



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**ANALÝZA NÁVRHOVÝCH PRVKŮ OKRUŽNÍCH
KŘÍŽOVATEK A JEJICH VLIV NA NEHODOVOST**

ANALYSIS OF ROUNDABOUT DESIGN PARAMETERS AND THEIR IMPACT ON ACCIDENTS

DIZERTAČNÍ PRÁCE - TEZE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jan Novák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.

BRNO 2017

ABSTRAKT

Dizertační práce se zabývá analýzou návrhových prvků okružních křižovatek a jejich vlivem na nehodovost. Cílem analýzy byla identifikace významných prvků okružních křižovatek, které mají vliv na nehodovost. Pro naplnění tohoto cíle byla využita metoda multifaktorového statistického hodnocení nehodovosti na základě výběrového souboru dat, vytvoření několika funkcí bezpečnosti, jejich ověření a interpretace výsledku.

V práci bylo vytipováno několik návrhových prvků, které z pohledu mechanismu dopravní nehody náleží do faktoru infrastruktury, jsou to: roční průměr denních intenzit (RPDI), průměr okružní křižovatky (OK), šířka vjezdu, úhel na vjezdu, úhel na přímém průjezdu, lokalita a mnohé další.

V základním souboru bylo cca 1200 OK. Po kontrole dostupnosti provozních dat klesl počet vybraných OK v souboru na 200. Nehodovost byla sledována v letech 2009 až 2016, tedy za dobu osmi let; celkem se jednalo o 2674 dopravních nehod.

Výstupem této práce je model nehodovosti, který byl sestaven na základě analýzy návrhových prvků vjezdu OK a mapa kritických OK na území ČR dle empirického bayesovského odhadu nehodovosti. Závěrem byly identifikovány tyto významné parametry vjezdu OK: RPDI, úhel na vjezdu, kolizní vzdálenost, odchylka úhlů mezi rameny, výskyt pojížděného prstence, výskyt bypassu, typ vjezdu, výskyt přechodu pro chodce a okolní zástavba.

KLÍČOVÁ SLOVA

Okružní křižovatka, bezpečnost, dopravní nehoda, návrhové prvky, rizikový faktor, statistické modelování dopravní nehodovosti, model nehodovosti, funkce bezpečnosti

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto dizertační práci vypracoval samostatně, dle pokynů vedoucího dizertační práce a školitele specialisty. Všechny podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne: 1. září 2017

Podpis: **Ing. Jan Novák**

.....

ABSTRACT

The dissertation deals with the analysis of roundabout design elements impact on traffic accidents. The analysis objective was to identify the important elements of roundabouts that have impact on accidents. In order to achieve this goal, the multifactorial statistical safety assessment method was used on the basis of a representative sample of data, by developing several safety performance functions, verifying them and interpreting the result.

Several design elements, which from the point of view of the traffic accident mechanism belong to the infrastructure factor, have been identified: AADT, average diameter, entrance width, entry angle, direct passage angle, location and many others.

The original sample contained about 1200 roundabouts, which were reduced to 200 based on data availability. Accident frequencies were monitored between 2009 and 2016, i.e. for eight years, resulting in total 2674 roundabouts accidents.

The result is an accident prediction model, developer based on roundabout approach design elements, and map of critical roundabouts, identified based on empirical Bayes estimate of accident frequency. Following approach parameters were identified: AADT, entry angle, distance between collision points, deviation of angles between approaches, presence of apron, presence of bypass, entry type, presence of pedestrian crossing and surrounding area type.

KEY WORDS

Roundabout, Traffic Safety, Traffic Accident, Design Element, risk factor, statistical road safety modelling, accident model, Safety function

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVÁK Jan; *Analýza návrhových prvků okružních křižovatek a jejich vliv na nehodovost*, Analysis of roundabout design parameters and their impact on accidents, teze – zkrácené pojednání dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, školitel: doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D., 2017, počet stran 40.

OBSAH

1. OBLAST VÝZKUMU	5
1.1. Terminologie	5
1.2. Hlavní cíle	6
1.3. Výzkumné otázky	6
2. ZÁKLADNÍ TEORIE A DATA	7
2.1. Konceptuální rámec	7
2.1.1 <i>Funkce bezpečnosti</i>	9
2.1.2 <i>Srovnání funkce bezpečnosti a relativní nehodovosti</i>	10
2.1.3 <i>Vysvětlovaná proměnná: ukazatele bezpečnosti</i>	12
2.1.4 <i>Vysvětlující proměnné: silniční data</i>	13
2.2. Data	16
2.2.1 <i>Základní členění sledovaných parametrů (proměnných):</i>	16
2.2.2 <i>Příprava dat: kvadranty okružní křižovatky</i>	18
2.2.3 <i>Příprava dat: existence okružní křižovatky</i>	19
2.2.4 <i>Příprava dat: závažnost</i>	19
2.2.5 <i>Explorační analýza</i>	20
2.2.6 <i>Analýza závislosti: korelace</i>	21
3. MODEL NEHODOVOSTI	22
3.1. Regresní analýza	23
3.2. Upravená forma modelu nehodovosti pro okružní křižovatky	25
3.3. Praktická aplikace GLM na model okružních křižovatek	26
4. ROZŠÍŘENÍ MODELU NEHODOVOSTI	27
4.1. Srovnání modelů dopravní nehody a závažnost	27
4.2. Významné proměnné vjezdu OK dle modelu nehodovosti	28
4.3. Omezení modelu nehodovosti	30
5. OVĚŘENÍ MODELU NEHODOVOSTI	30
5.1. Interní validita	31
5.2. Externí validita	32
6. SHRUTÍ A ZÁVĚRY	33
6.1. Odpovědi na výzkumné otázky	33
6.2. Výsledky a výstupy	35
6.3. Závěry pro další rozvoj teorie	35
6.4. Závěry pro realizaci v praxi	36
LITERATURA	37

1. OBLAST VÝZKUMU

V posledních cca dvaceti letech došlo k významnému navýšení úprav stávajících stykových a průsečných křižovatek na křižovatky okružní (OK). Jen na území Moravy v posledních pěti letech došlo k výstavbě několika desítek OK.

K užití OK v intravilánu/extravilánu místo průsečných a stykových vedly tvůrce (zadavatele, projektanty aj.) různé důvody. Bez předchozích dlouhodobých zkušeností v podmínkách ČR přineslo užití OK řadu dopravních problémů, které ovlivnily plynulost a bezpečnost dopravního proudu a následně životní prostředí a kvalitu života obyvatel (dopravní nehody, kongesce, hluk aj.).

Z *Metodiky hodnocení účinnosti opatření ke zvýšení bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích* [1] vyplynulo, že rozhodnutí o realizaci úpravy nebo výstavby křižovatky by mělo být založeno na posouzení očekávaných nákladů a přínosů vyplývajících z jejího budoucího provozu (s ohledem na plynulost a bezpečnost dopravy). Ústředním nástrojem posouzení nově navrhované OK by měl být model nehodovosti (založen na funkci bezpečnosti). Jedná se o matematický regresní model, který dává do souvislosti údaje o nehodovosti s provozními a geometrickými charakteristikami reprezentativního souboru OK. Cílem analýzy návrhových prvků je vyhledání spojitosti mezi jejich nastavením a nehodovostí OK zastoupenou četností dopravních nehod (DN). Účelem této práce je analýza návrhových prvků OK, která povede k identifikaci těch nejvlivnějších z pohledu bezpečnosti.

Na poli vědy a výzkumu se tématem modelů nehodovosti zabýval již projekt VEOBEZ [3]. Jeho výstupem byl základní model nehodovosti definovaný cca 90 OK. Navazující projekt VEOBEZplus [2] řešil stejnou tematiku na rozšířeném vzorku 143 OK. Tato práce pokračuje ve zmiňovaných projektech, rozšiřuje datovou základnu na 200 OK a zavádí do analýzy podrobnější segmentaci vzorku nehod i s ohledem na rok výskytu nehody.

1.1. Terminologie

Bezpečnost (viz publikace [27]) představuje stav, kdy jsou na nejnížší možnou míru eliminovány hrozby pro referenční objekt a jeho zájmy. Referenční objekt bezpečnosti je takový, který vnímá určitou hrozbu jako hrozbu samotnému přežití jednotky (nebo jeho zájmů). Může se jednat stejně tak o jedince, sociální skupinu, stát nebo mezinárodní systém. V dopravě používáme pojem bezpečnost v následujících úpravách: dopravní bezpečnost, popř. bezpečnost silničního provozu.

Bezpečnost silničního provozu představuje soubor opatření, postupů a zásad, dle kterých se pozemní komunikace (PK) realizují. Účelem je minimalizování konfliktních situací a zabránění vzniku dopravních nehod. Za bezpečnou se považuje taková křižovatka, kde vozidla projíždějí bez omezení a negativního následku.

Dopravní nehoda (viz kapitola 4.5.6. ČSN 73 6100-2 [54]) je mimořádná událost, při níž vznikne újma na zdraví osob nebo škoda na věcech v přímé souvislosti s provozem dopravního prostředku nebo dopravního zařízení (např.: Následek chování

řidiče vozidla, které nedalo přednost v jízdě vozidlu na okruhu OK, představuje právě jednu dopravní nehodu).

Absolutní počet nehod (viz kapitola 4.5.7. ČSN 73 6100-2 [54]) je celkový počet nehod, ke kterým došlo na daném místě nebo úseku PK za dané časové období (např.: celkový počet nehod na vjezdu OK v roce 2016).

Dopravní nehodovost (viz kapitola 4.5.8. ČSN 73 6100-2 [54]) je ukazatel vyjadřující počet dopravních nehod připadajících na určitý počet vozidel, nebo obyvatel, nebo určitý dopravní výkon za určité časové období (např.: počet dopravních nehod na OK, které se uskutečnily v jednom roce, vztažený na počet obyvatel ČR).

Nehodovost je v této práci chápána jako celkový počet nehod vyskytujících se na vjezdech OK za období jednoho roku. Pojem bezpečnost je používán ve smyslu vnímání nebo i očekávání nějakého rizika spojeného s provozem na OK. Za bezpečnou se považuje ta OK, na které nevnímáme žádná rizika, jelikož nevykazuje nehody ani konflikty.

Relativní nehodovost (viz kapitola 4.5.9. ČSN 73 6100-2 [54]) je počet nehod vztažený na určitý dopravní výkon v daném místě nebo úseku za určité časové období (např.: představuje podíl počtu dopravních nehod za období a délky úseku).

1.2. Hlavní cíle

Hlavním cílem dizertační práce je provést analýzu návrhových prvků OK ve vazbě na nehodovost. Analýza těchto prvků by mohla přispět k optimalizaci nebo úpravě parametrů OK, které zvýší bezpečnost silničního provozu na OK.

Tato práce využívá model nehodovosti jako nástroj pro prokázání závislosti mezi návrhovými prvky a bezpečností křižovatky. Model je matematický předpis (funkce bezpečnosti) popisující vztah mezi návrhovými prvky (vysvětlujícími proměnnými) a nehodovostí prezentovanou počtem DN (vysvětlovanou proměnnou). Model nehodovosti postupně analyzuje jednotlivé návrhové prvky OK. Ty, u kterých se prokáže statistická významnost (na hladině významnosti pravděpodobně nižší jak 5 %), budou v modelu ponechány pro následující interpretaci nehodovosti na vjezdu OK.

Hlavní výstupy dizertační práce:

- statistická multifaktorová analýza nehodovosti na OK v prostředí ČR,
- model (modely) nehodovosti OK v ČR,
- identifikace významných návrhových prvků OK s ohledem na nehodovost.

1.3. Výzkumné otázky

Dopravní strukturu lze definovat křižovatkami (body/uzly) a mezi-křižovatkovými úseky (spojnicemi). Jejich návrh musí být efektivní a proveditelný.

Z pohledu efektivity návrhu PK lze analyzovat kapacitu, bezpečnost a ekonomickou návratnost. **Kapacita** sítě PK je vždy definována jejím nejslabším článkem. **Bezpečnost** je dalším kritériem efektivního návrhu PK. Vyjadřuje se prostřednictvím ukazatelů bezpečnosti (viz kapitola 2.2.1). **Ekonomiku** návrhu

komunikace lze odvodit z nákladu na realizaci a z návratnosti (například z počtu ušetřených nehod, které by jinak vznikly za stávajícího stavu).

Záměrem práce je vysledovat vztah návrhových prvků OK v kombinaci s provozním zatížením (RPDI) a bezpečnostními ukazateli (počet DN, závažnost). Ověřit závěry výzkumu a vývoje, které se touto problematikou zabývají. Pokusit se nalézt odpovědi (nebo je alespoň odvodit) na nejzákladnější otázky:

Jsou OK jedním z nejbezpečnějších typů uzlů na síti PK?

Zaručují vždy OK bezpečnost lokality na PK z principu, nebo se jedná pouze o mylně interpretovaný závěr převzatý ze zahraničí nebo z doslechu?

Je vhodné umožňovat přímý průjezd vozidlům na okružním pásu OK?

Stávají se na OK charakteristické nehody?

Vede vyšší hodnota RPDI na vjezdu OK k vyšší nehodovosti?

Mají OK nalézající se v intravilánu nižší nehodovost než OK v extravilánu?

Jsou OK se dvěma pruhy na okruhu nebezpečnější než OK s jedním pruhem?

Vedou větší průměry OK k vyšší nehodovosti?

2. ZÁKLADNÍ TEORIE A DATA

Na území ČR, ale i v zahraničí je výzkum a vývoj OK prováděn aktivně. Většina vyspělých zemí se o vývoj tohoto typu křižovatek na PK zajímá a věnuje nemalé úsilí k jeho zdokonalení. Dostupná literatura se však zabývá analýzou pouze jednotlivých návrhových prvků OK. Nejvíce diskutované návrhové prvky jsou: průměr OK, výskyt nebo šířka pojížděného prstence, počet pruhů na okruhu/vjezdu, poloměr vjezdu a výjezdu OK, úhel na vjezdu nebo na přímém průjezdu a rychlost vozidla na průjezdu křižovatkou.

Veškerý výzkum OK je založen na sběru dat, který lze rozdělit na geometrické prvky OK (silniční data), provozní hodnoty OK a bezpečnostní ukazatele (počet DN).

2.1. Konceptuální rámec

Koncept multifaktorové analýzy dopravní nehodovosti je založen na identifikaci kritických vlivů a kvantifikaci míry jejich působení na vznik DN. Lze ji provádět na infrastruktuře o rozloze kraje nebo státu. Pojem multifaktorová analýza označuje soubor postupů určených k analýze jevů, na které působí více než jeden vliv (faktor). Proto se tyto jevy nazývají víceproměnné nebo vícerozměrné.

Proces multifaktorové analýzy lze rozdělit do tří následujících kroků:

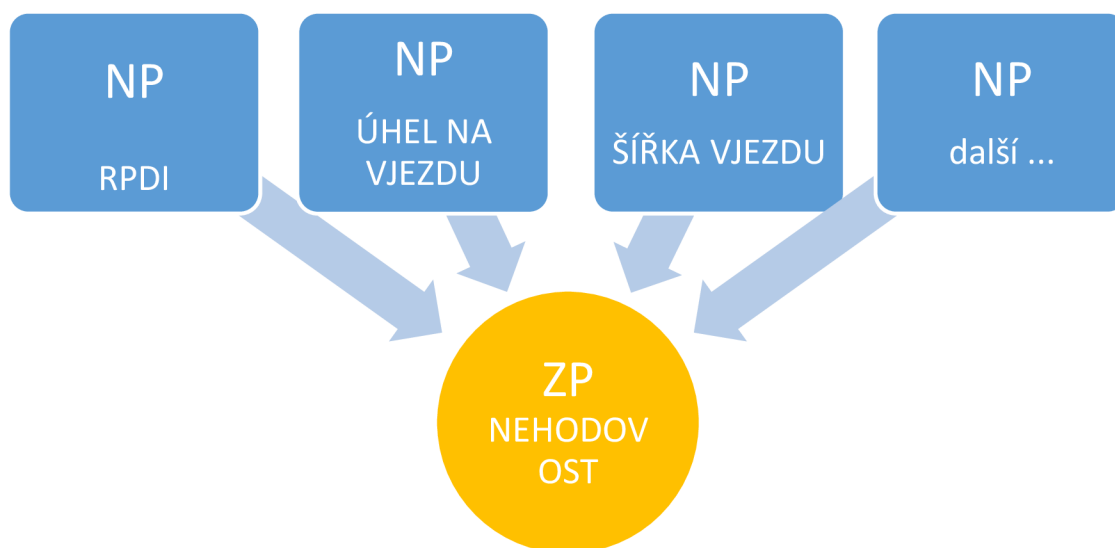
- 1) výběr analyzovaného jevu (počet DN na OK),
- 2) volba vlivů, jevů faktorů (RPDI, průměr OK, úhel na vjezdu aj.),
- 3) provedení analýzy (ověření faktorů a stanovení míry ovlivnění).

Tento druh analýzy se obvykle používá na úseky PK, ale je možné ho využít i na jakákoliv jiná místa na PK (křižovatky, sjezdy, přechody, přejezdy aj.). Výstupem je

rovnice (matematický předpis, model nehodovosti), která obsahuje jednotlivé významné proměnné.

K vyjádření vlivu jednotlivých proměnných na nehodovost byly využity přístupy kvantitativního výzkumu. Ten se zabývá vztahy mezi proměnnými, jejichž hodnotami mohou být čísla nebo kategorie. Proměnné se dělí na dva druhy. **Závislá proměnná (ZP)** představuje **vysvětlovanou proměnnou**, kterou je v tomto případě dopravní nehodovost (viz obr. 1 a literaturu [18]). **Nezávislé proměnné (NP)** představují **vysvětlující proměnné (faktory)**.

Teoreticky by nezávislé proměnné měly reprezentovat příčiny a závislé proměnné jejich důsledek. To však platí pouze v oblasti experimentálního (laboratorního) výzkumu, kdy se pomocí manipulace s nezávislou proměnnou zjišťuje vliv na závislou proměnnou. Předpokládá se, že tento jev není zkreslen žádnou jinou proměnnou. Toto však v oblasti přepravy osob a věcí nelze předpokládat, proto je vhodnější používat pojem vlivy a faktory. Z pohledu mechanismu DN jsou tři známé a běžně používané množiny faktorů: člověk, vozidlo a prostředí.



obr. 1. Obecný konceptuální rámec

Obecně platí, že vlivy (tj. faktory, nezávislé proměnné) by měly být voleny na základě teorie. V oblasti bezpečnosti dopravy však bohužel ustálené teorie stále chybí. Dopravní jevy lze zkoumat pouze neexperimentálně – pozorováním. Při tomto výzkumu se využívá přirozená variabilita nezávislých proměnných.

Explorační analýza představuje průzkum dat (angl. exploratory data analysis, EDA) a odhaluje zvláštnosti, nebo extrémy ještě před vlastním statistickým zpracováním.

Analýza vzájemných závislostí proměnných je v této práci provedena dle postupu popsaného v metodice [19]. Jedná se o korelační analýzu, která odpovídá na otázku „*Jak silná je závislost mezi proměnnými?*“, a regresní analýzu, která poskytuje odpověď na otázku „*Jak vypadá závislost mezi proměnnými?*“. Důležité však je, že statistická závislost nemusí znamenat příčinnost (kauzalitu, tj. vztah mezi příčinou a následkem).

Zobecněný lineární model (angl. generalized linear model, GLM) umožňuje modelovat závislost vysvětlované proměnné na jedné nebo více proměnných (faktorech), které mohou opět být spojité nebo kategorické. **Důležitou předností GLM je, že umožňuje modelovat proměnné i s jinými pravděpodobnostními rozděleními, než je normální rozdělení použité v klasickém modelu regrese.** Zobecněný (nelineární) regresní model obvykle vystihuje nějakou fyzikální nebo empirickou závislost.

Z formálního hlediska lze rozlišit dva typy náhodných veličin. **Diskrétní (nespojité) náhodná veličina** je taková, která může nabývat pouze jednotlivých hodnot (celých čísel, např. 1, 2, 3, ... 1568 voz/h). **Spojité náhodná veličina** je taková, která může nabývat všech hodnot z konečného nebo nekonečného intervalu (desetinná čísla, např.: rychlost vozidel 50, 56, ... 62,25 km/hod).

2.1.1 Funkce bezpečnosti

Nehodovost lze dle publikace Turner and Wood 2009 [24] (nebo také Turner a spol. 2009 [9]) vyjádřit v jednoduché formě mocninnou funkcí dle vzorce (01). N zde představuje počet nehod identifikovaných ve vazbě ke zkoumanému prvku PK. Intenzita I představuje právě jednu vysvětlující proměnnou, a a b jsou konstanty (regresní koeficienty), které je nutné identifikovat.

$$(01) \quad \text{Jednoduchá funkce bezpečnosti} \quad N = a \cdot I^b \quad [\text{počet } N]$$

Intenzita I (popřípadě RPDÍ aj.) představuje ve funkci bezpečnosti hodnotu, která má zásadní vliv na průběh funkce bezpečnosti z pohledu expozice sledovaného děje N , a to následovně:

- N může nabývat pouze kladných hodnot,
- N může nabývat hodnot, pouze když je $I > 0$,
- N nemůže nabývat větších hodnot než je hodnota intenzity I ($N \leq I$).

Konstanta a je odvozena z vyšetřované proměnné I . Nejvíce bývá ovlivněna hodnotou počtu nehod N a intenzitou I v modelu (viz tab. 8 tezí). Pokud zkoumáme prvek s vysokou hodnotou počtu nehod N a intenzitou I , tak lze očekávat vyšší hodnotu konstanty v modelu a naopak. Analýzou provedenou v této práci bylo dále zjištěno, že s rostoucím počtem proměnných zahrnutých do modelu nehodovosti hodnota konstanty klesá (viz srovnání hodnoty konstanty a v kapitole 4. dizertační práce).

Konstanta b definuje průběh funkce bezpečnosti (tvar). Jeho znaménko (+) znamená: I roste a N roste, anebo I klesá a N klesá. Jeho znaménko (–) znamená I roste a N klesá, nebo I klesá a N roste (podrobněji viz kapitola 2.1.4).

Složitější forma funkce bezpečnosti pro OK obsahuje více proměnných (viz vzorec (02)). Postup její tvorby je uveden v kapitole 3.2 na straně 25.

$$(02) \quad \text{Složitější funkce bezpečnosti} \quad N = a \cdot I^b \cdot e^{\sum c_i x_i} \quad [\text{počet } N]$$

Při vývoji složitější funkce bezpečnosti je počet nehod N dále ovlivněn součinem konstanty a , mocninným tvarem proměnné intenzity I^b a dalšími proměnnými X , u kterých se předpokládá exponenciální tvar funkce.

Tvar funkce bezpečnosti vyplývá jako konsenzus, na kterém se usnesli výzkumníci zabývající se bezpečností silničních komunikací (dále viz literaturu *Road transport research, Road safety principles and models* [48] a také [49]).

2.1.2 Srovnání funkce bezpečnosti a relativní nehodovosti

Funkci bezpečnosti lze využít především pro zpřesnění výsledků při vyhledávání kritických prvků PK. Funkce bezpečnosti je ve srovnání s tradičním lineárním ukazatelem bezpečnosti výhodnější. Běžně využívaným ukazatelem bezpečnosti je relativní nehodovost (definice viz kapitola 1.1, a následující vzorec (03)). Tento ukazatel má však několik nevýhod, které jsou dále prezentovány.

$$(03) \quad \text{Relativní nehodovost} \quad R = \frac{N}{365 \cdot I \cdot t} = \operatorname{tg} \alpha \quad [\text{nehody/voz}]$$

Ve vzorci je

R relativní nehodovost,

N počet DN (těch, které se opravdu staly) [-],

I průměrné zatížení na lokalitě (většinou se užívá RPD) [voz/24hod],

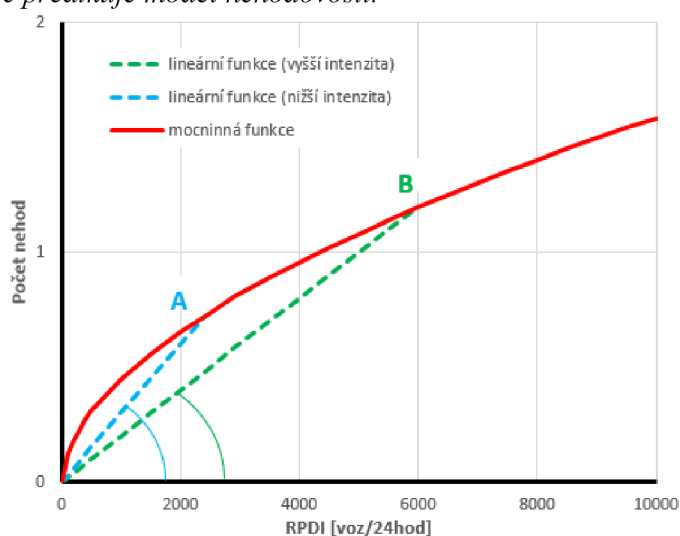
t sledované období, počet roků [roky].

Například při řešení běžné úlohy stanovení očekávaného počtu nehod $N_{\text{oček}}$ vycházíme ze vzorce (04)). Pro tento vzorec byla stanovena $\operatorname{tg} \alpha$ dle vzorce (03) z hodnoty stávající intenzity I (kupříkladu 2000 voz/den viz bod A na obr. 2) a uskutečněného počtu nehod N za sledované časové období.

$$(04) \quad \text{Očekávaný počet } N_{\text{oček}} \text{ z relativní nehodovosti} \quad N_{\text{oček}} = \operatorname{tg} \alpha \cdot I \quad [\text{nehody/voz}]$$

$N_{\text{oček}}$ představuje očekávaný počet nehod, které predikuje model nehodovosti.

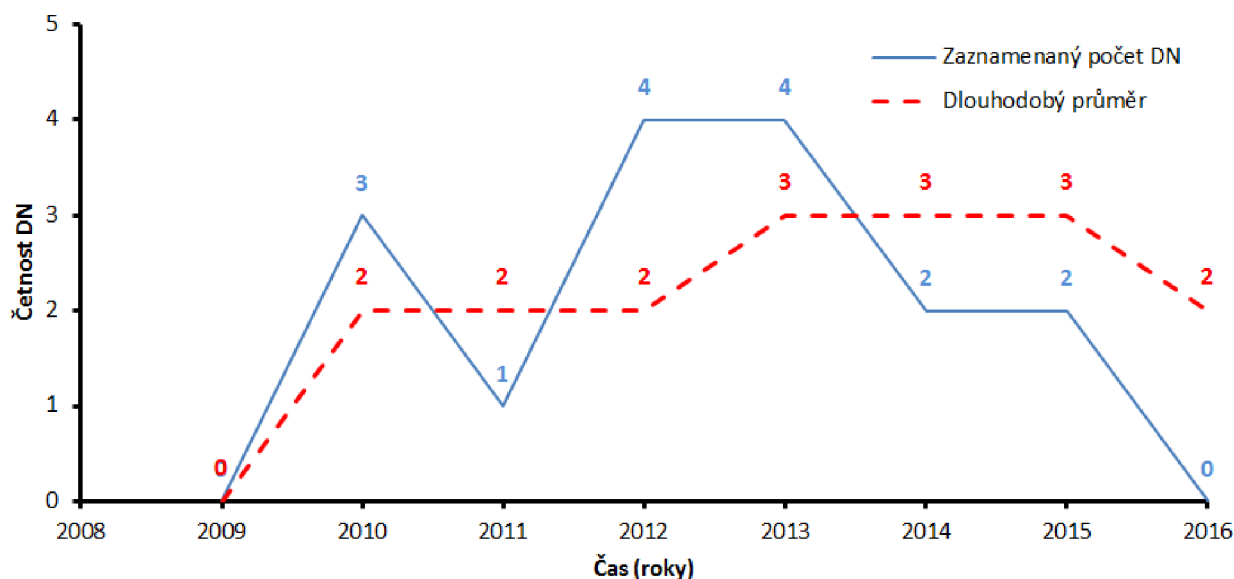
Pokud má ve výhledu dojít ke zvýšení intenzity (např. 6000 voz/den, viz bod B na obr. 2), pak stanovujeme novou hodnotu $\operatorname{tg} \beta$ ze stejného počtu nehod N a výhledové intenzity I . Využitím vzorce (03) však dospějeme k závěru, že relativní nehodovost R je ve výhledu menší, jelikož směrnice B je menší než směrnice A . Což lze interpretovat tak, že s rostoucí intenzitou I se lokalita stává bezpečnější. Přitom jsme však neprovedli žádnou změnu nebo úpravu předmětné lokality.



obr. 2. Využití relativní nehodovosti

Pro úlohu stanovení účinnosti úpravy lokality před a po její realizaci je také běžně využívána hodnota relativní nehodovosti (vzorec (03)). Za podmínky, že srovnáváme stejně dlouhá období před a po úpravě, lze předchozí vzorec upravit na hodnotu směrnice $tg \alpha$. V tomto případě dochází ke srovnání relativní nehodovosti lokality (před úpravou a po úpravě) za stejné (podobné) hodnoty intenzity I v obou stavech, ale jiného počtu nehod N . Výsledek lze interpretovat tak, že došlo ke změně nehodovosti. Nelze však dosledovat příčinu této změny, nebo vyloučit náhodný jev.

Další běžně využívanou metodou odhadu DN je použití kumulativního průměru počtu DN. Na obr. 3 je prezentován jeho dlouhodobý vývoj. V každém roce sledovaného období byl zaznamenán absolutní počet DN (modrá linie) a s postupem času byl také stanoven kumulativní průměr DN (červená přerušovaná čára). Z obr. 3 vyplývá, že ve třech případech (rok 2010, 2012, 2013) došlo k podcenění očekávaného počtu DN a to za předpokladu, že nedošlo k žádné úpravě lokality. Změny v absolutních hodnotách DN se mohou jevit jako náhodné. Mechanismus DN však obsahuje i systematickou složku, kterou kumulativní průměr DN nezohledňuje. Tento jev se nazývá regrese k průměru. Komplikuje výběr kritických lokalit a zkresluje účinky úpravy PK (viz publikaci Hauer 1997 [21]). Regresi k průměru lze navíc ovlivnit prodloužením sledovaného období.



obr. 3. Vývoj nehodovosti na reálné OK

K určení faktorů ovlivňujících DN a vyloučení náhodného jevu je tedy vhodné využít multifaktorovou analýzu založenou na funkci bezpečnosti. Prvním krokem je vytvoření jejího jednoduchého tvaru (obsahuje pouze intenzitu, nebo RPDI) a následně její rozšíření o další proměnné, které zohlední vliv složek mechanismu DN (prostředí, řidič vozidlo).

Tato práce se na následujících stranách zabývá prohloubením jednoduché formy funkce bezpečnosti pomocí silničních dat. Rozšíření funkce bezpečnosti o další proměnné X se provádí součinem dalších proměnných, viz vzorec (09) modelu nehodovosti jízdy OK na straně 25.

2.1.3 Vysvětlovaná proměnná: ukazatele bezpečnosti

Nehodovost (počet DN) představuje vysvětlovanou proměnnou, která závisí na mnoha jiných faktorech (viz mechanismus DN: řidič, prostředí a vozidlo). Tyto složky dále obsahují jednotlivé popisné faktory, jejichž veličiny nemají lineární průběh.

Kupříkladu reakční doba řidiče je v každém okamžiku jeho jízdy jedinečná a neopakovatelná. Souvisí se zkušenostmi řidiče, jeho tělesnou konstitucí a složitostí dopravní situace (tyto parametry je velmi obtížné kvantifikovat). Dále pak zpomalení vozidla, které souvisí s jeho technickým stavem, ale i reakcí řidiče a povrchem vozovky, nemá zcela jednoduchý průběh.

Proměnná zahrnuje počet všech zaznamenaných nehod Policií ČR. Nejedná se však o úplný (absolutní) počet uskutečněných nehod na předmětných OK. Existuje nemalý podíl nehod, které nejsou evidovány v záznamech Policie ČR. Neúplnost tohoto ukazatele bezpečnosti má vliv na funkci bezpečnosti. Jeho rozsah je těžké identifikovat. Nejedná se totiž o systematickou chybu, kterou by bylo možné odstranit logickou úpravou. Řešení spočívá v databázích pojišťoven a soukromých asistenčních služeb. Současně je v jednání přístup k těmto doposud neanalyzovaným datům, která by zpřesnila funkci bezpečnosti.

DN představují proměnnou, kterou je našim cílem vysvětlit pomocí silničních dat a dopravního zatížení. Vysvětlení hledáme pomocí statistické multifaktorové analýzy nehodovosti. Rozlišujeme systematickou a náhodnou složku tohoto jevu. Přitom je naší snahou maximálně omezit tu náhodilou. Dle publikací Hauer 1997 [21], Persaud 2001 [22], Reurings 2005 [23] mají nehodová data pro sledovaný prvek PK několik důležitých vlastností:

- vykazují často nulovou hodnotu (lokality bez nehod),
- vykazují velmi malé počty nehod (1, 2, 3) nebo žádné (viz nulovou hodnotu),
- jsou to diskrétní (nespojité) data, nabývají pouze celých čísel, nemohou nabývat zlomků ani desetin,
- jejich četnost nepodléhá normálnímu rozdělení pravděpodobnosti. Častou náhradou rozdělení může být Poissonovo rozdělení, nebo je vhodné přistoupit k **negativně binomickému rozdělení** (viz Lord a spol., 2006 [8]).

Závažnost (podrobněji viz kapitola 2.2.4) představuje alternativní vysvětlovanou proměnnou, která v této práci byla experimentálně použita pro analýzu vlivu návrhových prvků OK. Závažnost byla stanovena na základě výskytu typu zranění osob u jednotlivých zaznamenaných nehod. Počet těchto zranění byl pomocí celospolečenských ztrát použit jako váha k příslušným dopravním nehodám. Pomocí tohoto ukazatele se podařilo identifikovat obdobné prvky OK s podobným vlivem na bezpečnost (viz Šenk a Ambros, 2011 [6], [7]). Navíc se podařilo identifikovat další dva prvky OK, a to výskyt přechodu pro chodce a zástavbu. Zástavba úzce souvisí s rychlostí vozidla, kterou v této práci substituuje. Výskyt přechodu pro chodce souvisí se závažností zranění (chodci obvykle utrpí závažné nebo smrtelné zranění).

Z výše uvedeného vyplývá, že pro statistickou analýzu nehodovosti nelze použít konvenční statistické metody, jako je regrese nebo korelace. Ty pracují jen se spojitými proměnnými, které mají normální rozdělení.

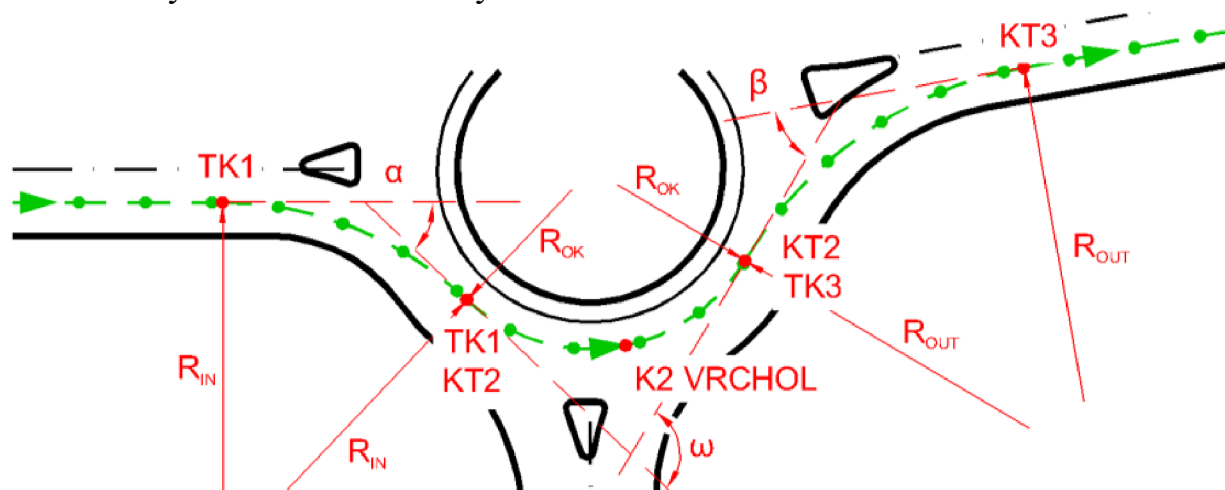
2.1.4 Vysvětlující proměnné: silniční data

Faktory mechanismu DN, jako jsou řidič, vozidlo a prostředí, představují skupiny vysvětlujících proměnných, které ovlivňují vznik, průběh a následek DN. Identifikace vlivu těchto faktorů je nezbytná pro stanovení efektivity úpravy PK a jejich součástí (viz metodiku [25]). Haddonova matice, která je zobrazena v tab. 1, slouží pro identifikaci faktoru, který má vliv na DN (viz Williams 1999 [26]).

tab. 1. Haddonova matice s příklady příslušných oblastí

Fáze / Faktory	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

Na poli výzkumu mechanismu DN stále převládá názor, který upřednostňuje identifikaci typizovaných příčin. Nasvědčuje tomu i způsob sběru údajů o DN Policií ČR. Snažíme se tak identifikovat těžiště příčin DN. Tento přístup se však dle aktuálních poznatků *Bezpečnosti silničního provozu* (Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. a jeho kolektiv, 2011 [27]) jeví jako nevhodný, jelikož DN není ovlivněna pouze jedním faktorem, ale souhrou mnoha. Faktory před nehodou určují její vznik a pravděpodobnost výskytu, faktory při nehodě určují závažnost zranění a faktory po nehodě určují rozsah následků. Např. úhel na přímém průjezdu ω (viz obr. 4), spadá do fáze před nehodou a do faktoru prostředí (PK). Je předpoklad, že s jeho menšími hodnotami, které se blíží nule, je řidičům umožněn přímý nerušený průjezd bez výrazného omezení rychlosti. To může vést k vyšší nehodovosti a vyšším následkům DN.



obr. 4. Parametry průjezdu vozidla OK

V následující tab. 2 jsou uvedeny jednotlivé návrhové prvky OK, včetně jejich očekávaného vlivu ve funkci bezpečnosti. Práce je zaměřena výhradně na proměnné spadající do faktoru prostředí (pozemní komunikace). V tab. 2 jsou shrnuty předpoklady a očekávaný vliv na směr závislosti proměnné X (pozitivní (+) nebo negativní (-)) ve funkci bezpečnosti. Tyto předpoklady mají sloužit ke kontrole funkce. Ve skutečnosti je však nutné předpokládat spolupůsobení faktorů, také to že závislosti nebývají lineární (Hauer 2004 [28]) a vliv faktoru se může lišit dle typu nehody (Martensen and Dupont 2013 [29]).

Pozitivní závislost (znaménko plus u směru závislosti proměnné X v tab. 2) znamená, že s rostoucí hodnotou proměnné X dojde k nárůstu očekávaného počtu nehod N (např. větší šířka vjezdu způsobuje větší nehodovost). Naopak pokles hodnoty proměnné X způsobuje pokles očekávaného počtu N (např. užší vjezd, vyžaduje nižší rychlost vozidel, to vede k nižší nehodovosti).

Negativní závislost naopak (znaménko minus u směru závislosti proměnné X v tab. 2) znamená, že s rostoucí hodnotou proměnné X dojde ke snížení očekávaného počtu nehod N (např. větší délka kolize vede k nižšímu počtu N). Naopak pokles hodnoty proměnné X způsobuje nárůst očekávaného počtu N (např. kratší délka kolize, je spojena s kratší délkou rozhledu, což vede k vyššímu počtu N).

tab. 2. Přehled očekávaného vlivu návrhových prvků OK na nehodovost

Prvek (rizikový faktor)	Předpoklad	Směr závislosti	Prvek (rizikový faktor)	Předpoklad	Směr závislosti
Úhel na vjezdu α	>	< N (-)	Typ křižovatky	1 s jedním pruhem na okruhu 2 se dvěma pruhy na okruhu 3 miniokružní 4 spirála 5 mimoúrovňová	1 < 2 Ostatní těžké odhadnout
Úhel na přímém průjezdu ω	>	< N (-)	Lokalita	1 extravilán 2 intravilán	> N (+) < N (-)
Úhel na výjezdu β	>	< N (-)	Konzistence kategorie komunikace	0 všechna ramena stejné kategorie 1 alespoň jedno jiné kategorie	< N (-) > N (+)
Poloměry na vjezdu/průjezdu/výjezdu	>	> N (+)	Výskyt zastávky HD	0 ne 1 ano	< N (-) > N (+)
Průměr křižovatky	>	> N (+)	Výskyt parkování	0 ne 1 ano	< N (-) > N (+)
Průměr středního ostrova	>	> N (+)	Výskyt sjezdu	0 ne 1 ano	< N (-) > N (+)
Odchylka úhlů mezi rameny	>	> N (+)	Vliv jiného charakteru provozu (rameno)	1 extravilán 2 intravilán	> N (+) < N (-)

Prvek (rizikový faktor)	Předpoklad	Směr závislosti	Prvek (rizikový faktor)	Předpoklad	Směr závislosti
Odsunutí paprsku vjezdu	>	> N (+)	Změna směru provozu	1 vjezd 2 výjezd 3 obousměrný	< N (-) - > N (+)
Kolizní vzdálenost	>	< N (-)	Změna typu křižovatky	1 průsečná 2 styková 3 vidlicovitá 4 odsazené 5 hvězdicovitá 6 okružní 7 mimoúrovňová	Těžké odhadnout
Šířka vjezdu	>	> N (+)	Počet pruhů na vjezdu	0 bez pruhu 1 pruh 2 pruhy	- < N (-) > N (+)
Šířka výjezdu	>	> N (+)	Počet pruhů na výjezdu	0 bez pruhu 1 pruh 2 pruhy	- < N (-) > N (+)
Šířka okružního pásu	>	> N (+)	Počet pruhů na okruhu	1 pruh 2 pruhy	< N (-) > N (+)
Šířka pojižděného prstence	>	< N (-)	Výskyt pojižděného prstence	0 ne 1 ano	> N (+) < N (-)
Šířka bypassu	>	> N (+)	Výskyt bypassu	0 ne 1 ano	< N (-) > N (+)
Intenzita	-	-	Počet ramen OK	3 ramena 4 ramena 5 ramen 6 ramen	Těžké odhadnout
Rychlost	>	> N (+)	Výskyt přechodu pro chodce	0 ne 1 ano	< N (-) > N (+)
			Kruhový tvar okruhu křižovatky	0 ne 1 ano	< N (-) > N (+)

Vysvětlující proměnná X představuje potenciální faktor ovlivňující bezpečnost sledovaného vjezdu OK nebo jakéhokoliv jiného sledovaného prvku na PK. V této práci byly primárně sledovány geometrické prvky, které prezentují statickou složku mechanismu DN. Tyto parametry byly vybrány na základě běžně používaných předpisů ČR a dostupné literatury. Ostatní faktory, jako počasí, řidič nebo vozidlo, nebyly sledovány. Tyto parametry vyžadují detailnější sběr dat, který je časově ale i finančně nad rámec možností dizertační práce. Převzetí ze zahraničních studií a využití poznatků, je možné, ale pouze pro srovnávací účely. Použitá funkce bezpečnosti reprezentuje pouze zkoumaný vzorek dat. Kombinace regresních koeficientů z jiných modelů by vedla k mylným závěrům.

S ohledem na použitou metodu analýzy je také nutné uvažovat správnou parametrizaci proměnných. OK představuje uzel na silniční infrastruktuře, kde je umožněna výměna směrů. Zpravidla se zde střetává více komunikací s jiným

uspořádáním (s jinými návrhovými prvky). Proto je na rozdíl od úseku PK možné získat pro křižovatku více hodnot jedné sledované proměnné, např. šířky vjezdu, vjezdového úhlu. Parametrizace pomocí minima, maxima nebo průměru může mít velký vliv (podrobněji viz kapitolu 2.2.2). Proto byl model v této práci upraven z funkce bezpečnosti OK na funkci bezpečnosti vjezdu OK.

RPDI představuje vysvětlující proměnnou, která je současně mírou expozice sledovaného jevu (DN). Základní okrajovou podmínkou je, že pokud není žádné zatížení ($RPDI = 0$ voz/24 hod), DN se nemůže stát. Obecně lze potvrdit, že s vyšší hodnotou RPDI lze očekávat i vyšší počet DN. Tuto skutečnost však ovlivňují další faktory (proměnné).

2.2. Data

Tato kapitola se zabývá využitelností dat pro model nehodovosti, pro který představují data základní vstupní hodnoty. Výběr evidence a archivace sledovaných dat je podstatou kvalitního modelu. Sledované návrhové prvky OK (charakteristiky/indikátory/proměnné) byly vybrány ve vazbě na výsledky dosavadního domácího a zahraničního výzkumu se zaměřením na české předpisy návrhu a kapacitního posouzení OK (TP 135 [50], TP 234 [51], ČSN 73 6101 [52], ČSN 73 6102 [53]) a zahraniční literaturu (např.: HCM 2010 [17] aj.).

Rozsah výběrového šetření je 1200 identifikovaných OK na území ČR. Po selekci s pohledem na dostupnost všech potřebných parametrů, z pohledu návrhových prvků provozního zatížení a ukazatelů bezpečnosti bylo vybráno pro analýzu 200 OK. V této práci jsou prezentována data pouze na jednotlivých existujících vjezdech OK. Celkem je analyzováno 6194 stavů vjezdů OK v jednotlivých letech (2009 až 2016). Jedná se o vzorek s velkým výběrem.

2.2.1 Základní členění sledovaných parametrů (proměnných):

Pro analýzu návrhových prvků OK v závislosti na nehodovosti byl proveden sběr dat ve třech skupinách, a to: silniční data (parametry/geometrie OK), data o provozu (zatížení) a data o ukazatelích bezpečnosti (nehodovost).

Silniční data (neboli návrhové/geometrické prvky) byla pořízena ze dvou základních zdrojů: vektorové mapy silniční sítě ČR [30] založené na datech ze Silniční databanky ŘSD [13], druhým zdrojem byl portál Mapy.cz [16]. Ze základního souboru dat OK v ČR, děleného dle počtu ramen a lokality, vyplývá následující: Nejvíce OK je čtyřramenných (cca 700). Nejvíce OK se nachází v intravilánu (cca 960). ŘSD neviduje cca 75 % OK. Nejvíce OK je s jedním pruhem na okruhu (cca 930). Minimální zastoupení mají mimoúrovňové OK (5), mini okružní křižovatky (83), OK se dvěma pruhy na okruhu je (44). Nejvíce OK se nachází na místních komunikacích (259), a na silnicích I. třídy (195). Minimální počet OK se vyskytuje na D, R a účelových komunikacích. Výčet sledovaných parametrů: úhel na přímém průjezdu křižovatkou, úhel na výjezdu z křižovatky, kruhový tvar okruhu křižovatky, průměr křižovatky, průměr středového ostrova, úhel mezi rameny, odsunutí paprsku vjezdu, kolizní vzdálenost, počet pruhů na okruhu, počet pruhů na vjezdu, počet pruhů na výjezdu, šířka

okružního pásu, šířka poježděného prstence, šířka vjezdu, šířka výjezdu, výskyt bypassu, šířka bypassu, nejvyšší kategorie komunikace na vjezdu do křižovatky, konzistence kategorie na vjezdu do křižovatky, výskyt zastávky HD na vjezdu do křižovatky, výskyt parkování na vjezdu do křižovatky, výskyt sjezdu na vjezdu do křižovatky, vliv jiného charakteru provozu, změna směru provozu na ramenu křižovatky, změna typu křižovatky v okolí, výskyt přechodu pro chodce, počet ramen OK, typ křižovatky, lokalita.

Provozní data představují v modelu nehodovosti OK parametr, který je pro analýzu bezpečnosti návrhových prvků nezbytný. Provoz na OK je charakterizován prostřednictvím intenzity dopravy, tj. RPDI stanoveného z výsledků Celostátního sčítání dopravy 2010 [12]. Hodnota RPDI do modelu vstupuje jako součet vozidel na vjezdu do OK. Vypočte se jako polovina součtu všech RPDI na jednotlivých ramenech OK. Pro bezpečnostní model zaměřený pouze na vjezdy se bude jednat pouze o poloviční hodnotu RPDI na příslušném rameni. Výčet sledovaných proměnných následuje: součet vozidel vjíždějících do OK (tj. polovina z RPDI na každém rameni OK), podíl TNV na vjezdu do OK. Výchozím zdrojem pro provozní zatížení OK byly údaje z Celostátního sčítání dopravy (CSD) 2010. Pro jiné roky byly využity růstové koeficienty (postup viz v TP 225 [54]).

Bezpečnostní ukazatele vycházejí ze sledování parametrů bezprostředně souvisejících s nehodami. Celkem bylo vyhledáno 200 OK, kde bylo možné doložit RPDI na všech vjezdech. U tohoto vzorku křižovatek bylo v letech 2009 až 2016 nalezeno 2674 DN, z toho 611 se zraněním a 2063 pouze s hmotnou škodou. Na všech OK evidovaných v ČR bylo evidováno 7600 DN (se zraněním 1896 a 5704 jen s hmotnou škodou). Analýza tedy zahrnuje cca 35 % DN na OK v ČR. Výčet bezpečnostních ukazatelů následuje: součet DN celkem v oblasti křižovatky, závažnost DN, data z dopravní nehodovosti jsou uvažována za léta 2009 – 2016.

Pro metodologii této práce představují vstupní data základ. Kvantita a kvalita dat přímo souvisí s vypovídající hodnotou výsledku bezpečnostní funkce.

Kvalita silničních dat je ovlivněna obsahem dat databanky [13], která je poměrně rozsáhlá, ale neobsahuje podrobné informace o křižovatkách. Tyto informace je nevhodnější stále získávat z mapového díla mapy.cz nebo Národního archivu leteckých měřických snímků (viz NALMS [32]). Toto je však nutné provádět smluvně nebo vlastním průzkumem veřejného portálu. To je zdlouhavé a výsledek není jistý. Např. úhel na vjezdu je sice možné změřit. Opětovným měřením však lze získat několik různých výsledků (hodnot úhlu na vjezdu), proto je nutné tyto hodnoty opět průměrovat. Poloměry nelze volně dostupnými nástroji získat vůbec.

Z pohledu provozního zatížení je získávání dat o něco snadnější. RPDI je dostupné z opakovaných Celostátních sčítání dopravy (CSD) na základní síti komunikací v ČR. Jeho dostupnost na místních komunikacích je však ojedinělá. Vzhledem k tomu, že se podstatná část nehod na křižovatkách odehrává na zastavěném území (uvnitř měst a obcí), jsou tyto údaje nezbytné. Databáze zatížení dopravou v

intravilánu existují pouze ojediněle. Měření této proměnné je velmi zdlouhavé a nákladné. Pro model je však údaj o provozním zatížení nezbytný.

Kvantita je výsadní problém bezpečnostních ukazatelů. Data z dopravní nehodovosti jsou dostupná na veřejném portálu jednotné dopravní vektorové mapy (viz JDVM [30]). Podrobnější data, lze získat ze statistik Policie ČR. Nejpodrobnější data jsou obsažena v protokolu o DN. Zde je problém s jejich vytěžením. Velmi by pomohlo, pokud by byl dostupný digitální scan těchto formulářů. To samozřejmě vede k vyšším časovým nárokům na straně Policie ČR, ale i na straně dopravních analytiků.

Současně setrvává problém s nenahlášenými DN pouze s hmotnou škodou. Údaje o těchto nehodách zůstávají stále nezpracovány. Přitom o nich mají záznamy a přehled pojišťovny, které provádějí náhradu vzniklých škod. Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. se dlouhodobě snaží získat přístup k těmto datům. Tato data však podléhají zákonu o ochraně osobních údajů. Rozšířením databáze o tuto část DN by došlo ke zvětšení vzorku nejčtenějšího typu DN na silniční infrastruktuře v ČR. Tento typ nehody je obzvláště nutný pro další analýzu bezpečnosti OK, kde jsou nehody se zraněním poměrně ojedinělé.

2.2.2 Příprava dat: kvadranty okružní křižovatky

Vzhledem k charakteru předmětného prvku (křižovatky) na PK je nutné zvážit ještě jedno hledisko z pohledu sběru dat. OK představuje místo na PK, kde se sbíhají tři a více PK. Každá z těchto PK má svoje vlastní parametry, které je nutné v místě jejich styku řešit. V případě realizace OK dochází v tomto uzlu ke vložení jednosměrné kruhové komunikace, do které se zaústí každé z připojovaných ramen. Tímto způsobem vznikají po sobě jdoucí stykové křižovatky.

Z pohledu sběru dat na OK existují dva typy návrhových charakteristik OK, a tím jsou společné a individuální charakteristiky. Těmi **společnými** jsou např. průměr OK, průměr ostrova, počet ramen, pojížděný prsteneček aj. Těmi **individuálními** jsou úhel na vjezdu, šířka vjezdu, poloměr vjezdu aj. Jedná se o charakteristiky, které jsou pro každé rameno, každý vjezd uzpůsobeny na míru. Avšak v případě výběru charakteristiky rizikového faktoru, jako je například úhel na vjezdu, to může způsobit zkreslení výsledku.

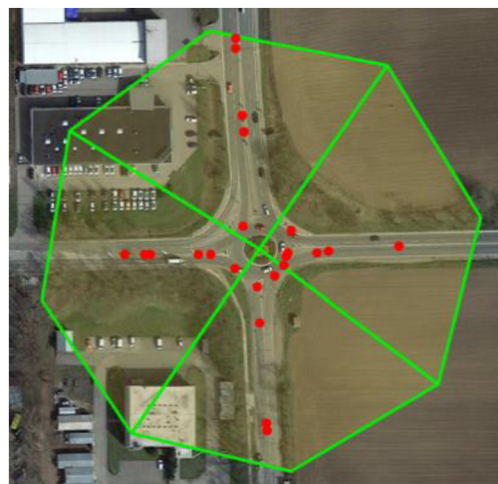
Pokud například uvažujeme čtyřramennou křižovatku, která je zobrazena na obr. 5 a obr. 6, zjistíme, že bypass se nachází pouze na severním rameni OK. Ostatní ramena bypass nemají. V případě stanovení charakteristické šířky pro bypass vzniká problém, jak to provést. Např. pomocí průměru, kdy dosadíme tři nulové a jednu nenulovou hodnotu. Analýza bude provedena na nevypovídající hodnotě šířky bypassu. V případě použití min. nebo max. hodnoty dojde také k nepřesné charakteristice. Nebudeme moci konstatovat, zda jsou DN ovlivněny právě min., nebo max. hodnotami vysvětlujících proměnných.

Tato problematika byla v práci vyřešena rozdělením OK do tzv. kvadrantů jednotlivých ramen křižovatky (viz obr. 6). Pomocí směrníku (úhel svírající paprsek vjezdu komunikace a orientace k severu) byly určeny úhly mezi jednotlivými rameny.

Ty pak byly zpětně přepočítány na směrníky, které jsou vždy o polovinu meziúhlu menší. Tak bylo 200 OK rozděleno na 781 kvadrantů (dle počtu ramen OK), které obsahují pouze výseč právě jedné komunikace a k tomu příslušnou část kruhového objezdu. Na základě této výseče byla do vzdálenosti 100 m od středu vyhledána data o ukazatelích bezpečnosti, která pak byla přiřazena do příslušného segmentu křižovatky. Pokud došlo při vyhledání v softwarovém prostředí QGIS [31] k překryvu vyhledávacích ploch, byla jejich vzdálenost upravena na poloviční mezi sousedícím středem OK. Tato metoda pomohla analyzovat charakteristiky vysvětlujících proměnných bez zkrácení pomocí průměru, minima, nebo maxima.



obr. 5. Data DN na OK: celek



obr. 6. Data DN na OK: kvadranty

2.2.3 Příprava dat: existence okružní křižovatky

Pro analýzu návrhových prvků OK s ohledem na nehodovost je nutné provést sběr dat o bezpečnostních ukazatelích za dlouhé monitorovací období. V případě této práce se jedná o data za roky 2009 až 2016. Za toto období 8 let se však na OK mohlo hodně parametrů změnit. Proto byla provedena vizuální kontrola jednotlivých OK dle portálu NALMS [32]. V každém roce sledovaného období byl prověřen stav křižovatky. Pokud byla zjištěna změna nebo úprava, nebo stav křižovatky nebylo možné dohledat či ověřit, byl stav OK ze sledovaného souboru vyloučen. Původně bylo v modelu uvažováno s 200 OK za dobu 8 let, tedy 1600 stavů. Po ověření jejich existence je možné do modelu zahrnout pouze 1549 stavů OK. V další části práce jsou prezentována data pouze na jednotlivých existujících vjezdech OK. Celkem je tedy analyzováno 6194 stavů vjezdů OK.

2.2.4 Příprava dat: závažnost

V této práci je experimentálně použitý další přímý ukazatel hodnocení bezpečnosti. Jedná se o závažnost DN stanovenou z průměrných hodnot celospolečenských ztrát dle metodiky [1]. Celospolečenské ztráty z DN představují finanční hodnocení DN na základě finančních prostředků vynaložených na odstranění a nahrazení škod vzniklých při DN. Jedná se o váhu DN, která představuje její závažnost (např. čím dražší nehoda, tím závažnější její následky). Ukazatel celospolečenských

ztrát umožnil srovnání výskytu DN dle jejich závažnosti na výchozí hladinu, kterou je nejčetnější skupina DN pouze s hmotnou škodou.

$$(05) \quad \text{Závažnost DN} \quad \text{Závažnost DN} = \frac{\text{Celospolečenská ztráta (SZ, TZ, LZ)}}{\text{Celospolečenská ztráta HM šk}} \quad [-]$$

Závažnost DN je vypočtena pro každou nehodu v příslušném roce jejího uskutečnění. Jedná se o relativní poměr zobrazený v tab. 03. Příslušná závažnost DN byla stanovena dosazením koeficientu závažnosti dle výskytu DN v roce a její závažnosti (dle počtu zraněných účastníků a výše hmotné škody na DN).

tab. 3. Závažnost a celospolečenské ztráty z DN (tis. Kč)

Ztráta	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
SZ	10653	17645	18572	18669	19440	20881	20790	20790
TZ	3577	4863	4783	5062	4868	5089	5034	5034
LZ	402	668	509	413	433	429	650	650
HMš	109	271	227	226	267	262	345	345
Závažnost	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
SZ	97,73	65,11	81,93	82,61	72,73	79,70	60,28	60,28
TZ	32,82	17,94	21,10	22,40	18,21	19,42	14,59	14,59
LZ	3,69	2,46	2,24	1,83	1,62	1,64	1,88	1,88
HMš	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00

2.2.5 Explorační analýza

Explorační analýza představuje průzkum dat a odhaluje zvláštnosti nebo extrémy ještě před vlastním statistickým zpracováním. Zobecněný lineární model (GLM) umožňuje modelovat závislost vysvětlované proměnné na jedné nebo více vysvětlujících proměnných (spojité nebo ordinální veličiny). Důležitou předností GLM je, že umožňuje modelovat proměnné i s jinými pravděpodobnostními rozděleními, než je normální rozdělení použité v klasickém modelu regrese.

Jako vysvětlovaná proměnná (ukazatele bezpečnosti) bude využit absolutní počet DN na OK za sledované období a dále potom závažnost.

tab. 4. Popisné charakteristiky vysvětlovaných proměnných

Charakteristika	Min.	Max.	Průměr	Směr. odch.
Počet DN	0	16	0,430	1,062
Závažnost	0	113,42	0,8303	3,59894

Jako vysvětlující proměnné (silniční data) budou použity jednotlivé návrhové prvky OK, které z pohledu mechanismu DN spadají do faktoru prostředí (geometrie PK aj.).

tab. 5. Popisné charakteristiky spojitéch vysvětlujících proměnných

Charakteristika	Min.	Max.	Průměr	Směr. odch.
RPDI	5	24520	4143,130	2897,944
podíl TNV	0	1	0,133308	0,0907732
Úhel na vjezdu	0	83	35,190	15,275
Úhel na přímém průjezdu	0	83	32,930	15,108
Úhel na výjezdu	0	171	55,600	28,632

Charakteristika	Min.	Max.	Průměr	Směr. odch.
Průměr křižovatky	19	139	42,200	21,437
Průměr středového ostrova	3	119	24,400	20,520
Odchylka úhlů mezi rameny	0	61	15,480	11,597
Odsunutí paprsku vjezdu	0	42	1,834	3,2255
Kolizní vzdálenost	0	106	16,903	10,8715
Šířka vjezdu	3	10	4,668	1,3180
Šířka výjezdu	3	10	4,859	1,1763
Šířka okružního pásu	4	10	6,671	1,4290
Šířka pojižděného prstence	0	6	1,807	1,1460
Šířka bypassu	0	7	0,343	1,2405

Z histogramů a testů pravděpodobnostního rozdělení (doloženo v plném znění dizertační práce) vysvětlujících proměnných vyplývá, že pravděpodobnostní rozdělení nepodléhá normálnímu rozdělení. Z grafů je navíc zřejmé, že závislosti nejsou lineární. Z těchto důvodů nelze pro model nehodovosti použít lineární regresi. Vysvětlující proměnné s malou četností bude nevhodnější z analýzy vyloučit.

Do modelu GLM bude nevhodnější použít tyto vysvětlující proměnné: RPDI, odchylku úhlů mezi rameny OK, kolizní vzdálenost, úhel na vjezdu (dělený do kategorie), výskyt pojižděného prstence, výskyt bypassu, charakter provozu (zástavba), výskyt přechodu pro chodce, typ vjezdu (uspořádání pruhů na vjezdu) aj.

2.2.6 Analýza závislosti: korelace

Protože vysvětlující proměnné jsou spojité bez normálního rozdělení a kategoriální proměnné, bylo nutné kombinovat Spearmanův a Kendallův korelační koeficient. V tab. 6 jsou zobrazeny korelační koeficienty pouze nad diagonálou a jsou zobrazeny pouze koeficienty proměnných, které spolu nekorelují a jsou již zahrnuty ve výsledném modelu (funkce bezpečnosti).

tab. 6. Korelační koeficienty vysvětlujících proměnných

Proměnné	Odchylka úhlu mezi R	Kolize	Alfa kategorie	Prstenc výskyt	Bypass výskyt	Charakter provozu	Výskyt přechod	Typ vjezdu
Odchylka úhlu mezi R	1	0,055	0,042	0,024	0,047	0,035	0,046	0,034
Kolize		1	0,167	0,245	0,016	0,228	0,116	0,439
Alfa kategorie			1	0,037	0,045	0,077	0,002	0,234
Prstenc výskyt				1	0,109	0,189	0,203	0,403
Bypass výskyt					1	0,089	0,022	0,062
Charakter provozu						1	0,407	0,211
Výskyt přechod							1	0,158
Typ vjezdu								1

Pro ověření vlivu parametrů vjezdu OK bylo realizováno 92 měření neovlivněných průjezdů na vybraných křižovatkách (podrobněji viz plné znění

dizertační práce). Korelace mezi rychlostí v jednotlivých bodech průjezdu OK a prvky vjezdu dokládá, že: rychlost 50 m před vjezdem na okruh křižovatky nejvíce koreluje s úhlem vjezdu (0,576) a s poloměrem vjezdu (0,616). Přitom poloměr vjezdu a úhel na vjezdu spolu také korelují (0,896). Tyto proměnné jsou závislé. Další korelaci lze dohledat mezi rychlostí v místě vjezdu (TK), vjezdovým úhlem (0,3) a vjezdovým poloměrem (0,464). Korelace je sice menší, ale přesto významná ve smyslu závislosti těchto proměnných. Vypovídá o tom, že řidiči přizpůsobují rychlost vozidla vzhledem k dopravní situaci a geometrii komunikace. Obdobných výsledků dosáhla i studie rychlostních charakteristik na průjezdu OK [33].

Do modelu nehodovosti (bezpečnostní funkce) není vhodné vkládat vysvětlující proměnné, které spolu korelují. Proměnné získané z analýzy průjezdu vozidla na přímém průjezdu OK lze označit jako kontrolní proměnné (KN). Dokládají podobnou korelaci mezi proměnnými z reálného průjezdu a z měření parametrů OK.

I když má rychlost zcela nepopiratelný vliv na počátek, průběh a hlavně na následky DN, musíme ji v této fázi vyloučit, hned ze dvou důvodů:

- rychlost koreluje s vjezdovým úhlem α i poloměrem R_{IN} ,
- rychlost není možné v tak rozsáhlém měřítku získat.

Alternativou pro rychlostní charakteristiky v modelu je její zastoupení pomocí jiné kategoriální proměnné. Např.: zástavba/charakter provozu ovlivňuje rychlost na komunikaci.

Poloměry jsou z bezpečnostní funkce taktéž vyloučeny, jelikož korelují se svými směrovými úhly. Navíc metoda jejich měření pro potřeby této práce není zcela spolehlivá.

3. MODEL NEHODOVOSTI

Běžným postupem pro hodnocení bezpečnosti jakékoliv lokality na PK je provedení prohlídky místa a následné zpracování zprávy obsahující: popis bezpečnostních rizik a vhodných opatření k jejich odstranění. Tento postup představuje jeden z četných nástrojů *Auditora bezpečnosti pozemních komunikací*. Kromě toho, že tento postup vyžaduje mnoho času, je obvykle zatížen subjektivním hodnocením auditora (ovlivněno: zkušenostmi, nebo i účelností). Nedostatek tohoto nástroje spočívá v jeho zaměření na lokální faktory. Z pohledu auditora jsou všechna identifikovaná bezpečnostní rizika lokální (vlastní předmětné lokality). K identifikaci těchto faktorů, které se opakují a způsobují podobné bezpečnostní deficity i na jiných lokalitách, dochází jen výjimečně.

Tato práce byla zaměřena zejména na identifikaci faktorů (návrhových prvků OK), které se opakují na dalších místech infrastruktury a mají podobný vliv na bezpečnost. Jedná se o multifaktorovou analýzu, založenou na funkci bezpečnosti, která je sestavena na základě regresní analýzy. Tato statistická metoda je schopna identifikovat faktor a jeho vliv na základě výskytu jeho vlivu na podobných lokalitách. Výhoda této metody spočívá v tom, že je prostá subjektivního hodnocení bezpečnosti. Nevýhodou je její závislost na kvalitě a rozsahu vstupních dat, což lze ovlivnit

navyšováním rozsahu výběru ze vzorku. Hlavní zásadou je dodržení rozmanitosti vzorku.

Pokud touto metodou byly identifikovány jako významné tyto návrhové parametry OK: RPDI, vjezdový úhel α , kolizní vzdálenost, odchylka úhlů mezi vjezdovými paprsky (rozložení ramen na OK), výskyt pojižděného prstence, výskyt bypassu, typ vjezdu, zástavba a přechod pro chodce, tak byly identifikovány na základě selektovaného výběru ze vzorku. Funkce bezpečnosti tedy vysvětluje pouze použitá data. Další použití modelu je závislé na zachování jeho vstupních podmínek. Lze očekávat, že při dalších analýzách budou výsledkem proměnné s podobnými výsledky, ale jejich výskyt nelze zaručit ve všech případech. Proto je důležité tyto modely i nadále srovnávat se zahraničními studiemi.

3.1. Regresní analýza

Funkce bezpečnosti je sestavena na základě regresní analýzy. Jedná se o statistickou metodu, pomocí které lze odhadnout hodnotu regresních koeficientů nezávislých proměnných a , b a c které definují průběh křivky modelu nehodovosti. Jinými slovy: vliv návrhových prvků OK lze odhadnout na základě zaznamenaných DN pozorovaných na OK. K tomu byl v této práci využit statistický program IBM SPSS [41] (dále pak je možné využít SAS nebo R).

Vstupní údaje:

- závislé proměnné (např.: počet DN, závažnost),
- nezávislé proměnné (např.: úhel na vjezdu, poloměr OK, RPDI aj.).

Poznatky k modelování:

Při modelování pomocí této metody, je nutné mít na paměti, že statisticky prokázaná závislost nemusí nutně znamenat příčinnost (kauzalitu, tj. vztah mezi příčinou a následkem, viz publikace Hebák a spol. 2013 [45], Hendl a spol. 2014 [46]).

Touto metodou dochází k identifikaci pravděpodobně nejvýznamnějších prvků, které mají vliv na bezpečnost v nejvyšší míře. Proto nelze předpokládat, že spolehlivost modelu R^2 bude dosahovat hodnot blízkých 100 %. Hodnota spolehlivosti modelu R^2 bude i nadále ovlivňována selektovaným výběrem ze vzorku. Dále tato metoda zahrnuje vliv lokálních proměnných a nahodilost DN. Dalším cílem by mělo být nalezení postupu, jak identifikovat právě ty nehody, u kterých byl vliv proměnných z modelu nejvýraznější, a ty pak ze vzorku odstranit. Dále pak provést opětovnou regresní analýzu a provádět selekci DN a proměnných až do chvíle, kdy ve vzorku zůstane pouze náhodná složka DN bez dalších faktorů.

Jelikož jsou předmětem modelování proměnné, které jsou kategoriální nebo spojité veličiny bez normálního pravděpodobnostního rozdělení, je nezbytné využívat tzv. zobecněnou lineární regresi (zobecněný lineární model, generalized linear model, GLM), která **umožňuje modelovat proměnné i s jinými pravděpodobnostními rozděleními**. V modelu se volí spojovací funkce g , vysvětlující proměnné X . 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 používá Poissonovo rozdělení, pro které se volí spojovací funkce (06).

$$(06) \quad \text{Spojovací funkce Poissonova rozdělení} \quad g(\mu) = \ln(\eta) \quad [-]$$

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). Pro inverzní funkci pak platí následující vzorec (07).

$$(07) \quad \text{Inverzní spojovací funkce Poissonova} \\ \text{rozdělení} \quad \mu = g^{-1}(\eta) = e^{\eta} \quad [-]$$

Poissonovo rozdělení však vyžaduje, aby průměr všech hodnot byl roven rozptylu. U proměnné jako jsou DN, to však obvykle neplatí. Vhodnější bude zvolit negativně binomické rozdělení, jehož rozptyl je roven průměru μ a jeho přírůstku $k \cdot \mu^2$. Kde k je disperzní parametr, který se určuje v průběhu modelování (viz Reurings a spol. 2005 [23], nebo Rune E. 2007 [4]). Disperzní parametr taktéž slouží k hodnocení kvality modelu.

Obecně se předpokládá, že s vyšším počtem proměnných se zvyšuje kvalita modelu, tedy proložení n -rozměrné funkce předmětným souborem dat. Současně také platí, že čím je model jednodušší (obsahuje méně proměnných), tím je spolehlivější (důvěryhodnější).

V modelování často dochází k záměně vysvětlujících proměnných, které představují skutečné příčiny a které představují potenciální rizikové faktory. Tyto proměnné by měly být jasně identifikovatelné, aby nedocházelo k mylné interpretaci výsledku modelu (viz kauzální a predikční modely, Persaud 2001 [22]).

Z názvu predikčního modelu může dojít k mylnému předpokladu, že tyto modely mají za úkol predikovat, tedy předpovídat závislost bezpečnosti na předmětném prvku PK. Toto však neplatí, jelikož je každý model platný pouze v rozsahu svých vstupních dat předmětného souboru. **Model tedy pouze vysvětluje historická data.** Jakákoliv další predikce silně závisí na zachování podmínek jeho nastavení (viz Daniels a spol., 2010 [10] a 2011 [11]).

Modelování se provádí v následujících bodech:

- 1) *Sestavení databáze*
- 2) *Stanovení nejvhodnějšího tvaru funkce modelu*
- 3) *Stanovení konkrétních hodnot koeficientů proměnných v modelu*

Model se vytváří krokově, a to buď dopřednou selekcí (přidáváním proměnných), nebo zpětnou eliminací (odebíráním proměnných).

- 4) *Stanovení statistické významnosti modelu*

Lze využít tzv. informační kritéria, nejčastěji Akaikovo informační kritérium (AIC), viz rovnici (08), kde k je počet odhadovaných parametrů a LL je maximalizovaná věrohodnostní funkce (log-likelihood).

$$(08) \quad \text{Akaikeho informační kritérium (AIC)} \quad AIC = 2 \cdot k - 2 \cdot LL \quad [-]$$

5) *Interpretace výsledků daných modelem***3.2. Upravená forma modelu nehodovosti pro okružní křižovatky**

Pro všechny křižovatky se v základním modelu nehodovosti uvažuje s intenzitou pro hlavní komunikaci I_H a vedlejší komunikaci I_V zvlášť. Pro OK toto dělení nelze použít, jelikož zde hlavní komunikace není definována. Pokud bychom požadovali do modelu nehodovosti OK zavést intenzitu nadřazeného dopravního proudu, tak bychom ji hledali v místě vjezdu. V tomto místě se spojuje dopravní proud na vjezdu a na okruhu. Z technických a časových důvodů však nebylo možné stanovit intenzitu na okruhu OK bez podrobného průzkumu všech 200 OK. Pro tuto práci se vychází z intenzity na vjezdu. Matematický předpis je tedy nutné upravit následovně (24):

$$(09) \quad \text{Model nehodovosti na OK} \quad N = a \cdot RPDI^b \cdot e^{\sum c_i \cdot x_i} \quad [\text{počet } N]$$

kde platí:

N očekávaný počet nehod,

$RPDI$ provozní proměnná, intenzita na vjezdu do křižovatky,

a regresní konstanta,

b, c regresní koeficienty, definující průběh modelu (křivky),

x další vysvětlující proměnné,

e základ přirozeného logaritmu.

Očekávaný počet nehod N je vyjádřen matematickým předpisem exponenciální funkce (11) s inverzní logaritmickou funkcí (10) intenzity dopravy $RPDI$ a s vysvětlujícími proměnnými x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

$$(10) \quad \text{Logaritmická funkce} \quad f(x) = \ln x \quad [-]$$

$$(11) \quad \text{Exponenciální funkce} \quad f(x) = a^x \quad [-]$$

Jako spojovací funkce zobecněného lineárního modelu se volí funkce inverzní k exponenciální, což je logaritmická funkce. Vytvoří se tak log-lineární multiplikatívni model. Model nehodovosti na OK lze převést do tvaru (12). Proměnné a koeficienty jsou stejné jako u výše uvedeného modelu (09).

$$(12) \quad \text{Log-lineární tvar modelu DN} \quad \ln(N) = \ln(a) + b \cdot \ln(RPDI) + \sum (c \cdot x) \quad [-]$$

na OK

Protože model dle bezpečnostní funkce nemůže vystihnout všechny systematické variace nehodovosti, představují tyto očekávané hodnoty pouze průměr pro dané kombinace proměnných. Z tohoto důvodu se očekávaná nehodovost na konkrétním místě PK může od průměru lišit.

Tento postup byl využit v projektu IDEKO [14], byl popsán v *Metodice multifaktorové analýzy dopravní nehodovosti* [19] a obdobně v dizertační práci *Hodnocení bezpečnosti silničního provozu s využitím statistického modelování* [42]. Jeho výhody oproti standardním postupům identifikace rizikových lokalit byly popsány

v článku [38]. Aplikace byla provedena pro potřeby ŘSD ČR (Pokorný a Ambros 2014 [39]). Postup lze také dohledat v publikaci *Kompendium statistického zpracování dat* [43] (viz kapitolu 8. Nelineární regresní modely).

3.3. Praktická aplikace GLM na model okružních křižovatek

Pro praktickou aplikaci postupu uvedeného výše byla využita vstupní data (silniční, provozní, bezpečnostní ukazatele). V souladu s postupem byla použita GLM metoda pro vysvětlení proměnné (počet DN) pomocí vysvětlujících proměnných (tj. suma RPDÍ na vjezdu OK, průměr OK, průměrná hodnota úhlu na vjezdu aj.). **Výsledný model nehodovosti** zahrnoval tyto vysvětlující proměnné: RPDÍ na vjezdu, úhel na vjezdu α (kategoriální), kolizi, odchylku úhlu mezi rameny (odchylku R), výskyt pojížděného prstence (kategoriální), výskyt bypassu (kategoriální), typ vjezdu (kategoriální).

$$(13) \quad \text{Model vjezdu OK z DN} \quad N = e^{-2,800 \cdot RPDÍ^{0,583}} \cdot e^{(\alpha)} \cdot e^{(-0,005 \cdot \text{kolize})} \cdot e^{(0,005 \cdot \text{odchylkaR})} \cdot e^{(PRSTENEC)} \cdot e^{(BYPASS)} \cdot e^{(TYP VJEZDU)}$$

Podrobný popis významných proměnných v modelu nehodovosti vjezdu OK je uveden v kapitole 4.2 na straně 28. Celková variabilita modelu je 37,20 %.

tab. 7. Model vjezdu OK z DN

Vysvětlující proměnné	Regresní koeficient	Střední chyba	95% interval spolehlivosti		Test významnosti		
			Dolní mez	Horní mez	Testové kritérium	Stupeň volnosti	Dosažená hladina významnosti
(konstanta)	-2,800	0,5164	-3,812	-1,788	29,403	1	0,000
RPDÍ	0,583	0,0416	0,501	0,664	196,581	1	0,000
α (0; 20)	-0,952	0,3067	-1,553	-0,351	9,634	1	0,002
α (20; 40)	-1,183	0,3014	-1,774	-0,593	15,414	1	0,000
α (40; 60)	-1,169	0,2988	-1,755	-0,584	15,318	1	0,000
α (60; 80)	-1,122	0,3135	-1,736	-0,507	12,802	1	0,000
α (80; ∞)	0	-	-	-	-	-	-
Kolize	-0,005	0,0021	-0,010	-0,001	6,275	1	0,012
Odchylka uhlu mezi rameny	0,005	0,0020	0,001	0,008	5,103	1	0,024
PRSTENEC (NE)	0,560	0,0543	0,454	0,667	106,474	1	0,000
PRSTENEC (ANO)	0	-	-	-	-	-	-
BYPASS (NE)	-0,498	0,0706	-0,636	-0,359	49,662	1	0,000
BYPASS (ANO)	0	-	-	-	-	-	-
TYP VJEZDU 1	-1,813	0,0879	-1,986	-1,641	425,293	1	0,000
TYP VJEZDU 3	-1,123	0,0910	-1,301	-0,945	152,162	1	0,000
TYP VJEZDU 4	0	-	-	-	-	-	-
Disperzní parametr	0,150	-	-	-	-	-	-

4. ROZŠÍŘENÍ MODELU NEHODOVOSTI

Pro rozšíření byl proveden model bezpečnosti na OK s těmito modifikacemi: rozšíření z modelu o 72 OK (z toho 13 ČR) na 200 OK pouze v ČR, segmentace OK na jednotlivé vjezdy (781 vjezdů), stavy vjezdů v jednotlivých letech a ověření jejich existence (6194 stavů vjezdů). Pro model byly dále identifikovány tyto významné proměnné: RPDI, úhel na vjezdu α , kolize, odchylka úhlu mezi rameny, výskyt pojížděného prstence, výskyt bypassu, typ vjezdu.

4.1. Srovnání modelů dopravní nehody a závažnost

V tab. 8 jsou prezentovány výsledné tvary čtyř vybraných modelů. První model pochází ze studie nehodovosti na OK ve čtyřech evropských státech [37]. Tento model byl vyjádřen z DN pouze se zraněním, jelikož se DN jen s hmotnou škodou v některých zemích Evropy nehlásí policii. V tomto modelu byly identifikovány významné vysvětlující proměnné: RPDI, úhel na vjezdu α a šířka vjezdu w_{IN} . Model vykázal velmi nízkou hodnotu disperzního parametru a AIC. Což je pozitivní hodnocení. Nízká hodnota celkové variability je však negativní hodnocení. Model obsahoval poměrně málo dat o bezpečnostních ukazatelích, což může vést k nízké hodnotě ukazatelů validity. Nízká hodnota variability vypovídá jen o minimální shodě s původním datovým vzorkem o DN. To může být zapříčiněno jinou metodikou sběru dat.

Pro srovnání byl proveden 9. model nehodovosti na vjezdu OK s těmito modifikacemi: rozsah vstupního vzorku byl zachován, navíc byla do modelu vložena proměnná zástava. Regresní koeficienty dosáhly podobných hodnot včetně znamének. Dosažená hodnota významnosti byla však pro zástavbu nevyhovující (0,654).

Pro další srovnání byl vytvořen obdobný 9. model nehodovosti na vjezdu OK s modifikacemi: rozsah vstupního vzorku byl zachován, počet očekávaných nehod byl tentokrát vyjádřen ze závažnosti. Dosažená hodnota významnosti byla však pro zástavbu vyšší (0,064) a pro interval $\langle 0; 20 \rangle$ úhlu na vjezdu α nevyhovující (0,105).

Jako poslední byl sestaven 10. model nehodovosti na vjezdu OK s modifikacemi: rozsah vstupního vzorku byl zachován, počet očekávaných nehod byl tentokrát vyjádřen ze závažnosti, do modelu byla přidána proměnná výskyt přechodu pro chodce. Dosažená hodnota významnosti však u proměnné výskyt přechodu pro chodce (0,068) a pro interval $\langle 0; 20 \rangle$ úhlu na vjezdu α (0,097) přesáhla hranici 5 %.

tab. 8. Srovnání modelů vjezdu DN a závažnost

Vysvětlující proměnné	Regresní koeficienty				Dosažená hladina významnosti			
	Studie	Model 9 DN	Model 9 Závažnost	Model 10 Závažnost	Studie	Model 9 DN	Model 9 závažnost	Model 10 Závažnost
(konstanta)	-3,935	-2,830	-3,056	-2,940	0,120	0,000	0,000	0,000
RPDI	0,424	0,583	0,589	0,583	0,071	0,000	0,000	0,000
α	-0,034	-	-	-	0,069	-	-	-
$\alpha \langle 0; 20 \rangle$	-	-0,934	-0,926	-0,946	-	0,003	0,105	0,097
$\alpha \langle 20; 40 \rangle$	-	-1,167	-1,199	-1,239	-	0,000	0,034	0,028

Vysvětlující proměnné	Regresní koeficienty				Dosažená hladina významnosti			
	Studie	Model 9 DN	Model 9 Závažnost	Model 10 Závažnost	Studie	Model 9 DN	Model 9 závažnost	Model 10 Závažnost
α (40; 60)	-	-1,152	-1,171	-1,212	-	0,000	0,038	0,031
α (60; 80)	-	-1,113	-1,146	-1,178	-	0,000	0,048	0,041
α (80; ∞)	-	0	0	0	-	.	.	.
Kolize	-	-0,005	-0,009	-0,009	-	0,012	0,012	0,014
Odchylka uhlu mezi rameny	-	0,005	0,006	0,006	-	0,023	0,047	0,028
PRSTENEC (NE)	-	0,557	0,683	0,703	-	0,000	0,000	0,000
PRSTENEC (ANO)	-	0	0	0	-	.	.	.
BYPASS (NE)	-	-0,494	-0,527	-0,521	-	0,000	0,000	0,000
BYPASS (ANO)	-	0	0	0	-	.	.	.
Vjezd šířka	0,369	-	-	-	0,010	-	-	-
TYP VJEZDU 1	-	-1,810	-1,984	-1,996	-	0,000	0,000	0,000
TYP VJEZDU 2	-	-	-	-	-	-	-	-
TYP VJEZDU 3	-	-1,122	-1,261	-1,277	-	0,000	0,000	0,000
TYP VJEZDU 4	-	0	0	0 ^a	-	.	.	.
Zástavba (NE)	-	0,023	0,136	0,188	-	0,654	0,064	0,017
Zástavba (ANO)	-	0	0		-	.	.	.
Přechod (NE)	-	-	-	-0,133	-	-	-	0,068
Přechod (ANO)	-	-	-		-	-	-	.
Disperzní parametr	0,074	0,150	0,679	0,673	14,91 %	37,00 %	34,90 %	37,00 %
AIC	187,083	8129,059	5677,512	5676,161	-	-	-	-

4.2. Významné proměnné vjezdu OK dle modelu nehodovosti

Úhel na vjezdu α byl jako vysvětlující proměnná kategorizován. Regresní koeficient nabyt v jednotlivých kategoriích záporného znaménka, to znamená, že s rostoucím úhlem na vjezdu bude ubývat počet očekávaných nehod. Výchozí předpoklad, že s rostoucím úhlem na vjezdu α je OK bezpečnější, se nepotvrdil. **Nejbezpečnější interval úhlu na vjezdu je (20; 40) stupňů.** Přípustný interval je (40; 60), (60; 80). Jako nepřipustné intervaly se prokázaly (0; 20) a více než 80 stupňů, to znamená, že vjezdy s malou hodnotu úhlu na vjezdu jsou nebezpečné ($\alpha < 20$). Souhlasí s předpokladem i zahraniční literaturou. Z Kanadské studie [56] vyplynulo, že

s rostoucím úhlem na vjezdu počet nehod klesá. Britský manuál pro navrhování OK [57] doporučuje hodnotu úhlu na vjezdu mezi 20 a 60 stupni. Nejvhodnější hodnota je 30 stupňů. Hodnotou úhlu na vjezdu se zabývá i národní výzkum geometrie komunikací v Americe [58]. Také potvrdil, že s rostoucí hodnotou úhlu na vjezdu se snižuje nehodovost. Vjezdy s úhlem na vjezdu > 80 stupňů byly také prokázány jako nebezpečné. V této kategorii však bylo nalezeno malé množství dat. Proto by bylo vhodné tuto kategorii doplnit o vzorek dat a opět vyhodnotit.

Šířka na vjezdu w_{IN} byla jako vysvětlující proměnná transformována do **typu vjezdu**. Tato proměnná je kategoriální a je složena z proměnné počet pruhů na vjezdu a na okruhu v místě vjezdu. Regresní koeficient nabyval vždy záporného znaménka. Nejlépe hodnocený vjezd je kategorie 1 (1 pruh na okruhu; 1 pruh na vjezdu), což je ve shodě s výchozím modelem (studie [37]). Nejhorše hodnocená je kategorie 4 (2 pruhy na okruhu; 2 pruhy na vjezdu). Dle švédské studie [60] lze očekávat, že jeden pruh na okruhu je bezpečnější než dva pruhy. Z kanadské studie [56] vyplynulo, že s rostoucí šířkou okružního pásu roste i počet DN. Typ 2 se ve vzorku nevyskytl (1 pruh na okruhu, 2 pruhy na vjezdu). Obdobné výsledky jsou také potvrzeny ze zkušeností z Německa (viz Brilon 2011 [5]).

Kolize je vysvětlující proměnná, která v modelu prokázala svůj vliv na bezpečnost. Regresní koeficient nabyval záporného znaménka, to znamená, že s rostoucí vzdáleností mezi kolizními body na výjezdu a vjezdu bude počet DN klesat. Souhlasí s předpokladem i literaturou. Dle indické studie [59] je potvrzen vliv vzdálenosti mezi kolizními body výjezdu a vjezdu téhož ramene. S jeho rostoucí hodnotou lze očekávat snížení počtu nehod. Kolize představuje vzdálenost mezi bodem odpojení na výjezdu a bodem připojení vjezdu jednoho z ramen PK, které je napojeno do okružního pásu křižovatky. Tato vzdálenost souvisí s kapacitou vjezdu a také s rozhledem pro bezpečné zastavení. Regresní koeficient v modelu prokázal, že s rostoucí hodnotou kolize klesá očekávaný počet DN.

Odchylka úhlu mezi rameny představuje směrodatnou odchylku úhlů, které mezi sebou svírají jednotlivé paprsky ramen křižovatky. Regresní koeficient nabyval kladného znaménka, to znamená, že s rostoucí odchylkou úhlů mezi rameny OK bude růst i počet očekávaných nehod. Pravidelné uspořádání vjezdů do OK je výhodou. Také potvrzeno indickou studií [59]. Pokud je tedy uspořádání paprsků (ramen) křižovatky pravidelné, hodnota odchylky nabývá nuly, to znamená, že model nebude ovlivněn. Ve chvíli, kdy dojde ke změně úhlu alespoň jednoho ramene, hodnota odchylky roste a spolu s ní roste i očekávaný počet DN na vjezdu. Toto souhlasí s teorií uvedenou v ČSN 73 6102 [53].

Výskyt pojížděného prstence představuje kategoriální proměnnou. Regresní koeficient nabyval kladné hodnoty v kategorii bez výskytu prstence, to znamená, že pokud na vjezdu prstenec není, bude očekávaný počet nehod vyšší. Souhlasí s předpokladem i literaturou. Britská příručka pro navrhování OK [57] doporučuje šířku pojížděného prstence 1,5 až 2,0 m s ohledem na skladbu vozového parku. Prstenec rozšiřuje plochu okružního pásu pro nadrozměrná vozidla. Prstenec zvětšuje také pohledovou plochu,

kteřá může řidiče upozornit na překážku, tzn. včasné upozornění. Plocha pojížděného prstence také usnadňuje manévrování rozměrných vozidel.

Výskyt bypassu představuje kategoriální proměnnou. Regresní koeficient výskytu nabyl záporné hodnoty v kategorii bez výskytu bypassu, to znamená, že pokud vjezd bypass nemá, tak bude očekávaný počet nehod nižší. V dostupné literatuře se však podobné výsledky nepodařilo nalézt. Obecně však platí předpoklad, že bypass přidává do oblasti křižovatky další kolizní bod, tzn. další lokalitu, kde je vyšší pravděpodobnost expozice jevu DN.

Zástavba a výskyt přechodu pro chodce jsou proměnné, které byly identifikovány jako významné z modelu nehodovosti sestaveného z experimentálního bezpečnostního ukazatele: závažnost. V tomto modelu vykazují statistickou významnost nad hladinou 5 %. Závažnost je proměnná, která je spojená s rychlostí a která má vliv na bezpečnost vjezdu OK. Rychlost je spojena s mechanismem DN a má přímý vliv na následky DN. Nehody s chodci se většinou neobejdou bez zranění. Jelikož je závažnost vyjádřena právě počtem a závažností zraněných osob, je logické předpokládat tuto proměnnou v modelu 10. Výsledkem je, že pokud se na vjezdu vyskytuje přechod pro chodce, očekává se vyšší počet DN a vyšší závažnost.

Ze srovnání modelu nehodovosti z pohledu četnosti DN a jejich závažnosti vyplývá, že regresní koeficienty nabývají obdobných hodnot a co je důležité stejných znamének. Tím je potvrzen předpokládaný trend (vliv) jednotlivých vysvětlujících proměnných na bezpečnost vjezdu.

4.3. Omezení modelu nehodovosti

Hlavní omezení modelu spočívá v jeho zobecnění nebo jeho přenositelnosti ve vazbě na okrajové podmínky. Omezení modelu je dáno rozsahem vstupních hodnot použitých vysvětlujících proměnných (tj. okrajových podmínek). Pro model představený touto prací jsou okrajové podmínky proměnných následující (viz tab. 9).

tab. 9. Rozsah použitelných hodnot vysvětlujících proměnných

	RPDI (voz/24 hod)	Alfa (stupně)	Kolize (m)	Odchylna úhlu (stupně)	Výskyt prstence	Výskyt bypassu	Typ vjezdu	
							Pruhy na okruhu	Pruhy na vjezdu
Min.	5	0	0	0	0 = ne	0 = ne	1	1
Max.	24520	82	106	61	1 = ano	1 = ano	2	2

5. OVĚŘENÍ MODELU NEHODOVOSTI

Hodnocení modelu napomáhají informační kritéria (AIC), disperzní parametr, celková variabilita, signifikance jednotlivých proměnných, ale také postupy pro ověření interní a externí validity. Validace modelu je určena ke kontrole výsledných regresních koeficientů a jejich znamének (ve smyslu zajištění vypovídající hodnoty modelu, aby byl model vypovídající a aplikovatelný i v jiných kontextech). Validace slouží k objektivnějšímu a méně zkreslenému odhadu celkové chyby modelu. Dále slouží pro výběr nejvhodnějšího modelu, zajištění stability modelu, k výběru proměnných do

modelu a jako kontrola jeho obecné platnosti. **Cílem je vybrat nejjednodušší model vysvětlující největší množství informací** (viz publikaci Hoggarth 2015 [36]).

Validita reprezentuje požadavek vhodnosti, logiky a použitelnosti modelu. Kvalita (goodness-of-fit) samotného modelu obvykle nestačí (viz publikaci Miaou and Lord 2003 [35]), požaduje se také jeho logika (goodness-of-logic). Rozlišujeme tedy dva druhy validity. Interní validita je schopnost modelu vysvětlit modelovaný fenomén. Externí validita je schopnost modelu predikovat proměnnou v čase a prostoru.

Pro stanovení kvality neboli vypovídající schopnosti modelu je nutné si uvědomit, že model pouze vysvětluje použitá vstupní data. Kvalita modelu je navíc ovlivněna vlivy v oblasti dostupnosti, sběru a analýzy dat.

Jedním z nedostatků, který se může projevit na kvalitě modelu, je sběr dat s malou variabilitou (sbírají se data na stejných lokalitách). Nedochozí zde k rozptylu jednotlivých proměnných. Toto má přímý vliv na regresní koeficienty v modelu (Hebák a spol. 2013 [45]).

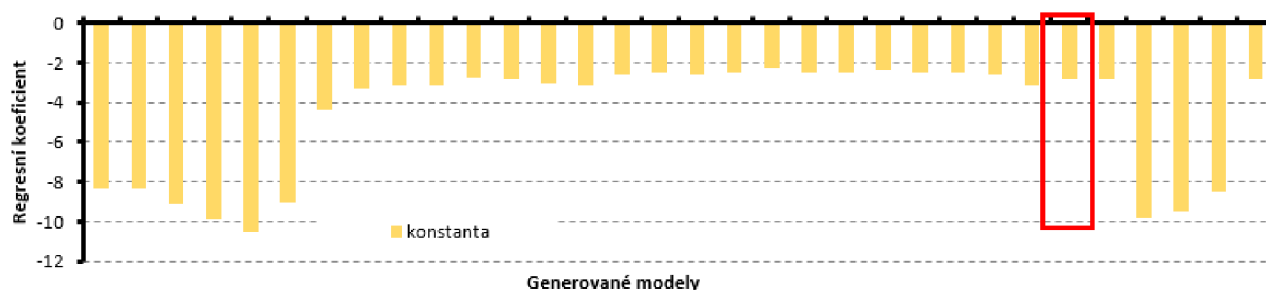
5.1. Interní validita

Pro ověření validity modelu je nejvhodnější provést srovnání regresních koeficientů s jinými studiemi. Získání těchto studií však bývá náročné. Navíc často nelze doložit alespoň obdobnou definici sledované charakteristiky či popis datového základu. Výsledky (hodnoty regresních koeficientů) se tedy mohou lišit (viz tab. 10).

tab. 10. Srovnání základních modelů OK

Proměnná	Tato studie	Evropská studie	USA	Nový Zéland
Konstanta a	0,0608	0,002	0,0013	0,00173
$RPDI^b$	0,583	0,458	0,5923	0,530

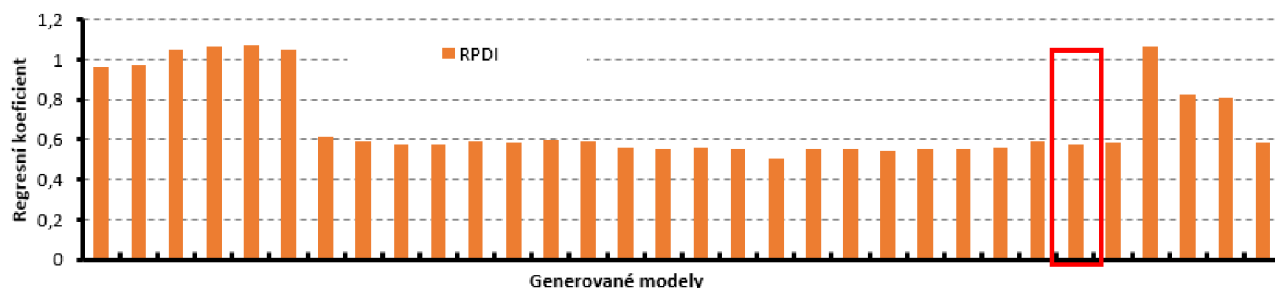
Regresní koeficient $RPDI$ stanovený touto dizertační prací, se podobá koeficientům i z jiných studií. Hodnota konstanty modelu se liší o řád. Pravděpodobně je to způsobeno vlivem $RPDI$ ze vzorku. V této práci jsou prezentovány jednotlivé vjezdy OK, v ostatních jsou prezentovány součty všech vjezdů do OK. Na obr. 7 jsou zobrazeny hodnoty konstanty v průběhu vývoje modelu nehodovosti vjezdu OK. V prvních modelech byla konstanta vyčíslena pouze spolu s proměnnou $RPDI$ v modelu (vysoká hodnota). Po přidání dalších proměnných došlo ke snížení její hodnoty.



obr. 7. Vývoj regresních koeficientů konstanta

Na obr. 8 jsou zobrazeny hodnoty regresních koeficientů proměnné $RPDI$. Koeficient se ustálil v případě změny charakteru proměnné úhel na vjezdu formou

kategorie. Výsledná hodnota je v červeném rámečku. Poslední čtyři modely vykazují změnu vlivem dalších nevýznamných proměnných.



obr. 8. Vývoj regresních koeficientů RPDI

V červeném rámečku je označen výsledný model (hodnota regresního koeficientu). V této práci bylo generováno cca 150 modelů s různými kombinacemi proměnných. Modely byly vytvářeny dopřednou metodou.

Interní validita prokázala, že znaménka a velikost regresních koeficientů jsou podobné a v souladu s ostatními studii.

5.2. Externí validita

Pro ověření externí validity byl zvolen způsob srovnání celkového modelu A + B s výběrovým modelem A. Pro porovnání shody validity modelů byl v této práci využit ukazatel MSPE. Bylo realizováno 5 testů u jednotlivých podmnožin A a B, které rozdělily vstupní soubor dat (vjezdy OK) na 80 a 20 %. Množiny A + B představují data, která sloužila pro ověření výsledného 8. modelu nehodovosti.

$$(14) \quad MSPE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{N}_i - N_i)^2}{n} \quad [-]$$

Z množiny A + B byly stanoveny regresní koeficienty modelu. Potom byl stanoven očekávaný počet nehod E , který byl srovnán se skutečným počtem nehod N v podmnožině B. Byla stanovena hodnota $MSPE^{A+B}$. Ve druhé fázi byly z podmnožiny A stanoveny regresní koeficienty testovaného modelu 8, ze kterého byl stanoven očekávaný počet nehod E . Výsledek byl srovnán se skutečným počtem zaznamenaných nehod N v podmnožině B. Následně byla stanovena hodnota $MSPE^A$.

Externí validitu lze posoudit na základě srovnání podobnosti hodnot $MSPE^{A+B}$ a $MSPE^A$. Jejich hodnoty spolu s absolutním rozdílem (0,88 až 2,79 %) jsou tab. 11.

tab. 11. Externí validace MSPE

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
$MSPE^{A+B}$	0,785	0,786	0,650	0,835	1,076
$MSPE^A$	0,792	0,793	0,660	0,859	1,095
Absolutní rozdíl	0,88 %	0,88 %	1,51 %	2,79 %	1,74 %

Externí validita pomocí 5 testů MSPE podmnožiny A a B potvrdila, že výsledná chyba modelu je přijatelná.

6. SHRNU TÍ A ZÁVĚRY

Název dizertační práce je *Analýza návrhových prvků okružních křižovatek a jejich vliv na nehodovost*. Tato práce se zabývá aplikací multifaktorové analýzy dopravní nehodovosti na konkrétní prvek dopravní infrastruktury. Metody z části v zahraničí již běžně používané, ale současně i rozvíjené, byly pouze použity v českém prostředí, kde se tato metoda doposud využila pouze ve VaV projektu IDEKO [14].

Za hlavní hypotézu této práce lze považovat závislost bezpečnosti křižovatky na úhlu ω na přímém průjezdu křižovatkou. Úhel ω na přímém průjezdu OK zatím nemá v českých předpisech pevnou oporu. Jeho význam se pomocí multifaktorové metody (GLM) nepodařilo v této práci přímo prokázat. Tato proměnná nevykázala v generovaných bezpečnostních modelech statistickou významnost. Nebyla prokázána ani podobnost hodnoty a znaménka regresního koeficientu s výsledky jiných studií.

Bezpečnostní modely však potvrdily významnost, tzn. vliv na bezpečnost, úhlu na vjezdu α , který s úhlem na přímém průjezdu ω koreluje. Nejbezpečnější interval úhlu na vjezdu je $(20; 40)^\circ$. Nejhorší následky z pohledu nehodovosti nastávají, pokud úhel na vjezdu nabývá hodnot $\langle 0; 20)^\circ$. Úhel na vjezdu α je spojen s parametry vjezdu OK, což je místo nejčastějších nehod v oblasti křižovatky. Jeho hodnota také koreluje s poloměrem vjezdu a podélnou deflexí trajektorie přímého průjezdu.

6.1. Odpovědi na výzkumné otázky

V úvodu práce byly stanoveny otázky, které se na základě dílčích závěrů a postupu práce pokusím zodpovědět:

a. Jsou OK jedním z nejbezpečnějších typů uzlů na síti PK?

Díky statistice dopravní nehodovosti PČR se podařilo zjistit, že se na OK odehrává nejmenší podíl nehod se zraněním. Ke smrtelným zraněním dochází jen ojedinele. Ze studie Ambros, Turek, Janoška (2016) [34] vyplývá, že četnost nehod je na OK nižší v porovnání s běžnými úrovnovými křižovatkami. Transformace standardního typu křižovatky na OK má pozitivní účinky. OK v ČR vykazují vyšší četnost nehod než jiny ch zemí EU.

b. Zaručují vždy OK bezpečnost lokality na PK z principu, nebo se jedná pouze o mylně interpretovaný závěr převzatý ze zahraničí nebo z doslechu?

V práci byla provedena analýza průjezdu měřicího vozidla OK. Průjezd byl proveden v době minimálního dopravního zatížení. Analyzovány byly pouze neovlivněné průjezdy. Na základě průjezdů bylo možné identifikovat závislost mezi směrovými úhly a rychlostí vozidla v jednotlivých bodech polygonu.

Realizací středového ostrova křižovatky dochází ke vzniku přirozené bariéry, kterou je vozidlo nuceno objet vpravo ve směru jízdy okružním pásem. Aby se vozidlo na tento pás dostalo, musí překonat vjezd a změnit směr své jízdy. Tato změna je dána úhlem na vjezdu α . Tento úhel koreluje s okamžitou rychlostí vozidla ve vzdálenosti 50 m před vjezdem křižovatky s rychlostí v místě napojení křivky a v místě vjezdu.

Korelace však postupně klesá. Dále pak rychlost koreluje s úhlem na přímém průjezdu ω . Úhel na vjezdu α je tedy spojen s vjezdovou rychlostí vozidel.

Ze statistiky DN PČR [15] vyplývá, že se na OK odehrává menší počet nehod se zraněním. Je zde také prokazatelně nižší četnost zranění i z pohledu závažnosti. OK jsou tedy z pohledu závažnosti zranění bezpečnější.

c. Je vhodné umožňovat přímý průjezd vozidlům na okružním pásu OK?

S úhlem na přímém průjezdu ω korelují i další návrhové prvky vjezdu OK jako je: úhel na vjezdu α , poloměry na vjezdu a výjezdu a poloměr trajektorie vozidla na průjezdu a jeho rychlost. Vyšší hodnoty úhlu na přímém průjezdu ω motivují řidiče k nižší rychlosti. Zvyšuje se tak reakční doba řidiče. Následky na DN jsou nižší. V modelu byl vliv parametrů průjezdu prokázán pomocí úhlu na vjezdu α . **Nejbezpečnější interval úhlu na vjezdu α je (20; 40)°**. Přípustný interval je (40; 60) a (60; 80). Jako nepřípustné intervaly se prokázaly (0; 20) a více než 80 stupňů, to znamená, že vjezdy s malou hodnotou úhlu na vjezdu jsou nebezpečné ($\alpha < 20$). Přímý průjezd vozidel na OK tedy není vhodný.

d. Stávají se na OK charakteristické nehody?

Na OK se stává mnoho typů nehod. Nejméně časté jsou ty se smrtelnými následky účastníka. Nejčastější místo vzniku DN je na vjezdu křižovatky z důvodu nevhodného způsobu jízdy (spojeno s rychlostí) a nedání přednosti v jízdě (také spojeno s rychlostí a rozhledem). Nejčetnější skupinou nehod jsou nehody jen s hmotnou škodou.

e. Vede vyšší hodnota RPDI na vjezdu OK k vyšší nehodovosti?

Ano, vyšší hodnota RPDI vede k vyššímu počtu nehod N . V modelu nehodovosti vjezdu OK, bylo dosaženo kladného znaménka regresního koeficientu b u proměnné RPDI. Kladné znaménko se nalézá jak v jednoduchém tvaru modelu ($b=1,068$ a to pouze s proměnnou RPDI), tak ve výsledném modelu ($b=0,583$ s více proměnnými viz vzorec (13)) obsahujícím proměnné RPDI, úhel na vjezdu α , kolizní vzdálenost, odchylku úhlů mezi rameny, výskyt pojížděného prstence, výskyt bypassu, typ vjezdu.

f. Mají OK nalézající se v intravilánu nižší nehodovost než OK v extravilánu?

Model nehodovosti na vjezdu OK sestavený na základě závažnosti nehod prokázal, že vjezdy křižovatky nalézající se mimo zástavbu ($b= 0,188$) vykazují vyšší očekávaný počet nehod N než nalézající se v zástavbě ($b= 0$). Lze říci, že na vyšší nehodovost má vliv vyšší rychlost vozidel. Toto vyplývá i ze statistiky DN PČR [15].

g. Jsou OK se dvěma pruhy na okruhu nebezpečnější než OK s jedním pruhem?

Model nehodovosti na vjezdu OK sestavený na základě počtu DN prokázal, že nejnebezpečnější vjezd je typu 4 (tj. 2 pruhy na vjezdu a 2 pruhy na okruhu). Nejvhodnější je typ vjezdu 1 (tj. 1 pruh na vjezdu a 1 pruh na okruhu). Viz tab. 8.

h. Vedou větší průměry OK k vyšší nehodovosti?

Zda vedou vyšší hodnoty průměru OK k vyšší nehodovosti, se pomocí modelu nehodovosti nepodařilo jednoznačně prokázat.

Před agregací modelu nehodovosti na jednotlivé vjezdy bylo realizováno několik modelů pro křižovatku jako celek. V těchto modelech se hodnoty regresních koeficientů proměnné (průměru OK) neprokázaly jako stabilní. Z pohledu modelů agregovaných na jednotlivé vjezdy se průměr OK také neprokázal jako významný.

V práci byla identifikována korelace mezi průměrem OK, průměrem středového ostrova a kolizní vzdálenosti. Průměr OK má tedy vliv alespoň na jednu z proměnných ve výsledném modelu.

6.2. Výsledky a výstupy

a. Model nehodovosti

Byl sestaven model nehodovosti na základě počtu DN. Obsahuje tyto vlivné proměnné (parametry vjezdu OK): RPDI, úhel na vjezdu α , kolizní vzdálenost, odchylka úhlů mezi rameny, výskyt pojížděného prstence, výskyt bypassu, typ vjezdu. Viz vzorec (13) na straně 26.

Změnou vysvětlované proměnné z počtu DN na závažnost bylo dále možné identifikovat vliv výskytu přechodu pro chodce a okolní zástavbu, které charakterizují rychlostní parametry vozidel. Regresní koeficienty proměnných ve výše uvedeném odstavci zůstaly podobné.

b. Mapa

Mapa (viz uvedená PŘÍLOHA C v nezkráceném znění práce) zobrazuje OK, které byly analyzovány pomocí multifaktorové statistické metody. Křižovatky byly seřazeny dle EB odhadu, který měl za úkol ohodnotit je jako nejkritičtější.

6.3. Závěry pro další rozvoj teorie

Multifaktorovou analýzu bude vhodné prohloubit o druhou vlnu analýzy, pro identifikaci druhé nejvlivnější kombinace faktorů na sledovaném vzorku nehod. Současně bude nezbytné zvážit vliv faktoru vozidla a člověka na mechanismus DN. Údaje o vozidlech lze získat z databáze PČR. Údaje o řidičích by bylo možné získat z bližší analýzy registru řidičů, nebo socioekonomických vazeb v daném regionu.

V této práci byl sestaven model nehodovosti vjezdu OK. Pro ohodnocení návrhu celé křižovatky se provede součet jednotlivých očekávaných nehod na vjezdech. Do budoucna bude vhodné provést posouzení, zda v případě součtu nedochází k podhodnocení očekávaného počtu DN za celou křižovatku. Je pravděpodobné v tomto případě očekávat vzájemné ovlivnění.

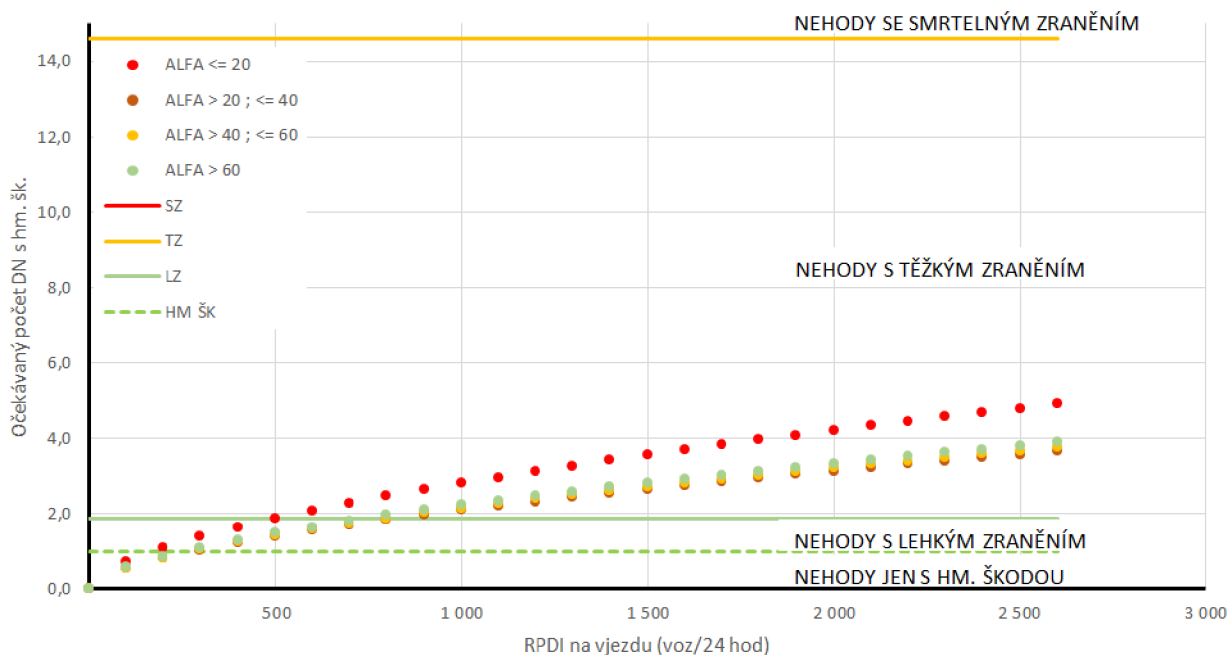
Úroveň kvality geometrie (ÚKG)

Do budoucna bude vhodné prohloubit analýzu bezpečnosti silničního provozu o závislou proměnnou závažnost a to ve smyslu identifikace očekávaného typu zranění. Závažnost je ukazatel bezpečnosti, který má šanci nejen predikovat počet nehod na zamýšlené geometrii PK, ale může i odhadnout, k jakému typu zranění může dojít.

V této práci je experimentálně závažnost přepočítána na nehody pouze s hmotnou škodou. Výstup je prezentován na obr. 9, kde jsou hranice závažnosti prezentovány pomocí hranic. Model nehodovosti je zde zobrazen s nepříznivými

parametry vjezdu OK: minimální úhel na vjezdu, minimální kolizní vzdálenost, nerovnoměrné rozdělení ramen OK (vysoká hodnota odchylky úhlu mezi rameny), bez pojížděného prstence, s bypassem, mimo zástavbu, s přechodem, dva pruhy na vjezdu, dva pruhy na výjezdu (typ vjezdu 4). Cílem bylo sestavit limity pro tzv. úroveň kvality geometrie (ÚKG) podle očekávané závažnosti nehody.

Využití tohoto nástroje posuzování geometrie vjezdu OK závisí na výskytu nehody s daným počtem zranění. Z níže uvedeného obr. 9 lze vyčíst, že hodnota očekávané závažnosti dosáhla na hranici nehody s těžkým zraněním, ale je také možné, že se může stát jakákoliv nehoda s nižší závažností nebo kombinace nehod.



obr. 9. Návrh limitních hranic pro ÚKG

Poznámka: Hranice nehody se smrtelným zraněním není v grafu prezentována, jelikož se nachází na ose Y kolem hodnoty 80. Na OK se smrtelná zranění téměř nestávají.

6.4. Závěry pro realizaci v praxi

Hlavním výsledkem této práce je model nehodovosti vjezdu OK, který lze využít při navrhování úprav OK a pro identifikaci právě těch vjezdů křižovatek, které stabilně vykazují bezpečnostní deficity v porovnání s jinými podobně nastavenými lokalitami.

LITERATURA

- [1] Šenk, P., Ambros, J., Daňková, A. *Metodika hodnocení účinnosti opatření ke zvýšení bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích*. Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2011. ISBN 978-80-86502-14-4. Osvědčení Ministerstva dopravy č.j. 33/2012-520-TPV/1 ze dne 2.4.2012.
- [2] VEOBEZplus, *Rozšíření predikčního modelu nehodovosti na okružních křižovatkách*, projekt vědy a výzkumu pro zadavatele Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, 2012
- [3] VEOBEZ, *Vývoj metodiky hodnocení účinnosti opatření ke zvýšení bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích*, výzkumný projekt pro zadavatele Ministerstvo vnitra, CG711-078-160, 2007 - 2011
- [4] Elvik R., *Effects on Road Safety of Converting Intersections to Roundabouts: Review of Evidence from Non-U.S. Studies*; Transportation Research Board of the National Academies (USA), ISSN 0361-1981, (leden 2007)
- [5] Brilon W., *Studies on Roundabouts in Germany: Lessons Learned*, International TRB-roundabout conference, Carmel, Indiana, (Germany), (květen 2011)
- [6] Šenk P., Ambros J., Daňková A.; *Predikce ekonomických škod z dopravních nehod na okružních křižovatkách*; Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.; Odborný článek/zpráva, 2011
- [7] Šenk P., Ambros J.; *Odhad počtu nehod na nově budovaných okružních křižovatkách*, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.; Odborný článek ve sborníku, Silniční konference 2011, Zlín
- [8] Lord, D. *Modelling 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, vol. 38 (2006), s. 751-766
- [9] Turner, S. A., Roozenburg, A.P., Smith, A.W. *Roundabout crash prediction models*. NZ Transport Agency research report 386, 2009. ISBN 978-0-478-35220-7.
- [10] Daniels, S., Brijs, T., Nuyts, E., Wets, G. *Explaining variation in safety performance of roundabouts*. Accident Analysis and Prevention, vol. 42 (2010), s. 393-402.
- [11] Daniels, S., Brijs, T., Nuyts, E., Wets, G. *Extended prediction models for crashes at roundabouts*. Safety Science, vol. 49 (2011), s. 198-207.
- [12] Ředitelství silnic a dálnic ČR 2010. Celostátního sčítání dopravy 2010 [online]. [cit. 2012-12-06].
- [13] Silniční databanka ŘSD, odbor ŘSD se sídlem v Ostravě, spadá pod úsek informatiky
- [14] VG20112015013 – IDEKO, *Identifikace a řešení kritických míst a úseků v síti pozemních komunikací, které svým uspořádáním stimulují nezákonné nebo nepřiměřené chování účastníků silničního provozu*. Poskytovatel: MV ČR, hlavní příjemce: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., konec projektu: 2015
- [15] Statistika dopravní nehodovosti Policie ČR, aktualizováno ročně,
- [16] Mapy CZ; Autor: Seznam.cz, a.s.; Aktualizace: denně; Popis: Internetový portál zabývající se digitálním zobrazením České republiky a přilehlých států.
- [17] *Highway capacity manual 2010*, zkratka HCM 2010, Transportation research board of the national academies (TRB), ISBN 978-0-309-16077-3
- [18] Punch K. (2008), *Základy kvantitativního šetření*, Portál, Praha
- [19] Ambros J., Valentová V., Striegler R. a další, *Multifaktorová analýza dopravní nehodovosti: metodika provádění*, Brno, 2014, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., ISBN 978-80-88074-01-4
- [20] Council, F. M. and others, *Accident research manual*, University of North Carolina, Chapel Hill, Highway Safety Research Center, Chapel Hill, NC USA 27599
- [21] Hauer, E., 1997, *Observational Before-After Studies in Road Safety: Estimating the Effect of Highway and Traffic Engineering Measures on Road Safety*, Oxford: Elsevier.
- [22] Persaud, B. N., 2001, *Statistical Methods in Highway Safety Analysis: A Synthesis of Highway Practice*, NCHRP Synthesis 295. Washington: Transportation Research Board (TRB).
- [23] 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 RIPCORDER-ISEREST, výstup č. 2.1.
- [24] 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.

- [25] Novák J., Striegler R., Valentová V., Vyskočilová L. a další, *Metodika popisující postup pro úpravu křižovatek*, Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2013, ISBN 978-80-86502-68-7
- [26] 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, Herston: University of Queensland.
- [27] *Bezpečnost silničního provozu – aktuální poznatky*, Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2011
- [28] Hauer, E., 2004, *Statistical Road Safety Modeling*, Transportation Research Record, 1897, 81-87.
- [29] 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
- [30] Jednotná dopravní vektorová mapa, geografický informační systém Ministerstva dopravy ČR, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
- [31] QGIS: Geographic Information System, Software, Free and Open Source
- [32] Národní archiv leteckých měřičských snímků, WEB APLIKACE, Zeměměřický úřad, Pod sídlištěm 9/1800, 182 11 Praha 8
- [33] Sangyoun K., Jaisung Ch., *Safety Analysis of Roundabout Designs based on Geometric and Speed Characteristics*, KSCE Journal of Civil Engineering (2013), DOI 10.1007/s12205-013-0177-4
- [34] Ambros J., Turek R., Janoška Z., *Safety evaluation of Czech roundabouts*, Advances in Transportation Studies an international Journal, Section B 40 (2016)
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Ambros J., Novák J., Borsos A., et al. Central European comparative study of traffic safety on roundabouts. In Proceedings of 6th Transport Research Arena, Varšava (Polsko), 18. - 21. 4. 2016 [Flash disk]. 2016.
- [38] 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.
- [39] Pokorný, P., & Ambros, J., 2014, *Identifikace rizikových míst na silnicích I. třídy v Jihomoravském kraji – praktická aplikace empirické bayesovské metody*. Silniční obzor
- [40] AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (2010). Highway Safety Manual. First Edition. Washington: AASHTO.
- [41] IBM SPSS: Statistical Package for the Social Sciences, SOFTWARE, Chicago, 2009
- [42] Ambros J., *Hodnocení bezpečnosti silničního provozu s využitím statistického modelování*, Dizertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů, Praha 2015, školitel: Ing. Zuzana Čarská, Ph.D.
- [43] Meloun M., Militký J., *Kompendium statistického zpracování dat*, Vydala Univerzita Karlova v Praze, Nakladatelství Karolinum, Praha 2012, ISBN 978-80-246-2196-8
- [44] 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.
- [45] Hebák, P., Jarošová, E., Pecáková, E., Plašil, M., Řezanková, H., Vilikus, O., Vlach, P. (2013)., *Statistické myšlení a nástroje analýzy dat*. Praha: Informatorium.
- [46] 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*.
- [47] Hauer, E. (1995). *On exposure and accident rate*. Traffic Engineering and Control, 36, 134-138.
- [48] Road transport research, Road safety principles and models: *Review of descriptive, predictive, risk and accident consequence models*, Organisation for economic co-operation and development, Head of Publications Service, OECD, 2 rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.
- [49] 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*. Policy Research Centre for Traffic Safety, Report RA-MOW-2011-027. Policy Research Centre for Traffic Safety

- [50] TP 135 Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích, Schváleno MD - OPK č.j. 489 /05-120 – RS/1 ze dne 6. 9. 2005 s účinností od 1.10.2005
- [51] TP 234 Posuzování kapacity okružních křižovatek; EDIP s.r.o.; (2011); Technické podmínky; Schváleno MD – OPK a ÚP č.j. 620/2011-910-IPK/1 ze dne 31. 8. 2011, s účinností od 1. 9. 2011; ISBN 978-80-87394-02-01
- [52] ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic, říjen 2004, Český normalizační institut, 2004; ČSN 73 6101:2004/Oprava 1 (květen 2005); ČSN 73 6101:2004/Z1 (leden 2009)
- [53] ČSN 73 6102 Projektování křižovatek na silničních komunikacích, listopad 2007, Český normalizační institut, 2007; ČSN 73 6102:2007/Z1 (srpen 2011)
- [54] ČSN 73 6100-2 Názvosloví pozemních komunikací – Část 2: Projektování pozemních komunikací, 11/2008
- [55] TP 225 Prognóza intenzit automobilové dopravy (II. doplněné vydání), EDIP s.r.o., listopad 2012, Schváleno MD ČR s účinností od 12. října 2012.
- [56] Weber P., *Roundabout safety experience*, Chapter 5 of the Synthesis of North American Roundabout practice, Ourton Roundabouts Canada, Paper prepared for presentation at the Road Safety / Geometric Design Session of the 2007 Annual Conference of the Transportation Association of Canada Saskatoon, Saskatchewan
- [57] *Geometric Design of Roundabouts*, United Kingdom, 1993.
- [58] NCHRP – National cooperative Highway research program, report 572, Transportation research board of the national Academies.
- [59] S. Anjana, M. V. L. R. Anjaneyulu, *Development of Safety Performance Measures for Urban Roundabouts in India*, DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000729. © 2014 American Society of Civil Engineers.
- [60] Brude, *What roundabout design provides the highest possible safety?* Nordic Road and transport Research, No. 2, 2000, ISSN: 1101-5179

Název (CZE): Analýza návrhových prvků okružních křižovatek a jejich vliv na nehodovost
Název (ENG): Analysis of Roundabout design Parameters and their Impact on Accidents
Typ práce: Dizertační práce
Rok vydání: září 2017
Autor: Ing. Jan Novák
Studijní program: P3607 Stavební inženýrství (nDK)
Studijní obor: AKVO3607V009 Konstrukce a dopravní stavby (KDS)
Forma studia: Kombinovaná
Školitel práce: doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.
Místo: Vysoké učení technické v Brně
(IČ: 00216305)
Fakulta stavební
Ústav pozemních komunikací
Veveří 331/95, 602 00 Brno
Školitel
specialista: Ing. Jindřich Frič, Ph.D.
Pod záštitou: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
(IČ: 44994575)
Líšeňská 33a, 636 00 Brno
Fotodokumentace: autor
Grafika: autor



CENTRUM
DOPRAVNÍHO
VÝZKUMU