ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ústav dopravních systémů

Jiří Ambros

HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI SILNIČNÍHO PROVOZU S VYUŽITÍM STATISTICKÉHO MODELOVÁNÍ

Road traffic safety evaluation using statistical modelling

Disertační práce

Studijní program: P 3710 Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: 3708V009 Dopravní systémy a technika

Školitel: Ing. Zuzana Čarská, Ph.D.

Praha 2015

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kdo mi pomohli na mé cestě doktorským studiem, zakončené předloženou disertační prací:

- školitelce Ing. Zuzaně Čarské, Ph.D. za odborné vedení
- školiteli-specialistovi Doc. Ing. Ivanu Nagy, CSc. za počáteční konzultace
- dalším kolegům z ČVUT FD
    - Doc. Ing. Josefu Kocourkovi, Ph.D., Ing. Dagmar Kočárkové, Ph.D., Ing. Tomáši Padělkovi, Ing. Petru Kumpoštovi, Ph.D. a Petře Nesládkové z Ústavu dopravních systémů za podporu a praktické informace ohledně studia
    - Leoně Šrůtové z fakultní knihovny za knihovnické služby
    - prof. Ing. Pavlu Přibylovi, CSc. za zájem o disertační práci a její kontroly
- Doc. Ing. Petru Slabému, CSc. (ČVUT FSv) za řadu konzultací a nápadů
- týmu z ACREA CR, spol. s r. o., především
    - Doc. RNDr. Janu Řehákovi za seznámení se světem statistiky a softwarem IBM SPSS
    - Mgr. Elišce Kalinové a Ing. Michalu Kadlecovi za konzultace
- Mgr. Lence Herrmannové ze SAS Institute ČR, s.r.o. za zapůjčení studentské licence software SAS
- kolegům (a ex-kolegům) z Centra dopravního výzkumu, v.v.i. (CDV)
    - Ing. Jindřichu Fričovi, Ph.D. za počáteční „nakopnutí“ a následnou snahu o poskytnutí potřebného prostoru ke studiu
    - Ing. Milanu Dontovi, Ph.D., Ing. Vojtěchu Ekslerovi, Ph.D. a Ing. Petru Šenkovi, Ph.D. za směřování v počátku studia
    - Ing. Petru Pokornému za navedení ke kvalitní literatuře
    - Mgr. Zuzaně Strnadové a Ing. Josefu Mikulíkovi, CSc. za řadu diskuzí (nejen) k tématu práce
    - Ing. Veronice Valentové za dlouhodobou týmovou výzkumnou spolupráci
    - Ing. Petru Zedníkovi, Ing. Ondřeji Gogolínovi a Ing. Richardu Turkovi, Ph.D. za pomoc se sběrem dat
    - Mgr. Zbyňkovi Janoškovi a Mgr. Jiřímu Sedoníkovi za přípravu prostorových dat
    - Ing. Peteru Oríškovi za pomoc se zpracováním a vizualizací dat
    - Janě Kadlečkové a Mgr. Daniele Hrbáčkové za pomoc se sháněním literatury a Soni Fenclové za následné reprodukce
- a všem ostatním, s kým jsem měl možnost diskutovat, konzultovat, spolupracovat na výzkumných projektech nebo jinak rozšiřovat své povědomí o hodnocení bezpečnosti silničního provozu

Dále děkuji poskytovatelům dotace následujících výzkumných projektů, při jejichž řešení vznikaly dílčí části disertační práce: Ministerstvu dopravy (CG711-078-160), Ministerstvu školství, mládeže a tělovýchovy (CZ.1.07/2.2.00/15.462 a ED2.1.00/03.0064), Ministerstvu vnitra (VG20112015013) a Technologické agentuře ČR (TB0200MD062 a TH01010254).

V neposlední řadě velmi děkuji své manželce za její neustálou podporu, trpělivost a vytváření potřebného zázemí po celou dobu doktorského studia a přípravy disertační práce.

PROHLÁŠENÍ

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Brně dne …..... Podpis …....

ABSTRAKT

Cílem práce je odpovědět na 4 výzkumné otázky z oblasti hodnocení bezpečnosti silničního provozu: (1) Co lze považovat za faktor bezpečnosti?; (2) Jak určíme, zda vybraný faktor bezpečnost skutečně ovlivňuje?; (3) Jak určíme směr tohoto působení?; (4) Jak určíme velikost tohoto působení?

Za tím účelem byla vytvořena metodologie statistického hodnocení bezpečnosti, zahrnující sběr dat, vytvoření vícerozměrných predikčních modelů rychlosti a nehodovosti, jejich ověření a interpretaci výsledků.

Metoda byla aplikována na výběrovém souboru mezikřižovatkových úseků silnic I. třídy. Jako klíčové byly identifikovány následující proměnné: intenzita dopravy, délka úseku a konzistence rychlosti (rozdíly rychlosti mezi přímými úseky a směrovými oblouky). Všechny tyto faktory mají pozitivní vliv, tj. vedou ke zvýšení nehodovosti.

ABSTRACT

Thesis objective is to provide answers to the 4 research questions related to road traffic safety evaluation: (1) What may be considered a safety factor?; (2) How to detect whether the factor truly influences safety?; (3) How to identify direction of this effect?; (4) How to measure size of this effect?

In this regards the methodology of statistical evaluation was developed, including data collection, multivariate prediction modelling of speed and accidents, their validation and interpretation of results.

The method was applied on a sample of segments of Czech national roads. Key variables were traffic volume, segment length and speed consistency (speed differences between tangents and curves). Their effects are positive: they are associated with increase of accidents.

OBSAH

1. ÚVOD 8
2. NÁVRH PRÁCE 9
   2.1. Oblast výzkumu 9
   2.2. Téma výzkumu 10
   2.3. Výzkumné otázky 10
3. ČÁST A: DATA 11
   3.1. DATA A METODY HODNOCENÍ 11
      3.1.1. Nehodová data 11
      3.1.2. Provozní data 13
      3.1.3. Silniční data 14
      3.1.4. Metody hodnocení 14
      3.1.5. Shrnutí 15
   3.2. UKAZATELE BEZPEČNOSTI 15
      3.2.1. Přímé ukazatele bezpečnosti 15
      3.2.2. Ilustrace rozdílné vypovídací schopnosti ukazatelů 18
      3.2.3. Nepřímé ukazatele bezpečnosti 21
      3.2.4. Shrnutí 21
   3.3. PŘÍPRAVA PROMĚNNÝCH 22
      3.3.1. Konceptuální rámec 22
      3.3.2. Vysvětlovaná proměnná: nehodovost 23
      3.3.3. Vysvětlující proměnné: rizikové faktory 27
      3.3.4. Shrnutí 30
   3.4. APLIKACE 30
      3.4.1. Výběrový soubor 30
      3.4.2. Segmentace 31
      3.4.3. Přiřazení dat 33
      3.4.4. Závěr 35
4. ČÁST B: PREDIKČNÍ MODEL 36
   4.1. TEORIE 36
      4.1.1. Regresní analýza 36
      4.1.2. Aplikace v kontextu nehodovosti 37
      4.1.3. Aplikace modelu 39
      4.1.4. Shrnutí 42

4.2. APLIKACE 42
4.2.1. Volba funkčního tvaru proměnných 42
4.2.2. Postupný vývoj modelu 42
4.2.3. Ohodnocení modelů 43
4.2.4. Závěr 48
5. ČÁST C: ROZŠÍŘENÍ MODELU 49
5.1. TEORIE 49
5.1.1. Zkušenosti ze světa 49
5.1.2. Stav v ČR 51
5.1.3. Shrnutí 52
5.2. APLIKACE 52
5.2.1. Model s rozdíly křivolakosti 52
5.2.2. Model s rozdíly „měřené“ rychlosti 53
5.2.3. Model s rozdíly „modelované“ rychlosti 53
5.2.4. Srovnání modelů 55
5.2.5. Závěr 57
6. ČÁST D: OVĚŘENÍ MODELU 59
6.1. TEORIE 59
6.1.1. Interní validita 59
6.1.2. Externí validita 60
6.1.3. Shrnutí 60
6.2. APLIKACE 60
6.2.1. Interní validita 60
6.2.2. Externí validita 64
6.2.3. Závěr 66
7. DISKUZE 67
7.1. Podstata hodnocení 67
7.2. Volba vysvětlované proměnné 67
7.3. Volba vysvětlujících proměnných 68
7.4. Kvalita vstupních dat 68
7.5. Velikost souboru nehod 69
7.6. Kvalita modelů 69
7.7. Hodnocení validity 70
8. SHRNUTÍ A ZÁVĚRY 71

8.1. Shrnutí 71
8.2. Závěry pro další rozvoj vědy 71
8.2.1. Závěry z pohledu metodologie 71
8.2.2. Závěry z pohledu výsledků 72
8.3. Závěry pro realizaci v praxi 72
9. REFERENCE 74
10. PŘÍLOHY 85
10.1. Publikační výstupy disertační práce 85
10.2. Ostatní publikační výstupy 86
10.3. Scientometrické údaje 89
10.4. Vybrané články 91
10.5. Životopis 91

1. ÚVOD

Původní název a téma disertační práce, které jsem si v roce 2008 zvolil, byly následující:

„Nehodovost na úseku pozemní komunikace z hlediska charakteru daného úseku“

Analýza relativní nehodovosti na širokém spektru úseků silniční sítě v extravilánu/intravilánu o různých vlastnostech tak, aby zastoupený do rozsahu co největší počet úseků dobře reprezentoval různorodou skladbu dopravních úseků silniční sítě v ČR. Vytvoření dostatečně rozsáhlé databáze relativně homogenních úseků, která zaznamená řadu podrobností o směrovém a výškovém uspořádání daného úseku, vlastnostech bezprostředně sousedících úseků, intenzitě, rychlosti, počtu nehod dle následků za časové období atd. a následné vyhodnocení těchto dat.

V období 2009 – 2012, kdy jsem prováděl úvodní rešerše a první kroky řešení, jsem dospěl k závěru, že zadání bude vhodné zúžit a to následovně:

	Původní zadání →	**Důvod změny** →	**Nové zadání**
Ukazatel bezpečnosti	Relativní nehodovost	Ne zcela vhodný ukazatel, zahrnuje v sobě totiž intenzitu, která je sama rizikovým faktorem.	Absolutní nehodovost (četnost nehod)
Rozsah sítě	Plošný záběr (základní soubor)	Cílem práce je především vývoj metodologie, bude použit výběrový soubor.	Menší záběr
Kategorie komunikací	Extravilán/intravilán	V intravilánu působí na bezpečnost řada vlivů, které se obtížně kvantifikují (např. intenzita pěší nebo cyklistické dopravy). Lze také předpokládat, že v intravilánu je významnější vliv křižovatek, které nejsou v záběru práce.	Extravilán

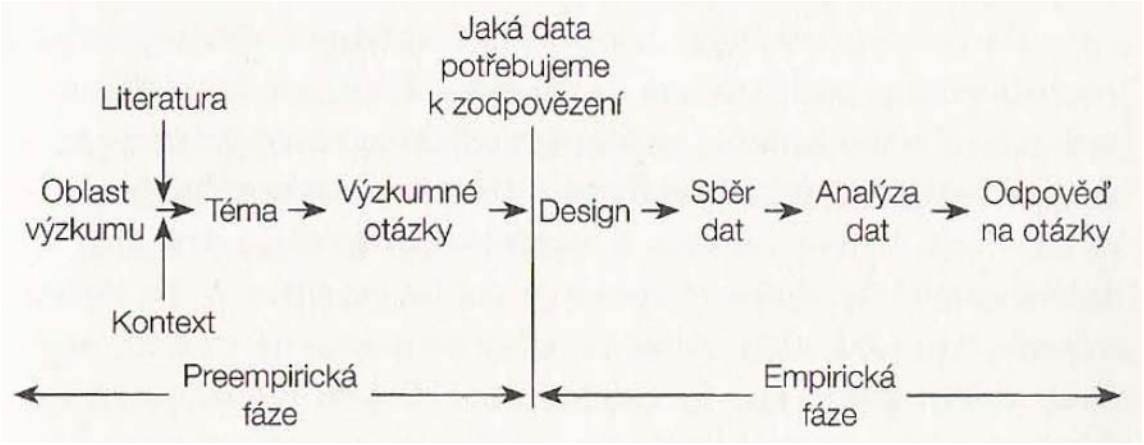
Cílem práce tedy není plošný výzkum velkého počtu vlastností (vlivů, faktorů, proměnných, veličin) na rozsáhlé silniční síti, ale především vývoj metodologie, která umožní faktory shromáždit, zjistit zda je jejich vliv statisticky významný a vyjádřit míru působení tohoto vlivu. Protože doprava je komplexní systém, budou k těmto analýzám využity statistické modely, které tento systém vhodně zjednodušují.

Zmíněné zúžení tématu jsem prezentoval na obhajobě písemné studie k disertační práci v červenci 2012, kde bylo také odsouhlaseno. Výsledný název práce je: **„Hodnocení bezpečnosti silničního provozu s využitím statistického modelování“**. Je strukturována do následujících kapitol a částí:

Kap. 2	**Kap. 3 – 6**	**Kap. 7 – 10**
Návrh práce	Vlastní práce ▪ část A (Data) ▪ část B (Predikční model) ▪ část C (Rozšíření modelu) ▪ část D (Ověření modelu)	▪ Diskuze ▪ Shrnutí a závěry ▪ Reference ▪ Přílohy

2. NÁVRH PRÁCE

Snažil jsem se vést disertační práci podle doporučení „úspěšného návrhu výzkumu“ (*Punch, 2008a*). Jednotlivé body tohoto doporučení jsou shrnuty ve schématu na Obr. 1.



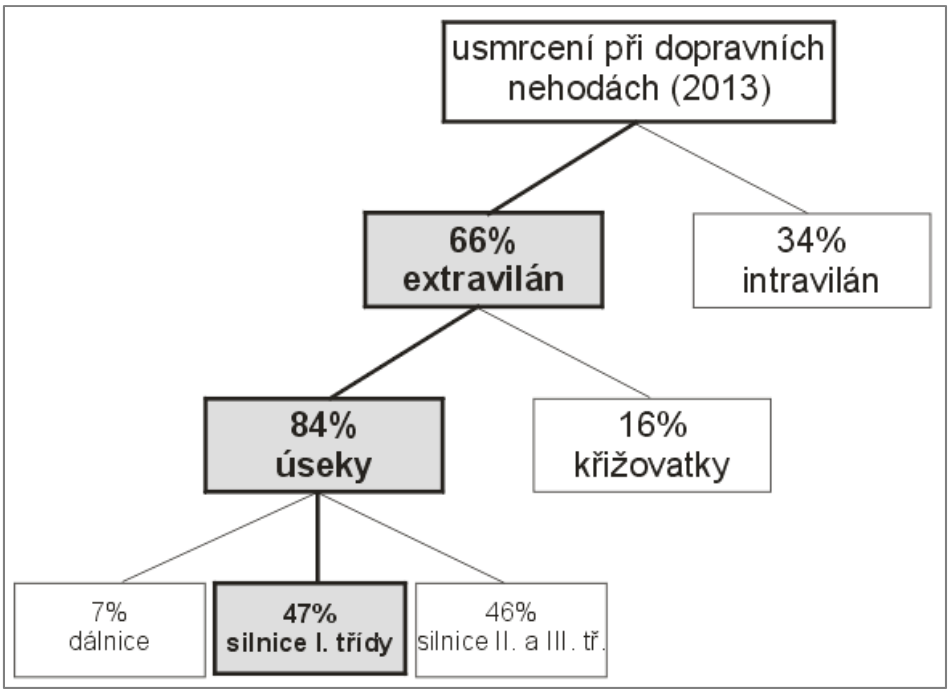
Obr. 1 Zjednodušený model výzkumu (*Punch, 2008a*)

Kapitola 2 tedy popisuje preempirickou fázi výzkumu (návrh práce), kapitola 3 pak empirickou fázi (vlastní práci). S ohledem na rozsah je vlastní práce rozdělena do čtyř bloků: Data, Predikční model, Rozšíření modelu, Ověření modelu. Každý blok obsahuje teorii (úvod a rešerši) a aplikaci.

2.1. OBLAST VÝZKUMU

Bezpečnost silničního provozu (dále „bezpečnost“) je tématem s vysokou prioritou. V českém prostředí to potvrzuje ústřední dokument, kterým je Národní strategie bezpečnosti silničního provozu (NSBSP), aktuálně platná pro období 2011 – 2020. V jejím úvodu je shrnut stav bezpečnosti dopravy v ČR. Je konstatováno, že od roku 2001 bylo na českých silnicích usmrceno více než 10 000 osob a čtyřikrát tolik bylo vážně zraněno. Ekonomické ztráty způsobené nehodami a jejich následky znamenaly v roce 2013 pro stát náklady 52,8 mld Kč, což odpovídá cca 1,3 % hrubého domácího produktu (*Valach et al., 2015*). Pro to, aby bylo možné snížit množství těchto obrovských celospolečenských ztrát, jsou hledána řešení na světové, evropské i národní úrovni.

Zaměření práce se řídilo podle toho, kde je bezpečnost největším problémem. Jako ukazatel byl zvolen počet usmrcených při dopravních nehodách, registrovaných Policií ČR v roce 2013; poměrné dělení bylo provedeno pro extravilán/intravilán, úseky/křižovatky a kategorie silniční sítě. Schéma na Obr. 2 ukazuje výsledné hodnoty (každý řádek = 100 %), zvýrazněná pole ukazují větší podíl v jednotlivých řádcích. Podle toho je tedy z hlediska počtu usmrcených nejkritičtější kombinace: **extravilánové mezikřižovatkové úseky silnic I. třídy**. Specifičnost a rizika provozu v extravilánu potvrzují i další zdroje (*OECD, 1999*; *CDV, 2012*).



Obr. 2 Kategorizace počtu usmrcených osob při dopravních nehodách v ČR v roce 2013

2.2. TÉMA VÝZKUMU

Řešení stavu, zmíněného Národní strategií bezpečnosti silničního provozu a schématem vyžaduje systematickou aplikaci takových aktivit, které pomáhají zvyšovat bezpečnost. Tyto činnosti lze podle Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (*OECD, 1997*) klasifikovat následovně:

1) identifikace rizikových faktorů, které ovlivňují bezpečnost
2) identifikace vhodných bezpečnostních opatření
3) hodnocení účinnosti aplikovaných bezpečnostních opatření

Téma disertační práce spadá do bodu 1 – identifikace rizikových faktorů, od kterého se odvíjí i další dva kroky. Doporučené postupy vyžadují adekvátní kvantitativní vědecké metody; ve světě se již řadu let rozvíjí (*OECD, 1997*; *Hauer, 1997*; *Persaud, 2001*; *PIARC, 2003*; *Elvik et al., 2009*; *AASHTO, 2010*), v ČR nejsou doposud výrazně používány.

2.3. VÝZKUMNÉ OTÁZKY

Výzkum v této disertační práci se soustřeďuje na parametry (vlivy, faktory, proměnné), o kterých předpokládáme, že působí na bezpečnost silničního provozu na úsecích (nezahrnuje křižovatky). Je tedy několik logických kroků, které definují následující výzkumné otázky:

1) Co lze považovat za faktor bezpečnosti?
2) Jak určíme, zda vybraný faktor bezpečnost skutečně ovlivňuje?
3) Jak určíme směr tohoto působení? (zvyšuje/snižuje bezpečnost)
4) Jak určíme velikost tohoto působení? (i pro srovnávání mezi faktory)

K nalezení odpovědi na tyto otázky bude proveden výběr dat, sběr a analýza v následujících kapitolách (část A, B, C, D).

3. ČÁST A: DATA

V této části budou představeny základní datové sady v oboru kvantitativního hodnocení bezpečnosti silničního provozu: nehodová, provozní a silniční data. Z nich se následně odvozují ukazatele („měřítka“) bezpečnosti.

3.1. DATA A METODY HODNOCENÍ

Základem každého hodnocení jsou **data**, ze kterých odvozují **ukazatele** (indikátory), která lze použít k různým metodám analýz. Z analýz následně získáme nové **informace** (hodnocení).

Ideální je mít data v podobě uspořádané množiny – **databáze**. Ta umožňuje data vzájemně spojovat, třídit, filtrovat a analyzovat jejich souvislosti. Za tímto účelem budou představeny základní množiny dat – *nehodová*, *provozní* a *silniční* data (*PIARC, 2003*).

3.1.1. Nehodová data

Bezpečnost je často ztotožňována s **nehodovostí**. Toto vnímání není zcela správné, protože nehody jsou sice důležitým, ale zdaleka ne jediným ukazatelem bezpečnosti. Protože je však pojem *nehodovost* velmi zažitý a zároveň názorný, budeme jej sami občas používat.

Nehody jsou – ze statistického pohledu – vzácným jevem a proto o nich chceme získat co největší množství informací (dat). Tato data jsou shromažďována Policií ČR – mluvíme o nehodové databázi (nebo databázi nehodovosti) – a jsou de facto základem většiny běžných analýz v oblasti hodnocení bezpečnosti (*Andres et al., 2001*; *Slabý, 2003*; *Landa et al., 2006*). Je však nutno pamatovat na to, že primárním motivem policejního vyšetřování není dopravně inženýrská analýza, ale především identifikace viníka (*Oppe, 1993*; *Andres et al., 2001*; *CDV, 2011*).

Dopravní policisté na místě vytváří spis o nehodě, plánek místa nehody a doprovodné fotografie (*Chmelík, 1997*; *Porada et al., 2000*). Součástí spisu je standardizovaný Formulář evidence nehod v silničním provozu (tzv. **protokol**). Údaje z tohoto protokolu jsou po centrálním zpracování ukládány do databáze nehodovosti; jako výstup z ní vznikají **statistiky nehodovosti**.[1] Souhrnná nehodová data jsou pak vydávána tiskem jako **ročenky nehodovosti**.

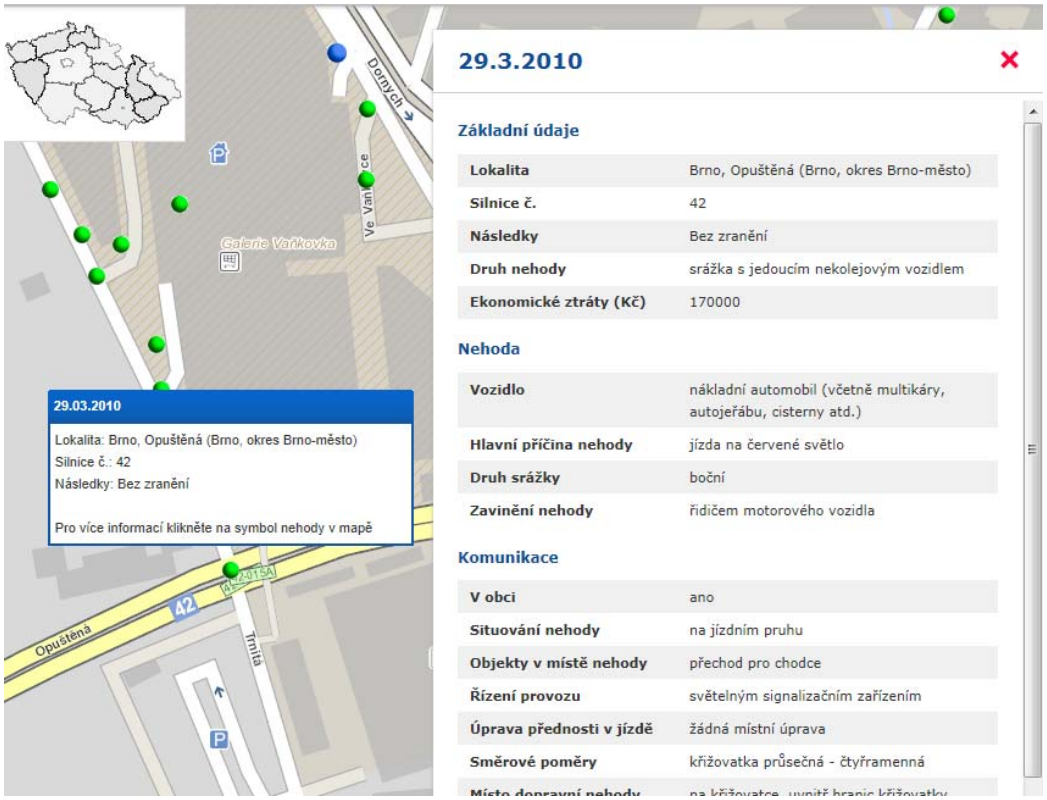
Policie shromažďuje u každé registrované nehody údaje následujících skupin: údaje o nehodě, údaje o místě nehody, údaje o vozidlech, údaje o účastnících nehody. Dovíme se tedy *kde*, *kdy* a *jak* se nehoda stala, *za jakých podmínek*, *kdo* se nehody účastnil a jaké byly její *následky*. Z protokolu se následně vytváří tzv. topografické sestavy nehod neboli **řádkové výpisy** nehod seřazené podle komunikací. Vybrané údaje z řádkových výpisů a protokolů lze získat na pracovištích dopravní policie. Přístup je však komplikován kvůli přítomnosti osobních údajů účastníků nehody, dále s ohledem na časové a personální možnosti příslušných pracovníků (*Landa et al., 2006*).

V roce 2006 byla u dopravní policie celoplošně zavedena lokalizace míst nehod pomocí GPS, návazně byl spuštěn elektronický systém **INFOBESI**[2] (*Striegler & Tučka, 2006*; *Tesařík, 2006*). V roce 2008 byl

[1] http://www.policie.cz/clanek/statistika-nehodovosti-178464.aspx
[2] http://infobesi.dopravniinfo.cz/app/Main/

pak otevřen přístup k většině údajů z nehodových protokolů v **Jednotné dopravní vektorové mapě** (JDVM).[3] Oba tyto systémy obsahují údaje o nehodách od roku 2007.

Obr. 3 Ukázka prostředí Jednotné dopravní vektorové mapy



Obr. 4 Ukázka prostředí systému INFOBESI

[3] http://maps.jdvm.cz/cdv2/apps/nehodyvmape/

Přestože policejní nehodová data jsou unikátním zdrojem informací, existuje několik problémů, která jejich kvalitu snižují. Jedním z nich je tzv. **podregistrace**. Ta vyplývá z toho, že míra registrace závisí na druhu účastníků nehody a závažnosti jejich zranění (*ETSC, 2006*; *Derriks & Mak, 2007*; *Elvik et al., 2009*). Registrace nehody Policií ČR je navíc podmíněna překročením limitu hmotné škody, který se časem mění (naposledy k 1. 1. 2009), což vede k nekonzistenci při tvorbě časových řad.

Dalším problémem je například **lokalizace nehod.** Před GPS lokalizací bylo používáno staničení (kilometráž), které nebylo vždy spolehlivé, navíc se v čase měnilo. Proto je kompatibilita různých období často problematická.

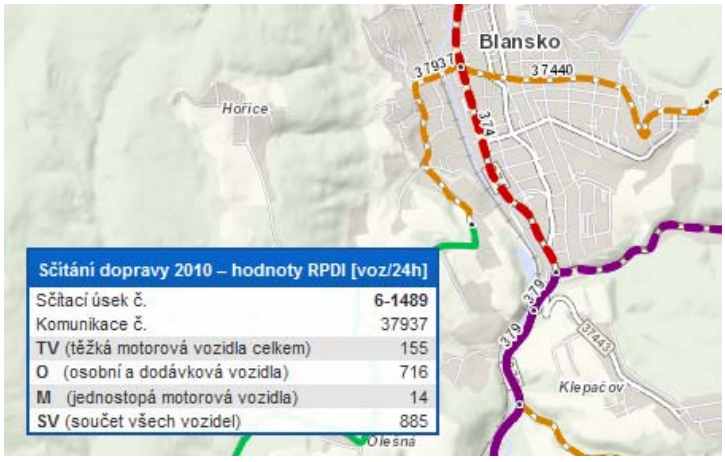
Existují i další možnosti, jak získat data o nehodách. Jednou z nich je například tzv. **hloubková analýza dopravních nehod** (*Andres, 2011*; *Juza et al., 2014*) nebo informace ze šetření **soudních znalců**. Tyto postupy se aplikují u závažnějších nehod. Zahrnují důkladné vyšetření vozidla, místa nehody i účastníků, včetně například počítačové simulace průběhu nehody. Oba tyto zdroje tedy obsahují mnohonásobně podrobnější informace než policejní údaje, především více údajů o skutečných příčinách nehod. Zároveň však platí, že hloubkově analyzovány nebo soudně vyšetřovány nejsou úplně všechny dopravní nehody. Tyto zdroje tedy budou vždy jen doplňkové.

Dalším zdrojem doplňkových dat mohou být **nemocnice a pojišťovny**. Zde je však nutno počítat s omezenou dostupností a právní ochranou dat (*Konečný, 2013*).

Další data lze získat např. z tzv. „**černých skříněk**“ (*automatic data recorder*), které zaznamenávají údaje o stavu a pohybu vozidla po jistou dobu před nehodou a po nehodě.

3.1.2. Provozní data

Existuje řada provozních ukazatelů odvozených z **intenzity** dopravy. Plošná data vychází z celostátních sčítání dopravy (CSD), která probíhají každých 5 let, naposledy v roce 2010[4] (*Bartoš et al., 2010*). Podrobné výsledky obsahují kromě roční průměrné denní intenzity (RPDI) např. i hodnoty padesátirázové a špičkové hodinové intenzity dopravy, dále údaje pro hlukové a emisní výpočty. Základní údaje lze také hledat v interaktivní mapě. Jedním z výstupů CSD je také **dopravní výkon** neboli počet ujetých vozokilometrů.



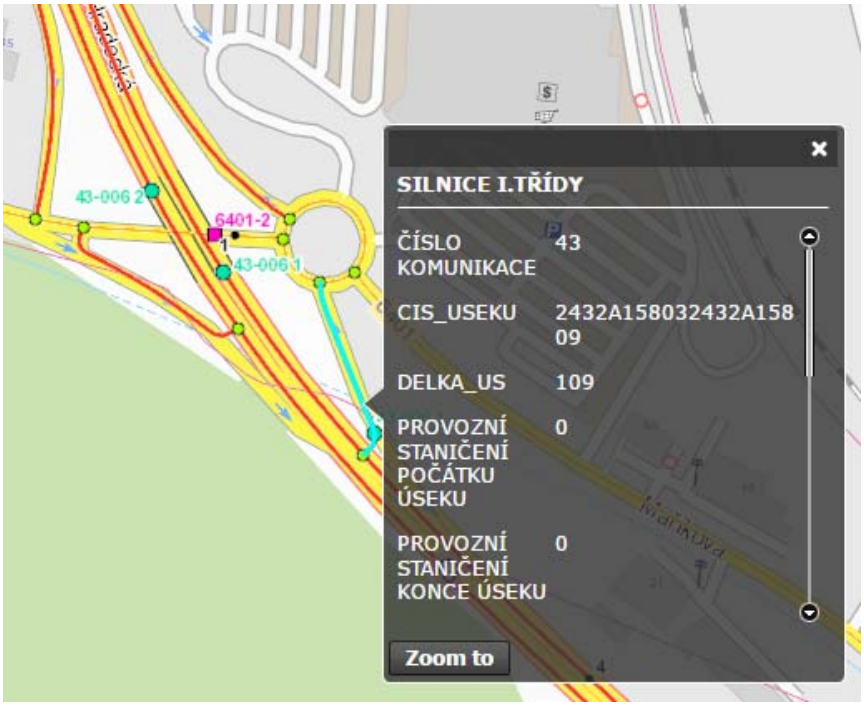
Obr. 5 Ukázka z výsledků Celostátního sčítání dopravy 2010

[4] http://scitani2010.rsd.cz/

Dále existují např. výsledky dlouhodobého sčítání dopravy z automatických detektorů dopravy. Ty jsou umístěny především na dálnicích a silnicích I. třídy (*Míšek, 2006*).

3.1.3. Silniční data

Základním zdrojem silničních dat je tzv. **silniční databanka** ŘSD ČR. Data jsou vedena ve čtyřech databázích – křižovatky, uzly, úseky a pasport. Od roku 2011 je k dispozici i webová mapová aplikace Silniční a dálniční síť ČR.[5] Ta zobrazuje vybraná data silniční databanky a umožňuje i vyhledávání, např. podle hodnot staničení nebo čísel úseků a uzlů. Všechna uvedená data jsou dvakrát ročně aktualizována. Dalším zdrojem jsou pasporty komunikací obcí. (*Martolos et al., 2009*; *Ryšavý, 2007*).



Obr. 6 Ukázka prostředí webové mapové aplikace Silniční a dálniční síť ČR

3.1.4. Metody hodnocení

Z výčtu je zřejmé, že v ČR existuje množství relativně dostupných dat vhodných k použití při hodnocení bezpečnosti. Jsou však jistá omezení: např. celostátní sčítání dopravy nepokrývá celou síť silnic III. třídy ani místních komunikací; data Silniční databanky ŘSD ČR také nezahrnují místní komunikace.

Dále platí, že každá databáze (silniční, provozní i silniční data) existuje odděleně; řešením proto často bývá tvorba vlastní relační databáze. Jedině tak lze efektivně studovat nehodovost ve vztahu k vlastnostem komunikace a jejího okolí (*Slabý & Dusbaba, 1998*).

Zároveň je však zřejmé, že plošné databáze nemohou obsahovat všechna data, která jsou z hlediska bezpečnosti relevantní. Hodnocení je proto často nutno doplnit inspekcí na hodnoceném místě a vlastním sběrem dat.

[5] http://geoportal.jsdi.cz/flexviewers/Silnicni_a_dalnicni_sit_CR/

Další možné dělení metod souvisí s prostorovými úrovněmi bezpečnosti: hodnocení lze provádět buď na jednotlivých případech (jako **případové studie**) nebo na více případech, tj. **statisticky** (*Hautzinger et al., 2007*). Přednost případových studií může být v hloubce detailu; naopak nevýhodou je, že závěry často nelze zobecnit na ostatní případy. Oproti tomu statistické hodnocení pracuje s větším množstvím případů a to tak, aby závěry byly zobecnitelné.

3.1.5. Shrnutí

Data jsou základem hodnocení, ideálně v podobě databáze, ve které lze hledat souvislosti, filtrovat apod. Základní dělení dat k hodnocení bezpečnosti (ve vztahu k infrastruktuře) je na nehodová, provozní a silniční data.

Existují plošné databáze těchto dat. Jedná se však o sekundární data, která nemusí přesně vyhovovat potřebám hodnocení. Je proto vhodné je doplnit o vlastní (primární) data, např. inspekcí na hodnoceném místě.

3.2. UKAZATELE BEZPEČNOSTI

Z uvedených dat se tvoří ukazatele, neboli „měřítka," která použijeme k hodnocení. Mohou mít podobu různých operací:

- **měření** (určení bezpečnosti vybraného prvku),
- **srovnávání** (hodnocení toho, který prvek je bezpečnější nebo hodnotit, zda opatření přispělo ke zlepšení bezpečnosti),
- **seřazení** (seřazení souboru prvků do pořadí např. podle jejich rostoucí hodnoty bezpečnosti, takže na vrcholu žebříčku budou prvky, které nejvíce vyžadují řešení),
- **vážení** oproti jiným kritériím (často se srovnává přínos bezpečnosti s finančními náklady, dále lze vážit oproti přínosům z pohledu mobility nebo životního prostředí).

Prvkem je zde myšlen (jako doposud) na lokální úrovni prvek silniční sítě (např. křižovatka nebo úsek); na plošné úrovni to ale může být obec, okres, kraj nebo stát.

Jedno z důležitých rozdělení vnímání bezpečnosti je na *reaktivní* a *proaktivní*. S tím souvisí i dělení ukazatelů na přímé a nepřímé. Zatímco *přímé* jsou odvozeny od počtu nehod, *nepřímé* ukazatele využívají širokou škálu proměnných, u kterých je známá souvislost s nehodovostí (*ETSC, 2001*; *PIARC, 2003*; *CDV, 2011*).

Následující text bude proto rozdělen na dvě podkapitoly.

3.2.1. Přímé ukazatele bezpečnosti

Přímé ukazatele bezpečnosti se často shrnují pod pojem *nehodovost* (někdy *absolutní* nehodovost, za účelem odlišení od *relativní* nehodovosti). Vychází z počtu (tj. četnosti, nejčastěji za 1 rok) následujících ukazatelů:

- *Nehody*: celkový počet nebo dělený podle závažnosti na nehody pouze s hmotnou škodou a nehody se zraněním (někdy také nehody s osobními následky nebo *osobonehody*), zahrnující nehody s lehkým zraněním, nehody s těžkým zraněním, nehody se smrtelným zraněním; nebo typů nehod, účastníků, denní doby atd.

- *Zranění*: celkový počet nebo rozdělený podle osobních následků na lehce, těžce a smrtelně zraněné.
- Obojí lze zkombinovat v ukazateli celospolečenských ztrát.

Další vybrané přímé ukazatele bezpečnosti budou rozděleny podle jejich vhodnosti pro plošné nebo lokální hodnocení. Dělení však není striktní a částečně se může překrývat.

Přímé ukazatele bezpečnosti pro plošné hodnocení

Kromě již uvedených ukazatelů (počet zraněných, počet nehod, rozdělení podle závažnosti, typů nehod apod.) se utváří i relativní ukazatele a to vztažením četnosti např. k počtu obyvatel, počtu registrovaných motorových vozidel nebo k počtu vozokilometrů ujetých motorovými vozidly. Jedná se vlastně o různé způsoby vyjádření expozice (míry vystavení riziku) (*Hakkert & Braimaister, 2002*).

Přímé ukazatele bezpečnosti pro lokální hodnocení

Základním ukazatelem je **četnost** (n) počtu nehod na prvku (N) za určité časové období (čas t):

$$n = \frac{N}{t} \qquad (1)$$

Při rozlišení prvků na křižovatky a mezikřižovatkové úseky se četnost dále vztahuje k intenzitě dopravy (I) a/nebo délce úseku (L). Prvním odvozeným ukazatelem je **relativní nehodovost** (R):

$$R = \frac{n}{I \cdot L} = \frac{\frac{N}{t}}{I \cdot L} = \frac{N}{I \cdot L \cdot t} \qquad (2)$$

Jmenovatel zlomku se nazývá dopravní výkon. Čas se většinou uvažuje v letech, používá se tedy souhrnná intenzita $I = 365 \cdot RPDI$. Roční průměrná denní intenzita ($RPDI$) se vypočítává z krátkodobého sledování podle Technických podmínek č. 189 (*Bartoš & Martolos, 2012*), případně lze využít hodnotu z celostátního sčítání dopravy. Odtud pak plynou definice:

$$R = \frac{N}{365 \cdot RPDI \cdot L \cdot t} 10^6 \quad \text{pro úseky} \qquad (3a)$$

$$R = \frac{N}{365 \cdot RPDI \cdot t} 10^6 \quad \text{pro křižovatky} \qquad (3b)$$

Relativní nehodovost je nejčastěji používaným ukazatelem bezpečnosti; vyjadřuje bezpečnost jako pravděpodobnost nehody ve vztahu k dopravnímu výkonu.

Z rovnice (1) lze odvodit i další ukazatel: **hustotu nehod** (H). Její definice neobsahuje intenzitu – udává četnost nehod vztaženou na délku úseku (pro křižovatky se nepoužívá):

$$H = \frac{n}{L} = \frac{\frac{N}{t}}{L} = \frac{N}{L \cdot t} \qquad (4)$$

Uvedená četnost nehod nezohledňuje závažnost nehod (pouze hmotné škody, lehké zranění, těžké zranění, smrtelné zranění a jejich kombinace). Za tímto účelem lze ve výpočtu relativní nehodovosti i hustoty nehod namísto četnosti nehod použít hodnotu **celospolečenských ztrát** (E). Ta vznikne součtem všech škod vzniklých při nehodě. Finanční hodnota, odpovídající každé úrovni závažnosti, je uvedena v Metodice výpočtu ztrát z dopravní nehodovosti na pozemních komunikacích (*Vyskočilová*

et al., 2013). Hodnota celospolečenských ztrát u konkrétní nehody se vypočte jako součin finančních částek na jednotlivá zranění a počtu příslušných jednotek.

Analogií relativní nehodovosti a hustoty nehod pak je **ukazatel relativních ztrát** (R_e) a **ukazatel hustoty ztrát** (H_e):

$$R_e = \frac{E}{365 \cdot RPDI \cdot L \cdot t} \qquad \text{pro úseky} \qquad (5a)$$

$$R_e = \frac{E}{365 \cdot RPDI \cdot t} \qquad \text{pro křižovatky} \qquad (5b)$$

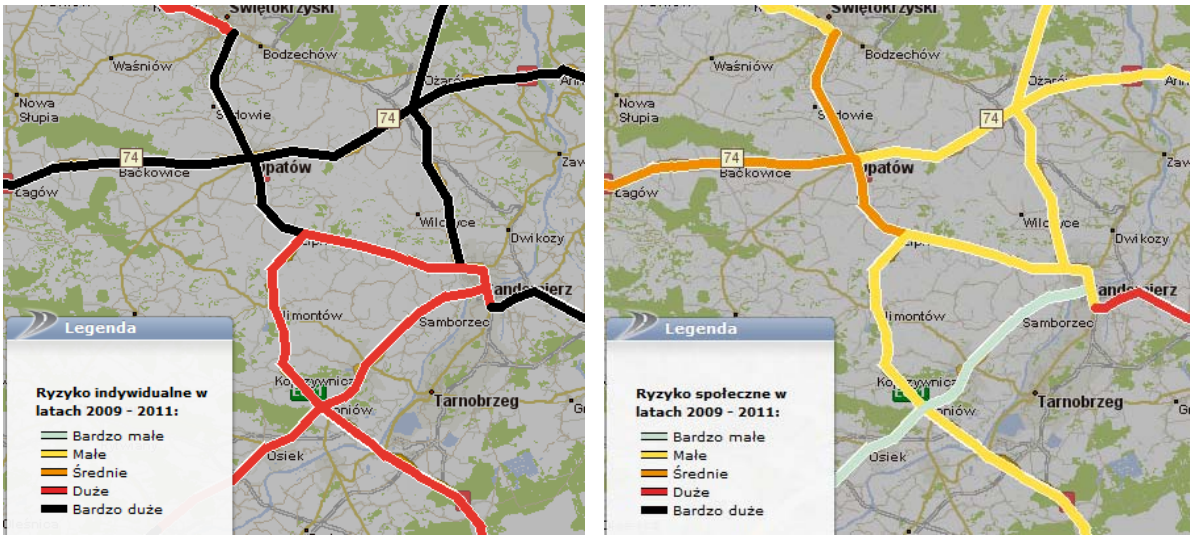
$$H_e = \frac{E}{L \cdot t} \qquad (6)$$

Z uvedených definic (*Andres et al., 2001*) však vyplývá rozdílnost jednotlivých ukazatelů. Bylo řečeno, že:

- relativní nehodovost vyjadřuje bezpečnost jako pravděpodobnost nehody ve vztahu k dopravnímu výkonu, zatímco
- hustota nehod vyjadřuje bezpečnost vztaženou na délku úseku.

Tyto dva ukazatele představují **individuální a společenské riziko**. Relativní nehodovost je individuální ukazatel (jaká je pravděpodobnost pro řidiče, že se případná nehoda stane zrovna jemu?), hustota nehod je společenský ukazatel (týká se všech vozidel).

Toto rozdělení se používá např. v mapách vytvořených v rámci projektu EuroRAP (*European Road Assessment Programme*)[6] (*Sázavská, 2009*). Na Obr. 7 je ukázka z map individuálního i společenského rizika na webovém portálu polského EuroRAPu. Na příkladu stejného území je zřejmé, že výsledky obou typů hodnocení se mohou u jednotlivých silničních tahů výrazně lišit (čím tmavší barva, tím vyšší riziko).



Obr. 7 Srovnání části polské silniční sítě na dvou typech map EuroRAP[7]

[6] http://www.eurorap.org/protocols/risk-mapping/
[7] http://eurorap.targeo.pl/

3.2.2. Ilustrace rozdílné vypovídací schopnosti ukazatelů

Jak naznačil Obr. 7, různé ukazatele mohou vést hodnotitele k rozdílné interpretaci a závěrům. Pro příklad bude uvedena studie, porovnávající bezpečnosti dvoupruhových mezikřižovatkových úseků komunikací podle jejich šířky. Největší rozsah sítě komunikací v ČR připadá na silnice I., II. a III. třídy. Typické kategorijní šířky komunikací jsou zde 7,5 m, 9,5 m a 11,5 m. Z dat silniční databanky ŘSD ČR byly vybrány úseky s těmito šířkami (s uvážením tolerance a rozšiřování ve směrových obloucích).

Každá skupina byla dále rozdělena na úseky v extravilánu a intravilánu; celkem tedy vzniklo šest skupin. Výběr byl dále upraven podle délky úseků: protože lze předpokládat, že krátké úseky nemají výrazný vliv na změnu způsobu jízdy, byly vybrány úseky o délkách nad 100 m. Ze srovnání s celkovou délkou sítě silnic I. – III. třídy podle ŘSD ČR vyplynulo, že představený soubor reprezentuje 83 % rozsahu sítě.

K vybraným úsekům byly přiřazeny údaje o dopravních nehodách lokalizovaných Policií ČR. Jednalo se o nehody z období 2007 – 2010, tj. za 4 roky. V úvahu byly brány ty typy nehod, které byly způsobeny chováním souvisejícím se šířkou komunikace, tj. rychlost a předjíždění; tento výběr byl aplikován i v předchozích studiích (*Kafoňková & Andres, 2008*). Dále byly k úsekům přiřazeny hodnoty intenzity. K tomu byly využity hodnoty RPDI z Celostátního sčítání dopravy 2010.

Z uvedených údajů byly vypočteny ukazatele zmíněné v kap. 3.2.1. Následující grafy ukazují hodnoty průměrů ukazatelů pro šest zmiňovaných skupin.

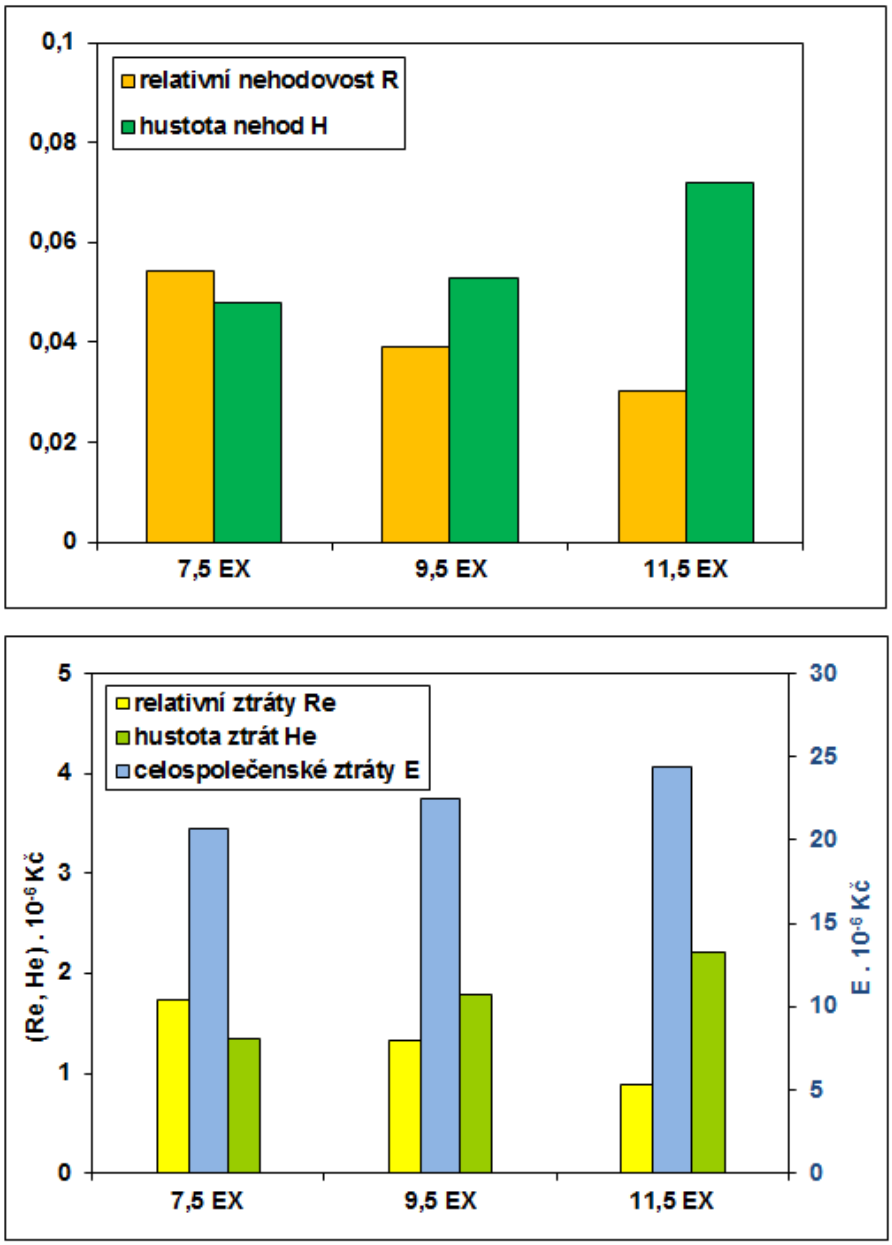
Stupnice v grafech jsou zvoleny tak, aby byly veličiny srovnatelné. Již pohledem je zřejmé, že:

- relativní nehodovost se šířkou klesá, hustota nehod naopak roste,
- to stejné platí pro odvozené ukazatele relativních ztrát a hustoty ztrát,
- v intravilánu jsou všechny ukazatele vyšší než v extravilánu (s výjimkou celospolečenských ztrát, kde to platí naopak).

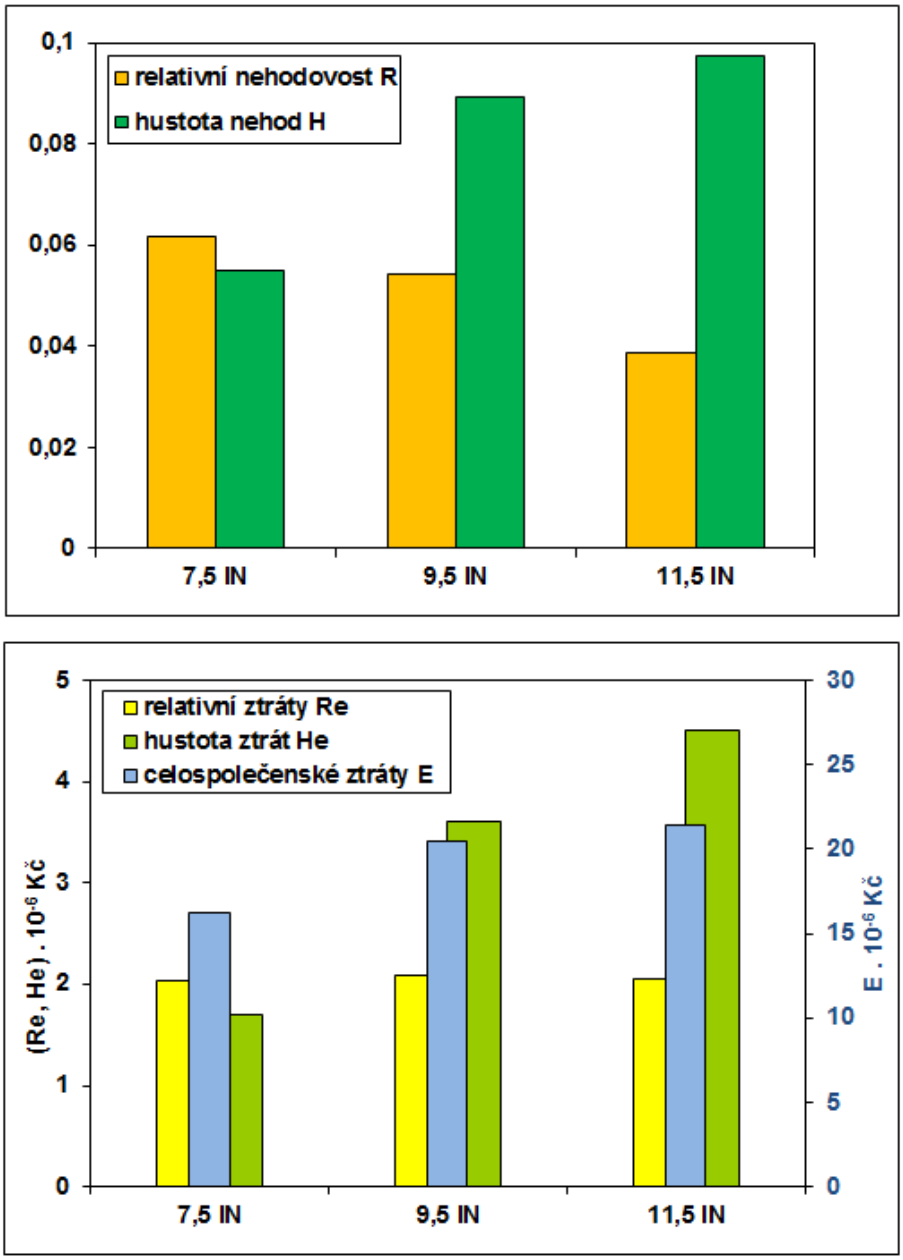
Pokud jsou však výsledky protichůdné, jak lze na základě představených ukazatelů provádět srovnávací hodnocení bezpečnosti? Popsané rozdíly mezi skupinami vyplývají z definic (podrobně viz *Ambros, 2012a*):

- u hustoty nehod je dělitelem délka úseku, která ve skupinách klesá (snižuje se míra zastoupení v silniční síti), takže hodnoty rostou,
- u relativní nehodovosti je dělitelem navíc intenzita, která ve skupinách roste (stoupá dopravní význam), takže hodnoty klesají.

Volba ukazatele určuje podobu závěrů: na základě relativní nehodovosti lze tvrdit, že se šířkou klesá nehodovost (zvyšuje se bezpečnost); na základě hustoty nehod lze odvodit opačný vztah.



Obr. 8 Hodnoty vybraných ukazatelů pro úseky v extravilánu (pro přehlednost jsou hodnoty ekonomických ukazatelů uvedeny v milionech)



Obr. 9 Hodnoty vybraných ukazatelů pro úseky v intravilánu (pro přehlednost jsou hodnoty ekonomických ukazatelů uvedeny v milionech)

3.2.3. Nepřímé ukazatele bezpečnosti

Nepřímé ukazatele bezpečnosti silničního provozu (NUB) operují s okolnostmi či jevy, z nichž lze odvozovat bezpečnost silničního provozu. Cílem NUB je rozšíření pohledu na bezpečnost a osvětlení fungování systému. Mezi NUB (chováním účastníků) a bezpečností silničního provozu (mírou problému v příslušné oblasti) existují experimentálně ověřené vztahy (*ETSC, 2001*; *Eksler et al., 2008*; *Gitelman et al., 2014a*).

Nepřímé ukazatele bezpečnosti pro plošné hodnocení

Ve výše obecném širokém pojetí jsou nepřímé ukazatele používány především na plošné úrovni. Za zmínku stojí příklad jejich aplikace v celé řadě tzv. observatoří bezpečnosti silničního provozu[8] v podobě ukazatelů, které popisují např. následující jevy:

- překračování nejvyšší dovolené rychlosti
- dodržování odstupů mezi vozidly
- používání zádržných systémů (tj. bezpečnostních pásů a dětských sedaček)
- telefonování při řízení
- denní svícení
- používání ochranné přilby u cyklistů

Tyto ukazatele lze vhodně aplikovat např. na úrovni jednotlivých krajů. Jedná-li se o pravidelný sběr dat, lze na základě jeho vyhodnocení srovnávat vývoj bezpečnostní situace a potažmo interpretovat případné změny (*Ambros et al., 2008*; *Dont & Ambros, 2009*).

Nepřímé ukazatele bezpečnosti pro lokální hodnocení

Na lokální úrovni existuje řada jevů, které lze vnímat jako nepřímé ukazatele bezpečnosti. Nejčastěji jsou zmiňované tzv. **dopravní konflikty** (někdy také „skoronehody“). Podle mezinárodní definice jsou to takové pozorovatelné situace, při kterých se k sobě dva nebo více účastníků silničního provozu přiblíží v prostoru a čase natolik, že hrozí riziko kolize, pokud se jejich pohyb nezmění (*Amundsen & Hydén, 1977*).

Hlavním rysem hodnocení na základě konfliktů je jeho proaktivita – umožňuje získat informace o přednehodovém ději. Existuje několik metod konfliktních analýz; ohledně české metodiky jsou podrobnosti školení, sledování i vyhodnocování uvedeny v *Ambros & Kocourek (2013)*.

Navíc lze využít video, dále se rozvíjí aplikace automatizace analýzy obrazu, která umožňuje detekci událostí a extrakci ukazatelů přímo ze záznamu, provádí se i mikrosimulace konfliktů. Lze provádět i dynamické sledování konfliktů (sledování za jízdy), případně využívat senzory ve vozidlech (např. data o zrychlení doplněná lokalizací a videozáznamem).

3.2.4. Shrnutí

Pro vyjádření bezpečnosti lze využít přímé nebo nepřímé ukazatele, v absolutní nebo relativní podobě, vyjadřující individuální a společenské riziko. Každý však hodnotí z jiné perspektivy, což může vést k rozdílné interpretaci výsledku.

[8] např. *European Road Safety Observatory* (www.erso.eu), v ČR pak *Observatoř bezpečnosti silničního provozu* (www.czrso.cz)

3.3. PŘÍPRAVA PROMĚNNÝCH

Bylo uvedeno, jak se z dat vytvoří ukazatele; další krok spočívá v jejich využití ve formě proměnných. Pro následující analýzy, kdy budou vytvářeny statistické predikční (regresní) modely bude vhodné proměnné rozdělit následovně:

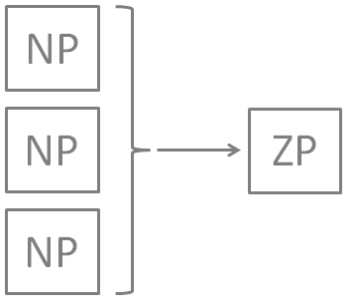
- závisle proměnná (neboli vysvětlovaná proměnná) na levé straně rovnice … nehodovost
- nezávisle proměnné (neboli vysvětlující proměnné) na pravé straně rovnice … rizikové faktory

Po uvedení konceptuálního rámce budou tyto dvě části popsány.

3.3.1. Konceptuální rámec

Základem statistického hodnocení nehodovosti, z perspektivy disertační práce, bude analýza závislostí. Nyní proto bude zaveden její konceptuální rámec.

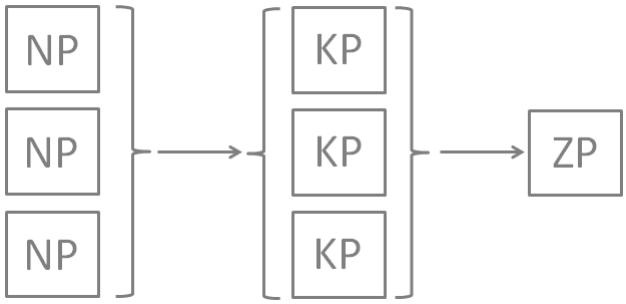
Cílem analýzy bude identifikace kritických vlivů a zjištění míry jejich působení na vznik dopravních nehod – tj. kvantifikace vlivu jednotlivých nehodových (rizikových) faktorů. Za tím účelem budou využity přístupy kvantitativního výzkumu. Ten se zabývá vztahy mezi proměnnými, jejichž hodnoty mohou být čísla nebo kategorie. *Závisle proměnná* bude nehodovost (četnost nehod na úseku). *Nezávisle proměnné* budou jednotlivé nehodové faktory. Obr. 10 schematicky znázorňuje obecný konceptuální rámec tohoto typu výzkumu: závisle proměnná (ZP) je ovlivňována několika nezávislými proměnnými (NP).



Obr. 10 Obecný konceptuální rámec (*Punch, 2008b*)

Teoreticky by nezávisle proměnné měly být *příčiny* a závisle proměnné by měly být jejich *důsledkem*. Toto však platí jen v případě čistě *experimentálního* výzkumu, kdy se pomocí manipulace s nezávislými proměnnými zjišťuje vliv na závisle proměnnou, přičemž tento vliv není zkreslen žádnou jinou proměnnou. Toho lze docílit v laboratorním výzkumu (v dopravním kontextu např. na řidičském simulátoru), obecně však v dopravě tento předpoklad neplatí. Je tedy vhodnější používat pojem *vlivy* nebo *faktory*.

Obecně platí, že vlivy (tj. nezávisle proměnné) by se měly volit na základě teorie (např. fyzikální) (*OECD, 1997*). V oblasti bezpečnosti dopravy však bohužel ustálené teorie chybí (*Elvik, 2004a*). Dále platí, že v dopravě nelze manipulovat s proměnnými, dopravní jevy lze proto zkoumat pouze neexperimentálně – pozorováním (observací), odtud pojem *observační* výzkum. Při tomto výzkumu se využívá přirozená variabilita nezávisle proměnných. Přitom však působí celá řada tzv. matoucích proměnných, jejichž vliv je nutno statisticky odstranit – tzv. kontrolovat a to tak, že se kontrolní proměnné zapojí do analýzy spolu s ostatními nezávisle proměnnými. Obr. 11 znázorňuje konceptuální rámec se zohledněním kontrolních proměnných (KP).



Obr. 11 Konceptuální rámec s kontrolními proměnnými (*Punch, 2008b*)

Obecný postup statistického hodnocení lze s využitím uvedeného konceptuálního rámce uvést následovně:

1) Volba závisle proměnné.
2) Volba nezávisle proměnné/proměnných (včetně kontrolních proměnných).
3) Provedení analýzy, ve které jsou zjištěny hodnoty nezávisle proměnných; kvantifikace vztahů mezi závislou proměnnou a nezávisle proměnnými.

3.3.2. Vysvětlovaná proměnná: nehodovost

Nehodovost je statistický jev, který má systematickou i náhodnou složku. Úkolem statistických modelů je popsat systematickou složku, ideálně při potlačení zkreslení způsobených vlivem náhodné složky.

Nehodová data mají několik důležitých statistických vlastností (*Hauer, 1997*; *Persaud, 2001*; *Reurings et al., 2005*).

- Jedná se o **statisticky vzácné jevy**. Na prvku (např. úseku nebo křižovatce) může být za rok zaznamenána např. jen 1 nehoda.
- Jsou to **diskrétní (nespojitá) data**: na prvku může být zaznamenáno 0, 1, 2… nehody ale nemůže být např. 0,3 nehody.
- Častým záznamem bývá nula (např. roční četnost nehod na mezikřižovatkových úsecích).
- Četnost nehod **nepodléhá normálnímu rozdělení pravděpodobnosti**. Místo toho se často aproximuje Poissonovým rozdělením – to však předpokládá, že průměr všech hodnot je roven jejich rozptylu. Pokud to neplatí (rozptyl je menší nebo větší než průměr), používá se negativně binomické rozdělení, jehož rozptyl je definován (*Reurings et al., 2005*):

  $$\mathrm{var}(Y) = \mu + k \cdot \mu^2 \qquad (7)$$

  tj. rozptyl (variance) $\mathrm{var}(Y)$ je roven průměru μ navýšenému o druhou část rovnice $k \cdot \mu^2$. Parametr k se nazývá *disperzní parametr* a jeho hodnota se získává v průběhu modelování. Lze jej mj. použít k hodnocení kvality modelu.

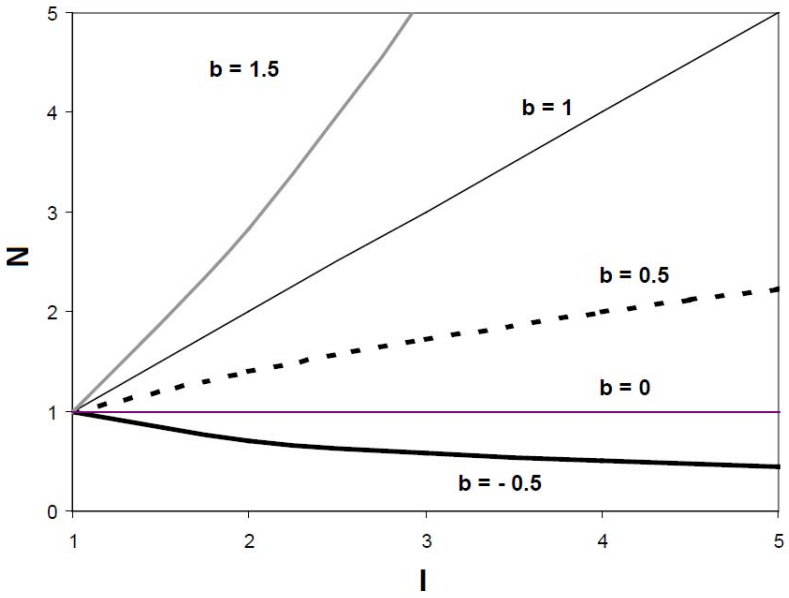
Nehodovost dále záleží na mnoha faktorech, jejichž působení (vlivy, závislosti) jsou většinou nelineární. Z toho mj. vyplývá, že **nelze použít nástroje klasické statistiky** jako je například korelace nebo regrese. Ty totiž pracují jen se spojitými daty (navíc normálně rozloženými) a předpokládají lineární závislosti.

Funkce bezpečnosti

Pro ilustraci lze uvést typický průběh **závislosti nehodovosti na intenzitě** na úseku. Závislost lze vyjádřit mocninnou funkcí

$$N = a \cdot I^b \qquad (8a)$$

kde N je četnost nehod (např. na 1 km délky úseku), I je intenzita, a a b jsou konstanty, které je potřeba určit. Z funkční formy vyplývá, že hodnoty N, I jsou vždy kladné; pro $I = 0$ je také $N = 0$. Exponent b udává tzv. elasticitu; vliv jeho hodnoty na četnost nehod N ilustruje Obr. 12.

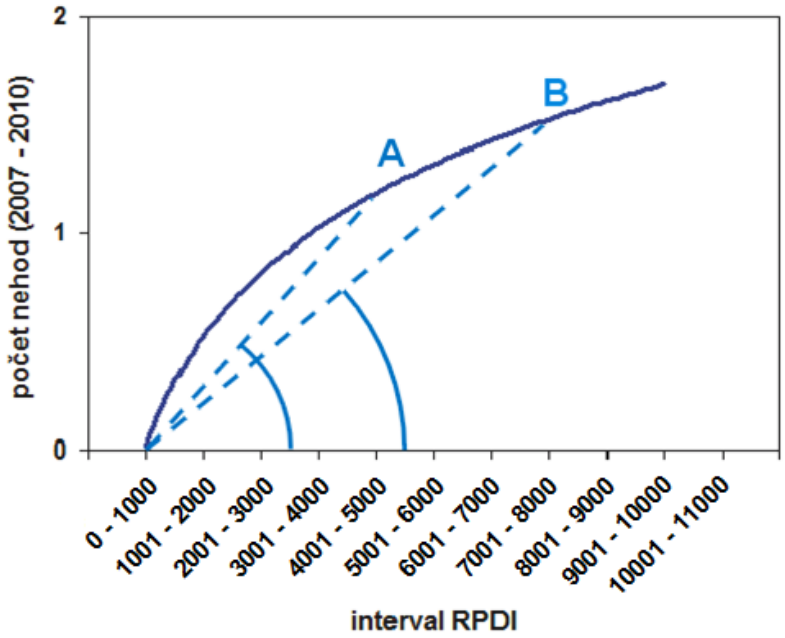


Obr. 12 Ilustrace elasticity četnosti nehod $N = I^b$ v závislosti na hodnotě b (*Turner & Wood, 2009*)

Pro křižovatky pak platí

$$N = a \cdot I_1^b \cdot I_2^c \qquad (8b)$$

kde I_1 a I_2 jsou intenzity kolizních proudů (na hlavní a vedlejší komunikaci), konstanty jsou a, b, c.



Obr. 13 Příklad funkce bezpečnosti (*Hauer, 1997*)

Příklad na Obr. 13 ukazuje křivku závislosti četnosti nehod na skupině úseků na intenzitě. Jedná se o tzv. **funkci bezpečnosti** – ta v každém svém bodě (pro každou hodnotu intenzity) ukazuje úroveň bezpečnosti (očekávaný počet nehod).

Funkce bezpečnosti, která obsahuje jedinou vysvětlující proměnnou (intenzitu) se nazývá jednoduchá; klasické vícerozměrné funkce bezpečnosti (modely) obsahují více proměnných (*Hauer, 1995*; *Persaud, 2001*).

Pro zajímavost lze srovnat hodnotu funkce bezpečnosti s tradičním ukazatelem relativní nehodovostí. Ta byla pro úsek definována vzorcem $R = \frac{N}{I \cdot L \cdot t}$; při zachování konstantní délky L a období t lze psát $R \propto \frac{N}{I}$ (úměra podílu nehodovosti a intenzity). Tento podíl je lineární funkce, znázorněná na Obr. 13 čárkovaně. Velikost relativní nehodovosti je pak dána strmostí (tangentou vyznačených úhlů).

Představme si úsek A s intenzitou 5000 voz/d; po nějakém čase, kdy jsou zachovány všechny podmínky, vzroste intenzita na 8000 voz/d (bod B). Protože směrnice B je menší než směrnice A, znamená to, že se snížila relativní nehodovost, úsek B je tedy nyní bezpečnější než původně. Je však možné, aby se zvýšila bezpečnost jen díky zvýšení intenzity?

Správná odpověď je, že takto lze situaci vnímat jen z pohledu řidiče (tj. jako individuální riziko), pro kterého se snížila pravděpodobnost nehody; avšak ne z pohledu nezávislého hodnotitele: ten nemůže tvrdit, že se bezpečnost komunikace zvýšila samovolně (bez jakéhokoli opatření) (*Hauer, 1997*).

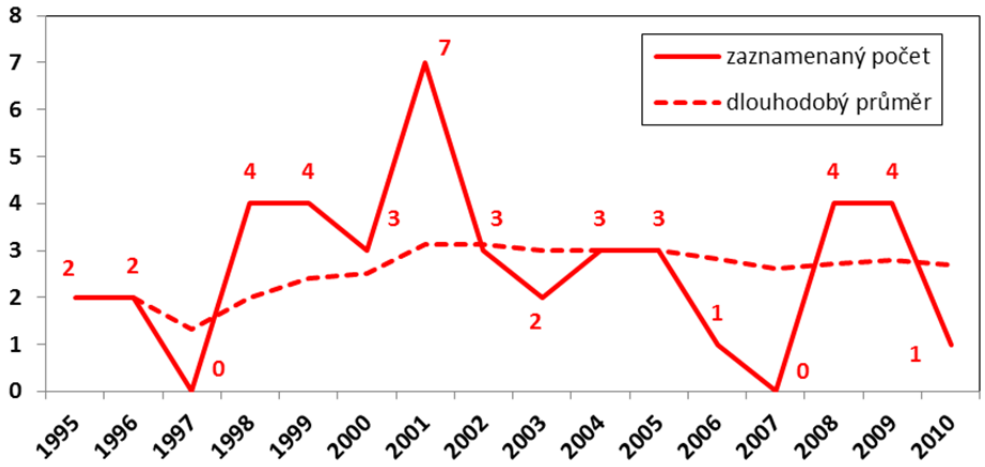
Z toho vyplývá, že relativní nehodovost lze využít pouze pro individuální hodnocení. Pro jiné účely není vhodná, protože vychází z chybného předpokladu o linearitě vztahu mezi nehodovostí a intenzitou. V tom případě je možné ji použít pro srovnávání jen při stejné hodnotě intenzity.

Obecné doporučení je, že hodnocení a srovnávání bezpečnosti by se nemělo provádět na základě relativní nehodovosti ale **na základě srovnání funkcí bezpečnosti.**

Regrese k průměru

V plošném měřítku platí, že dochází k velkému množství nehod. V malém měřítku se však často stává, že množství nehod je – ze statistického hlediska – nízké. Navíc zde dochází k tomu, že četnost nehod v čase přirozeně kolísá okolo dlouhodobého průměru (jehož hodnotu však neznáme). Tento dlouhodobý průměr představuje **očekávaný počet nehod** – slovo *očekávané* označuje rozdíl vůči *zaznamenaným*, které mohou být ovlivněny a zkresleny.

Očekávaný počet nehod lze tedy definovat jako průměrný počet, který se vyskytne v dlouhodobém horizontu při dané kombinaci expozice a rizika. Příklad je na Obr. 14, který zobrazuje vývoj počtu nehod se zraněním na konkrétní křižovatce v Brně v období 1995 – 2010. V tomto období nedošlo na křižovatce k žádným významným změnám; přesto je zřejmý výrazně proměnlivý průběh počtu nehod. Po každém výraznějším výkyvu následuje návrat k průměru (k očekávané hodnotě).



Obr. 14 Vývoj nehodovosti na reálné křižovatce (*Striegler et al., 2012*)

Změny v četnosti nehod by byly systematické, kdyby byly způsobené systémovou změnou, tj. změnou vlivu rizikových faktorů. Protože k žádné systematické změně nedošlo, jedná se o náhodné změny. Jev způsobující toto náhodné kolísání, se nazývá **regrese k průměru**. Právě proto může být vliv regrese k průměru závažný – projevuje se zejména ve dvou oblastech (*Hauer, 1997*):

- *komplikuje výběr kritických míst:* podmínkou výběru kritického místa je naplnění výběrového kritéria definovaného nejčastěji pouze počtem nehod za rok. Kvůli kolísání počtu nehod se však může stát, že kritérium bude v některých obdobích naplněno a v některých obdobích naopak nenaplněno. Křižovatka se přitom za celé sledované období nezměnila. Z tohoto důvodu je vliv regrese k průměru nutné zahrnovat do výpočtů používaných při identifikaci kritických míst.
- *zkresluje účinky opatření*: náhodný pokles, způsobený regresí k průměru, je chybně přičítán účinku opatření a jeho účinnost je tak přeceňována.
- Často dochází i ke kombinaci obou vlivů a to následovně: Opatření se přednostně aplikují na místech s vysokou nehodovostí, tj. například na základě výkyvu regresí k průměru k vyšší hodnotě. Předpokládejme, že je zájem o vyhodnocení účinnosti opatření aplikovaném na takovém místě. Například rok po aplikaci je tedy zjištěna četnost nehod a je zjištěno, že je oproti době před aplikací nižší. Z toho by mohlo vyplynout, že opatření je účinné. Tento účinek však může být pouze zdánlivý, protože mohlo dojít pouze k přirozenému výkyvu regresí zpět k nižším hodnotám. Četnost nehod by se tedy snížila i bez aplikace opatření.

Vliv regrese k průměru časem slábne, lze jej tedy omezit prodloužením délky období sledování. To však nemusí být praktické, protože – nemluvě o neefektivnosti délky takové analýzy – za tu dobu může dojít ke změnám kauzálních faktorů, což omezuje vypovídací schopnost celého sledování.

3.3.3. Vysvětlující proměnné: rizikové faktory

Studium rizikových faktorů je základem výzkumu bezpečnosti – jejich poznání je klíčové pro to, abychom byli schopni navrhnout nejvhodnější opatření, které omezí (nebo eliminuje) působení rizikového faktoru a tedy zvýší bezpečnost.

Rizikové faktory se nejčastěji rozdělují do tří skupin: účastníci provozu, dopravní prostředky, dopravní infrastruktura a její okolí (zkráceně řidič, vozidlo, prostředí). Dále lze rozlišit tři fáze nehodového děje: *před*, *při* a *po* nehodě. Sestava těchto 3 skupin faktorů a 3 fází se nazývá podle svého autora **Haddonova matice** a používá se k přehledu opatření (ve smyslu oblastí, kterým by se měla věnovat pozornost) vhodných pro uvedené kombinace (*Williams, 1999*).

Tab. 1 Haddonova matice s příklady příslušných oblastí

Faktory / Fáze	Řidič	Vozidlo	Prostředí
Před nehodou	kondice řidiče, jeho zkušenosti, informovanost	způsobilost k jízdě, funkce světel a brzd	vedení komunikace, nejvyšší dovolená rychlost jízdy
Při nehodě	použití zádržných systémů	kvalita zádržných systémů	pasivní bezpečnost objektů v okolí komunikace
Po nehodě	dostupnost první pomoci	možnost opuštění vozidla, riziko vznícení	únikové cesty, zajištění místa nehody, kongesce

Faktory mají v jednotlivých fázích následující vliv:

- před nehodou: určují pravděpodobnost výskytu nehody,
- při nehodě: určují pravděpodobnost výskytu zranění,
- po nehodě: určují rozsah následků.

V historii byly tyto faktory často zkoumány ve smyslu **příčin** – bylo zjišťováno, zda jsou nehody častěji způsobené chybou silnice, vozidla nebo řidiče. Tento přístup však není vhodný, protože nehoda není nikdy důsledkem jediné příčiny – spíše se jedná o souhru více **faktorů** (*CDV, 2011*).

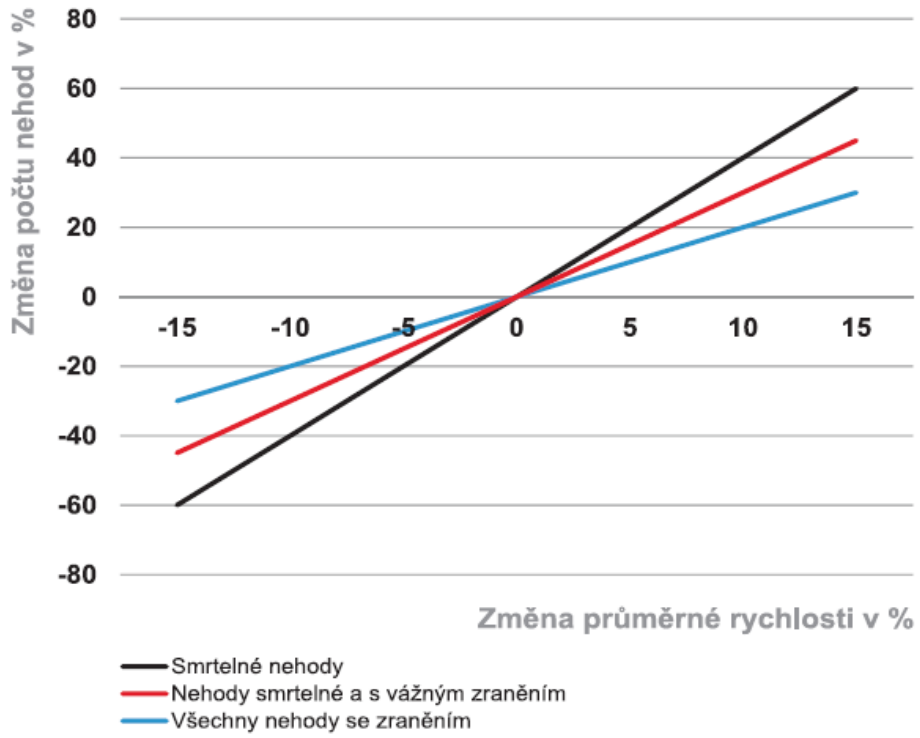
Dále bude uveden stručný přehled nejvýznačnějších rizikových faktorů a jejich vlivu na bezpečnost. Výčet se zaměřuje především na fyzickou stránku provozu (stavební a provozní záležitosti).

Intenzita dopravy

Už v předcházejícím textu byly zmíněny ukazatele relativní nehodovosti nebo relativní konfliktnosti – ty vychází z předpokladu, že bezpečnost závisí na hodnotě intenzity. Logickým východiskem je, že čím více je na křižovatce nebo úseku vozidel, tím mezi nimi vzniká více interakcí i potenciálních konfliktů a nehod.

Rychlost

Rychlost má v celé bezpečnosti výsadní postavení – je totiž jedním z nejzávažnějších rizikových faktorů. Je dlouhodobě známo, že s vyšší rychlostí jízdy roste závažnost potenciální kolize; s nárůstem rychlosti dále přímo roste i počet nehod – tento vztah byl ověřen ve větším měřítku u řady zemí, kde v historii docházelo ke změnám stanovené nejvyšší dovolené rychlosti jízdy (Obr. 15).



Obr. 15 Změna počtu nehod v závislosti na změně průměrné rychlosti (*CDV, 2011*)

Rychlost a její následky jsou u komunikací uvažovány při návrhu geometrického vedení jejich trasy. Tato problematika je velmi široká, dále bude jen stručně uvedeno několik příkladů vztahů mezi vedením trasy a rychlostí, potažmo nehodovostí (*PIARC, 2003*; *Gatti et al., 2007*; *Elvik et al., 2009*):

Vedení trasy

- Nehodovost je nejvyšší u malých **poloměrů směrových oblouků** (sjetí z vozovky). S rostoucím poloměrem však narůstá i rychlost. Nejkritičtější jsou náhlé změny – změny by měly být vždy plynulé, aby řidič měl čas přizpůsobit rychlost.
- Rostoucí **křivolakost** (součet úhlových změn trasy vztažený na délku) zvyšuje nehodovost, opět zejména v kombinaci s nepřiměřenou rychlostí. Důležitá je však kombinace s celkovým vedením (sled oblouků nemusí být tak nebezpečný jako jeden nečekaný oblouk po dlouhém přímém úseku).
- Se zvýšením **počtu sjezdů** taktéž roste nehodovost – v těchto místech totiž dochází k rozdílům rychlosti (mezi vjíždějícím vozidlem a projíždějícím proudem), dále například k manévrům při levém odbočení.

Šířkové uspořádání

- **Šířka pruhu** by měla být taková, aby umožňovala bezpečnou jízdu, ale naopak nepodporovala nadměrnou rychlost. Větší šířka může snížit počet nehod, ale zároveň může zvýšit jejich závažnost (při nebezpečném předjíždění).
- Ideální **krajnice** je zpevněná – umožní odstavení vozidla i případný úhybný manévr. Naopak ale může podporovat pocit komfortní šířky a rychlé jízdy.
- **Okolí komunikace** by ideálně mělo být bez pevných překážek a s takovým sklonem svahu, na kterém nedojde po opuštění vozovky k převrácení vozidla.

Mezi další rizikové faktory patří například:

- nedostatečné rozhledové poměry (v obloucích, na křižovatkách…)
- nevyhovující povrchové vlastnosti vozovky (mikro a makrotextura, protismykové vlastnosti)
- nesrozumitelné dopravní značení
- nejasná přednost v jízdě na křižovatkách

Potenciálních rizikových faktorů je velké množství. Ovšem zdaleka ne ke všem je jednoduché shromáždit dostatečná popisná data – ideálně v takové podobě, aby mohly být přiřazeny ke každé nehodě nebo místu nehody. Celá řada faktorů má navíc velmi dynamický charakter – např. osvětlení (a s ním související viditelnost) nebo počasí (potažmo např. vlhkost nebo námraza).

Jedním z nejvýznamnějších rizikových faktorů je i únava a nepozornost. Data, která by vystihovala tyto jevy, je však obtížné získat.

Tab. 2 shrnuje vliv vybraných rizikových faktorů na základě zahraniční literatury (*Babkov, 1975*; *McGee et al., 1995*; *Ogden, 1997*; *Stefan et al., 2011*). Je uveden směr závislosti – přímý (nárůst vlivu faktoru zvyšuje nehodovost) nebo nepřímý (nárůst vlivu faktoru snižuje nehodovost).

Tab. 2 Přehled vlivu vybraných rizikových faktorů na nehodovost (N)

	Rizikový faktor	**Směr závislosti**
Směrové vedení	poloměr oblouku	menší R, více N
	hustota oblouků	vyšší H, méně N
	změny křivolakosti	více změn, více N
	poměr poloměru k průměrnému	vyšší poměr, více N
Výškové vedení	podélný sklon > 6 %	větší sklon, více N
Viditelnost	osvětlení	výskyt snižuje N
	rozhledová vzdálenost	delší RZ, méně N
Příčný řez	šířka jízdního pruhu	větší Š, nižší N
	zpevněná krajnice	výskyt snižuje N
Okolí komunikace	zóna bez překážek	širší zóna, méně N
	ochranná zařízení	výskyt snižuje N
Povrch vozovky	protismykové vlastnosti	nižší kvalita, více N

Tabulka však podává pouze zjednodušený pohled. Platí totiž následující:

- Závislosti většinou nebývají lineární (*Hauer, 2004*).
- Faktory nepůsobí samostatně, ale společně.
- Vliv faktoru se může lišit podle typu nehody (např. nehody pouze jednoho vozidla vs nehody mezi vozidly) (*Martensen & Dupont, 2013*).
- Existují rozdíly mezi studiemi, ze kterých uvedená zjištění vycházejí. Lze se setkat i s protichůdnými tvrzeními (*Elvik et al., 2009*).
- Většina informací v tomto oboru pochází ze zahraničních studií; není zaručeno, že vliv faktorů je v českých podmínkách stejný.

3.3.4. Shrnutí

V této kapitole byl představen konceptuální rámec, potřebný k následujícím analýzám: budeme rozlišovat závisle proměnnou (neboli vysvětlovanou proměnnou), tj. nehodovost, a nezávisle proměnné (neboli vysvětlující proměnné), představované jednotlivými rizikovými faktory.

V té souvislosti byly představeny důležité statistické vlastnosti nehodových dat. Jedná se o statisticky vzácné náhodné jevy, diskrétní a s nenormálním pravděpodobnostním rozložením. Variace nehodovosti má systematickou a náhodnou složku. Systematické variace jsou způsobeny změnami *očekávaného* počtu nehod v čase, prostoru apod. Naopak náhodné variace jsou způsobeny kolísáním zaznamenaného počtu nehod kolem dlouhodobého průměru (regresí k průměru) a dalšími matoucími proměnnými.

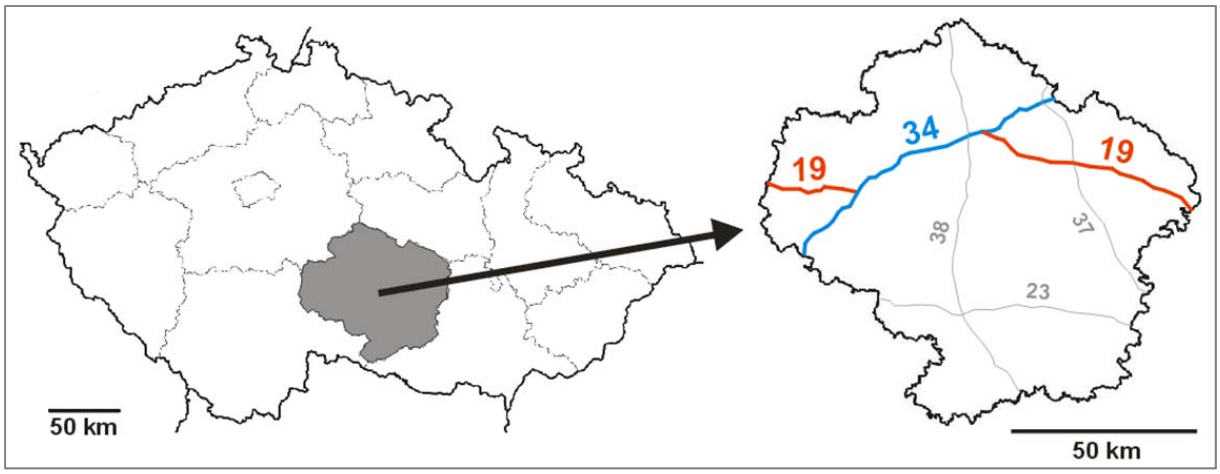
Dále byly uvedeny příklady potenciálních rizikových faktorů – je jich velké množství, avšak ne všechny lze prakticky kvantifikovat na úrovni všech studovaných jednotek (např. mezikřižovatkových úseků vybrané silniční sítě). Navíc platí, že faktory působí společně a ve formě nelineárních závislostí.

Statistické hodnocení bezpečnosti (zde ve formě nehodovosti) proto využívá modely (rovnice), které umožňují zohlednění vícerozměrných funkčních závislostí. Výstupem modelu je *očekávaný* počet nehod (dlouhodobý průměr) za působení daných hodnot rizikových faktorů.

3.4. APLIKACE

3.4.1. Výběrový soubor

Jak bylo stanoveno v úvodu, práce se zaměřuje na extravilánové mezikřižovatkové úseky silnic I. třídy. Byl zvolen kraj Vysočina, kterým prochází 5 silnic I. třídy. Pro účely práce byly vybrány silnice I/19 a I/34, které se vyznačují nejvyššími intenzitami dopravy, tudíž i rizikem. Obr. 16 znázorňuje lokalizaci výběrového souboru. Obě silnice mají částečný souběh (peáž), která je dále uvažována jako úsek silnice I/34.



Obr. 16 Lokalizace vybraných silnic I/19 a I/34

Silnice jsou zpevněné, dvoupruhové, směrově nedělené. Průměrná šířka je 7 m, průměrná intenzita (RPDI) je mezi 5000 a 10000 voz/d. Dvě ilustrativní fotografie jsou na Obr. 17.

Ze souboru byly vyloučeny úseky v intravilánu. Celková výsledná délka je přibližně 100 km.

Obr. 17 Ukázka úseků ve výběrovém souboru

3.4.2. Segmentace

Prvním krokem je definice prvků (jednotek analýzy) neboli rozdělení silniční sítě (segmentace). V literatuře existuje řada přístupů: např. pevná délka úseků (*Cenek et al., 1997*), volba délky v závislosti na konstantních hodnotách proměnných (*Cafiso et al., 2010*), agregace oblouků a přímých úseků (*Koorey, 2009*) nebo kombinací 2 oblouků a 2 úseků (*Cafiso & D'Agostino, 2013*). V této práci bylo využito rozdělení na přímé úseky a směrové oblouky.

Nejsou-li však k dispozici podkladová data o směrovém vedení trasy, jako v tomto případě, není geometrická segmentace jednoduchým úkolem. Existují různé postupy určení směrového vedení trasy z GPS dat projíždějících vozidel (*Ben-Arieh et al. 2004*; *Castro et al. 2006*; *Biagioni & Eriksson 2012*), avšak každá z nich má svá omezení, zejména přesnost a pouze částečnou možnost automatizace. Proto se často používá kombinace manuálního a automatického vyhodnocení (*Bogenreif et al. 2012*; *Findley et al. 2012*; *Rasdorf et al. 2012*).

K získání GPS dat na uvedeném souboru úseků bylo využito měřicí vozidlo CDV (VW Transporter T5). Z jeho senzorů byl využit gyroskop, GNSS snímač a odometr. Kombinace gyroskopu a GNSS modulu výrazně upřesňuje určování polohy a při nedostatečném počtu satelitů nedovoluje odchylku o více než 5 m. Ve spojení s diferenciální GPS anténou Dewetron lze následně určit GPS polohu s přesností na 2 m. GNSS snímač dále zajišťuje synchronizaci datových výstupů jednotlivých senzorů se synchronizačním impulsem o frekvenci 10 Hz.

Jednotku GPS lze použít i pro určení ujeté dráhy, ovšem pouze za předpokladu stabilního a silného signálu. S ohledem na tento možný zdroj chyb byl pro měření ujeté vzdálenosti použit odometr, napojený na sériovou datovou sběrnici vozidla (CAN). Informace o ujeté dráze jsou získávány z impulsů vysílaných řídicí jednotkou ABS do vozidlové řídicí jednotky (více viz *Ambros & Gogolín, 2014*).

Zájmové silnice byly projety v průběhu dvou pracovních dnů v listopadu 2013, v jednom směru, neovlivněnou rychlostí typického vozidla. Z frekvence záznamu dat z výše uvedených senzorů 10 Hz vyplývá při rychlosti 90 km/h ujetá vzdálenost 2,5 m.

Za účelem segmentace trasy na přímé úseky a oblouky byl vyvinut a aplikován následující postup (viz Obr. 18):

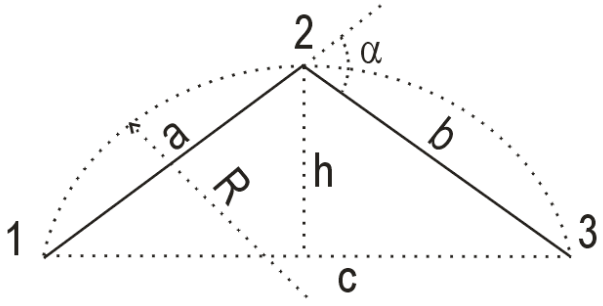
- Transformace GPS souřadnic datových bodů do rovinného souřadnicového systému JTSK.
- Výpočet vzdáleností a, b, c mezi trojicemi bodů (ze souřadnic, Pythagorovou větou).
- Určení úhlů α mezi trojicemi bodů a délek tětiv h (kosinovou větou).
- Výpočet poloměrů kruhových oblouků R pro trojice bodů podle vzorce[9] (9):

$$R = \frac{c^2 + 4h^2}{8h}$$

Výpočet křivolakosti K s využitím poloměrů R a délek L podle vzorce (10) (*Lamm et al., 2002*):

$$K_i = \frac{L_i}{R_i} \cdot \frac{200}{\pi} \cdot 10^3 \cong \frac{L_i}{R_i} \cdot 63700$$

Trojice bodů byla „plovoucí“, tj. první trojice byla tvořena body $\widehat{123}$, druhá trojice $\widehat{234}$ atd. S ohledem na podrobnost (cca 2,5 m mezi body) lze takto kruhovým obloukem aproximovat i přechodnice.



Obr. 18 Označení veličin použitých pro výpočet křivolakosti

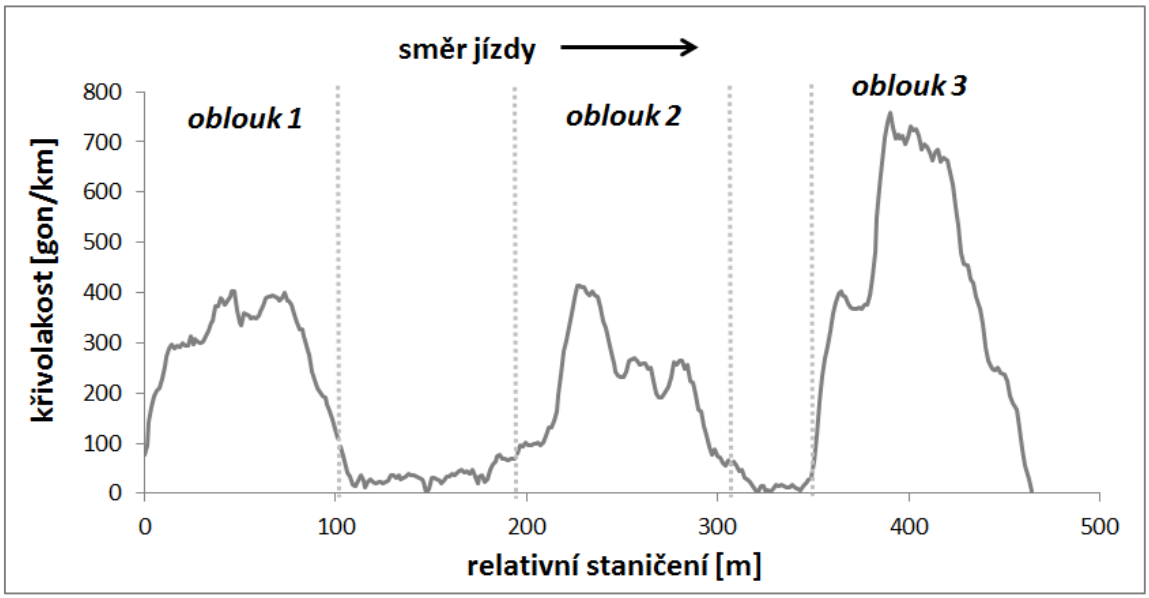
Dále byl stanoven práh křivolakosti, použitelný pro rozlišení přímého úseku a směrového oblouku. Na základě testů citlivosti byla tato hodnota stanovena na 80 gon/km.

[9] viz např. http://mathworld.wolfram.com/Circumradius.html

Výsledkem segmentace bylo 316 úseků – 158 přímých úseků a 158 směrových oblouků. Výsledky byly zobrazeny ve webovém prostředí, s využitím PHP, JavaScript a mapové služby MapQuest (viz Obr. 19 – přímé šedě, oblouky červeně).

Obr. 19 Ukázka výsledku segmentace na přímé úseky (bíle) a směrové oblouky (červeně)

Vzhledem k vysoké frekvenci záznamu a způsobu určení křivolakosti se hodnoty křivolakosti v průběhu úseků mění – viz Obr. 20. Pro další zpracování byla proto pro každý úsek určena jedna hodnota – 85. percentil. Tyto hodnoty budou dále označovány K.



Obr. 20 Ukázka průběhu hodnot křivolakosti na úseku z Obr. 19

3.4.3. Přiřazení dat

Byl popsán proces segmentace; během něj byla zároveň určena délka jednotlivých úseků (L) a jejich křivolakost (K). Návazně byla k úsekům přiřazena další data; v souladu s kap. 3.1 budou uvedena v rozdělení na nehodová, provozní a silniční data.

Nehodová data

V souladu s předešlými poznatky byla jako ukazatel zvolena absolutní nehodovost (četnost nehod na úseku). Bylo využito pětileté období (2009 – 2013) a všechny stupně závažnosti (nehody pouze s hmotnou škodou, nehody s lehkým/těžkým/smrtelným zraněním).

Ve studiích, souvisejících s nehodovostí a směrovým vedením, jsou někdy uvažovány rozlišné typy nehod (všechny nehody vs individuální nehody, tj. nehody s účastí pouze 1 vozidla). Pro ilustraci lze uvést několik příkladů:

- *Anderson et al. (1999)* použili všechny nehody, ale vyloučili např. srážky se zvěří.
- *Dietze & Weller (2011)* zkombinovali individuální nehody a nehody při předjíždění.
- *Turner et al. (2012)* studovali pouze nehody, kdy došlo ke ztrátě kontroly nad vozidlem nebo čelní srážce.

Ke každému úseku byly přiřazeny dvě hodnoty: počet individuálních nehod a počet všech nehod (dále označeno jako N_{ind} a $N_{vše}$). Výběrový soubor celkem zahrnuje 269 nehod (z toho 173 individuálních nehod).

Provozní data

Byla využita roční průměrná denní intenzita (označena jako I) z Celostátního sčítání dopravy 2010. Ke každému úseku byla přiřazena jedna hodnota.

Silniční data

Ze Silniční databanky ŘSD ČR byly získány údaje o šířce komunikace. Protože se často v rámci úseků měnily, byl vždy určen průměr a zařazen do následujících kategorií: do 7,5 m; 7,6 – 9,5 m; 9,6 – 11,5 m; 11,6 m a více.

Dále byl proveden výběr rizikových faktorů z Tab. 2. Výběr se soustředil na ty, jejichž hodnoty lze získat sběrem z mapových podkladů. Data byla doplněna prostřednictvím Google Maps (Street View), jednalo se o následující proměnné:

- *Vegetace podél komunikace:* kategorizována jako žádná/keře, jednotlivé stromy, stromořadí/les.
- *Vodorovné dopravní značení (VDZ)* (oddělení jízdních směrů): žádná/přerušovaná čára, plná čára.
- *Směrové sloupky:* ano/ne.
- *Svodidla:* ano/ne.
- *Podélný sklon:* ano/ne.

V následujících tabulkách jsou shrnuty popisné charakteristiky uvedených proměnných. Pro spojité proměnné (Tab. 3) je uvedeno minimum, maximum, průměr a směrodatná odchylka; pro kategorické proměnné (Tab. 4) jsou uvedeny absolutní a relativní četnosti jednotlivých kategorií; vždy samostatně pro směrové oblouky a přímé úseky.

Tab. 3 Popisné charakteristiky spojitých proměnných

		$N_{vše}$	N_{ind}	I [voz/d]	L [m]	K [gon/km]
Směrové oblouky	min.	0,00	0,00	1 122,00	21,00	19,75
	max.	7,00	4,00	12 096,00	2 403,00	984,77
	průměr	0,52	0,31	5 050,43	188,94	216,82
	směr. odch.	1,15	0,69	2 966,09	269,76	162,39
Přímé úseky	min.	0,00	0,00	1 122,00	30,00	17,77
	max.	17,00	10,00	12 096,00	2 924,00	177,01
	průměr	1,18	0,78	5 061,64	423,24	60,70
	směr. odch.	2,41	1,66	3 023,87	541,07	23,33

Tab. 4 Popisné charakteristiky kategorických proměnných

	Kategorie	**Směrové oblouky**		**Přímé úseky**	
		Četnost	%	Četnost	%
Šířka	1 ($\leq$ 7,5 m)	66	41,77	67	42,41
	2 (7,6 – 9,5 m)	19	12,03	20	12,66
	3 (9,6 – 11,5 m)	60	37,97	60	37,97
	4 ($\geq$ 11,6 m)	13	8,23	11	6,96
Vegetace	0 (žádná / keře)	25	15,82	27	17,09
	1 (stromy)	58	36,71	52	32,91
	2 (stromořadí / les)	75	47,47	79	50,00
VDZ	0 (žádná / přerušovaná čára)	77	48,73	44	27,85
	1 (plná čára)	81	51,27	114	72,15
Sloupky	0 (ne)	15	9,49	10	6,33
	1 (ano)	143	90,51	148	93,67
Svodidla	0 (ne)	116	73,42	116	73,42
	1 (ano)	42	26,58	42	26,58
Podélný sklon	0 (ne)	115	72,78	92	58,23
	1 (ano)	43	27,22	66	41,77

3.4.4. Závěr

Byl popsán sběr dat pro výběrový soubor cca 100 km extravilánových mezikřižovatkových úseků silnic I. třídy. Nejprve byla provedena segmentace, na základě vlastního postupu využívajícího data z měřicího vozidla (*Ambros & Valentová, v tisku*). K výsledným úsekům (přímým a obloukům) byla přiřazena nehodová data a rizikové faktory: expozice (délka a intenzita), dále parametry komunikace a okolí získané vlastním sběrem na základě Google Maps.

Jako ukazatele bezpečnosti budou dále využity četnosti nehod na úsecích; jako rizikové faktory budou použity proměnné vytvořené (kategorizované) ze zmíněných dat.

4. ČÁST B: PREDIKČNÍ MODEL

4.1. TEORIE

Modely (funkce bezpečnosti) jsou v podstatě regresní modely (rovnice). Modelování (proces tvorby a aplikace modelů) je obecně takový postup, kdy nahrazujeme zkoumaný systém jeho modelem a to proto, abychom pomocí pokusů s modelem získali takové informace, které vypovídají o původním zkoumaném systému (*Křivý & Kindler, 2001*). V principu je každý model zjednodušením původního systému, tj. v tomto případě skutečného dopravního provozu.

Před uvedením konkrétních modelů z oblasti nehodovosti budou popsány základy regresní analýzy.

4.1.1. Regresní analýza

Regresní analýza je označení statistických metod, pomocí nichž lze odhadovat hodnoty závisle proměnné na základě znalosti jiných veličin (nezávisle proměnných). Je-li závislost prokázána, lze pomocí nezávisle proměnné odhadovat (predikovat) hodnoty závisle proměnné. Důležité však je, že statistická závislost **nemusí znamenat příčinnost** (kauzalitu, tj. vztah mezi příčinou a následkem) (*Hebák et al., 2013*; *Hendl et al., 2014*).

V různých kontextech se používá rozdílné názvosloví pro proměnné:

- závisle proměnná (Y): regresand, predikant, cílová proměnná, vysvětlovaná proměnná
- nezávisle proměnná (X): regresor, prediktor, predikční proměnná, kovariáta, vysvětlující proměnná

Podstatou řešení regresní analýzy je (*Meloun & Militký, 2004*):

1) stanovení nejvhodnějšího tvaru regresního modelu (rovnice)
2) stanovení konkrétních hodnot regresních parametrů (konstanty a koeficientů)
3) stanovení statistické významnosti modelu (tj. zda model podstatným způsobem přispěje ke zpřesnění odhadu závisle proměnné oproti výchozímu (nulovému) modelu)
4) interpretace výsledků daných modelem

Regresní analýza je velmi rozšířenou technikou statistické analýzy dat. Její standardní variantu (lineární regresi) však lze aplikovat pouze na spojité proměnné, které (resp. jejichž rezidua) mají normální rozdělení. V ostatních případech lze použít tzv. zobecněnou lineární regresi (zobecněný lineární model, *generalized linear model*, GLM). Ten umožňuje modelovat závislost vysvětlované proměnné (kvantitativní nebo kvalitativní) na jednom nebo více prediktorech (opět kvantitativních nebo kvalitativních). Důležitou předností GLM je, že umožňuje modelovat proměnné i s jinými pravděpodobnostními rozděleními, než je normální rozdělení použité v klasickém modelu regrese.

Předpokládá se, že systematická složka μ je prostřednictvím tzv. *spojovací funkce* (*link*) spojena s lineárním prediktorem η, což je lineární funkce parametrů modelu (systematická složka je funkcí lineárního prediktoru). V modelu se volí spojovací funkci g, vysvětlující proměnné X a na základě předpokladu o rozdělení vysvětlované proměnné Y se hledají takové koeficienty lineárního prediktoru, aby model co nejlépe vystihoval výsledky měření. Například pro četnostní data (tj. diskrétní nezáporné hodnoty, což je i případ nehodovosti) se volí spojovací funkce $g(\mu) = \ln(\eta)$. Pro inverzní funkci pak platí $\mu = g^{-1}(\eta) = e^{\eta}$ (*Anderson et al., 2008*).

Modelování se podle obecného postupu regrese provádí v následujících bodech:

1) stanovení nejvhodnějšího tvaru regresního modelu
Výchozí (nulový) model má tvar $Y = a$. V dalším kroku je vložena proměnná X, model má tvar $Y = a \cdot X^b$ (a je konstanta, b je koeficient). Model se vytváří krokově (*stepwise*) a to buď dopřednou selekcí (přidáváním proměnných, *forward stepwise*) nebo zpětnou eliminací (odebíráním proměnných, *backward stepwise*).

2) stanovení konkrétních hodnot parametrů
Zatímco u klasické lineární regrese se hodnoty parametrů určují nejčastěji metodou nejmenších čtverců (MNČ), u GLM se nejčastěji používá metoda maximální věrohodnosti.

3) stanovení statistické významnosti modelu
Kritérium R^2 z klasické lineární regrese nelze u GLM použít. Lze využít tzv. informační kritéria, nejčastěji Akaikeho informační kritérium (AIC):

$$AIC = 2 \cdot k - 2 \cdot LL \qquad (11)$$

kde k je počet odhadovaných parametrů, LL je maximalizovaná věrohodnostní funkce (*log-likelihood*).

4) interpretace výsledků daných modelem
K hodnocení kvality modelu lze využít tzv. *věrohodnostní funkce* (*likelihood*). Pro nulový model je věrohodnost minimální; pro další modely se hodnotí dvojnásobek rozdílu mezi jejich věrohodnostními funkcemi neboli *deviance*. Cílem je nalézt model, který zmenšuje celkovou devianci – ta je úměrná rozdílu logaritmů věrohodnostních funkcí (*log-likelihood*, LL) mezi úplným modelem a nulovým modelem).

Jak bylo uvedeno výše, model lze vytvářet dopřednou selekcí nebo zpětnou eliminací; oba způsoby by měly ideálně vést ke stejnému výsledku. Výběr proměnných se může řídit dosaženou hladinou významnosti (signifikancí) – čím nižší, tím lepší (*De Ceunynck et al., 2012*).

4.1.2. Aplikace v kontextu nehodovosti

V kontextu nehodovosti se používají vícerozměrné regresní modely. Proces tvorby modelu má několik kroků. Prvním z nich je výběr modelového území a shromáždění dostupných dat. Vysvětlovanou proměnnou je nehodovost (např. ve formě roční četnosti nehod). Volba rizikových faktorů, tj. potenciálních vysvětlujících proměnných, se většinou řídí dostupností dat; nejčastěji se jedná o následující proměnné (*Reurings et al., 2005*):

- indikátor expozice (u úseků délka a intenzita)
- popis dopravní funkce komunikace (dálnice, hlavní/sběrná/obslužná/ komunikace)
- popis šířkového uspořádání komunikace (počet pruhů, šířka pruhu, šířka krajnice, přítomnost středního dělícího pásu, šířka středního dělícího pásu ad.)
- popis řízení dopravy (rychlostní limit, způsob řízení dopravy na křižovatce ad.)

Obecně platí, že s vyšším počtem proměnných se zvyšuje kvalita proložení. Naopak ale platí, že čím méně proměnných model obsahuje, tím je lépe interpretovatelný. Výsledek by měl být kompromisem mezi počtem vysvětlujících proměnných a přiměřenou shodou modelu s daty. Zároveň

však může dojít k tomu, že použité faktory se mohou lišit od skutečných příčin. Aby byly tyto rozdíly zřejmé, používá se někdy dělení na kauzální a predikční modely (*Persaud, 2001*):

- *Kauzální model* je tvořen funkcí bezpečnosti, jejíž vysvětlující proměnné představují skutečné příčiny nehod.
- *Predikční model* je tvořen funkcí bezpečnosti, jejíž vysvětlující proměnné jsou tvořeny jakýmikoli daty, která představují potenciální rizikové faktory.

Z dostupnosti dat vyplývá, že většina modelů je druhého typu. Z toho však vyplývá, že z nich nelze jednoduše usuzovat na příčiny nehod, případně odvozovat velikost změn nehodovosti změnou hodnot proměnných v modelu.

Slovo *predikční* naznačuje, že rovnici by mělo být možno použít k předpovědi (*predikci*) hodnoty bezpečnosti a to dosazením za konkrétní hodnoty vysvětlujících proměnných. To je však diskutabilní z několika důvodů (*Reurings et al., 2005*):

- V principu je každý model platný pouze v rozsahu dat, využitých k jeho tvorbě, tj. v daném časovém a prostorovém rozmezí.
- Model tedy „pouze“ vysvětluje historická data. Jakákoli další extrapolace nemusí být úspěšná, protože podmínky se mohou v čase a prostoru měnit.
- I z těchto důvodů se někdy používá konzervativnější pojem *vysvětlující model*. Nicméně pojem *predikční model* je již celosvětově natolik rozšířen, že se používá téměř výhradně. My budeme v zájmu stručnosti používat termín „model“ a proces jeho tvorby „modelování.“

Pro tvorbu modelu je vhodné mít všechny proměnné uspořádané ve formě databáze, která spojuje více zdrojů dat: každý prvek (např. mezikřižovatkový úsek) má k sobě přiřazeny hodnoty rizikových faktorů, které na něm působí a počet nehod, ke kterým na prvku došlo. Jedná se tedy o relační databázi, která spojuje databáze prvků, nehod a faktorů; ve spojení s geografickou polohou (v geografickém informačním systému) se jedná o geodatabázi.

Modelování probíhá podle uvedeného obecného postupu GLM. Pro nehodovost na úsecích se používá funkční tvar

$$\widehat{N} = a \cdot I^b \cdot L^c \cdot e^{\sum(d \cdot x)} \qquad (12)$$

tzn. je modelován vliv intenzity dopravy I, délky úseku L a dalších proměnných x; a je regresní konstanta; b, c, d jsou regresní koeficienty; e je základ přirozených logaritmů. Jako $\widehat{N}$ je označena očekávaná (predikovaná, modelovaná) nehodovost, pro odlišení od vstupních hodnot N.

První část modelu (mocninná) vyjadřuje expozici, danou intenzitou dopravy a délkou úseku. Druhá část modelu (exponenciální) vyjadřuje vliv rizikových faktorů, působících při dané expozici (*Elvik, 2004b*).

Jako spojovací funkce zobecněného lineárního modelu se volí logaritmus. Jedná se o tzv. log-lineární multiplikativní model. Model odhaduje logaritmy hodnot $\ln(N)$; hodnoty se získají prostřednictvím inverzní funkce $e^{\ln(N)}$ (*OECD, 1997*). Výše uvedený model se proto převádí na logaritmizovaný tvar

$$\ln(\widehat{N}) = \ln(a) + b \cdot \ln(I) + c \cdot \ln(L) + \sum(d \cdot x) \qquad (13)$$

Výstupem modelování je odhad velikosti regresní konstanty a a regresních koeficientů b, c, d. K tomu lze využít statistické programy, např. SPSS (proceduru *GENLIN*), SAS (proceduru *GENMOD*) nebo R (proceduru *glm*).

Výsledný model je ten, který nejlépe vystihuje vstupní nehodovost. Přitom by měl obsahovat takové proměnné, jejichž vliv lze interpretovat v souladu se známými teoretickými poznatky; **ideální model je stručný ale logicky výstižný** (tzv. princip parsimonie).

Existuje řada způsobů, jak ověřit vhodnost modelu, příp. srovnávat jeho varianty, např.:

- Kontrolou rozložení reziduí modelu: rozložení reziduí by mělo být náhodné, s průměrem kolem nuly a hodnotami nepřesahujícími meze dané konfidenčním intervalem (volí se v rozmezí dvojnásobku směrodatné odchylky $\pm 2\sigma$ (postup viz *Hauer & Bamfo, 1997*; *Hauer, 2015*).
- Srovnáním hodnoty disperzního parametru (*Persaud, 2001*; *Reurings et al., 2005*): Disperzní parametr se určuje v průběhu modelování. Na závěr jej lze srovnat s hodnotou z původních nehodových dat. Disperzní parametr modelu by měl být nižší než u původních dat.
- Srovnáním informačního kritéria: Každý model má jistou hodnotu informačního kritéria, často se používá např. Akaikeho informační kritérium (AIC). Při srovnávání modelů a hodnocení jejich kvality se preferuje model s nižší hodnotou AIC. Protože rovnice zohledňuje počet parametrů, je zřejmé, že AIC penalizuje modely s velkým množstvím proměnných – hledá kompromis mezi kvalitou proložení a jednoduchostí modelu.

4.1.3. Aplikace modelu

Jak bylo uvedeno, funkce bezpečnosti (tj. model) je hlavním nástrojem systémového hodnocení (a řízení) bezpečnosti – má totiž celou řadu vhodných uplatnění, které stručně s příklady uvedeme: (*Persaud, 2001*; *AASHTO, 2010*)

Využití ke srovnávání bezpečnosti

Máme za úkol srovnat vhodnost dvou typů křižovatek (z hlediska bezpečnosti) ve vybraném městě, řekněme okružních a průsečných. Shromáždíme tedy data ke všem těmto křižovatkám ve městě a vytvoříme model pro okružní křižovatky a model pro průsečné křižovatky (*Ambros & Slabý, 2013*).

Dosazováním konkrétních hodnot do těchto modelů získáme dvojí hodnoty očekávaného počtu nehod. Rozdíly těchto hodnot lze považovat za rozdíly bezpečnosti – z jejich velikosti a znaménka lze usuzovat, který typ křižovatek je bezpečnější a o kolik.

Využití k hodnocení účinnosti opatření

Existují dva přístupy: předběžné a následné hodnocení (*before-after study*) nebo průřezové hodnocení (*cross-section study*). Jejich rozdíl vysvětlíme na příkladu, kdy chceme určit účinnost speciálního typu přechodu.

- *Předběžné a následné:* srovnání hodnocení nehodovosti na skupině přechodů před úpravou a následně po úpravě (změně přechodu na speciální typ). Zjištěný rozdíl – po eliminaci vlivu matoucích proměnných – je považován za vliv opatření (časovou změnu).

- *Průřezové:* srovnání hodnocení speciálních přechodů (po úpravě) se srovnávací skupinou co nejpodobnějších přechodů, ale bez speciální úpravy. Zjištěný rozdíl je opět považován za vliv opatření (konstrukční změnu).

Zatímco tedy způsob (a) srovnává ty stejné přechody (před a po úpravě), způsob (b) srovnává různé přechody (s úpravou a bez úpravy). Aplikace způsobu (b) může být rychlejší, protože se nemusí čekat na provedení úpravy. Má však tu nevýhodu, že srovnávací skupina se může lišit v některém faktoru, jehož vliv nebude uvažován. Obecně se proto více doporučuje způsob (a).

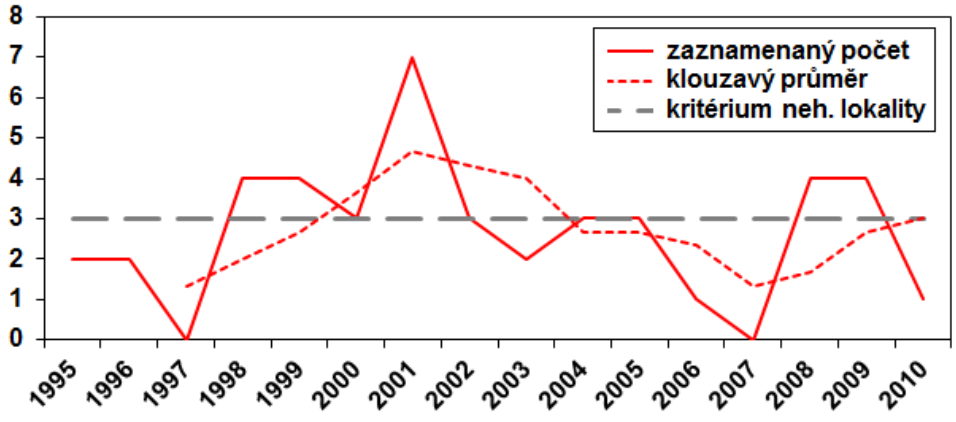
Změna nehodovosti se vždy posuzuje na tzv. cílové skupině nehod. Ta představuje ty nehody, které mají být opatřením ovlivněny. Cílová skupina se může lišit podle typu hodnoceného opatření a její určení nemusí být vždy zcela jednoznačné. Například k hodnocení účinnosti osvětlení tvoří cílovou skupinu nehody v noci; u hodnocení nového typu krajnice pak nehody, kdy vozidlo sjelo z vozovky.

Kvalifikované hodnocení účinnosti opatření je v ČR téměř neznámé. Časté aplikace, kdy jsou srovnávány hodnoty zaznamenané nehodovosti před úpravou a po úpravě, nejsou spolehlivé, protože jsou zatíženy vlivem regrese k průměru. Příkladem předběžného a následného hodnocení efektu přestavby průsečných křižovatek na okružní s využitím statistických modelů je studie *Ambros & Janoška (2015)*.

Využití k identifikaci nehodových lokalit

Nehodové lokality (nebo „místa častých dopravních nehod“) jsou místa, kde dochází ke zvýšenému výskytu nehod. Jejich identifikace, evidence a analýza je jednou z tradičních úloh řízení bezpečnosti.

Dosavadní metody však vždy vycházely ze zaznamenaných nehod. Přitom již dříve bylo zmíněno, že zaznamenané počty nehod mohou být zavádějící kvůli vlivu regrese k průměru. To lze ilustrovat na typickém výběrovém kritériu nehodové lokality 3 nehod se zraněním za rok. Použijeme opět data z konkrétní křižovatky, která je označována za jednu z nejvíce nehodových v Brně – viz Obr. 21. V grafu je kromě roční četnosti (červeně plnou čarou) zobrazen tříletý klouzavý průměr (červeně čárkovaně), černou plnou čarou pak hodnota výběrového kritéria. Je však zřejmé, že v některých obdobích bylo kritérium naplněno (čárkovaná čára je nad kritériem – křižovatka tedy byla nehodovou lokalitou) a v některých obdobích naopak nenaplněno (čárkovaná čára je pod kritériem – křižovatka nebyla nehodovou lokalitou). Křižovatka se přitom za celé sledované období nezměnila.



Obr. 21 Ukázka aplikace kritéria nehodové lokality na reálné křižovatce (*Striegler et al., 2012*)

Z tohoto vyplývá, že identifikace nehodových lokalit na základě zaznamenané nehodovosti (tj. ovlivněné regresí k průměru) může být zavádějící. Měly by se proto používat očekávané počty nehod (zohledňující regresi k průměru). Očekávaná nehodovost, určená funkcí bezpečnosti, však představuje průměrné hodnoty pro použité kombinace vysvětlujících proměnných. Očekávaná nehodovost na konkrétním místě se tedy může od průměru lišit. Za účelem zpřesnění očekávané hodnoty, získané modelem, se proto používá tzv. empirická bayesovská metoda (EB) (*Hauer et al., 2002*). Takto zpřesněný výsledek budeme zkráceně nazývat **EB odhad**.

EB odhad vychází z informací ze dvou zdrojů: (1) počtu nehod na sledovaném místě a (2) počtu nehod na srovnatelných místech, určeného pomocí modelu. Píšeme, že očekávaná hodnota E (tj. $\widehat{N}$) při zaznamenaném počtu nehod K (zapsáno jako $E|K$) je:

$$E|K = w \cdot E + (1 - w) \cdot K \qquad (14)$$

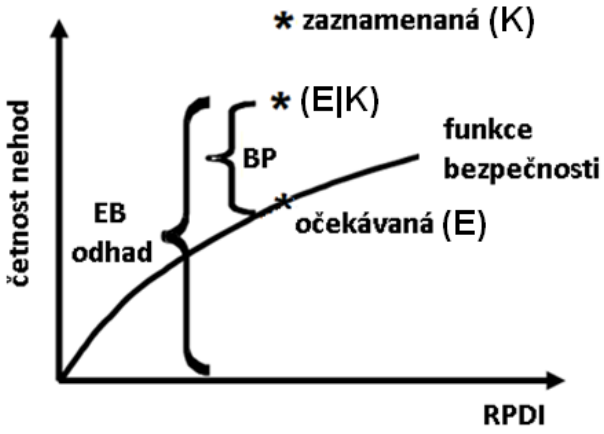
kde w je váha definovaná jako

$$w = \frac{1}{1+{}^{E}/_{\varphi}} \qquad (15)$$

kde φ je hodnota disperzního parametru funkce bezpečnosti, který se určuje při modelování. Ze vzorce (14) vyplývá, že EB odhad konkrétního místa leží vždy mezi hodnotami očekávaného počtu nehod na podobných místech (E) a počtem zaznamenaných nehod na tomto konkrétním místě (K). Hodnota váhy rozhoduje o tom, ke které hodnotě se EB odhad více přiblíží.

Výsledkem identifikace nehodových lokalit by měl být seznam míst seřazený podle nějakého kritéria závažnosti – správce komunikací tak dostane informaci, na kterých místech je situace „nejakutnější“ a měla by se tudíž řešit nejdříve. K seřazení lze použít přímo hodnoty EB odhadu, příp. tzv. **bezpečnostní potenciál** (BP). Ten je definován jako rozdíl mezi EB odhadem a očekávanou hodnotou – schématicky viz Obr. 22.

$$BP = E|K - E \qquad (16)$$



Obr. 22 Ilustrace definice bezpečnostního potenciálu (BP) (*AASHTO, 2010*)

Tento postup identifikace byl v ČR poprvé aplikován ve výzkumném projektu IDEKO[10] – byl popsán v metodice (*Striegler et al., 2012*) a byly demonstrovány jeho výhody oproti tradičnímu přístupu (*Valentová et al., 2013, 2014*), následně byl aplikován pro potřeby ŘSD ČR (*Pokorný & Ambros, 2014*).

4.1.4. Shrnutí

Byl uveden postup tvorby modelu, jakožto aplikace vícerozměrné regrese v kontextu nehodovosti. Výsledný model slouží k odhadu očekávaného počtu nehod; ten není (na rozdíl od zaznamenaného počtu nehod) ovlivněn náhodnými variacemi (regresí k průměru) a má proto různé aplikace:

- srovnávání bezpečnosti
- hodnocení účinnosti opatření
- identifikace nehodových lokalit (s využitím empirické bayesovské metody)

4.2. APLIKACE

Shromážděná data (kap. 3.4) byla využita ke tvorbě statistického modelu nehodovosti. Byly aplikovány kroky modelování, uvedené v kap. 4.1, které budou dále popsány.

4.2.1. Volba funkčního tvaru proměnných

V souladu s literaturou (kap. 4.1.2) byl uvažován multiplikativní model, s expozicí (délkou a intenzitou) v mocninné formě, a ostatními vysvětlujícími proměnnými ve formě exponenciální funkce ty zahrnují křivolakost, vegetaci, VDZ, směrové sloupky, svodidla, podélný sklon.

4.2.2. Postupný vývoj modelu

K modelování byl využit statistický program IBM SPSS 20. Přidávání proměnných a jejich vliv na kvalitu modelu bylo kontrolováno prostřednictvím tří ukazatelů:

- Akaikeho informační kritérium (AIC), které udává relativní kvalitu modelu (vzorec 11).
- Disperzní parametr modelu (viz vzorec 7), který by se měl zkvalitňováním modelu zmenšovat.
- Podíl systematické variability původních dat, která je vysvětlena prostřednictvím modelu ($\%SV$) – preferovány jsou vyšší hodnoty. Tento ukazatel je také někdy nazýván Elvikův index; lze jej určit prostřednictvím disperzních parametrů původních dat a modelu (*Fridstrøm et al., 1995*; *Elvik et al., 2013*).

$$\%SV = 100\% - \frac{disperzní\ parametr_{model}}{disperzní\ parametr_{data}} \qquad (17)$$

Modely se vytváří krokově (*stepwise*) a to buď dopřednou selekcí (přidáváním proměnných, *forward stepwise*) nebo zpětnou eliminací (odebíráním proměnných, *backward stepwise*). Zde byla použita zpětná eliminace.

Volba ponechání proměnné v modelu se řídí dosaženou statistickou významností (signifikancí) – většinou je požadována hranice 5 % nebo 10 %.

Vysvětlovaná proměnná je nehodovost ($N_{vše}$ nebo N_{ind}). Jako vysvětlujících proměnných bylo využito všech 9 proměnných, představených v kap. 3.4.3.

[10] http://ideko.cdv.cz/

Při postupném odebírání statisticky nevýznamných proměnných však v modelu zůstaly jen základní expoziční proměnné délka a intenzita.

Použitý program IBM SPSS nemá českou lokalizaci; u popisků jeho následujících výstupů se tedy jedná o vlastní překlad. Pro příklad interpretace tabulky jsou její části očíslovány:

- část 1 – jednotlivé parametry (konstanta a proměnné), dále disperzní parametr
- část 2 – regresní koeficienty β jednotlivých proměnných
- část 3 – střední chyba odhadu regresních koeficientů
- část 4 – dolní a horní mez 95% intervalu spolehlivosti hodnot regresních koeficientů
- část 5 – výsledky testu hypotézy, že statistický vliv proměnné není náhodný (hodnoty v tabulce jsou všechny < 0,001, tj. pravděpodobnost chyby I. řádu je menší než 1 %)

Tab. 5 Parametry modelu nehodovosti (pro všechny nehody) s proměnnými I, L

1	2	3	4		5		
Parametr modelu $N_{vše}$	**Regresní koeficient**	**Střední chyba**	**95% interval spolehlivosti**		**Test významnosti**		
			Dolní mez	Horní mez	Testové kritérium	Stupně volnosti	Dosažená významnost
(konst.)	-6,280	1,216	-8,664	-3,896	26,661	1	0,000
$\ln(I)$	0,854	0,143	0,573	1,135	35,556	1	0,000
$\ln(L)$	0,915	0,073	0,773	1,057	158,780	1	0,000
(disp. parametr)	0,423	0,149	0,213	0,842			

Tab. 6 Parametry modelu nehodovosti (pro individuální nehody) s proměnnými I, L

Parametr modelu N_{ind}	**Regresní koeficient**	**Střední chyba**	**95% interval spolehlivosti**		**Test významnosti**		
			Dolní mez	Horní mez	Testové kritérium	Stupně volnosti	Dosažená významnost
(konst.)	-6,637	1,334	-9,252	-4,023	24,762	1	0,000
$\ln(I)$	0,848	0,156	0,543	1,154	29,581	1	0,000
$\ln(L)$	0,957	0,080	0,799	1,114	141,821	1	0,000
(disp. parametr)	0,257	0,138	0,090	0,734			

Výsledné modely (rovnice) lze napsat následovně:

$$\widehat{N}_{vše} = e^{-6,280} \cdot I^{0,854} \cdot L^{0,915} \qquad (18a)$$

$$\widehat{N}_{ind} = e^{-6,637} \cdot I^{0,848} \cdot L^{0,957} \qquad (18b)$$

4.2.3. Ohodnocení modelů

V Tab. 7 je uveden vývoj jednotlivých ukazatelů pro obě varianty modelů (pro všechny nehody nebo pouze individuální nehody). Na prvním řádku je tzv. nulový model (obsahující pouze regresní konstantu, tj. průměrnou nehodovost), dále model s intenzitou, nakonec model s intenzitou a délkou.

Podle očekávání se model zlepšuje: hodnota AIC a disperzního parametru postupně klesá, $\%SV$ roste. V posledním sloupci jsou uvedeny přírůstky. Zatímco přidání intenzity zvýšilo $\%SV$ o méně než 10 %, přidání délky zvýšilo $\%SV$ o téměř 50 % a více. Oba výsledné modely vysvětlují cca 90 % systematické variability původních dat.

Tab. 7 Srovnání kvality modelů nehodovosti (pro všechny nehody / pro individuální nehody)

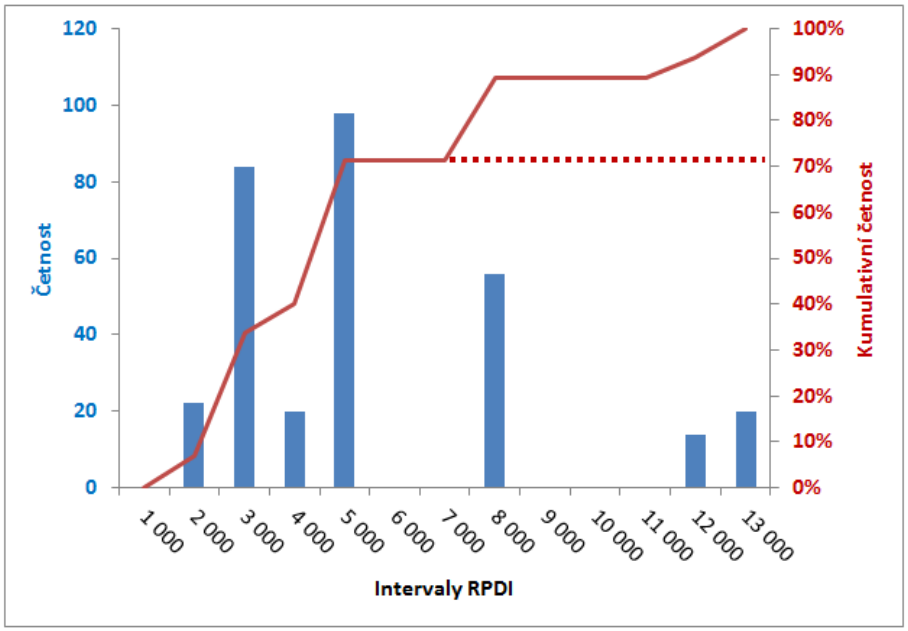
	$N_{vše}$				N_{ind}			
	AIC	**disperzní parametr**	$\%SV$	$\Delta\%SV$	**AIC**	**disperzní parametr**	$\%SV$	$\Delta\%SV$
konst.	754,035	2,596	33,00		601,974	2,447	24,67	
konst., I	742,815	2,305	40,51	7,51	592,207	2,130	34,43	9,76
konst., I, L	623,263	0,440	88,64	48,13	480,682	0,281	**91,35**	**56,92**

Z tabulky zároveň vyplývá, že model vycházející pouze z individuálních nehod se jeví jako kvalitnější, a to z pohledu všech tří použitých ukazatelů. **V dalším textu budou proto používány pouze individuální nehody.**

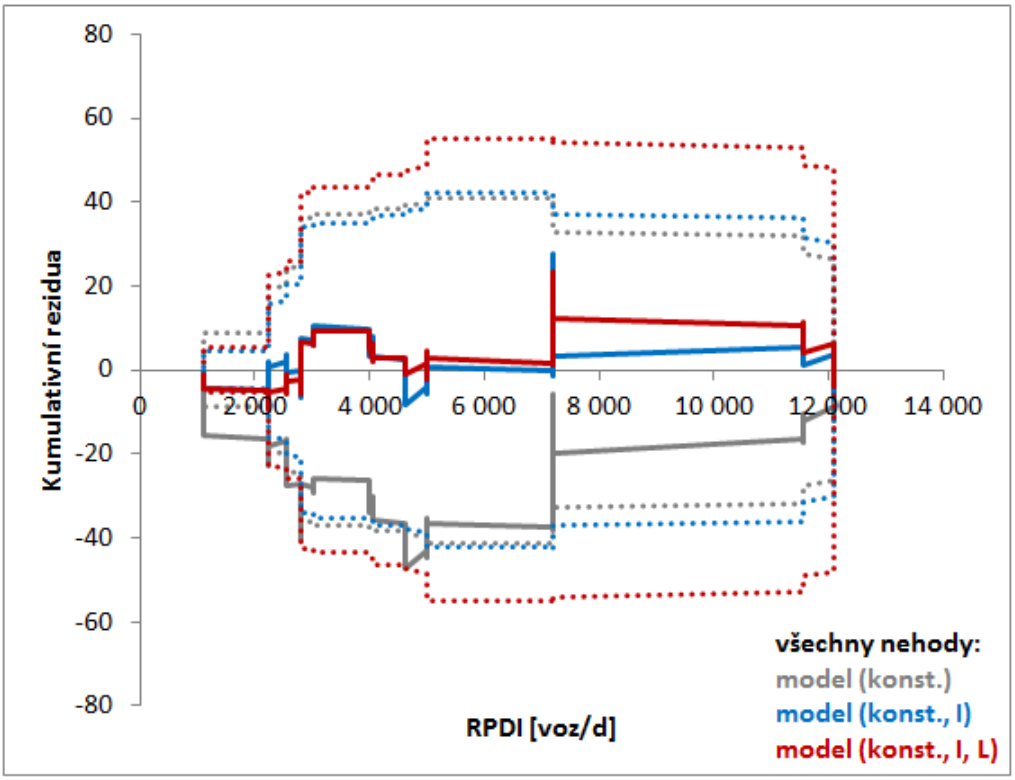
Kvalita tří modelů nehod byla posouzena i prostřednictvím tzv. kumulativních reziduí. Pro možnost srovnání ukazuje graf na Obr. 23 průběh reziduí pro všechny 3 varianty modelu. Ideální rozložení reziduí je náhodné kolem nuly, s hodnotami nepřesahujícími meze dané konfidenčním intervalem $\pm 2\sigma$ (meze jsou vyznačeny tečkovaně).

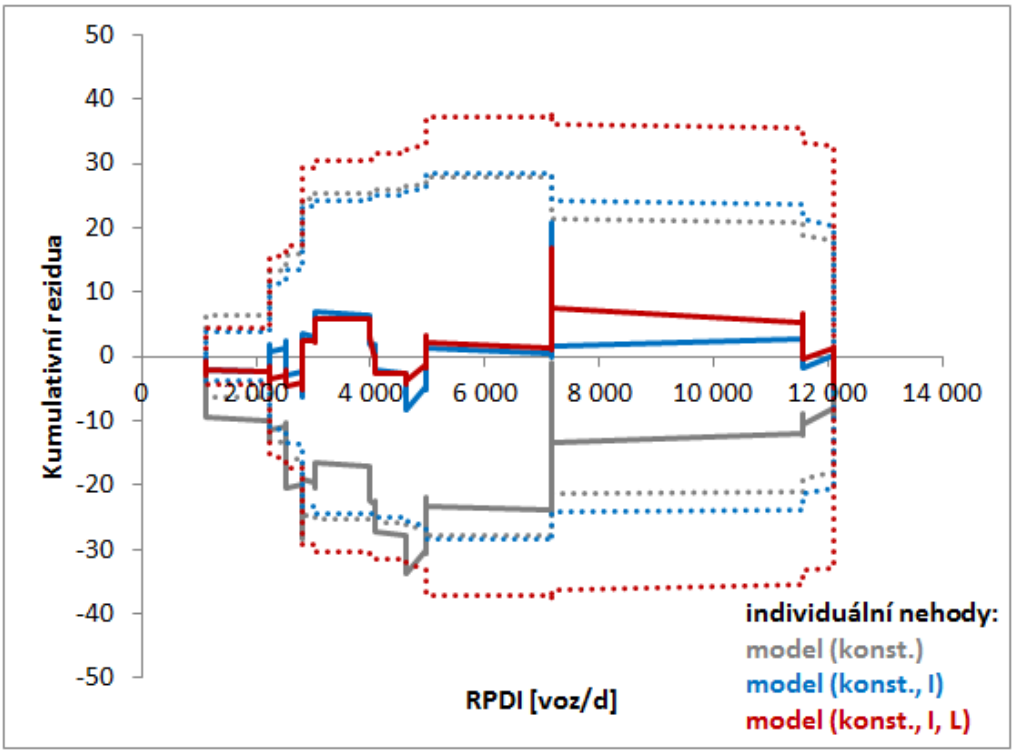
Rezidua nulového modelu (obsahujícího pouze konstantu), vyznačená šedě, jsou zřetelně záporně vychýlená. To znamená, že model v celém rozsahu intenzity predikuje nižší hodnoty, místy i přesahují dolní mez konfidenčního intervalu. To svědčí o tom, že nulový model není vhodnou alternativou.

Dále jsou vyznačeny dvě další varianty: model s intenzitou modře, model s intenzitou a délkou červeně. Průběh jejich reziduí se místy překrývá a není přehledný. Přehlednost lze zvýšit omezením rozsahu grafu na hodnoty nejčastějších intenzit. Za tím účelem byl vytvořen histogram, viz Obr. 23. Z něj je zřejmé, že více než 70 % úseků má intenzitu v rozsahu 1000 – 5000 voz/d. Byly tedy vytvořeny „výřezy“ grafu kumulativních reziduí pro tento rozsah intenzity, viz Obr. 24 a 25. Z těchto grafů je zřejmé, že červená křivka (tj. model s intenzitou a délkou) osciluje blíže nulovým hodnotám.

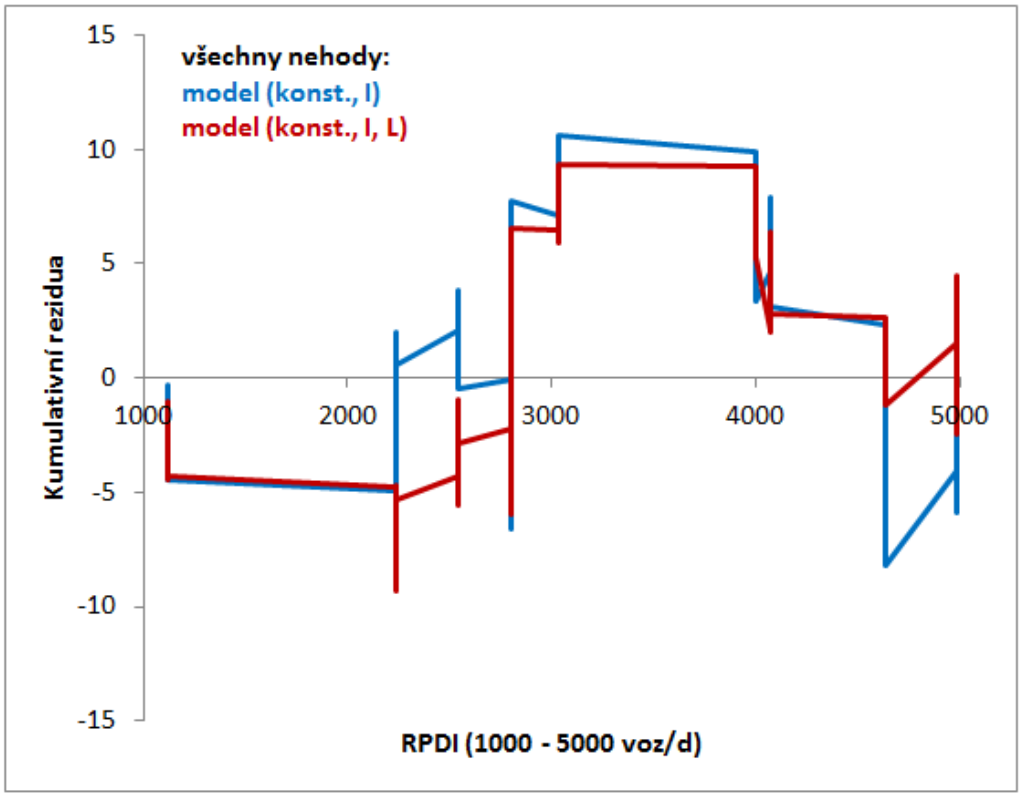


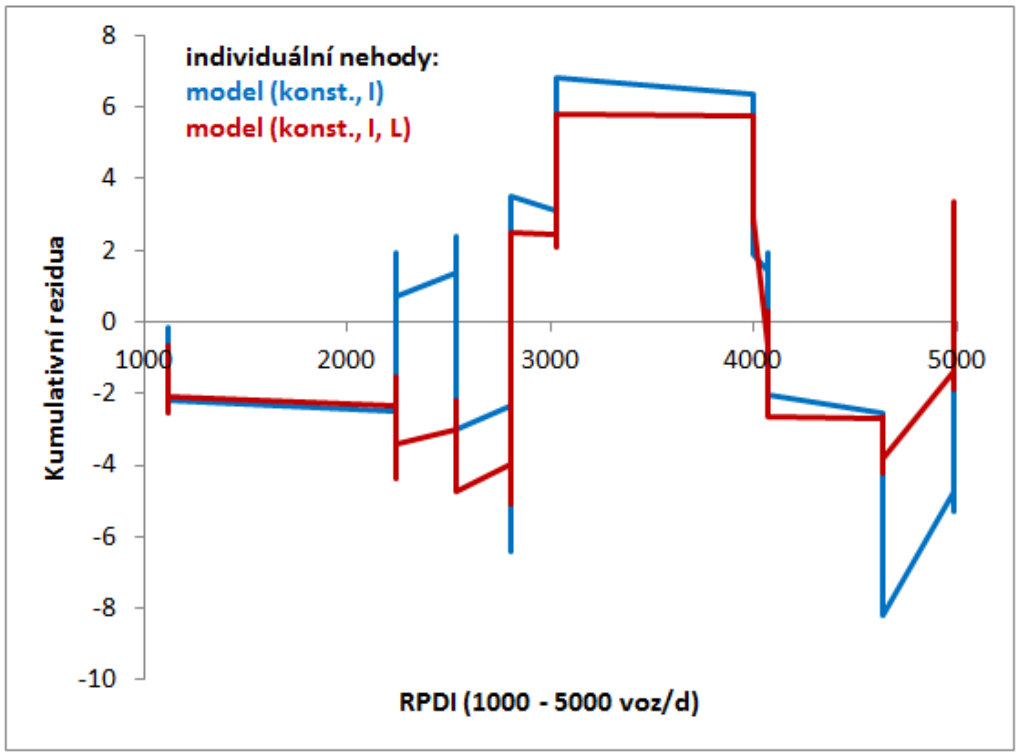
Obr. 23 Histogram četnosti hodnot intenzity (RPDI)





Obr. 24 Graf kumulativních reziduí modelů nehodovosti (pro všechny nehody / pro individuální nehody)





Obr. 25 Graf kumulativních reziduí modelů nehodovosti (pro všechny nehody / pro individuální nehody) po zúžení na interval s nejvyšší četností hodnot intenzity (RPDI)

4.2.4. Závěr

Ze tří variant modelu individuálních nehod je nejkvalitnější model zahrnující intenzitu dopravy a délku úseku. To je potvrzeno tím, že má:

- nejnižší hodnotu Akaikeho informačního kritéria
- nejnižší hodnotu disperzního parametru
- největší podíl vysvětlené systematické variability
- nejvhodnější průběh grafu kumulativních reziduí

Základní zjištění však je, že **kromě základních proměnných (intenzita a délka) žádná z proměnných nemá statisticky významný vliv na nehodovost** na studovaných úsecích. S identifikací těchto dvou základních expozičních proměnných se nelze spokojit – v další kapitole budou proto hledány další proměnné s cílem zkvalitnění modelu.

5. ČÁST C: ROZŠÍŘENÍ MODELU

5.1. TEORIE

Cílem práce je identifikace rizikových faktorů; jejich vztah k nehodovosti má být prověřen statistickou významností jejich vlivu v predikčním modelu nehodovosti. Proto byl proveden a v předchozích kapitolách popsán sběr dat a jejich aplikace při tvorbě modelu. Bylo však zjištěno, že z celkem 9 proměnných mají statisticky významný vliv pouze dvě základní – **intenzita dopravy a délka úseku.**

Ačkoli se toto zjištění může zdát překvapivé, není výjimečné. Například v 90. letech provádělo britské TRL rozsáhlý průzkum silniční sítě s cílem tvorby predikčních modelů – bylo však zjištěno, že z velkého množství potenciálních vysvětlujících proměnných (vztažených především ke geometrickým parametrům komunikací) jich jen malá část přispěla ke zlepšení shody modelů s daty (*Walmsley et al., 1998*). I novější britská studie (*Wood et al., 2013*) potvrdila, že nejkvalitnější modely neobsahují žádné z geometrických proměnných. Podobné závěry byly zjištěny i ve finských studiích (*Peltola et al., 1994*) a od té doby se ve Finsku používají pouze jednoduché modely (*Peltola et al., 2013*). Nedávná americká studie (*Saha et al., 2015*) také zjistila, že několik málo z mnoha prediktorů vysvětluje většinu variability nehodových dat.

Společným zjištěním uvedených (ale i dalších studií) bylo, že nejvlivnějším prediktorem je **expozice**, především intenzita dopravy (viz např. *Fridstrøm et al., 1995*; *Vogt a Bared, 1998*; *Greibe, 2003*; *Hauer et al., 2004*). Tato skutečnost může vyplývat i z toho, že tato proměnná má velkou variabilitu, která v sobě zahrnuje i vliv jiných proměnných, které v modelu nejsou zohledněny. Opomenutí proměnné (ať už z důvodu nevědomosti, nedostupnosti dat nebo náročnosti jejich sběru) je přitom jednou z častých chyb, které zapříčiňují nízkou kvalitu modelů (*Reurings et al., 2005*; *Lord & Mannering, 2010*; *Mitra & Washington, 2012*; *Mannering & Bhat, 2014*).

Podle přehledu predikčních modelů (*Reurings et al., 2005*) existuje řada proměnných, které jsou důležité, ale často nejsou v modelech zahrnuty, právě z důvodu náročnosti sběru dat; je to např.:

- popis vedení trasy (směrové a výškové)
- odhad expozice pěších a cyklistů
- popis chování řidiče (rychlost, použití ochranných systémů ad.)

Jiný přehled (*Dietze & Weller, 2011*) uvádí, že většina modelů obsahuje proměnné, vztažené k silniční infrastruktuře (pravděpodobně z důvodu existence plošných databází), zatímco **opomíjí proměnné, související s chováním**. Chování se obtížně kvantifikuje, ale místo něj lze sledovat „mezičlánek“ mezi infrastrukturou a chováním, kterým je konzistence směrového vedení trasy komunikace.

V této kapitole bude proto představen koncept **konzistence**, který bude následně kvantifikován a využit k rozšíření predikčního modelu z kap. 4.

5.1.1. Zkušenosti ze světa

Směrové návrhové prvky mají významný vliv na bezpečnost provozu na pozemních komunikacích, vyjadřovanou počtem dopravních nehod. Podle syntézy Světové silniční asociace *PIARC (2003)* je **nehodovost ve směrových obloucích** 1,5 až 4× vyšší než na přímých úsecích. K nehodám dochází

převážně na začátku a konci směrových oblouků a to zejména v místech, kde jsou řidiči nuceni výrazně snížit rychlost jízdy.

I na českých silnicích již dlouhodobě platí, že u největšího počtu usmrcených při nehodách je spolupůsobícím faktorem **nepřiměřená rychlost**: podle policejních statistik se dlouhodobě jedná o více než 40 % ze všech registrovaných nehod. Častým problémem bývá **nepřiměřená rychlost ve směrových obloucích a jejich bezprostředním okolí**.

Směrové vedení trasy se skládá z přímých úseků a oblouků. Tradičně jsou tyto prvky při návrhu posuzovány samostatně. V praxi se však může stát, že ačkoli jednotlivé prvky mohou požadavkům bezpečnosti vyhovět, trasa jako celek může být z hlediska bezpečnosti navržena nesprávně. Proto je důležité sledovat sled jednotlivých prvků, tj. plynulost trasy.

Problematika směrových návrhových prvků a jejich vztahu k bezpečnosti dopravy bývá označována jako *design consistency, alignment consistency, relation design* atp. Výsledkem plynulého neboli „**konzistentního**" (homogenního, harmonického) návrhu je taková komunikace, kde se očekávání řidiče shoduje se skutečným stavem. Konzistence se posuzuje prostřednictvím rozdílů rychlosti na navazujících úsecích; nemělo by docházet k náhlým změnám. Aplikace tohoto konceptu byla dokonce označena za jeden z nejslibnějších přístupů navrhování bezpečných pozemních komunikací (*Hassan, 2004*).

Vhodnou veličinou k posouzení konzistence návrhu je již dříve zmíněná **křivolakost, resp. rozdíly jejích hodnot** na navazujících úsecích (mezi přímým úsekem a směrovým obloukem).

Lamm et al. (1999, 2002, 2007) uvádí i další **kritéria hodnocení konzistence.** Dvě z nich (využívající křivolakost K a rychlost V) budou v další práci použita; jsou představena v Tab. 8, ve třech úrovních podle míry vlivu na bezpečnost (vhodná, uspokojivá, nevyhovující).

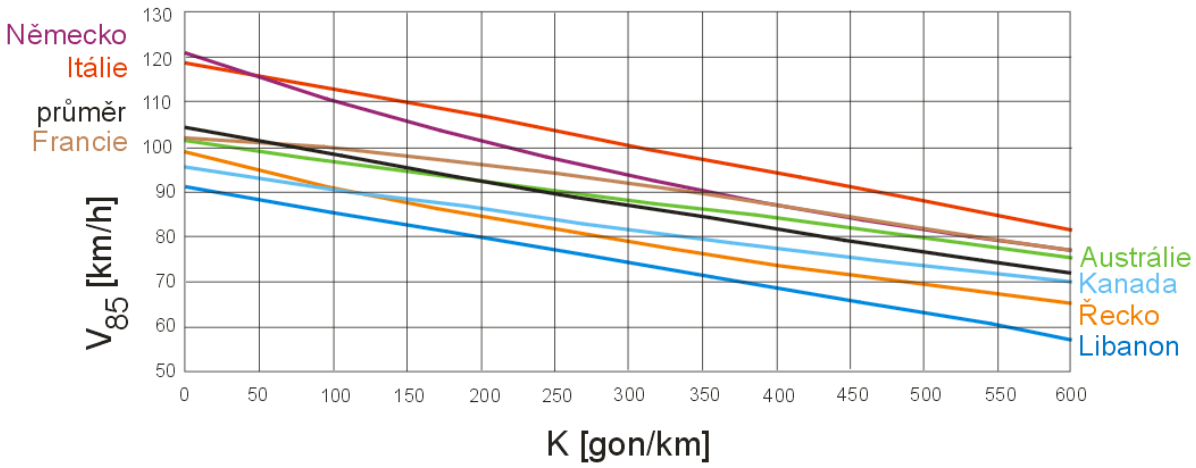
Tab. 8 Klasifikace úrovně konzistence podle vlivu na bezpečnost (*Lamm et al., 1999, 2002, 2007*)

Úroveň 1: vhodná	**Úroveň 2: uspokojivá**	**Úroveň 3: nevyhovující**
$\|\Delta K\| \leq 180$ $\|\Delta V\| \leq 10$	$180 < \|\Delta K\| \leq 360$ $10 < \|\Delta V\| \leq 20$	$\|\Delta K\| > 360$ $\|\Delta V\| > 20$

$|\Delta K|$ … absolutní rozdíl křivolakosti na navazujících úsecích [gon/km] (dále zjednodušeně dK)
$|\Delta V|$ … absolutní rozdíl rychlosti na navazujících úsecích [km/h] (dále zjednodušeně dV)

Hodnoty, uvedené v tabulce, jsou nejčastěji používané, nejsou však jediné. V rozdílných kontextech se mohou lišit: např. čínská studie (*Wang et al., 2013*) používá limity dK 150 a 300 gon/km.

Autoři uvádí i **rychlostní modely**, s jejichž pomocí lze kvantifikovat bezpečnost komunikace již ve fázi návrhu (ať už nové komunikace nebo při návrhu přestavby stávající komunikace). Jak ukazuje Obr. 26, pro každou zemi se rychlostní model liší.



Obr. 26 Rychlostní modely, tj. grafy směrodatné rychlosti V_{85} na dvoupruhových silnicích v závislosti na křivolakosti (K) pro podélný sklon do 6 % v různých zemích (*Lamm et al., 1999 a 2007*)

Princip změny rychlosti v navazujících úsecích je implementován i do řady zahraničních předpisů týkajících se návrhu komunikací a jejich rekonstrukcí. Např. ve Velké Británii se uvádí, že nárůst křivolakosti trasy o 1°/km je spojený s nárůstem počtu nehod o 1 % (*Hughes & Amis, 1996*).

5.1.2. Stav v ČR

V českých podmínkách stanovuje návrh komunikace v extravilánu norma ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic. Norma z hlediska bezpečnosti uvádí, že **návrhová rychlost** má být zajištěna na ucelených silničních tazích. Komunikace I. a II. třídy navržené na návrhovou rychlost se posuzují pomocí **směrodatné rychlosti**, která je stanovena tabulkou. Silnice kategorie S 7,5 a nižší se však směrodatnou rychlostí neposuzují. Návrh dle ČSN 73 6101 tedy závisí na subjektivním pohledu projektanta, jeho znalostech a zkušenostech.

Vydání normy ČSN 73 6101 z roku 2004 zmiňovalo křivolakost, pomocí které se stanovovala směrodatná rychlost. Tato úprava byla zrušena změnou normy z ledna 2009; *Kůrka (2009)* uvádí, že závislost směrodatné rychlosti na křivolakosti byla v českých podmínkách obtížně použitelná, proto byla nahrazena přímou závislostí na návrhové rychlosti, třídě komunikace a dalších podmínkách.

Autoři Technických podmínek č. 131 (*CityPlan, 2000*) uvádí vysokou směrovou **křivolakost** trasy jako jednu ze závad v prostorovém uspořádání komunikace. Zároveň uvádí, že nepřiměřená křivolakost má vliv na nehomogenitu trasy, avšak bez uvedení konkrétních hodnot.

Národní zkušenosti (*Nemček, 2009*) dokládají, že křivolakost, jakožto klíčová veličina ve zmiňovaných analýzách, se v naší praxi doposud běžně nepoužívá. I další zdroje (např. *Krajčovič a Řezáč, 2006*) uvádí, že vliv jednotlivých geometrických prvků trasy na rychlost vozidel se sledoval pouze parciálně. Autoři také potvrzují, že u nás doposud nebyly vytvořeny potřebné rychlostní modely. Výše zmíněné modely, vyvinuté v určitých podmínkách a čase (viz Obr. 26), nelze v ČR jednoduše aplikovat.

„Konzistentní design“ jako jeden ze způsobů moderního utváření pozemních komunikací spolu se samovysvětlujícími a odpouštějícími komunikacemi uvádí i Metodika bezpečnostní inspekce (*CDV, 2009*). Z přehledu je však zřejmé, že popisovaná problematika se v potřebném rozsahu, v jakém byla studována v zahraničí, v ČR zatím neobjevila.

5.1.3. Shrnutí

Cílem je nalezení proměnných, které umožní rozšířit predikční model a zlepšit jeho vypovídací schopnost o úrovni bezpečnosti. Mezi proměnné, které se málo používají, patří popis chování řidiče. Protože se však obtížně kvantifikuje, budou jako „mezičlánek“ mezi infrastrukturou a chováním hledány proměnné z oblasti konzistence směrového vedení trasy komunikace. Tu lze vyjádřit pomocí rozdílu křivolakostí, příp. rychlostí, mezi přímými úseky a směrovými oblouky.

5.2. APLIKACE

V předchozím textu byly uvedeny dvě možnosti, jak kvantifikovat konzistenci směrového vedení trasy:

- pomocí rozdílů křivolakosti mezi úseky (míry konzistence trasy)
- pomocí rozdílů rychlosti mezi úseky (míry konzistence rychlosti)

Hodnocení konzistence má tedy tři kroky: určení křivolakosti (nebo rychlosti) na přímých úsecích; určení křivolakosti (nebo rychlosti) ve směrových obloucích; určení rozdílů křivolakosti (nebo rychlosti) a ohodnocení konzistence.

Přitom existuje více způsobů, jak potřebné hodnoty získat:

- Křivolakost lze určit z mapových podkladů (projektové dokumentace) nebo např. prostřednictvím GPS dat.
- Rychlost lze určit vlastním měřením (stacionárním nebo kontinuálním, např. ze záznamu GPS dat) nebo pomocí zmíněného rychlostního modelu.

Dále bude konzistence hodnocena třemi ze jmenovaných způsobů:

- pomocí rozdílů křivolakosti, vypočtené z trajektorie určené GPS body
- pomocí rozdílů rychlosti, vypočtené ze stejné sady GPS bodů (tzv. „měřená“ rychlost)
- pomocí rozdílů rychlosti, určené regresním modelem s využitím popisných silničních dat (tzv. „modelovaná“ rychlost)

5.2.1. Model s rozdíly křivolakosti

Postup určení křivolakosti jednotlivých úseků byl popsán v kap. 3.4.2. V následujícím modelu byl využit absolutní rozdíl hodnot křivolakosti na navazujících úsecích (dK).

Tab. 9 Parametry modelu nehodovosti s proměnnými I, L, dK

Parametr modelu	Regresní koeficient	Střední chyba	95% interval spolehlivosti		Test významnosti		
			Dolní mez	Horní mez	Testové kritérium	Stupně volnosti	Dosažená významnost
(konst.)	-7,360	1,491	-10,283	-4,438	24,360	1	0,000
$\ln(I)$	0,916	0,172	0,579	1,253	28,364	1	0,000
$\ln(L)$	0,973	0,086	0,803	1,142	126,628	1	0,000
dK	0,001	0,001	0,000	0,002	2,817	1	0,093
(disp. parametr)	0,275	0,140	0,101	0,746			

5.2.2. Model s rozdíly „měřené“ rychlosti

Z polohy (vzdálenosti) jednotlivých GPS bodů, zaznamenaných měřicím vozidlem, a časového rozestupu, daného frekvencí záznamu 10 Hz, byla určena rychlost. Podobně jako u křivolakosti, byla následně určena jedna hodnota za každý úsek a to formou 85. percentilu. V následujícím modelu byl využit absolutní rozdíl hodnot takto určených rychlostí na navazujících úsecích ($dV_{měř}$).

Tab. 10 Parametry modelu nehodovosti s proměnnými I, L, $dV_{měř}$

Parametr modelu	**Regresní koeficient**	**Střední chyba**	**95% interval spolehlivosti**		**Test významnosti**		
			Dolní mez	Horní mez	Testové kritérium	Stupně volnosti	Dosažená významnost
(konst.)	-6,276	1,376	-8,972	-3,580	20,817	1	0,000
$\ln(I)$	0,819	0,161	0,504	1,135	25,893	1	0,000
$\ln(L)$	0,964	0,084	0,800	1,128	132,232	1	0,000
$dV_{měř}$	-0,023	0,017	-0,057	0,010	1,860	1	0,173
(disp. parametr)	0,262	0,141	0,091	0,751			

5.2.3. Model s rozdíly „modelované“ rychlosti

K vytvoření rychlostního modelu je potřeba použít proměnné, o nichž se předpokládá, že rychlost ovlivňují. V literatuře je běžné, že rychlostní modely spoléhají zejména na geometrické proměnné, nejčastěji poloměr směrového oblouku nebo z něj odvozené proměnné, např. křivolakost (*TRB, 2011*; *Castro et al., 2012*; *Montella et al., 2014*).

Zároveň však existují studie, které analyzují rychlost ze širšího pohledu lidského faktoru a jeho interakce s prostředím, a které uvádí celou řadu potenciálních vlivů na volbu jízdní rychlosti. Tyto proměnné se netýkají pouze geometrie trasy, ale např. i jejího šířkového uspořádání nebo okolí komunikace (*Fildes & Lee, 1993*; *Silcock et al., 2000*; *Edquist et al., 2009*; *SWOV, 2012*).

Rychlostní model byl vytvořen zvlášť pro přímé úseky a zvlášť pro směrové oblouky, s využitím všech proměnných, představených v kap. 3.4.3, s výjimkou délky úseku a intenzity dopravy. Bylo tedy využito celkem 7 proměnných: šířka komunikace, vegetace podél komunikace, vodorovné dopravní značení (oddělení jízdních směrů), směrové sloupky, svodidla, podélný sklon, křivolakost.

Pro model byla zvolena následující forma (lineární regresní model):

$$V_{mod} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i \cdot x_i \qquad (19)$$

kde x_i jsou vysvětlující proměnné s regresními koeficienty β_i.

Protože vysvětlující proměnné jsou spojité i kategorické, byl použit zobecněný lineární model. Modelování bylo provedeno zpětnou eliminací, tj. vložením všech proměnných a postupným vylučováním v závislosti na dosažené hladině statistické významnosti (signifikanci). Ve výsledném modelu byly ponechány pouze proměnné, jejichž vliv má signifikanci ≤ 5 %.

Při modelování byla vyloučena nesignifikantní proměnná „směrové sloupky“; dále vodorovné dopravní značení (VDZ) nebylo signifikantní pro směrové oblouky (pro přímé úseky však ano). Ostatní proměnné byly statisticky signifikantní a zůstaly ve výsledném modelu.

Tab. 11 Regresní koeficienty modelu rychlosti

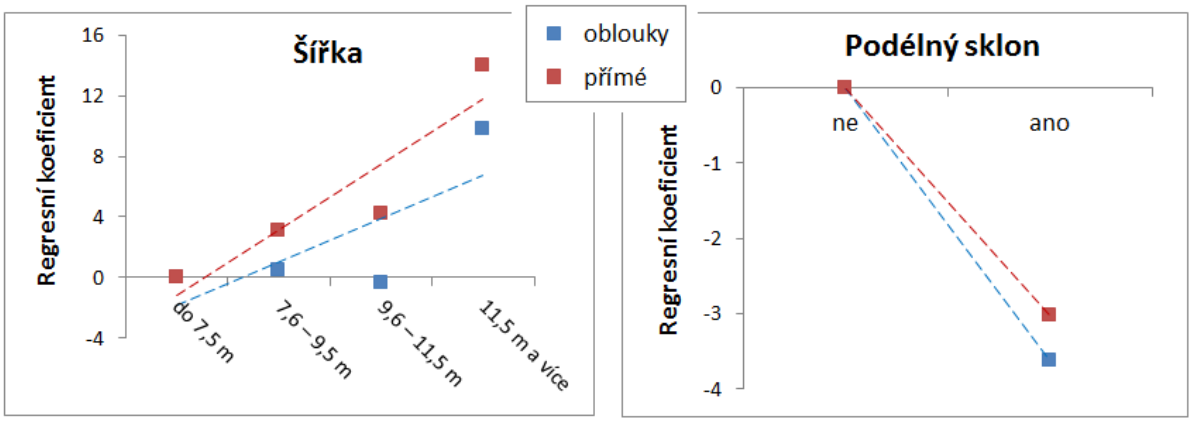
Proměnná	Kategorie	Regresní koeficienty		Dosažená významnost		Směr závislosti
		Oblouky	Přímé	Oblouky	Přímé	
Šířka	1 (≤ 7,5 m)	0,00	0,00	0,002	0,000	
	2 (7,6 – 9,5 m)	0,50	3,12			
	3 (9,6 – 11,5 m)	-0,36	4,26			
	4 (≥ 11,6 m)	9,78	14,01			pozitivní
Vegetace	0 (žádná / keře)	0,00	0,00	0,011	0,050	
	1 (stromy)	-0,56	1,56			
	2 (stromořadí / les)	4,01	4,80			pozitivní
VDZ	0 (žádná / přerušovaná čára)	–	0,00	n.s.*	0,002	
	1 (plná čára)	–	5,37			pozitivní
Svodidla	ne	0,00	0,00	0,015	0,005	
	ano	4,05	4,89			pozitivní
Podélný sklon	ne	0,00	0,00	0,023	0,052	
	ano	-3,62	-3,03			negativní
Křivolakost		-0,03	-0,07	0,000	0,031	negativní

* n.s. – nesignifikantní

V závislosti na znaménku regresních koeficientů a jejich velikosti pro jednotlivé kategorie lze interpretovat směr závislosti (viz poslední sloupec tabulky):

- kladný regresní koeficient … s rostoucí hodnotou prediktoru roste rychlost … pozitivní závislost
- záporný regresní koeficient … s rostoucí hodnotou prediktoru klesá rychlost … negativní závislost

Na Obr. 27 je ukázka pozitivní závislosti (šířka) a negativní závislosti (podélný sklon).



Obr. 27 Ukázka pozitivní a negativní závislosti rychlosti na vysvětlujících proměnných modelu

Směry závislostí lze také srovnat se zahraničními studiemi:

- Nárůst šířky souvisí s nárůstem rychlosti – toto zjištění souhlasí se závěry ostatních studií (*Martens et al., 1997*; *Gatti et al., 2007*; *Aarts et al., 2011*).
- Rychlost roste s přibývající hustotou vegetace podél komunikace. Některé studie (*SWOV, 2012*) uvádí, že řidiči volí vyšší rychlost na úsecích bez vegetace; např. *Martens et al. (1997)* ale uvádí, že souvislá zeleň může vést k nárůstu rychlosti, ve srovnání s keři, které mohou rychlost snižovat.
- Přítomnost plné čáry v přímých úsecích vede k vyšší rychlosti. To může odpovídat zjištění, že přítomnost vodorovného dopravního značení (ve srovnání se stavem bez značení) souvisí s vyšší rychlostí (*SWOV, 2012*).
- Nárůst rychlosti v úsecích bez svodidel také potvrzuje závěry předchozích studií (*SWOV, 2012*).
- Podélný sklon i křivolakost vedou k poklesu rychlosti, což odpovídá zjištěním z literatury (*Martens et al., 1997*; *TRB, 2011*).

Výsledky modelu byly využity pro odhad rychlosti na přímých úsecích a ve směrových obloucích. Z rozdílů těchto hodnot na navazujících úsecích byly určeny hodnoty dV_{mod}. Ty byly použity jako proměnná v následujícím modelu.

Tab. 12 Parametry modelu nehodovosti s proměnnými I, L, dV_{mod}

Parametr modelu	**Regresní koeficient**	**Střední chyba**	**95% interval spolehlivosti**		**Test významnosti**		
			Dolní mez	Horní mez	Testové kritérium	Stupně volnosti	Dosažená významnost
(konst.)	-6,725	1,379	-9,427	-4,023	23,795	1	0,000
$\ln(I)$	0,838	0,161	0,523	1,154	27,117	1	0,000
$\ln(L)$	0,941	0,083	0,778	1,104	128,215	1	0,000
dV_{mod}	0,030	0,020	-0,009	0,068	2,249	1	0,134
(disp. parametr)	0,260	0,140	0,090	0,749			

5.2.4. Srovnání modelů

Za účelem rozšíření a zkvalitnění predikčního modelu nehodovosti byly vytvořeny tři nové proměnné, vystihující konzistenci směrového vedení trasy, která má vztah k bezpečnosti. Jednalo se o:

- rozdíly křivolakosti na navazujících úsecích (dK)
- rozdíly „měřené“ rychlosti na navazujících úsecích ($dV_{měř}$)
- rozdíly „modelované“ rychlosti na navazujících úsecích (dV_{mod})

Je nutno podotknout, že žádná z těchto proměnných nebyla statisticky významná na hladině 5 %. Dosažené hladiny významnosti byly 9,3 % pro dK; 17,3 % pro $dV_{měř}$; 13,4 % pro dV_{mod}. Navíc existuje logický předpoklad, že regresní koeficienty by měly být kladné (pozitivní závislosti – s rostoucí velikostí rozdílů, tj. s nižší konzistencí, by měla růst nehodovost), u $dV_{měř}$ je však koeficient záporný. Konfidenční interval hodnot regresního koeficientu dV_{mod} je také částečně v záporných hodnotách, ale střední hodnota je kladná.

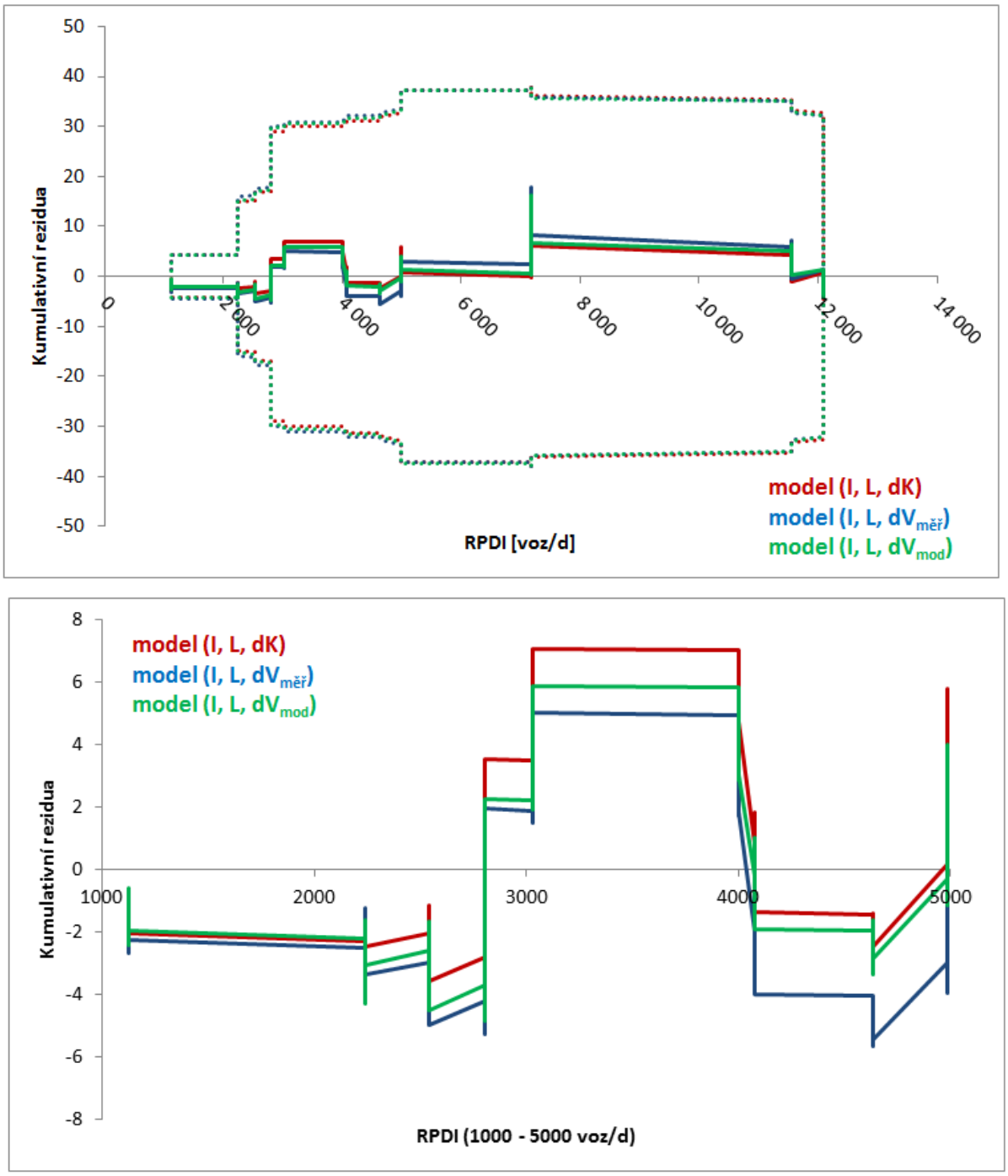
Uvedené proměnné lze proto přijmout jen při snížení nároku na statistickou významnost (10 – 20 %).

Ukazatele kvality modelů jsou uvedeny v Tab. 13. Na prvním řádku je uveden výchozí jednoduchý model z kap. 4.2.2. V posledním sloupci je přírůstek vysvětlené systematické variability vůči výchozímu modelu.

Tab. 13 Srovnání kvality modelů nehodovosti (výchozí model a rozšířené modely)

	Vysvětlující proměnné	**AIC**	**Disperzní parametr**	$\%\boldsymbol{SV}$	$\Delta\%\boldsymbol{SV}$
Výchozí model	I, L	480,682	0,281	91,35	
Rozšířené modely	I, L, dK	**480,027**	0,275	91,53	0,18
	$I, L, dV_{\text{měř}}$	480,714	0,262	91,93	0,58
	I, L, dV_{mod}	480,526	**0,260**	**92,00**	0,65

Dále byly využity grafy kumulativních reziduí tří uvedených modelů: model s rozdíly křivolakosti červeně, model s rozdíly měřené rychlosti modře, model s rozdíly modelované rychlosti zeleně. Pro zpřehlednění byl opět proveden „výřez“ na rozsah 1000 – 5000 voz/d. Z těchto grafů (Obr. 28) je zřejmé, že červená křivka (tj. model s intenzitou a délkou) osciluje blíže nulovým hodnotám. Z průběhu je vidět, že červené a modré křivky střídavě podhodnocují a nadhodnocují výsledky modelu – kompromisem mezi nimi je zelená křivka, tj. modelované rychlosti.



Obr. 28 Grafy kumulativních reziduí modelů nehodovosti pro celý rozsah intenzity a po zúžení na nejčetnější interval

5.2.5. Závěr

S výjimkou Akaikeho informačního kritéria, které vychází nejlépe (nejnižší) pro model s rozdíly křivolakosti, vyhovuje model s rozdíly modelované rychlosti ve všech testech:

- nejnižší hodnota disperzního parametru
- největší podíl vysvětlené systematické variability
- nejvhodnější průběh grafu kumulativních reziduí

Model s proměnnými I, L, dV_{mod} lze tedy považovat za nejvhodnější pro predikci četnosti individuálních nehod na vybraných úsecích. Kromě intenzity a délky úseku, které vyjadřují expozici, obsahuje i třetí proměnnou, vztaženou ke konzistenci jízdní rychlosti.

V souhrnu byly tedy využity dva modely: jedním se určila rychlost (k výpočtu konzistence rychlosti) a druhým se určila nehodovost. Použití této posloupnosti modelů není nové, objevilo se v řadě studií. Většina z nich však postupovala od jednoduchého modelu rychlosti ke složitějšímu modelu nehodovosti, viz příklady v Tab. 14.

Tab. 14 Přehled vysvětlujících proměnných vybraných modelů rychlosti a nehodovosti

Studie	**Vysvětlující proměnné**	
	Model rychlosti[1]	Model nehodovosti[2]
Anderson et al. (1999)	R	I, L + 4 ukazatele konzistence
Cafiso et al. (2010)	K, šířka	I + 4 ukazatele konzistence
Montella & Imbriani (2015)	R, K, podélný sklon, délka předchozího přímého úseku	I + až 5 ukazatelů konzistence

[1] R – poloměr směrového oblouku; K – křivolakost

[2] I – intenzita dopravy; L – délka úseku

Způsob, použitý v této studii, je opačný: postupuje od složitějšího (modelu rychlosti se 6 proměnnými) k jednoduššímu (modelu nehodovosti se 3 proměnnými). **Tento přístup je konzistentní se žádoucím principem parsimonie.** Jedinou známou analogickou prací byla studie *Chen et al. (2013)*, která aplikovala podobný „dvoufázový“ model rychlosti a nehodovosti na okružních křižovatkách.

6. ČÁST D: OVĚŘENÍ MODELU

6.1. TEORIE

V předchozích kapitolách byla shromážděna data a byl vytvořen predikční model. Pomocí několika kritérií (Akaikeho informační kritérium, disperzní parametr, podíl vysvětlené systematické variability, graf kumulativních reziduí) byla prověřena jeho vhodnost.

Uvedené testy však vystihují pouze vztah modelu k jeho vstupním datům (*goodness-of-fit*); neříkají nic o tom, zda je model prakticky **aplikovatelný nebo zobecnitelný i v jiných kontextech** (na jiných vstupních datech). Ačkoli je tento krok velmi důležitý, často bývá při modelování opomíjen (*Hoggarth et al., 2015*).

Jakékoli zobecnění nebo přenositelnost je však omezeno rozsahem vstupních hodnot použitých proměnných (tzv. okrajovými podmínkami modelu). Rozmezí hodnot je uvedeno v Tab. 15.

Tab. 15 Rozsah hodnot použitých vysvětlujících proměnných

	$\boldsymbol{I}$ [voz/d]	$\boldsymbol{L}$ [m]	$\boldsymbol{dV_{mod}}$ [km/h]
Min.	1 122,00	21,00	0,01
Max.	12 096,00	2 924,00	21,41

Reurings et al. (2005) rozlišují dvě perspektivy: *overal goodness-of-fit* a *predictive performance*. *Dixon & Avelar (2015)* doporučují ověřovat přenositelnost v čase a prostoru, vč. srovnání hodnot regresních koeficientů. *Oh et al. (2003)* rozlišují interní a externí validitu – tato klasifikace bude použita i v následujícím textu.

Validita obecně označuje požadavek, aby model byl vhodný, logický a použitelný. Kvalita samotného modelu (*goodness-of-fit*) nestačí; *Miaou & Lord (2003)* uvádí, že je důležitá (a přitom často opomíjená) také *goodness-of-logic*. Oba tyto koncepty zahrnují dva druhy validity:

- interní validita … schopnost modelu vysvětlit modelovaný fenomén
- externí validita … schopnost modelu predikovat nehody v čase a prostoru

6.1.1. Interní validita

Interní validitu lze ověřit interpretací modelu ve srovnání s modely z literatury – tj. srovnáním znamének regresních koeficientů (směrů závislostí) a jejich velikostí. (Tento princip byl již aplikován při hodnocení rychlostního modelu v kap. 5.2.3.)

„Chování“ modelu lze hodnotit i vizuálně (graficky), např.:

- zobrazením funkcí vlivu jednotlivých prediktorů (*Gitelman et al., 2014b*)
- zobrazením vývoje elasticity nebo marginálního efektu

Elasticita a marginální efekt jsou dva příbuzné koncepty – oba ukazují míru změny vysvětlované proměnné (Y) v závislosti na změně prediktoru (X), za předpokladu, že se ostatní prediktory nemění:

- Elasticita (E) určuje, o kolik % se změní Y, jako reakce na změnu X o 1 %.
- Marginální efekt (ME) určuje, o kolik jednotek se změní Y, jako reakce na jednotkovou změnu X.

Je zřejmé, že elasticita je vhodná na vyjádření intenzity vyvolané změny u relativizovaných proměnných. Např. pro vyjádření vlivu změny rychlosti na změnu nehodovosti (N) je vhodnější marginální efekt. Výpočty využívají hodnoty regresních koeficientů β; dále jsou uvedeny vzorce (zjednodušeně bez indexů) (*Washington et al., 2011*):

$$E_X^N = \frac{\partial N}{N} \cdot \frac{X}{\partial X} = \beta \cdot X \qquad (20)$$

$$ME_X^N = \frac{\partial N}{\partial X} = \beta \cdot \exp(\beta \cdot X) \qquad (21)$$

6.1.2. Externí validita

Externí validitu lze ověřit srovnáním kvality modelů, vytvořených dvěma způsoby:

a) Vstupní data jsou rozdělena na množiny A a B. Z nich jsou vytvořeny modely A a B, které jsou následně porovnávány. Množiny lze chápat v prostoru (srovnání komunikací A, B) nebo čase (srovnání časových období A, B).
b) Model je vytvořen ze všech dat. Následně je náhodně vybrána množina, z ní vytvořen model a ten aplikován na zbývající data; nejčastěji v poměru 80 % : 20 % (*Hilbe, 2011*).

Pro porovnání shody validace se používá řada ukazatelů, nejčastěji tzv. MSPE (*mean-squared predictive error*), definovaný jako průměr kvadrátů odchylek mezi pozorovanými (N) a predikovanými hodnotami ($\widehat{N}$):

$$MSPE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\widehat{N}_i - N_i)^2}{n} \qquad (22)$$

6.1.3. Shrnutí

Validita označuje požadavek, aby model byl vhodný, logický a použitelný. Lze rozlišit dva druhy validity: interní (schopnost modelu vysvětlit modelovaný fenomén) a externí (schopnost modelu predikovat nehody v čase a prostoru). Obě budou aplikovány na ověření kvality vytvořeného modelu s proměnnými I, L, dV_{mod}.

6.2. APLIKACE

Některé z uvedených testů budou aplikovány na model s proměnnými I, L, dV_{mod}.

6.2.1. Interní validita

Model, představený v kap. 5.2.3, lze napsat jako následující rovnici:

$$\widehat{N}_{ind} = \exp(-6{,}725) \cdot I^{0{,}838} \cdot L^{0{,}941} \cdot \exp(0{,}030 \cdot dV_{mod}) \qquad (23)$$

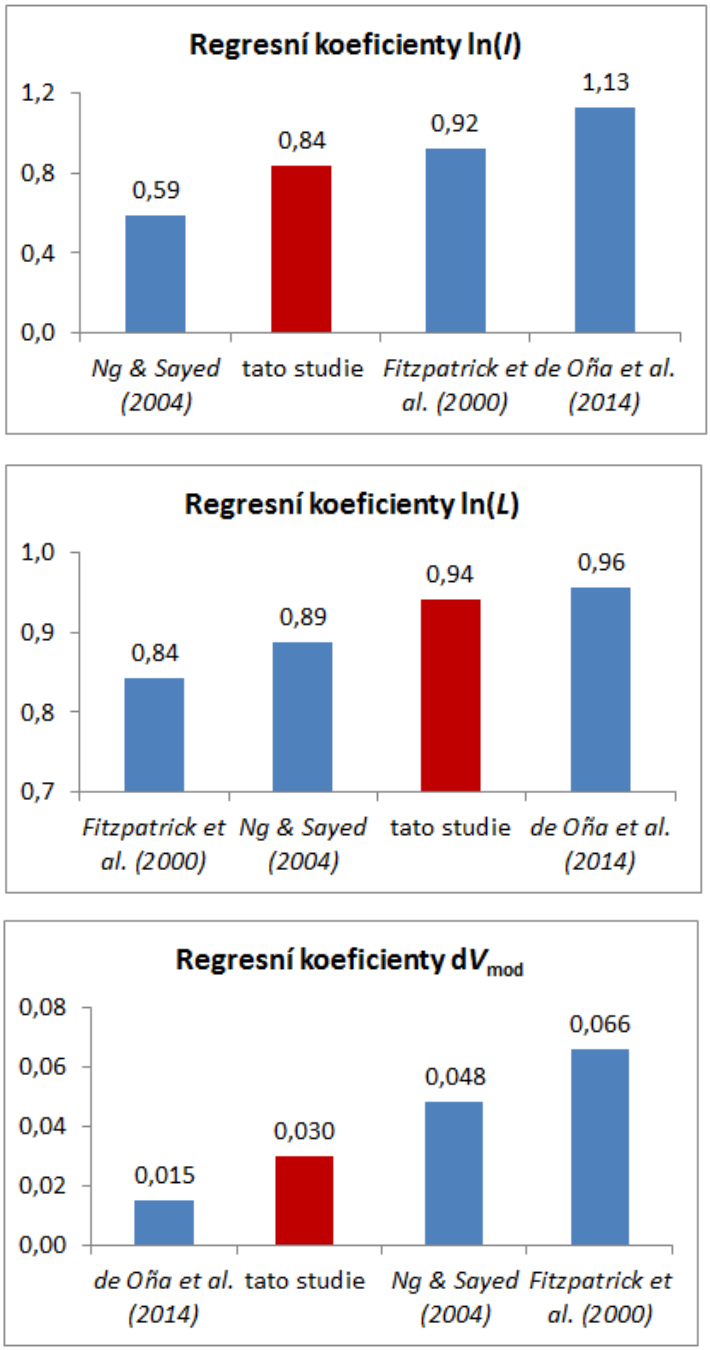
Znaménka všech regresních koeficientů jsou kladná, tzn. že závislosti jsou pozitivní: s nárůstem intenzity, délky i rozdílů rychlostí roste i četnost nehod na jednotlivých úsecích. Toto zjištění je logické a souhlasí i s ostatními studiemi.

Dále budou posouzeny velikosti regresních koeficientů a to vůči hodnotám ze srovnatelných modelů z literatury. Byly vybrány 3 zahraniční modely, hodnoty koeficientů jsou uvedeny v Tab. 16.

Tab. 16 Přehled hodnot regresních koeficientů vybraných modelů

Proměnná	**tato studie**	***Fitzpatrick et al.*** *(2000*, rovnice 35)	***Ng & Sayed*** *(2004*, model 2)	***de Oña et al.*** *(2014*, Tab. 8, průměr)
$\ln(I)$	0,838	0,922	0,585	1,129
$\ln(L)$	0,941	0,842	0,887	0,955
dV_{mod}	0,030	0,066	0,048	0,015

Grafické srovnání je uvedeno na Obr. 29. Hodnoty koeficientů jsou seřazeny vzestupně, hodnoty příslušející modelu z této studie jsou vyznačeny červeně.



Obr. 29 Grafické srovnání hodnot regresních koeficientů

Z grafů je zřejmé, že ačkoli jsou hodnoty rozdílné, jsou vždy v přijatelném rozmezí mezi ostatními.

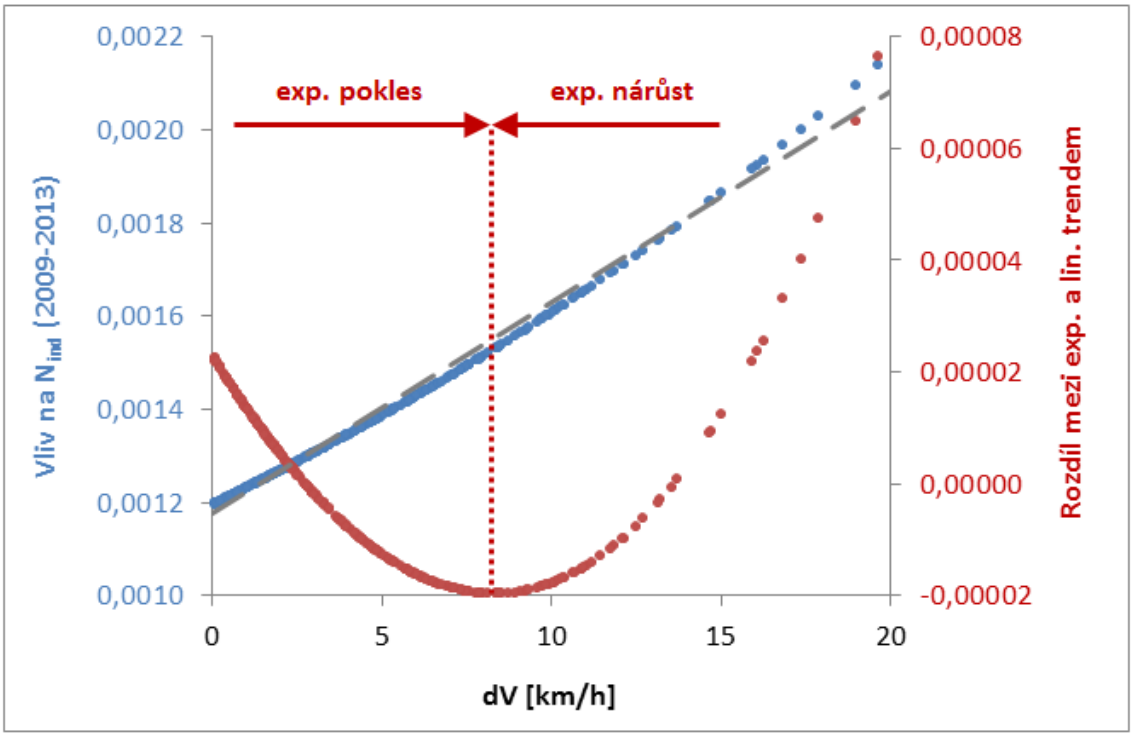
Z rovnice modelu lze také vyjádřit vliv vysvětlujících proměnných na vysvětlovanou četnost nehod. Dílčí vliv je součinem konstanty a jednotlivých prediktorů (*Ambros et al., 2014*), viz grafy na Obr. 30.

- vliv intenzity: $\exp(-6{,}725) \cdot I^{0{,}838}$
- vliv délky: $\exp(-6{,}725) \cdot L^{0{,}941}$
- vliv konzistence rychlosti: $\exp(-6{,}725) \cdot \exp(0{,}030 \cdot dV_{mod})$

Z rovnic (funkčních forem) vyplývají podoby funkcí: pro intenzitu a délku je to mocninná funkce, pro rozdíl rychlostí pak exponenciální funkce.

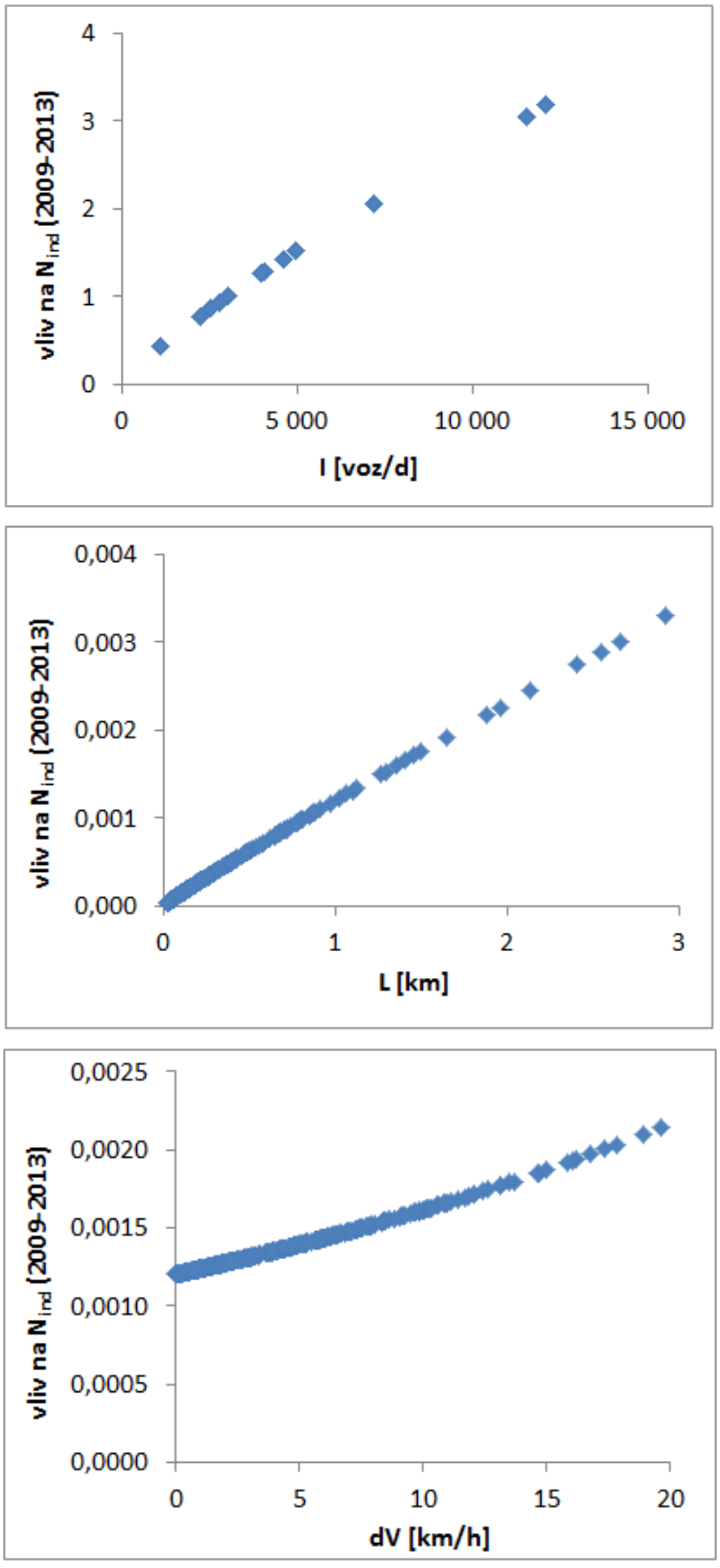
U křivky ve třetím grafu jsou při bližším pohledu zřetelné dva trendy. Pro jejich bližší studium lze křivkou proložit lineární trend (viz Obr. 31), určit rozdíl mezi oběma trendy a interpretovat jej následovně:

- klesající hodnoty rozdílu mezi trendy → exponenciální vliv se zmenšuje (riziko klesá)
- rostoucí hodnoty rozdílu mezi trendy → exponenciální vliv se zvětšuje (riziko roste)



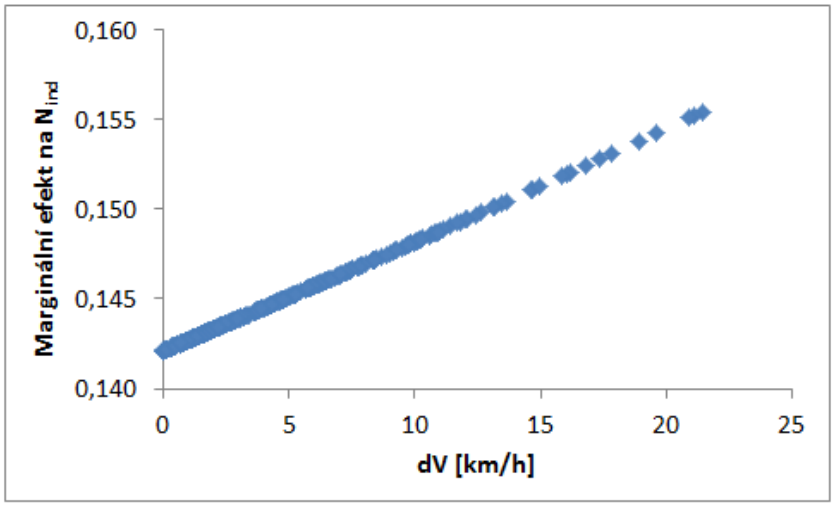
Obr. 31 Určení zlomové hodnoty vlivu konzistence rychlosti na nehodovost podle rozdílu mezi jeho exponenciálním a lineárním trendem

Vyznačená hranice mezi dvěma oblastmi odpovídá přibližně rozdílu rychlostí 8 km/h. Tu lze chápat jako aproximaci hodnoty 10 km/h, která je často chápána jako mez, od které začíná být rozdíl rychlostí kritický (*Kanellaidis et al., 1990*; *Abdelwahab et al., 1998*; *Lee et al., 2000*); viz také dříve uvedené hodnoty (Tab. 8), kde je rozdíl 10 km/h chápán jako mezní mezi vhodnou a uspokojivou konzistencí. Toto zjištění lze chápat jako jedno z potvrzení přijatelnosti modelu.



Obr. 30 Grafy dílčích vlivů vysvětlujících proměnných na nehodovost

Dále lze vliv zobrazit formou marginálního efektu – viz graf na Obr. 32. Průměrná hodnota je 0,145 – tzn. že změna dV_{mod} o 1 km/h způsobí změnu četnosti nehod (N_{ind}) o 0,145. Tato hodnota vychází z pětiletého období, na 1 rok tedy připadá změna o cca 0,03 nehody.



Obr. 32 Graf marginálního efektu konzistence rychlosti na nehodovost

6.2.2. Externí validita

Pro ověření byl zvolen způsob druhý ze způsobů validace, zmíněných v kap. 6.1.1. Podobně jako ve studii *Lord et al. (2008)* bylo ze souboru všech úseků vybráno 5 podsouborů o rozsahu 80 %. Pro rozřazení do podsouborů byl použit následující postup:

- Úseky byly průběžně očíslovány čísly 1 – 10, s nastavením počátků číslování 1, 3, 5, 7 a 9.
- Úseky očíslované 1 – 8 byly zařazeny do podsouboru A, úseky očíslované 9 a 10 do podsouboru B.
- Tak vzniklo 5 dvojic podsouborů A + B obsahujících vždy 80 + 20 % původního souboru.

Graficky je tento postup znázorněn na Obr. 33.

	pořadí				
úsek 1	1	3	5	7	9
úsek 2	2	4	6	8	10
úsek 3	3	5	7	9	1
úsek 4	4	6	8	10	2
úsek 5	5	7	9	1	3
úsek 6	6	8	10	2	4
úsek 7	7	9	1	3	5
úsek 8	8	10	2	4	6
úsek 9	9	1	3	5	7
úsek 10	10	2	4	6	8

(1 - 8) = 80 % → A

(9 - 10) = 20 % → B

Obr. 33 Ilustrace principu vytvoření 5 podsouborů (80 % + 20 %) pro externí validaci modelu

Další postup byl následující:

- Pro každý podsoubor B (označený jako B1, B3, B5, B7, B9) byly uloženy hodnoty predikované modelem, uvedeným v kap. 5.2.3. Ten byl vytvořen ze všech dat, tzn. z podsouborů A + B (označení hodnot $\widehat{N}^{A+B}$).
- Pro podsoubory A byly vytvořeny analogické predikční modely. Rovnice modelů pak byly aplikovány na příslušné podsoubory B a byly uloženy predikované hodnoty (označení hodnot $\widehat{N}^{A}$).
- Každý podsoubor B byl tedy charakterizován hodnotami N (původní data), $\widehat{N}^{A+B}$ (predikce modelem odvozeným z celkových dat), $\widehat{N}^{A}$ (predikce modelem odvozeným z podsouboru A). Tyto hodnoty byly použity pro výpočet chyb predikce MSPE:

$$MSPE^{A+B} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\widehat{N}_i^{A+B} - N_i\right)^2}{n} \qquad (24)$$

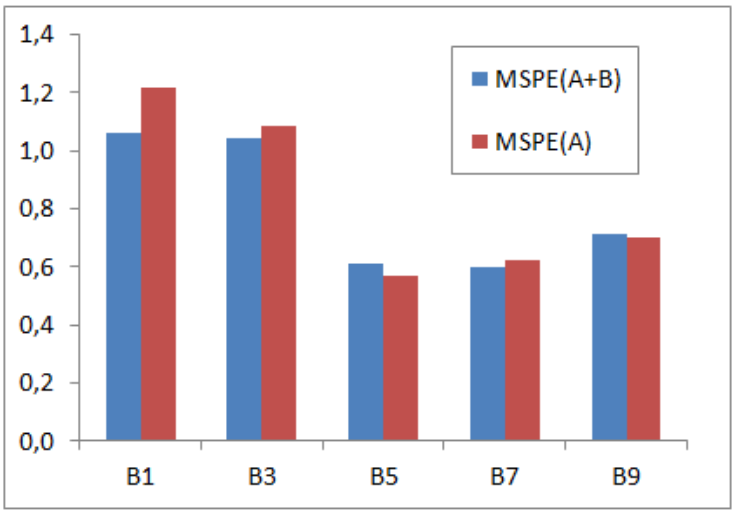
$$MSPE^{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\widehat{N}_i^{A} - N_i\right)^2}{n} \qquad (25)$$

Externí validitu lze posoudit na základě podobnosti hodnot $MSPE^{A+B}$ a $MSPE^{A}$ pro jednotlivé podsoubory B. Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 17, spolu s absolutním rozdílem. Ten dosahuje hodnot mezi 2 a 13 % (průměr 6 %) – tyto hodnoty jsou srovnatelné se studií *Lord et al. (2008)*, kde bylo dosaženo hodnot mezi 2 a 11 % (průměr 5 %).

Tab. 17 Chyby predikce pro 5 podsouborů

Chyba predikce	**Podsoubory B**				
	B1	B3	B5	B7	B9
$MSPE^{A+B}$	1,059	1,040	0,613	0,600	0,715
$MSPE^{A}$	1,216	1,083	0,571	0,624	0,703
Absolutní rozdíl	**13 %**	**4 %**	**7 %**	**4 %**	**2 %**

Graficky jsou hodnoty MSPE zobrazeny v Obr. 34.



Obr. 34 Srovnání hodnot chyb predikce (MSPE) pro 5 podsouborů

6.2.3. Závěr

Model s proměnnými I, L, dV_{mod}, vytvořený v předchozí kapitole, byl podroben několika variantám validace.

- V rámci interní validace byla ověřena znaménka a velikost regresních koeficientů – byla v souladu s literaturou.
- Dále byly vizualizovány dílčí vlivy prediktorů – ze změn rychlosti bylo možné odvodit kritickou hodnotu, která je srovnatelná s ostatními studiemi.
- Jako externí validace bylo prověřeno 5 podsouborů, výsledná chyba predikce byla opět srovnatelná s předešlými studiemi.

Na základě těchto testů lze model prohlásit za validní.

7. DISKUZE

Téma práce je „Hodnocení bezpečnosti silničního provozu s využitím statistického modelování“. Ačkoli hodnocení bezpečnosti má v ČR dlouhou tradici, ve využívání statistických metod je stále velký prostor. Proto, jak bylo v úvodu zdůrazněno, bylo mým cílem zaměřit práci především na samotnou metodologii hodnocení (za účelem identifikace rizikových faktorů, která je vstupem pro následující analýzy) s využitím statistického modelování.

Jako každá metoda, i vývoj a aplikace modelů mají svá slabá místa. Některá vyplývají přímo z podstaty metody, k některým došlo s ohledem na rozsah práce a materiální a časové možnosti. Základní kritické body, které mohou mít vliv na výsledky a jejich kvalitu, rozeberu v následujícím textu.

7.1. PODSTATA HODNOCENÍ

Použité regresní modely vychází v podstatě z tzv. *průřezových* dat – tzn., že např. pro studium vlivu křivolakosti na nehodovost se vychází z variability křivolakosti na jednotlivých úsecích ve vztahu k jejich nehodovosti. Křivolakost může být přitom ovlivněna dalšími (tzv. matoucími) proměnnými, jako je např. terén nebo kvalita povrchu, které nejsou zohledněny.

Ideálním způsobem hodnocení jsou proto tzv. *předběžné a následné* studie – to by v praxi znamenalo sledovat vybrané úseky, u kterých došlo ke změně křivolakosti (při zachování všech ostatních podmínek). Výslednou změnu nehodovosti by pak bylo možno přisoudit pouze sledované změně křivolakosti.

Druhý typ studií je ovšem prakticky obtížně realizovatelný. Znamenalo by to sledovat pouze přestavby, zaměřené výhradně na změnu křivolakosti – přitom přestavba většinou změní i další parametry komunikace, např. povrch vozovky nebo dopravní značení. Omezením je také počet takových přestaveb, které se v praxi realizují.

Predikční modely, založené na průřezových datech, jsou proto frekventovanou alternativou. Matoucí proměnné je přitom žádoucí kontrolovat prostřednictvím jejich kvantifikace a zapojení do modelu.

7.2. VOLBA VYSVĚTLOVANÉ PROMĚNNÉ

Dalším zásadním bodem je volba ukazatele bezpečnosti, tj. závislé (vysvětlované) proměnné na levé straně rovnice modelu. Nejčastěji se jedná o nehody (četnost nehod neboli absolutní nehodovost), i když je známo, že jejich počet je zkreslen podregistrací. Dále z podstaty nehod vyplývá, že jejich lokální četnost bývá statisticky nízká.

Četnější alternativou by byl některý z nepřímých ukazatelů bezpečnosti, např. zmíněné dopravní konflikty. Jejich využití patřilo i mezi jeden z mých původních záměrů: v období 2011 – 2013 jsme řešili, ve spolupráci s ČVUT FD, výzkumný projekt KONFLIKT[11] („Metodika sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů v českém prostředí“), kde jsme vyvinuli metodiku školení, sledování i hodnocení bezpečnosti na základě dopravních konfliktů (*Ambros & Kocourek, 2013*). Přestože má tato metoda řadu výhod oproti hodnocení na základě nehod, zjistili jsme, že konflikty nelze použít jako paušální náhradu nehodových analýz – za aktuálních podmínek je nelze rutinně a dlouhodobě sledovat na rozsáhlé silniční síti (*Ambros & Turek, 2014, 2015*), proto se jejich sledování aktuálně soustřeďuje

[11] http://konflikt.cdvinfo.cz/

především na křižovatky. Do budoucna je východiskem využití automatizace (videodetekce, analýza obrazu apod.). Za aktuálního stavu, kdy převládá fyzické sledování na místě, nebylo možné provést sběr konfliktních dat na širším souboru úseků.

7.3. VOLBA VYSVĚTLUJÍCÍCH PROMĚNNÝCH

Kritická je také volba vysvětlujících proměnných (prediktorů). Přáním hodnotitele je, aby tyto proměnné reprezentovaly skutečné příčiny nehod – pak by bylo možné dojít ke kauzálním (příčinným) závěrům. V oboru dopravy je však toto obtížně splnitelné. Je všeobecně známé, že nejvýraznější složkou příčin nehodovosti je lidský faktor. V Tab. 1 bylo uvedeno, že do této sféry spadají např. vlivy kondice řidiče, jeho zkušenosti nebo informovanost; dále si lze představit únavu, rozptýlení, náladu… Všechny tyto vlivy jsou však obtížně měřitelné, navíc ve větším rozsahu. Otázkou také je, jak by bylo možné výskyt těchto vlivů vztáhnout ke konkrétním úsekům.

Dále lze předpokládat např. vliv počasí. Jeho vliv na vznik dopravních nehod se často mezi jednotlivými regiony liší; navíc stejné meteorologické jevy mohou mít v určitých oblastech značný vliv na dopravní bezpečnost, zatímco jinde může být jejich vliv zanedbatelný (*Janoška et al., 2014*). Pro ilustraci byly vybrány údaje o teplotě a srážkách z dat Českého hydrometeorologického ústavu[12] z roku 2014. Hodnoty pro kraj Vysočina, ve kterém byly provedeny analýzy této disertační práce, byly srovnány s celorepublikovým průměrem. Bylo zjištěno, že v kraji Vysočina je *nadprůměrný* úhrn srážek a *podprůměrná* teplota vzduchu. Tyto skutečnosti mohou bezpečnost ovlivňovat a zároveň omezovat zobecnění okrajových podmínek, zmíněných v kapitole 6.

Východiskem k širšímu hodnocení mohou být tzv. naturalistické studie, kdy jsou vybraní řidiči dlouhodobě (v řádu měsíců až let) sledováni ve vozidlech, vybavených záznamovými technologiemi (eye-tracker, videokamera) spolu s průběžným záznamem polohy a chování vozidla. Přestože technologie již existují a používají se, zpracování takto získaných dat je relativně novým tématem (podobně jako zpracování videozáznamů u výše zmíněných studií dopravních konfliktů) vyžadujícím nákladnou nadnárodní spolupráci (viz např. *Victor et al., 2015*).

Z důvodů plošné dostupnosti se proto jako prediktory nejčastěji používají proměnné vztažené k silniční infrastruktuře, které lze získat v silničních databankách (v českých podmínkách ŘSD ČR). S vědomím, že takto jsou opomenuty vlivy chování a lidského faktoru, jsem se snažil v části C (Rozšíření modelu) o využití změn rychlosti, kterou považuji za „mezičlánek“ mezi chováním a infrastrukturou.

Zkvalitnit by však určitě šla i použitá data silniční infrastruktury, použitá v modelu rychlosti – kromě zvážení vlivu povrchu vozovky např. klopení ve směrových obloucích nebo přesnější kvantifikace podélného sklonu. Některá z těchto dat nejsou dostupná v Silniční databance ŘSD ČR, je však možno je doplnit např. měřicím vozidlem, popsaným v kap. 3.4.2.

7.4. KVALITA VSTUPNÍCH DAT

Existuje známé úsloví „*garbage in – garbage out*“ – neboli na základě špatných vstupních dat nelze očekávat dobrý výsledek. Toto pravidlo platí i ve statistickém modelování. Některé potenciální problémy budou vysvětleny:

[12] http://portal.chmi.cz/

- Intenzita dopravy bývá nejsilnějším prediktorem nehodovosti. Je však téměř pravidlem, že se pro její kvantifikaci používají hodnoty ročního průměru denních intenzit (RPDI). Kromě toho, že tato hodnota má jistou nepřesnost, přináší její použití dvě úskalí, vyplývající z variací RPDI. Zaprvé tato hodnota nereprezentuje intenzitu v době nehody; zadruhé neumožňuje specifikovat intenzitu za vybraných kritických podmínek, např. za deště nebo špatné viditelnosti (*Mensah & Hauer, 1998*).
- Úzce souvisejícím problémem je aktuálnost použitých dat. Je známo, že údaje v silničních databankách nemusí být zcela aktuální (*Elvik, 2010*), což potvrdila i osobní konzultace na Odboru Silniční databanky ŘSD ČR (Ing. Ladislav Volný, 5. 11. 2010).
- Problém variací a agregace platí i pro ostatní proměnné: zřejmé je to např. u rychlosti, která může být jiná podle podmínek prostředí, dopravního proudu ale také např. podle typů vozidel nebo řidičů. Dále platí, že rychlost, která zde byla použita (zjištěná jen z jednoho vozidla v jednom směru jízdy) je jen hrubou aproximací reprezentativní rychlosti. Vhodnou alternativou je využití dat z flotily plovoucích vozidel – tento zdroj jsem chtěl v projektu využít, ale nebylo to možné v daném časovém rozmezí. Aktuálně je mám k dispozici v rámci výzkumných projektů CDV (SAMO[13] a SMĚR[14]), ale momentálně jsou ve fázi zpracování.

7.5. VELIKOST SOUBORU NEHOD

Jedním z významných úskalí predikčních modelů nehodovosti je kvantita vstupních (nehodových) dat. Na jednu stranu se doporučuje, aby modely byly co nejvíce disagregované – tzn., že by se měly modelovat samostatně individuální a ostatní nehody (jak bylo v práci provedeno), dále např. zvlášť v noci a ve dne, zvlášť podle závažnosti nehod apod. Na druhou stranu však existuje tzv. „problém malého průměru“ – v případě malého počtu sledovaných jednotek (a nízkých průměrných hodnot nehodovosti) může dojít ke zkreslení disperzního parametru modelu a tím pádem zhoršení jeho kvality (*Lord, 2006*). Ve studovaném souboru bylo celkem 173 individuálních nehod, tj. průměrně 0,6 nehody na úsek. Podle této hodnoty by měl mít studovaný soubor rozsah cca 2000 úseků (*Lord, 2006*); jiné zdroje doporučují pro tvorbu predikčního modelu minimálně 200 nehod (*Jonsson, 2005*) nebo 300 nehod (*Srinivasan et al., 2013*).

Řešením je samozřejmě zvětšení souboru v čase a prostoru – to však naráží jednak na heterogenitu dat (hodnoty prediktorů se v čase mění), dále na moje možnosti v rámci disertační práce.

7.6. KVALITA MODELŮ

Výše zmíněné skutečnosti (malý soubor, málo nehod, agregované proměnné…) mohly ovlivnit kvalitu výsledků, tj. výsledných modelů a to jak rychlosti, tak nehodovosti. To se mohlo projevit variabilitou regresních koeficientů mezi kategoriemi u rychlostního modelu; dále nižší dosaženou hladinou významnosti u modelu nehodovosti.

Tyto komplikace je však možné očekávat, především u „neplánovaných“ dat, kdy hodnoty vysvětlujících proměnných pochází z pozorování a nejsou pod kontrolou výzkumníka. Jedním z nedostatků takových dat je malá variabilita pozorovaných hodnot, projevující se v malých změnách hodnot vysvětlované proměnné, které zapříčiňují statisticky nevýznamné regresní koeficienty (*Hebák et al., 2013*).

[13] http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=TB0200MD062
[14] http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=TH01010254

Diskutabilní je i volba ukazatelů kvality modelů. Často je např. používaný podíl vysvětlené systematické variability modelu, někdy dokonce nazývaný *explanatory power* (vysvětlovací/vysvětlující síla). Nemělo by se však zapomínat na to, že kromě systematické existuje i náhodná variace a její podíl se může mezi jednotlivými modely měnit – tzn., že model (ačkoli kvalitní z pohledu míry vysvětlení systematické variability) vysvětluje jen zlomek celkové variace. Pro ilustraci jsou v Tab. 18 uvedeny podíly variabilit u dvou modelů z této studie a dvou modelů z literatury.

Tab. 18 Srovnání podílů náhodné a systematické variability ve vybraných modelech

Podíl variability	**Modely z této studie**		**Modely z literatury**	
	$N_{vše}$	N_{ind}	*Vogt & Bared (1998)*	*Elvik (2004)*
- náhodné	23 %	37 %	45 %	66 %
- systematické	77 %	63 %	55 %	34 %

Při srovnávání kvality jednotlivých kroků postupně budovaných modelů je také otázkou, jak velký rozdíl lze považovat za významný. Zatímco např. pro informační kritéria (AIC a další) existují jisté srovnávací standardy (viz např. *Hilbe, 2011*), pro podíl vysvětlené variability (nebo např. pro disperzní parametr) se mi žádný nepodařilo v literatuře najít. Přitom je možné, že přírůstek 0,65 %, způsobený přidáním vysvětlující proměnné dV_{mod} (Tab. 13) je málo významný; přestože v literatuře lze najít srovnatelné hodnoty (např. 0,66 % u *Anderson et al., 1999*, model č. 2).

7.7. HODNOCENÍ VALIDITY

Pro hodnocení validity je vhodné, aby byly k dispozici údaje z ostatních studií, které umožní srovnání a posouzení kvality modelů. Tyto údaje však často nejsou dostupné – to se konkrétně týkalo např. velikosti marginálního efektu u interní validity.

Samotné hodnocení validity je dále obtížné z toho důvodu, že modely v literatuře často nejsou zcela srovnatelné – mohou se lišit rozsahem studovaného území, použitým typem nehod (a průměrnou nehodovostí), formou použitých proměnných (a rozsahem jejich hodnot) apod. Navíc zde opět platí, že tyto podrobnosti často nejsou ve studiích popsané. Podobně jako např. u studií účinnosti opatření[15] je řešením do budoucna sdílení podrobných výsledků statistického modelování ve webových repozitářích, které umožní i srovnávání a metaanalýzy (aktivity tohoto typu jsou aktuálně řešeny v EU[16] i USA[17]).

[15] http://www.cmfclearinghouse.org/
[16] http://www.practproject.eu/
[17] http://spfclearinghouse.com/

8. SHRNUTÍ A ZÁVĚRY

8.1. SHRNUTÍ

Název disertační práce je „Hodnocení bezpečnosti silničního provozu s využitím statistického modelování“. Nejedná se však o vyčerpávající studii velkého množství faktorů na rozsáhlé silniční síti. Naopak, s ohledem na nedostatek zkušeností v českém prostředí, se práce soustředila na vývoj metodologie a její aplikaci na výběrovém souboru. Za tímto účelem byly vytvořeny a použity vícerozměrné statistické modely.

V úvodu byly stanoveny čtyři výzkumné otázky; nyní budou uvedeny s komentářem k jejich naplnění.

- *Co lze považovat za faktor bezpečnosti?*
  Z literární rešerše vyplynula celá řada potenciálních rizikových faktorů. S ohledem na možnosti a rozsah práce byly vybrány ty, které lze prakticky kvantifikovat. Bylo jich celkem devět: délka úseku, intenzita dopravy, křivolakost, šířka komunikace, vegetace podél komunikace, vodorovné dopravní značení (oddělení jízdních směrů), směrové sloupky, svodidla, podélný sklon.
- *Jak určíme, zda vybraný faktor bezpečnost skutečně ovlivňuje?*
  Míru působení proměnné prokážeme statistickou významností jejího regresního koeficientu v predikčním modelu. Výsledný predikční model však obsahoval jen dvě základní expoziční proměnné, ostatní byly nevýznamné. Byly proto doplněny další proměnné, vztažené ke konzistenci směrového vedení trasy komunikace, z nichž se jako statisticky významný projevil vliv rozdílu rychlostí mezi úseky („konzistence rychlosti“).
- *Jak určíme směr tohoto působení? (zvyšuje/snižuje bezpečnost)*
  Směr působení určuje znaménko regresního koeficientu – ty byly pro všechny zúčastněné proměnné (délka, intenzita, konzistence rychlosti) kladné, což znamená, že jejich nárůst vede k nárůstu nehodovosti. To je v souladu s očekáváním i závěry z literatury.
- *Jak určíme velikost tohoto působení? (i pro srovnávání mezi faktory)*
  Míru působení vybrané proměnné na nehodovost lze znázornit graficky (zobrazením průběhu funkcí vlivu jednotlivých prediktorů) nebo početně, např. prostřednictvím marginálního efektu. Oba způsoby byly provedeny. Z grafu, kde bylo možné identifikovat dvě oblasti (pokles rizika, nárůst rizika), vyplynula i mezní hodnota, od které se konzistence rychlosti stává kritickou.

8.2. ZÁVĚRY PRO DALŠÍ ROZVOJ VĚDY

8.2.1. Závěry z pohledu metodologie

Z hlediska metodologie je klíčové zjištění, že v českých podmínkách existují datové zdroje (lokalizované nehody, celostátní sčítání dopravy, Silniční databanka ŘSD ČR) vhodné pro vývoj predikčních modelů. Modely se tak mohou stát základem statistického hodnocení bezpečnosti a jeho dalších aplikací, tak jak se tomu stalo ve světě již před řadou let, kde v této souvislosti dochází ke změně řízení bezpečnosti z pragmatického způsobu na racionální (*Hauer, 2007*).

Zároveň je však potřeba pamatovat na to, že metodologie statistického modelování nehodovosti není zcela ustálená. Zejména návaznosti, jako je segmentace (předcházející modelování) a validace (po modelování) bývají často přehlíženy. Na validaci, která je důležitým závěrečným krokem, zapomíná většina zdrojů (*Maher & Summersgill, 1996*; *Hauer, 2004, 2015*; *Sawalha & Sayed, 2006*; *Wood & Turner, 2007*; *AASHTO, 2010*; *Srinivasan & Bauer, 2013*; *Fridstrøm, 2015*); dále často nejsou

dodržována pravidla správného výpočtu a interpretace elasticity a marginálního efektu (informace prof. Freda Manneringa, Purdue University, 16. 4. 2015). V oblasti modelů rychlosti existuje také řada mezer, vyžadujících další zlepšení (*TRB, 2011*).

Inovativní je v práci použitý „dvoufázový" model, kdy je nejprve modelována rychlost, jejíž hodnoty jsou pak použity v modelu nehodovosti. Tento postup umožňuje postupné zjednodušování a snižování počtu proměnných s cílem zachování jednoduchosti (parsimonie).

Pro další rozšiřování poznatků však platí, že související znalosti nejsou součástí VŠ výuky (nejen v ČR, ale např. ani v USA – *Gross & Jovanis, 2008*). Kvantitativní hodnocení bezpečnosti, související statistické postupy, ovládání potřebného software jsou všechno oblasti, které jsou v ČR relativně neznámé – osobně mi zabralo jejich základní osvojení několik let. Např. zobecněné lineární modely jsou údajně pouze okrajově probírány na Matematicko-fyzikální fakultě UK v Praze (informace Mgr. Elišky Kalinové, ACREA CR, spol. s r. o., 15. 2. 2012); jediným východiskem je selektivní studium napříč vědními obory, jako je např. epidemiologie, ekonometrie nebo sociologie. V zájmu většího prohloubení a rozšíření tématu v oblasti výzkumu (a následně i v praktických aplikacích) na technických VŠ by proto bylo žádoucí přizpůsobit obsah výuky a projektů. K tomu lze využít existující podklady, jak z CDV (*Ambros, 2013*), tak ze světa (např. *Sun, 2015*).

8.2.2. Závěry z pohledu výsledků

Za přínos z hlediska výsledků považuji především prokázání vlivu rychlostní konzistence na bezpečnost. Tato proměnná má jednoznačný vztah k chování účastníků provozu (jejich volbě jízdní rychlosti) a lze ji tudíž považovat za nepřímý ukazatel bezpečnosti. Tento ukazatel lze navíc (při využití plovoucího vozidla nebo vozidel) sledovat plošně, na rozdíl od tradičních staticky orientovaných nepřímých ukazatelů (*Bekhor et al., 2013*; *Bonnard et al., 2014*; *Riguelle, 2015*).

Další závěry lze odvodit z diskuze v kap. 7 – budoucí výzkum by se měl zaměřit na redukci nebo eliminaci nedokonalostí konstatovaných v disertační práci, např.:

- ověření závislostí formou předběžné a následné studie
- sledování prostřednictvím dopravních konfliktů
- zvětšení výběrového souboru v čase a prostoru

Žádoucí je také rozšíření modelů o další proměnné ze sféry lidského faktoru. Např. *De Ceunynck et al. (2013)* sledovali dávání přednosti na křižovatkách; *Young et al. (2013)* pozorovali překračování rychlosti; *Killeen (2014)* studoval vliv pohlaví řidičů na nehodovost křižovatek. Tyto studie mají společné to, že se odehrávají na křižovatkách a data jsou sbírána fyzicky přímo na místě. Pro další rozvoj proto bude klíčová automatizace detekčních technologií, která umožní rozšíření sběru souvisejících dat. Otázkou zůstává, jak na prostorově rozsáhlé silniční síti volit lokality ke sledování.

8.3. ZÁVĚRY PRO REALIZACI V PRAXI

Využití rychlostní konzistence jako nepřímého ukazatele bezpečnosti má řadu potenciálních praktických aplikací. Tuto proměnnou (ať už změřenou lokálně nebo např. z flotily plovoucích vozidel) lze použít všude, kde je zájem o proaktivní hodnocení. Takto lze (bez čekání na nehody) např. identifikovat úseky, vhodné k přestavbě nebo úpravám.

Nízkonákladovou úpravou může být např. osazení vodicích tabulí (Z 3). Těmi se podle Technických podmínek č. 65 (*Seidl, 2013*) označuje každá zatáčka, která za normálních podmínek neumožňuje bezpečné projetí rychlostí vyšší než 50 km/h. Toto kritérium se však v praxi většinou nepoužívá a často se vychází až z výskytu nehod (doloženo informací Ing. Miroslava Lva, ŘSD ČR správa Jihlava, 31. 7. 2015).

Další možnosti aplikace existují ve sféře prevence a represe – na místa s nízkou rychlostní konzistencí lze cílit aktivity Policie ČR, příp. doporučit osazení značek IP 5 „Doporučená rychlost“ (informace Mgr. Jaroslava Konečného, Vyšší policejní škola MV v Praze, 27. 4. 2015).

9. REFERENCE[18]

Aarts, L., Brandenburg, S., & van Nes, N. (2011). The Influence of Environmental Factors on Speed Choice. In *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems* (FISTS), Vídeň.

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (2010). *Highway Safety Manual. First Edition*. Washington: AASHTO.

Abdelwahab, W. M., Aboul-Ela, M. T., & Morrall, J. F. (1998). Geometric design consistency based on speed change on horizontal curves. *Road and Transport Research*, *7*, 13-23.

Ambros, J., Dont, M., & Striegler, R. (2008). Česká observatoř bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích. *Dopravní inženýrství*, *3*(2), 15-17.

Ambros, J. (2013). *Hodnocení bezpečnosti dopravy*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Ambros, J., & Kocourek, J. (2013). *Metodika sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Ambros, J., & Slabý, P. (2013). Comparison of Roundabout Accident Prediction Models: Challenges of Data Collection, Analysis and Interpretation. In Z. Votruba, & M. Jeřábek (Eds.), *20th Anniversary of the Faculty of Transportation Sciences* (s. 42-52). Praha: České vysoké učení technické v Praze.

Ambros, J., & Gogolín, O. (2014). *Metodika sběru parametrů dopravního prostoru pozemní komunikace pomocí měřicího vozidla*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Ambros, J., & Turek, R. (2014). Jsou dopravní konflikty vhodným ukazatelem bezpečnosti silničního provozu? *Silniční obzor*, *75*, 138-142.

Ambros, J., Valentová, V., Striegler, R., Havránek, P., Simonová, E., Lipl, M., Vyskočilová, L., Pokorný, P., Novák, J., Kyselý, M., Janoška, Z., Gogolín, O., & Frič, J. (2014). *Multifaktorová analýza dopravní nehodovosti – metodika provádění*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Ambros, J., & Janoška, Z. (2015). Safety evaluation of Czech roundabouts. In *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (# 15-1238). Washington: TRB.

Ambros, J., & Turek, R. (2015). Není nutno čekat na nehody: Praktická aplikace metodiky sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů. *Silniční obzor*, *76*, 112-115.

Ambros, J., & Valentová, V. (v tisku). Identification of Road Horizontal Alignment Inconsistencies – A Pilot Study from the Czech Republic. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*.

Amundsen, F. H., & Hydén, C. (1977). *First workshop on traffic conflicts – proceedings*. Oslo: Institute of Transport Economics (TØI).

Anderson, I. B., Bauer, K. M., Harwood, D. W., & Fitzpatrick, K. (1999). Relationship to Safety of Geometric Design Consistency Measures for Rural Two-Lane Highways. *Transportation Research Record*, *1658*, 43-51.

[18] Reference v celé práci používají citační styl APA.

Anderson, D., Feldblum, S., Modlin, C., Schirmacher, D., Schirmacher, E., & Thandi, N. (2008). *A Practitioner's Guide to Generalized Linear Models.* Arlington: CAS.

Andres, J., Mikulík, J., Rokytová, J., Hrubý, Z., & Skládaný, P. (2001). *Metodika identifikace a řešení míst častých dopravních nehod*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Andres, J. (2011). Hloubková analýza dopravních nehod po roční bilanci. *Silniční obzor*, *72*, 320-322.

Babkov, V. F. (1975). *Road conditions and traffic safety*. Moskva: Mir.

Bartoš, L., Martolos, J., Dont, M., & Tesař, I. (2010). Celostátní sčítání dopravy na silnicích a dálnicích v ČR v roce 2010. *Silniční obzor*, *71*, 240-243.

Bartoš, L., & Martolos, J. (2012). *Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích (II. vydání)*. Technické podmínky č. 189. Plzeň: EDIP s.r.o.

Bekhor, S., Lotan, T., Gitelman, V., & Morik, S. (2013). Free-Flow Travel Speed Analysis and Monitoring at the National Level Using Global Positioning System Measurements. *Journal of Transportation Engineering*, *139*, 1235-1243.

Ben-Arieh, D., Chang, S., Rys, M., & Zhang, G. (2004). Geometric Modeling of Highways Using Global Positioning System Data and B-Spline Approximation. *Journal of Transportation Engineering*, *130*, 632-636.

Biagioni, J., & Eriksson, J. (2012). Inferring Road Maps from Global Positioning System Traces Survey and Comparative Evaluation. *Transportation Research Record*, *2291*, 61-71.

Bogenreif, C., Souleyrette, R. R., & Hans, Z. (2012). Identifying and Measuring Horizontal Curves and Related Effects on Highway Safety. *Journal of Transportation Safety & Security*, *4*, 179-192.

Bonnard, A., Hugot, M., & Brusque, C. (2014). Development of innovative safety performance indicators from Naturalistic Driving data. In *Transport Research Arena 2014* (# 19658). Marne la Vallée: IFSTTAR.

Cafiso, S., Di Graziano, A., Di Silvestro, G., La Cava, G., & Persaud, B. (2010). Development of comprehensive accident models for two-lane rural highways using exposure, geometry, consistency and context variables. *Accident Analysis and Prevention*, *42*, 1072-1079.

Cafiso, S., & D'Agostino, C. (2013). Investigating the influence of segmentation in estimating safety performance functions for roadway sections. In *92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board* (# 13-4372). Washington: TRB.

Castro, M., Iglesias, L., Rodríguez-Solano, R., & Sánchez, J. A. (2006). Geometric modelling of highways using global positioning system (GPS) data and spline approximation. *Transportation Research Part C*, *14*, 233-243.

Castro, M., Sánchez, J. F., & Sánchez, J. A. (2012). Operating speed models for two-lane rural highways. *Proceedings of the ICE – Transport*, *165*, 107-118.

CDV (Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.) (2009). *Metodika bezpečnostní inspekce pozemních komunikací*. Brno: CDV.

CDV (Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.) (2011). *Bezpečnost silničního provozu – aktuální poznatky, I. díl*. Brno: CDV.

CDV (Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.) (2012). *Bezpečnost extravilánových silnic – shrnutí semináře*. Brno: CDV.

Cenek, P. D., Davies, R. B., McLarin, M. W., Griffith-Jones, G., & Locke, N. J. (1997). *Road Environment and Traffic Crashes*. Research Report 79. Wellington: Transfund.

CityPlan spol. s r. o. (2000). *Zásady pro úpravy silnic včetně průtahů obcemi*. Technické podmínky č. 131. Praha: CityPlan spol. s r. o.

De Ceunynck, T., De Pauw, E., Daniels, S., Brijs, T., Hermans, E., & Wets, G. (2012). *Identification of factors contributing to the occurrence of crashes at high-risk locations*. Report RA-MOW-2011-027. Diepenbeek: Policy Research Centre for Traffic Safety.

De Ceunynck, T., Polders, E., Daniels, S., Hermans, E., Brijs, T., & Wets, G. (2013). Road Safety Differences Between Priority-Controlled Intersections and Right-Hand Priority Intersections: Behavioral Analysis of Vehicle–Vehicle Interactions. *Transportation Research Record*, *2365*, 39-48.

de Oña, J., Garach, L., Calvo, F., & García-Muñoz, T. (2014). Relationship between Predicted Speed Reduction on Horizontal Curves and Safety on Two-Lane Rural Roads in Spain. *Journal of Transportation Engineering*, *140*.

Derriks, H. M., & Mak, P. M. (2007). *Underreporting of Road Traffic Casualties*. IRTAD Special Report. Paříž: OECD/ITF.

Dietze, M., & Weller, G. (2011). *Applying speed prediction model to define road sections and develop accident prediction models: A German case study and a Portuguese exploratory study*. Projekt RISMET, výstup č. 6.2.

Dixon, K., & Avelar, R. (2015). Validation technique applied to Oregon safety performance function arterial segment models. In *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (# 15-5873). Washington: TRB.

Dont, M., & Ambros, J. (2009). Hodnocení bezpečnosti silničního provozu v krajích. In *Brnosafety 2009* (s. 25-29). Brno: Veletrhy Brno, a.s.

Edquist, J., Rudin-Brown, C. M., & Lenné, M. G. (2009). *Road design factors and their interactions with speed and speed limits*. Report 298. Victoria: Monash University Accident Research Centre (MUARC).

Eksler, V., Dont, M., Heinrich, J., Striegler, R., & Ambros, J. (2008). *Metodika sledování nepřímých ukazatelů bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Elvik, R. (2004). To what extent can theory account for the findings of road safety evaluation studies? *Accident Analysis and Prevention*, *36*, 841-849.

Elvik, R. (2004). Traffic Safety. In M. Kutz (Ed.), *Handbook of transportation engineering* (s. 16.3-16.20). New York: McGraw-Hill.

Elvik, R., Høye, A., Vaa, T., & Sørensen, M. (2009). *The Handbook of Road Safety Measures. Second Edition*. Bingley: Emerald.

Elvik, R. (2010). *Assessment and applicability of road safety management evaluation tools: Current practice and state-of-the-art in Europe*. Report 1113/2010. Oslo: Institute of Transport Economics (TØI).

Elvik R., Fridstrøm, L., Kaminska, J., & Meyer, S. F. (2013). Effects on accidents of changes in the use of studded tyres in major cities in Norway: A long-term investigation. *Accident Analysis and Prevention*, *54*, 15-25.

ETSC (European Transport Safety Council) (2001). *Transport Safety Performance Indicators.* Brusel: ETSC.

ETSC (European Transport Safety Council) (2006). *Road accident data in the enlarged European Union: Learning from each other*. Brusel: ETSC.

Fildes, B. N., & Lee, S. J. (1993). *The Speed Review: Road Environment, Behaviour, Speed Limits, Enforcement and Crashes*. Report CR 127. Canberra: Federal Office of Road Safety (FORS).

Findley, D. J., Zegeer, C. V., Sundstrom, C. A., Hummer, J. E., Rasdorf, W., & Fowler, T. J. (2012). Finding and Measuring Horizontal Curves in a Large Highway Network: A GIS Approach. *Public Works Management & Policy*, *17*, 189-211.

Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., Krammes, R. A., Irizarry, N., Parma, K. D., Bauer, K. M., & Passetti, K. (2000). *Speed prediction for two-lane rural highways*. Report FHWA-RD-99-171. Washington: Federal Highway Administration (FHWA).

Fridstrøm, L., Ifver, J., Ingebrigtsen, S., Kulmala, R., & Thomsen L. K. (1995). Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. *Accident Analysis and Prevention*, *27*, 1-20.

Fridstrøm, L. (2015). *Disaggregate Accident Frequency and Risk Modelling: A Rough Guide*. Report 1403/2015. Oslo: Institute of Transport Economics (TØI).

Gatti, G., Polidori, C., Galvez, I., Mallschützke, K., Jorna, R., van de Leur, M., Dietze, M., Ebersbach, D., Lippold, C., Schlag, B., Weller, G., Wyczynski, A., Iman, F., & Aydin, C. (2007). *Safety Handbook for Secondary Roads*. Projekt RIPCORD-ISEREST, výstup č. 13.

Gitelman, V., Vis, M., Weijermars, W., & Hakkert, S. (2014a). Development of road safety performance indicators for the European countries. *Advances in Social Sciences Research Journal*, *1*, 140-158.

Gitelman, V., Doveh, E., Carmel, R., & Pesahov, F. (2014b). The relationship between road accidents and infrastructure characteristics of low-volume roads in Israel. In O. Čokorilo (Ed.), *2nd International Conference on Traffic and Transport Engineering* (s. 350-358). Bělehrad: City Net Scientific Research Center.

Greibe, P. (2003). Accident prediction models for urban roads. *Accident Analysis and Prevention*, *35*, 273-285.

Gross, F., & Jovanis, P. P. (2008). Current State of Highway Safety Education: Safety Course Offerings in Engineering and Public Health. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, *134*, 49-58.

Hakkert, A. S., & Braimaister, L. (2002). *The uses of exposure and risk in road safety studies*. Report R-2002-12. Leidschendam: SWOV Institute for Road Safety Research.

Hassan, Y. (2004). Highway Design Consistency: Refining the State of Knowledge and Practice. *Transportation Research Record*, *1881*, 63-71.

Hauer, E. (1995). On exposure and accident rate. *Traffic Engineering and Control*, *36*, 134-138.

Hauer, E. (1997). *Observational Before-After Studies in Road Safety: Estimating the Effect of Highway and Traffic Engineering Measures on Road Safety*. Oxford: Elsevier.

Hauer, E., & Bamfo, J. (1997). Two tools for finding what function links the dependent variable to the explanatory variables. In *ICTCT 97 Conference*. Lund: Lund University.

Hauer, E., Harwood, D. W., Council, F. M., & Griffith, M. S. (2002). Estimating Safety by the Empirical Bayes Method – A Tutorial. *Transportation Research Record*, *1784*, 126-131.

Hauer, E. (2004). Statistical Road Safety Modeling. *Transportation Research Record*, *1897*, 81-87.

Hauer, E., Council, F. M., & Mohammedshah, Y. (2004). Safety Models for Urban Four-Lane Undivided Road Segments. *Transportation Research Record*, *1897*, 96-105.

Hauer, E. (2007). A case for evidence-based road-safety delivery. In *Improving Traffic Safety Culture in the United States: The Journey Forward* (s. 329-343). Washington: AAA Foundation for Traffic Safety.

Hauer, E. (2015). *The Art of Regression Modeling in Road Safety*. Springer International Publishing Switzerland.

Hautzinger, H., Pastor, C., Pfeiffer, M., & Schmidt, J. (2007). *Analysis Methods for Accident and Injury Risk Studies*. Projekt TRACE, výstup č. 7.3.

Hebák, P., Jarošová, E., Pecáková, E., Plašil, M., Řezanková, H., Vilikus, O., & Vlach, P. (2013). *Statistické myšlení a nástroje analýzy dat*. Praha: Informatorium.

Hendl, J., Kalous, J., Šimpach, O., Sluková, K., Krejčí, J., Soukup, P., Trampota, T., Severová, L., Basl, J., Zháněl, J., Malý, M., Valenta, Z., Brabec, M., & Dohnal, G. (2014). *Statistika v aplikacích*. Praha: Portál.

Hilbe, J. M. (2011). *Negative Binomial Regression. Second Edition*. Cambridge: Cambridge University Press.

Hoggarth, P. A., Innes, C. R. H., Dalrymple-Alford, J. C., & Jones, R. D. (2015). Prediction of driving ability: Are we building valid models? *Accident Analysis and Prevention*, *77*, 29-34.

Hughes, W., & Amis, G. (1996). *Accidents on Rural Roads: Single Carriageway 'A' Class Roads*. Basingstoke: AA Foundation for Road Safety Research.

Chen, Y., Persaud, P., Sacchi, E., & Bassani, M. (2013). Investigation of models for relating roundabout safety to predicted speed. *Accident Analysis and Prevention*, *50*, 196-203.

Chmelík, J. (1998). *Vyšetřování silničních dopravních nehod*. Praha: Ministerstvo vnitra.

Janoška, Z., Andrášik, R., & Bíl, M. (2014). Vliv vybraných meteorologických jevů na počty a následky dopravních nehod na příkladu Brna a okolí. *Silniční obzor*, *75*, 109-113.

Jonsson, T. (2005). *Predictive models for accidents on urban links: A focus on vulnerable road users*. Bulletin 226. Lund: Lund University.

Juza, J., Frič, J., Semmler, P., Tvarožková, L., Michalský, S., Křenek, J., & Mikulík, J. (2014). *Hloubková analýza dopravních nehod v ČR – metodika*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Kafoňková, J., & Andres, J. (2008). Nové poznatky v oblasti utváření bezpečných pozemních komunikací – silniční kategorie S 9,5 a S 11,5. *Silniční obzor*, *69*, 290-292.

Kanellaidis, G., Golias, J., & Efstathiadis, S. (1990). Drivers' Speed Behaviour on Rural Road Curves. *Traffic Engineering and Control*, *31*, 414-415.

Killeen, D. (2014). *Investigating Human Factors in Predictive Accident Models*. Dublin: National College of Ireland.

Konečný, J. (2013). Bezpečnost silničního provozu v kontextu s činností dopravní policie. In J. Konečný (Ed.), *Dopravní nehodovost a rizikové chování řidičů motorových vozidel* (s. 79-94). Praha: Vyšší policejní škola MV v Praze.

Koorey, G. (2009). Road Data Aggregation and Sectioning Considerations for Crash Analysis. *Transportation Research Record*, *2103*, 61-68.

Krajčovič, M., & Řezáč, M. (2006). Křivolakost trasy silniční komunikace. *Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava*, *6*, 159-167.

Křivý, I., & Kindler, E. (2001). *Simulace a modelování*. Ostrava: Ostravská univerzita.

Kůrka, P. (2009). Změny v ČSN 73 6101 Z1 (Projektování silnic a dálnic, změna č. 1) oproti původnímu textu normy z roku 2004. In *Projektování pozemních komunikací – křižovatky* (s. 31-34). Praha: PRAGOPROJEKT, a.s.

Lamm, R., Psarianos, B., & Mailänder, T. (1999). *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*. New York: McGraw-Hill.

Lamm, R., Psarianos, B., & Cafiso, S. (2002). Safety Evaluation Process for Two-Lane Rural Roads: A 10-Year Review. *Transportation Research Record*, *1796*, 51-59.

Lamm, R., Beck, A., Ruscher, T., Mailänder, T., Cafiso, S., & La Cava, G. (2007). *How To Make Two-Lane Rural Roads Safer: Scientific Background and Guide for Practical Application*. Southampton: WIT Press.

Landa, J., Komínek, M., & Tříska, L. (2006). *Metodický postup pro hodnocení a odstraňování bezpečnostních rizik na pozemních komunikacích – metodická příručka pro veřejnou správu*. Praha: CityPlan spol. s r. o.

Lee, S., Lee, D., & Choi, J. (2000). Validation of the 10 mph rule in highway design consistency procedure. In R. Krammes, & W. Brilon, *2nd International Symposium on Highway Geometric Design* (ISHGD) (s. 364-376). Kolín nad Rýnem: FGSV Verlag.

Lord, D. (2006). Modeling motor vehicle crashes using Poisson-gamma models: Examining the effects of low sample mean values and small sample size on the estimation of the fixed dispersion parameter. *Accident Analysis and Prevention*, *38*, 751-766.

Lord, D., Guikema, S. D., & Geedipally, S. R. (2008). Application of the Conway–Maxwell–Poisson generalized linear model for analyzing motor vehicle crashes. *Accident Analysis and Prevention*, *40*, 1123-1134.

Lord, D., & Mannering, F. (2010). The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. *Transportation Research Part A*, *44*, 291-305.

Maher, M. J., & Summersgill, I. (1996). A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. *Accident Analysis and Prevention*, *28*, 281-296.

Mannering, F. L., & Bhat, C. R. (2014). Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions. *Analytic Methods in Accident Research*, *1*, 1-22.

Martens, M., Comte, S., & Kaptein, N. (1997). *The Effects of Road Design on Speed Behaviour: A Literature Review*. Projekt MASTER, zpráva č. 2.3.1.

Martensen, H., & Dupont, E. (2013). Comparing single vehicle and multivehicle fatal road crashes: A joint analysis of road conditions, time variables and driver characteristics. *Accident Analysis and Prevention*, *60*, 466-471.

Martolos, J., Bartoš, L., Rozsypal, V., & Uhlík, J. (2009). *Dopravně inženýrská data pro kvantifikaci vlivů automobilové dopravy na životní prostředí.* Technické podmínky č. 219. Liberec: EDIP s.r.o.

McGee, H. W., Hughes, W. E., & Daily, K. (1995). *Effect of Highway Standards on Safety*. NCHRP Report 374. Washington: Transportation Research Board (TRB).

Meloun, M., & Militký, J. (2004). *Statistická analýza experimentálních dat. 2. vydání*. Praha: Academia.

Mensah, A., & Hauer, E. (1998). Two Problems of Averaging Arising in the Estimation of the Relationship Between Accidents and Traffic Flow. *Transportation Research Record*, *1635*, 37-43.

Miaou, S.-P., & Lord, D. (2003). Modeling Traffic Crash-Flow Relationships for Intersections: Dispersion Parameter, Functional Form, and Bayes Versus Empirical Bayes Methods. *Transportation Research Record*, *1840*, 31-40.

Míšek, J. (2006). Úloha automatického sčítání dopravy. *Dopravní inženýrství*, *1*(2), 14-15.

Mitra, S., & Washington, S. (2012). On the significance of omitted variables in intersection crash modeling. *Accident Analysis and Prevention*, *49*, 439-448.

Montella, A., Pariota, L., Galante, F., Imbriani, L. L., & Mauriello, F. (2014). Prediction of Drivers' Speed Behavior on Rural Motorways Based on an Instrumented Vehicle Study. *Transportation Research Record*, *2434*, 52-62.

Montella, A., & Imbriani, L. L. (2015). Safety performance functions incorporating design consistency variables. *Accident Analysis and Prevention*, *74*, 133-144.

Nemček, M. (2009). Krivolakosť ako parameter trasy cestnej komunikácie v nezastavanom území. *Silniční obzor*, *70*, 6-10.

Ng, J. C. W., & Sayed, T. (2004). Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *31*, 218-227.

Oh, J., Lyon, C., Washington, S., Persaud, B., & Bared, J. (2003). Validation of FHWA Crash Models for Rural Intersections: Lessons Learned. *Transportation Research Record*, *1840*, 41-49.

Ogden, K. W. (1997). *Safer Roads: A Guide to Road Safety Engineering*. Aldershot: Ashgate.

Oppe, S. (1993). Possibilities and limitations of accident analysis. In *6th ICTCT Workshop* (s. 32-47). Vídeň: Kuratorium für Verkehrssicherheit.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (1997). *Road Safety Principles and Models: Review of Descriptive, Predictive, Risk and Accident Consequence Models*. Paříž: OECD.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (1999). *Safety Strategies for Rural Roads*. Paříž: OECD.

Peltola, H., Kulmala, R., & Kallberg, V.-P. (1994). Why use a complicated accident prediction model when a simple one is just as good? In *22nd PTRC Summer Annual Meeting* (s. 163-170). London: PTRC Education and Research Services Limited.

Peltola, H., Rajamäki, R., & Luoma, J. (2013). A tool for safety evaluations of road improvements. *Accident Analysis and Prevention*, *60*, 277-288.

Persaud, B. N. (2001). *Statistical Methods in Highway Safety Analysis: A Synthesis of Highway Practice*. NCHRP Synthesis 295. Washington: Transportation Research Board (TRB).

PIARC Technical Committee on Road Safety (2003). *Road Safety Manual: Recommendations from the World Road Association (PIARC).* Harrogate: Route2market.

Pokorný, P., & Ambros, J. (2014). Identifikace rizikových míst na silnicích I. třídy v Jihomoravském kraji – praktická aplikace empirické bayesovské metody. *Silniční obzor*, *75*, 341-344.

Porada, V., Bradáč, A., Chmelík, J., Kasanický, G., Kopecký, Z., Nečas, S., Pavlíček, K., Rak, R., Slámka, J. (2000). *Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi*. Praha: Linde Praha, a. s.

Punch, K. (2008a). *Úspěšný návrh výzkumu*. Praha: Portál.

Punch, K. (2008b). *Základy kvantitativního šetření*. Praha: Portál.

Rasdorf, W., Findley, D. J., Zegeer, C. V., Sundstrom, C. A., & Hummer, J. E. (2012). Evaluation of GIS Applications for Horizontal Curve Data Collection. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *26*, 191-203.

Reurings, M., Janssen, T., Eenink, R., Elvik, R., Cardoso, J., & Stefan, C. (2005). *Accident prediction models and road safety impact assessment: a state-of-the-art*. Projekt RIPCORD-ISEREST, výstup č. 2.1.

Riguelle, F. (2015). Can Floating Car Data be used to monitor the speed behaviour? Results of a pilot study in Belgium. In *International Symposium on Road Safety Behaviour Measurements and Indicators.* Brusel: Belgian Road Safety Institute (BRSI).

Ryšavý, I. (2007). Není pasport jako pasport. *Moderní obec*, *13*(6), 34.

Saha, D., Alluri, P., & Gan, A. (2015). Prioritizing Highway Safety Manual's crash prediction variables using boosted regression trees. *Accident Analysis and Prevention*, *79*, 133-144.

Sawalha, Z., & Sayed, T. (2006). Traffic accident modeling: some statistical issues. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *33*, 1115-1124.

Sázavská, D. (2009). Rizikové mapy ČR. *Silnice a železnice*, *4*, 92-93.

Seidl, A. (2013). *Revize TP 65 Zásady pro dopravní značení na pozemních komunikacích*. Praha: Ministerstvo dopravy.

Silcock, D., Smith, K., Knox, D., & Beuret, K. (2000). *What limits speed? Factors that affect how fast we drive*. Basingstoke: AA Foundation for Road Safety Research.

Slabý, P., & Dusbaba, K. (1998). Statistická analýza dopravních nehod – 1. část. *Silniční obzor*, *59*, 8-10.

Slabý, P. (2003). Výzkum dopravní bezpečnosti na ČVUT Praha. *Silniční obzor*, *64*, 113-116.

Srinivasan, R., & Bauer, K. (2013). *Safety Performance Function Development Guide: Developing Jurisdiction-Specific SPFs*. Report FHWA-SA-14-005. Washington: Federal Highway Administration (FHWA).

Srinivasan, R., Carter, D., & Bauer, K. (2013). *Safety Performance Function Decision Guide: SPF Calibration vs SPF Development*. Report FHWA-SA-14-004. Washington: Federal Highway Administration (FHWA).

Stefan, C., Dietze, M., Marchesini, P., Louise, W., & Candappa, N. L. (2011). *Data systems and requirements*. Projekt RISMET, výstup č. 2.

Striegler, R., & Tučka, P. (2006). Systém GPS v lokalizaci dopravních nehod na pozemních komunikacích. In *Nové výzvy pro dopravu a spoje* (s. 100-106). Pardubice: Univerzita Pardubice.

Striegler, R., Valentová, V., Pokorný, P., Ambros, J., Šenk, P., & Janoška, Z. (2012). *Identifikace kritických míst na pozemních komunikacích v extravilánu – metodika provádění*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Sun, X. (2015). *Development of a Highway Safety Fundamental Course*. Report FHWA/LA.14/524. McCain: National Center for Intermodal Transportation for Economic Competitiveness (NCITEC).

SWOV Institute for Road Safety Research (2012). *Speed choice: the influence of man, vehicle, and road*. Leidschendam: SWOV.

Tesařík, J. (2006). Lokalizace míst nehod na pozemních komunikacích. *Dopravní inženýrství*, *1*(2), 6-8.

TRB (Transportation Research Board) (2011). *Modeling Operating Speed: Synthesis Report*. TR Circular E-C151. Washington: TRB.

Turner, S., Singh, R., & Nates, G. (2012). *The next generation of rural road crash prediction models: final report.* Research Report 509. Wellington: NZ Transport Agency (NZTA).

Turner, S., & Wood, G. (2009). Crash prediction modelling at intersections in New Zealand 1990 to 2009. In *32nd Australasian Transport Research Forum* (ATRF). Victoria: ARRB Group Ltd.

Valach, O., Tecl, J., Ambros, J., & Vyskočilová, A. (2015). *Výše ztrát z dopravní nehodovosti na pozemních komunikacích za rok 2013.* Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Valentová, V., Ambros, J., Janoška, Z., & Striegler, R. (2013). Predikční modelování a jeho výhody oproti stávající metodě identifikace nehodových lokalit. *Silniční obzor*, *74*, 290-293.

Valentová, V., Ambros, J., & Janoška, Z. (2014). A comparative analysis of identification of hazardous locations in regional rural road network. *Advances in Transportation Studies*, *34*, 57-66.

Victor, T., Dozza, M., Bärgman, J., Boda, C.-N., Engström, J., Flannagan, C., Lee, J. D., & Markkula, G. (2015). *Analysis of Naturalistic Driving Study Data: Safer Glances, Driver Inattention, and Crash Risk*. Report S2-S08A-RW-1. Washington: Transportation Research Board (TRB).

Vogt, A., & Bared, J. G. (1998). *Accident Models for Two-Lane Rural Roads: Segments and Intersections*. Report FHWA-RD-98-133. McLean: Federal Highway Administration (FHWA).

Vyskočilová, A., Tecl, J., Valach, O., & Frič, J. (2013). *Metodika výpočtu ztrát z dopravní nehodovosti na pozemních komunikacích – aktualizovaná verze 2013*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

Walmsley, D. A., Summersgill, I., & Binch, C. (1998). *Accidents on modern rural single-carriageway trunk roads*. Report 336. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL).

Wang, Y., Xu, G., & Bai, H. (2013). Operating Speed Based Alignment Consistency Evaluation Using Driving Simulator: Case Studies from Taigan Freeway in Jiangxi, China. *Promet – Traffic & Transportation*, *25*, 23-31.

Washington, S. P., Karlaftis, M. G., & Mannering, F. L. (2011). *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis, Second Edition*. Boca Raton: CRC Press.

Williams, A. F. (1999). The Haddon matrix: Its contribution to injury prevention and control. In R. McClure (Ed.), *3rd National Conference on Injury Prevention and Control* (s. 15-17). Herston: University of Queensland.

Wood, A. G., Mountain, L. J., Connors, R. D., Maher, M. J., & Ropkins, K. (2013). Updating outdated predictive accident models. *Accident Analysis and Prevention*, *55*, 54-66.

Wood, G. R., & Turner, S. (2007). Towards a "start-to-finish" approach to the fitting of traffic accident models. In A. De Smet (Ed.)., *Transportation Accident Analysis and Prevention* (s. 239-250). New York: Nova Science Publishers.

Young, K. L., Salmon, P. M., & Lenné, M. G. (2013). At the cross-roads: An on-road examination of driving errors at intersections. *Accident Analysis and Prevention*, *58*, 226-234.

10. PŘÍLOHY[19]

10.1. PUBLIKAČNÍ VÝSTUPY DISERTAČNÍ PRÁCE

Článek v impaktovaném časopise[20]

- **Ambros, J.**, & Valentová, V. (v tisku). Identification of Road Horizontal Alignment Inconsistencies – A Pilot Study from the Czech Republic. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*.

Články v recenzovaných časopisech[20]

- **Ambros, J.**, Valentová, V., & Striegler, R. (2015). Multifaktorová analýza dopravní nehodovosti. *Silniční obzor*, *76*, 172-175.
- Valentová, V., & **Ambros, J.** (2014). Konzistentní design – využití GPS ke zjištění nesouladu ve směrovém řešení trasy. *Silniční obzor*, *75*, 98-101.
- **Ambros, J.** (2012b). Jak měřit bezpečnost? – 2. část. *Silniční obzor*, *73*, 103-105.
- **Ambros, J.** (2012a). Jak měřit bezpečnost? – 1. část. *Silniční obzor*, *73*, 78-82.
- **Ambros, J.**, & Valentová, V. (2012). Optimalizace směrových návrhových prvků pozemních komunikací: úvod do problematiky a příprava pilotní studie. *Dopravní inženýrství*, *7*(1), 14-16.
- **Ambros, J.** (2011). Dopravně inženýrská data v českém prostředí: analýza dostupnosti, rozsahu a použitelnosti. *Silniční obzor*, *72*, 204-209.

Příspěvky na konferencích

- **Ambros, J.**, Valentová, V., & Oríšek, P. (2015). Safety Ranking of Rural Curves Based on Design Consistency Measures. In *5th International Symposium on Highway Geometric Design* (ISHGD). Vancouver: Transoft Solutions.
- **Ambros, J.**, & Peltola, H. (2015). Testing of 'application-based' goodness-of-fit measure of crash prediction model. In *4th NTSA Annual Scientific Seminar*. Lund: Nordic Traffic Safety Academy.
- **Ambros, J.**, & Valentová, V. (2013). Czech pilot study of road horizontal alignment optimization. In *XXVIII International Baltic Road Conference*. Vilnius: Baltic Road Association.
- **Ambros, J.** (2012). Spolupůsobící faktory vzniku nehod. In *Bezpečnost extravilánových silnic – shrnutí semináře* (s. 10-13). Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- **Ambros, J.** (2011). Relationship between road width and safety. In *Young Researchers Seminar 2011*. Brusel: ECTRI.

Knihy a kapitoly

- **Ambros, J.** (2013). *Hodnocení bezpečnosti dopravy*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- Frič, J., Skládaný, P., Andres, J., Daňková, A., & **Ambros, J.** (2011). Ukazatele bezpečnosti. In *Bezpečnost silničního provozu – aktuální poznatky, I. díl* (s. 69-83). Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- Skládaný, P., **Ambros, J.**, & Frič, J. (2011). Management rychlosti. In *Bezpečnost silničního provozu – aktuální poznatky, I. díl* (s. 181-196). Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- Frič, J., & **Ambros, J.** (2010). Bezpečnost silničního provozu. In J. Frič (Ed.), *Silniční doprava* (s. 63-89). Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o.

[19] stav ke dni 21. 8. 2015
[20] články jsou přiloženy v kap. 10.4

Certifikované metodiky

- **Ambros, J.**, & Gogolín, O. (2014). *Metodika sběru parametrů dopravního prostoru pozemní komunikace pomocí měřicího vozidla*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- **Ambros, J.**, Valentová, V., Striegler, R., Havránek, P., Simonová, E., Lipl, M., Vyskočilová, L., Pokorný, P., Novák, J., Kyselý, M., Janoška, Z., Gogolín, O., & Frič, J. (2014). *Multifaktorová analýza dopravní nehodovosti – metodika provádění*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

10.2.OSTATNÍ PUBLIKAČNÍ VÝSTUPY

Články v recenzovaných časopisech

- **Ambros, J.**, & Turek, R. (2015). Není nutno čekat na nehody: Praktická aplikace metodiky sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů. *Silniční obzor*, *76*, 112-115.
- Pokorný, P., & **Ambros, J.** (2014). Identifikace rizikových míst na silnicích I. třídy v Jihomoravském kraji – praktická aplikace empirické bayesovské metody. *Silniční obzor*, *75*, 341-344.
- Valentová, V., **Ambros, J.**, & Janoška, Z. (2014). A comparative analysis of identification of hazardous locations in regional rural road network. *Advances in Transportation Studies*, *34*, 57-66.
- **Ambros, J.**, & Turek, R. (2014). Jsou dopravní konflikty vhodným ukazatelem bezpečnosti silničního provozu? *Silniční obzor*, *75*, 138-142.
- Valentová, V., **Ambros, J.**, Janoška, Z., & Striegler, R. (2013). Predikční modelování a jeho výhody oproti stávající metodě identifikace nehodových lokalit. *Silniční obzor*, *74*, 290-293.
- Pokorný, P., **Ambros, J.**, Janoška, Z., & Kyselý, M. (2013). Bezpečnost pozemních komunikací sítě TEN-T. *Silniční obzor*, *74*, 284-290.
- Šenk, P., **Ambros, J.**, Pokorný, P., & Striegler, R. (2012). Use of Accident Prediction Models in Identifying Hazardous Road Locations. *Transactions on Transport Sciences*, *5*, 223-232.
- **Ambros, J.**, Kafoňková, J., Kocourek, J., Kočárková, D., Kozel, P., Rusek, M., Turek, M., & Turek, R. (2012). Vývoj metodiky sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů. *Silniční obzor*, *73*, 309-312.
- Šenk, P., & **Ambros, J.** (2011). Estimation of Accident Frequency at Newly-built Roundabouts in the Czech Republic. *Transactions on Transport Sciences*, *4*, 199-206.
- Šenk, P., Vyskočilová, A., & **Ambros, J.** (2011). Predikce ekonomických škod z dopravních nehod na okružních křižovatkách. *Silniční obzor*, *72*, 351-355.
- **Ambros, J.** (2010). Studenti snižují rychlost. *Silniční obzor*, *71*, 342-344.
- **Ambros, J.**, Dont, M., & Striegler, R. (2008). Česká observatoř bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích. *Dopravní inženýrství*, *3*(2), 15-17.
- **Ambros, J.**, Dont, M., & Striegler, R. (2007b). Vjezdový ostrůvek v obci Bedihošť. *Silniční obzor*, *68*, 340-341.
- **Ambros, J.**, Dont, M., & Striegler, R. (2007a). Zařízení pro provozní informace doplněné radarem. *Silniční obzor*, *68*, 307-309.
- Dont, M., & **Ambros, J.** (2006). Vyhodnocení efektivity použití figuríny policisty. *Dopravní inženýrství*, *1*(1), 20-21.

Příspěvky na konferencích

- **Ambros, J.**, Valentová, V., & Janoška, Z. (2015). Investigation of difference between network screening results based on multivariate and simple crash prediction models. In *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (# 15-1242). Washington: TRB.
- **Ambros, J.**, & Janoška, Z. (2015). Safety evaluation of Czech roundabouts. In *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (# 15-1238). Washington: TRB.
- **Ambros, J.**, Turek, R., & Paukrt, J. (2014). Road safety evaluation using traffic conflicts: Pilot comparison of micro-simulation and observation. In O. Čokorilo (Ed.), *2nd International Conference on Traffic and Transport Engineering* (s. 221-227). Bělehrad: City Net Scientific Research Center.
- **Ambros, J.**, Turek, R., & Valentová, V. (2014). There is no need to wait for accidents: Applying observation of traffic conflicts and behaviour in Czech practice. In *27th ICTCT Workshop*. Vídeň: ICTCT.
- **Ambros, J.** (2014). Národní observatoř bezpečnosti silničního provozu. In *Brnosafety 2014* (s. 13-16). Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- **Ambros, J.**, & Michková, V. (2014). Není nutno čekat na nehody: Případová studie praktického uplatnění proaktivního hodnocení bezpečnosti silničního provozu. In *XV. Dopravně - inženýrské dny* (s. 199-203). Praha: Česká silniční společnost.
- **Ambros, J.**, & Laureshyn, A. (2014). Comparison of severity assessments based on Czech and Swedish traffic conflict techniques. In *3rd NTSA Annual Scientific Seminar*. Lund: Nordic Traffic Safety Academy.
- **Ambros, J.** (2013). Metodika sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů. In J. Konečný (Ed.), *Dopravní nehodovost a rizikové chování řidičů motorových vozidel 2013* (s. 43-48). Praha: Vyšší policejní škola MV v Praze.
- **Ambros, J.** (2013b). Revisiting the foundations of the Czech traffic conflict techniques. In *26th ICTCT Workshop*. Vídeň: ICTCT.
- Valentová, V., **Ambros, J.**, & Janoška, Z. (2013). A Comparative Analysis of Identification of Hazardous Locations in Regional Rural Road Network. In *Road Safety and Simulation 2013*, Řím.
- **Ambros, J.** (2013a). Hodnocení bezpečnosti na základě dopravních konfliktů. In *Brnosafety 2013*. Brno: Veletrhy Brno, a.s.
- **Ambros, J.**, & Slabý, P. (2013). Comparison of Roundabout Accident Prediction Models: Challenges of Data Collection, Analysis and Interpretation. In Z. Votruba, & M. Jeřábek (Eds.), *20th Anniversary of the Faculty of Transportation Sciences* (s. 42-52). Praha: České vysoké učení technické v Praze.
- **Ambros, J.**, & Andres, J. (2012). Možnosti využití sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů v policejní praxi. In J. Konečný (Ed.), *Dopravní nehodovost a návrh opatření na její eliminaci* (s. 217-224). Jihlava: Vyšší policejní škola MV v Jihlavě.
- **Ambros, J.** (2012). How to assess reliability and validity of a traffic conflict technique? In *25th ICTCT Workshop*. Vídeň: ICTCT.
- Novák, J., & **Ambros, J.** (2012). Rozšíření predikčního modelu nehodovosti na okružních křižovatkách. In *20. Silniční konference* (s. 127-132). Praha: Agentura VIACO.
- Šenk, P., Pokorný, P., & **Ambros, J.** (2012). Využití predikčního nehodovostního modelu při identifikaci kritických úseků na silniční síti. In *20. Silniční konference* (s. 112-116). Praha: Agentura VIACO.

- **Ambros, J.**, & Pokorný, P. (2012). Identifikace nehodových lokalit – projekt IDEKO. In *Bezpečnosť a plynulosť v cestnej premávke 2012*. Žilina: Wettrans Žilina s.r.o.
- **Ambros, J.** (2012). Traffic conflict technique as a complementary method of road safety management. In M. Vujanić (Ed.), *Road Accidents Prevention 2012* (s. 39-46). Novi Sad: GRID.
- Šenk, P., & **Ambros, J.** (2011). Odhad počtu nehod na nově budovaných okružních křižovatkách. In *19. Silniční konference* (s. 153-156). Praha: Agentura VIACO.
- **Ambros, J.** (2011). Traffic conflict technique in the Czech Republic. In *24th ICTCT Workshop.* Vídeň: ICTCT.
- **Ambros, J.**, Dont, M., & Striegler, R. (2009b). Tools Supporting Road Infrastructure Safety Management. In *XXVII International Baltic Road Conference*. Riga: Baltic Road Association.
- Dont, M., & **Ambros, J.** (2009). Hodnocení bezpečnosti silničního provozu v krajích. In *Brnosafety 2009* (s. 25-29). Brno: Veletrhy Brno, a.s.
- **Ambros, J.**, Dont, M., & Striegler, R. (2009a). Podpůrné nástroje managementu bezpečnosti silniční sítě. In *ROSALINE 2009*. Praha: Sdružení pro dopravní telematiku.
- **Ambros, J.** (2008b). Building the Czech Road Safety Observatory. In *21st ICTCT Workshop*. Vídeň: ICTCT.
- Dont, M., **Ambros, J.**, & Striegler, R. (2008). Česká observatoř bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích. In *Bezpečnosť dopravy na pozemných komunikáciách 2008*. Košice: Dom techniky.
- **Ambros, J.** (2008a). Building the Czech National Road Safety Observatory. In *GAMBIT 2008*, Gdaňsk.
- **Ambros, J.**, Striegler, R., & Tučka, P. (2007). Nejčastější bezpečnostní deficity při realizovaných inspekcích dopravního značení. In *Bezpečná silniční infrastruktura* (s. 131-139). Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- **Ambros, J.** (2007). Praktické příklady účinnosti opatření. In *Doprava v okolí škol z pohledu zdraví a bezpečnosti*. Brno: Magistrát města Brna.

Certifikované metodiky

- **Ambros, J.**, & Kocourek, J. (2013). *Metodika sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- Striegler, R., Valentová, V., Pokorný, P., **Ambros, J.**, Šenk, P., & Janoška, Z. (2012). *Identifikace kritických míst na pozemních komunikacích v extravilánu – metodika provádění*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- Šenk, P., **Ambros, J.**, & Vyskočilová, A. (2011). *Metodika hodnocení účinnosti opatření ke zvýšení bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- Striegler, R., Dont, M., & **Ambros, J.** (2008). *Metodika optimalizace hustoty silniční sítě v regionech*. Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., Brno.
- Striegler, R., Huzlík, J., Cholava, R., Dont, M., **Ambros, J.**, & Pokorný, P. (2008). *Metodika měření vybraných dopravně-inženýrských parametrů, hluku a imisí na lokalitách Zóna 30*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- Eksler, V., Dont, M., Heinrich, J., Striegler, R., & **Ambros, J.** (2008). *Metodika sledování nepřímých ukazatelů bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.
- Striegler, R., Dont, M., **Ambros, J.**, & Pokorný, P. (2007). *Bezpečnostní inspekce pozemních komunikací*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

10.3.SCIENTOMETRICKÉ ÚDAJE

Záznam v databázi Web of Science

- **Ambros, J.**, Turek, R., & Paukrt, J. (2014). Road safety evaluation using traffic conflicts: Pilot comparison of micro-simulation and observation. In O. Čokorilo (Ed.), *2nd International Conference on Traffic and Transport Engineering* (s. 221-227). Bělehrad: City Net Scientific Research Center.

Záznam v databázi Scopus

- Valentová, V., **Ambros, J.**, & Janoška, Z. (2014). A comparative analysis of identification of hazardous locations in regional rural road network. *Advances in Transportation Studies*, *34*, 57-66.

Vybrané citační ohlasy

(práce se zahraničním dopadem, s vyloučením prací z CDV a ČVUT)

Citované dílo	Citující díla
Ambros, J., Valentová, V., & Janoška, Z. (2015). Investigation of difference between network screening results based on multivariate and simple crash prediction models. In *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (# 15-1242). Washington: TRB.	Peltola, H., Jasiūnienė, V., Čygaitė, L., & Forsberg, A. (2015). Common methods for estimating the safety effects of road improvements. In *25th World Road Congress*, Soul.
Ambros, J., Turek, R., & Paukrt, J. (2014). Road safety evaluation using traffic conflicts: Pilot comparison of micro-simulation and observation. In O. Čokorilo (Ed.), *2nd International Conference on Traffic and Transport Engineering* (s. 221-227). Bělehrad: City Net Scientific Research Center.	Meel, I. P., Vesper, A., Borsos, A., & Koren, C. (2016). Evaluation of the effects of auxiliary lanes on road traffic safety at downstream of U-turn. In *14th World Conference on Transport Research* (WCTR), Šanghaj.
Ambros, J. (2012). Traffic conflict technique as a complementary method of road safety management. In M. Vujanić (Ed.), *Road Accidents Prevention 2012* (s. 39-46). Novi Sad: GRID.	Pešić, D., & Marković, N. (2014). The importance of applying the conflict technique in local communities. In K. Lipovac, & M. Nešić (Eds.), *Road Safety in Local Community 2014* (s. 75-83). Bělehrad: Academy of Criminalistic and Police Studies.
	Nešić, M., Lipovac, K., & Rosić, M. (2014). Application of a traffic conflict technique at intersections in urban areas – A case study in Belgrade. In K. Lipovac, & M. Nešić (Eds.), *Road Safety in Local Community 2014* (s. 65-73). Bělehrad: Academy of Criminalistic and Police Studies.
	Cipriano, F. R., & Vicenta, J. K. S. (2014). *Safety Evaluation of Motorcycle Lanes in Metro Manila*. Diliman: University of the Philippines.
Šenk, P., & **Ambros, J.** (2011). Estimation of Accident Frequency at Newly-built Roundabouts in the Czech Republic. *Transactions on Transport Sciences*, *4*, 199-206.	Shadpour, E. (2014). *Safety Effects of Roundabouts*. Waterloo: Laurier Centre for Economic Research & Policy Analysis (LCERPA).

Dont, M., & **Ambros, J.** (2011). *Strategie bezpečnosti na regionální a lokální úrovni*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.	Kořínek, T., Křupka, J., & Soušek, R. (2013). Modelling of road safety evaluations at the regional and local level in Czech Republic. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, *7*, 91-102.
Ambros, J. (2011). Traffic conflict technique in the Czech Republic. In *24th ICTCT Workshop.* Vídeň: ICTCT.	Cvetanovska, C., Cvetanovski, I., & Atanasova, V. (2014). Pedestrian safety in the municipality of Veles. In K. Lipovac, & M. Nešić (Eds.), *Road Safety in Local Community 2014* (s. 155-162). Bělehrad: Academy of Criminalistic and Police Studies.
	Nešić, M., Lipovac, K., & Rosić, M. (2014). Application of a traffic conflict technique at intersections in urban areas – A case study in Belgrade. In K. Lipovac, & M. Nešić (Eds.), *Road Safety in Local Community 2014* (s. 65-73). Bělehrad: Academy of Criminalistic and Police Studies.
Ambros, J. (2008). Building the Czech Road Safety Observatory. In *21st ICTCT Workshop*. Vídeň: ICTCT.	Mayoral Grajeda, E. F., Cuevas Colunga, A. C., & Mendoza Díaz, A. (2012). *Requisitos básicos para la creación del Observatorio de Seguridad Vial en el transporte de carga y pasajeros*. Publicación Técnica No. 352. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Další mé scientometrické údaje jsou dostupné na profilu *Google Scholar* (http://scholar.google.com/citations?user=esm4FAwAAAAJ&hl); příp. na *ResearchGate* (https://www.researchgate.net/profile/Jiri_Ambros2), kde jsou k dispozici i plné texty anglických publikací.

Dalším zdrojem plných textů publikací jsou projektové weby Centra dopravního výzkumu, v.v.i.:

- VEOBEZ – http://veobez.cdvinfo.cz/projekt/
- KONFLIKT – http://konflikt.cdvinfo.cz/vystupy-projektu/
- IDEKO – http://ideko.cdv.cz/dissemination
- SAMO – http://samo.cdvinfo.cz/vystupy/

Některé české články jsou ve zkrácené podobě k dispozici na *Observatoři bezpečnosti silničního provozu* (http://www.czrso.cz/clanky/).

Na následujících stranách jsou další přílohy:

10.4.VYBRANÉ ČLÁNKY

Výběr z publikačních výstupů disertační práce (v kap. 10.1): 6 článků v recenzovaných časopisech, 1 článek přijatý do impaktovaného časopisu.

10.5.ŽIVOTOPIS

(aktuální ke dni 21. 8. 2015)