



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ



FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

NÁVRHOVÉ PRVKY TURBO-OKRUŽNÍCH KŘIŽOVATEK

DESIGN ELEMENTS TURBO-ROUNDAABOUTS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE
ANOTATION OF Ph.D. THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN SMĚLÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL RADIMSKÝ, Ph.D.

BRNO 2016

ABSTRAKT

Disertační práce popisuje novou metodu pro konstrukci turbo-okružních křižovatek aplikovatelnou v České republice. Inovativní je zejména přístup ke konstrukci jízdních pruhů a to zejména ve vztahu ke směrodatným vozidlům a rozšíření jízdních pruhů v závislosti na jejich rozměrech. Inovativní je i přístup k dopravnímu značení, kdy řeší sice detaily stávajících dopravních značek, ale tyto detaily jsou důležité pro chápání řidičů při průjezdu turbo-okružní křižovatkou.

Disertační práce tedy vyplňuje legislativní, ale i technickou mezeru v konstrukci turbo-okružních křižovatek a věřím, že bude přínosem zejména pro projektanty těchto křižovatek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Turbo-okružní křižovatka, jednopruhá okružní křižovatka, vícepruhová okružní křižovatka, jízdní pruh, směrodatné vozidlo, nehodovost, analýza obrazu, mezní rychlost, dosahovaná rychlost, vjezd, výjezd, okružní pás, fyzické oddělení jízdních pruhů, jízdní pás, dopravní značení

ABSTRACT

Dissertation describes new methodology of design turbo-roundabouts in Czech Republic. Especially innovative is approach to the design of traffic lanes with regards to standard vehicles and widening of traffic lanes according to their dimensions. Innovative is also approach to road signs, where details of current signs are modified, however, these details are important for drivers' better understanding while driving through turbo-roundabouts.

Dissertation fills legislative, but also technical, blank spot during turbo-roundabouts design and I believe that it will benefit particularly designers of these intersections.

KEYWORDS

Turbo-roundabout, single lane roundabout, multi-lane roundabout, traffic lane, standard vehicle, accident rate, image analysis, limit speed, achieved speed, entrance, exit, circulatory roadway, physically separated traffic lanes, roadway, road signs

OBSAH

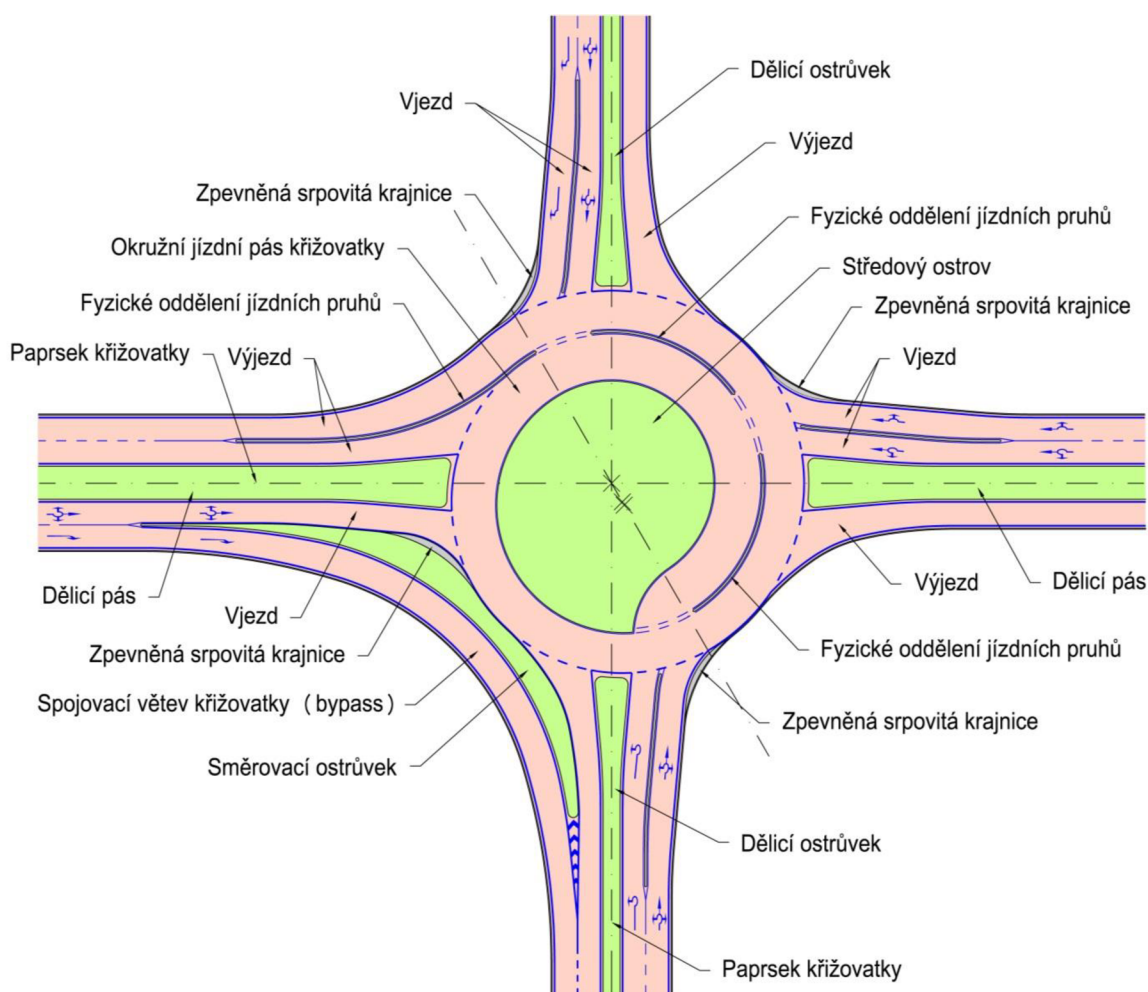
1 ÚVOD.....	4
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	5
3 SHRnutí STÁVAJÍCÍHO STAVU	5
3.1 Okružní křižovatky s vícepruhovými vjezdy	5
3.2 Princip TOK.....	5
4 METODY MĚŘENÍ A POSOUZENÍ	7
4.1 Měření rychlosti pomocí počítačového vidění – analýzy obrazu	7
4.2 Ověření průjezdnosti křižovatky – vlečné křivky	8
4.3 Výpočet kapacity TOK a OK.....	8
5 MĚŘENÍ, ANALÝZY A MODELOVÁNÍ	8
5.1 Poměr intenzit mezi pravým a levým jízdním pruhem na vjezdu OK a intenzity vozidel na OK.....	9
5.1.1 TOK čtyřramenná ve městě Uden v Nizozemí.....	9
5.1.2 TOK tříramenná křižovatka ve městě Uden v Nizozemí	11
5.1.3 OK křižovatka ve městě Harderwijk v Nizozemí.....	12
5.1.4 OK v Hranicích na Moravě na silnici I/35	14
5.1.5 TOK v Brně – Bohunicích na ulicích Kamenice x Netroufalky.....	14
5.1.6 Závěr z měření intenzit v jednotlivých jízdních pruzích před OK a TOK	15
5.2 Intenzity vozidel na TOK v ČR	15
5.3 Nehodovost na stávajících TOK a OK.....	16
5.3.1 Závěr k nehodovosti na vícepruhových OK a TOK.....	18
5.4 Rychlost vozidel při průjezdu TOK	18
5.4.1 Měření na TOK v Brně – Bohunicích.....	19
5.4.2 Měření na TOK v Brně Slatině.....	20
5.4.3 Závěr k měření rychlosti na TOK.....	21
5.5 Vlečné křivky při průjezdu TOK	22
5.5.1 Závěr k simulaci průjezdnosti TOK	22
5.6 Závěr z měření, analýz a modelování	22
6 NÁVRHOVÉ PARAMETRY TOK.....	23
6.1 Směrové uspořádání TOK.....	24
6.1.1 Postup návrhu	25
7 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ	26
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	28
ŽIVOTOPIS.....	29

1 ÚVOD

S oživující se ekonomikou a několika málo let stagnování rozvoje dopravy dochází opět k nárůstu dopravy. Důvodem jsou zejména snižující se nezaměstnanost, zvyšující se HDP, a s tím spojené ostatní parametry, které generují nárůst potřeb člověka po dopravě. S větší ekonomickou silou společnosti dochází i k přerozdělení volby dopravních prostředků pro mobilitu. Přirozeně tedy dochází a bude docházet k rozvoji zejména individuální automobilové dopravy.

Na tuto skutečnosti je třeba připravovat nejen vozový park, ale i silniční síť. Proto je třeba hledat nové druhy řešení a uspořádání silniční sítě, která přinesou benefity jako je vyšší kapacita za udržitelné nebo zvyšující se bezpečnosti dopravy.

Jedním z řešení může být spojení řadících pruhů a okružní křižovatky, spolu se spirálovitým uspořádáním jízdních pruhů na okružním pásu. Z tohoto potom vznikne křižovatka, která je ve světě označována jako turbo-okružních křižovatka (dále jen TOK), viz Obr. 1, a v České republice často nazývána jako spirálová okružní křižovatka, někdy též spirálovitá okružní křižovatka.



Obr. 1 Popis prvků TOK s fyzickým oddělením jízdních pruhů

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem této práce je definovat, nakreslit a vysvětlit návrhové parametry pro TOK tak, aby tento druh křižovatek mohl být efektivně, tedy s využitím jejich potenciálu v oblasti kapacity při zachování bezpečnosti jednopruhových okružních křižovatek, používán v silniční síti České republiky.

Dílčím cílem této práce jsou:

- Shrnutí stávajícího stavu poznání v ČR i v zahraničí.
- Měření.
- Prokázání pozitivního vlivu spirálového uspořádání na kapacitu turbo-okružních křižovatek.
- Modelování a prověření průjezdnosti turbo-okružních křižovatek pomocí software
- Návrh parametrů turbo-okružních křižovatek

Důvodem k výběru tohoto tématu je zajištění co možná největší podobnosti návrhů relativně složitých křižovatek, které se potom rychleji a lépe dokáží zařadit do systému komunikační sítě a řidiči dokáží přirozeně využívat jejich výhody podobně, jak se to dneska děje u jednopruhových okružních křižovatek.

3 SHRUTÍ STÁVAJÍCÍHO STAVU

3.1 OKRUŽNÍ KŘÍŽOVATKY S VÍCEPRUHOVÝMI VJEZDY

Kapacita okružní křižovatky s jedním jízdním pruhem na okruhu je cca 2500 vozidel/hodinu, tedy cca 25000 vozidel/24 hodin. S nárůstem dopravy vplynula potřeba převádět přes úrovnové křižovatky větší intenzity dopravy.

V domnění, že přidáním více pruhů do křižovatky, dojde k navýšení jejich kapacity, se začaly realizovat OK se dvěma pruhy na okružním páse a se dvěma pruhy na vjezdu i výjezdu (tzv. vícepruhové okružní křižovatky). Skutečnost ukázala, že v reálném provozu tyto úvahy nefungují. Z dopravně inženýrských měření (viz kapitola 5 a disertační práce kapitola 6) i zahraničních studií je zřejmé, že levý a pravý jízdni pruh na vjezdu do OK, stejně tak i levé a pravé pruhy na okružním páse a následně i výjezdu, nejsou využívány rovnoměrně, navíc toto uspořádání častěji vede ke kolizním situacím.

3.2 PRINCIP TOK

Základem TOK je jednopruhová OK. Do této OK jsou u dvoupruhových vjezdů do okružního páse vloženy další (vnitřní) jízdni pruhy.

U dvoupruhových výjezdů je řidič jedoucí v pravém (vnějším) jízdním pruhu obvykle nucen odbočit prvním výjezdem doprava případně pokračovat rovně napříč TOK. V levém jízdním pruhu na vjezdu do okružního pásu TOK jedou vozidla, která projíždí křižovatkou v přímém směru nebo odbočují vlevo.

Řidiči tedy musí být již před TOK rozřazeni do správných jízdních pruhů obdobně jako před průsečnou nebo stykovou křižovatkou s řadícími pruhy. Na tuto skutečnost musí být upozornění v dostatečném předstihu přehledným a zcela zřejmým vodorovným i svislým dopravním značením (Obr. 2).



Obr. 2 Svislé a vodorovné dopravní značka před okružní křižovatkou se spirálovitým uspořádáním (TOK – Holandsko – město Uden)

Následující výčet návrhových prvků může být nazván základní v tom smyslu, že bez jejich aplikace nelze křižovátku považovat za TOK:

1. naproti alespoň jednomu vjezdu začíná druhý jízdní pruh okružního pásu na úkor středového ostrova;
2. alespoň na dvou paprscích TOK se čtyřmi paprsky musí být vjezdy, na kterých dávají řidiči přednost vozidlům na dvou jízdních pruzích okružního pásu;
3. alespoň na jednom paprsku TOK se třemi paprsky musí být vjezd, na kterém dávají řidiči přednost vozidlům na dvou jízdních pruzích okružního pásu;
4. nesmí nastat uspořádání, ve kterém by řidiči na vjezdu museli dávat přednost vozidlům na třech a více jízdních pruzích okružního pásu;
5. spirálové vodorovné dopravní značení plynule vede vozidla od vjezdu po výjezd bez potřeby průpletů a bez umožnění křížení dráhy vozidel jedoucích po okruhu s vozidly opouštějícími okružní pás.

Hlavním důvodem zavádění TOK jsou kapacita a bezpečnost.

Hlavní výhodou z pohledu bezpečnosti TOK ve srovnání s konvenčními OK se dvěma pruhy na okruhu, vjezdech i výjezdech jsou:

- nízký počet křížných kolizních bodů, čehož je dosaženo snížením počtu křížících se dopravních proudů;
- odstranění možnosti průpletů a křížení dráhy vozidel jedoucích po okruhu s vozidly okružní pás opouštějícími.

Na TOK nejsou umožněny krátké průplety mezi vjezdem a následujícím výjezdem (viz disertační práce obrázek Obr. 13), a to ani v případě jednopruhových výjezdů.

4 METODY MĚŘENÍ A POSOUZENÍ

V následujících bodech jsou popsány různé metody měření, včetně posouzení jejich vhodnosti pro dosažení cílů disertační práce a jejich použití.

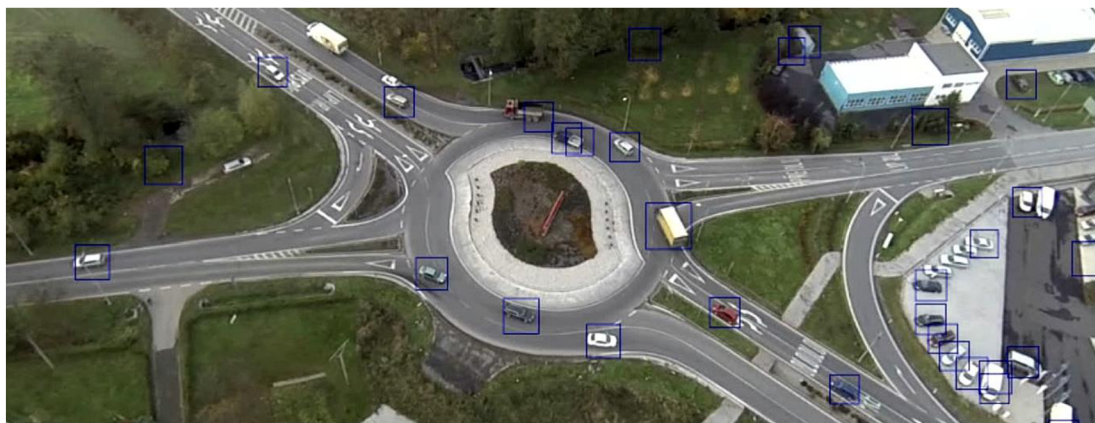
Ve vlastní disertační práci je uveden výčet všech použitých metod měření a posouzení. V Tezích práce jsou uvedeny pouze ty nejpodstatnější.

4.1 MĚŘENÍ RYCHLOSTI POMOCÍ POČÍTAČOVÉHO VIDĚNÍ – ANALÝZY OBRAZU

Analýza obrazu je v dnešní době velice rychle rozvíjející se obor. S aplikacemi analýzy obrazu se můžeme setkat v celé řadě odvětví jako je vojenství, lékařství a samozřejmě i v dopravě. Pro účely měření rychlosti je nutné získat trajektorie vozidel v čase. Z těchto údajů je možné získávat dopravně inženýrské hodnoty, jako je rychlost, intenzity vozidel, podélné a příčné zrychlení apod.

Velice podrobně a zejména věcně popisuje principy zpracování analýzy obrazu počítačovým viděním článek [6].

K měření rychlosti i ostatních dopravně inženýrských dat na TOK byl využit software firmy RCE systems s.r.o. - DataForSky, který je testován mimo jiné i v rámci měření provedených v této práci. Cílem softwaru je zcela automatické vyhodnocení zaznamenaných dat z hexakoptéry, Ukázky z práce softwaru jsou patrné z Obr. 3.



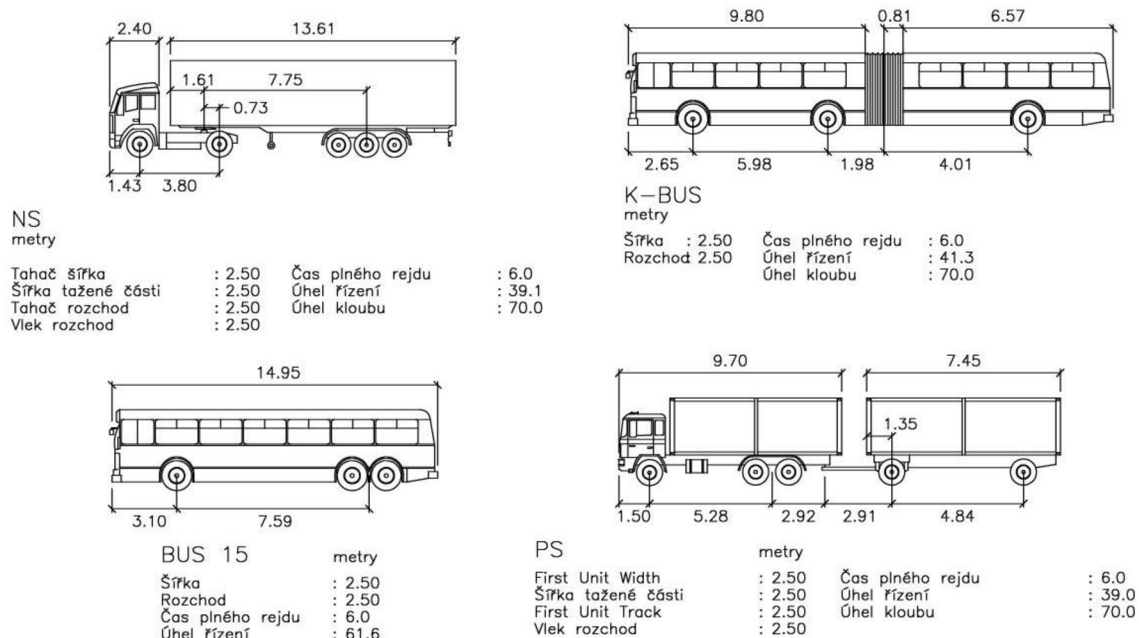
Obr. 3 Výsledek práce klasifikátorů při detekci vozidel

Z výsledných měření rychlostí vozidel projíždějících malým obloukem vyplývá, že pro dosažení cílů této práce je tato metoda nejvhodnější. Benefitem jsou další dopravně inženýrská data pro sledování chování vozidel při průjezdu křižovatkou, ale samozřejmě i jiných úseků komunikací. Naopak nevýhodou tohoto způsobu měření jsou některá omezení spojená s létáním s hexakoptérou jako je legislativa, klimatické podmínky a doba letu hexakoptéry, která je cca 20 minut na jednu sadu baterií.

4.2 OVĚŘENÍ PRŮJEZDNOSTI KŘIŽOVATKY – VLEČNÉ KŘIVKY

Návrhové parametry křižovatek je třeba ověřit na průjezd největšího uvažovaného návrhového vozidla, aby celkové směrové řešení křižovatkou umožnilo plynulý provoz zejména návěsovým soupravám podle technických podmínek [10].

Z pohledu šířky vlečné křivky a průjezdu vozidla směrovým obloukem jsou typické tyto vozidla, viz Obr. 4.



Obr. 4 Rozměry použitých vozidel pro ověření průjezdnosti křižovatkou

Dále jsou uvedeny technické parametry použité pro co možná nejrealnější simulaci průjezdu vozidel směrovým obloukem. Na ověření simulace byl použit software AutoTURN.

4.3 VÝPOČET KAPACITY TOK A OK

Kapacitu TOK lze vypočítat v ČR dle platných technických podmínek [5].

5 MĚŘENÍ, ANALÝZY A MODELOVÁNÍ

Předmětem kapitoly 5 je posouzení TOK a vícepruhových OK s cílem prokázat pozitivní vliv spirálového uspořádání TOK na kapacitu křižovatkou. Proto byla provedena řada měření a analýz s využitím metod popsanych v kapitole 4.

Pro měření a posouzení intenzit a rychlostí byly vybrány TOK/OK, případně jen jejich jednotlivé vjezdy, tak aby co nejlépe reprezentovaly sledovanou problematiku. Výběr je do značené míry omezen také tím, že TOK na popularitě získávají až v posledních letech, a některé z popsaných TOK nebyly v době započetí prací a provádění měření ještě realizovány.

Měření a analýzy jsou nesourodé, což je způsobeno vývojem návrhu těchto křižovatek v ČR, jejich postupnou výstavbou a následným sledováním autora.

5.1 POMĚR INTENZIT MEZI PRAVÝM A LEVÝM JÍZDNÍM PRUHEM NA VJEZDU OK A INTENZITY VOZIDEL NA OK

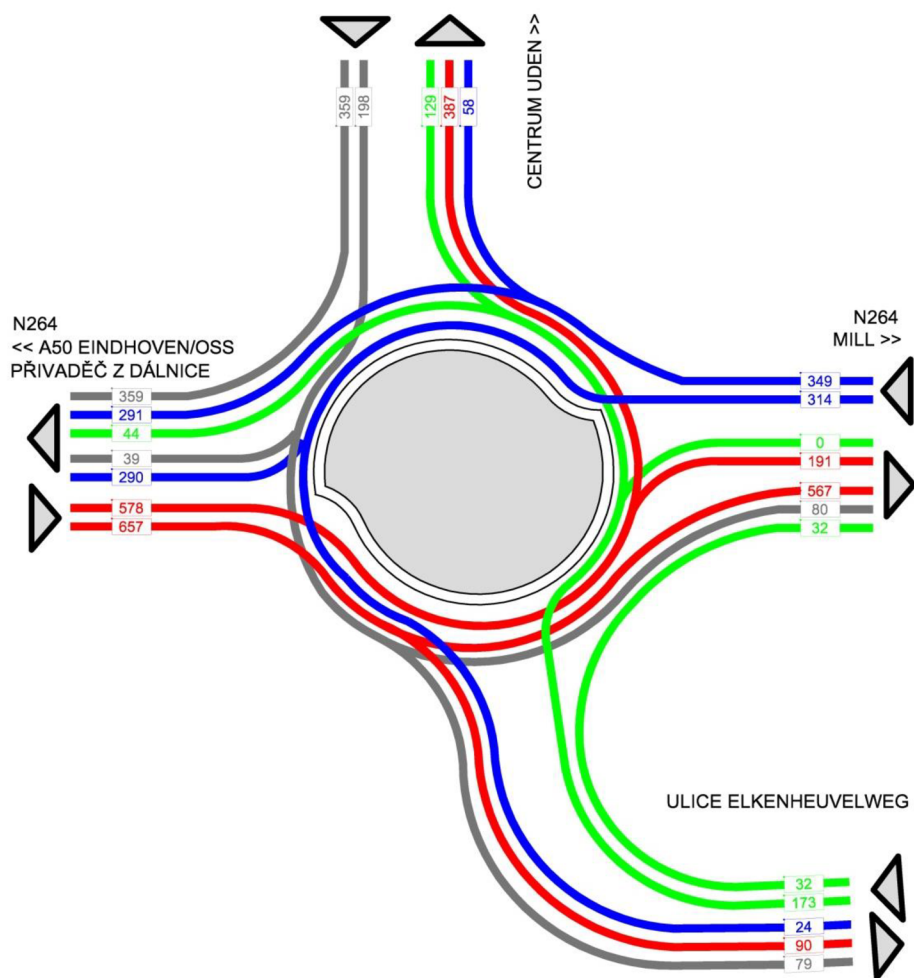
V rámci řešení dílčího úkolu 1311 projektu 1M0579 (výzkumné centrum CIDEAS) bylo provedeno několik měření intenzit dopravy u vícepruhových OK i TOK v České republice a v Nizozemí. Celkem byly změřeny 4 křižovatky v Nizozemí, z čehož 3 byly TOK a 1 dvoupruhová s klasickým uspořádáním jízdních pruhů na okruhu. V České republice byly sledovány 3 křižovatky, dvoupruhová v Praze na Litochlebském náměstí (sčítáno kolegy z ČVUT) a v Hranicích na Moravě a TOK v Brně Bohunicích na křižovatce ulic Kamenice x Netroufalky. Měření byla prováděna v roce 2010.

Cílem měření bylo potvrdit hlavní výhodu TOK oproti vícepruhovým OK, kterou je rovnoměrnější rozdělení vozidel na vjezdu mezi levý a pravý jízdní pruh.

Tabulky s uvedením nasčítaných intenzit vozidel k jednotlivým měřením jsou uvedeny v disertační práci.

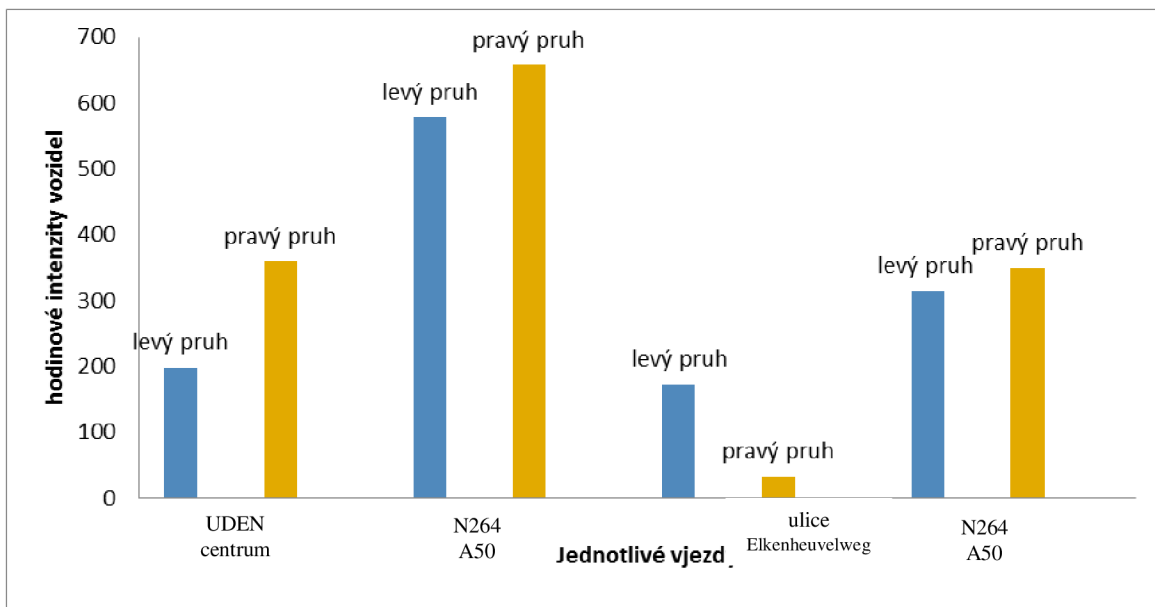
5.1.1 TOK čtyřramenná ve městě Uden v Nizozemí

Jedná se o TOK se spirálovitým vedením ve směru silnice N264, viz Obr. 5



Obr. 5 Kartogram s hodinovými intenzitami vozidel na čtyřramenné okružní křižovatce v Udenu. Z výsledků je patrné, že u spirálového uspořádání jízdnic pruhů v OK využívají vícepruhové vjezdy rovnoměrněji, než u dvoupruhových křižovatek s klasickým uspořádáním jízdnic pruhů.

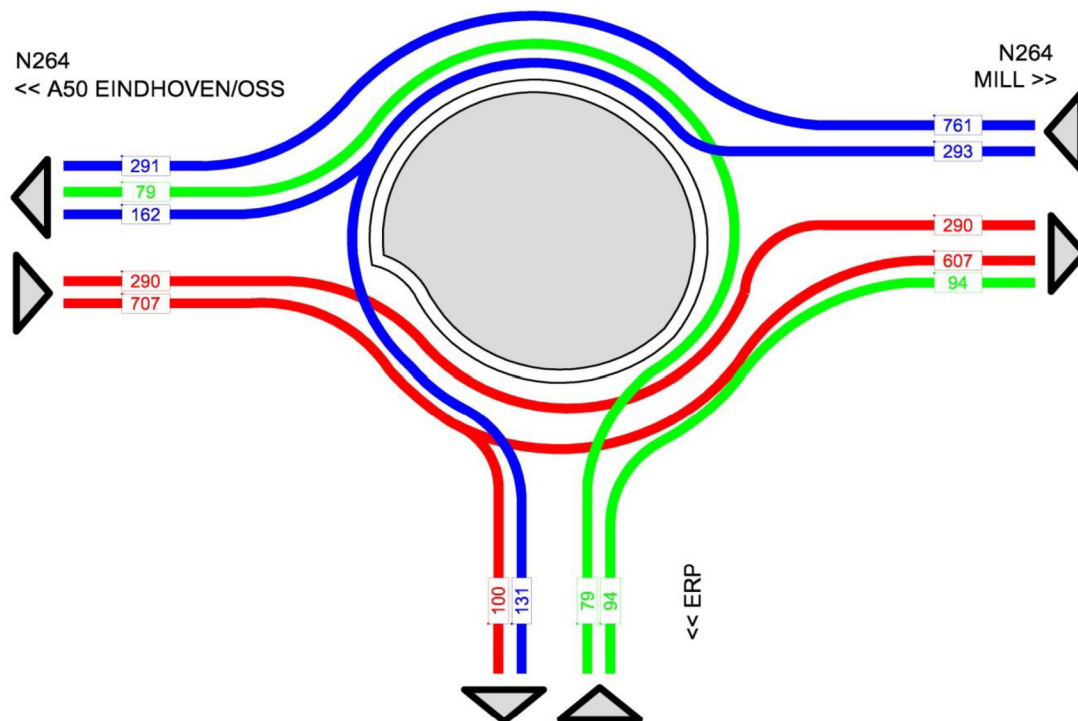
Rozdělení počtu vozidel v jednotlivých pruzích je zobrazeno v následujícím Graf 1.



Graf 1 Hodinová intenzita vozidel na vjezdu v levém a pravém pruhu pro jednotlivé vjezdy

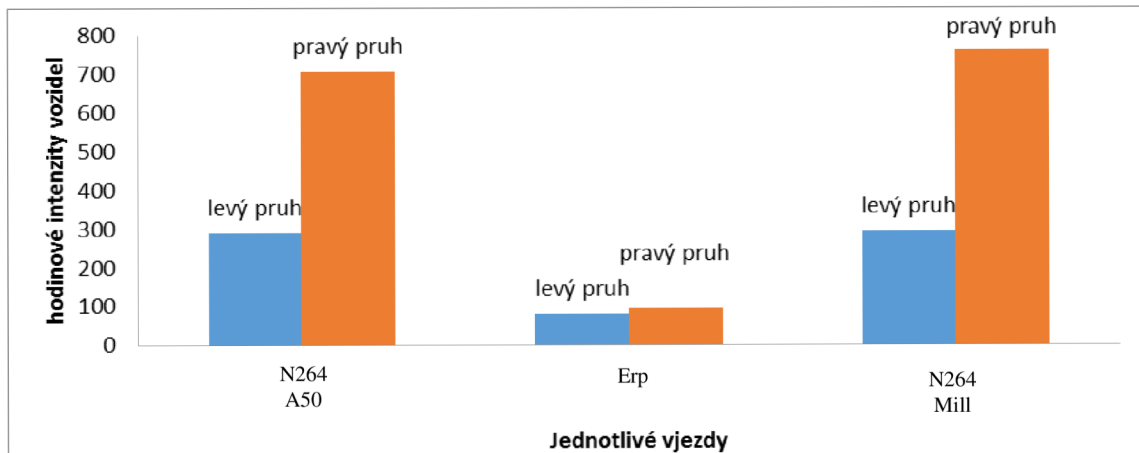
5.1.2 TOK tříramenná křižovatka ve městě Uden v Nizozemí

Jedná se o opět o křižovatku u města Uden na silnici N264 ve směru od dálnice A50 ve směru do města Genneep přes Mill.



Obr. 6 Kartogram s hodinovými intenzitami vozidel na tříramenné okružní křižovatce v Uden

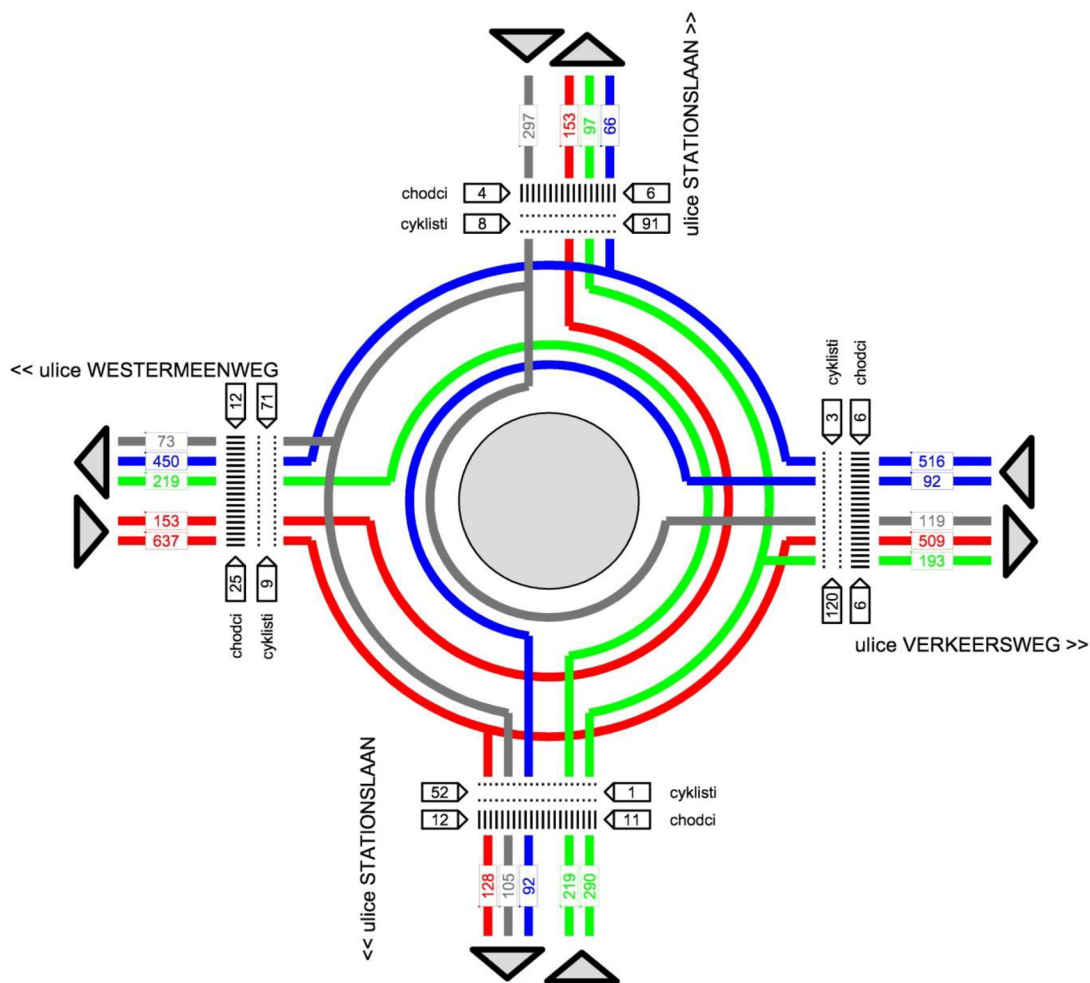
Výsledky sčítání jsou graficky zobrazeny v Graf 2. Z výsledků je patrné, že u TOK jsou využívány vícepruhové vjezdy rovnoměrněji, než u dvoupruhových křižovatek s klasickým uspořádáním jízdnic pruhů.



Graf 2 Hodinová intenzita vozidel na vjezdu v levém a pravém pruhu na vjezdech do křižovatky

5.1.3 OK křižovatka ve městě Harderwijk v Nizozemí

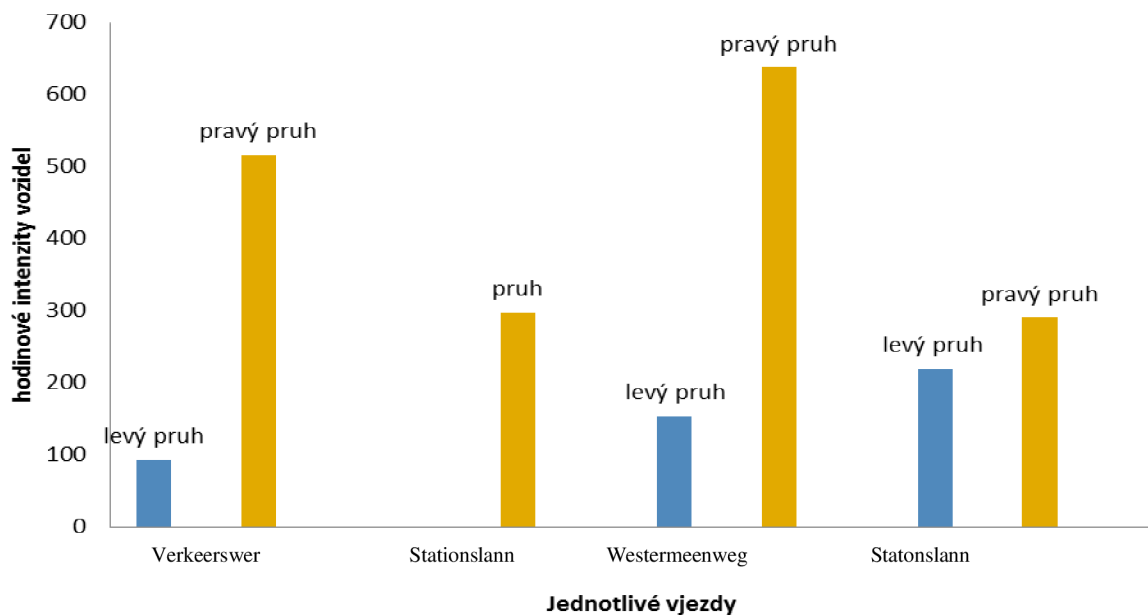
Jedná se o čtyřramennou křižovatku ve městě Harderwijk, která má klasické uspořádání jízdnic pruhů na okružním pásu křižovatky.



Obr. 7 Kartogram s hodinovými intenzitami vozidel na okružní křižovatce v Harderwijk včetně zobrazení chodců a cyklistů

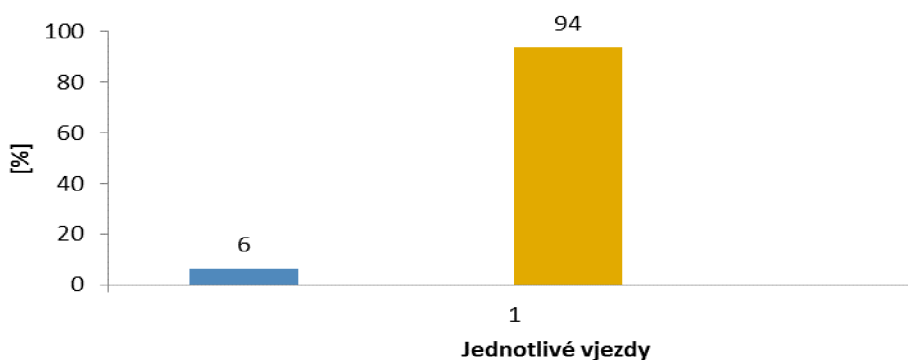
Výsledky sčítání jsou graficky zobrazeny v Graf 3.

Z Graf 3 je patrné, že i v Nizozemí nejsou levé pruhy tolik využívány v případě použití okružní křižovatky se soustředným vedením dvěma jízdními pruhy na okružním pásu.



Graf 3 Hodinová intenzita vozidel na vjezdech v levém a pravém pruhu.

5.1.4 OK v Hranicích na Moravě na silnici I/35



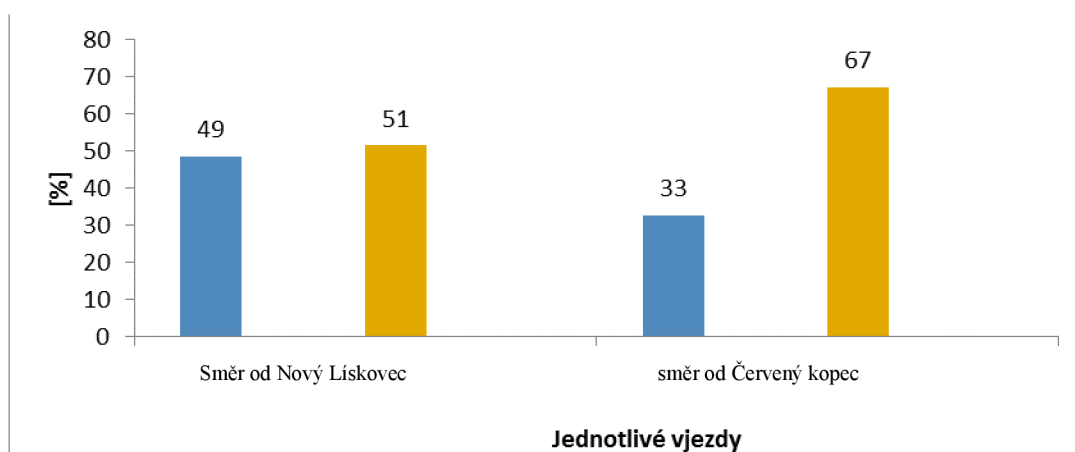
Graf 4 Procentuální rozložení intenzit vozidel v levém a pravém jízdním pruhu na vjezdu od Lipníka nad Bečvou

Ze sčítání dopravy bylo patrné, že i když je před vjezdem na okružní pás pravý jízdni prhu zaplněn a tvoří se na něm kolona, vozidla jen zcela výjimečně využívají levý jízdni pruh, který tak zůstává často prázdný.

Z Graf 4 je patrné, že pouze 6 % vozidel využívá na tomto vjezdu do křižovatky levý jízdni pruh.

5.1.5 TOK v Brně – Bohunicích na ulicích Kamenice x Netroufalky

Výsledky ukazují, že TOK může fungovat a zvýšit kapacitu silniční sítě.



Graf 5 Procentuální rozložení intenzit vozidel v levém a pravém jízdním pruhu v měřené hodině provozu na vjezdech do TOK v Brně – Bohunicích u Kampusu

5.1.6 Závěr z měření intenzit v jednotlivých jízdních pruzích před OK a TOK

Z výsledků měření vyplývá, že využívání levého a pravého jízdního pruhu na vícepruhových křižovatkách je v Nizozemí i v České republice efektivnější pouze v případě návrhu TOK. Z měření je patrný větší počet najíždějících vozidel do okružního pásu a zároveň větší propustnost křižovatky. Tato měření potvrzují, že kapacita TOK je větší než u vícepruhových OK s klasickým řazením jízdních pruhů. Tato práce se podrobněji vlastní kapacitou TOK nezabývá, pouze potvrzuje jejich výhodu a oprávněnost používání v ČR. Práce se zabývá v převážné míře vlastním geometrickým uspořádáním TOK.

5.2 INTENZITY VOZIDEL NA TOK V ČR

Doplněním ke kapitole 5.1 je sčítání dopravy na vybraných TOK v délce několika hodin v době ranní nebo odpolední špičky a vyhodnocení bylo provedeno pro špičkovou hodinu.

V práci jsou na ukázkou přiloženy kartogramy intenzit dopravy na vybraných křižovatkách a zde jsou vypsány intenzity vozidel na všech vjezdech do křižovatky. Žádná ze sledovaných TOK nemá fyzické oddělení jízdních pruhů.

Tab. 1 Součty intenzit vozidel ve špičkové hodině na vjezdech na některých TOK v ČR, měřeno v roce 2013

TOK	počet vjezdů	suma počtu vozidel na vjezdech za hodinu
Olomouc – Hamerská	4	2555
Havířov u nádraží	6	3700
Olomouc ul. Keplerova	4	2026
Brno – Kamenice x Netroufalky	4	1519

Brno – křižovatka ulic Hradecká x Žabovřeská	4	1514
Beroun – křižovatka ulic Koněpruská x K Nádraží, u D5	4	1150
Prostějov – křižovatka ulic Wolkerova x Dolní x Újezd a Petrské nám.	4	2079
Brno – Slatina, ul. Řípská x Hvězdoslavova x Olomoucká	5	2879

Z měření intenzit vozidel na vybraných křižovatkách vyplývá, že intenzita vozidel se blíží kapacitě křižovatky na křižovatce v Havířově a následně potom v Olomouci na ulici Hamerské, nicméně jak je uvedeno na příkladu právě křižovatky Olomouc – Hamerská i dle kapacitního výpočtu uvedeného v technických podmínkách [5] nedosahuje křižovatka Hamerská své kapacity a je zde tedy velká rezerva.

Nicméně z předložených kartogramů je patrné rovnoměrné využívání vícepruhových vjezdů, okružních pásu i výjezdů, což jednak potvrzuje tvrzení z předešlé kapitoly a dále potom na vyšší reálnou kapacitu TOK v provozu.

5.3 NEHODOVOST NA STÁVAJÍCÍCH TOK A OK

Hodnocení bezpečnosti vychází ze statistik Policie ČR. Nehodovost OK byla sledována pro skupinu dvanácti OK s vícepruhovým uspořádáním jízdních pruhů a porovnána s nehodovostí na osmi TOK v ČR. Do statistiky nebyly přidány 3 TOK v Českých Budějovicích, kde nebyla zaznamenána žádná dopravní nehoda, což vyplývá s nízké intenzity vozidel danou tím, že se jedná o etapu výstavby. Do statistiky nehodovosti nebyla rovněž přidána TOK v Brně Modřicích, kde nebylo možné, díky zákazu vlastníka komunikace Nákupního centra Olympie, získat data o intenzitách vozidel.

Porovnání nehodovosti OK a TOK bylo provedeno na základě ukazatele, který se nazývá relativní nehodovost.

(1)

$$R = \frac{N_o}{365 \cdot I \cdot t}$$

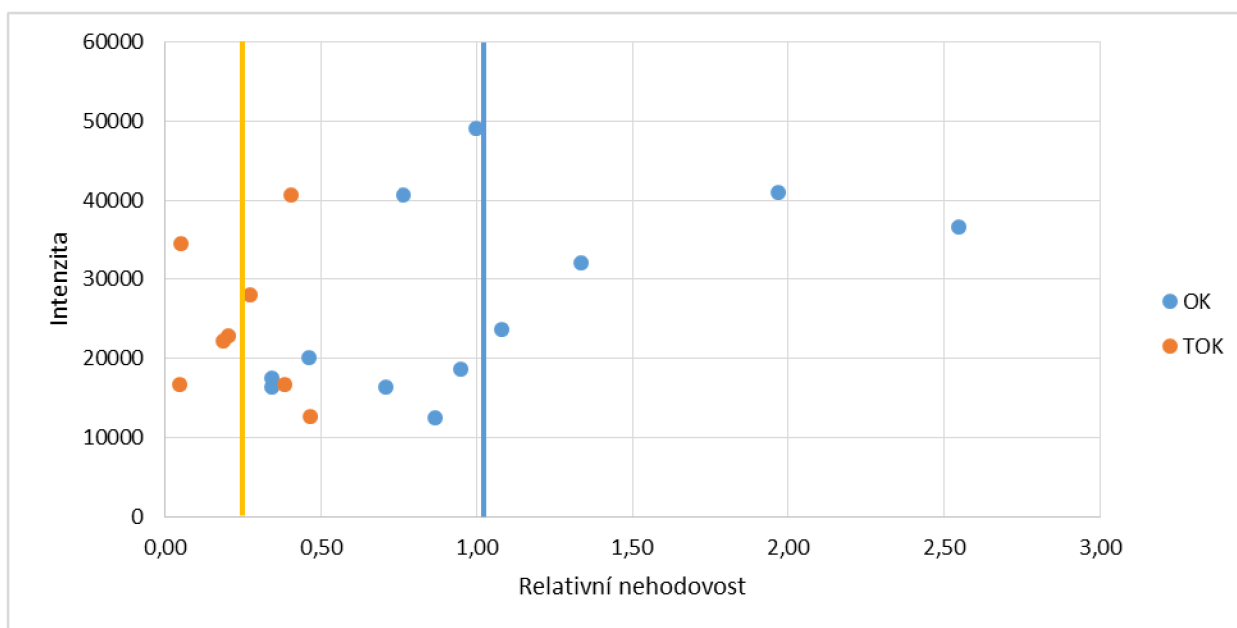
kde

N_o – celkový počet nehod ve sledovaném období [počet nehod / mil. vozkm a rok]

I – průměrná denní intenzita vozidel na vjezdech do OK [voz/24 hod]

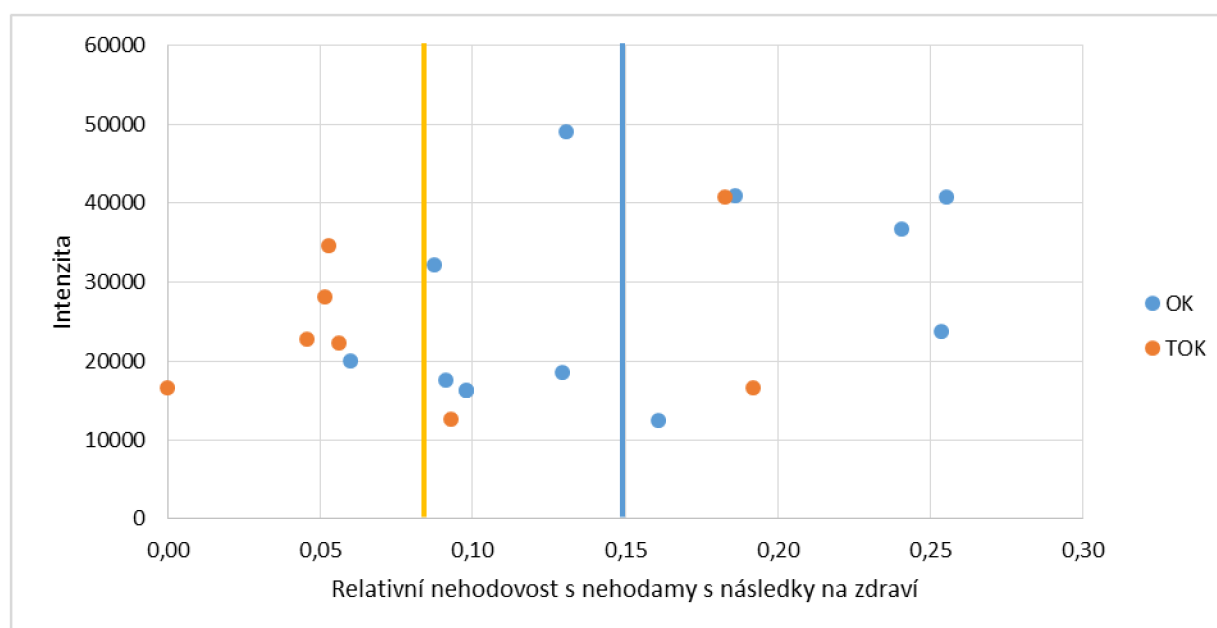
t – sledované období [roky]

Z Graf 6 je patrné, že u TOK je relativní nehodovost nižší oproti vícepruhových OK.



Graf 6 Relativní nehodovost na vícepruhových OK a TOK. Čáry v grafu zobrazují průměrnou hodnotu relativních nehodovostí na sledovaných křižovatkách.

Následně byla porovnána relativní nehodovost s nehodami s následky na zdraví, které popisuje [9]. I zde je patrné, že relativní nehodovost s následky na zdraví je u TOK nižší, i když v Brně na ulicích Kamenice – Netroufalky a Havířově u nádraží je tento ukazatel srovnatelný s OK s klasickým řazením jízdních pruhů.



Graf 7 Relativní nehodovost na vícepruhových OK a TOK s nehodami s následky na zdraví. Čáry v grafu zobrazují průměrnou hodnotu relativních nehodovostí na sledovaných křižovatkách.

Při podrobnější analýze dopravního nehod byly analyzovány hlavní příčiny vzniku nehod. V převážné míře se jedná o nehody z důvodu nedání přednosti v jízdě, což bývá způsobené nevhodným nebo nedostatečně srozumitelným dopravním značením. Dále se jedná o nehody s chodci na přechodu pro chodce. To dokazuje, že

přechody pro chodce u TOK i u OK obecně způsobují problémy nejen s jejich kapacitou, ale i s bezpečností.

5.3.1 Závěr k nehodovosti na vícepruhových OK a TOK

Z vyhodnocení nehodovosti na TOK a OK vyplývá, že nehodovost na vícepruhových OK je 4x větší než na TOK. Zároveň je možné říci, že u nehod s následky na zdraví je nehodovost na vícepruhových OK 2x větší než na TOK.

Lze tedy říci, že TOK splňují základní požadavky na ně kladené pro zvýšení bezpečnosti, tj.:

- nedochází k žádným průpletům (resp. změnám pruhu) na okružním pásu,
- nadřazený dopravní proud na okružním pásu má max. 2 jízdní pruhy (v místě připojení),
- nízké rychlosti (na vjezdech i na okružním pásu).

Je nutno zmínit, že tyto závěry z nehodovosti vycházejí z vzorku TOK, které jsou postaveny poměrně krátkou dobu, nicméně je to většina TOK v ČR v provozu v době psaní této práce. Podrobnější závěry z nehodovosti lze zjistit spíše z rozsáhlejších zahraničních zkušeností a studií [1], [7], [11] atd. Na druhou stranu řidiči každé země mají své dopravní zvyklosti a nelze tak vždy využít zkušenosti ze zahraničí.

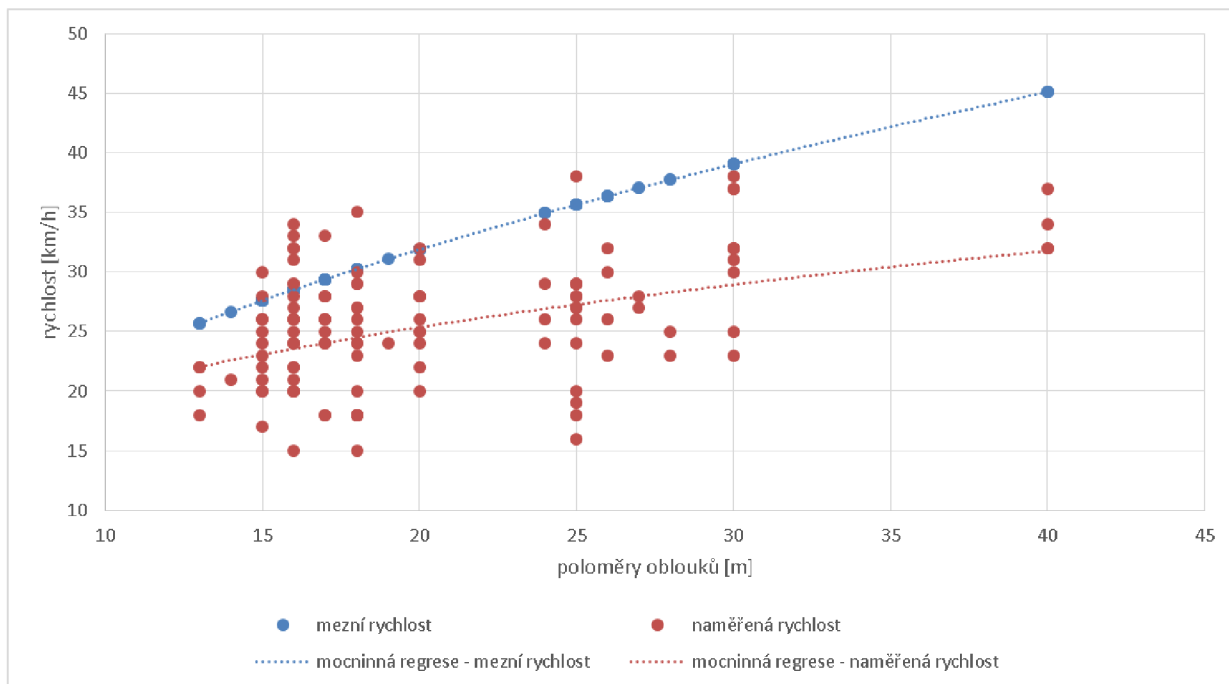
Nehody na sledovaných křižovatkách jsou v převážné míře způsobeny přejížděním jízdních pruhů v malých poloměrech oblouků, podobně jako v zahraničních studiích. Velký vliv na nehodovost a zejména na nehody s následky na zdraví osob, má přítomnost tzv. „úzkých“ (obvykle označovaných jako zranitelných) účastníků silničního provozu (cyklisté a motocyklisté). Tito účastníci se mnohem častěji schovávají do mrtvých úhlů v zrcátkách vozidel jedoucích před nimi, čímž dochází k jejich přehlédnutí a následně ke kolizním situacím případně i k nehodám.

5.4 RYCHLOST VOZIDEL PŘI PRŮJEZDU TOK

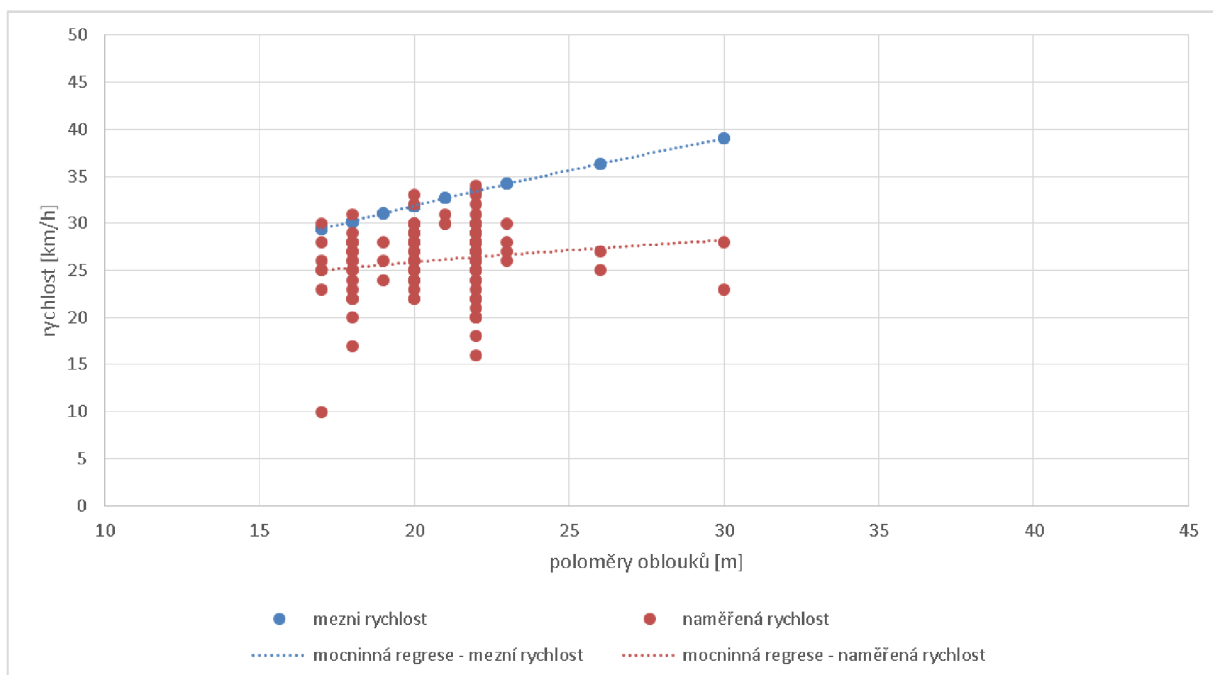
Sledování rychlosti vozidel při průjezdu OK je důležitý podklad pro vlastní návrh geometrie křižovatky. Sledována byla rychlost vozidel při průjezdu dvou TOK na vjezdu, okružním pásu a výjezdu. K získávání informací o rychlostech byl použit postup měření rychlosti pomocí počítačového vidění. Nejdříve byl hexakoptérou pořízen videozáznam a následně byla provedena analýza jednotlivých trajektorií vozidel pomocí softwaru DataForSky, viz kapitola 4.1.

Obě měření byla provedena v běžný pracovní den (21. 10. 2013 a 22. 11. 2014) za sucha a za nezhoršené viditelnosti. Měření bylo prováděno mimo dopravní špičku, tak aby bylo možné sledovat co největší množství neovlivněných průjezdů.

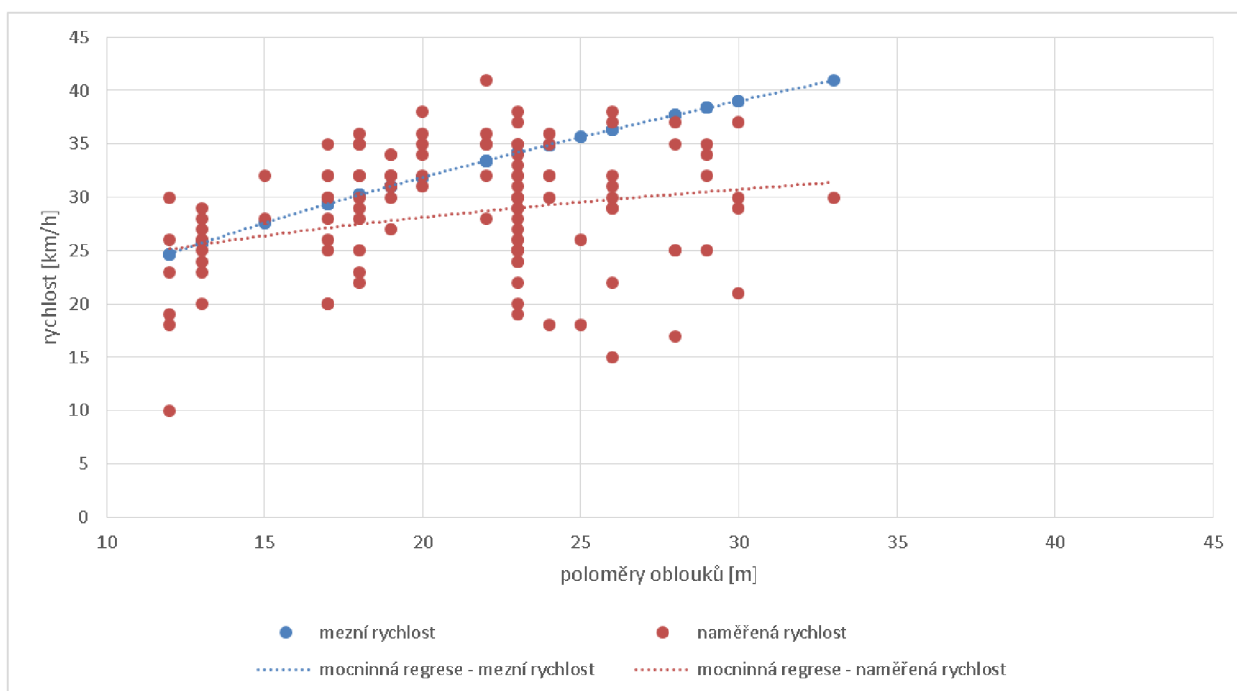
5.4.1 Měření na TOK v Brně – Bohunicích



Graf 8 TOK v Brně Bohunicích – porovnání naměřených a mezních rychlostí – vjezd na okružní pás TOK

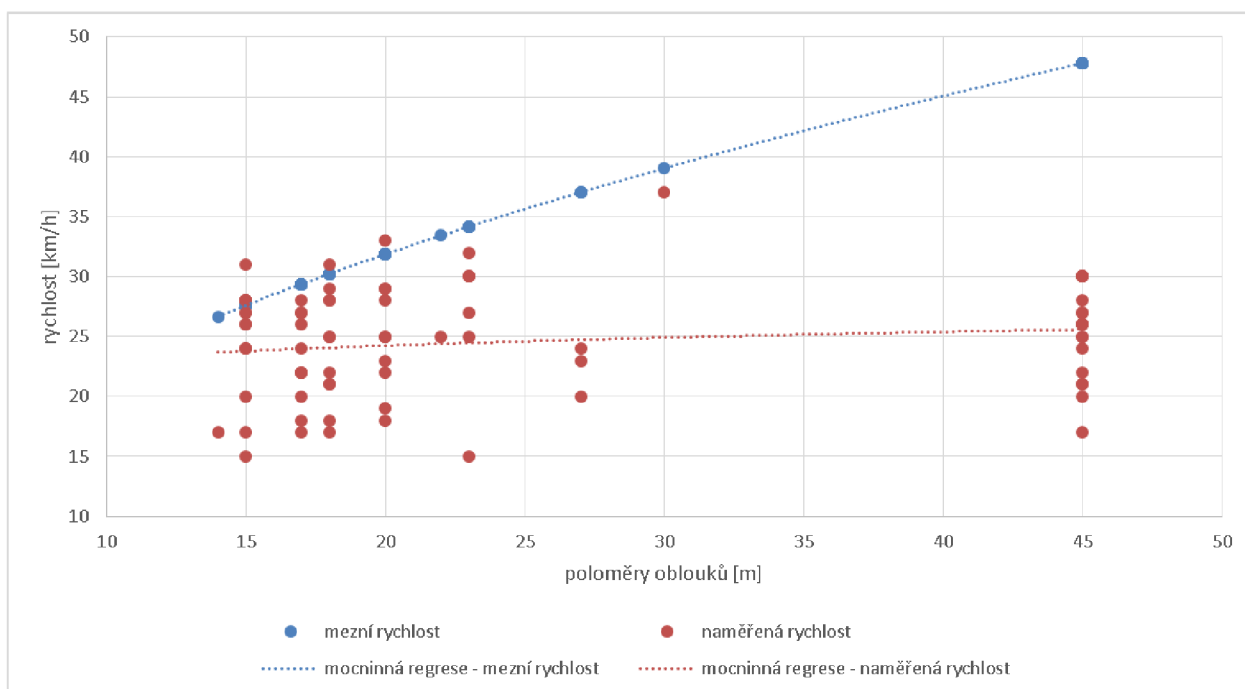


Graf 9 TOK v Brně Bohunicích – porovnání naměřených a mezních rychlostí – na okružním pásu TOK

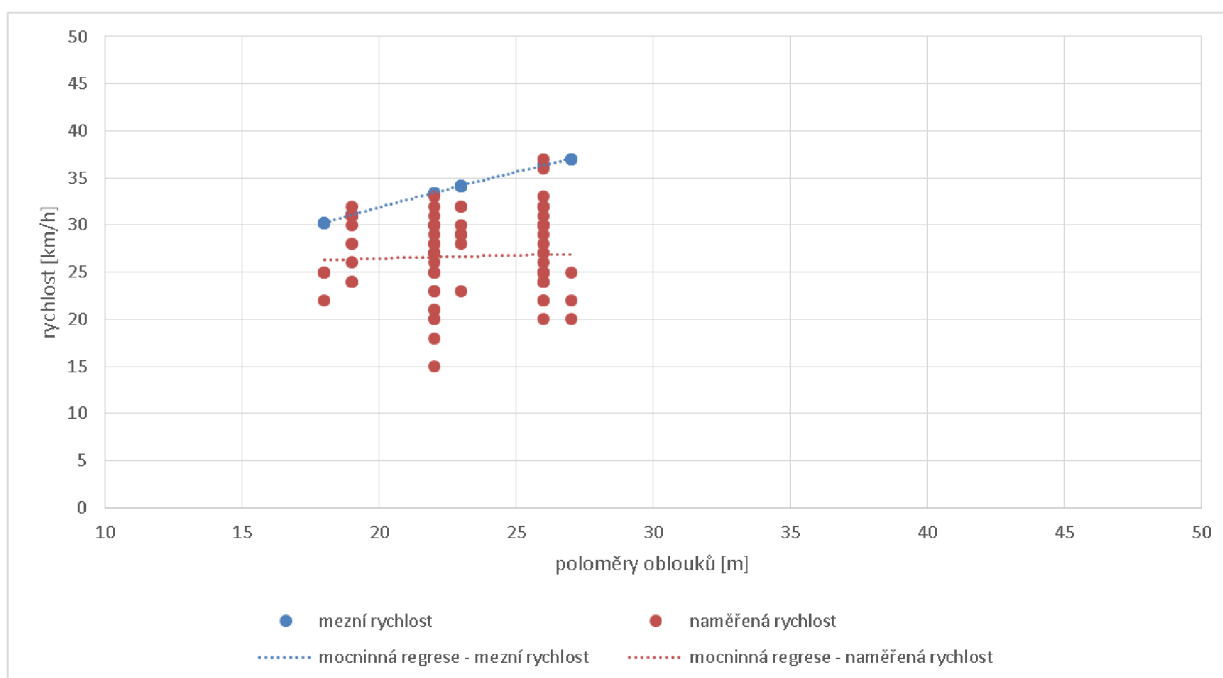


Graf 10 TOK v Brně Bohunicích – porovnání naměřených a mezních rychlostí – výjezd z okružního pásu TOK

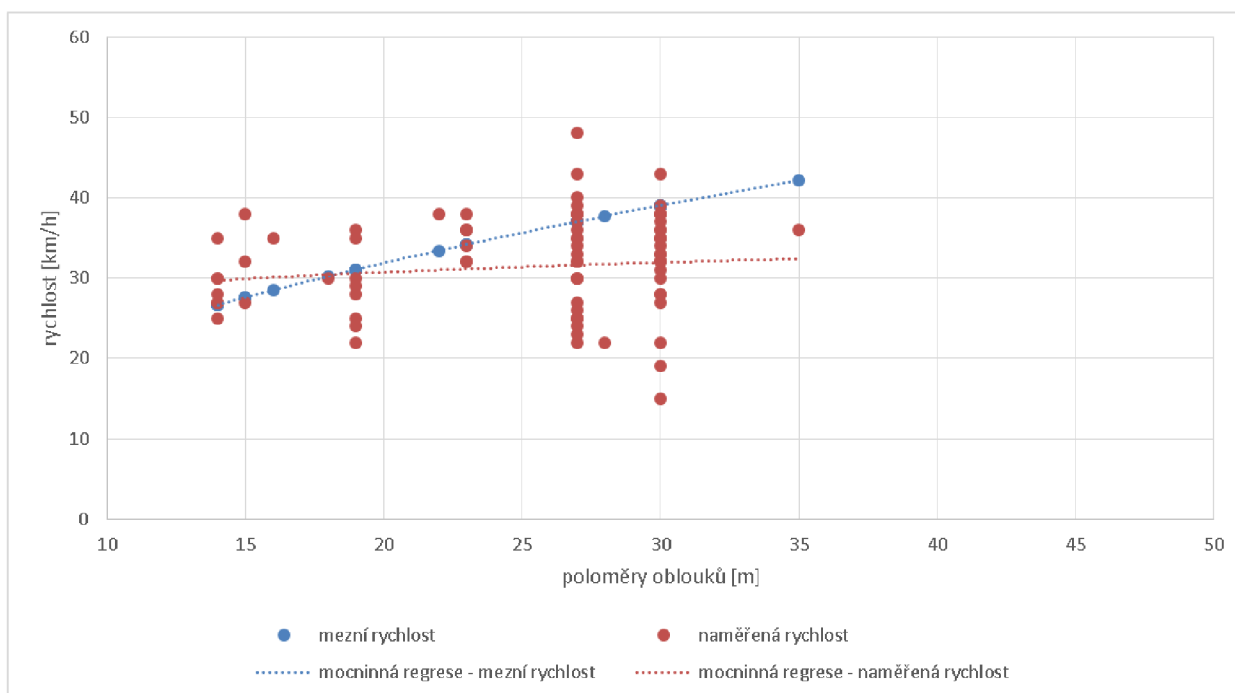
5.4.2 Měření na TOK v Brně Slatině



Graf 11 TOK v Brně Slatině – porovnání naměřených a mezních rychlostí – vjezd na okružní pás TOK



Graf 12 TOK v Brně Slatině – porovnání naměřených a mezních rychlostí – na okružním pásu TOK



Graf 13 TOK v Brně Slatině – porovnání naměřených a mezních rychlostí – výjezd z okružního pásu TOK

5.4.3 Závěr k měření rychlostí na TOK

Bylo změřeno více než 200 vozidel ve třech směrových obloucích, tedy přibližně 600 průjezdů směrových oblouků. Sledování bylo provedeno na TOK v městském prostředí. V extravilánu TOK v ČR nejsou nebo nebyly vhodné z důvodů velkých intenzit. Z těchto důvodů se v převážné míře jedná o průjezd osobních vozidel.

Celkově byl změřen průjezd u 17 kloubových autobusů a 4 jízdnic souprav, ostatní vozidla byla osobní.

Z měření je patrné, že většina vozidel se pohybuje na TOK rychlostí nižší, než je mezní rychlost pro projížděné poloměry. Zároveň měření potvrzuje skutečnost, že rychlost vozidel na výjezdu je větší a naopak na vjezdu do TOK je menší.

Z měření dále vyplývá, že rychlost vozidel v prostoru obou TOK nepřekračuje rychlost 30 až 35 km/h. Zároveň z měření vyplývá, že velká vozidla (návěsové soupravy, nákladní auta s přívěsem a kloubové autobusy) mohou projet TOK rychlostí 20 km/h a vyšší.

Tyto skutečnosti jsou výchozím předpokladem pro následující úvahy při vlastním návrhu geometrie TOK, viz kapitola 6.

5.5 VLEČNÉ KŘIVKY PŘI PRŮJEZDU TOK

Pro ověření průjezdu TOK bylo využito simulačních průjezdů pomocí software AutoTURN. Principy simulace jsou popsány v kapitole 4.2.

Ze simulace průjezdu křižovatkou je patrné, že použití prostého kružnicového oblouku na vjezdu a výjezdu z okružního pásu TOK není příliš hospodárné řešení. Prostý kružnicový oblouk je přitom doporučen v technických podmínkách [4] i v zahraničních předpisech [3] a [7]. V rámci návrhu geometrie TOK byly však hledány další možné křivky, které by pro nároží křižovatek byly vhodnější. Tedy se více přibližovaly vnitřní obalové křivce vzniklé při simulaci průjezdu návěsovou soupravou nárožím křižovatkou pro úhel tečen 100 gradů.

5.5.1 Závěr k simulaci průjezdnosti TOK

Simulace je vhodný nástroj sloužící ke kontrole geometrie nejen TOK. Zásadní je jeho vhodné nastavení pro vlastní simulaci. Nastavení je závislé na významu a místě jejího využití. Při kontrole TOK byla nastavena rychlost pro směrodatná vozidla 20 km/h, což koresponduje s filozofií použitou pro návrh křižovatkou a s mezními rychlostmi pro nákladní vozidla. Tedy rychlost nákladních vozidel nesmí klesnout pod 20 km/h (samozřejmě při ničím neovlivněném průjezdu křižovatkou) a osobní vozidla by neměla křižovatkou projíždět vyšší rychlostí než je 30 – 35 km/h. Tato úvaha koresponduje s filozofií použitou i v zahraničních studiích, zejména potom [1], [7], [11].

5.6 ZÁVĚR Z MĚŘENÍ, ANALÝZ A MODELOVÁNÍ

Měření a vyhodnocení v kapitole 6 potvrdily předpoklad, že spirálové uspořádání na vícepruhových okružních křižovatkách má pozitivní vliv na kapacitu vícepruhových okružních křižovatek a zároveň na nehodovost.

Dále bylo ověřeno měřením rychlostí a modelováním, že optimální TOK by měla být navržena tak, aby rychlost nákladních vozidel při neovlivněném průjezdu

neklesla pod 20 km/h a zároveň, aby osobní vozidla neprojížděla křižovatkou rychlostí vyšší než je 30 – 35 km/h.

Simulace a zkušenosti potvrdily, že vhodným nárožím křižovatky je složený kružnicový oblouk. Dalším poznatkem, který koresponduje obecně s problematikou OK, je důsledné vyřešení pěších a cyklistů.

Tyto poznatky byly použity jako vstup pro návrh parametrů TOK v kapitole 6.

6 NÁVRHOVÉ PARAMETRY TOK

Při volbě návrhových parametrů TOK je třeba vycházet z rozměrů největších vozidel včetně počtu a rozmístění jejich náprav, které se budou po takové křižovatce pohybovat. Vzhledem k tomu, že se předpokládá, že TOK jsou křižovatky určené pro větší dopravní zatížení, návrhové parametry vychází z těchto předpokladů. Současně je třeba vycházet z předpokládaných rychlostí průjezdů vozidel v křižovatce tak, aby byla využívána co možná nejefektivněji kapacita křižovatky a současně, aby byla zachována bezpečnost provozu na křižovatce. TOK budou navrhovány obvykle v intravilánu obcí na místních komunikacích II. třídy (funkční skupina B – sběrná komunikace) či průtazích silnic, nebo budou navrhovány v extravilánu na silnicích.

Principem návrhu TOK je konstrukce jednotlivých kružnicových oblouků od středu směrem ven. Vychází se z minimálního poloměru otáčení směrodatných vozidel 15 m (převzato ze zahraničních předpisů), což se rovná minimálnímu poloměru středového ostrova, kolem kterého se poté postupně konstruují příslušně rozšířené jízdní pruhy okružního pásu rozdělené fyzickým oddělením. Pro účely konstrukce TOK se zavádí dva pojmy: turboblok a translační osa, viz kapitola 6.1.1. Vnější průměr TOK je dle definice průměr kružnice, kterou je možné vepsat mezi vnitřní líc obrubníků nebo vnější okraje vodících proužků vnějšího jízdního pruhu okružního jízdního pásu křižovatky v místě translační osy. V součtu je velikost průměru TOK standardní velikosti typu vejce 62 m. Graficky je patrné z Obr. 8 měření vnějšího průměru křižovatky.

Návrhové prvky popsané podrobně v disertační práci byly podkladem pro vytvoření Metodiky pro navrhování turbo-okružních křižovatek (ISBN 978-80-214-5202-2), která byla dne 8. června 2015 certifikována Ministerstvem dopravy ČR pod číslem jednacím 50/2015-710-VV/1. Dále budou tyto parametry použity při revizi TP 135 - Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích.

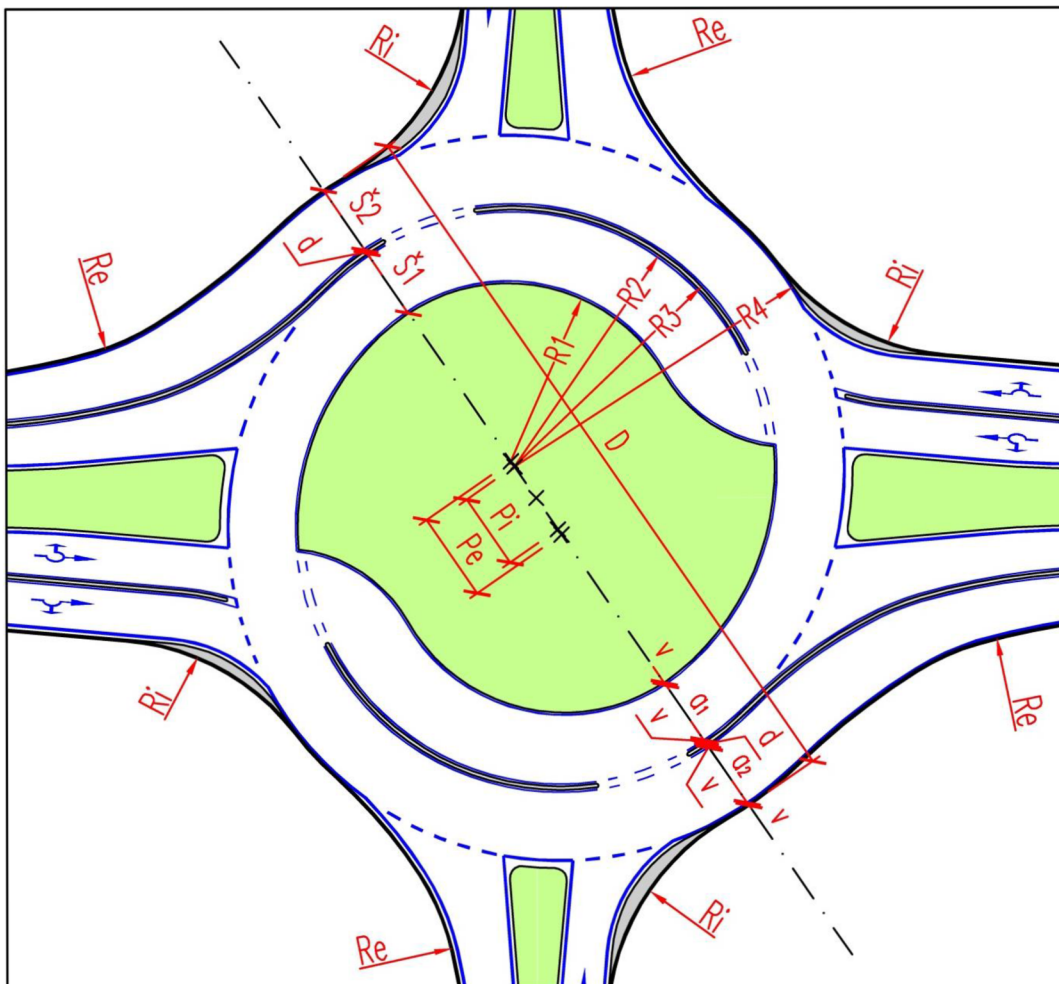
Návrhové prvky vychází z vybraných českých i zahraničních předpisů zaměřených obecně na křižovatky a byly optimalizovány na základě provedených měření, analýz a prověření průjezdnosti pomocí software pro konstrukci vlečných křivek.

Postup sestavení TOK používaný v zahraničí (především v Nizozemí a Slovinsku) však nevyhází z průjezdů směrodatných vozidel, ale je ponechán na kreativité projektantů. Reálné křižovatky dle těchto postupů pak není možné postavit tak, aby

byly funkční pro všechny typy vozidel. V disertační práci uvedený návrh tuto problematiku do výpočtu přidává a řeší jej.

6.1 SMĚROVÉ USPOŘÁDÁNÍ TOK

Podrobný postup návrhu jednotlivých prvků turbo okružních křižovatek (směrové a výškové vedení, příčné uspořádání, fyzické oddělení jízdních pruhů, dopravní značení apod.) je uveden v disertační práci, níže je pouze popsán princip sestrojení geometrie.



Obr. 8 Zakótování rozměrů křižovatky

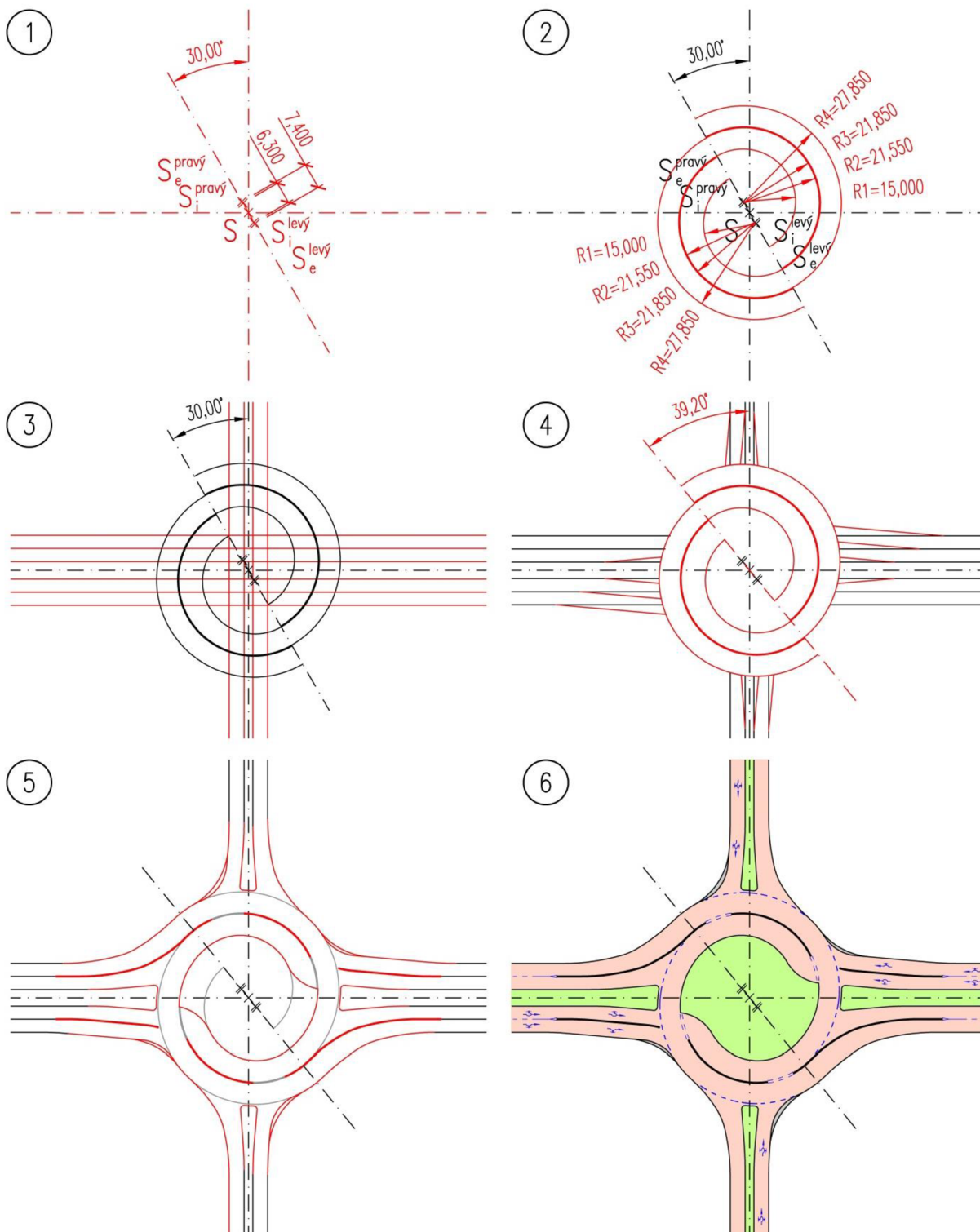
6.1.1 Postup návrhu

Tab. 2 Rozměry a poloměry turbobloku TOK standardní velikosti typu vejce s vnějším průměrem $D=62,0$ m

Šířkové uspořádání příčného řezu	Šířka [m]				
Vnitřní poloměr	15,00				
Vnitřní vodící proužek vnitřního jízdního pruhu	0,25	} Š1	} Pe	} Pi	
Vnitřní jízdní pruh	6,60				
Vnější vodící proužek vnitřního jízdního pruhu	0,25				
Fyzické oddělení jízdních pruhů	0,30				
Vnitřní vodící proužek vnějšího jízdního pruhu	0,25	} Š2			
Vnější jízdní pruh	5,50				
Vnější vodící proužek vnějšího jízdního pruhu	0,25				
Šířky vozovek, posunutí podél translační osy a vychýlení					
Š1 = Šířka vnitřní vozovky	7,10				
Š2 = Šířka vnější vozovky	6,00				
Pe = Posun vnější (vzdálenost vnitřních okrajů jízdních pruhů)	7,40				
Pi = posun vnitřní (vzdálenost vnějších okrajů jízdních pruhů)	6,30				
Ve = vychýlení vnější = $Pe / 2$ (pro R1)	3,700				
Vi = vychýlení vnitřní = $Pi / 2$ (pro ostatní R)	3,150				
Rozdíl vychýlení	0,550				
Poloměry okrajů vozovek	vychýlení středu oblouku	poloměr	počáteční pozice	koncová pozice	¹⁾ ²⁾ ³⁾
R1 = vnitřní vozovka, vnitřní okraj	3,700	15,000	11,300	18,700	⁴⁾
R2 = vnitřní vozovka, vnější okraj	3,150	21,550	18,400	24,700	⁵⁾
Rozdíly			7,100	6,000	⁶⁾
R3 = vnější vozovka, vnitřní okraj	3,150	21,850	18,700	25,000	⁷⁾
R4 = vnější vozovka, vnější okraj	3,150	27,850	24,700	31,000	⁸⁾

Poznámky:

- 1) Pozice je vztažena k celkovému středu S
- 2) Počáteční pozice = poloměr – vychýlení
- 3) Koncová pozice = poloměr + vychýlení
- 4) **R1** = vnitřní poloměr
- 5) **R2** = **R1** + **Š1** šířka vnitřní vozovky – rozdíl vychýlení
- 6) Rozdíly odpovídají šířkám vozovek
- 7) **R3** = **R2** + šířka fyzického oddělení jízdních pruhů
- 8) **R4** = **R3** + **Š2** šířka vnější vozovky



Obr. 9 Grafické znázornění postupu konstrukce TOK typu vejce s vnějším průměrem $D=62,0$ m.

7 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Vzhledem k tomu, že se jedná o část veřejné silniční sítě, není možné části křižovatky provádět v rozporu s platnou legislativou. Zároveň musí být návrh paradoxně co možná nejméně inovativní, aby sice umožnil zvýšit kapacitu OK při

zachování udržitelné bezpečnosti, ale zároveň neuváděl řidiče (uživatele) do rozpaků. Návrh musí být tedy pro řidiče co nejvíce pochopitelný.

V rámci měření a analýz se podařilo prokázat, že TOK jsou schopny převést větší intenzitu vozidel než klasické vícepruhové okružní křižovatky. Dále bylo prokázáno, že poměr vozidel na vjezdu mezi levým a pravým jízdním pruhem je více vyrovnaný. Nehodovost na TOK je nižší než na klasických vícepruhových TOK.

Pomocí měření rychlostí bylo zjištěno, že optimální je navrhovat geometrii TOK tak, aby neumožňovala průjezd vozidel rychlostí vyšší než 35 km/h a zároveň zajistila minimální průjezd 20 km/h pro směrodatná vozidla, což jsou návěsové a přívěsové soupravy a autobusy.

V rámci řešení výzkumného projektu VaV s číslem TA03030050 u Technologické agentury ČR řešeného v letech 2013-2015, jehož byl autor disertační práce řešitelem, byl vytvořen postup návrhu TOK vycházející ze středu směrem ven z křižovatky. Začne se s $R = 15$ m a pokračuje se přidáváním jízdních pruhů. Inovativní je tento návrh zejména v tom, že se provádí rozšíření v oblouku v závislosti na směrodatném vozidlu a tento postup je tedy aplikovatelný v praxi v celém svém rozsahu.

V rámci projektu byla vytvořena Metodika pro navrhování turbo-okružních křižovatek, která byla projednána s širokou odbornou veřejností včetně zástupců vlastníka a správce komunikací (ŘSD, MD ČR, PČR). Tato metodika byla dne 8. června 2015 certifikována Ministerstvem dopravy ČR.

Použití TOK se předpokládá v extravilánu, i v intravilánu zejména ve větších městech, kde mohou TOK za určitých podmínek nahradit světelně řízené křižovatky. TOK mají i svoje místo v blízkosti světelně řízených křižovatek, protože mají na rozdíl od jednopruhových OK výbornou vyklizovací schopnost. Jsou tedy schopné převést i skokové nárůsty intenzit dopravy, které pro jednopruhové křižovatky nejsou vhodné. TOK je samozřejmě možné použít jako přestavbu z vícepruhové OK se soustředným uspořádáním jízdních pruhů

Co je však nutné dořešit, je vlastní kapacitní posouzení TOK. Metoda uvedena v [5] je sice převzatá ze zahraniční, ale v podmínkách provozu v ČR nepříliš ověřená. V tomto výzkumu je třeba dále pokračovat na realizovaných TOK v ČR, sledovat chování řidičů a prověřovat hodnoty kritických a následných časů tak, aby bylo možné zpřesnit stávající výpočet uvedený v [5].

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SLOVENIAN EXPERIENCES WITH ALTERNATIVE TYPES OF ROUNDABOUTS - "TURBO" AND "FLOWER" ROUNDABOUTS. TOLLAZZI, Tomaz; RENCELJ, Marko a TURNSEK, Saso. Vilnius : THE 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 2011. ISBN 9789955288299ISSN.
- [2] Průjezd vozidel vícepruhovou okružní křižovatkou. SMĚLÝ, M., RADIMSKÝ M. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2011. 11. Mezinárodní vědecká konference MOBILITA '11 (id 19296).
- [3] Traffic safety of multi-lanes roundabouts. RADIMSKÝ, M., SMĚLÝ, M. a APELTAUER, T. Bratislava : Slovak Transport Society at the Slovak Academy of Sciences, 2011. MOSATT 2011 - International Scientific Conference Modern Safety Technologies in Transportation (id 19512).
- [4] TP 135 Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích.
- [5] TP 234 Posuzování kapacity okružních křižovatek.
- [6] APELTAUER, J., MATUSZKOVÁ, R. a VŠETEČKA, M. Aplikace počítačového vidění v dopravním inženýrství. Silnice železnice. 1, 2014, 1.
- [7] OVERKAMP, D. P. a W. Roundabouts – Application and design: A practical manual. Rotterdam : Ministry of Transport, 2009. str. 104. VB/SE2008.0772.
- [8] Metodika identifikace a řešení míst častých dopravních nehod. Brno : CDV, v.v.i., 2001.
- [9] AMBROS, J., KOCOUREK, J. Metodika sledování a vyhodnocování dopravních konfliktů. Brno : CDV v.v.i., 2013. ISBN 978-80-86502-62-5.
- [10] TP 171 Vlečné křivky pro ověřování průjezdnosti směrových prvků pozemních komunikací.
- [11] TOLLAZZI, Tomaz. KROŽNA KRIZIŠČA S SPIRALNIM POTEKOM KROŽNEGA VOZIŠČA. Maribor : REPUBLIKA SLOVENIJA MINISTRSTVO ZA PROMET, 2011.

ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: Ing. Martin Smělý
Datum narození: 12. 8. 1978
Bydliště: Slunečná 481/6, Brno, 634 00
Telefon: + 420 737 103 345
E-mail: smely.m@fce.vutbr.cz
Kontakt: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Ústav pozemních komunikací
Veveří 331/95
602 00 Brno

Vzdělání

2010 – 2016 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, doktorandské studium v oboru Konstrukce a dopravní stavby.

1996 – 2002 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, magisterské studium v oboru Konstrukce a dopravní stavby.

1992 – 1996 Střední integrovaná škola stavební ve Vysokém Mýtě

Zaměstnání

2005 - současnost Zaměstnán na Ústavu pozemních komunikací, Fakulta stavební, Vysoké učení technického na pozici asistent.

2002 - 2005 Zaměstnán u Ing. Vlastislav Novák, Ph. D., Ant. Procházky 4c, 623 00 Brno na pozici projektant.

Odborná způsobilost

2006 - současnost Auditor bezpečnosti pozemních komunikací.

2006 - současnost Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1004435 - autorizovaný inženýr pro dopravní stavby.