

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 481

ISSN 1213-418X

Tomáš Apeltauer

**MIKROSKOPICKÉ
MODELY DOPRAVY
V PRACOVNÍCH ZÓNÁCH**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta stavební
Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky

Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.

**MIKROSKOPICKÉ MODELY DOPRAVY
V PRACOVNÍCH ZÓNÁCH**

MICROSCOPIC TRAFFIC MODELS IN WORK ZONES

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
OBOR: KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY



BRNO 2014

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikroskopické modely dopravy; simulace; pracovní zóny; liniové řízení dopravy; dopravní stavby.

KEYWORDS

Microscopic traffic models; simulations; work zones; active traffic management; road structures.

HABILITAČNÍ PRÁCE JE ULOŽENA:

Originál habilitační práce je uložen v archivu pedagogicko-vědeckého oddělení Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno.

Obsah

1 Úvod	6
2 Výběr pracovní zóny	8
2.1 Dopravní průzkum v pracovním místě	8
3 Model pracovní zóny	12
3.1 Validace modelu	13
4 Testování scénářů dynamického řízení	16
4.1 Varianty řízení dopravního proudu	16
4.2 Řízení na základě délky kolony	17
4.3 Statistické vyhodnocení řízení na základě délky kolony	19
4.4 Řízení na základě intenzity dopravy	21
4.5 Statistické vyhodnocení řízení na základě intenzity	22
5 Dopady aktivního řízení provozu	23
5.1 Cestovní čas pracovní zónou	24
5.2 Ekonomické přínosy aktivního řízení provozu	26
6 Závěr	30
6.1 Mobilní systém liniového řízení a zdroje dat pro plánování	30
6.2 Model pracovní zóny a návrh jejího řízení	30
6.3 Další směřování výzkumu	32

Představení autora

Osobní údaje

Jméno a příjmení: Tomáš Apeltauer
Datum a místo narození: 8. 6. 1980 v Brně
Národnost: Česká
Zaměstnavatel: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Ústav automatizace inženýrských úloh
a informatiky
Veveří 331/95, 602 00 Brno
Telefon: +420 541 147 252
E-mail: apeltauer.t@fce.vutbr.cz



Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti

- 1998 — Gymnázium Táborská v Brně, zakončeno maturitou
- 2003 — Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Obor Teoretická fyzika a astrofyzika, zakončeno titulem Mgr.
- 2010 — Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Obor Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství, zakončeno titulem Ph.D.

Zaměstnání, pracovní zařazení a funkce

- 2000–2006 — Hvězdárna Brno, astronom
- 2006–2010 — Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky, asistent
- od 2010 — Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky, odborný asistent, tajemník ústavu

Odborné stáže, školení a praxe

- 2008 — SIAS Ltd., Edinburgh, Skotsko, Velká Británie
- 2009 — TSS Transport Simulation Systems, Barcelona, Španělsko
- 2010 — University of Greenwich, SCMS, Londýn, UK

Pedagogická činnost

- od 2006 — BU01 Informatika, CM04 Dopravní inženýrství (DST), CM55 Moderní trendy v dopravním inženýrství (DST), GU01 Základy informatiky
- od 2009 — CU01 Informatika II
- od 2013 — MU 01 Informatika
- od 2014 — Člen rady oboru Všeobecně teoreticko technický (T)
- Vedoucí diplomových prací oboru Konstrukce a dopravní stavby (DST)

Výzkumné zaměření

- Dopravní inženýrství
- Modely dopravního proudu
- Modely šíření požáru v uzavřených objektech
- Evakuační dynamika osob v kritických situacích

Výzkumná a publikační činnost

- 2 články v odborném periodiku s impakt faktorem
- 11 článků v odborném periodiku bez impakt faktoru
- 6 příspěvků ve sborníku světové nebo evropské vědecké konference
- 16 příspěvků ve sborníku národní nebo mezinárodní vědecké konference
- 17 projektů VaV různých poskytovatelů (TA ČR, MV ČR, MŠMT) v roli odpovědného řešitele

Členství ve vědeckých společnostech, redakčních radách a dalších sdruženích

- Člen World Road Association-PIARC, Technical Committee 2.1
- Člen redakční rady časopisu Silnice a železnice
- Certifikace pro projektový management IPMA-D

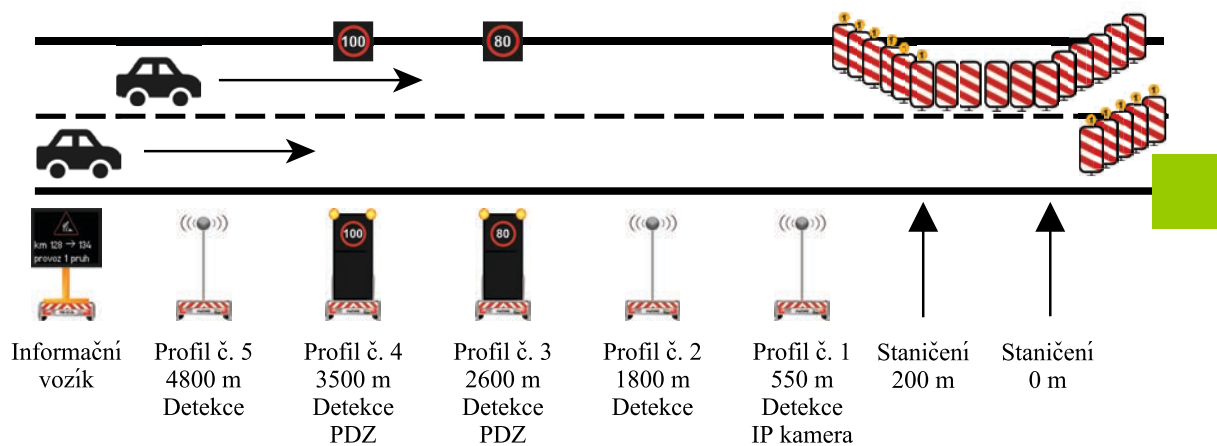
1 Úvod

Vzhledem k nadcházející kritické fázi rekonstrukce dálnice D1 začíná být v tuzemských podmínkách velmi aktuálním tématem řízení dopravy v tzv. pracovních zónách, tedy místech prováděné rekonstrukce a s tím spojeného dramatického omezení dopravy z hlediska její propustnosti i bezpečnosti. Vzhledem k přechodné povaze dálničních uzavírek a zároveň nezanedbatelným dopravním komplikacím, které tyto uzavírky způsobují, je logickým řešením aplikace mobilního, opakovaně použitelného systému liniového řízení dopravy. Správně fungující systém by měl být schopen tyto dopady *měřitelným* způsobem snížit a zvýšit komfort a kvalitu cestování v dané lokalitě. Za tímto účelem by měl splňovat některé obecné požadavky, které je nutné si stanovit již na počátku jeho vývoje a konstrukce:

- *Mobilita a přenositelnost systému* — Systém musí být schopen přemístění a následné instalace v dotčené lokalitě v relativně krátké době s minimálním rizikem pro pracovníky. Musí zároveň vykazovat minimální náročnost při kalibraci, instalaci a nastavení systému.
- *Kooperace jednotlivých připojených subsystémů a samotného zařízení* — Systém musí být schopen vzájemného propojení se všemi prvky do privátní bezdrátové sítě typu VPN. Jednotlivé podřízené prvky musí být schopny předávat data mateřské stanici, která kontroluje chod systému jako celku, sbírá měřená data a poskytuje operátorovi možnost systém vzdálenou správou ovládat.
- *Variabilita aplikace systému* — Klíčový software systému musí být variabilní a připraven pro různé činnosti s ohledem na potřeby lokality, investora nebo uživatele. Jednotlivé funkce systému musí vycházet z algoritmů, které budou jako vstupy používat intervalově agregovaná data z profilových detektorů a znalosti o přesném místě instalace. Mezi plánované činnosti systému patří zejména dynamický systém navigování řidičů v místě slučování jízdních pruhů (zipu), proměnné řízení maximální rychlosti příjíždějícího dopravního proudu, navádění na alternativní trasy a upozorňování na tvorbu kolon.
- *Modularita systému* — Každá komponenta systému na infrastruktuře musí být navržena tak, aby jejich minimálním společným prvkem byla pouze výkonná vyhodnocovací jednotka s integrovanou bezdrátovou sítí vhodného typu, ethernetovým nebo jiným pevným připojením a přijímačem GPS, která bude uložena v odolném boxu s ochranným krytím minimálně IP 55 (tedy ochrana před hrubým zacházením nebo fyzickým útokem a extrémní vlhkostí). Na boxu musí být co nejširší sada výstupních standardizovaných rozhraní pro různá modulární zařízení podle aktuální potřeby. Tímto způsobem je nutné zajistit připojení radarů s vysokým rozlišením pro profilová měření dopravy, jednoduchých radarů pro detekci vzniku kolony, detektoru

pro měření dojezdové doby, průmyslových kamer, bezdrátových modemů a dalších zařízení.

- *Efektivita systému* — Správně fungující systém musí *měřitelně* přispět ke zvýšení plynulosti dopravy a snížení cestovních časů při průjezdu lokalitou s dočasně omezenou kapacitou. Zároveň by měl systém zvýšit bezpečnost řidičů i pracovníků provádějících v dotčeném místě rekonstrukci nebo jinou činnost, která toto omezení způsobila. Systém dále musí zlepšit informovanost řidičů, operátorů, policie nebo zásahových jednotek a v případě možnosti navádět vozidla na alternativní trasy.
- *Nezávislost na zdrojích elektrického napájení* — Jednotlivé komponenty systému musí být připraveny na připojení k samostatným akumulátorům s nabíjecí stanicí, přičemž zdrojem energie mohou být palivové články nebo dieselové generátory. V případě nižšího odběru mohou být některé části systému napájeny z fotovoltaických článků.



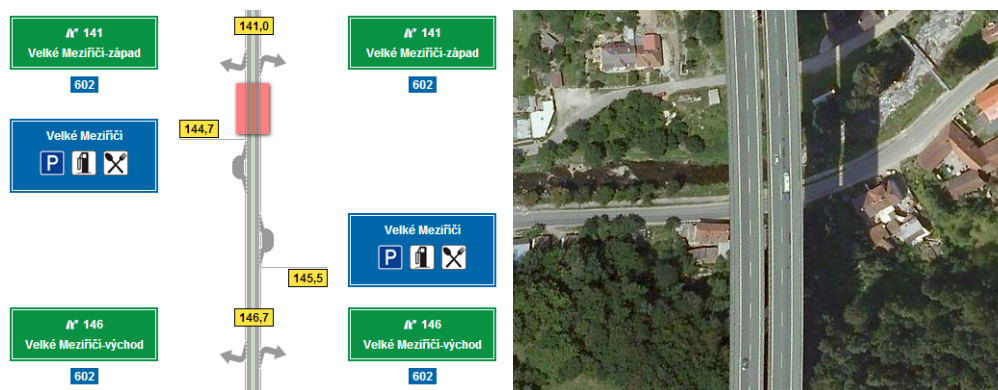
Obr. 1.1: Koncepte mobilního systému liniového řízení dopravy.

2 Výběr pracovní zóny

Mikroskopické modely dopravního proudu jsou pro testování pracovní zóny a algoritmů jejího řízení ideální. V případě, že jsme schopni vybrat vhodný mikroskopický model na základě požadavků, a zároveň dodržíme správný postup při validaci a kalibraci zvoleného modelu, můžeme analyzovat variantní řešení s minimem dalších nákladů. Konkrétní postup bude demonstrován na příkladu zúžení na jeden jízdní pruh u Velkého Meziříčí během rekonstrukce dálničního mostu.

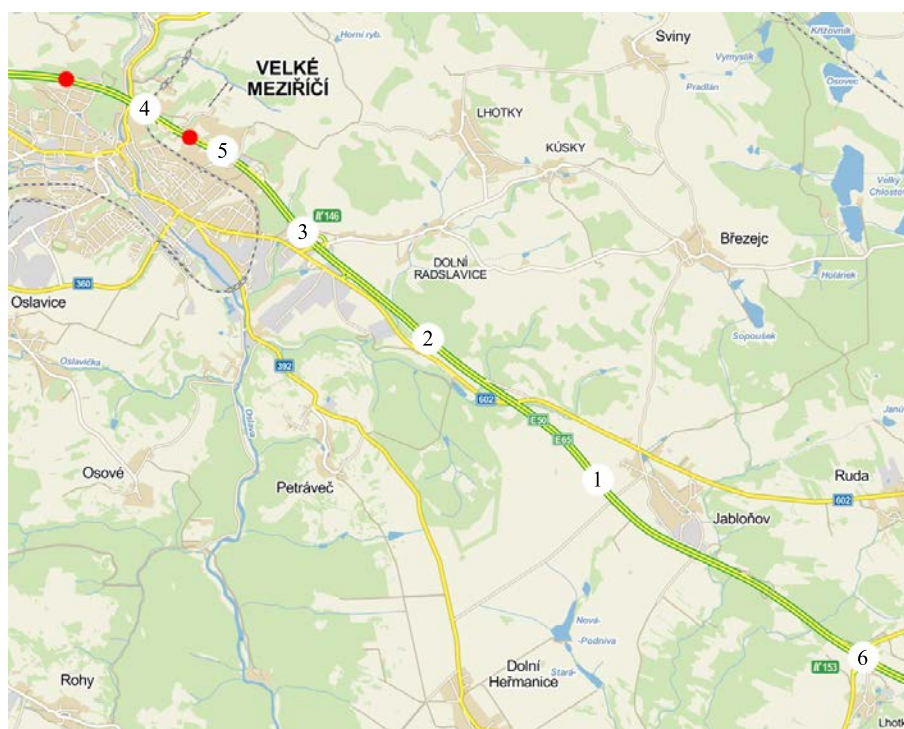
2.1 Dopravní průzkum v pracovním místě

Ve městě Velké Meziříčí za sjezdem č. 141 se nachází dálniční most, který je zachycen včetně umístění na obr. 2.1 a který převádí dálnici D1 přes řeku Oslavu. Nosnou konstrukci tvoří dva ocelové nosníky o celkové váze 6 tisíc tun, pilíře jsou betonové. Výška mostovky činí 77 metrů, délka přemostění 425 metrů. Dokončen byl roce 1978, v rámci jeho rekonstrukce v létě roku 2013 byl uzavřen jeden z jízdních směrů a provoz byl veden v protisměru. Během rekonstrukce byl ve dnech pondělí–středa provoz veden ve směru na Prahu ve dvou pruzích ze tří možných, ve dnech čtvrtek–neděle bylo schéma otočeno a provoz byl veden ve dvou pruzích ve směru na Brno. Díky střídání těchto režimů bylo možné v rámci jednoho měření získat informace o dvou případech dopravního omezení současně.



Obr. 2.1: Dálniční most ve Velkém Meziříčí, kde proběhla uzavírka sloužící jako vstup pro testování řízení pracovní zóny.

Při měření byla nasazena dvojice radarů Wavetronix SmartSensor HD pro plošnou analýzu dopravy a čtyři radary Stalker Traffic pro měření rychlosti dopravního proudu. Pro účely ověření dat z radarů Wavetronix byl získán záznam z detekčního profilu mýtné brány na staničení 145,3 km pořízený hybridním radarem ASIM. Validace modelu byla provedena prostřednictvím dojezdových dob plovoucích vozidel z příslušného období.



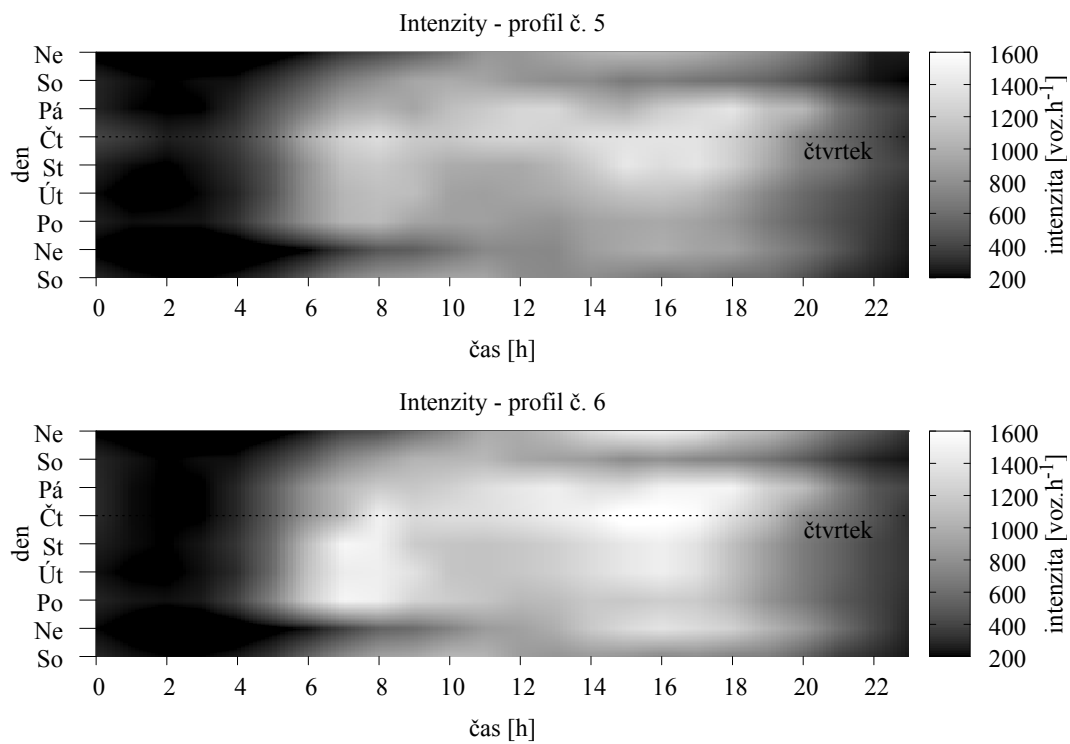
Obr. 2.2: Rozmístění detekčních profilů v průběhu testu.

Rozmístění detekčních řezů je na obr. 2.2, měření probíhalo nepřetržitě ve dnech 1.–10. června 2013. Profily 1, 2, 3 a 4 byly osazeny radary Stalker, profily 5 a 6 radary Wavetronix. Červené body ohraničují dopravní zúžení, vzdálenost mezi profily 6 a 4 je 9 600 m.

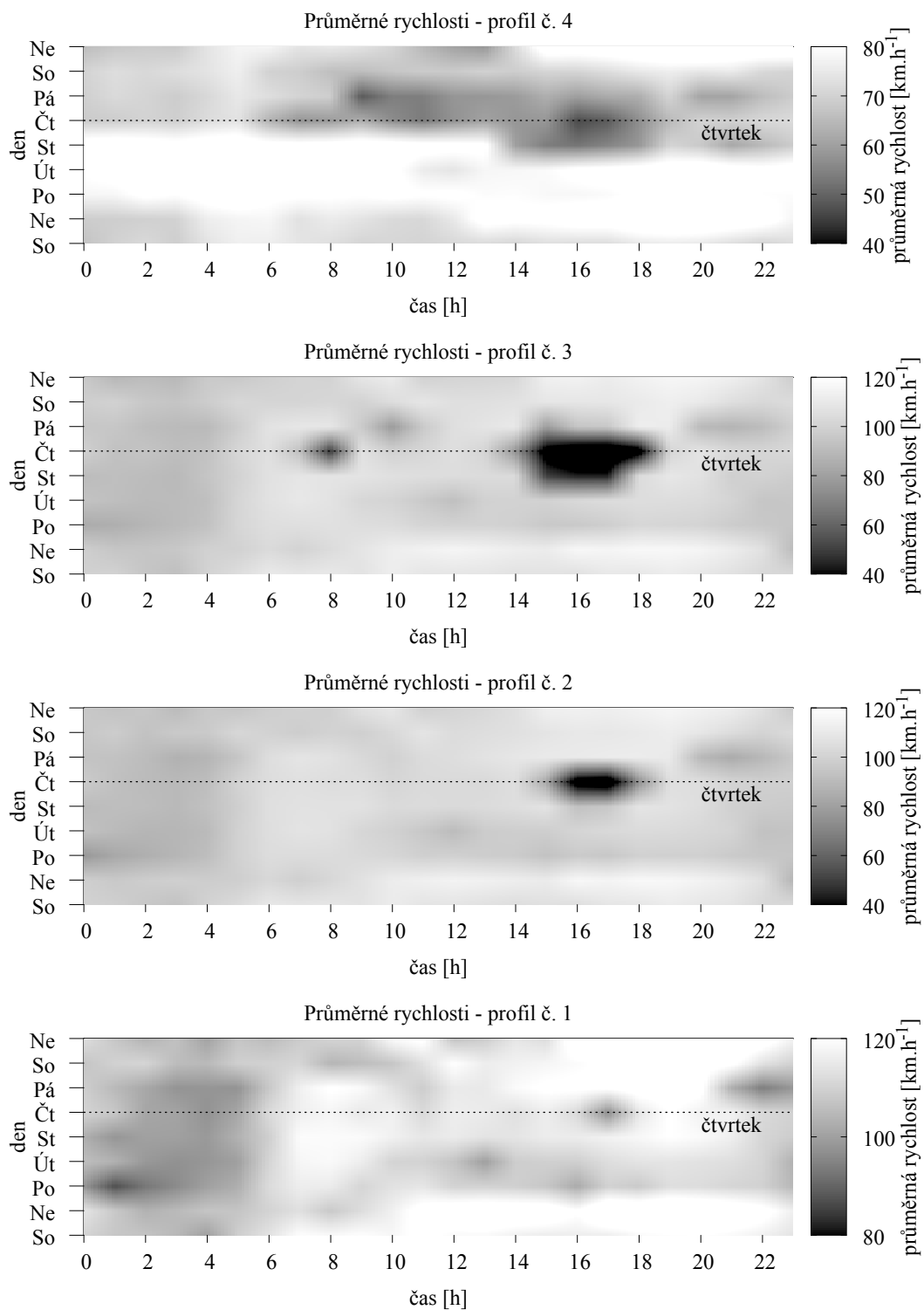
Výsledky měření intenzit z profilů č. 5 a 6 jsou na obr. 2.3. Intenzity byly snímány v hodinových intervalech, pro lepší názornost jsou následně vyhlazeny interpolací, přičemž v datech je zvýrazněn čtvrtek jako první den nové konfigurace uspořádání jízdních pruhů. Čtvrtek se zároveň ukázal jako nejvíce zatížený den, což je velmi dobře patrné především na vzdáleném profilu č. 6, který detekuje příchozí dopravu v relativně velké vzdálenosti od pracovní zóny. Příchozí intenzita se ukazuje jako kritická v intervalu 1 400–1 600 voz.h⁻¹, kdy následně dochází k vytvoření kolony především v profilu č. 3 nejbližší ústí pracovní zóny. K prvním komplikacím došlo ve středu odpoledne, se průměrná rychlost se propadla pod hladinu 60 km.h⁻¹.

Jakmile ovšem došlo k uzavření jednoho ze dvou zúžených jízdních pruhů, objevují se na obr. 2.4 první komplikace již v ranní špičce. Zejména odpoledne při srovnatelné intenzitě jako o 24 hodin dříve dochází k dramatickému poklesu průměrné rychlosti na profilu č. 3, přičemž kolona se šíří proti směru příchozí dopravy až k profilu č. 2, který je vzdálen 1 200 m a mezi oběma profily je dokonce sjezd. Dopravní proud se stává nestabilním a dochází k vytvoření kolony, jejíž délka narůstá až do doby, než dojde k opětovnému poklesu intenzit pod kritickou hodnotu. Ve výsledcích měření se rovněž ukázalo, že kolona se šíří až k radaru číslo 1, který se nachází 5 200 m před zúžením. Jako nejvíce problematický den se jednoznačně ukazuje čtvrtek, který je proto vybrán jako referenční pro aplikaci

mikroskopického modelu.



Obr. 2.3: Intenzity na detekčních profilech. Data jsou měřena v hodinových intervalech a vyhlazena interpolací.



Obr. 2.4: Průměrné rychlosti na detekčních profilech. Data jsou měřena v hodinových intervalech a vyhlazena interpolací.

3 Model pracovní zóny

V případě tvorby dopravních modelů jsou velmi často používány pojmy verifikace, validace a kalibrace modelu, které jsou nicméně často zkracovány nebo nesprávně pochopeny. Z toho důvodu je nejprve nezbytné tyto pojmy nejprve korektně popsat.

Verifikace modelu znamená proces, na jehož konci musíme mít odpověď na otázku, zda se zvažovaný nástroj nebo model v celkovém pohledu i jednotlivých detailech chová v souladu s požadavky, které na něj jeho uživatel klade. Tento soulad není zdaleka tak samozřejmý, jak se na první pohled může zdát. Uživatel má v dnešní době k dispozici širokou paletu nástrojů, přičemž nelze automaticky předpokládat, že libovolný, byť široce používaný softwarový nástroj, bude ve všech ohledech nabízet optimální kombinaci možností. Verifikaci bychom tak mohli v přeneseném smyslu popsat jako výběr vhodného nástroje pro tvorbu mikrosimulace, v případě zadavatele pak jako výběr vhodného zpracovatele modelu, který daným nástrojem disponuje. Jako zcela základní příklad verifikace lze uvést kategorie vozidel a možnost jejich statistického rozdělení v modelu. V případě, že zvažovaný nástroj či model není schopen generovat kategorie vozidel i jejich statistické rozdělení dle požadavků zadavatele, daný nástroj neprošel verifikací. Je přitom nutné zdůraznit, že verifikace ještě nemá automaticky vztah k realitě — o úspěšné verifikaci v tuto chvíli ještě nemusí rozhodovat skutečná skladba vozidel získaná např. naším měřením, ale čistě požadavky uživatele. Z hlediska námi řešeného problému proběhl určitý druh verifikace v předcházející části.

Kalibrace modelu už naopak vazbu mezi modelem a reálnými daty předpokládá. Jedná se o často relativně složitý a zdlouhavý, nicméně nezbytný proces, kdy modifikujeme jednotlivé dílčí parametry modelu tak, aby se jeho dílčí chování co nejvíce přiblížilo pozorovanému chování reálných vozidel na dopravní síti. Pokud použijeme předchozí příklad, tak jestliže očekáváme určité statistické rozdělení kategorií vozidel na modelované síti, tak během kalibrace modelu na základě empirických dat parametry tohoto rozdělení a nastavíme model tak, aby generoval obdobnou skladu vozidel, jakou jsme sledovali v reálném případě. Správně kalibrovaný model pak v dílčích náhledech vykazuje dobrou shodu s realitou.

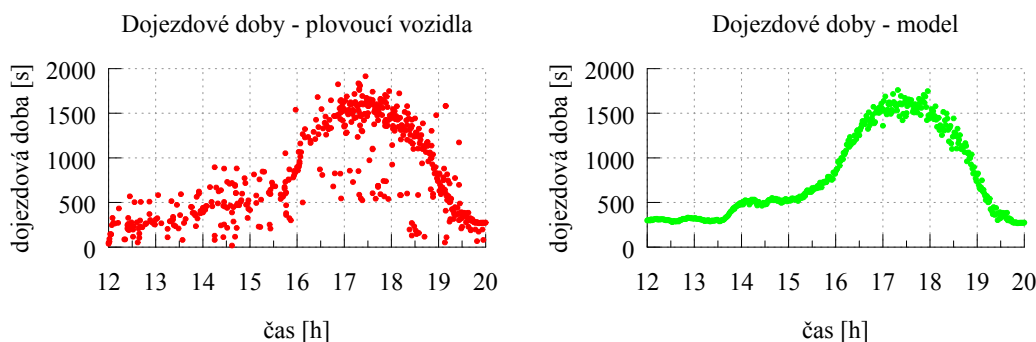
Po úspěšné kalibraci modelu následuje poslední krok, jeho *validace*. Jedná se o finální test modelu, který by měl být od kalibrace oddělen v případě možností také personálně, tedy by měl být prováděn jiným pracovníkem než tím, který prováděl kalibraci. Při validaci modelu ověřujeme, do jaké míry jsou schopny základní kalibrované mechanismy uvnitř modelu schopny reprodukovat globální chování, které od modelu očekáváme. Základním mechanismem může být např. výpočet rychlosti vozidla na základě časového odstupu, který byl během kalibrace nastaven dle empirických dat nebo teoretických podkladů. Globální vlastností, která musí být u validovaného modelu v souladu s realitou, je pak např. dojezdová doba vozidel v rámci dopravní sítě.

V našem případě použijeme model Aimsun, který můžeme považovat za verifikovaný a budeme tedy aplikovat pouze kalibrační a validační postupy. Prvním krokem při testování

vlastností plánované pracovní zóny je tedy vytvoření modelu stávajícího stavu, který máme podložen měřeními. Takto vytvořený model následně projde kalibrací a validací, přičemž v případě úspěchu je možné na něj aplikovat variantní řešení řízení pracovní zóny a testovat scénáře. V následující kapitole se zaměříme na validaci, která je rozhodujícím testem kvality modelu.

3.1 Validace modelu

Základním principem validace, který je nutné dodržet, je provádět validaci na jiném typu dat, než jaký byl použit pro kalibraci. Optimální postup by měl být dokonce takový, že validaci provede jiný pracovník dodavatele výsledků, než prvotní kalibraci, aby byla nezávislost obou procesů úplná. V našem případě je vhodné použít pro validaci dojezdové doby vozidel, které lze získat profilovým měřením například pomocí analýzy obrazu, jednotek Bluetooth nebo dat poskytovaných plovoucími vozidly. Pro validaci studovaného řešení byla využita data z plovoucích vozidel, které byla sledována na úseku přibližně 7 km s penetrací 3,6 %, tedy 385 dojezdových dob.



Obr. 3.1: Srovnání dojezdových dob reálných plovoucích vozidel a modelu v místě pracovní zóny na úseku dlouhém přibližně 7 km.

Na obr. 3.1 je srovnání datových zdrojů pro validaci. Zatímco model dle očekávání poskytuje vyrovnané výsledky, reálné měření dojezdových dob je výrazně méně kvalitní a obsahuje velký rozptyl hodnot, které jsou místy až nesmyslné. Jako příklad lze uvést datový shluk v čase přibližně 18.30, který se nachází na nerealisticky nízké hladině. Přesto dává vizuální srovnání pozitivní výsledek.

V případě validace je nutné si stanovit validační kritérium, které rozhodne o tom, zda je model úspěšně validovaný či nikoliv. Obvyklý způsob výpočtu např. *GEH* statistiky zde není možné použít, protože validace prostřednictvím intenzity není pro tento účel vzhledem k jednoduchosti sítě a konfiguraci experimentu vhodná.

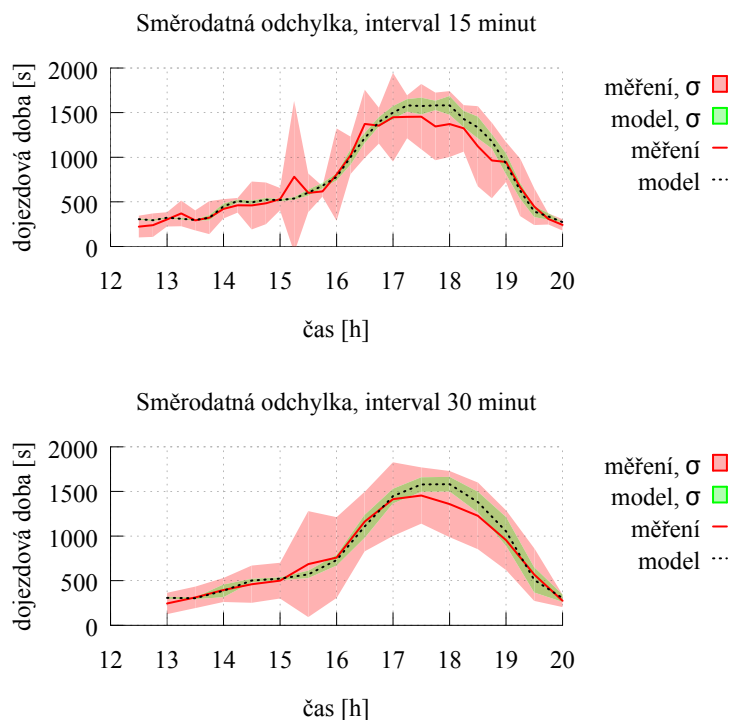
Alternativou může být výpočet statistických parametrů, konkrétně korelace a standardní deviace plovoucích vozidel a modelu. Pro výpočet korelace agregujeme data z plovoucích vozidel do minimálních intervalů, které budou obsahovat alespoň jedno vozidlo, což je

v tomto případě 10 minut. Do stejných intervalů agregujeme dojezdové doby a následně určíme korelační koeficient C_{DAT} , který by měl být v případě validovaného modelu velmi blízký hodnotě 1.

$$C_{\text{DAT}} = 0,972 \quad (3.1)$$

Jak vidíme z hodnoty korelačního koeficientu, data z plovoucích vozidel a modelu skutečně velmi silně korelují. Dalším faktorem, který využijeme při posouzení validace, je statistická analýza pomocí směrodatné odchylky měření. Vzhledem k nehomogennímu zastoupení dojezdových dob plovoucích vozidel v průběhu času budeme hledat takový interval agregace, aby počet agregovaných měření agregovaných neklesl pod smysluplné tři záznamy. Následně je pro obě sady intervalů vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka σ , pomocí které jsou vytvořeny obalové křivky ohraničující interval jedné směrodatné odchylky $\pm\sigma$.

Validační kritérium, které v tomto případě stanovíme, je požadavek, aby oblast $\pm\sigma$ modelu, jehož výsledky jsou výrazně lepší, byla podmnožinou oblasti $\pm\sigma$ dat z plovoucích vozidel.



Obr. 3.2: Srovnání směrodatných odchylek dojezdových dob plovoucích vozidel a modelu. Data jsou agregována v intervalu 15 a 30 minut, přičemž interval 15 minut je nejmenší možný pro udržení použitelného počtu prvků v daném agregačním intervalu.

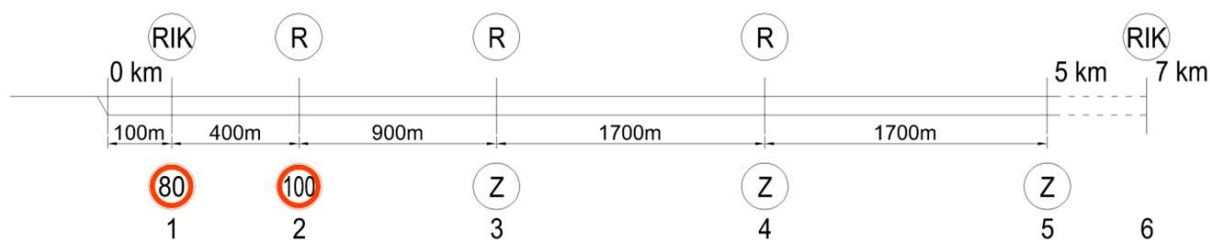
Na obr. 3.2 je výsledek tohoto porovnání. Je patrné, že již pro minimální interval 15 minut je křivka dojezdových dob modelu včetně jejich směrodatné odchylky v oblasti vy-

mezené směrodatnými odchylkami dojezdových dob reálných plovoucích vozidel. Lze tedy předpokládat, že v případě kvalitnějšího datového zdroje, který by neobsahoval tolik extrémů, by došlo spíše k posilování míry shody.

Jedinou oblastí, která vykazuje relativně nižší shodu mezi reálným měřením a modelem, je kulminace dojezdové doby, kde je patrný systematický posun. Ten lze přičíst na vrub některým zjevně nesmyslným hodnotám dojezdových dob v období 16.30–18.30, které odpovídají volné nezatížené dopravě, ale jsou změřeny v době vzniku dopravní kolony. Bez těchto datových bodů by se shoda obou křivek dále zlepšila. Model tak lze prohlásit za validovaný a bude následně použit pro sestavení algoritmu pro řízení pracovní zóny.

4 Testování scénářů dynamického řízení

Na základě výsledků měření a simulace modelu bylo navrženo následující schéma rozmístění techniky, podle kterého byl sestaven vývojový model.



Obr. 4.1: Schéma rozmístění techniky na profilech č. 1–6. *RIK* je komplexní měření rychlostí, intenzit a kategorií pomocí radaru Wavetronix, *R* je rychlostní radar Stalker, *Z* je proměnné dopravní značení.

4.1 Varianty řízení dopravního proudu

Byly testovány dynamického řízení dopravního proudu na základě detekce délky kolony, která se tvoří před místem zúžení dvou pruhů do jednoho, a na základě měření intenzity v místě profilu č. 5 ve vzdálenosti 7 km před zúžením. Po předchozích zkušenostech z kalibrace a validace modelu byly zvoleny tři úrovně intenzit, pro které bylo dynamické řízení testováno: podkritická intenzita 1 300 voz.h⁻¹, kritická intenzita 1 400 voz.h⁻¹ a nadkritická intenzita 1 500 voz.h⁻¹. Toto generované dopravní zatížení bylo vždy modelováno v délce 6 hodin simulačního času. Zátěžové intenzity představují průměr z většího počtu kratších časových intervalů se stochastickou změnou intenzity zatížení. Jako poslední byl proveden test s využitím reálných dat z kritického období ve čtvrtek 7. 6. 2012 do 10.30 do 20.00. Pro každý scénář a úroveň intenzity provedeno 10 simulací s náhodnými počátečními podmínkami, výsledky jsou uváděny jako průměr. Hodnotícím kritériem je počet vozidel stojících v koloně, což odpovídá požadavku na harmonizaci průjezdu vozidel místem dopravního omezení a zvýšení bezpečnosti. Za vozidlo stojící v koloně je považováno takové, které má rychlost v daném okamžiku nižší než 1 m.s⁻¹, což vyplývá ze způsobu měření počtu vozidel v koloně ve zvoleném softwarovém nástroji.

V modelu je sledována průměrná rychlost v profilech č. 1 a 2. Pokud klesne průměrná rychlost pod kritickou mez 40 kmh⁻¹, která vychází z testování modelu jako nejúčinnější, je situace v systému vyhodnocena jako kolona a dochází ke snížení rychlosti podle schémat odpovídajících legislativnímu omezení pro snižování rychlosti na dálnicích a silnicích ČR. V případě návratu rychlosti zpět nad hodnotu 60 kmh⁻¹ je stav v systému vrácen zpět a je

Schéma 1	
Profil 5	omezení rychlosti na 100 kmh ⁻¹
Profil 4	omezení rychlosti na 80 kmh ⁻¹
Profil 3	omezení rychlosti na 60 kmh ⁻¹
Schéma 2	
Profil 5	omezení rychlosti na 130 kmh ⁻¹
Profil 4	omezení rychlosti na 100 kmh ⁻¹
Profil 3	omezení rychlosti na 80 kmh ⁻¹

Tab. 4.1: Schémata proměnného omezení rychlosti.

možné zvýšit povolenou rychlost. Schémata omezení rychlosti v podobě dvou posloupností jsou zachycena v tabulce 4.1.

Pro posouzení jednoduchých nebo komplikovanějších variant řízení, případně nulové varianty bez řízení, jsou modelovány celkem tři scénáře řízení na základě *délky kolony*:

0. Dynamické řízení vypnuto (nulová varianta).
1. Pokud kolona dosáhne k profilu č. 1, je aktivováno schéma č. 1. Po odeznění kolony je schéma deaktivováno.
2. Pokud kolona dosáhne k profilu č. 1, je aktivováno schéma č. 2. V případě odeznění kolony je schéma č. 2 deaktivováno, v případě rozšíření kolony až k profilu č. 2 je aktivováno schéma č. 1. Po odeznění kolony v profilu č. 2 je aktivováno schéma č. 2 a v momentě vymizení kolony na profilu č. 1 je schéma deaktivováno.

Řízení na základě *intenzit* je mírně upraveno. Vzhledem k faktu, že intenzita je měřena pouze na jednom profilu, jsou modelovány pouze dva scénáře:

0. Dynamické řízení vypnuto (nulová varianta).
3. Pokud intenzita překročí 1 400 voz.h⁻¹, je aktivováno schéma č. 1 (schéma č. 2 v případě řízení na základě intenzit není použito). Schéma trvá, dokud je příchozí intenzita nad touto hranicí a zároveň je na profilu č. 2 detekována kolona.

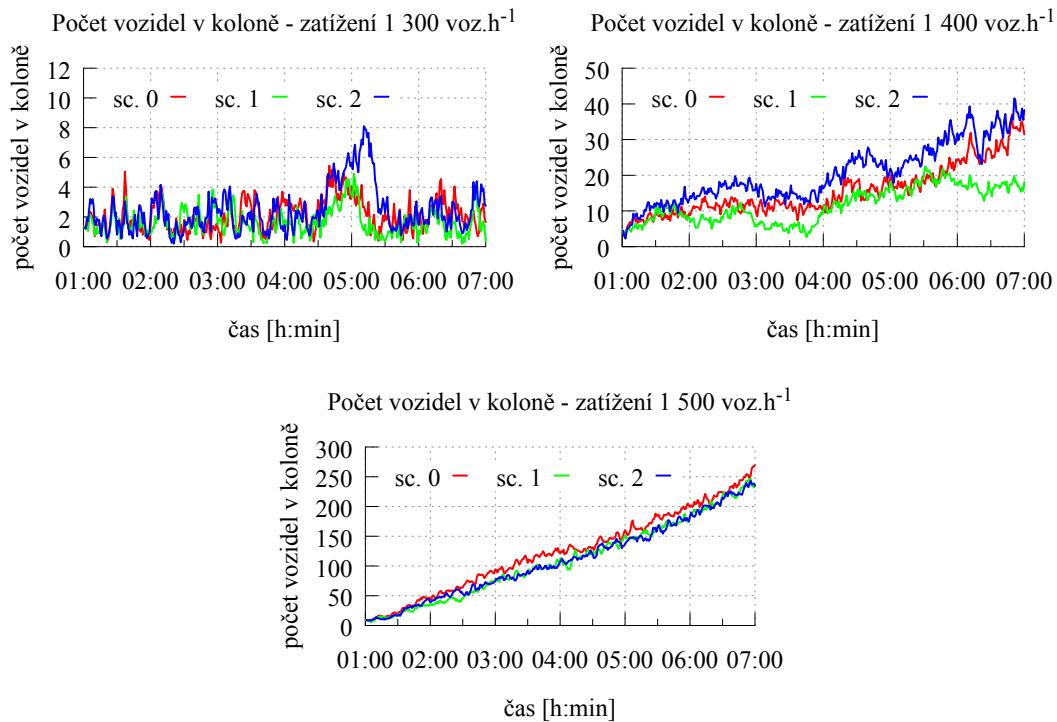
Příchozí intenzita je vyhodnocována na profilu č. 6 umístěném 7 km před zúžením, pro tento typ řízení byly testovány varianty 1 400 voz.h⁻¹, 1 500 voz.h⁻¹ a reálné zatížení.

4.2 Řízení na základě délky kolony

Nejprve je vhodné připomenout rozlišení pojmů počtu vozidel v koloně a délky kolony při simulačních testech. *Počet vozidel v koloně* je určován v modelu na základě okamžité rychlosti všech vozidel na síti, přičemž jako vozidlo stojící v koloně je započítáno takové,

jehož rychlost během dané minuty klesne pod 1 m.s^{-1} . Tato veličina je použita jako jedna z možných metrik úspěšnosti řízení dopravy, protože odráží plynulost dopravy před zónou. Vozidla jedoucí v koloně netvoří jediný útvar, mohou být a často bývají rozdělena do více samostatných skupin. Veličina *délka kolony* slouží jako podmínka pro spuštění aktivního řízení provozu a je vyhodnocována na detekčních profilech prostřednictvím průměrné rychlosti. Pokud virtuální detektor během sledované minuty určí průměrnou rychlost v profilu nižší než 40 km.h^{-1} , je situace v daném místě vyhodnocena jako kolona.

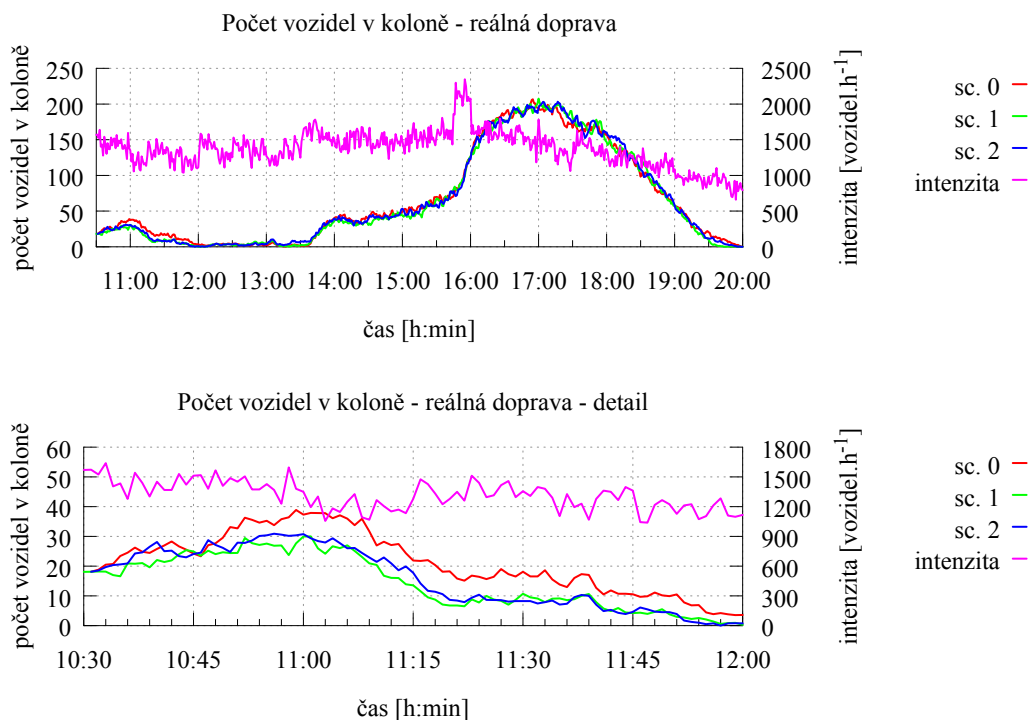
Počet vozidel stojících v koloně byl vyhodnocován po minutách v 10 simulacích, celkem tedy 3 960 měření pro každou kombinaci zatížení a scénáře. Model samotný byl v každé simulaci stejný, stochasticky se měnily parametry jednotlivých vozidel, čímž model napodoboval reálný dopravní proud.



Obr. 4.2: Výsledky dynamického řízení na základě délky kolony pro různá zatížení. Je zde patrné, že kritická intenzita leží v oblasti $1\ 400 \text{ voz.h}^{-1}$.

Na obr. 4.2 jsou zachyceny výsledky dynamického řízení pro různé příchozí intenzity. Pro dopravní zatížení $1\ 300 \text{ voz.h}^{-1}$ je doprava plynulá, lokální extrémy jsou výsledkem stochastických změn ve skladbě příchozí dopravy v jednotlivých simulačních testech, každá křivka je průměrem z 10 simulací modelu. Z dalších testů je proto tato hodnota intenzity vyřazena. Při kritickém zatížení $1\ 400 \text{ voz.h}^{-1}$ je situace náchylná na vznik turbulencí a citlivá na způsob řízení. Jako nejúspěšnější se zde projevuje scénář č. 1, tedy aktivace schématu č. 1, který dokázal zvrátit trend narůstajícího počtu vozidel v koloně oproti dalším dvěma scénářům. V případě nadkritického množství $1\ 500 \text{ voz.h}^{-1}$ již systém dynamického

řízení selhává. Trend narůstajícího počtu vozidel v koloně zvrátit nedokáže, dochází pouze k drobným korekcím a snížení počtu vozidel v koloně.



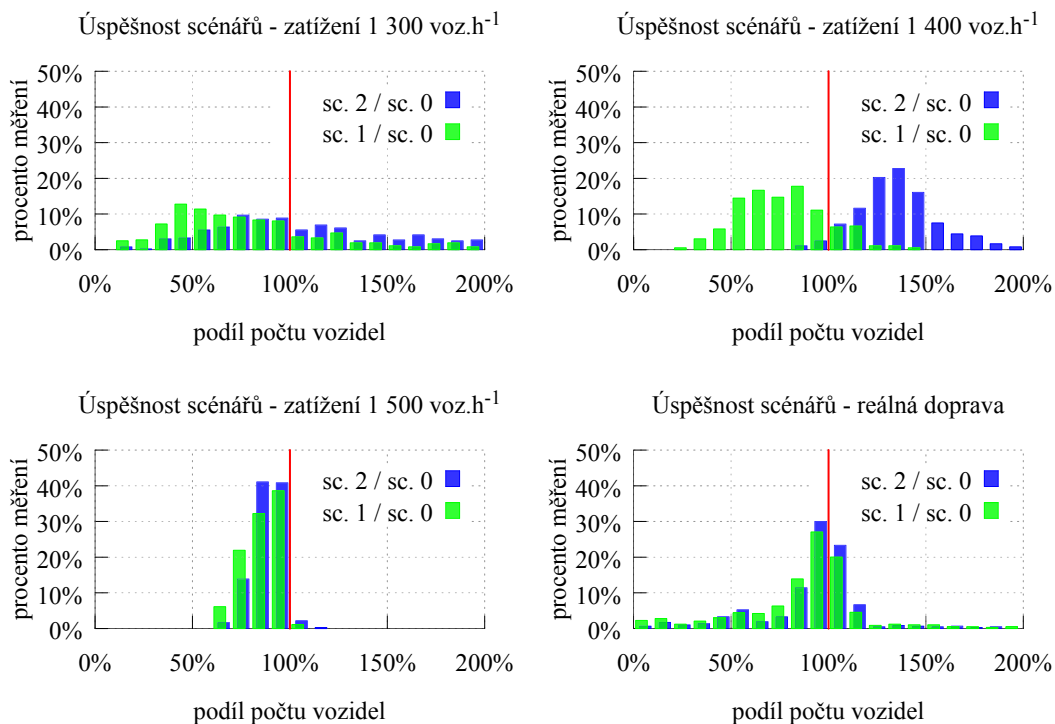
Obr. 4.3: Výsledek řízení s využitím reálného průběhu intenzity potvrzuje předchozí výsledky. Dynamické řízení na základě délky kolony je nejučinnější při intenzitách nepřesahujících $1\,400\text{ voz.h}^{-1}$ a je schopno především tlumit její rozvoj.

Testování na reálném dopravním zatížení potvrdilo poznatky zjištěné při předchozím testování na syntetických hodnotách intenzit. Jak je vidět na obrázku 4.3, při hodnotách intenzity kolem kritické hodnoty $1\,400\text{ voz.h}^{-1}$ je dynamické řízení schopno omezit průměrný počet vozidel stojících v koloně o desítky procent. Maximální počet těchto vozidel byl v období od 10.00 do 12.00 při scénáři číslo 2 snížen o přibližně 15 %, při scénáři 2 dokonce o přibližně 25 %. Tyto hodnoty se nicméně vztahují na počátek rozvoje kolony. Při nárůstu intenzit nad kritickou hodnotu v delším časovém úseku dojde k překročení kapacity pracovní zóny a již není nadále možné rozvoj kolony pozitivně ovlivnit. K samovolnému rozpuštění kolony dojde až teprve ve chvíli, kdy trvale poklesnou intenzity pod $1\,400\text{ voz.h}^{-1}$ a počet vozidel opouštějících pracovní zónu je v libovolném intervalu větší, než počet přijíždějících vozidel.

4.3 Statistické vyhodnocení řízení na základě délky kolony

Výsledky řízení pracovní zóny na obrázku 4.2 a 4.3 ukazují určité zlepšení oproti nulové variantě bez aktivního řízení, nicméně zejména pro nižší zatížení je vývoj počtu pomalu

jedoucích vozidel rozkolísaný a zhodnocení nejednoznačné. Totéž platí pro test řízení při zatížení reálnou intenzitou. Pro jednoznačné určení efektivity jednotlivých scénářů se zaměříme na statistické rozdělení podílů počtu vozidel v koloně daného scénáře aktivního řízení a počtu vozidel v koloně nulové varianty v průběhu simulace. Analyzováno je tak v případě syntetických intenzit vždy 360 vzorků, v případě reálné dopravy 570 vzorků.



Obr. 4.4: Statistické rozdělení podílů počtu vozidel v koloně daného scénáře aktivního řízení a nulové varianty v průběhu simulace. Hladina 0 % představuje nulový počet v případě aktivního řízení, hladina 100 % pak identický počet v případě aktivního řízení i nulové varianty.

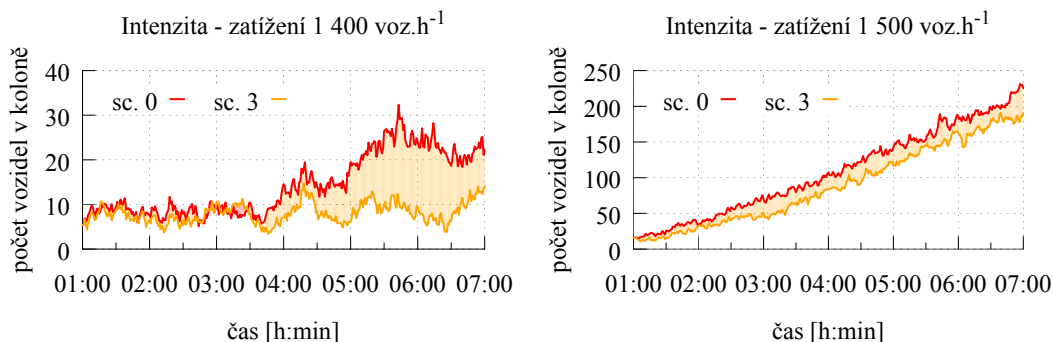
Výsledky na obr. 4.4 konkretizují informace v předchozí kapitole. Při nízkém zatížení intenzitou 1 300 voz.h⁻¹ jsou počty vozidel v koloně v obou případech řízení natolik malé, že lze jen obtížně hovořit o vyšší úspěšnosti některého ze scénářů. V případě kritické intenzity 1 400 voz.h⁻¹ jsou výsledky naopak jednoznačné, řízení pracovní zóny dle scénáře č. 2 situaci jednoznačně zhoršuje, naopak scénář č. 1 je při této intenzitě poměrně efektivní. Při vyšším zatížení 1 500 voz.h⁻¹ již oba scénáře přispívají ke zlepšení plynulosti dopravy, scénář č. 1 je opět efektivnější, ale méně výrazně. Pokud se zaměříme na reálnou intenzitu dopravy, situace se opakuje.

Výsledky poměrně jednoznačně hovoří ve prospěch scénáře řízení č. 1, kdy je aktivováno pouze schéma č. 1, tedy omezení rychlosti přímo na posloupnost 100 → 80 → 60 bez mezikroku. V takovém případě je scénář schopen dosáhnout efektu, kdy téměř 30 % sledované doby je počet fluktuujících vozidel snížen o 0–10 %, dalších přibližně 15 % doby o 10–20 %.

Scénář řízení č. 2 je účinný pouze při vysokém zatížení, při nižších intenzitě naopak situaci v pracovní zóně logicky zhoršuje a dynamické řízení by v takovém případě mělo být lépe zcela vypnuté.

4.4 Řízení na základě intenzity dopravy

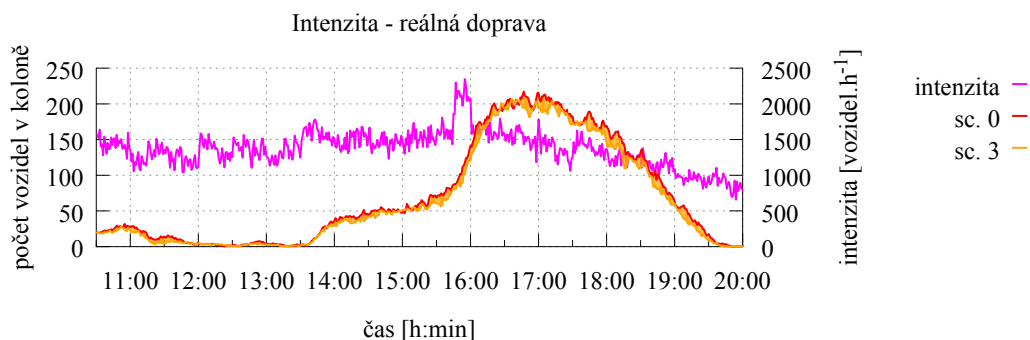
V případě řízení na základě příchozí intenzity dopravy je kritickým faktorem intenzita dopravy detekovaná na stanovišti číslo 6 ve vzdálenosti 7 km před pracovní zónou. Použité schéma vychází z výsledků předchozí části. Bezproblémová hodnota intenzity $1\,300\text{ voz.h}^{-1}$ je vyřazena, kritická hodnota intenzity pro aktivaci řízení je nastavena na $1\,400\text{ voz.h}^{-1}$, v takovém případě je aplikován modifikovaný scénář č. 3, který aktivuje schéma omezení rychlosti č. 1. Lze předpokládat, že tato forma řízení dosáhne lepších výsledků, jelikož reagujeme na případnou vyšší příchozí intenzitu dopravy ještě dříve, než se začne tvořit kolona u ústí pracovní zóny. Byly testovány dvě syntetické intenzity dopravy $1\,400\text{ voz.h}^{-1}$ a $1\,500\text{ voz.h}^{-1}$.



Obr. 4.5: Výsledek řízení pracovní zóny na základě příchozí intenzity dopravy při dvou různých zátěžích. V obou případech přispívá dynamické řízení k redukci počtu vozidel v koloně, rozdíl je zvýrazněn jako plocha

Výsledky na obr. 4.5 potvrzují předpoklad o vyšší efektivitě pracovní zóny v případě obou syntetických intenzit dopravy. Ve všech případech představuje oranžová plocha grafu oblasti, kde je dynamické řízení účinnější než nulová varianta, což je až na velmi krátké časové úseky po celou dobu simulace.

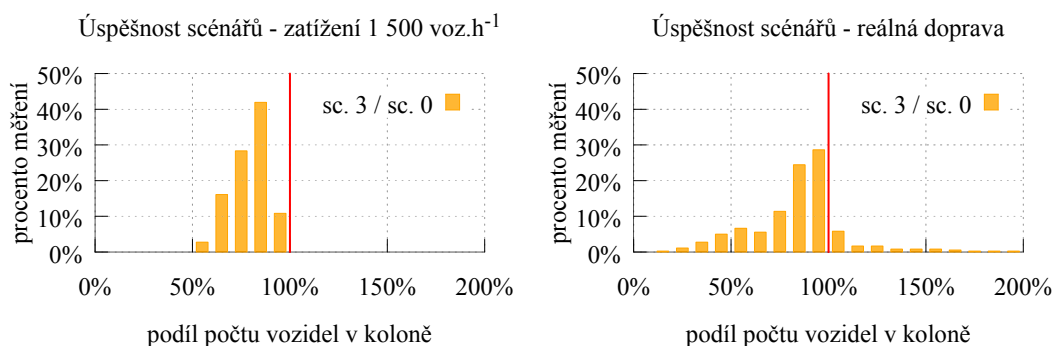
Výsledek řízení při reálné intenzitě na obr. 4.6 potvrzuje předpoklady učiněné na základě testů se syntetickou intenzitou dopravy. Téměř po celou dobu simulace scénáře je dynamický scénář efektivní, tato oblast je zvýrazněna oranžovou barvou. Výjimku představují pouze velmi krátké úseky zejména na počátku, kdy se situace obrací.



Obr. 4.6: Výsledek řízení pracovní zóny na základě příchozí intenzity dopravy při zatížení reálnou příchozí intenzitou. Až na velmi krátké časové úseky je dynamické řízení efektivnější, rozdíl v počtu vozidel v koloně je zvýrazněn jako plocha.

4.5 Statistické vyhodnocení řízení na základě intenzity

Pro statistické vyhodnocení řízení na základě intenzity použijeme stejný postup jako v případě řízení na základě délky kolony. Zaměříme se na rozdělení podílů počtu vozidel v koloně v případě aktivního řízení a bez něj, opět je analyzováno v případě syntetických intenzit 360 vzorků, v případě reálné dopravy 570 vzorků.



Obr. 4.7: Řízení pracovní zóny na základě příchozí intenzity dopravy. Hladina 0 % představuje nulový počet vozidel v případě aktivního řízení, hladina 100 % pak identický počet v případě aktivního řízení i nulové varianty.

Výsledky na obr. 4.7 upřesňují efektivitu dynamického řízení na základě intenzity, která je přínosem pro obě testované varianty syntetického zatížení i reálné zátěže, vychýlení rozdělení ve prospěch nižšího počtu pomalu jedoucích vozidel je vždy velmi jednoznačné. V případě reálné zátěže je po přibližně 30 % doby redukován počet popojíždějících vozidel o 0–10 %, pro dalších zhruba 25 % doby pak v rozmezí 10–20 % své délky.

5 Dopady aktivního řízení provozu

Hodnocení efektivity řízení, které je obsahem kapitoly 4, používá jako klíčovou metriku kolonu vyjádřenou nikoliv v metrech, ale jako počet vozidel, která prudce zpomalují před dopravním zúžením. Tímto způsobem lze alespoň orientačně kvantifikovat jinak poměrně obtížně uchopitelný pojem plynulosti dopravy. Jako nejúčinnější se v tomto pohledu jeví metoda řízení využívající vzdálené měření příchozí intenzity, což v předstihu redukuje úseky pomalu jedoucích úseků vozidel před ústím pracovní zóny. Metoda řízení na základě pouhého rozpoznání délky již existující kolony, která aplikuje stejný postup s využitím jiné aktivační podmínky, je účinná méně a pouze v případě, kdy dojde k omezení rychlosti v maximální míře. V případě redukce ve dvou krocích může být naopak kontraproduktivní.

Popsaný způsob hodnocení efektivity řízení pracovní zóny je nicméně poměrně úzce zaměřen, protože sleduje pouze malou část komunikace postiženou dopravní kolonou a ignoruje globální vlastnosti pracovní zóny a jejího okolí. Vhodnou metrikou pro hodnocení dopadů řízení na zónu jako celek je cestovní čas, který každé vozidlo potřebuje k cestě napříč všemi profily i pracovní zónou.

V rámci dopravního průzkumu v terénu můžeme získat cestovní časy ze tří různých zdrojů:

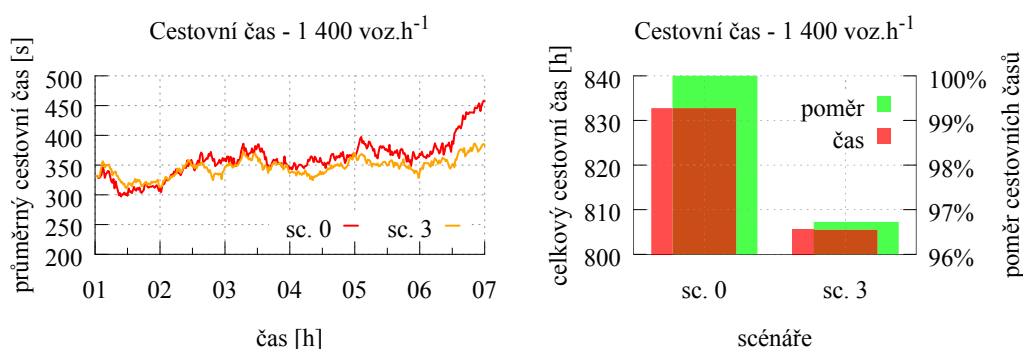
- *Plovoucí vozidla* poskytují dojezdové doby prostřednictvím sítě telefonních operátorů, typicky O₂ a T-Mobile. Výhodou je relativní pohodlí takového „měření“, které lze realizovat prakticky „od psacího stolu“, a jeho úplná anonymita. Nevýhodou je vysoká cena této služby, nízká penetrace na úrovni jednotek procent a jak jsme měli možnost vidět na obr. 3.1, problematická může být i kvalita těchto dat.
- *Detekce Bluetooth* zařízení projíždějících vozidel má výhodu v podstatně vyšší detekovatelné penetraci, která dnes v provozu běžně přesahuje 30% při použití kvalitních antén, a poměrně nízké ceně technologie. Problematická je pouze částečná anonymita měření, MAC adresy jsou sice měnitelné, ale výrobcem považované za prakticky unikátní.
- *Rozpoznávání registračních značek* pomocí strojového vidění má výhodu v prakticky úplné penetraci dopravního proudu. Tato technologie je nicméně velmi drahá, náročná na výpočetní výkon a data je nutné při zpracování anonymizovat. Měření je často v praxi příliš nápadné a vyvolává negativní reakce řidičů.

Pokud máme k dispozici model pracovní zóny, je tvorba takového odhadu již velmi přímočará, kvalitní mikroskopický model přirozeně poskytuje vedle celé řady údajů také cestovní dobu všech vozidel, která se na dopravní síti pohybují, přičemž modelovaná data jsou zcela přesná. Toho využijeme při hodnocení variant řízení z kapitoly 4, měření dojezdové doby

aplikujeme na nulovou variantu bez řízení a neúčinnější variantu řízení z předchozí části, tedy omezení rychlosti na základě příchozí intenzity (scénář č. 3, schéma opět aplikuje omezení rychlosti na posloupnost $100 \rightarrow 80 \rightarrow 60$). Varianty budeme posuzovat s využitím syntetické intenzity s kritickou hodnotou $1\,400 \text{ voz.h}^{-1}$ a dále s využitím reálného průběhu intenzity.

5.1 Cestovní čas pracovní zónou

Nejprve se zaměříme pouze na cestovní čas. Analyzovat budeme průměrné cestovní časy připadající na jediné vozidlo i celkové cestovní časy všech vozidel, která v daném vzorku projela pracovní zónou.



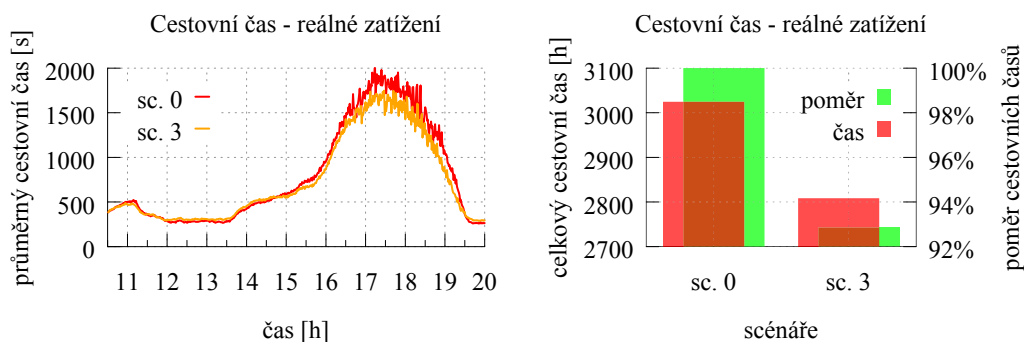
Obr. 5.1: Srovnání cestovních časů vozidel pracovní zónou pro intenzitu $1\,400 \text{ voz.h}^{-1}$.

Na obr. 5.1 jsou cestovní časy vozidel pracovní zónou, které jsou vypočteny vždy jako minutové průměry. Na počátku testu je patrné, že pro hraniční intenzitu bez dostatečně rozvinuté kolony je aktivní řízení spíše kontraproduktivní. Zpoždění získané omezením rychlosti je výraznější než zkrácení doby čekání ve spíše nepatrně redukované koloně. Jakmile se ovšem kolona dostatečně rozvine, je časová úspora získaná její redukcí pomocí aktivního řízení převažující.

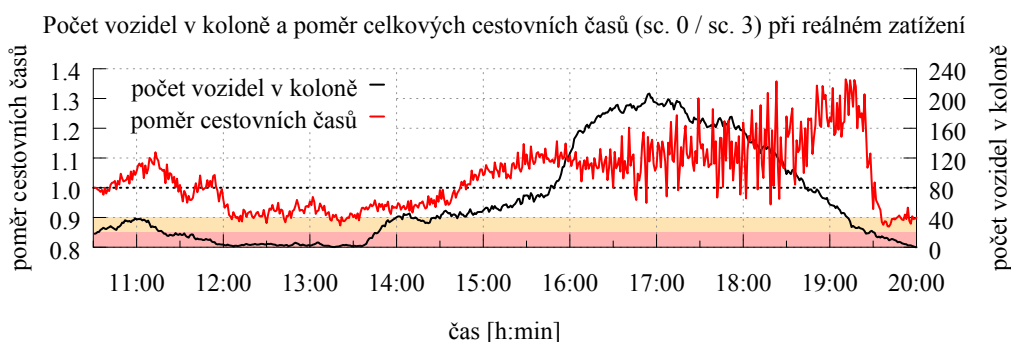
Pokud sečteme cestovní časy všech vozidel, která projela ve sledovaném období pracovní zónou, je dle výsledků aktivní řízení jednoznačně přínosné. Redukce činí na obr. 5.1 přibližně 3 %, v součtu pak více než 20 hodin cestovního času.

Na obr. 5.2 jsou cestovní časy pro zatížení proměnnou intenzitou odpovídající reálné dopravě v místě instalace. Celkový součet cestovních časů vyznívá opět pro aktivní řízení, úspora cestovního času činí přibližně 7 %, v součtu pak vzhledem k vyšším intenzitám 200 hodin.

Při srovnání obou výsledků vidíme výrazně vyšší efektivitu u reálného zatížení než u syntetické intenzity. Zároveň je zde patrný spíše negativní vliv řízení na počátku, kdy je kolona ještě relativně nepočtená, a naopak výrazné zlepšení ke konci simulace při velkém počtu vozidel v koloně. Nyní se zaměříme na vztah mezi efektivitou dynamického řízení a délkou kolony.



Obr. 5.2: Srovnání cestovních časů vozidla pracovní zónou pro skutečnou intenzitu.



Obr. 5.3: Vztah mezi efektivitou aktivního řízení a počtem vozidel v koloně. Červená oblast udává odhad počtu vozidel, pro které je aktivní řízení vždy kontraproduktivní, oranžová oblast znamená nejistý výsledek. Aktivní řízení nad oranžovou oblastí je vždy přínosem.

Na obr. 5.3 je zachycena efektivita aktivního řízení dopravy, určená jako poměr cestovních časů pracovní zónou při nulové variantě a při řízení na základě intenzity, a zároveň počet vozidel v koloně. Mezi oběma veličinami je zřetelná korelace, lze dokonce identifikovat přibližný počet vozidel v koloně v intervalu 20–40 vozidel, který je pro efektivitu řízení zlomový. Pro kolony obsahující méně než 20 vozidel je aktivní řízení z hlediska cestovních časů kontraproduktivní, pro kolony obsahující více než 40 vozidel je naopak vždy přínosem.

Výsledky ukazují, že dosavadní jednoduché pojetí aktivního řízení dopravy na základě příchozí intenzity není optimální, pokud bereme jako klíčovou metriku cestovní čas. Pokud je aktivní řízení vyvoláno vysokou příchozí intenzitou a zároveň je počet vozidel koloně relativně malý, tedy typicky při rozpadající se koloně, můžeme tento rozpad mírně urychlit, nicméně podstatně zvýšíme na úseku od profilu č. 4 k začátku kolony nebo ústí pracovní zóny časové zpoždění. Cestovní čas jako celek se tak zhorší.

Naopak v situaci, kdy je plynulost dopravy již poměrně nízká, a výsledky na obr. 5.3 ukazují hraniční hodnotu v intervalu 20–40 pomalu jedoucích vozidel, je redukce těchto vozidel aktivním řízením významnější než zdržení přijíždějících vozidel omezením rychlosti. Toto zdržení je navíc výrazně menší než v případě krátké kolony, protože rozvinutější kolona

přirozeně zkracuje dráhu vozidel jedoucích od profilu č. 4 k jejímu začátku.

5.2 Ekonomické přínosy aktivního řízení provozu

Ve snaze odhadnout přínosy aktivního řízení pracovní zóny se nelze omezit na prosté konstatování, že dochází ke zvýšení plynulosti dopravy nebo zkrácení cestovních časů. Počáteční investice do systému a jeho následný provoz generují nezanedbatelné náklady, které je potřeba zohlednit. Vhodným způsobem ekonomického hodnocení je nalezení ocenění cestovního času vozidel, vypočítat rozdíl cestovních časů a následně také finanční úsporu c_T , kterou srovnáme s náklady na systém c_S . Pro ekonomicky přínosný systém přitom musí přirozeně platit podmínka

$$c_T > c_S. \quad (5.1)$$

Jednu stranu této nerovnice lze nicméně určit jen přibližně. Zatímco náklady na investici a provoz jsme schopni vyčíslit velice přesně, náklady na cestovní čas uživatelů se určují velice obtížně a jsou zatíženy značnou nejistotou. V odborné literatuře nalezneme kromě matematických nástrojů schopných odhadovat dobu zdržení bez aplikace mikroskopického modelu také poměrně obsáhlý aparát pro odhad ceny cestovního času, resp. nákladů spojených s kongescemi [16, 32]. Zde se omezíme pouze na přehled vstupních údajů, které lze získat z národních zdrojů, a promítneme je do provozu sledovaného systému.

Jedním z tuzemských zdrojů pro výpočet externalit dopravních staveb jsou výsledky projektu *Kvantifikace externích nákladů dopravy v podmínkách České republiky*, který byl v rámci programu *CG - Podpora realizace udržitelného rozvoje dopravy (2007-2011)* v letech 2007–2011 veden řešitelským týmem Univerzity Karlovy v Praze, Centrem dopravního výzkumu, v.v.i. a SC & C spol. s r.o. Výsledkem projektu jsou mimo jiné odhady hodnoty času stráveného v kongescích, které jsou uvedeny v tabulce 5.1, přičemž výsledky se zaměřují na dopravu osobními vozidly či autobusy.

Hodnota času stráveného v kongescích dle projektu CG712-111-520	
typ přepravy	hodnota času [Kč.hod ⁻¹ .voz ⁻¹]
nepracovní cesta osobním autem	386,5
pracovní cesta osobním autem	606,1
cesta autobusem	244,8

Tab. 5.1: Hodnoty času stráveného v kongescích dle výsledků projektu *Kvantifikace externích nákladů dopravy v podmínkách České republiky*.

Dalším zdrojem vstupních dat je dokument *Základní data pro výpočty ekonomické efektivity silničních a dálničních staveb v investičních záměrech v ČR s použitím programu HDM-4 s kalibrovanými daty*, konkrétně příloha C - 2012. Hodnoty času dle této přílohy jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Hodnota času stráveného v kongescích dle HDM-4	
typ přepravy	hodnota času [Kč.hod ⁻¹ .voz ⁻¹]
nepracovní cesta osobním autem	245,4
pracovní cesta osobním autem	361,8
pracovní cesta „průměrným autem“	289,8
pracovní cesta autobusem	1 684,8
lehká nákladní vozidla (do 3,5 t)	52,2
střední nákladní vozidla (3,5–10 t)	283,2
těžká nákladní (nad 10 t)	660,0
návěsové soupravy	1 029,0

Tab. 5.2: Hodnoty času stráveného v kongescích určených dle HDM-4.

Oba přehledy předpokládají průměrnou obsazenost osobního vozidla 1,9 os.voz⁻¹ a autobusu 36 os.voz⁻¹, přičemž se výrazně liší. Vzhledem k tomu, že se snažíme o konzervativní odhad efektivity, budeme používat jako zdroj vstupních dat hodnoty dle HDM-4.

Složení dopravního proudu v místě měření hraje jako vstupní údaj významnou roli. Pracovní zóna poblíž průmyslové zóny s vysokým podílem nákladních vozidel bude mít pochopitelně výrazně vyšší ekonomické dopady než poblíž rezidenční čtvrti. Proto opět ve snaze o konzervativní odhad vybereme dlouhodobé měření na začátku dálnice D1, ze kterého analýzou více než 9 mil. vozidel vychází složení dopravního proudu uvedené v tabulce 5.3. Tato tabulka je dále doplněna o hodnoty času stráveného v kongescích. V případě, že se kategorie nepřekrývají a detektor ASIM je slučuje, byly hodnoty času dle HDM-4 převedeny aritmetickým průměrem. K tomu bylo nutné přistoupit pouze u nákladních vozidel, vzhledem k jejich velmi malému zastoupení je případná odchylka zanedbatelná. Z výsledků je patrné, že zcela dominantní budou v ekonomickém hodnocení hrát osobní vozidla. Jejich zastoupení je téměř 90 %, naopak zastoupení autobusů je prakticky zanedbatelné.

Hodnota času stráveného v kongescích vztažená na klasifikaci		
klasifikace vozidla	zastoupení	hodnota času [Kč.hod ⁻¹ .voz ⁻¹]
osobní automobil	89,3 %	289,8
nákladní automobil	3,4 %	471,6
nákladní automobil s přívěsem	6,6 %	844,5
autobus	0,6 %	1 684,8

Tab. 5.3: Hodnota času stráveného v kongescích vztažená na klasifikaci vozidel na dálnici D1 dle pevně instalovaného profilového detektoru. Slučování kategorií proběhlo aritmetickým průměrem.

Nyní můžeme přistoupit k samotnému odhadu ekonomického přínosu na jedné straně nerovnice, tedy ocenění úspory cestovního času. Pro ilustrační výpočet použijeme průběh reálné intenzity v místě instalace systému a výsledky řízení na obr. 5.2. Výsledná úspora celkového cestovního času za dobu simulace činí 215,5 hodiny, přičemž tento čas poměrně

rozdělíme mezi jednotlivé klasifikační třídy a spočítáme celkovou finanční úsporu, kterou daná třída v pracovní zóně vygeneruje. Výsledky jsou zachyceny v tabulce 5.4. Vypočtená hodnota celkové úspory cestovního času činí po dobu simulačního experimentu 73 469 Kč, což je 7 734 Kč.hod⁻¹.

Hodnota úspory cestovního času v průběhu simulačního experimentu			
klasifikace vozidla	zastoupení	úspora [h]	úspora [Kč]
osobní automobil	89,3 %	192,7	55 844,5
nákladní automobil	3,4 %	7,3	3 442,7
nákladní automobil s přívěsem	6,6 %	14,2	11 991,9
autobus	0,6 %	1,3	2 190,2
celkem	100,0 %	215,5	73 469,3

Tab. 5.4: Hodnota času stráveného v kongescích přepočtená na klasifikaci vozidel na dálnici D1 dle detektoru ASIM. Slučování kategorií s hodnotami času proběhlo aritmetickým průměrem.

V dalším kroku vyčíslíme co nejpřesněji druhou stranu nerovnice, kterou známe mnohem lépe, tedy počáteční investici do popisovaného systému a náklady na jeho provoz, které jsou zachyceny v tabulce 5.5 a rozdělují náklady na jednorázové a provozní.

Náklady na konstrukci a provoz systému	
jednorázová investice	cena [mil. Kč]
sensorická vrstva	2,7
zobrazovací vrstva	18,6
analytická vrstva	2,6
dokumentace a instalace	1,0
celkem	24,8
provozní náklady	cena [mil. Kč.rok ⁻¹]
servis a údržba	5,3

Tab. 5.5: Náklady na konstrukci a provoz systému VIAZONE, které jsou rozděleny na jednorázovou počáteční investici a provozní náklady.

Vzhledem k tomu, že náklady na jednorázovou investici spadají do odpisové skupiny 2 s dobou odepisování 5 let, lze i tyto náklady rozložit v čase. Klíčové srovnání přínosů a nákladů systému v průběhu simulačního testu tak již lze snadno vyčíslit.

Z výsledků v tabulce 5.6 vyplývá, že pro danou testovací konfiguraci a čas byl *index efektivity systému* jako poměr přínosů a nákladů jeho provozu

$$c_E = \frac{c_T}{c_S} = 6,6 \quad (5.2)$$

tedy systém by po sledovanou dobu během simulace dokázal teoreticky vygenerovat ve formě úspor více než šestnásobek provozních nákladů.

Srovnání přínosů a nákladů systému	
náklad či přínos	cena [tis. Kč.hod ⁻¹]
náklady na odpis investice	-0,565
náklady na služby	-0,604
náklady celkem	-1,169
přínos úspory cestovního času	7,734
poměr přínosů a nákladů	6,617

Tab. 5.6: Srovnání nákladů na provoz systému a přínosů, které systém generuje.

Podobný index je pro hodnocení ekonomické efektivity systému zcela klíčový. Je ovšem nutné zdůraznit, že jej není možné hledat jako pevné číslo pro systém, ale vždy *kombinaci systému, místa instalace a doby provozu*. Výsledek totiž určují mimo tyto nejdůležitější faktory:

- *Intenzita dopravy v místě instalace* ovlivňuje index efektivity nejvíce. Jak se ukázalo, zkrácení cestovních časů je u aktivního řízení výraznější v případě horší plynulosti dopravy, tedy většího počtu vozidel v koloně. V případě menšího počtu vozidel může být řízení naopak kontraproduktivní.
- *Doba provozu systému* zahrnuje fáze během dne s vyšší i nižší intenzitou, které se na jeho efektivitě projeví. Pokud bude systém v provozu 24 h denně, bude jeho efektivita nižší než v případě, kdy bude aktivní pouze během pracovního týdne a pouze během dne.
- *Roční období* má vliv na chování řidičů v oblasti pracovní zóny, v zimních měsících mají řidiči tendenci jezdit pomaleji a dynamika dopravního proudu je tak odlišná od letních měsíců.

Obecně lze konstatovat, že přestože byl studovaný systém byl testován na datech zejména během části dne s odpolední dopravní špičkou, je jeho index natolik vysoký, že do pásma nerentability by se propadl za velmi nepříznivé kombinace několika z uvedených faktorů současně. Pro výpočet byl použit velmi konzervativní odhad ceny cestovního času a nebyly zároveň zohledněny další, byť minoritní externality v podobě úspory paliva, nižších emisí CO₂, prašnosti nebo opotřebení vozidel, které efektivitu dále zvyšují.

6 Závěr

Výsledky jsou kombinací studia několika samostatných problémů, jejichž syntéza vyústila v návrh aktivního řízení dopravy v pracovních zónách a zejména stanovení podmínek, za kterých je toto řízení účinné a také ekonomicky efektivní.

6.1 Mobilní systém liniového řízení a zdroje dat pro plánování

Ukazuje se, že při návrhu mobilního systému aktivního řízení je vhodná alespoň částečná decentralizace systému do samostatných modulů, které obsluhují vždy jeden prvek sensorické, vyhodnocovací a zobrazovací vrstvy systému. Vzhledem k nutnosti provozu několika detekčních profilů současně je vhodné osazení alespoň prvního profilu detektorem s vysokým rozlišením dopravního proudu a podrobnou klasifikací, který bude schopen analyzovat příchozí dopravu ve více jízdnicích pružích současně a bude schopen zaznamenávat neagregované hodnoty. Pro měření okamžité rychlosti vozidel je dnes oprávněné požadovat od takového detektoru přesnost určení rychlosti alespoň $\pm 5 \text{ km.h}^{-1}$ pro 90 % vozidel, v případě klasifikace pak správné zatřídění pro 85 % vozidel.

Pro aktivní řízení dopravy je velmi důležitá detekce délky kolony před pracovní zónou, je proto nutné stanovit kritérium pro její detekci a vybavit maximum detekčních profilů příslušným aktivním senzorem. Jako optimální se ukazuje definice délky kolony na základě průměrné rychlosti v daném místě, potom je nutné klást důraz na přesnost měření, naopak klasifikaci nebo měření dojezdové doby není nutné v profilu provádět. Informace o dojezdové době je vhodné zprostředkovat na vzdáleném profilu pro řidiče, kteří se k pracovní zóně teprve blíží a nejsou zasaženi dopravní kolonou.

Při plánování pracovní zóny máme k dispozici jako zdroje dat pevně instalované detektory, konkrétně hybridní radary ASIM, laserové detektory AutoSense a smyčkové sčítače Marksmann 660 a CROSS ASD 3. Přestože jsou brány jako tradiční a spolehlivý zdroj dat, je k nim nutné přistupovat zejména v případě kritických aplikací s určitou obezřetností. Ukazuje se, že například smyčkové sčítače trpí odchylkou korelující s venkovní teplotou a částečně také intenzitou dopravy.

6.2 Model pracovní zóny a návrh jejího řízení

Jedním z možných přístupů k hodnocení dopadu aktivního řízení pracovní zóny na řidiče je sledování plynulosti dopravy a její změny. Tato veličina je v praxi velmi obtížně kvantifikovatelná, v mikroskopickém modelu ji ale lze snadno sledovat jako počet vozidel, která v daném časovém úseku popojíždí v koloně, tedy jejichž rychlost klesne pod předem stanovenou hladinu. Při použité této metriky se ukazuje, že pokud budeme liniové

řízení aplikovat ihned při rozvoji kolony, dosáhneme ve všech testovaných případech snížení počtu popojíždějících vozidel. Jako efektivnější se ukazuje agresivnější omezení rychlosti na minimální hodnotu oproti omezení ve dvou krocích, při testovaném reálném zatížení jsme schopni snížit po třetinu sledované doby počet popojíždějících řidičů do 10 %, dalších přibližně 15 % doby je tento počet nižší dokonce o 10–20 %.

Pokud do rozhodovacího procesu kromě detekce rozvoje kolony na jednotlivých profilo- vých detektorech zapojíme také vzdálený profil, který detekuje případnou kritickou intenzitu příchozí dopravy a dává nám tak možnost na situaci v předstihu adekvátně reagovat, je možné tento pozitivní efekt ještě dále prohloubit. V takovém případě byl při reálném zatížení počet pomalu jedoucích řidičů po více než polovinu sledované doby snížen do 20 %.

Platí ovšem, že příspěvek k plynulosti dopravy je měřitelný pouze pokud je tato plynulost skutečně výrazně zhoršená. Jestliže je počet fluktuujících vozidel blízky nule, liniové řízení k jejich úplné redukci prakticky nepřispívá a může situaci dokonce zhoršit. Naopak jestliže intenzita příchozí dopravy přesáhne kritickou hranici, která koreluje s maximální kapacitou zúžení, není v možnostech řízení zcela zabránit rozvoji kolony, je nicméně vždy schopné tlumit její negativní dopady na plynulost dopravy.

Optimální metrikou pro hodnocení přínosů aktivního řízení se ukázalo stanovení časové ztráty řidiče při průjezdu pracovní zónou oproti variantě bez tohoto řízení, přičemž mikroskopické modely jsou pro sledování dojezdové doby opět velmi vhodným nástrojem. Ukazuje se, že při důrazu na dojezdovou dobu je nutné rozšířit původní řízení na základě příchozí intenzity o podmínku, která nebude omezení aktivovat u malého počtu fluktuujících vozidel. Pokud je počet vozidel v koloně relativně malý a detekujeme na vzdáleném profilu vysokou příchozí intenzitu, dosáhneme sice omezením rychlosti vyšší plynulosti dopravy, nicméně časová úspora získaná menším počtem popojíždějících vozidel je nižší než časová ztráta způsobená nižší povolenou maximální rychlostí, aktivní omezení rychlosti je tak ve skutečnosti kontraproduktivní. Teprve od určitého počtu vozidel v koloně se tento poměr obrátí a je vhodné omezení rychlosti aplikovat. Ve studované situaci byl jako hraniční interval stanoven na 20–40 popojíždějících vozidel. Pokud je počet pomalu jedoucích vozidel před pracovní zónou nižší, má aktivní řízení negativní dopad na dojezdovou dobu v každém případě a aktivní řízení by mělo být vypnuto. Pokud se kolona rozvine a počet pomalu jedoucích vozidel je nad tímto limitem, přináší aktivní řízení vždy měřitelný pozitivní dopad jak k plynulosti dopravy, tak k době zdržení při průjezdu pracovní zónou.

Doba zdržení je také účinným nástrojem pro hodnocení ekonomických přínosů mobilních telematických systémů v pracovních zónách. Jedná se sice o opakovaně použitelná, nicméně nákladná řešení a vhodná metoda hodnocení jejich ekonomické efektivity je tak velmi důležitá. Klíčové je ocenit zdržení řidiče v kongesci, přičemž v tuzemsku jsou nyní k dispozici dva hlavní zdroje dat, které se bohužel výrazně liší. Při srovnání ekonomického přínosu na základě snížení kumulované dojezdové doby po nasazení aktivního řízení a naopak nákladů na provoz systému v místě instalace za stejnou dobu získáme index efektivity systému c_E jako podíl přínosů a nákladů. V případě, že je tento index vyšší než 1, lze alespoň teoreticky hovořit o ekonomické rentabilitě systému. Index modelovaného systému při konzervativním odhadu ceny zdržení v průběhu simulačního testu přesáhl hodnotu 6,

byl tedy teoreticky schopen ve sledovaném úseku uspořít šestinásobek nákladů na vlastní provoz.

Je nutné zdůraznit, že hodnocení účinnosti aktivního řízení a zejména jeho ekonomického přínosu není možné hledat jako pevné číslo, které by bylo *vlastností* daného systému, nýbrž jej musíme určovat pro *kombinaci* systému, místa jeho instalace a doby provozu. Výslednou efektivitu totiž kromě algoritmů liniového řízení ovlivňuje také doprava v místě instalace a její složení, doba provozu systému a do jisté míry také roční období, ve kterém bude systém nasazen. Podrobný dopravní průzkum s využitím co nejpřesnějších zdrojů dat, validovaný mikroskopický model pracovní zóny a kritická analýza dopadů aktivního řízení se tak ukazuje jako nezbytný sled kroků, které je nutné provádět vždy před každou instalací liniového řízení v pracovní zóně.

6.3 Další směřování výzkumu

Jak již bylo uvedeno dříve, systém prošel na podzim roku 2013 pilotním provozem na dálnici D1, přičemž na jaře roku 2014 budou vyhodnoceny výsledky a dojde k případné úpravě algoritmů řízení nebo doporučeného rozestavení profilových detektorů. Již nyní se ale ukazují některé kritické faktory, které ovlivňují efektivitu tohoto i jakéhokoliv dalšího budoucího systému aktivního řízení.

Jejich společným jmenovatelem je mizivá akceptace proměnného omezení rychlosti ze strany řidičů přijíždějících k pracovní zóně. Co se jeví jako relativně snesitelný jev při liniovém řízení např. na městském okruhu, má zřejmě zcela fatální dopady na řízení dopravy na dálničním zúžení. Předběžné výsledky specifických testů během pilotního provozu ukazují, že rychlostní omezení respektoval jen naprostý zlomek řidičů, kteří v danou chvíli zónou projížděli. Situace tak může být dokonce horší než bez aktivního řízení, protože malá část řidičů respektujících omezení je postupně strhávána dopravním proudem zpět k vyšším rychlostem a výsledkem je vnášení nebezpečných výchylek rychlostí do dopravního proudu.

Nerespektování proměnného omezení rychlosti ovšem nesmí být motivací pro jeho odstavení. Vysoká nehodovost je totiž dalším předběžným výsledkem pilotního testování a zároveň dalším faktorem, který efektivitu řízení dopravy omezuje. V průběhu tří měsíců pilotního provozu pracovní zóny vzrostla nehodovost v místě rekonstrukce na trojnásobek oproti předchozím hodnotám, přičemž dominující příčinou byla zřejmě vysoká rychlost řidičů před pracovní zónou. Ukazuje se tak jako nezbytné během následujících rekonstrukcí tuzemských dálnic a rychlostních komunikací zapojit do provozu pracovních zón uniformované členy dopravní policie, kteří vynucením respektování rychlostního omezení přispějí primárně k nižší nehodovosti v pracovní zóně a sekundárně také k její vyšší propustnosti při aplikaci aktivního managementu dopravy.

Další úsilí tak bude nutné směřovat ke studiu účinnosti proměnného dopravního značení obecně a k opatřením, která sníží nehodovost v pracovních zónách. Již nyní je zřejmé, že oba problémy jsou propojeny více, než je možná na první pohled patrné.

Výběr z literatury

- [1] Chandler, R. E.; Herman, R.; Montroll, E. W.: Traffic Dynamics: Studies in Car Following. *Operations Research*, ročník 6, 1958: s. 165–184.
- [2] Chrobok, R.; Pottmeier, A.; Schreckenberg, M.; aj.: A High-Resolution Cellular Automata Traffic Simulation Model with Application in a Freeway Traffic Information System. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, ročník 19, 2004: s. 338–350.
- [3] Edie, L.: Car Following and Steady State Theory for Non-congested Traffic. *Operations Research*, ročník 9, 1961: s. 66–76.
- [4] Esser, J.; Schreckenberg, M.: Microscopic Simulation Of Urban Traffic Based On Cellular Automata. *International Journal of Modern Physics C*, ročník 8, 1997: s. 1025–1036.
- [5] Forster, D.; Nelson, D.; Stephen, M.: Large-Distance and Long-time Properties of a Randomly Stirred Fluid. *Physical Review A*, ročník 16, 1977: s. 732–749.
- [6] Fritzsche, H.-T.: A model for traffic simulation. *Transportation Engineering And Control*, ročník 5, 1994: s. 317–321.
- [7] Gazis, D. C.: *Traffic Theory*. Springer, 2002.
- [8] Gipps, P.: A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, ročník 15, č. 2, April 1981: s. 105–111.
URL <http://ideas.repec.org/a/eee/transb/v15y1981i2p105-111.html>
- [9] Gipps, P. G.: A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, ročník 20, č. 5, 1986: s. 403 – 414, ISSN 0191-2615, doi:DOI: 10.1016/0191-2615(86)90012-3.
- [10] Gleick, J.: *Chaos: Making a New Science*. Penguin, 1988.
- [11] Haberman, R.: *Mathematical Models: Mechanical Vibrations, Population Dynamics, and Traffic Flow, Classics in Applied Mathematics*, ročník 21. SIAM, 1998.
- [12] Helbing, D.: Empirical Traffic Data and Their Implications for Traffic Modeling. *Physical Review E*, ročník 55, 1997: str. R25.
URL <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:cond-mat/9806062>

- [13] Helbing, D.; Hennecke, A.; Shvetsov, V.; aj.: Micro- and Macrosimulation of Freeway Traffic. *Mathematical and Computer Modelling*, ročník 35, 2002: str. 517.
URL <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:cond-mat/0003269>
- [14] Helbing, D.; Hennecke, A.; Treiber, M.: Phase Diagram of Traffic States in the Presence of Inhomogeneities. *Physical Review Letters*, ročník 82, 1999: s. 4360–4363.
URL <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:cond-mat/9809324>
- [15] Hoogendoorn, S. P.; Zuylen, H. J. V.; Schreuder, M.; aj.: Microscopic Traffic Data Collection by Remote Sensing. *Transportation Research Record*, ročník 1855, 2003: s. 121–128.
- [16] Horowitz, A. J.: The subjective value of the time spent in travel. *Transportation Research*, ročník 12, č. 6, 1978: s. 385 – 393, ISSN 0041-1647, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647\(78\)90026-6](http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647(78)90026-6).
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041164778900266>
- [17] Kerner, B. S.: *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory*. Springer, 2009, 265 s.
- [18] Kerner, B. S.; Rehborn, H.: Experimental features and characteristics of traffic jams. *Phys. Rev. E*, ročník 53, č. 2, Feb 1996: s. R1297–R1300, doi: [10.1103/PhysRevE.53.R1297](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.53.R1297).
- [19] Kesting, A.; Treiber, M.; Helbing, D.: Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, ročník 368, č. 1928, 2010: s. 4585–4605.
- [20] Knospe, W.; Santen, L.; Schadschneider, A.; aj.: Towards a realistic microscopic description of highway traffic. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, ročník 33, 2000: str. L477.
URL <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:cond-mat/0012204>
- [21] Laval, J. A.; Daganzo, C. F.: Lane-changing in traffic streams. *Transportation Research Part B: Methodological*, ročník 40, č. 3, March 2006: s. 251–264.
URL <http://ideas.repec.org/a/eee/transb/v40y2006i3p251-264.html>
- [22] Lighthill, M.; Whitham, G.: On Kinematic Waves II: A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. *Proceedings of the Royal Society A*, ročník 229, 1955: s. 317–345.
- [23] Miller, A.: A queuing model for road traffic flow. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, ročník 1, 1961: s. 64–75.
- [24] Nagel, K.; Wolf, D. E.; Wagner, P.; aj.: Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach. *Phys. Rev. E*, ročník 58, č. 2, Aug 1998: s. 1425–1437, doi: [10.1103/PhysRevE.58.1425](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.58.1425).

- [25] Newell, G.: Nonlinear Effects in the Dynamics of Car Following. *Operations Research*, ročník 9, č. 2, 1961: s. 209–229.
- [26] Pferer, R.: New safety and service guides for sight distances. *Transportation Engineering Journal of American Society of Civil Engineers*, ročník 102, 1976: s. 683–697.
- [27] Phillips, W.: A Kinetic Model for Traffic Flow with Continuum Implications. *Transportation Planning and Technology*, ročník 5, č. 3, 1979: s. 131–138.
- [28] Prigogine, I.: *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*. American Elsevier Pub. Co, 1971, ISBN 978-0444000828.
- [29] Schadschneider, A.; Schreckenberg, M.: Cellular Automaton Models and Traffic Flow. *Journal of Physics A*, ročník 26, 1993: str. L679.
- [30] Sugiyama, Y.; Fukui, M.; Kikuchi, M.; aj.: Traffic jams without bottlenecks – experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New Journal of Physics*, ročník 10, č. 3, 2008: str. 033001 (7pp).
URL <http://stacks.iop.org/1367-2630/10/033001>
- [31] Treiber, M.; Hennecke, A.; Helbing, D.: Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations. *Physical Review E*, ročník 62, 2000: str. 1805.
URL <http://www.citebase.org/abstract?id=oai:arXiv.org:cond-mat/0002177>
- [32] Tseng, Y.-Y.; Verhoef, E.; de Jong, G.; aj.: A pilot study into the perception of unreliability of travel times using in-depth interviews. *Journal of Choice Modelling*, ročník 2, č. 1, 2009: s. 8 – 28, ISSN 1755-5345, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1755-5345\(13\)70002-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1755-5345(13)70002-2).
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755534513700022>
- [33] Wiedemann, R.: *Simulation des StraBenverkehrsflusses*, ročník 8. Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, 1974.
- [34] Wolfram, S.: *Cellular Automata and Complexity*. Westview Press, 2002, ISBN 978-0201626643.

Abstract

Habilitation thesis focuses on the application of microscopic traffic flow models in the design and control of work zones on highways. The work itself is divided into three parts. The first part deals with telematic elements in work zones on highways, summarizing the experience of the authors from the development of portable traffic management system. It also describes the data used for planning work zones and describes how to collect them and test their reliability. The conclusion is that especially in some data from stationary detectors on roads, there are significant systematic variations. It would be appropriate in the future to study these in detail and take them into account during regular circuit traffic surveys.

The second part of the work focuses on the analysis of microscopic traffic models and their dynamic properties. These days, the key commercial tools are evaluated primarily on the basis of the statistical relevance of the results they produce. This approach can be problematic in specific applications, including merging lanes and the working zone in general. The conclusion of this part therefore is identification of instabilities that some tools produce at the microscopic level, and a selection of a suitable model for their actual application.

The third and final section combines the results of the previous parts and focuses on the application of the selected microscopic model in the design and testing of control algorithms in work zones, which restrict the maximum speed of the selected profiles, and evaluates their effectiveness. In case of selecting the number of slow moving vehicles in a traffic jam as the measure of efficiency, it seems necessary to also monitor the traffic intensity in the arrival zone quite far ahead of the actual bottleneck.

If the efficiency estimate is based on the extent to which the delay caused by the working to the driver is reduced, then it also seems necessary to further optimize the above mentioned strategy based on the number of vehicles, which are currently in the traffic jam. In case the number of vehicles in a traffic jam is relatively small and a high-intensity incoming traffic is detected in a distant profile, then based on previous results, reducing the maximum speed leads to a more fluent traffic. However, the delay caused by this reduction of maximum speed exceeds the time saved by having smaller number of vehicles in a stop-and-go waves, therefore reducing speed seems to be rather counterproductive. Only after the number of vehicles in a traffic jam reaches a certain threshold value, it is more efficient to reduce the maximum speed in comparison to a situation with more cars in stop-and-go waves, and it is therefore reasonable to apply such reduction.

An essential part of the work is also the assessment of the economical benefits of active traffic control in work zones. If it is possible to quantify the extra time the driver has to travel as a result of a congestion caused by working zones, then valid microscopic models provide a very straightforward tool for assessing the efficiency of traffic control simply by comparing the travel times. The key problem, however, is, and probably will be, the inputs representing the actual value of this time, which differ quite substantially depending on the source. Final conclusion is a conservative assessment of the economical efficiency of the system, including an overview of the available sources used for its determination.