >= 2 Or Sloupec = 103 And ←
NahodneZpomaleni >= 3 Or Sloupec = 104 And ←
NahodneZpomaleni >= 4 Or Sloupec = 105 And ←
NahodneZpomaleni >= 5 Then
131         PocetAut60 = PocetAut60 + 1
132         Rychlost60 = Rychlost60 + NahodneZpomaleni
133     End If
134 End If
135 Next Sloupec
```



```
207
208 '''Zapsání aspoň konečného stavu jizdy
209 For PoleRadek = 1 To 4
210   For PoleSloupec = 1 To PocetDilku
211     Sheets("Jizda").Cells(PoleRadek, PoleSloupec).Value = ←
       PoleJizda(PoleRadek, PoleSloupec)
212   Next PoleSloupec
213 Next PoleRadek
214 '''ZAVOLÁNÍ zapsání rychlostí
215 If Sheets("Index").Range("G14").Value = "True" Then
216   Call ZapisRychlosti
217 End If
218 '''ZAVOLÁNÍ Zapsaní vizualizace z pole
219 Vizualizace = Sheets("Index").Range("G12").Value
220 If Vizualizace = "True" Then
221   Call ZapisVizualizace
222   Sheets("Jizda").Range("G8").Value = "Vizualizace"
223 End If
224 Application.ScreenUpdating = True
225 i = MsgBox("Vše proběhlo v pořádku" & vbCrLf & "Délka ←
       Simulace :" & DelkaSimulace & vbCrLf & "Délka úseku" & ←
       DelkaUseku, vbOKOnly + vbInformation, "Celuatní Automat")
226 End Sub
227
228 Public Function VypocetNovePolohy() 'Rychlost As Byte, ←
       Sloupec As Integer)
229 Akcelerace = WorksheetFunction.Min(Rychlost + 1, ←
       AktualniMax0A)
230 Decelerace = WorksheetFunction.Min(Akcelerace, Y)
231 NahodneZpomaleni = WorksheetFunction.Max(Decelerace - Round(←
       Rnd(), 0), 0) 'Upravene NahodneZpomaleni
232 NovaPoloha = NahodneZpomaleni + Sloupec
233 End Function
234
235 Public Function ZapisRychlosti()
236 '''Zapsaní rychlostí a počtů vozidel po 60s
237 Dim SloupecZapis As Integer
238 Dim Rychlosti60 As Double
239 Dim PoctyVozidel60 As Double
240 Dim Pocitadlo As Byte
241
```

```
242 Rychlosti60 = 0
243 PoctyVozidel60 = 0
244 Pocitadlo = 1
245 SloupecZapis = 1
246 For PoleSloupec = 1 To Krok
247   Rychlosti = PoleJizda(11, PoleSloupec)
248   PoctyVozidel = PoleJizda(12, PoleSloupec)
249   Rychlosti60 = Rychlosti60 + Rychlosti
250   PoctyVozidel60 = PoctyVozidel60 + PoctyVozidel
251   If Pocitadlo = 60 Then
252     PrumerneRychlosti = Rychlosti60 / PoctyVozidel60
253     ''Sheets("Jizda").Cells(11, SloupecZapis).Value = ←
        Rychlosti60
254     Sheets("Jizda").Cells(12, SloupecZapis).Value = ←
        PoctyVozidel60 / 60 / 60
255     Sheets("Jizda").Cells(13, SloupecZapis).Value = ←
        PrumerneRychlosti * 3.6 * 7.5
256     Sheets("Jizda").Cells(10, SloupecZapis).Value = ←
        PoctyVozidel60 / 60 / 60 * (PrumerneRychlosti * 3.6 * ←
        7.5)
257     SloupecZapis = SloupecZapis + 1
258     Pocitadlo = 0
259   End If
260   Pocitadlo = Pocitadlo + 1
261 Next PoleSloupec
262
263 End Function
264
265 Public Function ZapisVizualizace()
266   ''''Zapsaní vizualizace z pole
267
268   For RadekVizual = 1 To DelkaSimulace
269     For SloupecVizual = 1 To PocetDilku
270       Sheets("Vizualizace").Cells(RadekVizual, SloupecVizual).←
        Value = PoleZapis1(RadekVizual, SloupecVizual)
271     Sheets("Jizda").Range("G9").Value = "Vizualizace"
272     Next SloupecVizual
273   Next RadekVizual
274
275 End Function
276 ''''Zobrazování simulace
```

```
277 Public Function ZobrazeniSimulace()  
278 For PoleRadek = 1 To 6  
279 For PoleSloupec = 1 To PocetDilku  
280 Sheets("Jizda").Cells(PoleRadek, PoleSloupec).Value = ↔  
    PoleJizda(PoleRadek, PoleSloupec)  
281 Next PoleSloupec  
282 Next PoleRadek  
283 Application.Wait (Now + 0.00001)  
284 End Function
```

B DATA

B.1 Intenzity na radarech

Č. radaru	26.8.		29.8.		Celkem za měření 26.8. - 1.9.
	12:00-13:00	13:00-14:00	13:00-14:00	14:00-15:00	
1	695	739	1072	1214	65337
2	737	750	1091	1210	68428
3	666	697	1036	1109	63866
4	709	762	1093	1190	67657
ϕ	701,75	737	1073	1180,75	66322

Tab. B.1: Data z kontroly intenzit na jednotlivých radarech.

Č. radaru	26.8.		29.8.		Celkem za měření 26.8. - 1.9.	ϕ Odchylek
	12:00-13:00	13:00-14:00	13:00-14:00	14:00-15:00		
1	-0,96%	0,27%	-0,09%	2,82%	-1,49%	0,11%
2	5,02%	1,76%	1,68%	2,48%	3,18%	2,82%
3	-5,09%	-5,43%	-3,45%	-6,08%	-3,70%	-4,75%
4	1,03%	3,39%	1,86%	0,78%	2,01%	1,82%

Tab. B.2: Data procentuálně vyjádřených rozdílů intenzit na jednotlivých radarech k průměru.

Č. radaru	26.8.		29.8.		Celkem za měření 26.8. - 1.9.	ϕ Odchylek
	12:00-13:00	13:00-14:00	13:00-14:00	14:00-15:00		
1	-2,62%	-1,51%	-1,23%	0,77%	-2,69%	-1,45%
2	3,27%	-0,04%	0,52%	0,44%	1,92%	1,22%
4	-0,65%	1,55%	0,71%	-1,22%	0,77%	0,23%

Tab. B.3: Data procentuálně vyjádřených rozdílů intenzit na jednotlivých radarech k průměru s vyloučením radaru č.3, který vykazoval stále záporné odchylky a byl ovlivněn sjezdem k čerpací stanici.

Č. radaru	Jednostopá	Osobní	Nákladní	Soupravy	Σ
1	2925	55587	3090	3735	65337
2	4448	61216	2180	584	68428
3	2621	56533	2247	2465	63866
4	2034	58491	4088	3072	67685
ϕ	3007	57956,75	2901,25	2464	

Č. radaru	Jednostopá	Osobní	Nákladní	Soupravy
1	-2,7%	-4,1%	6,5%	51,6%
2	47,9%	5,6%	-24,9%	-76,3%
3	-12,8%	-2,5%	-22,6%	0,0%
4	-32,4%	0,9%	40,9%	24,7%

Tab. B.4: Celkové počty vozidel dle druhu, zaznamenané na jednotlivých radarech. V druhé tabulce znázorněny odchylky od průměrné hodnoty ze všech radarů. Jedná se o počet všech vozidel změřených za celé měření.

B.2 Data k porovnání norem

		ČSN	SK	HCM	
		Kapacita	Kapacita	Měření	Kapacita
Silnice	Dvoupruhové	1250	1250	1473	1100
	Čtyřpruhové	1800		1774	1260
D a R	Čtyřpruhové	2000	2000	2483	2055
	Šestipruhové	1850	1900	2630	2060

Tab. B.5: Data pro graf na obrázku 3.5.

B.3 Data z mikrosimulačních modelů

Intenzita zadaná	PTV			S-Paramics			Aimsun		
	v	q	ρ	v	q	ρ	v	q	ρ
1000	160	978	6.1	154	997	6.5	158	974	6.2
1200	160	1164	7.3	154	1200	7.8	157	1236	7.9
1400	160	1369	8.6	154	1396	9.0	157	1456	9.3
1600	160	1580	9.9	154	1595	10.4	157	1602	10.2
1800	160	1773	11.1	155	1800	11.6	156	1803	11.6
2000	160	1991	12.5	155	1994	12.9	155	1940	12.5
2200	160	2179	13.6	154	2193	14.3	154	2184	14.2
2400	160	2368	14.8	154	2347	15.2	154	2344	15.3
2600	160	2577	16.1	154	2347	15.2	152	2569	16.9
2800	160	2779	17.4	154	2359	15.3	150	2765	18.5
3000	160	2993	18.8	155	2362	15.3	149	2825	18.9
4000	158	3939	25.0	154	2365	15.3	149	2823	18.9
5000	150	2444	16.3	155	2367	15.3	149	2823	19.0
7000	140	2358	16.8	155	2367	15.3	149	2825	19.0

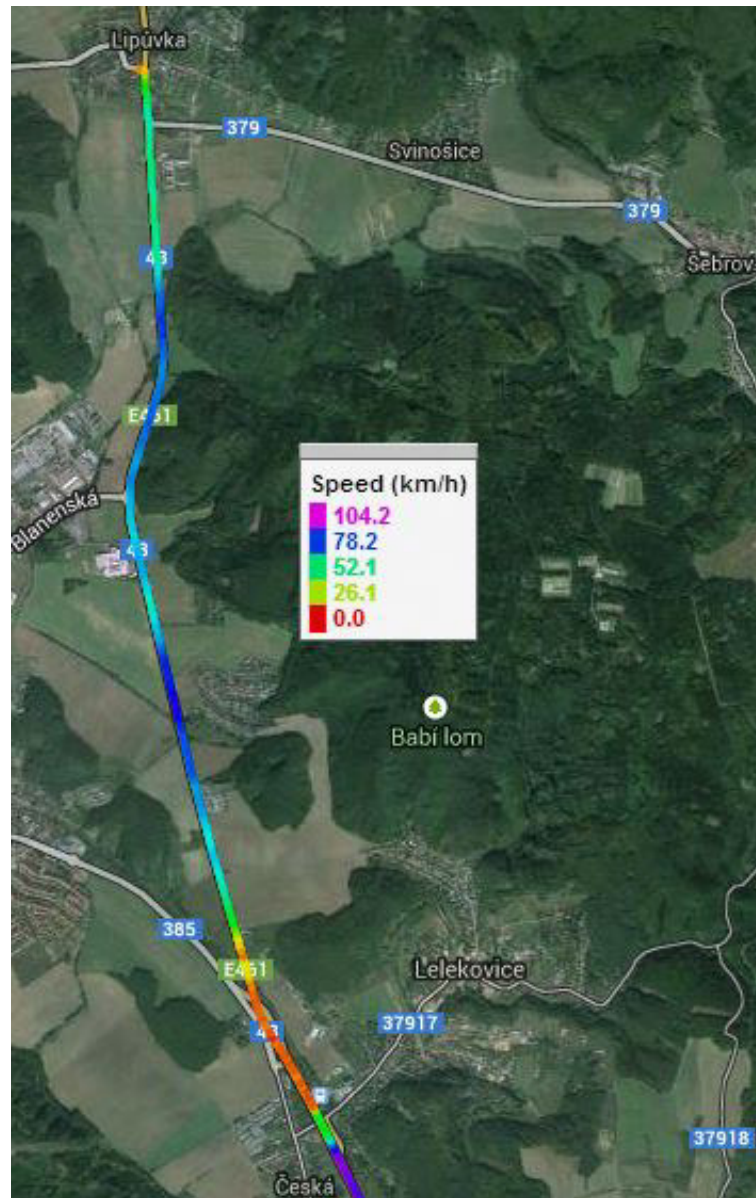
Tab. B.6: Data pro graf na obrázku 7.1.

Rychlost zadaná	PTV			S-Paramics			Aimsun		
	v	q	ρ	v	q	ρ	v	q	ρ
10	9.2	548	59.2	9.9	929	94.0	9.2	906	99.0
20	19.1	1118	58.7	19.7	1453	73.6	18.3	1514	82.6
30	29.1	1584	54.4	27.6	2072	75.2	27.5	1867	67.9
40	39.1	1981	50.7	40.0	2276	56.9	36.7	2098	57.1
50	49.2	2159	43.9	50.3	2317	46.1	46.1	2265	49.1
60	59.3	2289	38.6	60.5	2331	38.5	55.1	2384	43.3
70	69.4	2374	34.2	71.2	2337	32.8	64.6	2479	38.4
80	79.7	2408	30.2	81.5	2337	28.7	73.8	2551	34.6
90	89.8	2389	26.6	93.0	2352	25.3	83.2	2611	31.4
100	99.9	2396	24.0	104.6	2345	22.4	92.3	2657	28.8
110	107.6	2437	22.6	116.1	2357	20.3	102.1	2687	26.3
120	118.7	2980	25.1	125.9	2369	18.8	111.4	2723	24.4
130	129.4	2991	23.1	124.5	2366	19.0	120.4	2760	22.9
140	139.5	2993	21.5	124.4	2352	18.9	130.1	2774	21.3
150	149.5	2996	20.0	124.6	2358	18.9	139.9	2795	20.0
160	159.6	2993	18.8	124.5	2364	19.0	149.2	2825	18.9

Tab. B.7: Data pro graf na obrázku 7.3.

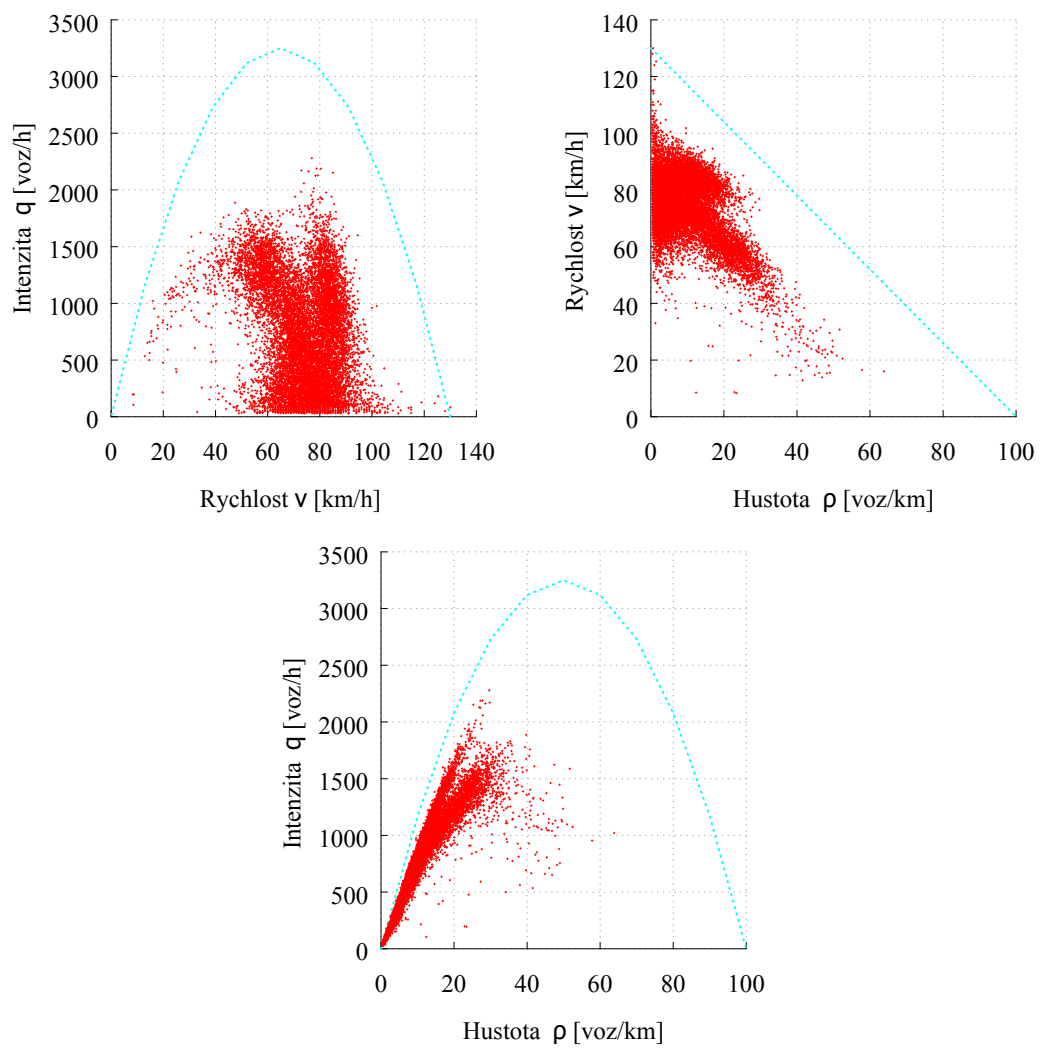
V	konstantní časový odstup				odstup dle ČSN 736101				konstantní délkový odstup				
	odstup		I	H	odstup		I	H	odstup		I	H	
	[km/h]	[m]	[s]	[voz/h]	[voz/km]	[m]	[s]	[voz/h]	[voz/km]	[m]	[s]	[voz/h]	[voz/km]
0	0					0				5			
2	1.11	2	327.27	163.64	0.86	1.54	341.50	170.75	5	9.00	200	100	
4	2.22	2	553.85	138.46	1.76	1.58	591.79	147.95	5	4.50	400	100	
6	3.33	2	720.00	120.00	2.71	1.62	778.39	129.73	5	3.00	600	100	
8	4.44	2	847.06	105.88	3.70	1.67	919.17	114.90	5	2.25	800	100	
10	5.56	2	947.37	94.74	4.75	1.71	1026.17	102.62	5	1.80	1000	100	
12	6.67	2	1028.57	85.71	5.83	1.75	1107.75	92.31	5	1.50	1200	100	
14	7.78	2	1095.65	78.26	6.97	1.79	1169.89	83.56	5	1.29	1400	100	
16	8.89	2	1152.00	72.00	8.15	1.83	1216.99	76.06	5	1.13	1600	100	
18	10.00	2	1200.00	66.67	9.37	1.87	1252.28	69.57	5	1.00	1800	100	
20	11.11	2	1241.38	62.07	10.65	1.92	1278.22	63.91	5	0.90	2000	100	
22	12.22	2	1277.42	58.06	11.97	1.96	1296.72	58.94	5	0.82	2200	100	
24	13.33	2	1309.09	54.55	13.33	2.00	1309.24	54.55	5	0.75	2400	100	
26	14.44	2	1337.14	51.43	14.74	2.04	1316.93	50.65	5	0.69	2600	100	
28	15.56	2	1362.16	48.65	16.20	2.08	1320.70	47.17	5	0.64	2800	100	
30	16.67	2	1384.62	46.15	17.71	2.12	1321.29	44.04	5	0.60	3000	100	
32	17.78	2	1404.88	43.90	19.26	2.17	1319.28	41.23	5	0.56	3200	100	
34	18.89	2	1423.26	41.86	20.85	2.21	1315.16	38.68	5	0.53	3400	100	
36	20.00	2	1440.00	40.00	22.50	2.25	1309.31	36.37	5	0.50	3600	100	
38	21.11	2	1455.32	38.30	24.18	2.29	1302.05	34.26	5	0.47	3800	100	
40	22.22	2	1469.39	36.73	26.82	2.41	1257.24	31.43	5	0.45	4000	100	
42	23.33	2	1482.35	35.29	28.69	2.46	1246.69	29.68	5	0.43	4200	100	
44	24.44	2	1494.34	33.96	30.61	2.50	1235.48	28.08	5	0.41	4400	100	
46	25.56	2	1505.45	32.73	32.59	2.55	1223.77	26.60	5	0.39	4600	100	
48	26.67	2	1515.79	31.58	34.61	2.60	1211.67	25.24	5	0.38	4800	100	
50	27.78	2	1525.42	30.51	38.39	2.76	1152.33	23.05	5	0.36	5000	100	
52	28.89	2	1534.43	29.51	40.66	2.81	1138.95	21.90	5	0.35	5200	100	
54	30.00	2	1542.86	28.57	42.98	2.87	1125.51	20.84	5	0.33	5400	100	
56	31.11	2	1550.77	27.69	45.36	2.92	1112.07	19.86	5	0.32	5600	100	
58	32.22	2	1558.21	26.87	47.79	2.97	1098.67	18.94	5	0.31	5800	100	
60	33.33	2	1565.22	26.09	52.76	3.17	1038.77	17.31	5	0.30	6000	100	
62	34.44	2	1571.83	25.35	55.48	3.22	1025.21	16.54	5	0.29	6200	100	
64	35.56	2	1578.08	24.66	58.25	3.28	1011.83	15.81	5	0.28	6400	100	
66	36.67	2	1584.00	24.00	61.09	3.33	998.63	15.13	5	0.27	6600	100	
68	37.78	2	1589.61	23.38	63.99	3.39	985.65	14.49	5	0.26	6800	100	
70	38.89	2	1594.94	22.78	71.06	3.65	920.34	13.15	5	0.26	7000	100	
72	40.00	2	1600.00	22.22	74.32	3.72	907.71	12.61	5	0.25	7200	100	
74	41.11	2	1604.82	21.69	77.65	3.78	895.34	12.10	5	0.24	7400	100	
76	42.22	2	1609.41	21.18	81.05	3.84	883.23	11.62	5	0.24	7600	100	
78	43.33	2	1613.79	20.69	84.51	3.90	871.36	11.17	5	0.23	7800	100	
80	44.44	2	1617.98	20.22	91.87	4.13	825.87	10.32	5	0.23	8000	100	
82	45.56	2	1621.98	19.78	95.66	4.20	814.59	9.93	5	0.22	8200	100	
84	46.67	2	1625.81	19.35	99.53	4.27	803.57	9.57	5	0.21	8400	100	
86	47.78	2	1629.47	18.95	103.48	4.33	792.80	9.22	5	0.21	8600	100	
88	48.89	2	1632.99	18.56	107.49	4.40	782.27	8.89	5	0.20	8800	100	
90	50.00	2	1636.36	18.18	117.14	4.69	736.87	8.19	5	0.20	9000	100	
92	51.11	2	1639.60	17.82	121.55	4.76	726.98	7.90	5	0.20	9200	100	
94	52.22	2	1642.72	17.48	126.04	4.83	717.33	7.63	5	0.19	9400	100	
96	53.33	2	1645.71	17.14	130.61	4.90	707.91	7.37	5	0.19	9600	100	
98	54.44	2	1648.60	16.82	135.26	4.97	698.71	7.13	5	0.18	9800	100	
100	55.56	2	1651.38	16.51	139.99	5.04	689.72	6.90	5	0.18	10000	100	
102	56.67	2	1654.05	16.22	144.79	5.11	680.95	6.68	5	0.18	10200	100	
104	57.78	2	1656.64	15.93	149.67	5.18	672.38	6.47	5	0.17	10400	100	
106	58.89	2	1659.13	15.65	154.64	5.25	664.00	6.26	5	0.17	10600	100	
108	60.00	2	1661.54	15.38	159.68	5.32	655.82	6.07	5	0.17	10800	100	
110	61.11	2	1663.87	15.13	178.02	5.83	601.04	5.46	5	0.16	11000	100	
112	62.22	2	1666.12	14.88	183.70	5.90	593.53	5.30	5	0.16	11200	100	
114	63.33	2	1668.29	14.63	189.47	5.98	586.20	5.14	5	0.16	11400	100	
116	64.44	2	1670.40	14.40	195.33	6.06	579.04	4.99	5	0.16	11600	100	
118	65.56	2	1672.44	14.17	201.28	6.14	572.05	4.85	5	0.15	11800	100	
120	66.67	2	1674.42	13.95	216.56	6.50	541.61	4.51	5	0.15	12000	100	
122	67.78	2	1676.34	13.74	223.00	6.58	535.10	4.39	5	0.15	12200	100	
124	68.89	2	1678.20	13.53	229.52	6.66	528.74	4.26	5	0.15	12400	100	
126	70.00	2	1680.00	13.33	236.14	6.75	522.53	4.15	5	0.14	12600	100	
128	71.11	2	1681.75	13.14	242.85	6.83	516.45	4.03	5	0.14	12800	100	
130	72.22	2	1683.45	12.95	261.86	7.25	487.14	3.75	5	0.14	13000	100	
132	73.33	2	1685.11	12.77	269.14	7.34	481.51	3.65	5	0.14	13200	100	
134	74.44	2	1686.71	12.59	276.51	7.43	476.01	3.55	5	0.13	13400	100	
136	75.56	2	1688.28	12.41	283.98	7.52	470.62	3.46	5	0.13	13600	100	
138	76.67	2	1689.80	12.24	291.55	7.61	465.36	3.37	5	0.13	13800	100	
140	77.78	2	1691.28	12.08	299.21	7.69	460.20	3.29	5	0.13	14000	100	

Tab. B.8: Data pro graf na obrázku 2.3.

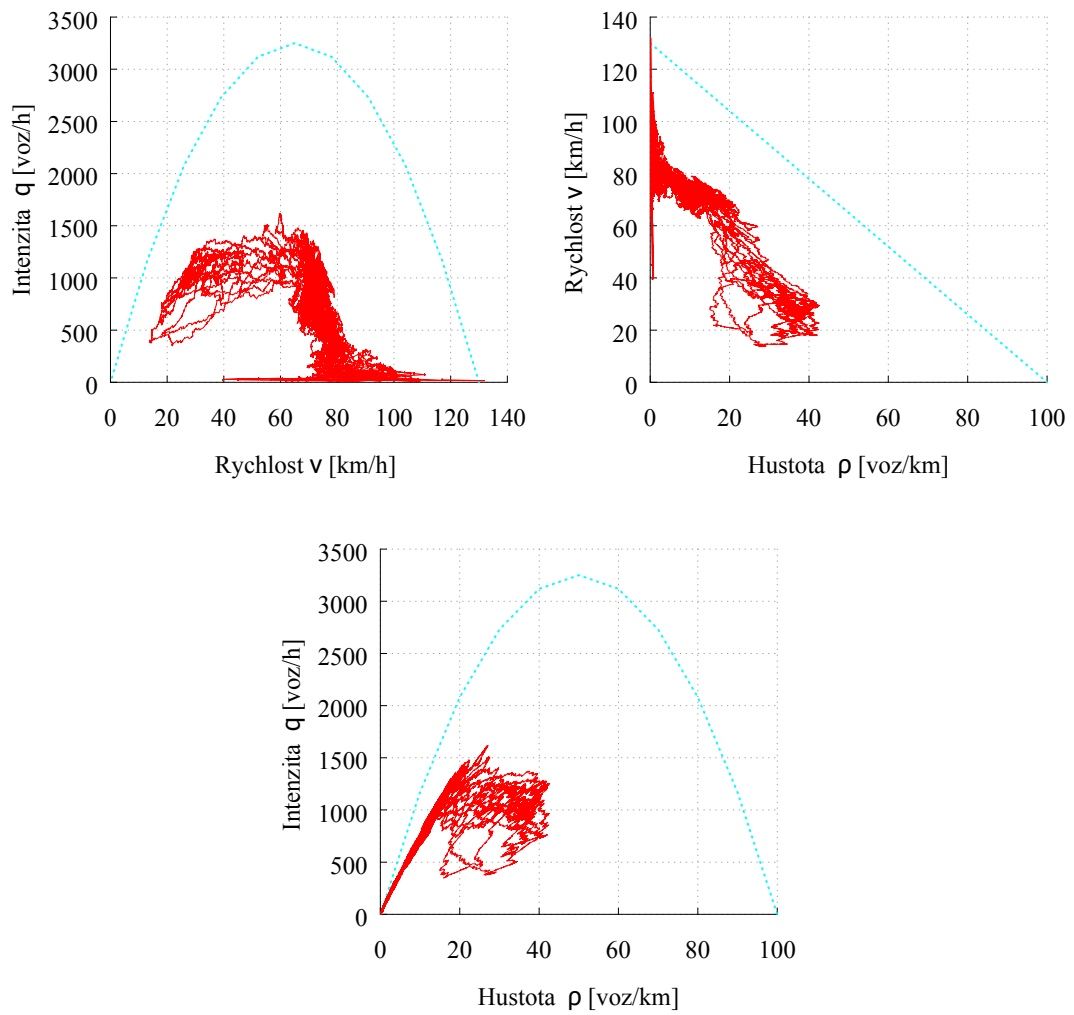


Obr. B.1: Mapa jako výstup z programu GPS Visualizer. Barevně je prokreslena aktuální rychlost vozidla v daném místě. Místo s nejnižší rychlostí je místo těsně před nehodou.

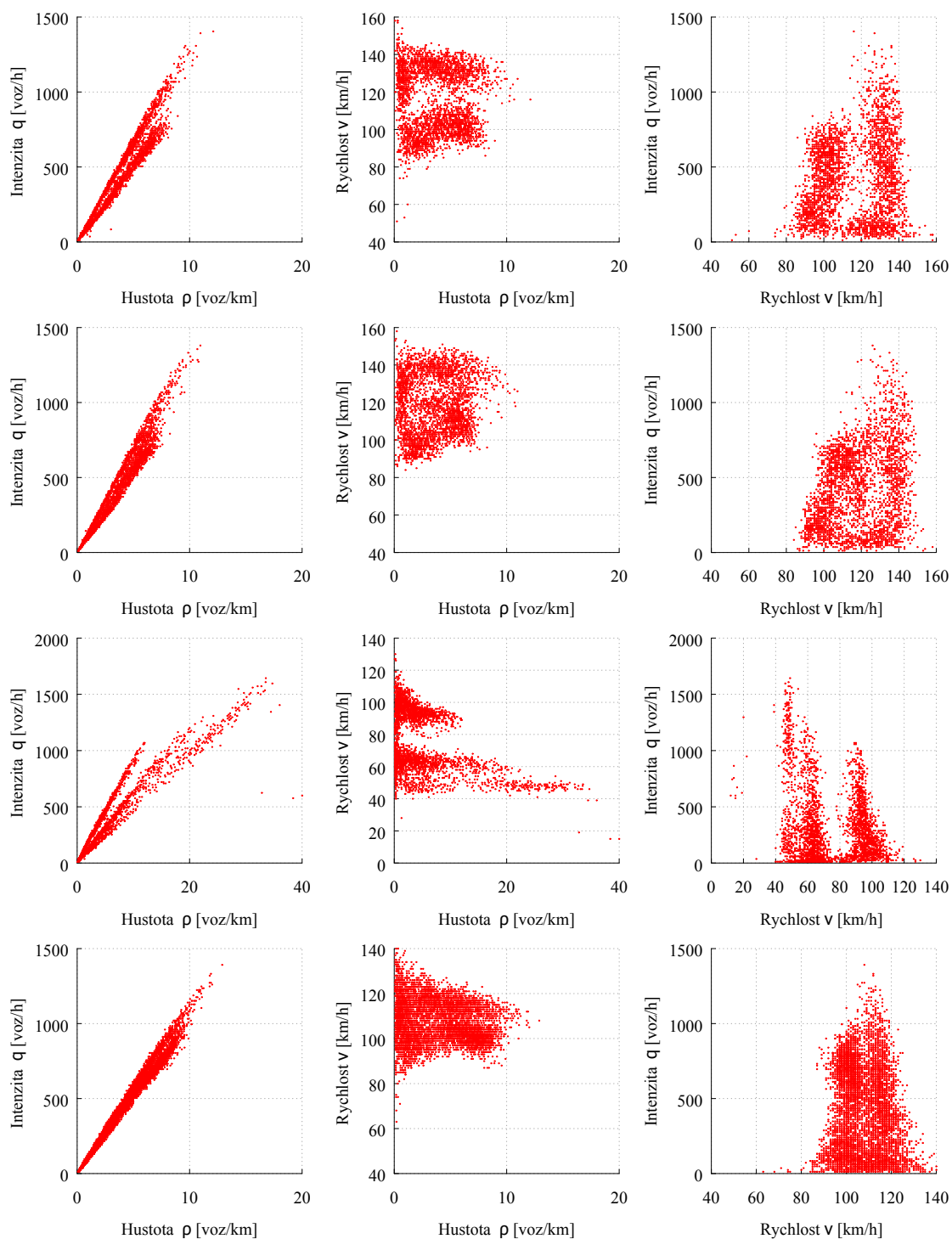
C DIAGRAMY



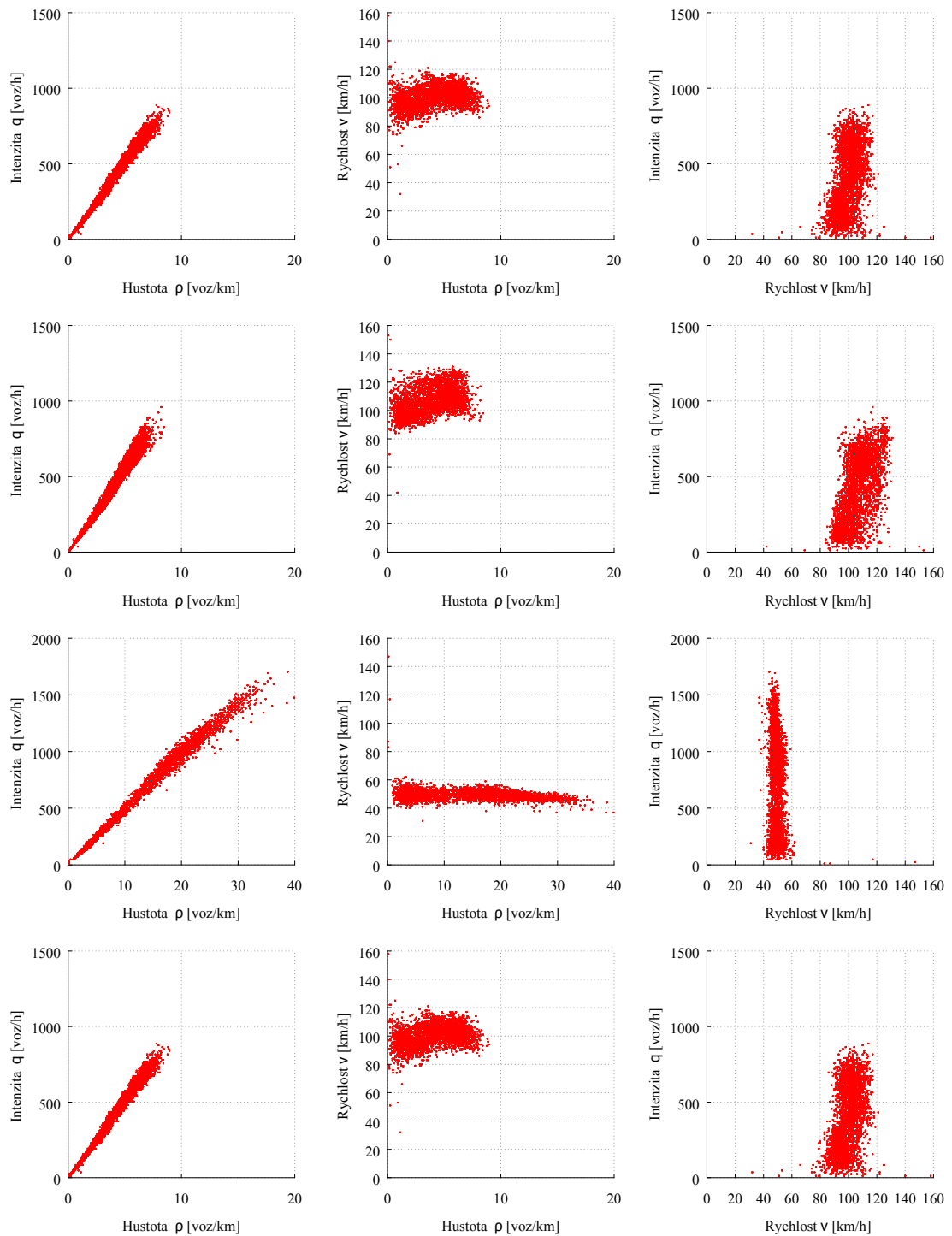
Obr. C.1: Grafy ze stejných dat jako na obrázku 5.2 jen porovnané se vztahy dle Greenshieldse.



Obr. C.2: Grafy ze stejných dat jako na obrázku 5.2 jen porovnané se vztahy dle Greenshieldse.



Obr. C.3: Diagramy z radarů ASIM, jejichž data se sbírala ode dne 14. 9. 2012 do 24. 9. 2012. Data jsou z radarů na dálnici D1 na staničení (shora) 145 km, 151 km, 214 km, 218 km. Jedná se o radar nad levým pruhem.



Obr. C.4: Diagramy z radarů ASIM, jejichž data se sbírala ode dne 14. 9. 2012 do 24. 9. 2012. Data jsou z radarů na dálnici D1 na staničení (shora) 145 km, 151 km, 214 km, 218 km. Jedná se o radar nad pravým pruhem.

D FOTOGRAFIE



Obr. D.1: Umístění radaru č.1.



Obr. D.2: Umístění radaru č.2.



Obr. D.3: Umístění radaru č.3.



Obr. D.4: Umístění radaru č.4.



Obr. D.5: Fotografie při průjezdu kolem nehody při měření pomocí plovoucího vozidla s použitím přístroje MobiTex[®] (na fotce vpravo na palubní desce).

E ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY

E.1 Data z radarů Sierzega a ASIM

E.2 Programy v jazyce VBA

E.3 Grafy vytvořené z dat z radarů pomocí programu Sierzega_GNUPlot.xlsm