



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**AKTUALIZACE VÝPOČTOVÉHO MODELU  
KAPACITY OKRUŽNÍCH KŘÍŽOVATEK**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Ing. MIROSLAV PATOČKA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. MICHAL RADIMSKÝ, Ph.D.**

**BRNO 2023**



## **Abstrakt**

Disertační práce se zabývá novým přístupem k charakteristice dopravních proudů na okružních křižovatkách ve vztahu k výpočtu jejich kapacity. Aktuálně používaná metodika, jejíž základy formuloval v roce 1973 Werner Siegloch, vychází z nepřesných předpokladů a zjednodušení, která mohou v konečném důsledku zkreslovat výsledky kapacitních posouzení provedených podle stávajícího platného národního předpisu.

V této práci je využito nejen inovativního postupu při získávání empirických dat formou analýzy obrazu využitím tzv. počítačového vidění, ale především je zde řešen proces akceptace časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu vozidly z podřazeného dopravního proudu jako stochastický jev. Tento přístup si klade za cíl nahradit deterministicky stanovené hodnoty kritické časové světlosti a následného časového odstupe vhodným rozdělením hustoty pravděpodobnosti, které bude nejlépe odpovídat naměřeným empirickým datům.

## **Klíčová slova**

teorie časových odstupů, kritická časová světlost, následný časový odstup, okružní křižovatka, kapacita, hustota pravděpodobnosti, zobecněné inverzní Gaussovo rozdělení (GIG), Gamma rozdělení, exponenciální rozdělení

## **Abstract**

The doctoral thesis deals with a new approach to the characteristics of traffic flows at roundabouts in relation to the capacity estimation. The currently used methodology, which was introduced in 1973 by Werner Siegloch, is based on imprecise assumptions and simplifications, which may ultimately distort the results of capacity assessments carried out according to the existing valid national regulation.

This thesis uses not only an innovative procedure for obtaining empirical data by image analysis using so-called computer vision, but above all, the process of gap-acceptance of main-stream time clearances by minor stream vehicles is solved as a stochastic phenomenon. This approach aims to replace the deterministic values of the critical gap and follow-up headway with an appropriate probability density function that will meet empirical data in the best way.

## **Keywords**

gap-acceptance theory, critical gap, follow-up time, roundabout, capacity, probability density function, generalized inverse Gaussian distribution, Gamma distribution, exponential distribution



## **Bibliografická citace VŠKP**

PATOČKA, Miroslav. *Aktualizace výpočtového modelu kapacity okružních křižovatek*. Brno, 2023, 106 s., 27 s. příloh. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Michal Radimský, Ph.D.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Aktualizace výpočtového modelu kapacity okružních křižovatek zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 31. 10. 2022

.....  
Ing. Miroslav Patočka  
autor práce





## **Poděkování**

Mé poděkování patří především doc. Mgr. Milanu Krbálkovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Apeltauerovi, Ph.D., kteří mi velmi pomohli s teoretickou částí práce. Dále bych chtěl poděkovat kolegům Ing. Martinovi Smělému, Ph.D. a Ing. Michalovi Radimskému, Ph.D. za odborné konzultace.

Na tomto místě bych také rád poděkoval své manželce za podporu a trpělivost.



# Obsah

1	Úvod .....	3
2	Cíle práce.....	5
3	Termíny a definice .....	7
3.1	Dopravní terminologie .....	7
3.2	Matematická terminologie.....	8
3.3	Symbolika .....	9
4	Současný stav poznání .....	11
4.1	Metody pro stanovení kapacity neřízených křižovatek .....	11
4.1.1	Metoda časových mezer .....	11
4.1.2	Empirické regresní metody .....	23
4.2	Výpočet kapacity okružních křižovatek v českých předpisech .....	25
4.3	Výpočet kapacity okružních křižovatek v zahraničních předpisech .....	30
4.4	Charakteristiky dopravního proudu .....	31
4.4.1	Vztah intenzity a hustoty dopravního proudu .....	32
4.4.2	Vztah rychlosti a hustoty dopravního proudu.....	33
4.4.3	Vztah intenzity a rychlosti dopravního proudu .....	34
5	Předcházející výzkum na stykových křižovatkách .....	36
5.1	Rozdělení světlostí v nadřazeném dopravním proudu .....	38
5.1.1	Sběr dat a jejich struktura .....	38
5.1.2	Vyhodnocení dat .....	41
5.2	Zařazovací manévr vozidel z vedlejší komunikace .....	44
5.2.1	Sběr dat a jejich struktura .....	46
5.2.2	Vyhodnocení dat .....	47
6	Aplikace získaných poznatků na JOK .....	49
6.1	Výběr měřicího zařízení.....	50
6.2	Výběr lokalit .....	55
6.2.1	Blansko .....	56
6.2.2	Brno-Bohunice.....	57
6.2.3	Kuřim .....	59
6.2.4	Černá Hora .....	61
6.2.5	Břeclav.....	62
6.3	Analýza videozáznamu a získání dat .....	63
6.4	Čištění dat.....	68
6.4.1	Výskyt časových světlostí .....	68

6.4.2	Akceptace časových světlostí .....	69
6.5	Fitovací procedura .....	73
6.5.1	Empirická hustota pravděpodobnosti $h(x)$ .....	73
6.5.2	Teoretická hustota pravděpodobnosti $g(x)$ .....	76
6.5.3	Fitování .....	78
6.5.4	Výsledky – mezery na okružním pásu.....	81
6.5.5	Výsledky – akceptační řád světlosti .....	88
6.6	Shrnutí výsledků .....	95
7	Závěr a doporučení.....	96
8	Seznam obrázků.....	98
9	Seznam tabulek .....	101
10	Seznam použitých zdrojů.....	102
11	Přílohy.....	107
11.1	Fundamentální diagramy.....	107
11.2	Aproximace hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu .....	110
11.2.1	JOK Blansko.....	110
11.2.2	JOK Brno-Bohunice .....	112
11.2.3	JOK Břeclav .....	114
11.2.4	JOK Černá Hora.....	116
11.2.5	JOK Kuřim.....	119
11.3	Akceptace časových světlostí .....	122
11.3.1	JOK Blansko.....	122
11.3.2	JOK Brno-Bohunice .....	125
11.3.3	JOK Břeclav .....	127
11.3.4	JOK Černá Hora.....	129
11.3.5	JOK Kuřim.....	132

# 1 Úvod

Kapacita, a s ní spojená tzv. úroveň kvality dopravy (UKD), je velmi důležitým faktorem rozhodujícím o vhodnosti, respektive použitelnosti, zvoleného typu křižovatky v řešeném uzlu dopravní infrastruktury. Kapacitu definujeme jako maximální možný počet vozidel, který je schopen křižovatkou projet za daný časový interval. Křižovatky jsou obecně úzkými hrdly silniční sítě, které určují její celkovou propustnost. K vyčerpání kapacity totiž zpravidla dochází nejdříve v prostoru křižovatek a teprve poté v mezikřižovatkových úsecích. Chceme-li řešit kapacitu silniční sítě jako celku, je třeba začít právě u křižovatek. Jejich nedostatečná kapacita totiž generuje nemalé celospolečenské ztráty v podobě časových ztrát účastníků silničního provozu, zhoršeného životního prostředí, zvýšené spotřeby pohonných hmot a v některých případech může mít vliv i na nehodovost.

Nejčastějším typem křižovatek na české silniční síti jsou úroňové křižovatky, konkrétně křižovatky stykové a průsečné. Stále více však přibývá křižovatek okružních, které mají obvykle za úkol řešit nedostatečnou kapacitu dvou výše uvedených typů. Za dobu navrhování a existence okružních křižovatek již byla vytvořena řada výpočetních modelů a postupů, jak stanovit jejich kapacitu, které by se daly dle [1] rozdělit do třech skupin:

1. výpočet kapacity na základě počtu jízdnic pruhů na okružním pásu a počtu paprsků,
2. výpočet kapacity na základě geometrie křižovatky (s různým důrazem na detail),
3. výpočet kapacity na základě geometrie křižovatky a charakteristik řidičů, definovaných tzv. kritickým a následným časovým odstupem.

V současné době jsou celosvětově nejvíce rozšířené metody spadající do třetí skupiny, které jsou založené na teorii časových odstupů (gap-acceptance theory). Základ kapacitním modelům neřízených křižovatek fungujících na tomto principu dal v roce 1973 Werner Siegloch [2], přičemž navazoval na předchozí práce Grabeho [3] a Harderse [4]. Siegloch definoval metodiku, za jakých podmínek je třeba sbírat empirická data a jak z nich následně stanovit tzv. psychotechnické časy – kritický a následný časový odstup. Ty se řadí mezi základní veličiny definující chování řidičů na neřízených křižovatkách, které následně vstupují do rovnic pro výpočet kapacity. Samotná teorie je založena na akceptaci nebo zamítnutí časových světlostí (mezer) vytvořených mezi za sebou jedoucími vozidly v nadřazeném dopravním proudu vozidly čekajícími v podřazeném dopravním proudu. Následující historický vývoj v přístupu k výpočtu kapacity okružních křižovatek je přehledně shrnut například v [5]. V roce 2011 byly v České republice pro účely posuzování kapacity okružních křižovatek schváleny Technické podmínky TP 234 [6], které obsahují metodiku využívající teorii časových odstupů, ve které jsou předepsány deterministické hodnoty kritických a následných časových odstupů zjištěných

na okružních křižovatkách v ČR v rámci výzkumných projektů prováděných v letech 2005 až 2009. Tento předpis byl v roce 2018 včleněn do Technických podmínek 188 [7] a zároveň došlo k drobným úpravám ve výpočetním modelu, které budou dále popsány v kapitole 4.2.

V posledních letech však začaly vznikat vědecké práce popisující dopravní proud na základě podobnosti s chováním termodynamického plynu, např. [8], [9], [10] a [11]. Tyto poznatky umožňují nový pohled na řešení problematiky kapacity křižovatek jako na ryze stochastickou úlohu. Tím by mohlo dojít k odstranění některých zjednodušení a nepřesností, které jsou ve stávajících zavedených metodách obsaženy a budou popsány dále v této práci, včetně popisu nového přístupu.

## 2 Cíle práce

Cílem disertační práce je přispět k aktualizaci stávajícího výpočtového modelu pro odhad kapacity okružních křižovatek. Zásadní výchozí motivací práce je skutečnost, že v současné době používaný model pro výpočet kapacity neřízených úrovnových křižovatek formulovaný v 70. letech Wernerem Sieglochem není jednak v některých ohledech založen na reálných předpokladech, a jednak některé vstupní veličiny, které by měly být uvažovány jako stochastické, vstupují do modelu deterministicky. Problematické je především odvození pravděpodobnosti rozdělení mezer v nadřazeném dopravním proudu na základě předpokladů platných pro tzv. poissonovské systémy vzájemně neinteragujících elementů. Použité exponenciální rozdělení je vhodné pouze pro stavy s nízkou hustotou dopravy a z principu se tedy nehodí pro posuzování zatížených křižovatek. Rovněž odhad kritických a následných časových odstupů pomocí lineární aproximace je příliš velkým zjednodušením celé úlohy stejně jako jejich použití v podobě deterministických konstant.

V rámci probíhajícího výzkumného projektu Technologické agentury ČR CK01000152 Pokročilé matematicko-fyzikální metody modelování mikrostruktury dopravního proudu, kde je autor disertační práce spoluřešitelem, bylo v publikovaném článku [12] prokázáno, že pro jednoduchý typ stykové křižovatky mnohem více odpovídá realitě odhad výskytu mezer v nadřazeném dopravním proudu pomocí zobecněného Gaussova inverzního rozdělení (GIG). Rovněž problematické stanovení kritických a následných časových odstupů z lineární aproximace lze úspěšně nahradit rozdělovací funkcí (hustotou). Ta pak stanovuje pravděpodobnost využití dané světlosti v nadřazeném dopravním proudu určitým počtem vozidel z podřazeného proudu pomocí dílčích pravděpodobnostních rozdělení vycházejících z tzv. akceptačních řádů světlosti.

Hlavním cílem disertační práce je tedy pojmout problematiku kapacity okružních křižovatek jako stochastickou úlohu a prokázat, že proces odhadu rozdělení mezer v nadřazeném dopravním proudu a proces odhadu akceptačních řádů světlosti lze aproximovat mnohem věrněji pomocí některého rozdělení z rodiny GIG.

Dílčími cíli této práce jsou:

- detailní rozbor předpokladů, ze kterých vychází Sieglochův přístup využívaný v současné době k výpočtu kapacity neřízených křižovatek,
- vyhledání vhodných lokalit (zatížených jednopruhových okružních křižovatek), kde by bylo technicky možné provést měření dopravy,
- pro vybrané lokality zvolit vhodné technické zařízení pro sběr dat,
- nalézt postup, který umožní vyhodnotit velké množství videozáznamů z vybraných lokalit a převést je na data, se kterými bude možné dále statisticky pracovat,

- získaná empirická data aproximovat vhodným rozdělením z rodiny GIG pomocí fitovací procedury
- pomocí vhodně zvolené metody porovnat úspěšnost aproximace pro vybraná rozdělení.



## 3 Termíny a definice

### 3.1 Dopravní terminologie

**Vehicular headway modelling (VHM)** – vědecká disciplína zabývající se statistickým popisem mikrostruktury dopravních proudů a závislostí jeho parametrů na hodnotách hlavních fázových proměnných (dopravní hustotě, intenzitě a průměrné rychlosti).

**Hlavní pozemní komunikace** – komunikace s předností v jízdě.

**Vedlejší pozemní komunikace** – komunikace, na které vozidla dávají přednost v jízdě vozidlům jedoucím po hlavní komunikaci.

**Dopravní proud** – sled všech vozidel pohybujících se v jízdním pruhu za sebou nebo v jízdních pružích vedle sebe týmž směrem.

**Nadřazený dopravní proud** – dopravní proud s předností v jízdě.

**Podřazený dopravní proud** – dopravní proud dávající přednost v jízdě nadřazenému dopravnímu proudu.

**Saturovaný tok** – nejvyšší počet vozidel, která mohou projet profilem komunikace za jednotku času (zpravidla za jednu hodinu) při ideálních dopravních podmínkách.

**Volný dopravní proud** – stav dopravního proudu, při kterém není možné statisticky pozorovat interakce mezi vozidly, která se pohybují na (případně za) hranicí dohledu a jejich rychlosti se blíží rychlostem dovoleným nebo mezním na daném úseku trasy.

**Ovlivněný dopravní proud** – stav dopravního proudu, kdy jednotliví řidiči začínají svoji rychlost upravovat dle vozidel jedoucích před nimi v takové míře, že je možné tuto interakci statisticky pozorovat. V praxi se jedná o případy, kdy je vzdálenost vozidel v řádech desítek metrů nebo menší a jejich rychlost je výrazně nižší, než je průměrná rychlost volného dopravního proudu.

**Vzdutí dopravního proudu** – dopravní režim, během nějž se v systému spontánně vytváří kinematické dopravní vlny, tedy šokové skoky v dopravní hustotě, doprovázené strmými propady průměrné rychlosti vozidel. Jedná se tedy o specifickou subfázi kondenzované dopravy, nazývanou v anglické literatuře stop-and-go fáze. V kontextu řešeného problému se jedná o prosté vytvoření kolony v nadřazeném dopravním proudu, kdy fakticky dochází k zablokování podřazených dopravních proudů.

**Časový odstup vozidel** – doba, která uplyne mezi okamžikem, kdy přední nárazník bezprostředně předcházejícího vozidla protne pevnou linii detektoru (průjezdové brány) a okamžikem, kdy stejnou linii protne přední nárazník referenčního vozidla.

**Časová světlost vozidel** – doba, která uplyne mezi okamžikem, kdy zadní nárazník bezprostředně předcházejícího vozidla protne pevnou linii detektoru (průjezdové brány) a okamžikem, kdy stejnou linii protne přední nárazník referenčního vozidla.

**Individuální kritická časová světlost** – nejmenší časová světlost mezi vozidly nadřazeného dopravního proudu, kterou je konkrétní řidič podřazeného dopravního proudu ochoten akceptovat pro provedení jednoho zamýšleného zařazovacího manévru.

**Kritická časová světlost** – náhodná veličina, jejíž jednotlivé realizace představují individuální kritickou časovou světlost. Tato kritická časová světlost je asociována s danou křižovatkou za neměnných vnějších podmínek. V inženýrském pojetí se kritickou časovou světlostí rozumí taková mezera mezi vozidly nadřazeného dopravního proudu, kterou 50 % řidičů v podřazeném dopravním proudu odmítne pro realizaci svého zařazovacího manévru a 50 % řidičů ji přijme.

**Následný časový odstup** – náhodná veličina, jejíž jednotlivé realizace představují individuální následný časový odstup. V inženýrské praxi se popisuje jako střední hodnota časových odstupů mezi dvěma následujícími vozidly podřazeného dopravního proudu, která se nacházejí ve frontě za sebou a zařazují se do stejné časové mezery (časové světlosti) v nadřazeném dopravním proudu.

**Kapacita křižovatky** – nejvyšší možný počet vozidel, která danou křižovatkou projedou za určitý čas

**Základní kapacita jízdního pruhu** – výchozí kapacita samostatného jízdního pruhu pro jeden dopravní proud vozidel bez vlivu vzduť nadřazených proudů.

**Kapacita jízdního pruhu** – kapacita samostatného jízdního pruhu pro jeden dopravní proud vozidel zohledňující pravděpodobnost nevzduť vozidel v nadřazených proudech.

**Kolizní plocha křižovatky** – prostor křižovatky, kde dochází ke křížení, spojování nebo rozdělování jízdních trajektorií vozidel.

**Akceptační řád světlosti** – rozdělení světlosti v nadřazeném dopravním proudu na datové sady podle počtu vozidel podřazeného dopravního proudu, která danou mezeru využila. Pro akceptační řád platí, že  $k \in \mathbb{N}_0$ .

## 3.2 Matematická terminologie

**Hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny  $X$**  – funkce, jejíž integrací na libovolném intervalu je získána pravděpodobnost výskytu náhodné veličiny  $X$ . Výsledek integrace funkce v intervalu zvoleného vzorku si lze představit jako plochu ohraničenou osou  $x$ , grafem funkce hustoty pravděpodobnosti a nejnižší a nejvyšší hodnotou intervalu. Funkce hustoty pravděpodobnosti je všude nezáporná a její integrál v celém prostoru je 1.

**Distribuční funkce náhodné veličiny  $X$**  – funkce, která udává pravděpodobnost, že hodnota proměnné náhodné veličiny  $X$  bude menší než zadaná hodnota  $x$ . Distribuční funkce jednoznačně určuje

rozdělení pravděpodobnosti a ve spojitém případě je úzce spjatá s funkcí hustoty pravděpodobnosti. Hodnota distribuční funkce je v největší dolní hranici oboru hodnot 0 a v nejmenší horní hranici 1.

**Statistická vzdálenost  $\chi$**  – kvantifikuje vzdálenost mezi dvěma statistickými objekty.

**Fitovací procedura** – proces odhadu parametrů zvolené funkce hustoty pravděpodobnosti s cílem provedení nejlepší možné aproximace pozorovaných hodnot náhodné veličiny.

### 3.3 Symbolika

JOK	jednopruhová okružní křižovatka
CSD	celostátní sčítání dopravy
RPDI	roční průměr denních intenzit [voz/den]
GIG	zobecněné inverzní Gaussovo rozdělení

#### Teorie kritických časových mezer

$C$	kapacita křižovatky
$t_g$	kritická časová světlost [s]
$t_f$	následný časový odstup [s]
$\Delta$	minimální časový odstup vozidel na okružním pásu [s]
$k$	akceptační řád světlosti
$\delta_k$	empirický rozpadový poměr řádu $k$
$\Delta_k$	teoretický rozpadový poměr řádu $k$
$f_k(x)$	dílčí pravděpodobnostní rozdělení kritické časové světlosti v nadřazeném dopravním proudu
$g(x)$	pravděpodobnostní rozdělení časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu
$s(t)$	Sieglochova funkce
$s_{LIN}(t)$	lineární aproximace Sieglochovy funkce
$F_a(t)$	kumulativní distribuční funkce přijatých časových světlostí
$F_r(t)$	kumulativní distribuční funkce odmítnutých časových světlostí
$F_c(t)$	distribuční funkce pro kritickou časovou světlost
$A_i$	přijatá světlost $i$ -tým vozidlem
$R_i$	zamítnutá světlost $i$ -tým vozidlem

#### Charakteristiky dopravního proudu

$\rho$	hustota dopravního proudu [voz/km]
$J$	intenzita dopravního proudu [voz/hod]
$v$	rychlost dopravního proudu [km/hod]

### Další symboly a funkce

$\alpha$	parametr funkcí GIG a Gamma – tenze
$\beta$	parametr funkce GIG – intenzita
$\lambda$	parametr funkcí GIG, Gamma a exponenciální funkce – koncentrace, škálovací konstanta
$\gamma$	stochastická rezistivita
$A$	normalizační konstanta
$\Gamma(x)$	Gamma funkce
$g(x)$	teoretická hustota pravděpodobnosti
$h(x)$	empirická hustota pravděpodobnosti
$\chi(x)$	statistická vzdálenost $L_1$
$\theta(x)$	Heavisideova funkce
$\mathcal{K}_a(x)$	Macdonaldova funkce řádu $a$

## 4 Současný stav poznání

Z kapacitního hlediska je možné okružní křižovatku považovat za soustavu neřízených stykových křižovatek s jednosměrným provozem na hlavní pozemní komunikaci a s přikázaným směrem odbočení vpravo při výjezdu z vedlejší pozemní komunikace. Řidič v podřazeném jízdním proudu se musí rozhodnout, kdy může bezpečně vjet do kolizní plochy křižovatky. Za tím účelem odhaduje vzdálenost a rychlost jízdy vozidel v nadřazeném dopravním proudu, zohledňuje dynamické vlastnosti svého vozidla a místní podmínky. Teorie výpočtu kapacity neřízených křižovatek (včetně okružních) vychází v současné době ze dvou rozdílných přístupů:

- **teorie časových mezer (odstupů)** – kapacita vjezdu závisí primárně na hodnotách kritického časového odstupu (v českých předpisech označovaný jako  $t_g$ ), následného časového odstupu (v českých předpisech označovaný jako  $t_f$ ) a na minimálních časových odstupech vozidel na okružním pásu (v českých předpisech označovaný jako  $\Delta$ ),
- **empirické vztahy (regresní analýza)** – teorie kapacity je založena na pozorování (měření intenzit) v době, kdy dochází k vyčerpání kapacity křižovatky.

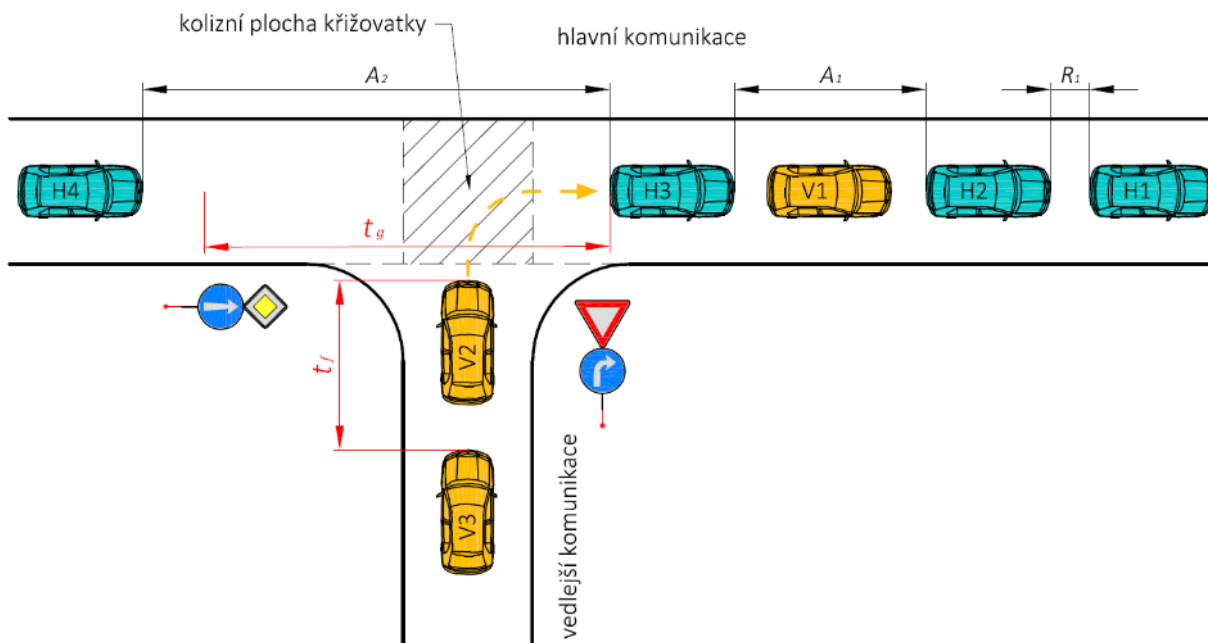
### 4.1 Metody pro stanovení kapacity neřízených křižovatek

#### 4.1.1 Metoda časových mezer

Metoda časových mezer nebo také teorie časových odstupů se dnes již běžně používá ke stanovení kapacity neřízených úrovnových křižovatek a vychází z ní i české technické podmínky zabývající se touto problematikou [7]. Způsobů stanovení těchto časových odstupů bylo známo již v 70. letech 20. století minimálně devět, viz [13]. V současné době jich lze najít v řádu desítek [14]. Dříve, než budou některé nejznámější metody podrobněji představeny, bude na nejjednodušším případě stykové křižovatky popsána řešená problematika časových odstupů.

Na stykové křižovatce dvou jednosměrných komunikací znázorněné na Obr. 4.1 jsou možné pouze dva dopravní pohyby. Jeden je po hlavní pozemní komunikaci v přímém směru, tomuto proudu říkáme nadřazený dopravní proud, a druhý je po vedlejší pozemní komunikaci, kde jsou vozidla podřazeného dopravního proudu nucena odbočit vpravo a zařadit se do nadřazeného dopravního proudu. Plocha, kde dochází ke styku trajektorií vozidel se nazývá kolizní plochou křižovatky. Budeme-li předpokládat, že pravidla silničního provozu budou beze zbytku dodržena, projedou vozidla nadřazeného dopravního proudu křižovatkou bez jakéhokoliv zdržení. Naproti tomu vozidla v podřazeném dopravním proudu jsou nucena vyčkávat na vedlejší komunikaci, dokud se v nadřazeném dopravním proudu nevytvoří dostatečně velká mezera na to, aby se bezpečně zařadila. Dostatečně velká mezera je definována tak,

že vozidlo nadřazeného dopravního proudu dojde do kolizní plochy křižovatky v čase  $t_g$  nebo větším od okamžiku, kdy tento bod opustilo předcházející vozidlo nadřazeného dopravního proudu, případně v čase  $t_g$  nebo větším od okamžiku, kdy se řidič vozidla podřazeného dopravního proudu rozhodl vjet do křižovatky. Časový interval  $t_g$  se v odborné literatuře obvykle nazývá kritická časová mezera nebo kritická časová světlost v nadřazeném dopravním proudu. Je to minimální časový interval, který je ochoten řidič čekající v podřazeném dopravním proudu využít k tomu, aby se bezpečně zařadil do nadřazeného dopravního proudu.



Obr. 4.1: Schéma stykové křižovatky s popisem zkoumaných veličin.  $H_i$  značí vozidla jedoucí po hlavní komunikaci,  $V_i$  pak vozidla na vedlejší komunikaci. Symbolem  $A_i$  je označena přijatá časová světlost na hlavní komunikaci,  $R_i$  zamítnutá časová světlost.

Dalším limitujícím faktorem ovlivňujícím množství vozidel podřazeného dopravního proudu, která využijí jednu konkrétní časovou mezera v nadřazeném dopravním proudu, jsou následné časové odstupy mezi těmito vozidly. Definovány jsou fyzickou délkou těchto vozidel a nezbytnými bezpečnostními odstupy mezi nimi. Následné časové odstupy jsou běžně označovány jako  $t_f$  a jedná se o čas mezi následujícími vozidly podřazeného dopravního proudu, která vjíždějí do kolizní plochy křižovatky v rámci jedné časové mezery v nadřazeném dopravním proudu.

Je zřejmé, že jak kritické, tak následné časové odstupy se budou lišit jak mezi jednotlivými řidiči, tak i mezi stejnými řidiči v různém čase vlivem jejich proměnlivého fyzického a psychického stavu. Dále na tyto časy bude mít nepochybně vliv typ křižovatky a zamýšleného křižovatkového pohybu, dopravní situace na křižovatce (hustota dopravy, rychlost vozidel nadřazeného dopravního proudu), typ a akcelerační schopnosti vozidla, povětrnostní vlivy atd. Z tohoto výčtu je zřejmé, že proces akceptace

časových mezer v nadřazeném dopravním proudu bude mít stochastický charakter a bude podrobněji rozebrán v kapitole 5.

Výhodou metody časových odstupů je především fakt, že základní vztah pro výpočet kapacity vjezdu zůstává stejný a je tedy např. mezinárodně přenosný. K úpravám obvykle v praxi dochází pouze u vstupních proměnných ( $t_g$ ,  $t_f$  a  $\Delta$ ), které charakterizují chování řidičů. Zjistit hodnoty těchto proměnných je možné pouze provedením dostatečného počtu měření na křižovatkách a následným statistickým vyhodnocením získaného datového vzorku.

Při odhadování kritických časových mezer a následných časových odstupů se používají dva základní přístupy. Prvním je metoda sběru dat za saturovaných podmínek s využitím regresní analýzy počtu a velikosti mezer, které byly řidiči buď využity nebo naopak zamítnuty. Druhý přístup uvažuje se sběrem dat za nesaturovaných podmínek a odhaduje rozdělení kritických časových mezer a následných časových odstupů nezávisle pomocí pravděpodobnostní analýzy. Oba přístupy jsou podrobněji popsány v kapitolách 4.1.1.1 a 4.1.1.2.

#### **4.1.1.1 Metoda sběru dat za saturovaných podmínek**

Tato metoda poskytuje relevantní výsledky pouze v případě saturované dopravy na sledované křižovatce. Jinými slovy to znamená, že je daná neřízená křižovatka natolik zatížená, že na vedlejší pozemní komunikaci se nachází fronta čekajících vozidel. Situace se dále komplikuje tím, že zařazovací manévry vozidla z podřazeného dopravního proudu může být považován za relevantní v rámci souboru vyhodnocovaných dat pouze tehdy, když na vjezdu do křižovatky zůstane po ukončení manévru alespoň jedno čekající vozidlo. Tím je totiž zaručeno, že mezera v nadřazeném dopravním proudu byla plně využita všemi potenciálně možnými vozidly čekajícími ve frontě. Z uvedeného popisu je zřejmé, že tyto podmínky se nevyskytují na křižovatkách příliš často. I u těch nejzatíženějších křižovatek se zpravidla jedná pouze o krátká období dopravních špiček. Uvážíme-li k tomu možnosti sběru dat (viz podrobněji v kapitole 6.1), dojdeme k závěru, že získat dostatečně obsáhlý soubor měření je poměrně náročný úkol.

Sběr dat za saturovaných podmínek, který je nutným předpokladem pro získání validních dat, předpokládá splnění následujících požadavků:

1. Před provedením zařazovacího manévru musí být na vedlejší komunikaci k dispozici alespoň jedno čekající vozidlo.
2. První zařazované vozidlo musí před křižovatkou zastavit, aby bylo zřejmé, že řidič mohl vyhodnotit celý rozsah mezery. Plynulý vjezd vozidla z vedlejší komunikace do nadřazeného dopravního proudu představuje nežádoucí jev, který se z datového

souboru vyřazuje. Zařazuje-li se ale do jediné mezery v nadřazeném dopravním proudu více vozidel, povinnost zastavit má pouze první z nich.

3. Na vedlejší komunikaci musí být v okamžiku akceptace mezery k dispozici dostatečně dlouhá fronta čekajících vozidel, aby každá mezera mohla být využita maximálním možným počtem vozidel.
4. Dopravní proud na hlavní či vedlejší komunikaci nesmí být ovlivněn vnějšími okolnostmi (přecházejícími chodci, blízkou světelně řízenou křižovatkou, dopravní kongescí atd.)

Pokud jsou tyto podmínky splněny, můžeme zaznamenávat časové mezery (světlosti)  $t$  mezi vozidly v nadřazeném dopravním proudu a příslušný akceptační řád světlosti  $k$ , tj. počet vozidel, který tyto mezery využil (a to i v případě, kdy je  $k = 0$ ).

### Sieglochova metoda

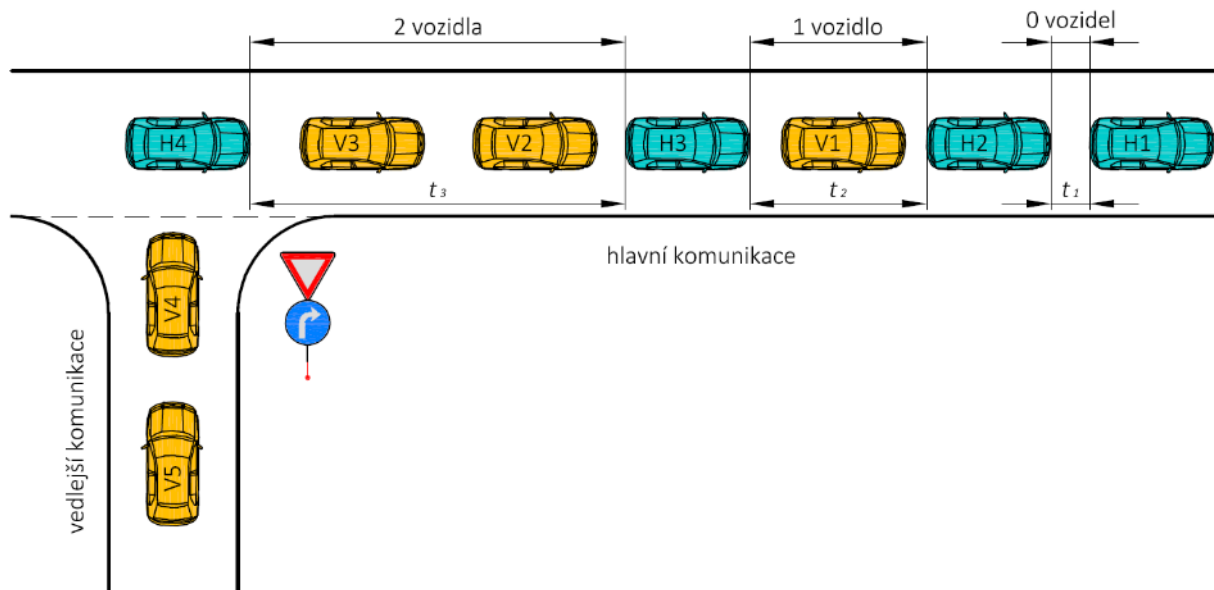
V roce 1973 zveřejnil Werner Siegloch v [2] ucelenou teorii pro výpočet kapacity neřízených úrovnových křižovatek, která vycházela z poznatků Grabeho [3] a Harderse [4]. Předpokládá se v ní, že podřazený dopravní proud na vedlejší komunikaci je vždy saturovaný, tzn. že zde čeká dostatečné množství vozidel, která mohou využít mezery v nadřazeném dopravní proudu.

Princip metody spočívá v tom, že ke každé časové světlosti mezi vozidly v nadřazeném dopravním proudu  $t_i$  je evidován počet vozidel  $k$ , která tuto světlost využila. Závislost mezi počtem vozidel, která časovou světlost  $t$  akceptovala, a její velikostí je nazývána Sieglochova funkce

$$s(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} k \cdot p_k(t), \quad (4-1)$$

kde je  $k$  akceptační řád světlosti a  $p_k(t) = \mathbb{P}[N_t = k]$  popisuje pravděpodobnost, že danou mezeru velikosti  $t$  využije právě  $k$  vozidel.  $N_t$  označuje mezeru v nadřazeném dopravním proudu velikosti  $t$ , kterou využije právě  $k$  vozidel podřazeného dopravního proudu. Metoda je podrobněji rozebrána v [15]. Funkce  $s(t)$  reprezentuje střední hodnotu počtu vozidel, která využijí nabídnutou světlost velikosti  $t$  a její průběh Siegloch na základě empiricky získaných poznatků aproximuje lineární funkcí, která bude dále označována jako  $s_{LIN}(t)$ .





Obr. 4.2: Schéma stykové křižovatky popisující sběr dat pomocí Sieglochovy metody. Vozidla v nadřazeném dopravním proudu jsou označena  $H_i$ , v podřazeném dopravním proudu  $V_i$  a jednotlivé časové světlosti na hlavní komunikaci jako  $t_i$ .

Vznik této metody úzce souvisí se Sieglochovým kapacitním modelem, který staví výpočet kapacity právě na funkci  $s(t)$  a hustotě pravděpodobnosti výskytu časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu  $g(t)$ . Výslednou kapacitu křižovatky  $C$  pak lze získat integrací přes všechny přípustné časové světlosti  $t$  takto:

$$C = J \cdot \int_0^{\infty} g(t) \cdot s(t) dt, \quad (4-2)$$

kde  $J$  označuje intenzitu nadřazeného dopravního proudu. Tento kapacitní model uvedený též v [14] je základem teorie časových světlostí.

V [15] se dále uvádí, že k nalezení aproximativního rozdělení počtu vozidel  $s_{LIN}(t)$  navrhuje Siegloch použití lineární regrese na základě empiricky získaných dat z terénu. Měření může probíhat pouze za satureovaných podmínek a je tedy obtížné získat údaje o časových světlostech, které přijalo více vozidel. V rámci měření provedených pro tuto disertační práci byl maximální detekovaný počet vozidel, která využila jednu mezeru  $k = 9$ . Takových událostí však nastává tak málo, že je zpravidla nelze statisticky vyhodnotit. Seriózní statistiky lze obvykle provést na datech do řádu světlosti  $k = 4$ . Na Obr. 4.3 je uveden příklad záznamu měření jednoho paprsku okružní křižovatky, na němž je patrná přibližná lineární závislost středních hodnot kritických časových světlostí.

Dle [15] a [16] se Sieglochova metoda prakticky provádí následujícím způsobem:

- Proveďte se sběr dat za satureovaných podmínek dle požadavků uvedených v kapitole 4.1.1.1.
- U každé události se zaznamená počet vozidel  $k$ , která využila časovou světlost  $t$  v nadřazeném dopravním proudu, včetně případů kdy  $k = 0$ .

- Pro všechny časové světlosti přijaté  $k$  vozidly se stanoví střední hodnoty  $t_{g,k}$  a na těchto středních hodnotách se provede lineární regrese.
- Získaný předpis přímky je hledanou aproximací Sieglochovy funkce  $s_{LIN}(t)$ .

Předpis  $s_{LIN}(t)$  lze zapsat využitím Heavisideovy funkce

$$\theta(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (4-3)$$

jako po částech lineární vztah

$$s_{LIN}(t) = \theta(t - t_0)(a \cdot t + b), \quad (4-4)$$

kde  $a > 0$ ,  $b \in \mathbb{R}$  jsou vhodné konstanty a  $t_0 = -b/a$  je nulový časový odstup, tedy minimální hodnota časové světlosti v nadřazeném dopravním proudu, kterou už není schopno využít žádné vozidlo čekající v podřazeném dopravním proudu ke svému zařazovacímu manévru.

Na Obr. 4.3 je patrné, jak je možné se znalostí  $s_{LIN}(t)$  získat hodnoty parametrů  $t_0$ ,  $t_f$  a  $t_g$ . Následný časový odstup  $t_f$  je čas  $t$ , který uběhne, než se hodnota funkce  $s_{LIN}(t)$  navýší o 1. V Obr. 4.3 je viditelný pravoúhlý trojúhelník, z jehož vlastností je možné jednoduše získat závislost následného časového odstupu na směrnici funkce  $a$ . Směrnice přímky se vypočítá jako tangens úhlu sevřeného s osou  $x$  a zároveň v pravoúhlém trojúhelníku lze tangens vypočítat jako poměr protilehlé ku přilehlé odvěsně, čímž je získán vztah pro výpočet následného časového odstupu

$$t_f = \frac{1}{a}. \quad (4-5)$$

Nulový časový odstup  $t_0$  je průsečík lineární aproximace  $s_{LIN}(t)$  s osou  $x$ , proto

$$t_0 = -b \cdot t_f. \quad (4-6)$$

Kritická časová světlost je v inženýrské praxi definována jako světlost, kterou polovina řidičů využije k zařazovacímu manévru a polovina nikoliv. Hledá se tedy takové  $t_g$ , pro něž platí  $s_{LIN}(t) = \frac{1}{2}$ . Aproximace  $s_{LIN}(t)$  je lineární funkce, takže kritickou časovou světlost analyzovaného vzorku dat lze získat jako

$$t_g = t_0 + \frac{t_f}{2}, \quad (4-7)$$

kde je:  $t_g$  kritická časová světlost [s],  
 $t_0$  nulový časový odstup [s],  
 $t_f$  následný časový odstup [s].

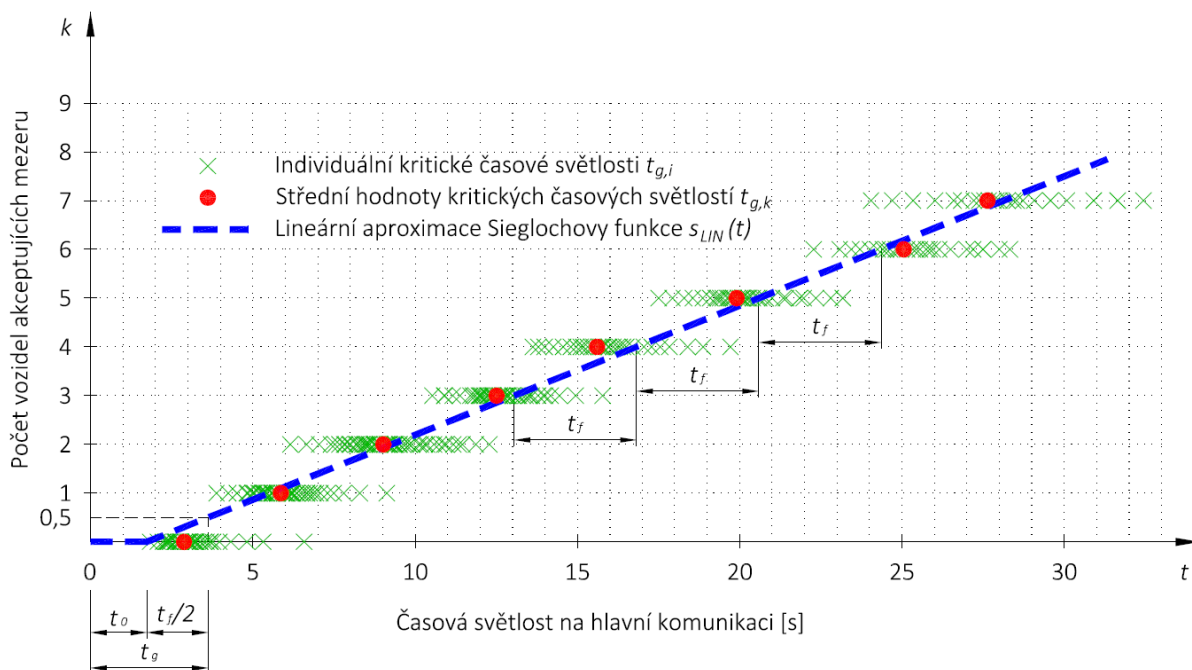
Tato jednoduchá aproximace společně s předpokladem Sieglochovy metody exponenciálního rozdělení světlostí v hlavním dopravním proudu lze zapsat jako

$$X \sim g(x) = \theta(x)\lambda e^{-\lambda x}, \quad (4-8)$$

kde  $\lambda = \frac{J}{3600}$ , což vede na známý vztah

$$C = a e^{-\lambda t_0}. \quad (4-9)$$

Parametry Sieglochovy aproximace uvedené v rovnici (4-4) bývají obvykle odhadnuty z empirických dat a jsou dobře popsány např. v [14], [16] a [17].



Obr. 4.3: Odhad lineární aproximace Sieglochovy funkce získaný lineární regresí na středních hodnotách  $t_{g,k}$  individuálních kritických světlostí  $t_{g,i}$ .

Sieglochova metoda tvoří základ výpočtového kapacitního modelu v mnoha zemích světa (např. německý předpis HBS, americký HCM, australský SIDRA model, francouzský software GIRABASE nebo švédský CAPCAL).

#### 4.1.1.2 Metody sběru dat za nesaturovaných podmínek

Tyto metody se používají v případech, kdy se na vjezdu do křižovatky netvoří souvislá fronta čekajících vozidel. To je také důvod, proč tyto metody vznikly. Saturované podmínky jsou totiž na křižovatkách poměrně vzácné, a pokud už se vyskytnou, tak zpravidla jen v krátkých obdobích dopravních špiček nebo při uzavírkách.

Místo regresní analýzy je u těchto metod potřeba provést analýzu pravděpodobnosti. Odhad kritické časové světlosti za nesaturovaných podmínek je poněkud složitější. Hlavní problém spočívá v tom, že je obtížné vůbec změřit interval, ve kterém by měla ležet. V tomto případě totiž známe pouze to, že řidičova individuální kritická časová světlost je větší než největší zamítnutá světlost mezi vozidly v nadřazeném dopravním proudu a menší než nejmenší přijatá světlost. Pokud je přijatá časová světlost kratší než největší zamítnutá časová světlost, pak se daný řidič považuje za nepozorného a tyto zamítnuté časové světlosti se ze statistiky zpravidla odstraní. Některé metody pracují ale i s těmito

nekonzistentními daty přesně tak, jak byla zaznamenána. Rozdíl ve výsledcích je však obecně spíše zanedbatelný.

Dále budou krátce popsány některé nejznámější metody sběru dat za nesaturovaných podmínek, které jsou podrobněji popsány v [13], [14] a [15].

### Metoda intervalů

Metoda je založena na měření intervalů (v anglické literatuře označovaných jako lags), přičemž za interval se považuje časový úsek od okamžiku vjezdu vozidla z vedlejší komunikace do kolizní plochy křižovatky po příjezd vozidla jedoucího po hlavní komunikaci. Při sběru těchto dat se předpokládá, že řidiči jsou konzistentní a časy příjezdů vozidel na vedlejší komunikaci jsou nezávislé na dopravní situaci na hlavní komunikaci. Konzistentní řidič je charakterizován tak, že se zachová ve všech obdobných situacích stejně.

Metoda dále předpokládá, že podíl řidičů  $P_{a,lag}(t)$ , kteří přijali interval o velikosti  $t$ , je identický s pravděpodobností, že řidičova osobní kritická časová světlost  $t_{g,i}$  je menší než interval  $t$ . Proto je možné zapsat tuto rovnici

$$P_{a,lag} = F_c(t), \quad (4-10)$$

kde  $F_c(t)$  je kumulativní distribuční funkce kritické časové světlosti.

Všechny intervaly musí být měřeny na neřízených křižovatkách a každý přijatý nebo zamítnutý interval musí být zaznamenán. Následně je časová osa rozdělena na  $W$  segmentů o velikosti  $\Delta t$ , např.  $\Delta t = 1$  s.

V každém intervalu  $i$  jsou sledovány následující údaje:

$N_i$  počet všech sledovaných intervalů (lags) v intervalu  $i$

$A_i$  počet přijatých intervalů (lags) v intervalu  $i$

$a_i$  podíl  $A_i$  a  $N_i$

Pokud  $t_i$  je čas uvnitř intervalu  $i$ , pak

$$F_c(t_i) = \frac{A_i}{N_i} = a_i, \quad (4-11)$$

což je aproximace kumulativní distribuční funkce kritické časové světlosti. Výpočtem střední hodnoty všech  $t_i$  lze vypočítat kritickou časovou světlost

$$t_g = \sum_{i=1}^W t_i [F_c(t_i) - F_c(t_{i-1})], \quad (4-12)$$

kde  $W$  je počet intervalů velikosti  $\Delta t$ . Podobným způsobem by mohla být stanovena směrodatná odchylka.

Při praktickém využití má tato metoda některé nevýhody. Předně je nutná dlouhá doba pozorování zkoumané křižovatky, protože v každém zvoleném intervalu  $i$  je třeba mít dostatečně velký vzorek použitelných dat. Pokud je na hlavní komunikaci nízká intenzita dopravy, zaznamenat dostatečné

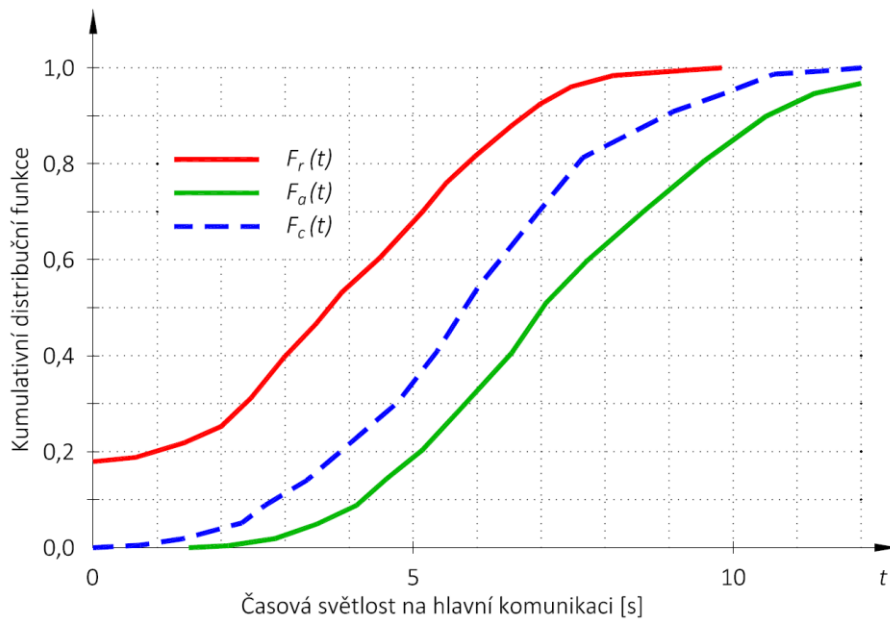
množství malých intervalů je obtížnější a nutná délka sledování se prodlužuje. Pokud je naopak intenzita vozidel na hlavní komunikaci vysoká, většina vozidel na vedlejší komunikaci před vjetím do kolizní plochy křižovatky zastaví a vyčkává. Přestože je při tom zaznamenáno velké množství rozhodovacích procesů řidičů, může být pouze málo z nich dále využito, protože tato metoda není použitelná pro saturované podmínky. Další nevýhodou této metody je, že postihuje zpravidla pouze ty situace na sledované křižovatce, kdy je dopravní proud klidný a nenastávají kongesce, což nepochybně ovlivňuje i chování řidičů, kteří raději volí pro svůj zařazovací manévr bezpečnější (delší) časové mezery v nadřazeném dopravním proudu. Z výše uvedených důvodů se tato metoda v praxi nevyužívá a slouží spíše jako teoretický vhled do problematiky.

### Raffova metoda

Jedná se o jednu z prvních metod používanou pro odhad kritické časové světlosti. Na rozdíl od předchozí metody intervalů pracuje Raffova metoda (a všechny dále uvedené metody) rovněž s daty těch vozidel, která využila časovou světlost v nadřazeném dopravním proudu po čekání ve frontě. Podíl přijatých intervalů (lags) a světlostí (gaps),  $P_{a,lag+gap}(t)$  už tedy není rozdělením kritické časové světlosti  $t_{g,i}$ . Důvodem je to, že řidič, který přijal světlost v nadřazeném dopravním proudu, pravděpodobně vybíral z několika světlostí, které se mu nabídky během čekání na vjezd do kolizní plochy křižovatky. V tomto případě tedy rozdělení světlostí v nadřazeném dopravním proudu ovlivňuje rozdělení světlostí přijatých řidiči na vedlejší komunikaci. Dále je třeba si uvědomit, že jsou ve statistice více zastoupeni řidiči s vyšší osobní hodnotou kritické časové světlosti  $t_{g,i}$ , protože během čekání zamítnou mnohem více světlostí v nadřazeném proudu oproti řidičům s nižší osobní hodnotou  $t_{g,i}$ .

Při pozorování rozhodovacího procesu řidiče na vedlejší komunikaci lze říci, že jeho hodnota  $t_{g,i}$  je větší než nejdelší zamítnutá světlost a zároveň je menší než časová světlost přijatá. Toto platí, pokud se řidič chová konzistentně. Pokud je zaznamenán dostatečně velký vzorek přijatých časových světlostí, mohou být popsány empirickou kumulativní distribuční funkcí  $F_a(t)$ . Stejným způsobem je možné pozorovat i zamítnuté časové světlosti a následně stanovit kumulativní distribuční funkci  $F_r(t)$ .

Na Obr. 4.4 je patrný průběh hledané kumulativní distribuční funkce  $F_c(t)$ , vlevo od ní je vynesena distribuční funkce zamítnutých časových světlostí  $F_r(t)$  a po pravé straně probíhá distribuční funkce přijatých časových světlostí  $F_a(t)$ . Obdobně také platí, že  $t_r < t_g < t_a$ .



Obr. 4.4: Grafy kumulativních distribučních funkcí  $F_c(t)$ ,  $F_r(t)$  a  $F_a(t)$ .

Cílem jak Raffovy metody, tak i všech následně uvedených metod, je odhadnout funkci  $F_c(t)$  co nejpřesněji, nebo alespoň odhadnout její typické parametry jako střední hodnotu nebo rozptyl, protože distribuční funkce  $F_c(t)$  nemůže být pozorována přímo. Podstata Raffovy metody je tedy definována tak, že kritická časová světlost  $t_g$  je taková hodnota času  $t$ , při které platí funkce

$$1 = F_a(t_g) + F_r(t_g). \quad (4-13)$$

Rovnici (4-13) lze popsat také tak, že odhad hodnoty  $t_g$  bude právě takový, pro který platí, že bude stejně odmítnutých světlostí větších než  $t_g$  jako přijatých světlostí menších než  $t_g$ . V [13] je k této metodě dále uvedeno, že odhad kritických časových světlostí  $t_g$  je citlivý na dopravní intenzity, za kterých je měření prováděno, přičemž tato metoda je vhodná především pro nízké intenzity.

### Ashworthova metoda

Ashworthova metoda [14] předpokládá exponenciální rozdělení mezer v nadřazeném dopravním proudu, statistickou nezávislost mezi následujícími časovými světlostmi a normální rozdělení přijatých  $t_a$  a zamítnutých  $t_r$  časových světlostí.

Ashworth na přelomu 60. a 70. let objevil, že průměrná kritická časová světlost  $t_g$  lze odhadnout ze střední hodnoty  $\mu_a$  a směrodatné odchylky  $\sigma_a$  přijatých časových světlostí  $t_a$  a lze ji vyjádřit vztahem:

$$t_g = \mu_a - J \cdot \sigma_a^2, \quad (4-14)$$

kde  $J$  je intenzita dopravy v nadřazeném dopravním proudu. Pokud nemají přijaté časové světlosti  $t_a$  normální rozdělení, může být řešení poněkud komplikovanější, přesto však existuje pro Gamma rozdělení a log-normální rozdělení časů  $t_a$  a  $t_c$  stále dobrá aproximace v podobě rovnice (4-9).

## Logit a probit metody

Tyto metody aplikují logitové, popřípadě probitové metody. V [15] jsou popsány jako zobecněné lineární modely. To znamená, že jejich předpis lze transformací převést právě na lineární modely. Parametry modelu lze získat odhadem pomocí metody maximální věrohodnosti (MLE). Probitové a logitové modely mají rozdílné předpisy a navíc se liší v předpokládaném rozdělení svých náhodných složek. Zatímco logitové modely pracují s logistickým rozdělením, probitové modely předpokládají normální rozdělení (popřípadě log-normální rozdělení). Logitové modely umožňují zakomponování dalších externích vlivů vložením dalšího členu. Probitové metody vedou k podobným výsledkům jako metoda intervalů a právě kvůli této podobnosti jsou společně s metodou intervalů iteračně aplikovány v Hewittově metodě (popsané dále). Podrobnější popis těchto dvou metod je uveden v [14].

## Hewittova metoda

Hewitt publikoval sérii článků zabývajících se odhadem kritických časových odstupů v průběhu 80. a na počátku 90. let, např. [18], [19]. Jeho metoda shrnutá v [14] opět předpokládá rozdělení časové osy na intervaly o konstantní velikosti, např.  $\Delta t = 1$  s. Střed každého intervalu  $i$  je označen jako  $t_i$ . Metoda využívá iterační proces, kde je inicializační stav získán z již popsané metody intervalů. Kumulativní distribuční funkce  $F_c(t)$  je v prvním kroku odhadnuta pomocí probit metody. Tím jsou získány hodnoty pravděpodobnosti, že kritická časová světlost  $t_g$  se nachází uvnitř intervalu  $i$ , které jsou označeny jako  $c_{i,0}$ , kde index 0 označuje nultý krok iterace. V následujících iteracích je vypočten očekávaný počet přijatých a zamítnutých intervalů a světlostí. Iterační proces končí v okamžiku, kdy se vypočtené hodnoty kritických časových světlostí nemění.

Z každého časového intervalu  $i$  o délce trvání  $\Delta t$  je v rámci vyhodnocení měření získán celkový počet světlostí, počet zamítnutých světlostí, celkový počet intervalů a počet zamítnutých intervalů. Pokud některé časové intervaly neobsahují dostatečné množství empirických dat, je zapotřebí sledovat i další parametry dopravy, příp. sousední intervaly sloučit.

Očekávaný počet světlostí a intervalů velikosti  $t_j$ , které jsou následně využity řidiči  $d$  s jejich kritickou světlostí velikosti  $t_{c,d} \cong t_i$  lze vyjádřit následujícím způsobem:

Využité jako:	Intervaly	Světlosti	Pro	(4-15)
Přijaté	$\xi \cdot N \cdot c_i \cdot f_j$	$\xi \cdot N \cdot c_i \cdot \frac{f_j \cdot E_i}{(1-F_i)}$	$j \geq i$	
Zamítnuté	$\xi \cdot N \cdot c_i \cdot f_j$	$\xi \cdot N \cdot c_i \cdot \frac{f_i \cdot E_i}{(1-F_i)}$	$j \leq i$ ,	

kde je

$c_i$  pravděpodobnost, že kritická světlost se nachází uvnitř intervalu  $i$

$f_i$  pravděpodobnost, že světlost v nadřazeném dopravním proudu se nachází v intervalu  $i$  (rozložení intervalů a světlostí se předpokládá stejné jako v případě exponenciálního rozdělení)

$F_i$  hodnota kumulativní distribuční funkce pro světlost v nadřazeném dopravním proudu ve středu intervalu  $i$

$\xi$  nabývá hodnoty 1 pro  $j \neq i$

nabývá hodnoty 0,5 pro  $j = i$

Pomocí těchto vzorců lze spočítat množství přijatých a zamítnutých světlostí a intervalů z daného souboru  $\{c_{i,0}\}$ . Z těchto předpokládaných hodnot pak lze např. pomocí probit metody spočítat nový odhad  $\{c_{i,1}\}$ . Soubor dat  $\{c_{i,1}\}$  pak umožní nový odhad  $t_g$ . Pro nové hodnoty  $\{c_{i,1}\}$  se znovu použijí rovnice (4-15) a vypočtou se nové hodnoty přijatých a zamítnutých světlostí a intervalů, které se označí  $\{c_{i,2}\}$  a tak dále. Tento iterační výpočet probíhá tak dlouho, dokud se nová hodnota  $t_g$  téměř neliší od předchozí.

### Metoda maximální věrohodnosti (MLE)

Nejlepších výsledků při stanovování kritických časových světlostí za nesaturovaných podmínek dosahuje metoda maximální věrohodnosti (někdy se používá též anglická zkratka MLE), je však třeba znát rozdělení časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu.

Při použití této metody se u každého řidiče  $i$  na vedlejší komunikaci zjišťují následující údaje:

$r_i$  největší zamítnutá světlost,

$a_i$  akceptovaná světlost.

Pomocí metody maximální věrohodnosti se vypočítá pravděpodobnost, že kritická časová světlost  $t_g$  bude mezi  $r_i$  a  $a_i$ . Aby bylo možné tuto pravděpodobnost odhadnout, je nutné nejdříve stanovit typ pravděpodobnostního rozdělení  $F_c(t)$  kritických časových světlostí sledované populace řidičů. Předpokládá se, že všichni řidiči jsou konzistentní, tzn., že jejich osobní kritická časová světlost  $t_{c,i}$  se v čase nemění.

Pravděpodobnost, že řidičova osobní hodnota  $t_{c,i}$  bude mezi  $r_i$  a  $a_i$ , je dána rozdílem kumulativních distribučních funkcí  $F_c(a_i) - F_c(r_i)$ .

Věrohodnostní funkci  $L$  popisující na vzorku  $n$  řidičů z podřazeného dopravního proudu pravděpodobnost, že kritická časová světlost  $t_g$  se bude nacházet v mezích  $r_i$  a  $a_i$ , je možné vyjádřit pomocí kumulativní distribuční funkce  $F_c(t)$  pro  $n$  řidičů podřazeného dopravního proudu takto

$$L_{(r_i, a_i)} = \prod_{i=1}^n [F_c(a_i) - F_c(r_i)]. \quad (4-16)$$

Pokud známe typ distribuční funkce kritické časové světlosti  $F_c(t)$ , můžeme maximalizací věrohodnostní funkce  $L_{(r_i, a_i)}$  získat odhady parametrů rozdělení  $f_c(t)$  [15]. Střední hodnota pravděpodobnostního rozdělení



$$t_g = E[T] = \int_R t \cdot f_c(t) dt \quad (4-17)$$

bude rovna hledané kritické časové světlosti  $t_g$ .

V praxi se často pro rozdělení kritických časových světlostí  $t_g$  používá log-normální rozdělení. Střední hodnota kritické časové světlosti v rámci tohoto rozdělení je považována za přiměřenou hodnotu reprezentující průměrné chování řidiče.

Tato metoda je sice komplikovaná, ale přináší poměrně přesné výsledky. Využívá maximální množství získaných informací. Bere v úvahu jak vliv velkého množství zamítnutých odstupů, tak případy, kdy je nízká intenzita dopravy a řidiči využívají velké časové světlosti v nadřazeném dopravním proudu bez jakéhokoliv zamítání. Pokud je na druhou stranu intenzita dopravy na křižovatce vyšší, řidiči přijímají menší kritické časové světlosti. Rozdělení přijatých kritických časových světlostí je potom závislé na intenzitě, respektive hustotě nadřazeného dopravního proudu. Všechny tyto odlišné podmínky je schopna metoda maximální věrohodnosti postihnout.

Její nevýhodou však je, že pokud by všichni řidiči přijali hned první časovou světlost na hlavní komunikaci bez jakéhokoliv zamítnutí, měly by příslušné rovnice triviální řešení. V tomto případě je třeba využít jinou metodu, nebo lépe rozšířit soubor dat, ze kterých je kritická časová světlost vyhodnocována.

Na závěr této kapitoly je třeba konstatovat, že i podle [13] jsou metody využívající sběr dat za nesaturovaných podmínek, respektive pracující pouze s intervaly, výrazně méně vypovídající v porovnání s těmi, které pracují i s časovými odstupy nebo světlostmi, a to především z těchto důvodů:

- využívají méně informací a tím pádem musí být i méně přesné,
- měření intervalů je zpravidla méně přesné než měření časových odstupů nebo světlostí.

#### 4.1.2 Empirické regresní metody

Empirické modely [20] často používají pro stanovení kapacity řešené křižovatky regresní analýzu. Tyto modely ze své podstaty přináší velmi dobré výsledky. Na druhou stranu však občas nejsou schopny odhalit vztah mezi příčinou a důsledkem změn v dopravě.

Pokud by měla být pomocí empirických metod řešena základní dopravní schémata stykové křižovatky (či vjezdu do okružní křižovatky) uvedená na Obr. 4.1 skládající se ze dvou dopravních proudů, jednoho nadřazeného a druhého podřazeného, bude třeba opět sledovat stav, kdy dochází k saturovanému stavu na vedlejší komunikaci, tzn. že zde vždy čeká alespoň jedno vozidlo, aby se zařadilo do nadřazeného dopravního proudu. V tomto případě můžeme považovat za kapacitu křižovatky množství vozidel, která se dokážou z vedlejší komunikace zařadit do nadřazeného dopravního proudu. Tato kapacita bude především záviset na intenzitě nadřazeného dopravního proudu  $J$  v témže časovém úseku. Jak bylo naznačeno výše, aby bylo možné odvodit empirický model pro stanovení kapacity

křižovatky, je třeba provést pozorování křižovatky a následný sběr dat v obdobích dopravních špiček, kdy je křižovatka zahlcena a je možné pozorovat saturované dopravní proudy. Při následném vyhodnocení je sledovaný čas rozdělen do stejně velkých intervalů, např. 1 minuta. V rámci těchto intervalů je zaznamenán počet vozidel jak v nadřazeném dopravním proudu, tak počet zařazených vozidel z podřazeného proudu. Jednotlivá měření se vynesou do grafu a provede se lineární regrese. Průměrně se označí zhruba polovina zaznamenaných dat jako odlehlá měření (tzv. outliers). V praxi se proto nepoužívá delší měřicí interval než 1 minuta (např. 5 minut), protože by k provedení regrese zbylo jen málo relevantních měření.

Výsledkem empirického řešení úlohy je sestavení lineární závislosti pro kapacitu vjezdu

$$C = a - b \cdot J. \quad (4-18)$$

Kromě lineární funkce mohou být použity i jiné typy regrese, např.

$$C = A \cdot e^{Bx}. \quad (4-19)$$

Regresní parametry  $A$  a  $B$  budou stanoveny na naměřených datech vhodnou regresní technikou. Podobný typ rovnice je použit v Sieglochově vzorci (4-9) pro výpočet kapacity.

Kromě vlivu intenzity nadřazeného dopravního proudu může být zkoumán také vliv geometrického uspořádání křižovatky. V tom případě mohou být parametry  $a$  a  $b$  nebo  $A$  a  $B$  vztaženy k šířce vozovky, poloměru zaoblení nároží, nebo jiným geometrickým vlastnostem typickým pro danou křižovatku.

Výhody empirických regresních metod v porovnání s metodou časových mezer jsou následující:

- není potřeba sestavovat teoretický matematický model,
- představuje hodnoty kapacity, kterých bylo dosaženo v reálném provozu,
- ve výpočtu mohou být zohledněny geometrické vlastnosti křižovatky,
- není třeba detailně zkoumat a popisovat chování řidiče,
- je účinnější v případě, kdy se řidiči nechovají podle pravidel provozu (např. v případě vyčerpané kapacity dochází k pouštění řidičů čekajících na vjezdu).

Mezi nevýhody empirických regresních metod patří:

- Nejsou přenosné do odlišných podmínek. Různé státy si proto definují vlastní rovnice. To snižuje celkovou přehlednost a rovnice jsou vzájemně nepřevoditelné. Pro každý nový případ nebo odlišnou geometrii křižovatky je nutné provést další sběr dat pro aktualizaci parametrů rovnic.
- Při praktickém využití neumožňuje projektantovi teoreticky pochopit dopravní chování.
- Jsou platné pouze pro mezní stavy kapacity, kdy chování řidičů může být odlišné než na průměrně fungující křižovatce. To nabývá na významu zvláště při posuzování úrovně kvality dopravy, resp. posuzování doby zdržení.

- Rovnice pro křižovatku se čtyřmi rameny a 12 možnými křižovatkovými pohyby jsou již příliš komplikované.
- Každá dopravní situace popsaná empirickým vztahem musí být reálně pozorována, což vyžaduje velké množství naměřených dat. To může způsobit komplikace v případě, kdy se daná dopravní situace vyskytuje pouze zřídka. Většina přetížených klasických neřízených úrovnových křižovatek se totiž brzy přebudovává na kapacitnější uspořádání (řízení světelným signalizačním zařízením, přestavba na okružní nebo mimoúrovňovou křižovatku).

## 4.2 Výpočet kapacity okružních křižovatek v českých předpisech

Výpočtem kapacity okružních křižovatek se v českých předpisech aktuálně zabývají Technické podmínky 188 Posuzování kapacity křižovatek a úseků pozemních komunikací vydané v srpnu 2018 [7]. Výpočetní model vychází z teorie kritických a následných časových odstupů s úpravami, které provedl Wu v roce 1997 pro německý předpis HBS [21]. V rámci výzkumného projektu popsaného v [5], který se tehdy zabýval implementací tohoto modelu do českého prostředí, byl proveden průzkum na 6 jednopruhových okružních křižovatkách v intravilánu českých měst. Křižovatky byly vybrány tak, aby se v době měření pohybovaly na hranici vyčerpání kapacity a sledovaly se u nich následující parametry:

- intenzity dopravy v rozlišení podle směrů jízdy a podle druhu vozidel,
- časy průjezdu vozidla křižovatkou v daném místě (v průsečíku jízdní dráhy sledovaných jízdních proudů)
- kontrola čekajícího vozidla podřazeného dopravního proudu na vjezdu,
- střední doba zdržení  $t_w$ ,
- případné ovlivnění nadřazeného dopravního proudu při vjezdu sledovaného vozidla do kolizní plochy křižovatky.

Časový rozsah průzkumů byl stanoven na 120 minut ve špičkových hodinách. Křižovatky byly natáčeny digitální videokamerou se stativem s časovou přesností 0,04 s s následným ručně-počítačovým vyhodnocením videozáznamu.

Pro účely vyhodnocování obrazu byl tehdy vyvinut firmou EDIP, s.r.o. vyhodnocovací software schopný zaznamenat intenzity jednotlivých dopravních proudů a kritických a následných časových odstupů. Data byla vyhodnocována po jednotlivých vozidlech, včetně přesného času průjezdu, což umožnilo v rámci následující analýzy volbu libovolného intervalu měření intenzit (minutové, hodinové apod.). Následně byla získaná data vyhodnocována metodami regresní analýzy i metodami využívajícími teorii časových odstupů, aby bylo možné výsledky obou metod porovnat.

Pro potřeby regresní analýzy byly vyhodnoceny minutové intenzity dopravy na vjezdu, výjezdu a okruhu v době průzkumu. Ty byly následně přenásobeny na intenzity hodinové. Každé rameno okružní křižovatky se vyhodnocovalo samostatně. Využití takto krátkých intervalů umožnilo, i přes větší nepřesnost měření, vybrat pouze data z intervalů pohybujících se na hranici kapacity. Kritérium vyčerpané kapacity bylo stanoveno takto: následující vozidlo na vjezdu musí dojet na místo prvního vozidla (na hranici křižovatky) v čase do 4 s za prvním vozidlem, které vjelo do okružní křižovatky. Byli-li čas příjezdu delší, jednalo se o vjezd pod hranici kapacity. Metodou regresní analýzy byly pak těmito body prokládány různé typy křivek.

Při analýze vybraných křižovatek pomocí metody časových odstupů byla ke stanovení hodnot kritického časového odstupu  $t_g$  využita statistická metoda maximální věrohodnosti. Podrobnější postup je popsán v [22].

Následný časový odstup  $t_f$  je střední hodnota časových odstupů mezi dvěma následujícími vozidly podřazeného dopravního proudu (na vjezdu), které se nacházejí ve frontě za sebou a zařazují se do jedné časové mezery (odstupu) v nadřazeném dopravním proudu na okruhu. Hodnota byla vypočtena jako aritmetický průměr naměřených odstupů.

Základní hodnoty kritických a následných časových odstupů byly stanoveny pro osobní vozidla a dodávky zjednodušeně považované za jednotková nebo také přepočtená vozidla, tedy vozidla v hodnotě 1,0 pvoz.


Hodnoty tehdy zjištěných kritických a následných časových odstupů pro jednotlivé vjezdy na sledovaných okružních křižovatkách jsou obsahem Tab. 4-1. Pro srovnání v tehdejší německém předpise HBS [21] byly pro jednopruhové okružní křižovatky uváděny hodnoty  $t_g = 4,1$  s a  $t_f = 2,9$  s.

*Tab. 4-1: Přehled zjištěných hodnot kritických a následných časových odstupů na jednopruhových okružních křižovatkách [5]. Hodnoty jsou uvedeny ve vteřinách.*

	průměr	minimum	maximum	směrodatná odchylka
kritický časový odstup $t_g$	4,10	3,25	4,85	0,40
následný časový odstup $t_f$	2,88	2,46	3,39	0,28

V aktuálně platných technických podmínkách TP 188 [7] je určení hodnot  $t_g$  a  $t_f$  složitější a vychází z Tab. 4-2.

Tab. 4-2: Aktuálně platné hodnoty kritických a následných časových odstupů pro jednopruhové okružní křižovatky dle TP 188 [7].  $L_{kol}$  značí vzdálenost mezi kolizními body na vjezdu a výjezdu a  $R_v$  poloměr vjezdu.

Typ uspořádání vjezdu a okruhu	Schema-tické znázor-nění	$n_o$	$n_v$	$k_{v,usp}$ [-]	$t_g$ [s]	$t_f$ [s]	$\Delta$ [s]
1/1		1	1	1,0	4,5 (pro $L_{kol} < 11$ )	3,1 (pro $R_v < 8$ )	2,1
					$5,6 - 0,1 \cdot L_{kol}$ (pro $11 \leq L_{kol} \leq 20$ )	$3,6 - 0,0625 \cdot R_v$ (pro $8 \leq R_v \leq 16$ )	
					3,6 (pro $L_{kol} > 20$ )	2,6 (pro $R_v > 16$ )	

Pro srovnání jsou opět uvedeny i aktuální hodnoty německého předpisu HBS z roku 2015 [23], kde jsou uvedeny tyto vzorce:

$$t_g = 3,86 + \frac{8,27}{D}, \quad (4-20)$$

$$t_f = 2,84 + \frac{2,07}{D}, \quad (4-21)$$

kde  $D$  značí vnější průměr okružní křižovatky.

### Výpočet kapacity okružních křižovatek dle TP 188

V inženýrské praxi aktuálně používaný výpočet kapacity má dvě základní části – posouzení kapacity vjezdu (a dalších vyplývajících charakteristik) a posouzení kapacity výjezdu. Zohlednění skladby dopravního proudu se provede přenásobením intenzit dopravy přepočtovými koeficienty na tzv. přepočtená vozidla (pvoz). Výpočtový model dále zohledňuje přecházející chodce jak na vjezdu, tak na výjezdu.

### Posouzení kapacity vjezdu bez vlivu chodců

Pro výpočet kapacity vjezdu předepisují Technické podmínky TP 188 tento vztah:

$$C_{g,v} = 3600 \cdot \left(1 - \frac{\Delta \cdot I_o}{n_o \cdot 3600}\right)^{n_o} \cdot \frac{k_{v,usp}}{t_f} \cdot e^{-\frac{I_o}{3600} \left(t_g - \frac{t_f}{2} - \Delta\right)}, \quad (4-22)$$

kde je:

$C_{g,v}$  základní kapacita vjezdu (bez vlivu přecházejících chodců [pvoz/h],

$I_o$  intenzita dopravy na okruhu v místě vjezdu [pvoz/h],

$n_o$  počet jízdních pruhů na okruhu v místě vjezdu [-],

$k_{v,usp}$  koeficient uspořádání jízdních pruhů na vjezdu a okruhu [-],

$t_g$  kritický časový odstup [s],

- $t_f$  následný časový odstup [s],  
 $\Delta$  minimální časový odstup vozidel jedoucích na okruhu za sebou [s]  
 $e$  Eulerovo číslo [-]

Hodnoty výše uvedených koeficientů jsou uvedeny v Tab. 4-2.

Přepíšeme-li rovnici (4-22) do tvaru (4-23), bude možné lépe rozpoznat význam jednotlivých členů rovnice

$$C_{g,v} = \frac{3600}{t_f} \cdot \left(1 - \frac{\Delta \cdot I_o}{n_o \cdot 3600}\right)^{n_o} \cdot k_{v,usp} \cdot e^{-\frac{I_o}{3600} \left(t_g - \frac{t_f}{2} - \Delta\right)}, \quad (4-23)$$

kde

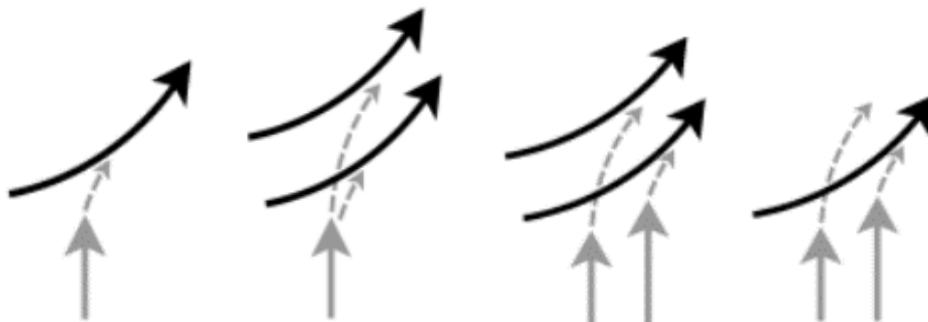
$\frac{3600}{t_f}$  reprezentuje saturovaný tok na vjezdu, jinými slovy se jedná o maximální dosažitelnou intenzitu dopravy na vjezdu za předpokladu nulové intenzity na okružním pásu,

$\left(1 - \frac{\Delta \cdot I_o}{n_o \cdot 3600}\right)^{n_o}$  reprezentuje člen, který koriguje kapacitu vjezdu (navíc k pravděpodobnosti výskytu dostatečně velké mezery na okružním pásu) mírou vytížení nadřazeného dopravního proudu. Pro nulovou intenzitu  $I_o$  má hodnotu 1,

$e^{-\frac{I_o}{3600} \left(t_g - \frac{t_f}{2} - \Delta\right)}$  reprezentuje výpočet pravděpodobnosti, že v nadřazeném dopravním proudu se vyskytne mezera větší, než je hodnota  $t_g - \frac{t_f}{2} - \Delta$ .

Při výpočtu kapacity vjezdu se bere do úvahy:

- vzdálenost kolizních bodů na každém posuzovaném paprsku křižovatky,
- poloměry zaoblení nároží na vjezdu,
- uspořádání křižovatky z hlediska počtu jízdních pruhů na okružním pásu v místě vjezdu,
- vnější průměr okružní křižovatky,
- uspořádání dle typu vjezdu (viz Obr. 4.5).



Obr. 4.5: Schématické znázornění typů vjezdů do okružních křižovatek [7].

### Posouzení kapacity vjezdu ovlivněné přecházejícími chodci

V zastavených oblastech obcí se zpravidla u křižovatek navrhuje přechody pro chodce, které následně v závislosti na intenzitě přecházejících chodců více či méně redukuje výslednou kapacitu vjezdů i výjezdů okružních křižovatek. TP 188 [7] zavádí vliv chodců do výpočtového vzorce (4-22) pomocí koeficientu  $k_{v,ped}$ , který se stanoví následujícím výpočtem

$$k_{v,ped} = \frac{1120 - 0,63 \cdot I_o - 0,63 \cdot \frac{I_{ped}}{k_{skup}} + 0,00071 \cdot I_o \cdot \frac{I_{ped}}{k_{skup}}}{1069,2 - 0,57 \cdot I_o}, \quad (4-24)$$

kde je:

$k_{v,ped}$  koeficient vlivu chodců na vjezdu do okružní křižovatky [-],

$I_o$  intenzita dopravy na okruhu [pvoz/h],

$I_{ped}$  intenzita přecházejících chodců [ch/h],

$k_{skup}$  koeficient skupinovitosti chodců [-], který je určen jako:

$$k_{skup} = 1,00 \quad \text{pro } I_{ped} \leq 200 \text{ ch/h}$$

$$k_{skup} = 0,004 \cdot I_{ped} + 0,2 \quad \text{pro } I_{ped} > 200 \text{ ch/h}$$

Vzorec (4-24) platí pro  $I_{ped} > 100$  ch/h. V případě  $I_{ped} \leq 100$  ch/h je hodnota  $k_{v,ped} = 1,00$ .

V závěru kapacitního posouzení se provede výpočet rezervy kapacity vjezdu  $Rez$ , stanovení střední doby zdržení  $t_w$  a délky fronty  $L_{95\%}$ . Na základě výsledné střední doby zdržení se každému vjezdu do okružní křižovatky přiřadí stupeň úrovně kvality dopravy (UKD). Pro celkové hodnocení křižovatky výsledným stupněm UKD je rozhodující nejméně příznivé hodnocení vjezdu s nejvyšší střední dobou zdržení  $t_w$ . Limitní hodnoty střední doby zdržení udává ČSN 73 6102 [24] a jsou uvedeny v Tab. 4-3.

Tab. 4-3: Mezní hodnoty střední doby zdržení na vjezdu do úrovně neřízené křižovatky

Úroveň kvality dopravy		
Označení	Charakteristika doby zdržení	Střední doba zdržení [s]
A	Doba zdržení velmi malá	$\leq 10$
B	Zdržení ještě bez front	$\leq 20$
C	Ojediné krátké kolony	$\leq 30$
D	Stabilní stav s vysokými ztrátami	$\leq 45$
E	Nestabilní stav	$> 45$
F	Překročená kapacita	- <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> UKD na stupni F je dosaženo při hodnotě stupně vytížení  $a_v > 1$ , přičemž stupeň vytížení se stanoví jako podíl návrhové intenzity  $I$  a kapacity  $C$ .

## 4.3 Výpočet kapacity okružních křižovatek v zahraničních předpisech

Tato kapitola je do práce doplněna pouze za účelem dotvoření uceleného přehledu o používaných metodách pro odhad kapacity okružních křižovatek ve světě. U vybraných metod budou uvedeny pouze vstupní proměnné veličiny a stručný popis principu, na kterém jsou založeny. Podrobnější informace je možné dohledat např. v [1].

Mezi nejjednodušší empirické metody pracující pouze s lineární závislostí kapacity na počtu jízdnic pruhů patří metoda dvojice německých autorů Brilon a Bondzio, příp. švýcarského autora Bovyho. Kapacita vjezdu do okružní křižovatky je u těchto metod ovlivněna počtem jízdnic pruhů na vjezdu a na okružním pásu a dále intenzitou dopravy na okružním pásu. Na rozdíl od rovnice Brilon-Bondzio, kde kapacitu vjezdu omezuje pouze dopravní proud před tímto vjezdem, u rovnice Bovy záleží i na intenzitě vozidel, která opouští okružní pás příslušným výjezdem, a na vzdálenosti vjezdu a výjezdu na posuzovaném paprsku křižovatky.

Mezi komplexnější empirické metody založené na geometrii křižovatky patří britská metoda TRRL, kterou sestavil Kimber na základě pozorování velkého množství okružních křižovatek ve Velké Británii jako klasickou lineární regresní metodu. TRRL vyžaduje podrobnější charakteristiku geometrie okružní křižovatky než v předešlých dvou metodách. Do výpočtu vstupuje 12 parametrů s danými mezními hodnotami (např. šířka vjezdu, šířka okružního pásu, úhel připojení vjezdu, poloměr zaoblení na vjezdu apod.). Vliv na kapacitu má rovněž intenzita dopravy na okružním pásu v místě vjezdu.

Teorii časových odstupů, popsanou v kapitole 4.1.1, zastupuje v tomto výčtu francouzský software GIRABASE, německá metodika od autorů Brilon a Wu, nebo americký předpis HCM (Highway Capacity Manual) [25]. Francouzský software GIRABASE se používá ve Francii od roku 1997, kdy byly na základě pozorování vjezdů desítek okružních křižovatek za saturovaných podmínek odvozeny pomocí regresní analýzy rovnice pro rozmanité typy křižovatek (od miniokružních po velké vícepruhové okružní křižovatky umístěné v zastavěném území i mimo něj). Do výpočtu vstupuje 5 geometrických parametrů (šířka vjezdu, šířka dělicího ostrůvku, šířka výjezdu, šířka okružního pásu a poloměr středového ostrova), deterministicky stanovený následný časový odstup a dále intenzita dopravy na okružním pásu. Americký přístup formulovaný v předpisu HCM se v průběhu času vyvíjí směrem k větší komplexitě. Verze 2010 [25] i 2016 [26] mají oproti předchozím verzím formulované rovnice i pro výpočet vícepruhových okružních křižovatek, do kterých vstupuje intenzita dopravy na okružním pásu a charakteristiky řidiče stanovené fixními hodnotami kritického a následného časového odstupu. Německý přístup v podobě metody Brilon-Wu použitý v národním předpisu HBS 2001 [27] a v drobných obměnách i v jeho aktualizacích [21] a [23], využívá ke stanovení kapacity vjezdu



charakteristiky řidičů (deterministicky stanovené hodnoty kritického a následného časového odstupu a minimálního odstupu vozidel na okružním pásu), dále počty jízdnic pruhů na vjezdu i na okružním pásu a také intenzitu dopravy na okružním pásu v místě připojení vjezdu.

## 4.4 Charakteristiky dopravního proudu

Na závěr této kapitoly zabývající se současným stavem poznání je vhodné zařadit i několik základních informací o charakteristikách dopravního proudu, se kterými se bude v následujících kapitolách pracovat. Základní charakteristiky dopravního proudu, které popisují jeho kvalitu a kvantitu, jsou přehledně shrnuty v [28] takto:

- intenzita,
- rychlost,
- hustota,
- časový odstup nebo světlost,
- délkový odstup nebo světlost.

Rychlost dopravního proudu se v teorii dopravního proudu (na rozdíl od jeho kinematického pojetí) chápe jako určitá funkce rozdělení rychlosti jednotlivých vozidel v proudu, která se v konkrétních výpočtech často nahrazuje střední hodnotou rychlosti, měřené na krátkém úseku trasy jako okamžitá rychlost.

Hustota dopravního proudu je definována polohou a počtem vozidel na dráze  $s$  v čase  $t$  (voz/km, voz/m).

Matematicky se intenzita  $J$ , rychlost  $v$  a hustota  $\rho$  dopravního proudu definuje takto:

$$J = J(x,t) \quad (4-25)$$

$$\rho = \rho(x,t) \quad (4-26)$$

$$v = \frac{J(x,t)}{\rho(x,t)} \quad (4-27)$$

Délkový odstup vozidel se definuje dynamickým obrysem vozidla

$$a = \frac{1}{\rho} [m] \quad (4-28)$$

Časový odstup vozidel je čas, který uplyne mezi přejezdy příjíždí za sebou jedoucích vozidel ve sledovaném profilu jízdnic pruhu

$$b = \frac{1}{J} [s] \quad (4-29)$$

Mezi základní charakteristiky dopravního proudu také patří fakt, že jeho vlastnosti lze přirovnat k chování termodynamického plynu, a tudíž zde také platí rovnice kontinuity.

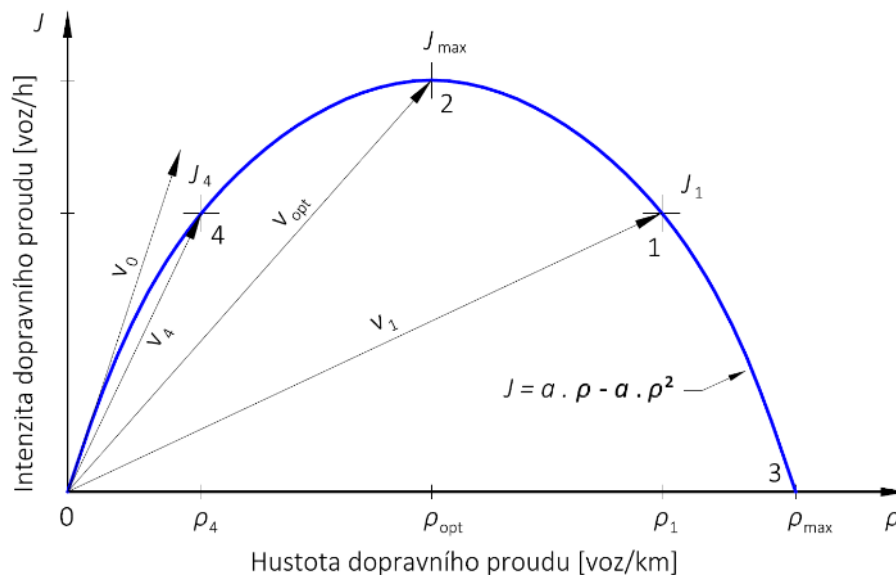
#### 4.4.1 Vztah intenzity a hustoty dopravního proudu

Pro vzájemný vztah mezi intenzitou a hustotou dopravního proudu můžeme napsat následující okrajové podmínky:

- bod 0  $J = 0, \rho = 0 \rightarrow v = v_0$ , kde  $v_0$  je volná rychlost
- bod 1  $J = J_1, \rho = \rho_1 \rightarrow v = v_1$ , kde  $v_1$  je obecná hodnota
- bod 2  $J = J_{max}, \rho = \rho_{opt} \rightarrow v = v_{opt}$ , kde  $v_{opt}$  je optimální rychlost
- bod 3  $J = 0, \rho = \rho_{max} \rightarrow v = 0$  – dopravní proud stojí
- bod 4  $J = J_1 = J_4, \rho = \rho_4 \rightarrow v = v_4$

Z okrajových podmínek znázorněných graficky na Obr. 4.6 a Obr. 4.7 vyplývá:

- jakmile posuzovaným profilem neprojdí vozidla ( $J = 0$ ), není možné hustotu a rychlost dopravního proudu definovat,
- jakmile je hustota vozidel taková, že jejich pohyb je nemožný (kolona vozidel stojí) můžeme definovat maximální hustotu dopravního proudu, ale jeho intenzita a rychlost jsou nulové,
- kde se vyskytne maximální intenzita (rovná se kapacitě jízdního pruhu za daných podmínek), definujeme optimální hustotu a rychlost dopravního proudu.



Obr. 4.6: Vztah mezi intenzitou a hustotou dopravního proudu –  $J/\rho$  diagram.

Křivka procházející body 0, 1, 2, 3 a 4 se nazývá obalová křivka  $J/\rho$  diagramu. Podle [29] a [30] je její tvar parabolický. V takovém případě:

- směrnice průvodiče kteréhokoliv bodu obalové křivky se rovná rychlosti dopravního proudu, která odpovídá intenzitě a hustotě v tomto bodu,
- směrnice tečny k obalové křivce v počátku souřadnic představuje „volnou rychlost“ dopravního proudu (při nízkých intenzitách a hustotách blízkých se nule).

Tento vztah nazýváme fundamentální nebo stavovou rovnicí dopravního proudu. Je základním vztahem, který se implicitně zahrnuje do každého modelu dopravního proudu.

#### 4.4.2 Vztah rychlosti a hustoty dopravního proudu

Podobně jako je možné stanovit okrajové podmínky pro  $J/\rho$  diagram, je možné je stanovit také pro  $v/\rho$  diagram. Pokud platí Obr. 4.7:

- bod 1: maximální rychlost na sledovaném úseku je dosažena, pokud se tam pohybuje pouze jedno vozidlo, tedy

$$v_1 = v_{max} \text{ pokud } \rho_1 = \rho_{min} = 1 \text{ [voz/km]} \quad (4-30)$$

- bod 2: v bodě  $\rho_{opt}$  vztahu  $J/\rho$  platí.

$$v = v_{opt}, \rho = \rho_{opt} \quad (4-31)$$

- bod 3: jakmile je hustota maximální, zastaví se dopravní proud

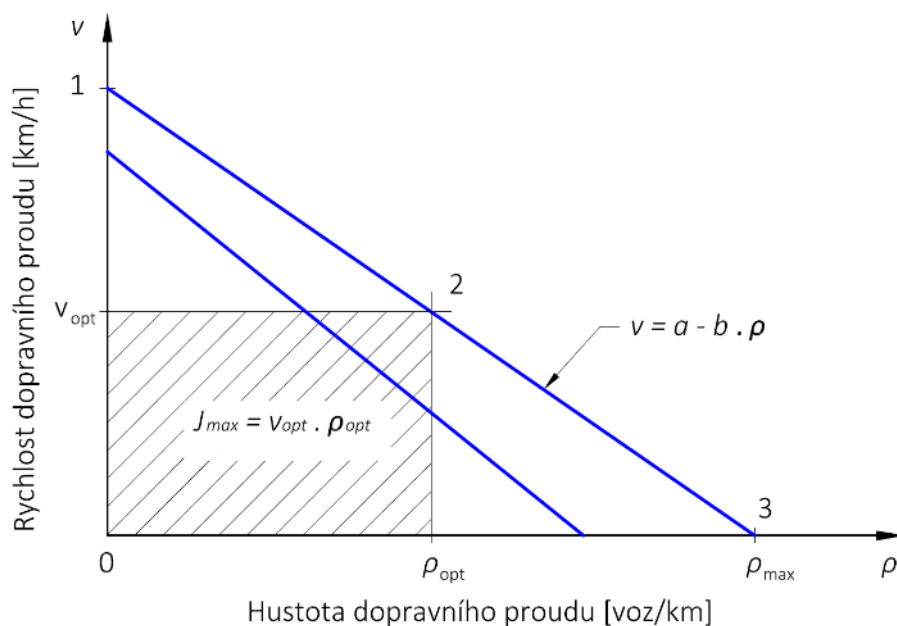
$$\rho = \rho_{max} \text{ pokud } v = 0 \quad (4-32)$$

Pokud je teoreticky vztah  $v/\rho$  přímkový, je možné ho vyjádřit funkcí ve tvaru

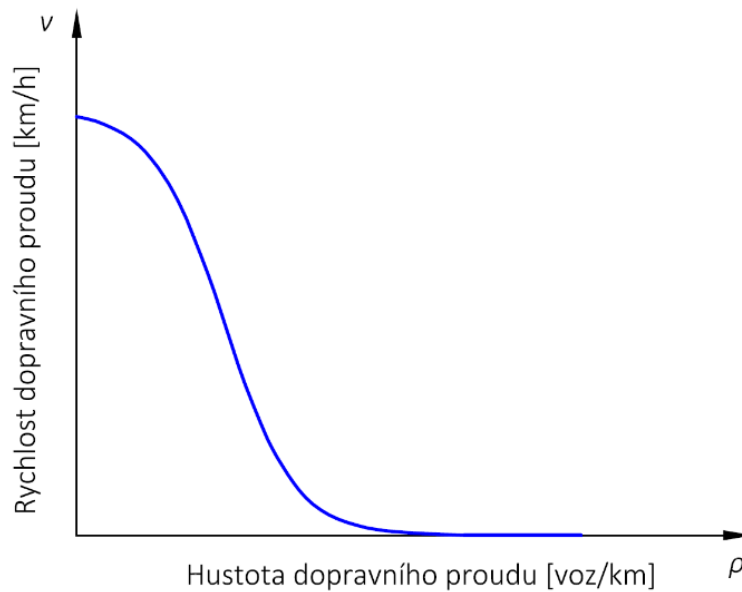
$$v = a - b\rho \quad (4-33)$$

a koeficienty  $a, b$  vypočítat z daných podmínek, kdy závisí na intenzitě, geometrickém uspořádání komunikace, existenci křižovatek apod. Přímkou na Obr. 4.7 vyjadřují rozdílnost okrajových podmínek na kvalitativně různých komunikacích.

Z výsledků četných měření bylo zjištěno, např. [31] nebo [32], že vztah  $v/\rho$  není čistě přímkový, protože v oblastech vysokých rychlostí a hustot nastává jeho zakřivení, viz Obr. 4.8.



Obr. 4.7: Vztah mezi rychlostí a hustotou dopravního proudu –  $v/\rho$  diagram.



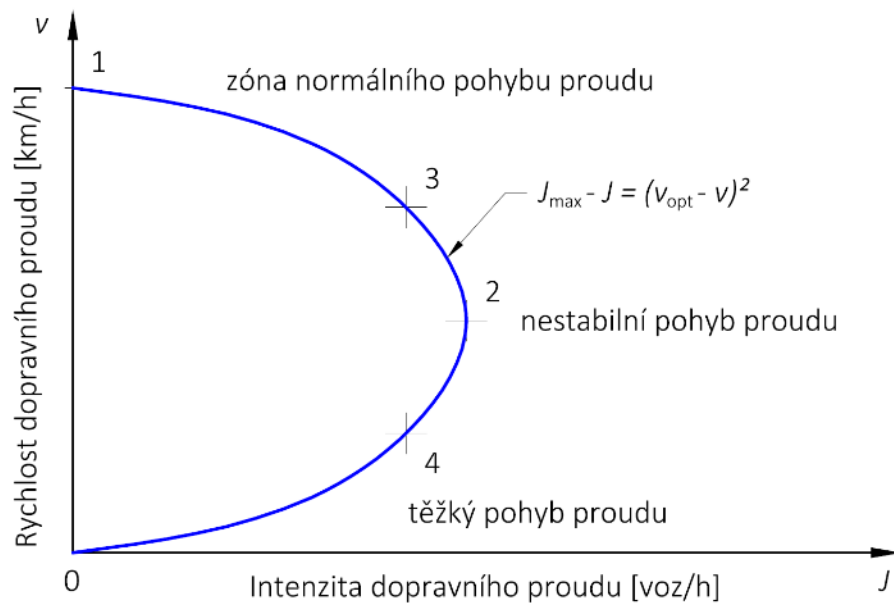
Obr. 4.8: Reálný tvar diagramu rychlosti a hustoty dopravního proudu –  $v/\rho$  diagram.

#### 4.4.3 Vztah intenzity a rychlosti dopravního proudu

Vztah mezi intenzitou a rychlostí dopravního proudu je taktéž parabolický a je dokumentován na Obr. 4.9 takto:

- Mezi body 1 a 3 platí pro pohyb dopravního proudu normální podmínky. Rychlost je poměrně vysoká, intenzita menší a nevznikají kolony.
- Mezi body 3 a 4 je zóna nestabilního pohybu dopravního proudu.
- Mezi body 4 a 0 nastává „těžký pohyb“ dopravního proudu, až se zastaví. Předjíždění je nemožné, vozidla se pohybují v kolonách a dopravní proud dosahuje vysoké hustoty, ale nízké rychlosti.
- V bodě 2 je maximální intenzita a dopravní proud má optimální rychlost.

Pro vztah intenzity a rychlosti je třeba si uvědomit ještě důrazněji než pro vztah  $J/\rho$  a  $v/\rho$ , že v současných jízdních podmínkách má rychlost dopravního proudu konečné hranice (ať už legislativní nebo technické). Z tohoto faktu vyplývají omezení hustoty a intenzity dopravního proudu na jízdním pruhu za každých, tedy i ideálních podmínek.



Obr. 4.9: Vztah mezi intenzitou a rychlostí dopravního proudu –  $J/v$  diagram.

## 5 Předcházející výzkum na stykových křižovatkách

V této kapitole budou detailně popsány nedostatky stávajícího Sieglochova výpočtového modelu [2] a zároveň bude představen nový model založený na stochastickém přístupu. V rámci výzkumného projektu Technologické agentury ČR CK01000152 Pokročilé matematicko-fyzikální metody modelování mikrostruktury dopravního proudu [33], byl tento model zkoumán nejdříve na nejjednodušším případě stykové křižovatky. Úloha byla rozdělena do dvou částí. V první části bylo analyzováno rozdělení a velikost časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu na úsecích komunikací v zastavěném území, tedy s omezenou dovolenou rychlostí obvykle do 50 km/h a v druhé části byly zkoumány přímo zařazovací manévry vozidel z vedlejší komunikace do nadřazeného dopravního proudu. Zde byl zase sledován počet vozidel podřazeného dopravního proudu, která využila časovou světlost dané velikosti na hlavní komunikaci. Kompletní výstup z tohoto výzkumu je uveden v [12], v následujících podkapitolách budou uvedena pouze zásadní zjištění, na která bude tato práce navazovat v souvislosti s výzkumem dopravních proudů na jednopruhových okružních křižovatkách.

Sieglochova metoda využívá pro definici pravděpodobnosti výskytu mezer v nadřazeném dopravním proudu Poissonovo pravděpodobnostní rozdělení, které se dle [28] používá v případě, že jsou splněna následující Adamsova-Kinzerova kritéria:

1. vozidla dodržují v dopravním proudu různé odstupy, které závisí na hustotě a rychlosti dopravního proudu,
2. všechna vozidla se mohou pohybovat volně, nezávisle na sobě a předjíždění je vždy možné,
3. průjezd vozidla sledovaným profilem je náhodný,
4. pravděpodobnost výskytu odstavu určité délky ve zvoleném časovém intervalu je přibližně úměrná jeho délce.

Dle [34] je zřejmé, že tyto předpoklady platí pouze omezeně a zejména druhý předpoklad platí jen ve fázi volného dopravního proudu, což zpravidla není ten případ, kdy je třeba řešit kapacitu křižovatek. Rovněž platnost třetího a čtvrtého předpokladu je diskutabilní. Jak se ukázalo v provedených průzkumech [35], sousední světlosti jsou výrazně korelovány a úměra popsaná v posledním bodě vykazuje extrémní fluktuace. Vlastnosti dopravního proudu jsou podrobněji popsány v kapitole 4.4. Samotný kapacitní výpočet [15] je sestaven jako integrál součinu předpokládaného rozdělení světlostí v nadřazeném dopravním proudu a Sieglochovy funkce (viz rovnice (4-1) v kapitole 4.1.1.1) přes všechny světlosti

$$C = J \cdot \int_R g(t) \cdot s(t) dt \approx J \cdot \int_{t_0}^{+\infty} g(t) \cdot s_{LIN}(t) dt, \quad (5-1)$$

kde  $J$  je intenzita nadřazeného dopravního proudu,  $g(t)$  hustota pravděpodobnosti výskytu časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu,  $s(t)$  je Sieglochova funkce, reprezentující průměrný počet vozidel z podřazeného dopravního proudu, která mohou využít danou časovou světlost a  $s_{LIN}(t)$  je lineární aproximace Sieglochovy funkce. Siegloch v [2] pracuje s předpokladem, že hustota pravděpodobnosti  $g(t)$  má exponenciální rozdělení a navíc, že parametr intenzity daného rozdělení odpovídá intenzitě dopravy nadřazeného dopravního proudu, tj.  $g(t) = \theta(t)m_H e^{-m_H t}$ . Lineární aproximaci Sieglochovy funkce  $s_{LIN}(t)$  vyjádřenou rovnicí (4-4) můžeme s využitím vztahů (4-5) a (4-6) zapsat jako

$$s_{LIN}(t) = \theta(t - t_0) \frac{t - t_0}{t_f}. \quad (5-2)$$

Na základě těchto předpokladů dostává kapacitní výpočet tvar

$$C = J \cdot \int_{t_0}^{+\infty} m_H e^{-m_H t} \cdot \frac{t - t_0}{t_f} dt = 3600 \cdot \frac{e^{-m_H t_0}}{t_f}, \quad (5-3)$$

kde je  $m_H = \frac{J}{3600}$  přepočtení intenzity nadřazeného dopravního proudu z jednotky voz/h na voz/s. Jak už bylo uvedeno výše i v [12], [15] a [34], exponenciální rozdělení příliš neodpovídá empirickým časovým světlostem, ale přesto se dlouhodobě používá. Jeho výhoda je, že oproti jiným výpočtům vyžívajícím složitější rozdělení pravděpodobnosti (např. Gamma nebo GIG) není třeba odhadovat žádné parametry a výpočet je lehce interpretovatelný.

Během vývoje vědecké disciplíny VHM (Vehicular Headway Modelling) [36] bylo navrženo mnoho různých modelů statistického rozdělení světlostí v dopravním proudu. V počátcích se jednalo spíše o porovnávání statistiky naměřených dat se známými rozděleními rozšířenými v dalších vědních odvětvích (normální, exponenciální, posunutá exponenciální rozdělení). Později se autoři snažili při odhadování reálných distribucí vycházet více z vlastností empirických dat a hledali distribuce, které by je popisovaly co nejlépe (Erlangova, Gamma či log-normální distribuce, případně jejich posunutá verze). V průběhu let byly formulovány základní teoretické/empirické požadavky pro výběr vhodné distribuce světlostí, které ukazují, že hustota pravděpodobnosti  $g(t)$  pro časovou světlost  $T$  měřenou mezi jedoucimi vozidly v dopravním proudu musí splňovat následující kritéria pro přípustnost uvedená např. v [12] nebo [36]:

- Spojitost:  $g(t) \in C(0, +\infty)$ ;
- Redukce nosiče:  $supp(g) \equiv \{t : g(t) > 0\} \subset (0, +\infty)$ ; tj.  $g(t) = \Theta(t)g(t)$ ;
- Nezápornost a omezenost hustoty:  $(\exists K > 0)(\forall t > 0) : 0 \leq g(t) \leq K$ ;
- Integrabilita a normalizace:  $\int_0^{+\infty} g(t) dt = 1$

- Balancovaný chvost: musí existovat  $\omega > 0$  tak, že

$$\kappa > \omega \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} g(t)e^{\kappa t} = +\infty \wedge \kappa < \omega \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} g(t)e^{\kappa t} = 0;$$

což je podle teorie balancovaných hustot ekvivalentní výroku

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\ln(g(t))}{t} = -\omega.$$

- Plató v počátku souřadné soustavy (s výjimkou pro empirická dopravní data extrahovaná z datových vzorků s velice nízkou hustotou provozu):

$$\forall q \geq 0 : \lim_{t \rightarrow 0_+} t^{-q} g(t) = 0.$$

Požadavky na balancovaný chvost a plató v počátku souřadnic jsou matematicky velmi silné a vylučují použití např. Gaussova nebo log-normálního rozdělení. Všechna výše uvedená kritéria naopak splňuje zobecněné inverzní Gaussovo rozdělení (zkráceně GIG).

Jsou-li empirická data, které má pravděpodobnostní model  $g(t)$  popisovat, škálovaná, pak je navíc požadováno, aby

$$E(T) = \int_0^{+\infty} t \cdot g(t) dt = 1. \quad (5-4)$$

Tato rovnost je obvykle nazývána škálovací rovnicí.

## 5.1 Rozdělení světlostí v nadřazeném dopravním proudu

### 5.1.1 Sběr dat a jejich struktura

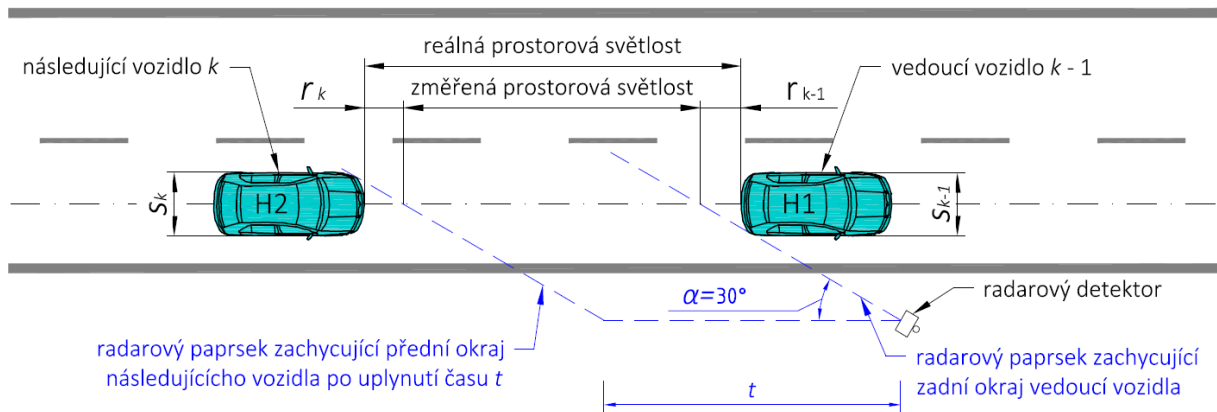
V této podkapitole bude popsáno statistické prověření časových světlostí změřených na 11 lokalitách v českých městech pomocí statistického radaru osazeného na vytížených dvoupruhových intravilánových komunikacích. Tyto úseky komunikací byly vybrány tak, aby se jednalo o zatížené mezikřižovatkové úseky, kde jsou ovšem křižovatky natolik vzdálené, že vzájemně neovlivňují dopravní proud. Nejbližší křižovatky pak nesměly být ani světelně řízené. Díky vysokým intenzitám dopravy a délce měření na každém úseku (cca 5 dní) byl získán rozsáhlý vzorek dat, který umožnil komplexní statistické zpracování.





Obr. 5.1: Ukázka umístění radarové detektoru u komunikace v intravilánu (silnice II/374 na průtahu městem Blanskem)

Při předepsaném umístění radaru ve vzdálenosti 0,5 – 2,0 m od vozovky, ve výšce 1,0 m, kdy paprsek detektoru svírá úhel 30° s osou komunikace (viz Obr. 5.1), dochází ke zkreslení skutečné světlosti mezi za sebou jedoucími vozidly. Toto zkreslení je patrné z idealizovaného schématu na Obr. 5.2. Rozdílná šířka vozidel a odlišná příčná poloha v rámci jízdního pruhu byla zanedbána.



Obr. 5.2: Idealizované schéma realizace měření časových světlostí v dopravním proudu pomocí radarového detektoru včetně provedení opravy délkové světlosti.

Surová data z detektoru proto musela projít opravným přepočtem, který pomocí známého úhlu  $\alpha$  mezi odvěsnou a přeponou pravoúhlého trojúhelníka a předpokládané šířky vozidel  $s_k$  a  $s_{k-1}$  stanovil skutečnou časovou světlost mezi vozidly.

Délky  $r_k$  a  $r_{k-1}$ , o něž byla zkrácena prostorová světlost, byly vypočteny jako

$$r_k + r_{k-1} = \frac{1}{2} \cotg \alpha (s_k + s_{k-1}). \quad (5-5)$$

Časový interval, o který byla zkrácena časová světlost naměřená detektorem, byl dopočítán pomocí vztahu

$$\Delta t = v_k \cdot (r_k + r_{k-1}). \quad (5-6)$$

V souladu s předchozími předpoklady uvedenými v úvodu kapitoly 5 a také v [37], [11], [38], [39] a [8] lze předpokládat, že pro adekvátní matematický popis rozdělení časových světlostí mezi za sebou jedoucími vozidly v dopravním proudu je možné využít inverzní Gaussovo rozdělení, zkráceně GIG. Toto rozdělení lze popsat následující rovnicí

$$g(x|\alpha, \beta, \lambda) = A\theta(x)x^\alpha e^{-\frac{\beta}{x}} e^{-\lambda x}, \quad (5-7)$$

kde  $\alpha \in \mathbb{R}$ ,  $\beta \geq 0$  a  $\lambda \geq 0$  jsou parametry rozdělení. Normalizační konstanta

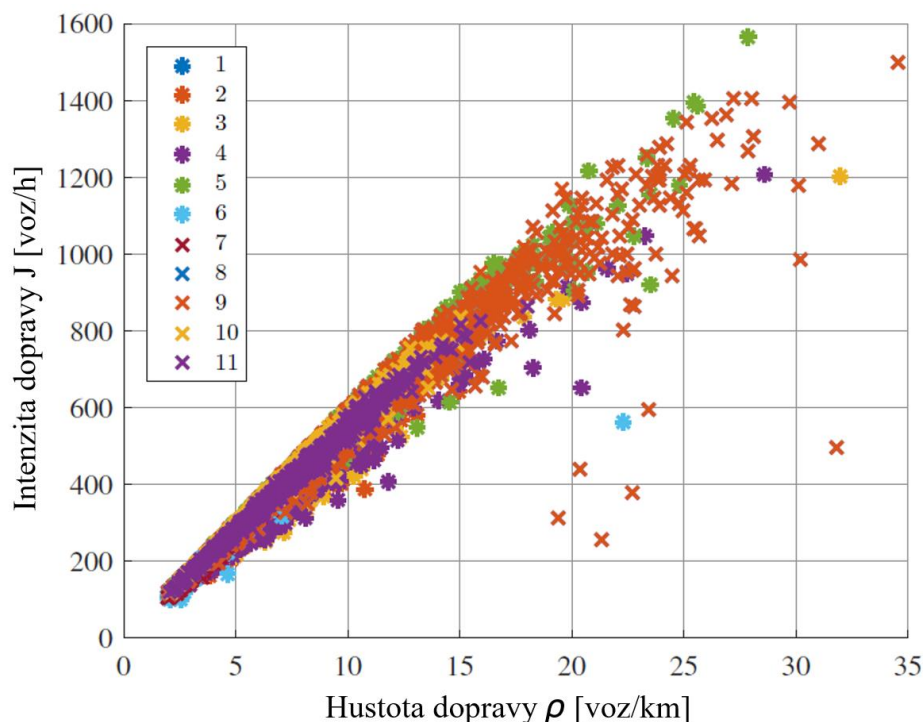
$$A^{-1} = \begin{cases} 2 \left(\frac{\beta}{\lambda}\right)^{\frac{\alpha+1}{2}} \mathcal{K}_{\alpha+1}(2\sqrt{\beta\lambda}); & \beta > 0, \alpha \in \mathbb{R}, \lambda > 0; \\ \frac{\Gamma(\alpha+1)}{\lambda^{\alpha+1}}; & \beta = 0, \alpha > -1, \lambda > 0; \end{cases} \quad (5-8)$$

zajišťuje správnou normalizaci [40]. Člen  $\mathcal{K}_a(x)$  zastupuje Macdonaldovu funkci řádu  $a \in \mathbb{R}$ , jinak také nazývanou jako Besselovu funkci 2. druhu. V integrálním tvaru tato funkce vypadá následujícím způsobem

$$x^a \mathcal{K}_x(x) = 2^{a-1} \int_0^\infty y^{a-1} e^{-\frac{x^2}{4y}} e^{-y} dy \quad (x > 0). \quad (5-9)$$

Gaussovo inverzní rozdělení má oproti ostatním často používaným jednodušším alternativám (exponenciální, Erlangovo, Gamma nebo log-normální rozdělení) dvě výhody. Zaprvé bylo odvozeno z konkrétního mikroskopického modelu (viz [11]), což znamená, že jeho tvar je podložen odpovídajícím dynamickým popisem dopravního toku. Zadruhé odpovídá (při  $\beta > 0$  nebo  $\beta = \alpha = 0$ ) všem empirickým/teoretickým kritériím, která musí být splněna pro všechny matematické funkce určené pro statistické odhady empirických dopravních dat [41]. Exponenciální, Erlangovo a Gamma rozdělení jsou navíc zvláštními případy inverzního Gaussova rozdělení.

Dle postupu osvědčeného ve vědecké disciplíně VHM (Vehicular Headway Modelling) [37] zabývající se statistickým popisem mikrostruktury dopravních proudů a závislostí jeho parametrů na hodnotách hlavních fázových proměnných (dopravní hustotě, intenzitě a průměrné rychlosti), byl naměřený soubor dat rozdělen na vzorky po 50 následujících se vozidlech. Pro každý vzorek pak byla spočítána průměrná rychlost  $V_k \equiv (v)_k$ , intenzita dopravy  $J_k$  a hustota  $\rho_k$  při použití standardní hydrodynamické aproximace  $\rho_k \approx J_k V_k$ . Tímto způsobem lze získat fundamentální diagram pro pár  $(\rho_k, J_k)$ , na kterém si lze relativně jednoduše udělat představu o dopravních režimech na měřených lokalitách (viz Obr. 5.3).



Obr. 5.3: Fundamentální diagram intenzita-hustota z dat naměřených v intravilánu. Každý vyneseny bod reprezentuje 50 za sebou jedoucích vozidel zachycených radarovým detektorem na 11 lokalitách v ČR [12].

Pro všechny změřené lokality lze v grafech objevit volné režimy dopravy s omezenou rychlostí. Na žádném z úseků nebyla místní nebo obecnou úpravou dopravního značení dovolena vyšší rychlost jízdy než 60 km/h. Přesto se samozřejmě stalo, že některá vozidla tuto rychlost překročila a byla z analýzy vyřazena, protože nerepresentují obvyklý městský provoz, kde je standardně zavedena maximální dovolená rychlost 50 km/h.

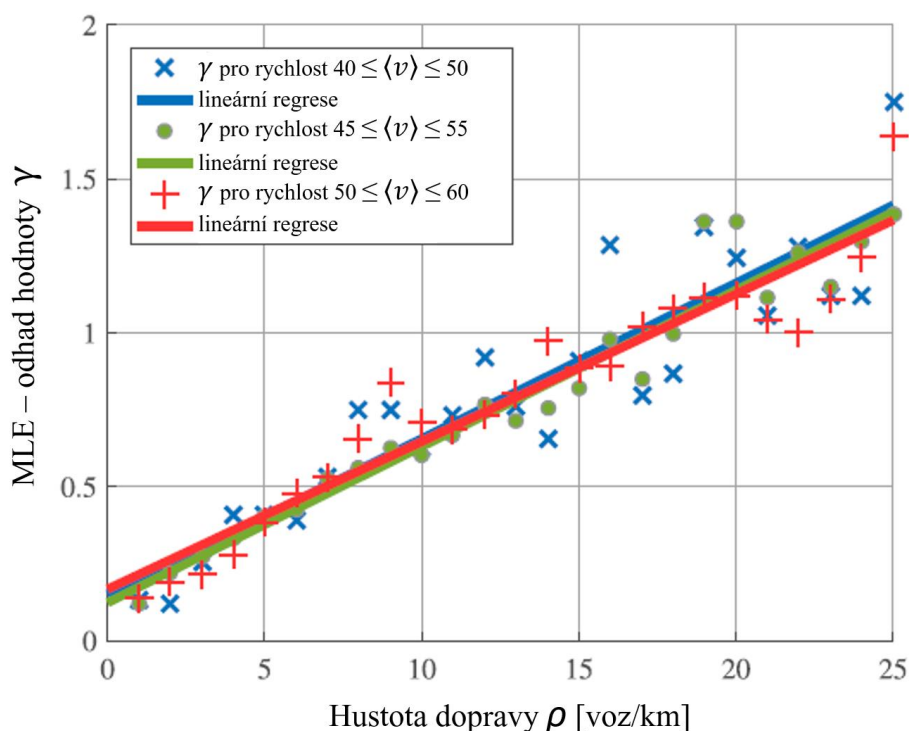
### 5.1.2 Vyhodnocení dat

Cílem této statistické analýzy bylo odhadnout typ distribuční funkce z rodiny GIG, která bude nejlépe odpovídat empirickým datům. Tvary histogramů empiricky získaných dat se výrazně mění v závislosti na hustotě dopravy, což je dobře známý fenomén fyziky dopravního proudu, viz také [9], [11], [8] a [38]. Z toho důvodu byla data škálována do zón hustoty  $[\rho, \rho + 5 \text{ voz/km}]$  a zón rychlosti  $[v, v + 10 \text{ km/h}]$ . Díky škálování byly následně získány soubory dat světlostí  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , které bylo možné následně podrobit osvědčenému postupu odhadu.

$$(\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\lambda}) = \underset{\alpha \in \mathbb{R}, \beta \geq 0, \lambda > 0}{\operatorname{argmax}} \prod_{i=1}^m A(\alpha, \beta, \lambda) x_i^\alpha e^{-\frac{\beta}{x_i}} e^{-\lambda x_i}. \quad (5-10)$$

Pokud jsou časové světlosti škálovány, je možné funkci *argmax* použít pouze se dvěma parametry. Klíčová hodnota metody maximální věrohodnosti  $\gamma$  (v teorii stochastického dopravního plynu obvykle nazývaná stochastická rezistivita [11]) ukazuje silnou lineární závislost na hustotě dopravy, což je také patrné z Obr. 5.4. Stochastickou rezistivitu  $\gamma$  lze stručně definovat jako inverzní teplotu termální lázně,

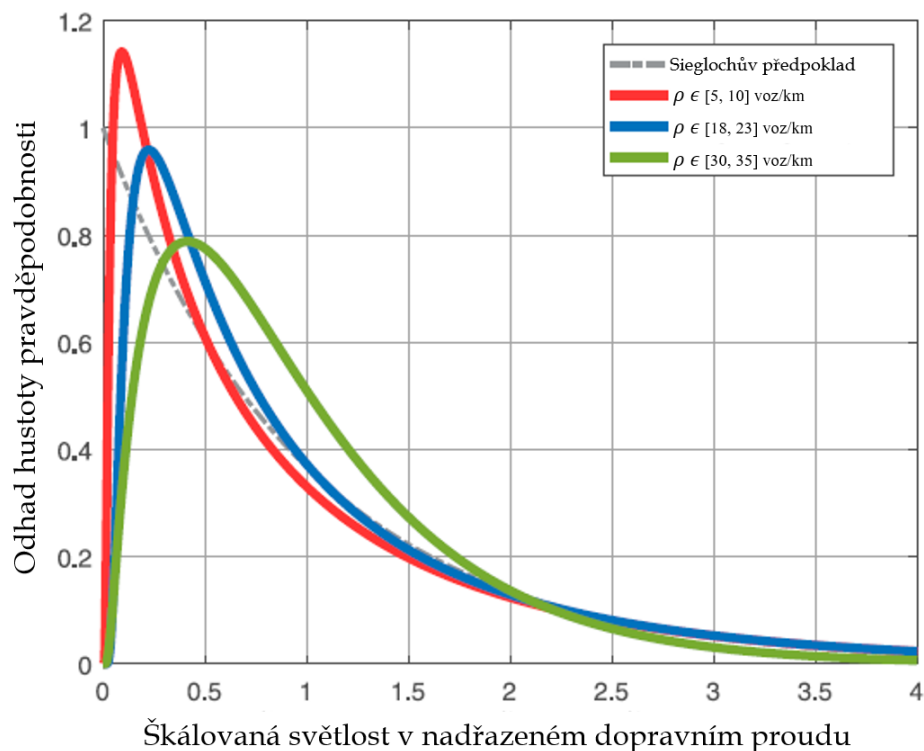
ve které se nachází systém částic, a která představuje míru odolnosti systému vůči stochastickým vlivům. Pro  $\gamma \rightarrow \infty$  je systém naprosto neovlivněn termální lázní a jedná se o jeho deterministickou verzi. Pokud však bude  $\gamma \rightarrow 0$ , pak je pohyb částic maximálně náhodný. V rámci řešeného dopravního problému pak tato veličina reprezentuje mentální stres řidiče v dopravním systému, který roste s narůstající hustotou dopravy a tím i narůstajícím počtem podnětů, na které musí řidič reagovat [15]. Výstupy lineární regrese navržené touto stochastickou rezistivitou vzorků dopravy mohou být spolehlivě popsány lineární funkcí  $\gamma = p\rho + q$ , kde konstanty  $p, q > 0$  jsou dokonce téměř závislé na průměrné rychlosti vozidel.



Obr. 5.4: Odhad stochastické rezistivity. Pomocí metody maximální věrohodnosti zde jsou odhadnuty hodnoty  $\gamma$  pro empirická data získaná měřením v zastavěných oblastech. Pro účely srovnání byly z celkového objemu dat vybrány 3 vzorky z různých rychlostních zón po skupinách 50 následujících se vozidel s průměrnou rychlostí ( $v$ ) [12].

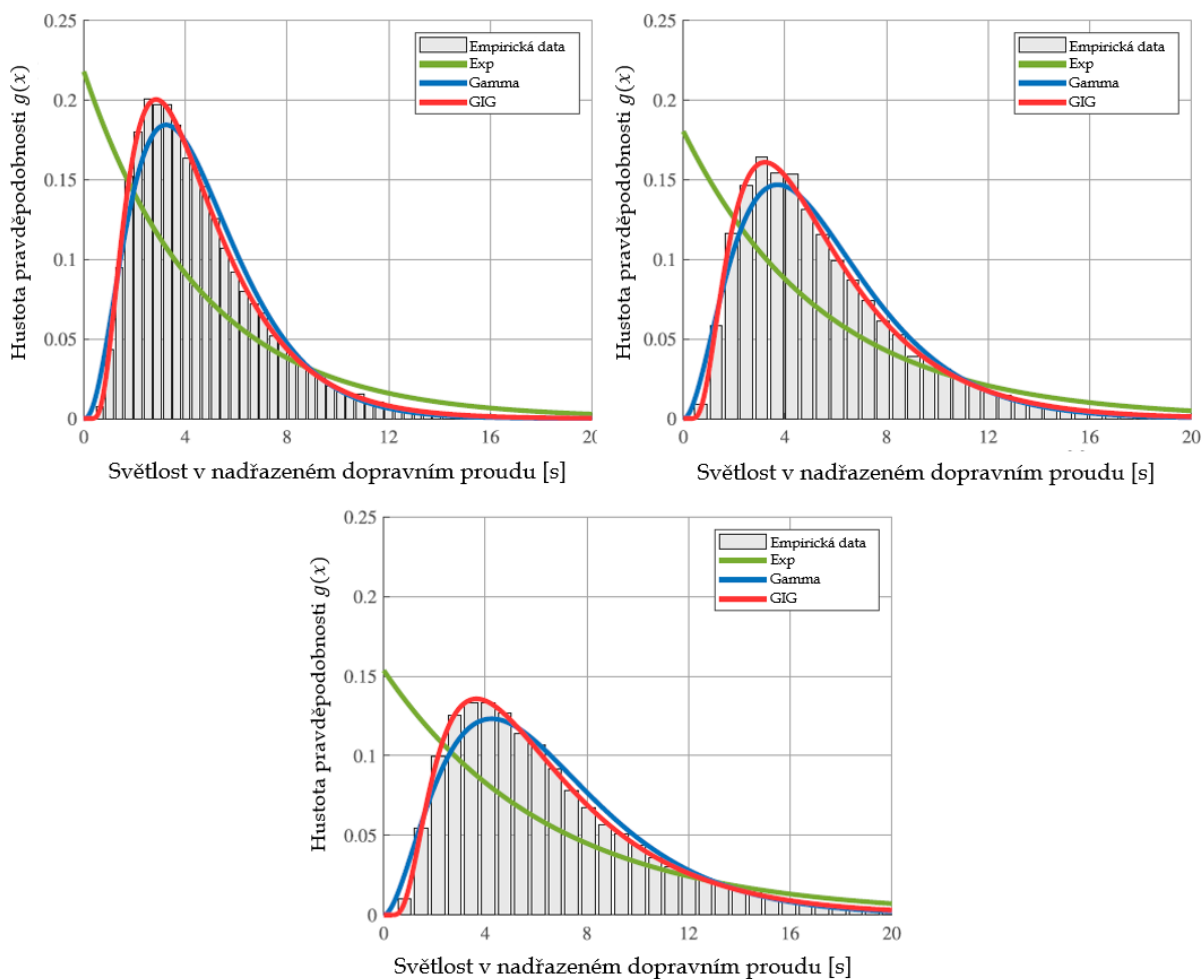
Výše uvedená statistická analýza dat získaných měřením dopravních proudů v zastavěných územích s omezenou rychlostí vyvrací základní předpoklady Sieglochovy metody o exponenciálním rozdělení světlostí v nadřazeném dopravním proudu v téměř všech případech. Zatímco pro dopravní proud s nízkou hustotou je odhad stochastické rezistivity blízký nule, a tedy rozdělení GIG podle (5-7) je po dosazení  $\alpha = 0$  transformováno na exponenciální rozdělení  $g(x) = \lambda\theta(x)e^{-\lambda x}$  uvažované Sieglochem, zásadně odlišná situace nastává pro dopravní proud s vysokou hustotou. V tomto případě stochastická rezistivita významně roste, což naznačuje významnou odchylku od Sieglochových předpokladů. Rozdělení GIG vykreslené pro vyšší rezistivitu (viz Obr. 5.5) znázorňuje výrazně potlačenou pravděpodobnost výskytu krátkých světlostí, zatímco u exponenciálního rozdělení je výskyt

krátkých světlostí velmi pravděpodobný. Tato zjištěná odchylka bohužel velmi snižuje přesnost odhadu výsledné kapacity křižovatky počítané podle současných předpisů.



*Obr. 5.5: Odhad rozdělení světlostí v nadřazeném dopravním proudu. Vykresleno bylo několik rozdělení GIG dle (5-7) na základě empirických dat, která byla vybrána v úzkých hustotních intervalech (viz legenda obrázku). Ve všech případech byla provedena škálovací procedura zajišťující, že střední hodnota světlostí je rovna jedné [12].*

Analogická analýza byla provedena i na třech vzorcích dat z Německa (podrobněji budou popsána v kapitole 5.2.1). Tentokrát bylo empirické rozdělení časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu porovnáváno s exponenciálním rozdělením (dle předpokladu Sieglochovy metody), Gamma rozdělením a rozdělením GIG. Parametry těchto rozdělení  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\lambda$  byly odhadnuty na základě metody maximální věrohodnosti (MLE). Výsledné grafy jsou uvedeny na Obr. 5.6. Rovnice pro výpočet hustoty pravděpodobnosti u vybraných rozdělení jsou přehledně uvedeny v kapitole 6.5.2



Obr. 5.6: Hustoty pravděpodobnosti výskytu časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu pro tři vzorky dat z Německa. Empirická data jsou znázorněna šedým histogramem, zelená křivka reprezentuje exponenciální rozdělení, modrá Gamma rozdělení a červená GIG [12].

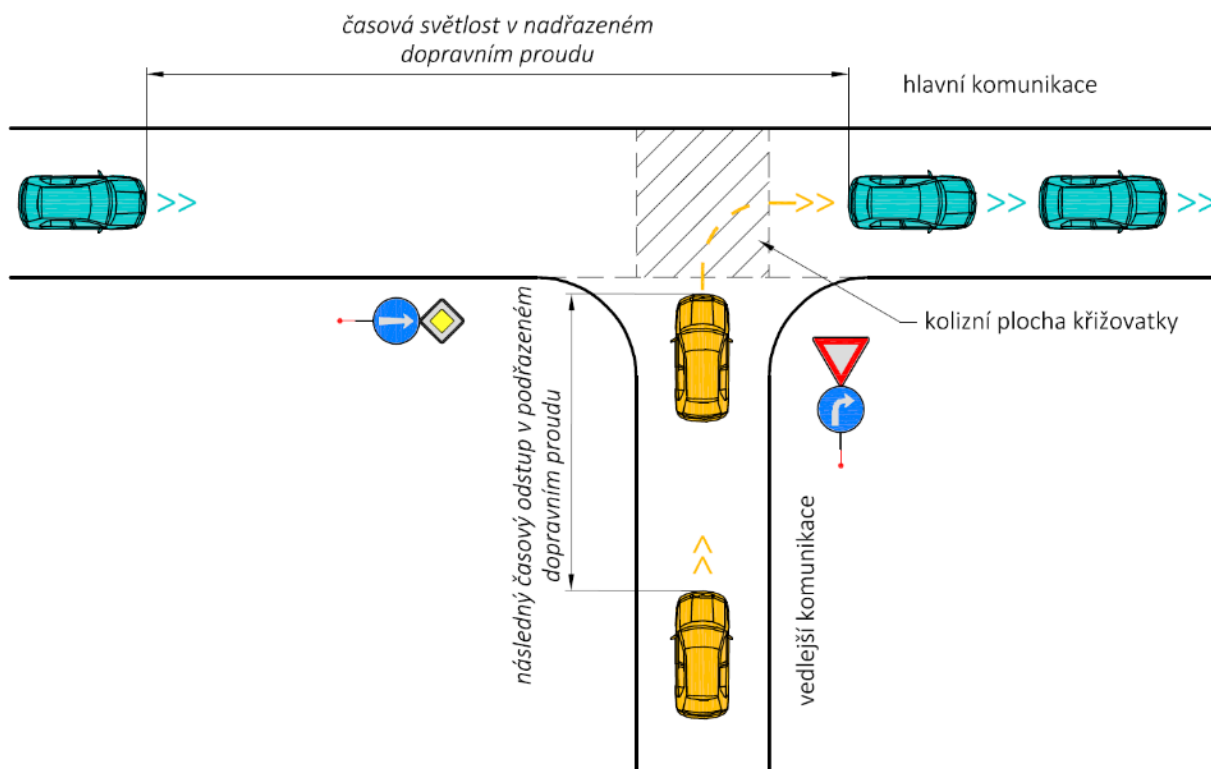
## 5.2 Zařazovací manévry vozidel z vedlejší komunikace

V této podkapitole bude pozornost věnována rozhodovacímu procesu spojenému se zařazením vozidla z vedlejší komunikace do nadřazeného dopravního proudu. Pro účely této analýzy byly v rámci výzkumného projektu [33] získány ve spolupráci s Technische Universität München 3 datové sady naměřené na stykových křižovatkách v Německu. Uspořádání sledovaných křižovatek bylo vlivem částečných uzavírek zredukováno na nejjednodušší model, který je patrný z Obr. 5.7, přičemž ale jejich zatížení zůstalo vysoké, což je poměrně vzácná situace, která v tu dobu v České republice nebyla k dispozici. Vzhledem k tomu, že bylo hledáno pravděpodobnostní rozdělení akceptace mezer v nadřazeném dopravním proudu, nikoliv konkrétní hodnoty kritických a následných časů, nepředpokládá se, že by zahraniční původ dat zkresloval výsledek.

Vozidla na hlavní komunikaci projížděla kolizní plochou křižovatky, aniž by došlo k jejich ovlivnění vozidly na vedlejší komunikaci. Dynamika nadřazeného dopravního proudu byla tedy ovlivněna pouze

vozidly pohybujícími se ve stejném směru a může být popsána osvědčenými charakteristikami dopravního proudu uvedenými v kapitole 4.4, nebo také v [31], [32], [42], [43].

Vozidla v podřazeném dopravním proudu s přikázaným směrem odbočení vpravo na jednosměrnou hlavní komunikaci vjížděla do kolizní plochy po proběhnutí rozhodovacího procesu, který byl v předchozích kapitolách označen jako teorie časových odstupů, příp. mezer (gap-acceptance theory). Podstata této teorie spočívá v tom, že řidič vozidla podřazeného dopravního proudu se rozhoduje, zda přijme nebo zamítne danou časovou mezeru (časovou světlost mezi dvěma vozidly jedoucími za sebou v nadřazeném dopravním proudu). V případě, že řidič mezeru přijme, provede následně zařazovací manévr do nadřazeného dopravního proudu. Výsledkem tohoto rozhodovacího procesu může být, že je buď časová mezera nevyužita žádným vozidlem, nebo je využita právě jedním vozidlem, případně je využita více vozidly.



Obr. 5.7: Schéma uspořádání sledovaných křižovatek v Německu po dobu sběru dat a naznačení zařazovacího manévru.

Manévr, při kterém dojde k zařazení vozidla z vedlejší komunikace do nadřazeného dopravního proudu, je poměrně složitý a riskantní a má přímý vliv na kapacitu a dobu zdržení [4], [2], [16], [44], stejně jako na bezpečnost křižovatky [45], [46]. Matematické modely založené na teorii časových odstupů byly vymyšleny v 60. letech 20. století a v současné době jsou stále využívány v mnoha zemích pro navrhování a posuzování neřízených úrovnňových křižovatek, viz kapitola 4.2 a 4.3.

V rámci této části výzkumu byl sledován děj, při kterém v nadřazeném dopravním proudu vznikne časová mezera (světlost) mezi za sebou jedoucími vozidly o takové délce (viz Obr. 5.7), že se ji řidič

v podřazeném dopravním proudu rozhodne využít pro svůj zařazovací manévr. Podle toho, kolik vozidel tuto světlost využije, je k dané světlosti přiřazen tzv. řád. Například světlost řádu  $k = 3$  značí, že danou mezeru využila právě tři vozidla.

Aby bylo dané měření validní, je nutné splnění níže uvedených kritérií naznačených již v kapitole 4.1.1.1:

1. Nadřazený dopravní proud se nachází ve volné nebo synchronizované fázi, popřípadě v přechodové fázi mezi nimi, ale nikoli v režimu vzduť.
2. Před pokusem zařadit se do dané mezery musí být na vjezdu k dispozici alespoň jedno vozidlo. Nejpozději při započetí zařazovacího manévru je třeba, aby se vozidla ve frontě rychle doplňovala.
3. První zařazované vozidlo musí před křižovatkou zastavit. Plynulý vjezd vozidla z podřazeného proudu na hlavní komunikaci, tj. vjezd bez nutnosti zastavit, byl v rámci tohoto výzkumného projektu vyřazen ze souboru dat. Zařazuje-li se ale do jediné mezery v nadřazeném proudu více vozidel, povinnost zastavit má pouze první z nich.
4. Na vjezdu musí být k dispozici dostatečně dlouhá fronta čekajících vozidel tak, aby nedošlo k situaci, kdy by danou mezeru mohlo využít více vozidel, než je délka fronty. Tím by došlo ke zkrácení řádu světlosti  $k$  dané mezery.
5. Nadřazený či podřazený dopravní proud není ovlivňován vnějšími okolnostmi (přechodem pro chodce, blízkou světelně řízenou křižovatkou, dopravní kongescí atd.), nebo jsou učiněna taková opatření při čištění dat, která ovlivněná měření vyřadí z dalšího zpracování.

## 5.2.1 Sběr dat a jejich struktura

Měření bylo v rámci projektu provedeno na třech lokalitách (dvě v Mnichově a jedna v Drážďanech), kde bylo celkem po vyčištění dat pořízeno téměř 85 000 záznamů. Získaná data byla strukturována tak, že se jednalo o soubor individuálních světlostí v hlavním dopravním proudu, ke kterým byl vždy evidován počet vozidel podřazeného dopravního proudu, který nabídnutou mezeru akceptoval. Mezera v nadřazeném dopravním proudu, kterou akceptovalo  $k$  vozidel, byla označena akceptovanou světlostí řádu  $k$ . Tímto způsobem byla označena každá světlost v nadřazeném dopravním proudu, kde  $k$  indikovalo počet vozidel podřazeného dopravního proudu, která tuto světlost akceptovala, včetně varianty, kdy  $k = 0$ , tedy že daná světlost zůstala nevyužita. Číslo  $k$  bude dále nazýváno akceptačním řádem světlosti. Celkový soubor naměřených světlostí označený jako  $S$  je potom přirozeně možné rozdělit na disjunktní podmnožiny  $S_k$  sdružující světlosti o akceptačním řádu  $k$ . Podíl



$k$  akceptovaných světlostí na celkovém souboru dat je označen jako rozpadový poměr řádu  $k$  a je označen symbolem  $\delta_k$  a lze ho spočítat jako

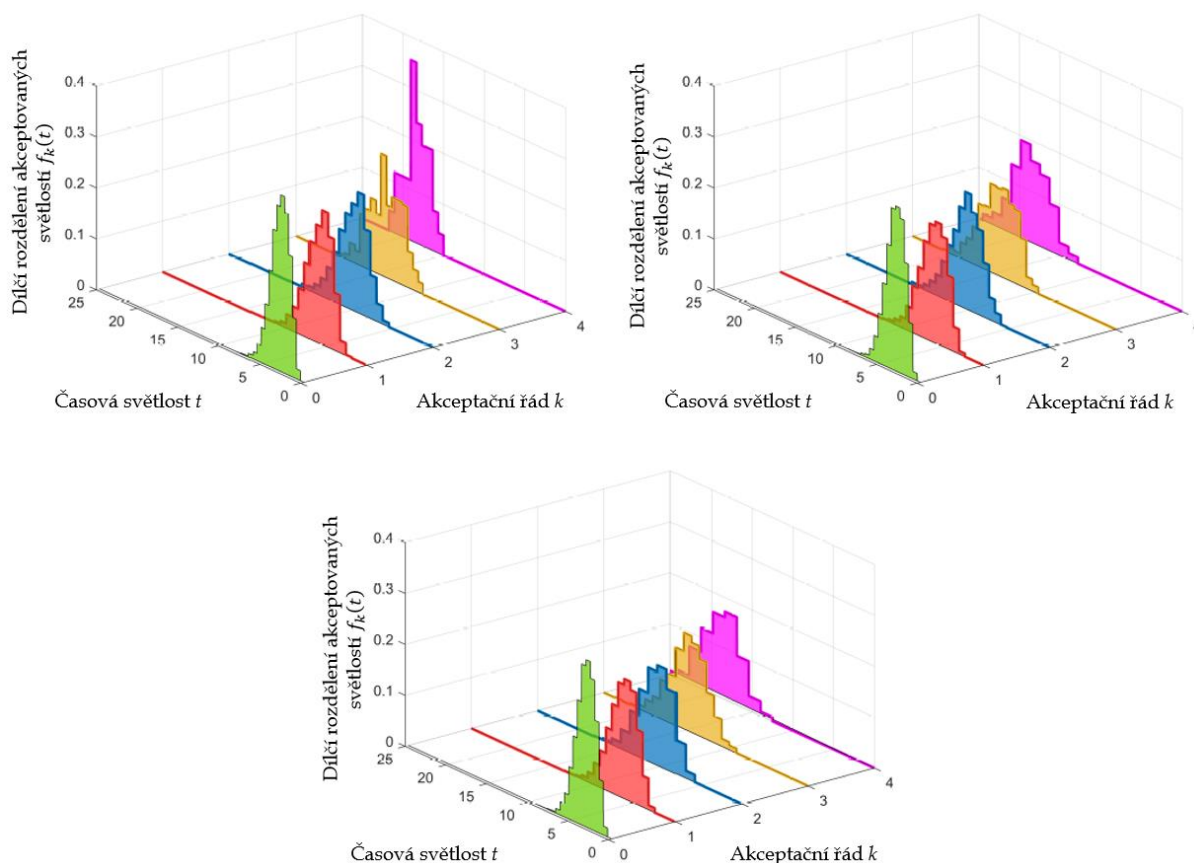
$$\delta_k = \frac{|S_k|}{|S|}. \quad (5-11)$$

## 5.2.2 Vyhodnocení dat

Výsledkem provedené statistické analýzy je dekompozice teoretické hustoty pravděpodobnosti  $g(x)$  na sérii dílčích pravděpodobnostních rozdělení  $f_k(x)$ , kterou je možné zapsat pomocí vzorce

$$g(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \Delta_k f_k(x), \quad (5-12)$$

kde  $\Delta_k$  je teoretický rozpadový poměr vyjadřující pravděpodobnost, že časová světlost bude využita právě  $k$  vozidly.



Obr. 5.8: Empirická rozdělení pravděpodobnosti výskytu akceptovaných časových světlostí řádu  $k = 0, 1, 2, 3$  a  $4$  na třech lokalitách v Německu [12].

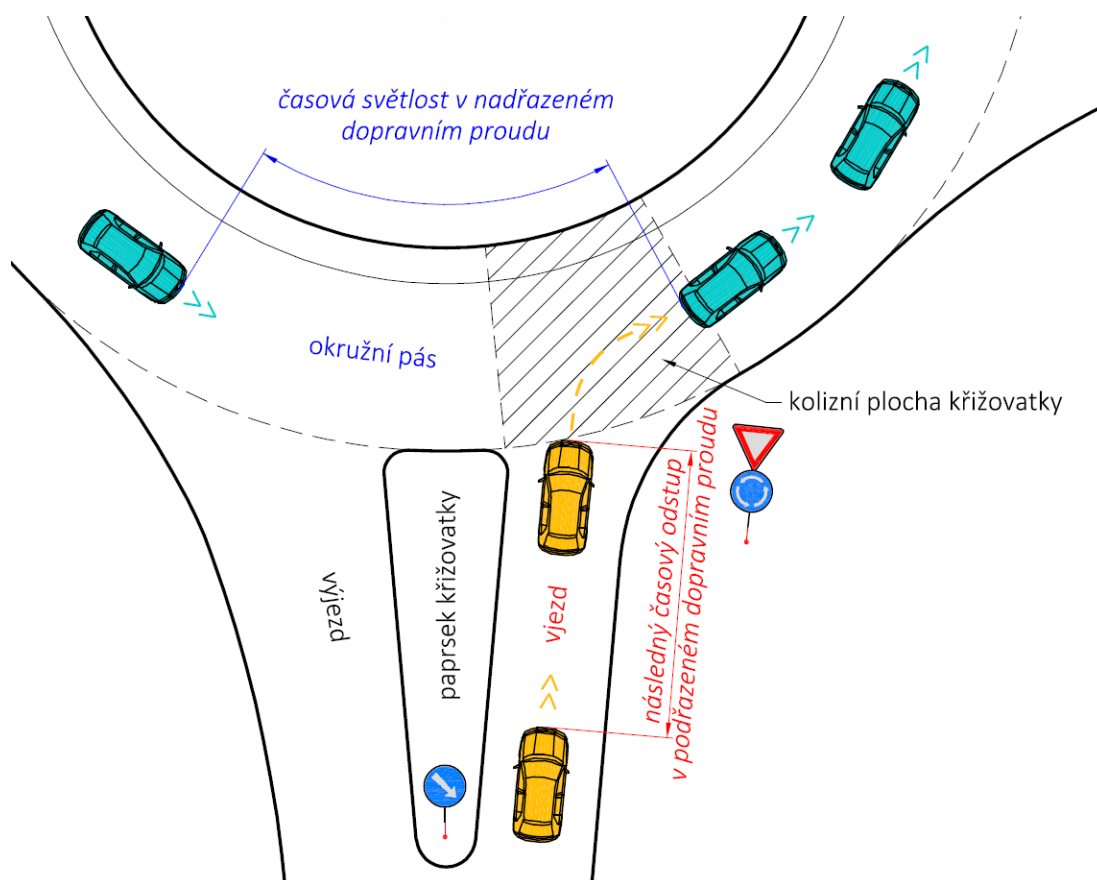
Dle slabého zákona velkých čísel bude se vzrůstajícím počtem měření hodnota  $\delta_k$  konvergovat k pravděpodobnosti  $\Delta_k$ . Analyzována byla empirická rozdělení pravděpodobnosti výskytu akceptovaných světlostí řádů  $k = 0, 1, 2, 3$  a  $4$ . Grafy pro všechny 3 vzorky dat jsou vyneseny na Obr. 5.8.

Stejně jako v případě výskytu mezer v nadřazeném dopravním proudu byla i v tomto případě prokládána empirická data akceptovaných světlostí jednotlivých řádů třemi vybranými rozděleními (exponenciální, Gamma a GIG) pomocí metody maximální věrohodnosti. Na rozdíl od výsledků uvedených v kapitole 5.1.2, kde rozdělení GIG aproximovalo empirická data nejlépe, není v tomto případě výsledek zcela jednoznačný. Rozdělení Gamma totiž pro účely statistického modelování akceptovaných světlostí vykazuje dostatečnou přesnost. K tomu je třeba dodat, že aproximace pracující s rozdělením GIG vedou na tak zanedbatelně malé (téměř nulové) hodnoty parametru  $\beta$ , že výsledná funkce se shoduje s rozdělením Gamma. Na tomto místě je vhodné připomenout, že rozdělení Gamma je jen zvláštním případem rozdělení GIG s nulovým parametrem  $\beta$ .

## 6 Aplikace získaných poznatků na JOK

V této kapitole již bude popsán samostatný výzkum autora práce zabývající se aplikací výše popsaného stochastického přístupu na jednopruhově okružní křižovatky. Pro tento účel bylo třeba nejdříve zajistit dostatečně obsáhlý vzorek dat, na kterém by bylo možné následně provést statistickou analýzu. Sběr dat pro odhad kritických časových světlostí musí probíhat na zatížených křižovatkách za podmínek popsaných v kapitole 4.1.1.1. a 5.2. Ideální rovněž je, pokud na těchto křižovatkách nejsou vyznačeny přechody pro chodce. Chodci by mohli svým přecházením narušovat spojitý proud vozidel na vjezdu do okružní křižovatky a tím zkreslovat akceptační řád pozorovaných světlostí. Druhým problémem při výběru lokality je, jaké zvolit záznamové zařízení a kam jej umístit, aby byl pořízen dostatečně kvalitní videozáznam s odpovídajícím úhlem záběru, který bude možné následně vyhodnotit s co největším podílem automatizace. Jen tak je možné získat dostatečně robustní vzorek dat k relevantní statistické analýze. Doposud byl v České republice praktikován především kombinovaný způsob získávání dat, tedy zadáváním ručně naměřených odstupů (pomocí stopek) do statistických programů, což je velmi nákladné a časově náročné.

Problematika časových světlostí na okružní křižovatce je zobrazena na Obr. 6.1.



Obr. 6.1: Schéma vjezdu do okružní křižovatky s vyznačením sledovaných časů.

## 6.1 Výběr měřicího zařízení

Při výběru vhodného měřicího zařízení bylo třeba dobře zvážit jejich výhody a nevýhody, omezení, náročnost použití, kvalitu a maximální délku záznamu sledované křižovatky.

Ústav pozemních komunikací FAST VUT má k dispozici velice sofistikované zařízení pro sběr dopravně inženýrských informací. Jedná se o hexakoptéru (viz Obr. 6.2), která je schopna díky podvěšené kameře s vysokým rozlišením pořizovat velmi kvalitní videozáznam z ptačí perspektivy, poskytující unikátní přehled o dění na sledované křižovatce s minimálním zkreslením vlivem perspektivy.

Použití hexakoptéry je výhodné díky její mobilitě a relativní svobodě použití. Reálně jsou bohužel možnosti použití hexakoptéry značně omezené, ať už z důvodu legislativních, vyplývajících ze zákona č. 49/1997 Sb. o civilním letectví ve znění pozdějších předpisů [47], který výrazně omezuje použití tzv. dronů v ochranných pásmech letišť, nebo z důvodů bezpečnostních. Hexakoptéra tak musí být při sběru dat ve vzduchu „usazena“ mírně mimo oblast, kde se nachází lidé, aby v případě jejího selhání a pádu nedošlo k ohrožení života nebo zdraví osob, případně škodám na majetku. Tato podmínka tedy téměř vylučuje použití tohoto zařízení v zastavěných oblastech. Nevýhodou je také omezená doba videozáznamu, která je limitována kapacitou baterie a hmotností kamery. Reálně lze dosáhnout na jednu baterii záznamu délky 15–20 minut. Měření může probíhat pouze za dobrých povětrnostních podmínek.



*Obr. 6.2: Hexakoptéra s podvěšenou kamerou s vysokým rozlišením.*

Výsledný videozáznam je pak třeba softwarově stabilizovat. Nevýhody hexakoptéry by měl v blízké budoucnosti částečně eliminovat tzv. helikite (viz Obr. 6.3), což je zvláštní druh balónu plněného heliem, který umožňuje dlouhodobější sledování (v rozsahu několika hodin) a to i za nevhodného počasí. V době zpracování této práce však toto zařízení ještě nebylo na takové úrovni, aby bylo smysluplné jeho pořízení. Navíc tu zůstávají problémy legislativního a bezpečnostního rázu, které bude možné eliminovat jen velmi těžko.



*Obr. 6.3: Helikite s podvěšenou kamerou s vysokým rozlišením.*

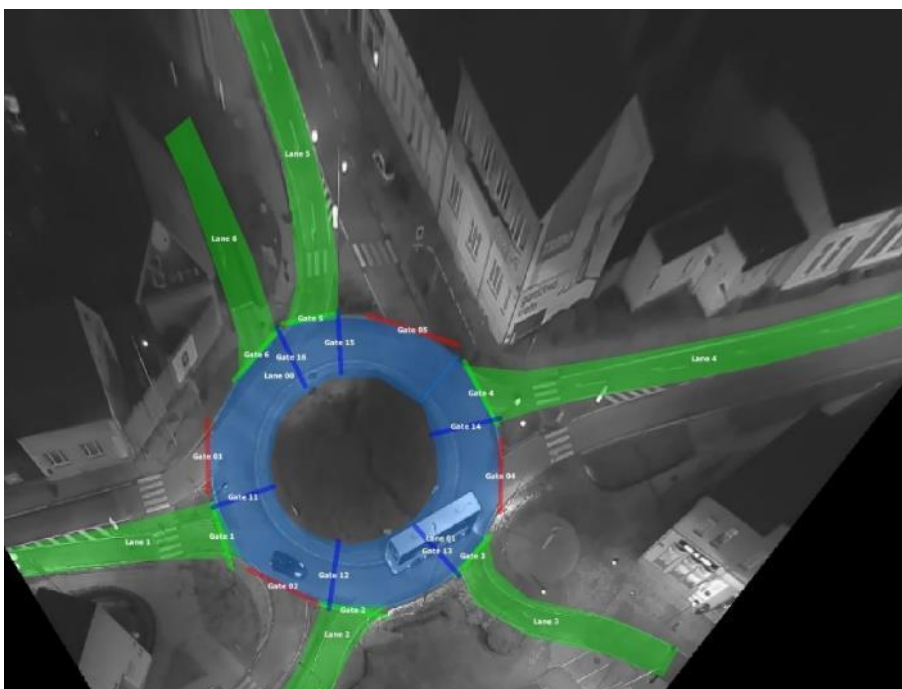
Dále bylo uvažováno o použití zařízení centra AdMaS – mobilní detekční zařízení ev. č. 2.4.37 (viz Obr. 6.5), které lze umístit na vhodná místa, např. přilehlé výškové budovy. Výhodou tohoto zařízení je, že stacionární IP kamera s vysokým rozlišením a širokoúhlým objektivem SONY IPELA SNC-VB630, umístěná do exteriérového vodotěsného pouzdra, umožňuje dlouhodobé pořizování kontinuálního záznamu. Nevýhodou je požadavek na přítomnost výškové budovy či jiné vysoké konstrukce v blízkosti sledované křižovatky, kde by bylo možné zařízení pevně uchytit a zajistit mu napojení na elektrickou a datovou síť. Zařízení nemá vlastní dostatečně kapacitní úložiště dat, proto je ideální zajistit napojení na internet a data ukládat na externí server. Nalézt zatíženou křižovatku, v blízkosti které by se nacházela dostatečně vysoká konstrukce splňující tyto požadavky, je poměrně náročný úkol, nicméně v rámci juniorského projektu specifického výzkumu č. FAST-J-16-3480 Aktualizace kapacitních výpočtů turbo-okružních křižovatek se podařilo domluvit s majitelem 10 patrové budovy v blízkosti okružní křižovatky silnic II/374 a III/27440 v Blansku. Na střeše jinak opuštěného objektu byly instalovány vysílače pro distribuci internetového připojení, takže zde bylo možné zajistit připojení jak do datové, tak do elektrické sítě. V rámci měření byl získán kontinuální záběr křižovatky v délce 38 dní.



*Obr. 6.4: Výsledný záběr stacionární kamery osazené na střeše výškové budovy u okružní křižovatky silnic II/374 a III/37440 v Blansku.*



Obr. 6.5: Instalované zařízení pro sledování okružní křižovatky v Blansku z přilehlé výškové budovy.



Obr. 6.6: Rozmístění detekčních bran a pruhů na transformovaném a georeferencovaném videozáznamu v softwaru Data From Sky, podrobněji viz kapitola 6.3.

Dalším zařízením připadajícím v úvahu je hardwarové zařízení pro měření dopravního proudu ev. č. 2.4.35 (viz Obr. 6.7), což je teleskopický stožár vybavený kamerou s vysokým rozlišením. Teleskopický stožár má výhodu v téměř statickém uchycení kamery (nižší tuhost stožáru je kompenzována kotevními lany). Jelikož lze stožár vysunout pouze do výšky 17 m, je třeba zařízení

umístit co nejbližší ke sledované křižovatce, aby bylo minimalizováno zkreslení perspektivou. Zařízení je uzpůsobeno k transportu na střešních nosičích vozidla a pro jeho uvedení do provozní polohy je třeba využít tažného zařízení vozidla nebo speciálního podstavce. Uvedení zařízení do provozní polohy je tedy vázáno na přítomnost vozidla, přičemž je nutná obsluha alespoň dvou lidí. Zaparkovat vozidlo nesoucí toto zařízení v bezprostřední blízkosti křižovatky však bývá mnohdy omezeno zákonem č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích ve znění pozdějších předpisů [48]. Rovněž pořízení dlouhodobého (vícedenního) záznamu je problematické, protože zařízení v provozní poloze vyžaduje nepřetržitý dohled obsluhy. Vzhledem k výše uvedeným komplikacím nebylo toto zařízení pro získání dat v rámci této práce využito.



*Obr. 6.7: Teleskopický stožár maximální výšky 17 m osazený dálkově ovládanou kamerou s vysokým rozlišením.*

Součástí vybavení Ústavu pozemních komunikací FAST VUT je rovněž lehký teleskopický stožár výšky cca 7 m (viz Obr. 6.8), na jehož vrchol lze umístit drobné záznamové zařízení. Nízká tuhost stožáru ve vysunuté poloze je stejně jako u předchozího zařízení kompenzována třemi kotevními lany. Tento systém se začal výrazněji uplatňovat s pokračující miniaturizací kamer a vzrůstající kvalitou záznamu, které jsou schopny pořizovat. Pro účely sběru dat v rámci této práce byla nakonec použita kamera s rozlišením 5,7K a 360° zorným polem Insta360 ONE X. Jelikož jsou v této práci řešeny okružní

křižovatky, jedině tento systém, díky své jednoduchosti a mobilitě, umožňuje umístění přímo ve středovém ostrově křižovatky a tím zajistí sledování všech prvků křižovatky najednou.



*Obr. 6.8: Teleskopický stožár maximální výšky 7 m osazený kamerou s 360° záběrem a vysokým rozlišením (JOK Brno-Bohunice).*



*Obr. 6.9: Rozvinutý pohled z kamery s 360° záběrem (JOK Břeclav).*

Díky malé vzdálenosti mezi umístěním stožáru a sledovanými vjezdy na okružní pás není zásadní problémem ani menší výška stožáru, protože výsledné zkreslení vlivem perspektivy je stále přijatelné.

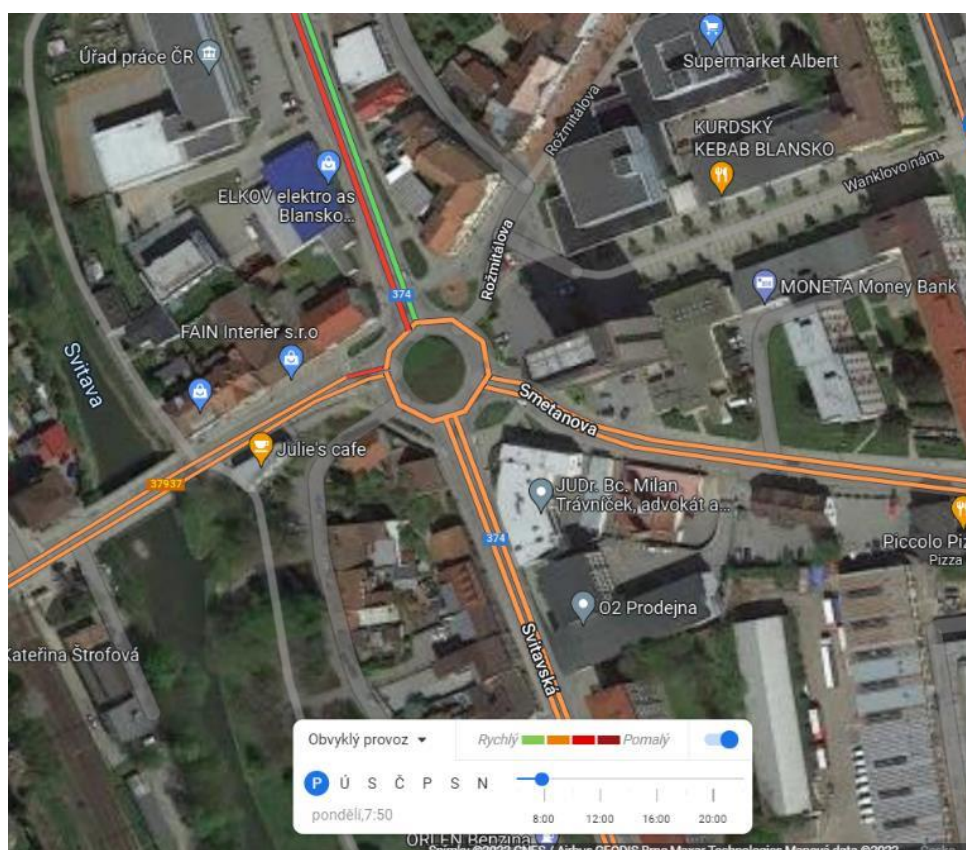


Jedinou nevýhodou těchto zařízení, pomineme-li nemožnost ponechat zařízení pracovat na místě několik dní bez dohledu, je nízká kapacita vestavěné baterie, která omezuje dobu nahrávání na cca 1 hodinu. Tento problém je však možné vyřešit připojením kamery na externí zdroj (powerbanku) a prodloužit tak dobu kontinuálního záznamu na 4–6 hodin. Pak zařízení narazí na další limit, kterým je maximální velikost podporované paměťové karty pro ukládání záznamu.

Zkreslení obrazu záznamu, ke kterému dochází vlivem perspektivy, je třeba před strojovým zpracováním záznamu kompenzovat. K tomu je třeba zaznamenaný obraz georeferencovat. Podrobný postup je popsán v kapitole 6.3.

## 6.2 Výběr lokalit

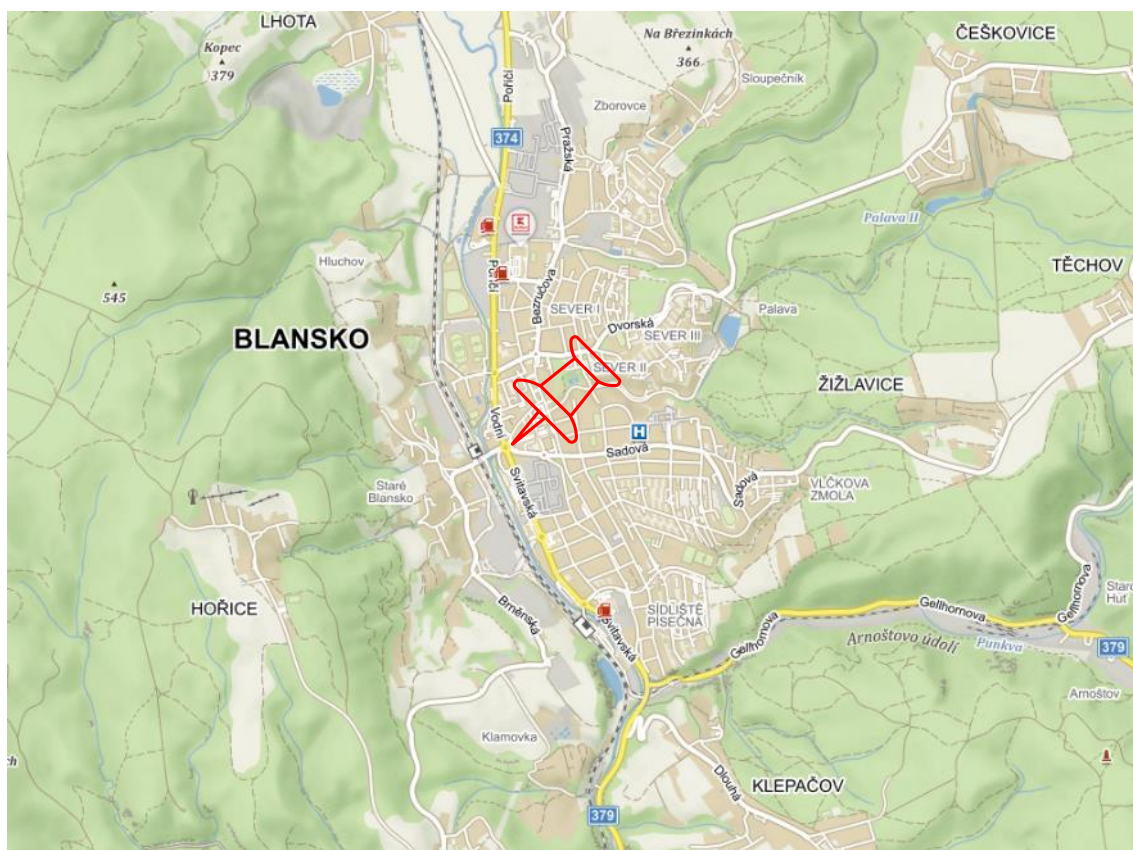
Pro sběr dat byly vybrány zatížené jednopruhové okružní křižovatky (JOK) v Jihomoravském kraji, kde bylo možné předpokládat, že se zde v období dopravních špiček bude alespoň na některých paprscích vyskytovat saturovaný tok vozidel. Pro odhalení období dopravních špiček na vytipovaných křižovatkách byly využity mapy od společnosti Google [49], kde je při zapnutí vrstvy *Provoz* k dispozici funkcionality znázornění obvyklé intenzity provozu s možností zvolit čas a den v týdnu. Zobrazení uživatelského rozhraní je patrné z Obr. 6.10.



Obr. 6.10: Funkcionality „Obvyklý provoz“ na mapovém serveru společnosti Google [49] umožňující lépe identifikovat den a čas dopravních špiček.

## 6.2.1 Blansko

První vybranou lokalitou, na níž se dopravní měření realizovalo již v roce 2016 v rámci projektu juniorského specifického výzkumu č. FAST-J-16-3480 Aktualizace kapacitních výpočtů turbo-okružních křižovatek, je okružní křižovatka silnic II/374 (ul. Vodní a Svitavská), III/37440 (ul. Smetanova), III/37937 (ul. Rožmitálova - západ), ul. Svatopluka Čecha a ul. Rožmitálova – východ v centru města Blanska, viz Obr. 6.11.



Obr. 6.11: Umístění okružní křižovatky v rámci města Blanska [50].

Jedná se o jednopruhovou okružní křižovatku o vnějším průměru cca 38,0 m. Do okružního pásu křižovatky je zaústěno 6 prasků, z toho čtyři jsou dvoupruhové obousměrné (umožňují vjezd i výjezd) a dva jsou jednosměrné jednopruhové (umožňují pouze vjezd). Uspořádání křižovatky a umístění kamery je patrné z leteckého snímku na Obr. 6.12.

Roční průměr denních intenzit (RPDI) na silnici II/374 na průtahu městem (ul. Vodní) v pracovní dny pro všechna motorová vozidla zde dosahuje dle výsledků celostátního sčítání dopravy (CSD 2020) 16 091 voz/den [51]. Ulice Vodní, Smetanova a Rožmitálova – západ jsou dvoupruhové obousměrné komunikace s převážně sběrnou funkcí. Ulice Svatopluka Čecha a Rožmitálova – východ jsou řádově méně zatížené komunikace s funkcí obslužnou umožňující pouze vjezd do sledované křižovatky.

Měření zde bylo provedeno pomocí IP kamery s vysokým rozlišením, která byla dočasně připevněna na speciálně vyrobené konstrukci na střeše výškové budovy v bezprostřední blízkosti křižovatky (viz Obr. 6.5). Kamera zde prováděla kontinuální záznam po dobu 38 dní, během nichž bylo detekováno 71 192 časových světlostí splňujících podmínky saturovaného toku na vjezdu s akceptačním řádem světlosti  $k$  v intervalu 0 až 9 vozidel. V době pořízení videozáznamu se v blízkosti sledované křižovatky na silnici II/374 na průtahu městem ještě nenacházely další okružní křižovatky, které by na tomto tahu snižovaly plynulost dopravy nebo přerušovaly tok dopravního proudu. Díky tomu ke sledované křižovatce vozidla v období dopravních špiček dojížděla zpravidla rychleji, než je byla schopna křižovatka propustit dále a docházelo k vytváření front na nejzatíženějších vjezdech.



Obr. 6.12: Letecký snímek sledované okružní křižovatky v Blansku s vyznačením budovy, na které byla instalována kamera [50].

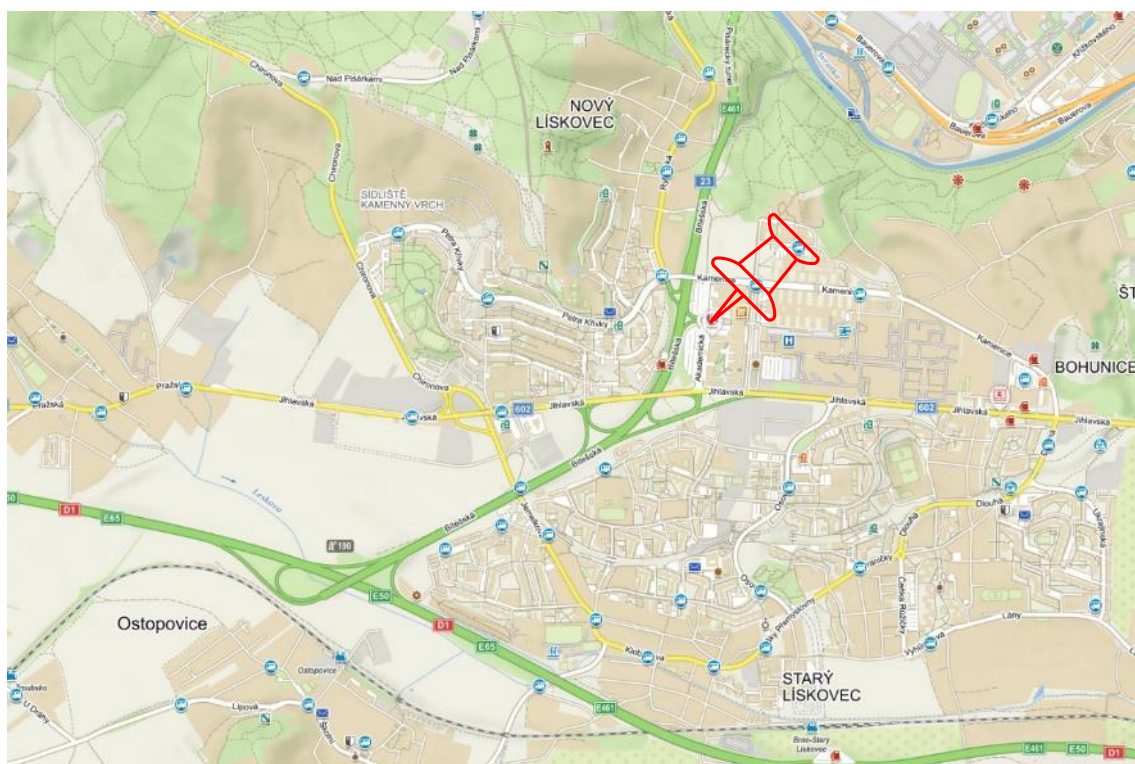
## 6.2.2 Brno-Bohunice

Druhou vybranou lokalitou, na níž se realizoval sběr dat v roce 2022, je jednapruhová okružní křižovatka místních komunikací ul. Akademické, Palachova náměstí a sjezdu a nájezdu na silnici pro motorová vozidla I/23 (ul. Bítešská) viz Obr. 6.13.

Jedná se o jednapruhovou okružní křižovatku o vnějším průměru cca 47,0 m. Do okružního pásu křižovatky jsou zaústěny 4 paprsky, z nichž jsou 2 dvoupruhové obousměrné a 2 jsou čtyřpruhové obousměrné. Tyto čtyřpruhové paprsky ul. Akademické jsou v blízkosti okružního pásu zredukovány

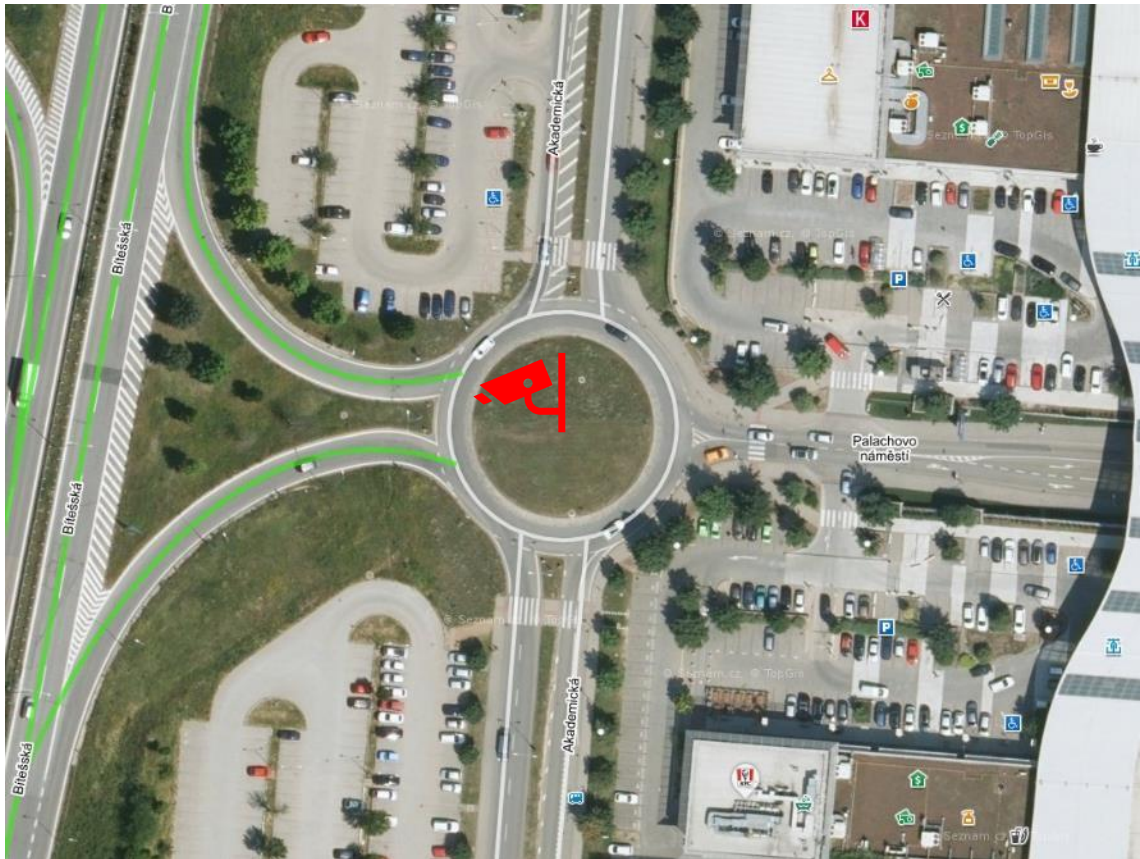
na dvoupruhové, takže křižovatka disponuje na všech paprscích pouze jednopruhovými vjezdy. Uspořádání křižovatky a umístění kamery je patrné z leteckého snímku na Obr. 6.14.

RPDI dosahuje na ul. Akademické v pracovní dny pro všechna motorová vozidla dle sčítání Brněnských komunikací a.s. 11 000 voz/den [52]. Všechny komunikace zapojené do sledované okružní křižovatky lze zařadit do funkční skupiny sběrných komunikací s výjimkou větví ul. Bítešské, která patří do funkční skupiny rychlostních komunikací.



Obr. 6.13: Umístění okružní křižovatky v rámci městské části Brno-Bohunice [50].

Měření zde bylo provedeno pomocí kamery s vysokým rozlišením a 360° záběrem umístěné na mobilním stojanu výšky 7 m uprostřed středového ostrova křižovatky (viz Obr. 6.14). Kamera zde prováděla kontinuální záznam po dobu téměř 5 hodin, během nichž bylo detekováno 1 007 časových světlostí splňujících podmínky saturovaného toku na vjezdu s akceptačním řádem světlosti  $k$  v intervalu 0 až 5 vozidel. V době pořizování záznamu byl provoz na křižovatce navýšen uzavřením paralelní ulice Netroufalky z důvodu výstavby nové tramvajové trati a konečné stanice u Nemocnice Bohunice, což také podpořilo výběr této lokality.



Obr. 6.14: Letecký snímek sledované okružní křižovatky v Brně-Bohunicích s vyznačením polohy kamery ve středovém ostrově [50].

### 6.2.3 Kuřim

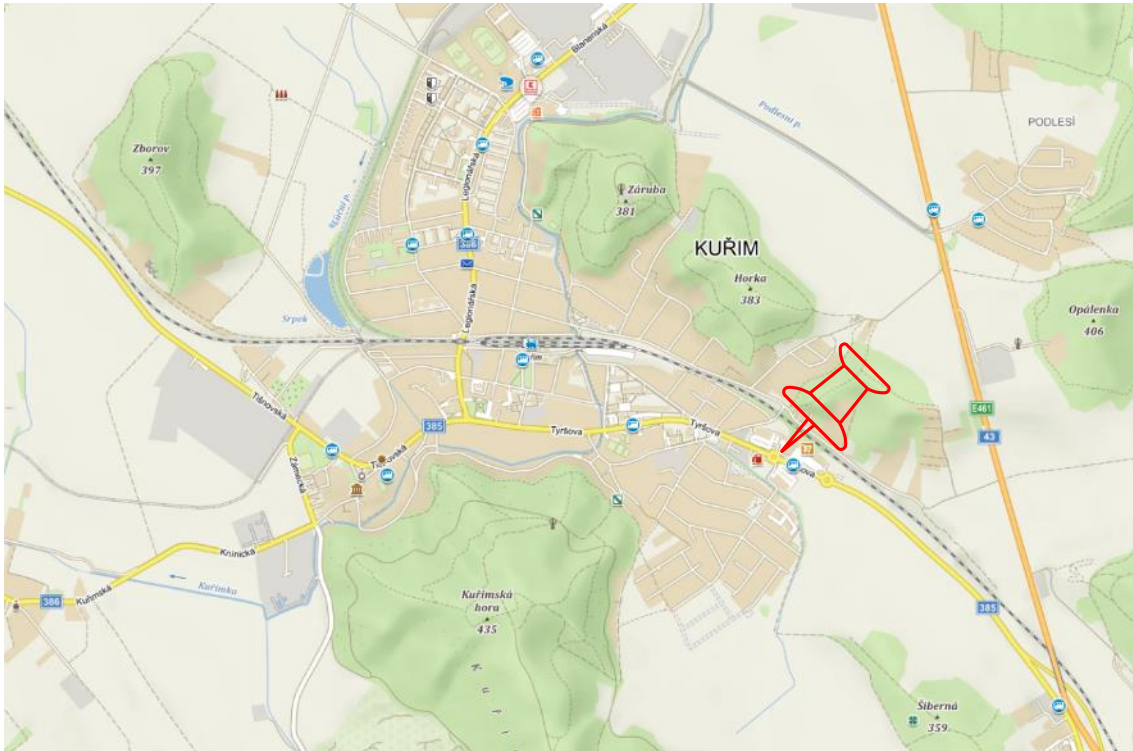
Třetí vybranou lokalitou, na níž se dopravní měření realizovalo ve dvou dnech v roce 2022, je okružní křižovatka ul. Tyršovy (silnice II/385 na průtahu městem Kuřim), místní komunikace ul. Dlouhá, která zároveň připojuje areál obchodního domu LIDL a místní komunikace připojující areál Obchodní galerie Zahrádky a obchodního domu Penny, viz Obr. 6.15.

Jedná se o jednopruhovou okružní křižovatku o vnějším průměru cca 40,0 m. Do okružního pásu křižovatky je zaústěno 5 prasků, z toho 4 jsou dvoupruhové obousměrné a jeden je jednopruhový jednosměrný a tvoří výjezd z čerpací stanice pohonných hmot. Uspořádání křižovatky a umístění kamery je patrné z leteckého snímku na Obr. 6.16.

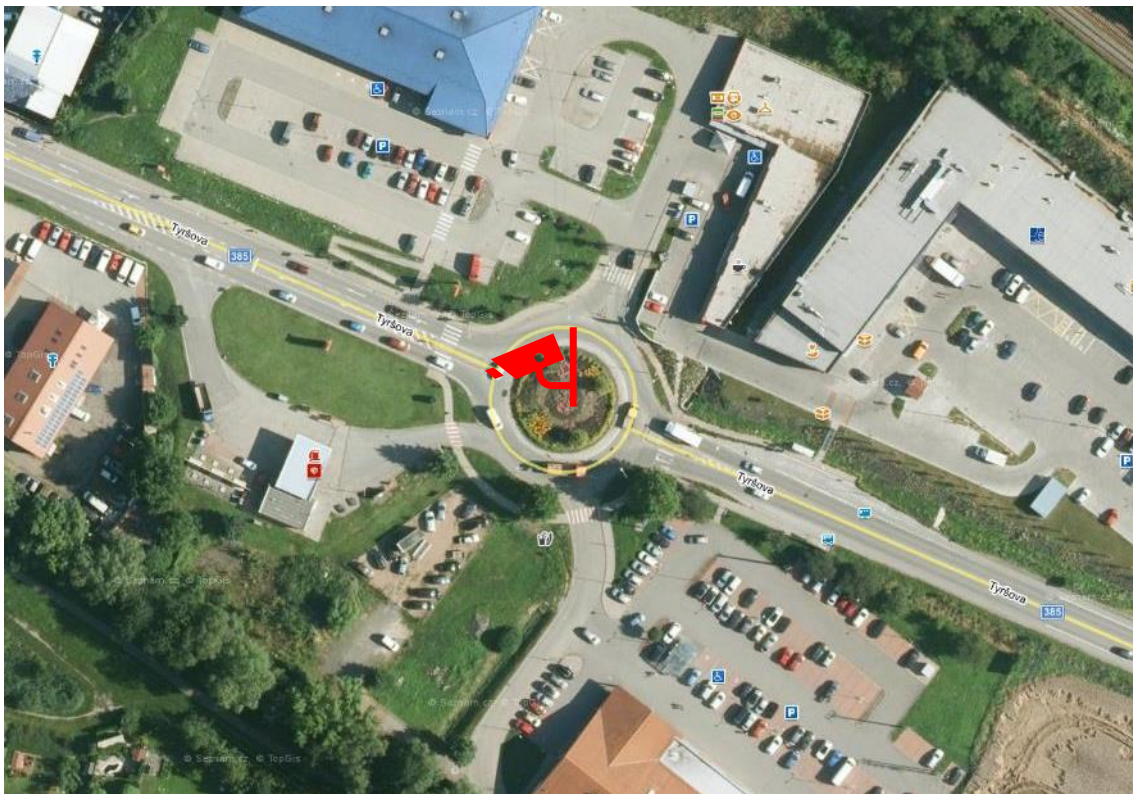
RPDI na silnici II/385 na průtahu městem (ul. Tyršova) dosahuje v pracovní dny pro všechna motorová vozidla dle výsledků celostátního sčítání dopravy (CSD 2020) 18 274 voz/den [51]. Ul. Tyršova plní v dopravní struktuře města funkci sběrnou, ul. Dlouhá a ulice připojující Obchodní galerii Zahrádky a nákupní dům Penny funkci obslužnou.

Měření zde bylo provedeno pomocí kamery s vysokým rozlišením a 360° záběrem umístěné na mobilním stojanu výšky 7 m uprostřed středového ostrova křižovatky (viz Obr. 6.16). Kamera zde prováděla ve dvou dnech kontinuální záznam v celkové délce přes 7 hodin, během nichž bylo

detekováno 1 364 časových světlostí splňujících podmínky saturovaného toku na vjezdu s akceptačním řádem světlosti  $k$  v intervalu 0 až 6 vozidel.



Obr. 6.15: Umístění okružní křižovatky v rámci města Kuřim [50].



Obr. 6.16: Letecký snímek sledované okružní křižovatky v Kuřimi s vyznačením polohy kamery ve středovém ostrově [50].

Silnice II/385 na průtahu Kuřimí je již dlouho známa svým přetížením v období dopravních špiček, což vytváří vhodné podmínky pro sledování saturovaného toku na vjezdech. Zatížení je generováno především každodenním dojížděním obyvatel brněnské metropolitní oblasti za prací do Brna a blízkého okolí.

## 6.2.4 Černá Hora

Čtvrtou vybranou lokalitou, na níž se dopravní měření realizovalo ve dvou dnech v roce 2022, je okružní křižovatka silnice I/43 a silnice II/377 (ul. Trávníky a ul. Svitavská) mezi městysem Černá Hora a obcí Bořitov, viz Obr. 6.17.



Obr. 6.17: Umístění okružní křižovatky mezi obcemi Černá Hora a Bořitov [50].

Jedná se o jednapruhovou okružní křižovatku o vnějším průměru cca 40,0 m. Do okružního pásu křižovatky jsou zaústěny 4 dvoupruhové obousměrné paprsky. Uspořádání křižovatky a umístění kamery ve středovém ostrově je patrné z leteckého snímku na Obr. 6.18.

RPDI na silnici I/43 dosahuje v pracovní dny pro všechna motorová vozidla dle výsledků celostátního sčítání dopravy (CSD 2020) 17 974 voz/den [51]. Na silnici II/377 dosahuje RPDI v pracovní dny pro všechna motorová vozidla hodnoty 7 995 voz/den [51].

Měření zde bylo provedeno pomocí kamery s vysokým rozlišením a 360° záběrem umístěné na mobilním stojanu výšky 7 m uprostřed středového ostrova křižovatky. Kamera zde prováděla ve dvou dnech kontinuální záznam v celkové délce cca 6,5 hodiny, během nichž bylo detekováno 4 568 časových světlostí splňujících podmínky saturovaného toku na vjezdu s akceptačním řádem světlosti  $k$  v intervalu 0 až 6 vozidel. Silnice I/43 tvoří hlavní dopravní tepnu ve směru z Brna na sever a je hojně využívána ke každodennímu dojíždění za prací v rámci regionu i pro tranzitní nákladní dopravu.



Obr. 6.18: Letecký snímek sledované okružní křižovatky v Černé Hoře s vyznačením polohy kamery ve středovém ostrově [50].

## 6.2.5 Břeclav

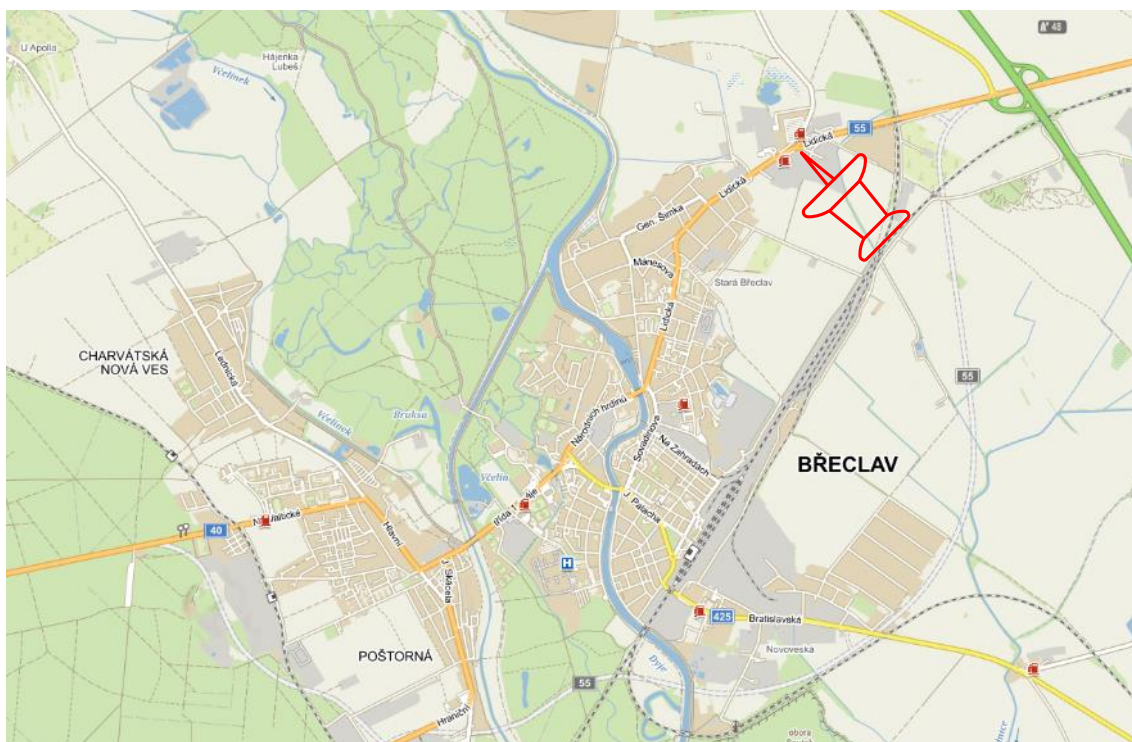
Pátou a poslední vybranou lokalitou, na niž se dopravní měření realizovalo v roce 2022, je okružní křižovatka silnice I/55 (ul. Lidická), silnice III/00221, komunikace napojující areál Obchodního centra Aventin a komunikace napojující areál bývalého zemědělské družstva, viz Obr. 6.19.

Jedná se o jednopruhovou okružní křižovatku o vnějším průměru cca 40,0 m. Do okružního pásu křižovatky je zaústěno 5 dvoupruhových obousměrných paprsků. Uspořádání křižovatky a umístění kamery ve středovém ostrově je patrné z leteckého snímku na Obr. 6.20.

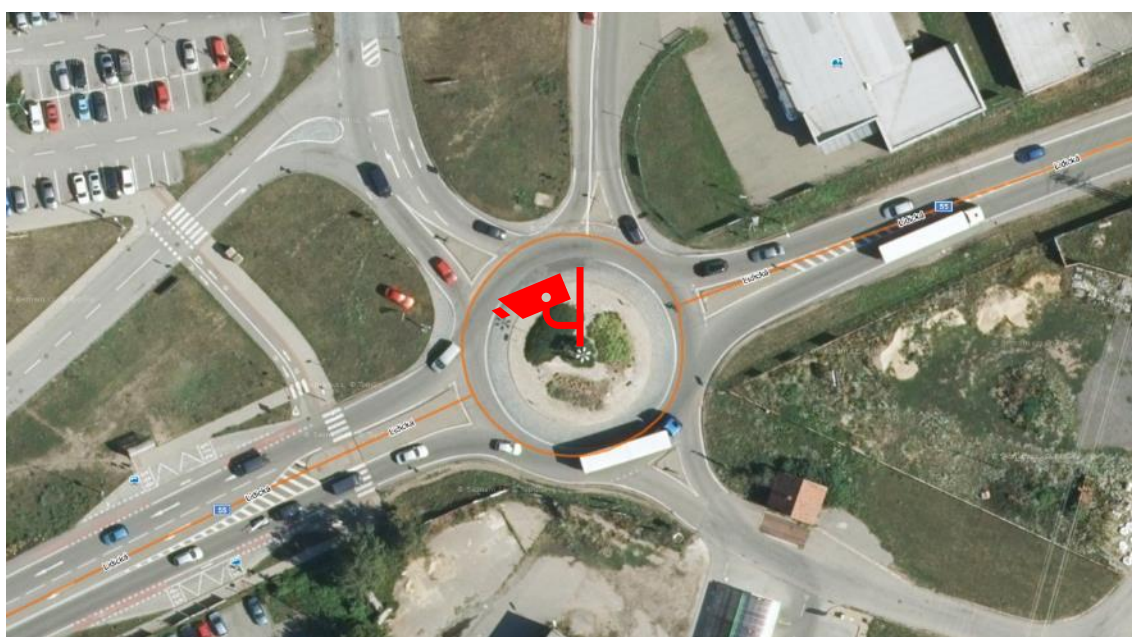
RPDI na silnici I/55 dosahuje v pracovní dny pro všechna motorová vozidla dle výsledků celostátního sčítání dopravy (CSD 2020) 20 864 voz/den [51]. Na silnici III/00221 dosahuje RPDI v pracovní dny pro všechna motorová vozidla hodnoty 4 851 voz/den [51].

Měření zde bylo provedeno pomocí kamery s vysokým rozlišením a 360° záběrem umístěné na mobilním stojanu výšky 7 m uprostřed středového ostrova křižovatky. Kamera prováděla kontinuální záznam v celkové délce cca 3,5 hodiny, během nichž bylo detekováno 1 671 časových světlostí splňujících podmínky saturovaného toku na vjezdu s akceptačním řádem světlosti  $k$  v intervalu 0 až 7 vozidel. Silnice I/55 tvoří hlavní a de facto jediný průtah Břeclavi, který zajišťuje napojení Břeclavi a okolních měst a obcí na dálnici D2. Silnice I/55 je zde dlouhodobě přetížená, což potvrzuje i fakt, že se již mnoho let připravuje výstavba obchvatu města.





Obr. 6.19: Umístění okružní křižovatky v rámci města Břeclav [50].



Obr. 6.20: Letecký snímek sledované okružní křižovatky v Břeclavi s vyznačením polohy kamery ve středovém ostrově [50].

### 6.3 Analýza videozáznamu a získání dat

V oblasti zpracování videozáznamu dopravních proudů pomocí analýzy obrazu, tzv. počítačového vidění, spolupracuje Ústav pozemních komunikací FAST VUT již několik let s firmou RCE systems s.r.o, která mimo jiné vyvinula a úspěšně provozuje mezinárodně používaný detekční software Data From

Sky [53]. Tento software umožňuje pokročilou analýzu, popis a vizualizaci dopravních dat včetně měření charakteristik dopravního proudu v libovolně zvoleném profilu a analýzy trajektorií jednotlivých vozidel. V roce 2019 došlo k rozdělení softwaru na Aerial mode pro záběry z větších výšek (typicky z dronů) a Light mode pro záběry z nižších výšek (typicky dopravních kamer umístěných na portálech nad komunikacemi).

Detailně je popsána problematika zpracování videozáznamů pro účely následné analýzy formou počítačového vidění v [54]. Obecně lze říci, že princip metody analýzy obrazu lze rozdělit do čtyřech kroků:

- Prvním krokem je digitalizace záznamu, která probíhá během snímání. Dochází ke vzorkování bodů, kde je konečným výsledkem získ obrazových ploch, tzv. pixelů. Po vzorkování následuje kvantování, kde dojde k převodu hodnoty jasu obrazové funkce do diskrétního tvaru.
- Druhým krokem je předzpracování. Obraz je během snímání poškozen, například určitým šumem nebo zkreslením. Tento krok má za cíl tyto vlivy odstranit. Hlavními nástroji pro předzpracování jsou jasová transformace, geometrická transformace, filtrace, ostření a matematická morfologie.
- Třetím krokem je segmentace. Tato fáze spočívá ve vyhledávání objektů, které jsou pro výslednou analýzu důležité (v tomto případě jednotlivá vozidla). Pro tyto účely se využívá buď metody hledání objektů pomocí rozdílů nebo pomocí detekce hran.
- Čtvrtým krokem je popis hledaných objektů, aby mohly být zařazeny do jednotlivých tříd. Existuje buď kvantitativní, nebo kvalitativní popis. Prvně zmíněný se zaměřuje na základní číselné charakteristiky jako je velikost, podlouhlost, kompaktnost nebo hodnota jasu. Druhý přístup zkoumá i vztahy mezi vlastnostmi objektů.

V praxi je tento postup zabudován do sofistikovaného software, který pracuje na principu klasifikátorů, jež jsou schopny rozpoznat v obraze předměty, na které jsou nadefinovány. Získání relevantních dat z pořízeného videozáznamu je poměrně dlouhodobý proces, při kterém dochází k „učení“ softwarových modulů zpřesňováním jednotlivých klasifikátorů. Zároveň je vhodné snížit nároky na výpočetní výkon tím, že se v záznamu vymeze vyhodnocované plochy.

Pokud je spolehlivost klasifikátorů dostatečná, následuje fáze trackování, která umožní zjistit trajektorie vozidel v obraze. Vyhodnocovací software umožňuje nastavit na sledované křižovatce vjezdové a výjezdové brány a vytvářet O/D matice křižovatkových pohybů. Díky znalosti optických vlastností kamery a geometrických rozměrů křižovatky je také možné tyto trajektorie transformovat do polohopisných souřadnic.

Polohopisné souřadnice sledovaných okružních křižovatek v Blansku, Břeclavi, Brně, Černé Hoře a Kuřimi byly zjištěny jejich podrobným zaměřením pomocí GPS stanice GNSS-RTK Trimble. Celkem

bylo zaměřeno cca 170 bodů na křižovatce v Blansku, u ostatních křižovatek, které byly sledovány z podstatně menší vzdálenosti, postačilo 40 až 60 bodů. Zaměřovány byly především ty body, které jsou dostatečně kontrastní a byly následně na videozáznamu dobře patrné, typicky vodorovné dopravní značení, výrazné trhliny v krytu vozovky, lomy obrub nebo sloupky dopravního značení. Každý bod byl po změření zanesen do snímku pořízeného z videozáznamu, aby nemohlo dojít k jeho záměně, viz Obr. 6.21 a Obr. 6.22.



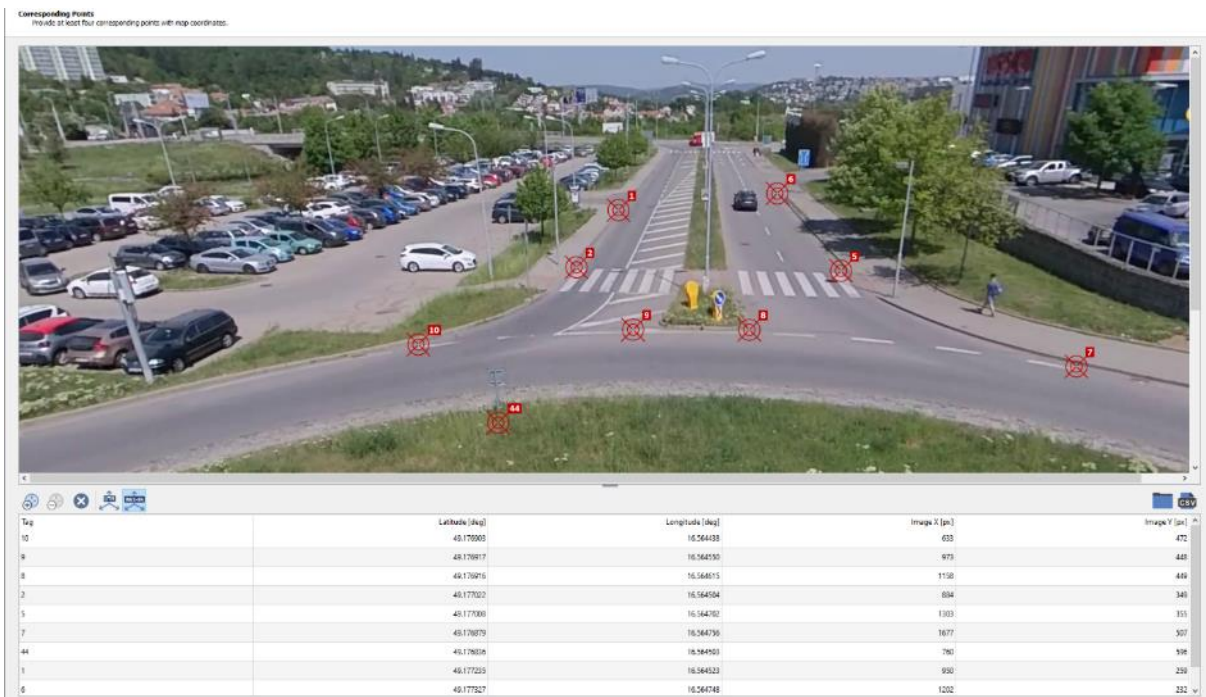
*Obr. 6.21: Zaměření křižovatky pomocí GPS stanice, které umožňuje jednotlivým pixelům záběru přiřadit globální polohopisné souřadnice.*



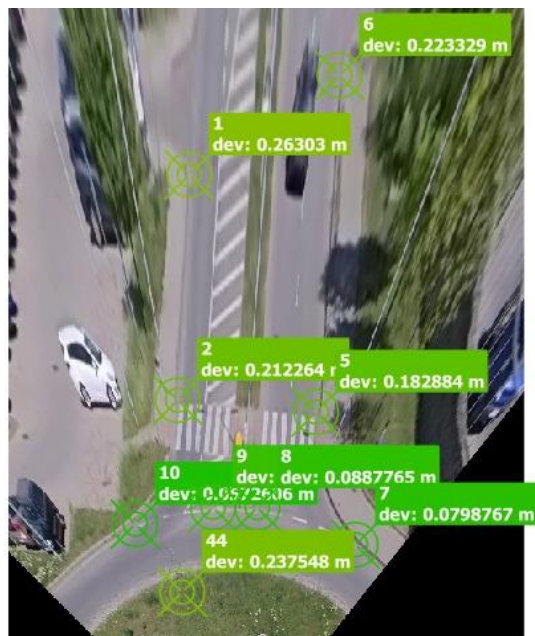
*Obr. 6.22: Zanesení zaměřených bodů do snímku z pořízeného videozáznamu.*

V softwaru Data From Sky následně proběhlo georeferencování zadáním jednotlivých zaměřených bodů do vybraného snímku videozáznamu a zároveň byly k těmto bodům doplněny zaměřené

souřadnice v souřadnicovém systému WGS-84, viz Obr. 6.23. Tím došlo ke spárování pixelových souřadnic snímku videozáznamu a skutečných souřadnic. Na Obr. 6.24 je patrné, jak software následně obraz „zdeformuje“ tak, aby odpovídal zadaným souřadnicím a mohl odměřovat reálné vzdálenosti.



Obr. 6.23: Proces georeferencování videozáznamu v softwaru Data From Sky.



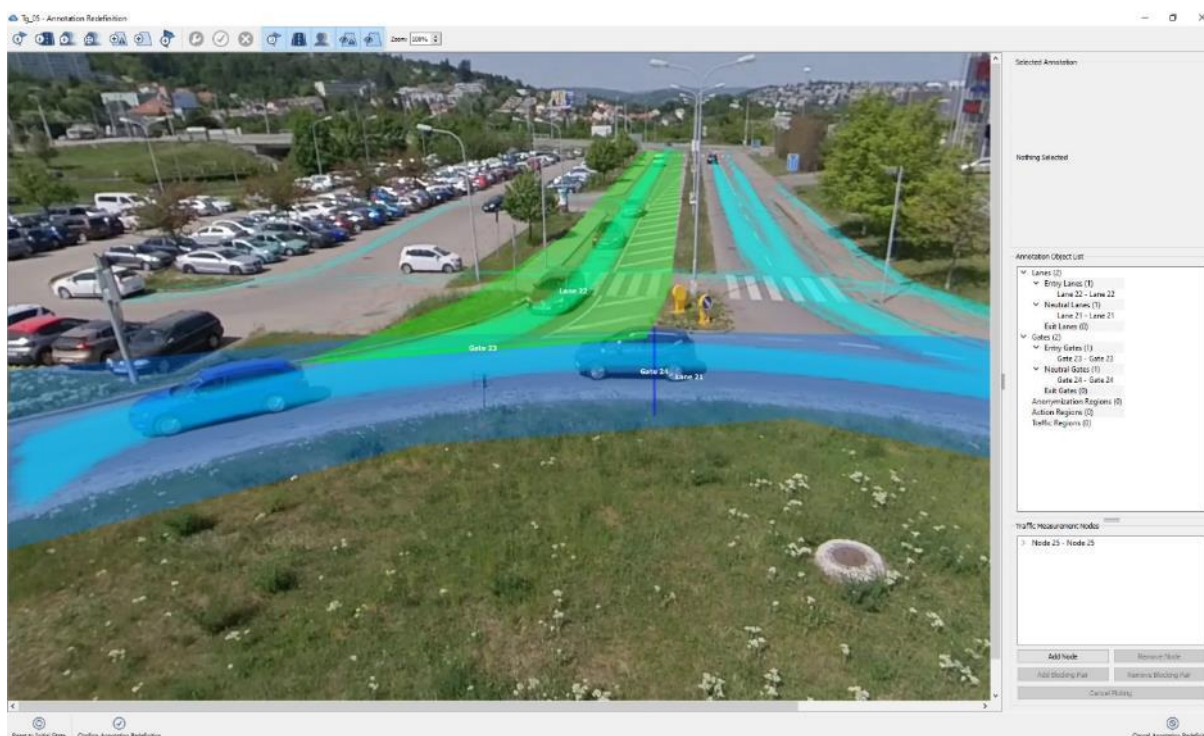
Obr. 6.24: Výsledek georeferencování videozáznamu v softwaru Data From Sky.

Díky navázání georeferencovaného videozáznamu na časovou osu je možné sledovat aktuální rychlost vozidel včetně jejich podélného a příčného zrychlení. Tyto veličiny je možné zobrazit u každého

detekovaného vozidla a tím případně orientačně zkontrolovat, zda proces georeferencování proběhl korektně.



Obr. 6.25: Kontrola hodnot rychlosti a zrychlení vozidel po provedení georeference videozáznamu v softwaru Data From Sky.



Obr. 6.26: Zadání vyhodnocovaných oblastí videozáznamu a průjezdových bran v softwaru Data From Sky.

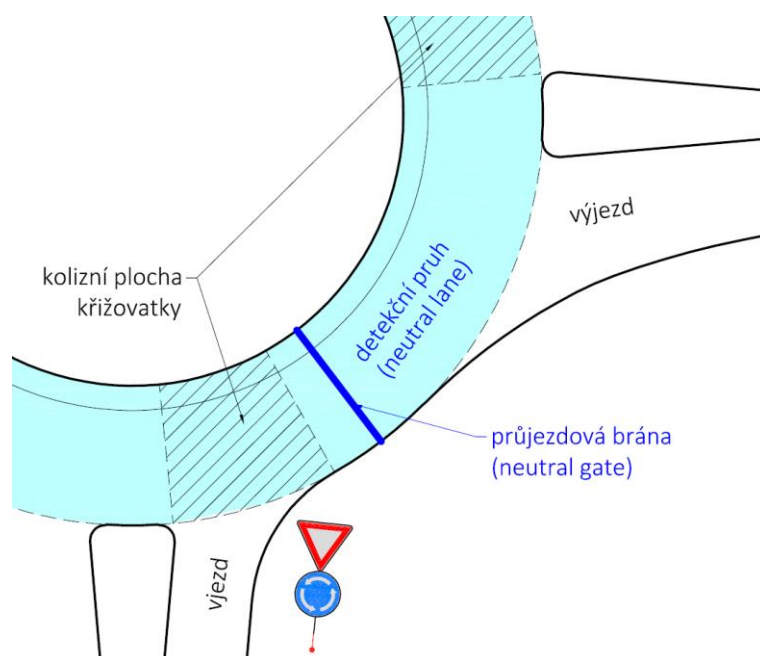
Následujícím krokem při vyhodnocování videozáznamu v softwaru Data From Sky je zadání sledovaných oblastí záznamů „lanes“ a průjezdových bran „gates“. Uživatelské rozhraní pro zadávání těchto pruhů a bran je uvedeno na Obr. 6.26, podrobnější popis a schémata umístění bran pro jednotlivé analýzy jsou uvedeny v následující kapitole 6.4 a na Obr. 6.27 a Obr. 6.28.

Před spuštěním analýzy takto zadaného uzlu za účelem exportu dat s hodnotami kritických a následných časových odstupů je třeba vyplnit rozhodovací tabulku (viz Obr. 6.29), která zajistí, aby byly splněny podmínky pro sběr dat uvedených v kapitole 4.1.1.1 a 5.2. Kromě saturovaného toku na vjezdu jsou tedy zároveň pomocí rozhodovací procedury vyřazeny z exportovaných dat i události zaznamenané v období ovlivnění dopravního proudu na vjezdu přecházejícími chodci nebo ovlivnění nadřazeného dopravního proudu jeho vzduťím na některém z výjezdů, které následně propagovalo i na okružní pás. Konkrétní opatření jsou rovněž popsána v následující kapitole 6.4.

## 6.4 Čištění dat

### 6.4.1 Výskyt časových světlostí

Za účelem vyhodnocení charakteristik dopravního proudu na okružním pásu byla vytvořena v softwaru Data From Sky průjezdová brána „neutral gate“ mezi vjezdem a následujícím výjezdem na okružním pásu, na kterém byl vytvořen detekční pruh „neutral lane“ (viz Obr. 6.27). Následně byly vyexportovány záznamy o průjezdech vozidel touto bránou (včetně délek časových světlostí mezi vozidly). Díky tomu, že má každé detekované vozidlo přiřazeno své unikátní identifikační číslo v rámci vyhodnocovaného záznamu, není problém kterýkoliv záznam průjezdové brány zpětně ve videozáznamu dohledat a zkontrolovat správnost vyhodnocení.



Obr. 6.27: Umístění průjezdové brány na okružním pásu za účelem analýzy časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu.

Vzhledem k tomu, že software Data From Sky je schopen pro každou zadanou průjezdovou bránu rovnou exportovat hodnoty časových světlostí mezi vozidly, která jí projela, bylo v rámci čištění dat přikročeno pouze k vyřazení záznamů, které s nejvyšší pravděpodobností neodpovídaly realitě. Jedná se o takové časové světlosti, jejichž hodnota klesla pod minimální mez, která je ještě považována za bezpečnou, aby bylo možné odvrátit kolizi v případě nenadálého brzdění přechozího vozidla. Za tento čas byla stanovena minimální reakční doba řidiče, který má svůj pohled fixován na brzdová světla přecházejícího vozidla. Dle [55] je tato minimální reakční doba 0,7 s.

Vyexportovaná tabulka se surovými daty obsahuje následující sloupce:

*Gate* – označení průjezdové brány, která vozidlo zaregistrovala

*Track ID* – unikátní identifikační číslo trajektorie vozidla

*Type* – typ zaregistrovaného vozidla

*Colour* – barva zaregistrovaného vozidla

*Licence Plate* – číslo registrační značky vozidla (pro účely této práce nebylo zjišťováno)

*Image ID* – unikátní identifikační číslo snímku videozáznamu

*Time [s]* – čas průjezdu zaregistrovaného vozidla bránou

*Speed [km/h]* – rychlost zaregistrovaného vozidla v okamžiku průjezdu bránou

*Tan. Acc. [ms<sup>-2</sup>]* – podélné zrychlení zaregistrovaného vozidla v okamžiku průjezdu bránou

*Lat. Acc. [ms<sup>-2</sup>]* – příčné zrychlení zaregistrovaného vozidla v okamžiku průjezdu bránou

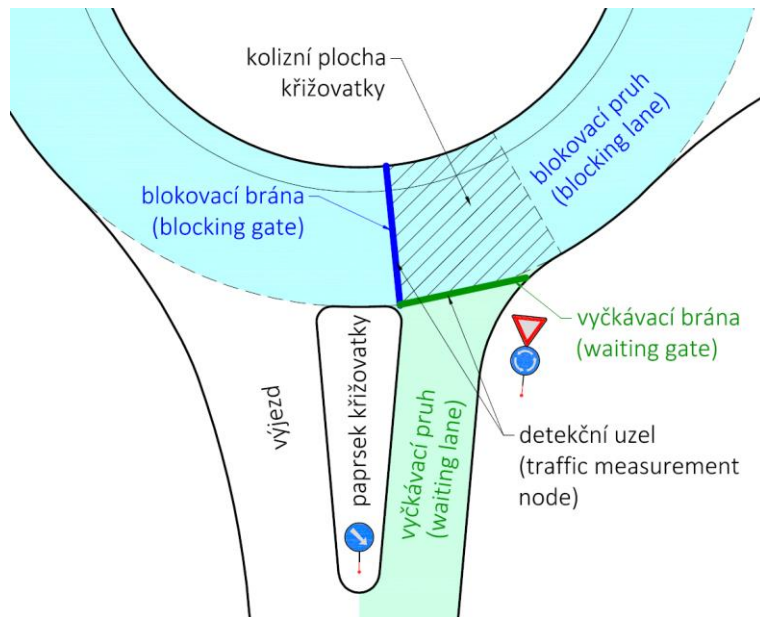
*Headway [s]* – časová světlost mezi následujícími vozidly

*Headway [m]* – vzdálenost mezi zadním nárazníkem vedoucího vozidla a předním nárazníkem následujícího vozidla.

#### **6.4.2 Akceptace časových světlostí**

Pro vyhodnocení akceptace časových světlostí na okružním pásu je třeba vytvořit z příslušného vyčkávacího pruhu „waiting lane“ a vyčkávací brány „waiting gate“ (na Obr. 6.28 vyznačeny zeleně) a tzv. blokovacího pruhu „blocking lane“ a blokovací brány „blocking gate“ (na Obr. 6.28 vyznačeny modře) tzv. detekční uzel neboli „traffic measurement node“. Vyčkávací a blokovací brány jsou umístěny na okraji kolizní plochy křižovatky v místě vjezdu. Při průjezdech vozidel těmito pomyslnými branami jsou registrovány časové světlosti v nadřazeném dopravním proudu na okružním pásu a časové odstupy vozidel podřazeného dopravního proudu.

Při analýze akceptace časových světlostí bylo čištění dat zajištěno rozhodovací tabulkou uvedenou na Obr. 6.29. Hodnoty jednotlivých parametrů vyplývají buď přímo z podmínek popisujících sběr dat za saturovaných podmínek, nebo byly stanoveny na základě opakovaného porovnávání nastavení tabulky, exportovaných dat a reality na krátkém úseku záznamu.



Obr. 6.28: Konfigurace detekčního uzlu za účelem analýzy akceptace časových světlostí.

DataFromSky Viewer	
Still speed threshold [km/h]:	3.60
Still time length threshold [s]:	1.00
Vehicle crossroad join max distance [m]:	15.00
Vehicle crossroad join max time [s]:	5.00
Min time between same node blocking [s]:	2.00
Assume only successful trajectories	<input type="checkbox"/>
Leading edge as reference	<input checked="" type="checkbox"/>
Max Tg time absolute [s]:	60.00
Max Tg time per vehicle [s]:	30.00
Max Tf time [s]:	30.00
Min number of left waiting vehicles	1
Max left waiting time diff [s]:	0.00
Min number of entered vehicles	0
Max reaction time [s]:	3.00
Min reaction speed [km/h]:	-3.60
Min reaction acceleration [ms <sup>-2</sup> ]:	-2.00
Reaction time must be known	<input type="checkbox"/>
Min blocking vehicle speed [km/h]:	5.00
Blocking vehicle speed time range [s]:	2.00
Max first waiting distance from gate [m]:	5.00
Reset to Defaults	
Export Cancel	

Obr. 6.29: Rozhodovací tabulka ovlivňující parametry exportovaných dat při analýze kritických a následných časových odstupů v softwaru Data From Sky.

V následujícím textu budou popsány významy kritérií rozhodovací tabulky důležitých pro splnění podmínek saturovaného toku u exportovaných dat:



*Still speed threshold* [km/h] – vozidla pohybující se pod stanovenou rychlostní hranicí jsou považována za stojící. Referenční bod vozidla se v průběhu času po vozidle mírně pohybuje, proto i u evidentně stojícího vozidla může software indikovat velmi nízkou rychlost pohybu.

*Still time length threshold* [s] – vozidlo musí před vjezdem na okružní pás stát alespoň po stanovenou dobu, aby byla splněna podmínka zastavení před vjezdem na okružní pás.

*Min time between same node blocking* [s] – minimální čas mezi vytvořením záznamu na blokovací bráně příslušného uzlu tím samým vozidlem. Tato situace může nastat z výše uvedeného důvodu pohybu referenčního bodu vozidla a způsobit tak několik blokovacích událostí ve velmi krátkém čase za sebou, což by zkreslilo výsledná data.

*Leading edge as reference* – při zaškrtnutí této položky bude software uvažovat jako rozhodný bod vozidla při průjezdu bránami střed jeho přídě. Pokud ne, bude používán referenční bod, který se nachází přibližně ve středu siluety vozidla.

*Max Tg time absolute* [s] – pokud je zaznamenaná hodnota kritické časové světlosti větší než zvolená hodnota, má se za to, že se jedná o chybu měření, případně nestandardní událost na křižovatce a hodnota je z registru vyřazena.

*Max Tg time per vehicle* [s] – pokud je zaznamenaná délka kritické časové světlosti přepočtená na jedno vozidlo, které mezeru využilo, větší než zadaná hodnota, má se za to, že se jedná o chybu měření, případně nestandardní událost na křižovatce, a hodnota je z registru vyřazena.

*Min number of left waiting vehicles* – zadaná hodnota udává minimální počet vozidel, která musí zůstat čekat ve vyčkávacím pruhu na vjezdu, aby mohla být blokovací událost uložena do registru. Zajištění saturovaných podmínek vyžaduje, aby na vjezdu vždy zůstalo stát alespoň jedno vozidlo.

*Min number of entered vehicles* – pro kompletní analýzu kritických časových odstupů je třeba evidovat i ty blokovací události, kdy nedošlo k využití mezery žádným vozidlem. Proto zde musí být zadána nula.

*Max reaction time* [s] – je maximální časový interval mezi uvedením do pohybu předcházejícího vyčkávajícího vozidlo a následujícího vozidla ve vyčkávacím pruhu na vjezdu. Pokud následující vozidlo nezareaguje v tomto časovém intervalu, má se za to, že řidič je buď nepozorný, nebo stojí před přechodem a pouští chodce. Takové měření by pro danou světlost v nadřazeném dopravním proudu zkreslilo akceptační řád  $k$ , a proto musí být z registru vyřazeno.

*Min blocking vehicle speed* [km/h] – minimální rychlost blokujícího vozidla v nadřazeném dopravním proudu. Tato podmínka má za úkol vyřadit z registru takové blokovací události, kdy by došlo ke vzdutí nadřazeného dopravního proudu, což se projeví výrazným snížením jeho rychlosti nebo úplným zastavením. V takovém případě by měření kritických světlostí bylo zkreslené, protože by záleželo čistě na tom, zda některý řidič na okružním pásu pustí čekající vozidlo na vjezdu.

*Blocking vehicle speed time range* [s] – je časový úsek před projetím vozidla nadřazeného dopravního proudu blokovací bránou a zahájení blokovací události, kde je sledována rychlost tohoto vozidla. Pokud

se v celém tomto časovém úseku rychlost blokovacího vozidla pohybuje pod hranicí hodnoty *Min blocking vehicle speed*, má se za to, že se nejedná o náhodný výkyv nebo chybu měření, ale došlo opravdu ke vzduť nadřazeného dopravního proudu.

*Max first waiting distance from gate* [m] – definuje maximální vzdálenost prvního vyčkávajícího vozidla na vyčkávacím pruhu před vyčkávací bránou. Toto kritérium má za cíl eliminovat z registru události, kdy vozidlo čeká před přechodem pro chodce a pouští chodce, přičemž se tedy nemůže zařadit do nadřazeného dopravního proudu, byť velikost světlostí by to případně umožňovala. Tím by došlo ke zkreslení naměřených dat.

Vyexportovaná tabulka se surovými daty obsahuje následující sloupce:

*Unique Event ID* – unikátní identifikační číslo blokovací události

*Measurement Node ID* – unikátní identifikační číslo blokovacího uzlu, kde blokovací událost nastala

*Waiting Gate ID* – unikátní identifikační číslo vyčkávací brány

*Video Position of First Blocking* [ms] – čas videozáznamu v okamžiku průjezdu vozidla nadřazeného dopravního proudu blokovací bránou

*First Blocking Vehicle ID* – unikátní identifikační číslo prvního blokujícího vozidla, které zahájilo zaregistrovanou časovou světlost

*Second Blocking Vehicle ID* – unikátní identifikační číslo druhého blokujícího vozidla, které ukončilo zaregistrovanou časovou světlost

*Number of Waiting Vehicles* – počet vyčkávajících vozidel podřazeného dopravního proudu v době zahájení blokovací události

*First Waiting Vehicle ID* – unikátní identifikační číslo prvního vyčkávajícího vozidla na vjezdu v okamžiku zahájení blokovací události

*Tg Value* [ms] – hodnota kritické časové světlosti

*Number of Left Waiting Vehicles* – počet vozidel, která bezprostředně po ukončení blokovací události zůstala stát na vjezdu

*First Left Waiting Vehicle ID* – unikátní identifikační číslo vozidla, které zůstalo po ukončení blokovací události stát na vjezdu jako první v řadě

*Entered Vehicles Count* – počet vozidel, která využila zaregistrovanou časovou světlost

Následující 4 sloupce se pak periodicky opakují pro každé vozidlo  $k > 1$ , které využilo zaregistrovanou časovou světlost.

(If Entered Vehicles Count > 1: list(*Tf Value* [ms] – hodnota následného časového odstupu

*Reaction Time* [ms] – reakční čas následujícího vozidla

*Following Entered Vehicle ID* – unikátní identifikační číslo následujícího vozidla

*Video Position of Following Vehicle Entry* [ms] – čas videozáznamu v okamžiku průjezdu následujícího vozidla vyčkávací bránou

## 6.5 Fitovací procedura

Na úvod této podkapitoly je třeba vysvětlit rozdíl mezi diskretní a spojitou náhodnou veličinou. Diskretní náhodné veličiny nabývají v rámci svého oboru hodnot různých izolovaných hodnot. Jako příklad je možné uvést hod hrací kostkou, kde je oborem hodnot množina přirozených čísel  $\mathbb{N}$  v intervalu 1 až 6. Výskyt náhodného diskretního jevu lze popsat pomocí pravděpodobnostní funkce  $p(x)$ . Naproti tomu spojitě náhodné veličiny mohou v rámci svého oboru hodnot nabývat jakýchkoliv hodnot, avšak nemá smysl v tomto případě stanovovat pravděpodobnost výskytu jednoho diskretního jevu jako u diskretní náhodné veličiny. V takovém případě by totiž byla pravděpodobnost vždy tak malá, že ji považujeme za nulovou. Rozdělovací funkce je totiž u spojitě náhodné veličiny definována hustotou pravděpodobnosti  $f(x)$ . Pravděpodobnost výskytu náhodného jevu v případě náhodné spojitě veličiny je definována jako plocha obrazce ohraničeného osou  $x$  a grafem hustoty  $f$ . Obsah tohoto obrazce je pak roven jedné. Pokud některá funkce tento základní předpoklad nesplňuje, je třeba ji nejdříve normalizovat. Zkoumáme-li nějaký spojitý náhodný jev, musí být zadán formou intervalu, který bude tvořit meze integrálu. Jako příklad lze uvést hledání pravděpodobnosti s jakou se v nadřazeném dopravním proudu vyskytne světlost velikosti 1,0 – 2,0 s. Z výše uvedeného popisu je zřejmé, že se v případě analýzy časových světlostí bude jednat o spojitou náhodnou veličinu.

### 6.5.1 Empirická hustota pravděpodobnosti $h(x)$

Za účelem zjištění lokálních charakteristik nadřazeného dopravního proudu byl každý vzorek dat (seřazený podle času) rozdělen v souladu s praxí vědecké disciplíny Vehicular Headway Modelling (VHM) a postupem popsaným v kapitole 5.1.1 na skupiny o stejném počtu vozidel. Zvoleny byly opět skupiny po 50 vozidlech, pro které byly následně spočítány základní charakteristiky dopravního proudu. Rychlost detekovaných vozidel byla známa z vyexportovaných surových dat, došlo tedy pouze k výpočtu průměrné rychlosti  $\bar{v}_m$ . Intenzita dopravy pro zvolenou skupinu byla spočítána podle vzorce

$$J_m = \frac{m}{\frac{(t_m - t_1)}{3600}}, \quad (6-1)$$

kde je

- $m$  počet vozidel ve skupině, pro účely této práce  $m = 50$  vozidel,
- $t_1$  relativní čas průjezdu prvního vozidla skupiny průjezdovou bránou [s],
- $t_m$  relativní čas průjezdu  $m$ -tého vozidla průjezdovou bránou [s].

Hustota dopravy pro každou skupinu vozidel byla spočítána podle vzorce

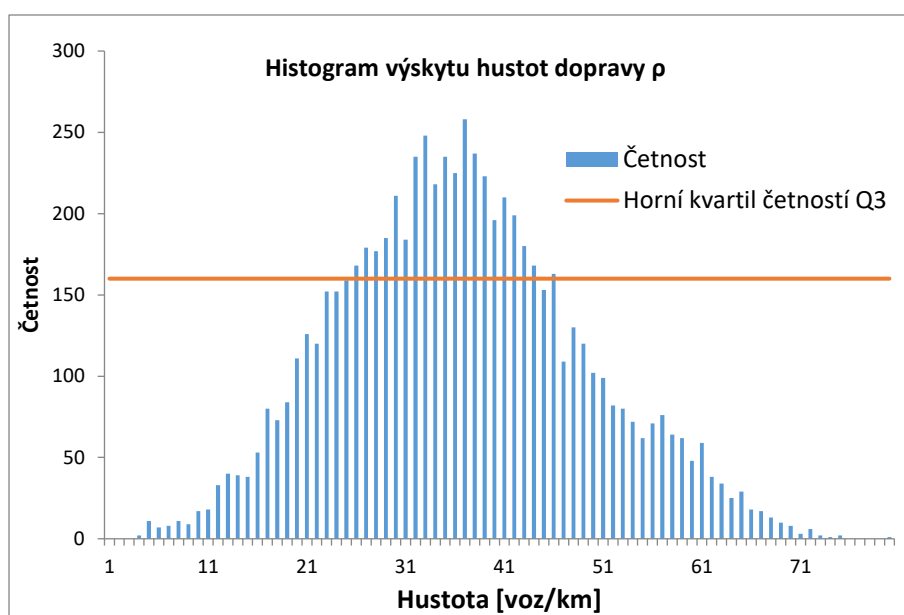
$$\rho_m = \frac{J_m}{\bar{v}_m}, \quad (6-2)$$

kde je

$\bar{v}_m$  průměrná rychlost  $m$  - tice vozidel [km/h],

$J_m$  intenzita dopravy spočítaná pro  $m$  - tici vozidel [voz/hod].

Dalším krokem v rámci přípravy empirických dat bylo jejich škálování na střední hodnotu 1. Empirická data totiž byla v dalším kroku aproximována různými teoretickými hustotami pravděpodobnosti, které je možné vzájemně srovnávat pouze v případě, že jsou všechny křivky škálovány na stejnou střední hodnotu. Aproximace časových světlostí na okružním pásu pak probíhala v úzkých hustotních pásmech, což vychází opět z poznatků vědecké disciplíny VHM. K dalšímu zpracování byla vybrána jen ta hustotní pásma, která byla ve vzorku nejvíce zastoupena. Jako kritérium pro výběr takových pásem byla použita hranice horního kvartilu  $Q_3$ , která zajistí, že pro další analýzy bude vybráno pouze 25 % nejvíce zastoupených hustotních pásem. Graficky je selekce znázorněna na Obr. 6.30.



Obr. 6.30: Grafické znázornění horního kvartilu  $Q_3$  v histogramu četnosti dat v jednotlivých hustotních pásmech.

Pro vybraná hustotní pásma byl na všech zkoumaných lokalitách vytvořen histogram škálovaných světlostí  $s$  (viz Obr. 6.31), kde byl krok třídy zvolen 0,1 v intervalu 0,0 – 5,0. Jelikož jsou časové světlosti škálované, nelze již hovořit o čase ve vteřinách. Každá třída byla na ose  $x$  označena středem svého intervalu.



Obr. 6.31: Histogram výskytu časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu v hustotním pásmu 25 – 30 voz/km.

Pro každou třídu škálovaných světlostí  $s$  byla zjištěna četnost výskytu v rámci analyzovaného vzorku a z těchto četností byla vypočtena empirická normalizovaná hustota pravděpodobnosti pomocí vzorce (6-3).

$$h(i) = \frac{c_i}{\sum_0^n c_i} \cdot \omega_i, \quad (6-3)$$

kde je

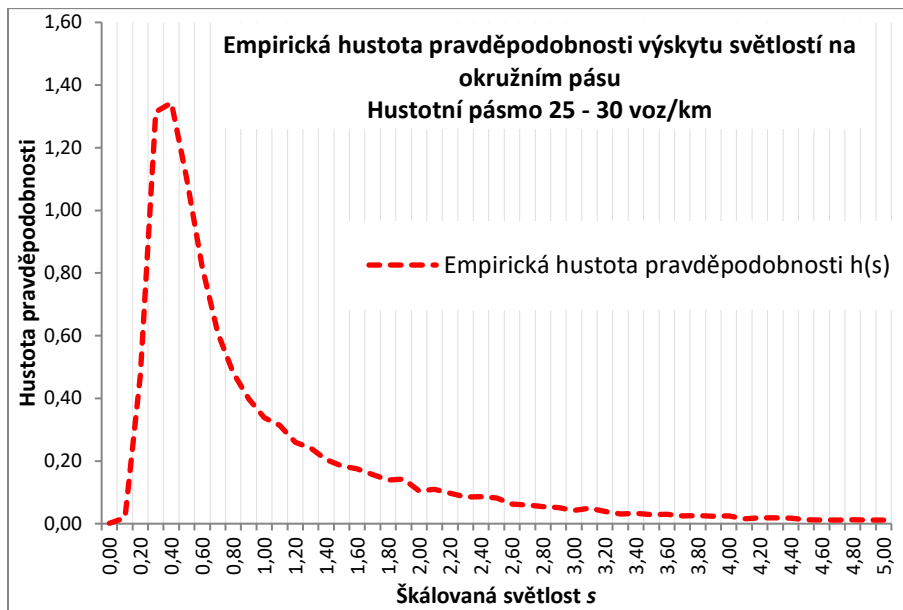
$h(i)$  empirická hustota pravděpodobnosti v daném intervalu (třídě)  $i$

$c_i$  četnost výskytu světlostí v daném intervalu (třídě)  $i$

$\omega_i$  velikost intervalu (třídy)  $i$ , pro účely této práce bylo zvoleno  $\omega = 0,1$

$n$  horní mez zkoumaných škálovaných časových světlostí, pro účely této práce  $n = 5,0$

Na takto připravené hodnoty empirické hustoty pravděpodobnosti výskytu škálovaných časových světlostí na okružním pásu  $h(s)$  (viz Obr. 6.32) byly v dalším kroku fitovány vybrané funkce reprezentující teoretické hustoty pravděpodobnosti  $g(x)$ , respektive jejich škálované verze  $g(s)$ .



Obr. 6.32: Empirická hustota pravděpodobnosti výskytu časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu v hustotním pásmu 25 – 30 voz/km.

### 6.5.2 Teoretická hustota pravděpodobnosti $g(x)$

V kapitole 5.1.2 byly popsány nedostatky aktuálně používaného Sieglochova přístupu k výpočtu kapacity neřízených křižovatek. Jedním z těchto nedostatků bylo použití exponenciálního rozdělení pravděpodobnosti výskytu mezer v nadřazeném dopravním proudu. Toto rozdělení by bylo relevantní pouze v případě, že by hustota dopravy byla tak malá, že by se jednotlivá vozidla vzájemně neovlivňovala, prakticky tedy maximálně do cca 4 vozidel na kilometr. Tento předpoklad však v reálném provozu zjevně není splněn, zvláště ne v případech, kdy potřebujeme posuzovat kapacitu křižovatek. Na základě poznatků z [12], [15] a [56] bude pro aproximaci použito jednoparametrické Gamma rozdělení a dvouparametrické zobecněné inverzní Gaussovo rozdělení (GIG), která jsou jednak v mikroskopickém modelování dopravy běžně používána a jednak odpovídají logaritmickému potenciálu termodynamického plynu, který lze dle [8] vnímat jako analogii k dopravnímu proudu vozidel. Kritéria pro přípustnost funkcí uvedená v kapitole 5 však beze zbytku splňuje pouze rozdělení GIG. Do grafů bude doplněno pro srovnání a lepší představu o vzájemném průběhu funkcí i aktuálně používané exponenciální rozdělení. V následujících podkapitolách 6.5.2.1, 6.5.2.2 a 6.5.2.3 bude pro tři vybraná rozdělení uveden jak obecný, tak i škálovaný a normalizovaný tvar, který je nezbytný pro následné srovnání jednotlivých rozdělení. Jelikož pracujeme se škálovaným časovým odstupem  $s$ , který neodpovídá reálnému časovému odstupu v nadřazeném dopravním proudu, bude v následujících vzorcích nahrazeno běžné označení proměnné  $x$  písmenem  $s$ .

### 6.5.2.1 Exponenciální rozdělení

Exponenciální rozdělení [15] je využíváné v mnoha modelech kvůli své jednoduchosti, avšak odpovídá pouze velice specifickým reálným případům. Korespondující částicový systém se nazývá Poissonův a odpovídá dopravním tokům pouze při velice nízkých hustotách provozu, kdy jsou řidiči od sebe natolik vzdáleni, že k jejich interakci nedochází. Obecný předpis exponenciálního rozdělení je roven

$$g(x) = \theta(x)Ae^{-\lambda x}, \quad (6-4)$$

kde parametr  $\lambda > 0$  se nazývá koncentrací.  $A$  je normalizační konstanta a  $\theta(x)$  je Heavisideova funkce definovaná rovnicí (4-3). Od rozdělení bude vyžadováno, aby šlo o normovanou hustotu pravděpodobnosti, která má jednotkový nultý moment  $\mu_0 = 1$ . Dále bude požadováno, aby hustota byla škálovaná, tedy aby její střední hodnota, neboli první moment, byla též rovna jedné. Normalizací je získáno vyjádření normalizační konstanty

$$A^{-1}(\lambda) = \int_0^{+\infty} e^{-\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda}, \quad (6-5)$$

Pro  $n$ -tý moment exponenciálního rozdělení platí  $\mu_n = \frac{n!}{\lambda^n}$ . Jak bylo uvedeno výše, první moment musí být roven jedné a v tom případě lze získat škálovací podmínku pro koncentraci  $\lambda = 1$ . Výslednou exponenciální škálovanou hustotu pravděpodobnosti je pak možné zapsat jako

$$g(s) = \theta(s)e^{-s}. \quad (6-6)$$

Jelikož byl v rámci škálování a normalizace funkce odstraněn jediný parametr  $\lambda$ , nebude na exponenciální funkci aplikován fitovací proces a její průběh bude záviset pouze na hodnotě škálované časové světlosti  $s$ .

### 6.5.2.2 Gamma rozdělení

Obecný tvar Gamma rozdělení [15] je možné zapsat jako

$$g(x) = \theta(x)Ax^\alpha e^{-\lambda x}, \quad (6-7)$$

kde  $A$  je normalizační konstanta,  $\lambda > 0$  je koncentrace a  $\alpha > -1$  je tenze. Toto rozdělení lze získat pokud je v termodynamickém dopravním plynu uvažován logaritmický potenciál s nenulovou stochastickou rezistivitou  $\gamma$ . Toto rozdělení odpovídá vyšším hustotám provozu, avšak stále nesplňuje veškeré podmínky, které jsou kladeny na rozdělení odpovídající časovým světlostem, například požadavek na platů v blízkosti nuly. Normování funkce je provedeno pomocí normalizační konstanty  $A = A(\alpha, \lambda)$  ve tvaru

$$A^{-1}(\alpha, \lambda) = \int_0^{+\infty} x^\alpha e^{-\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda^{\alpha+1}} \Gamma(\alpha + 1), \quad (6-8)$$

Stejně jako v předchozím případě je nutné, aby hustota pravděpodobnosti byla nejen normovaná, ale i škálovaná, tedy aby její střední hodnota byla rovna jedné. Při této operaci je získán vztah

pro koncentraci  $\lambda = \lambda(\alpha)$  ve tvaru  $\lambda = \alpha + 1$ . Výslednou hustotu Gamma rozdělení je pak možné zapsat jako

$$g(s) = \theta(s) \frac{(\alpha + 1)^{\alpha+1}}{\Gamma(\alpha + 1)} s^\alpha e^{-(\alpha+1)s}, \quad (6-9)$$

kde je již jediným volitelným parametrem tenze, která odpovídá stochastické rezistivitě termodynamického plynu. Právě parametr  $\alpha$  bude u rozdělení Gamma vstupovat do fitovacího procesu.

### 6.5.2.3 Zobecněné Gaussovo inverzní rozdělení

Poslední rozdělení, které bude použito při aproximaci empirických dat, je zobecněné Gaussovo inverzní rozdělení (GIG). Obecný tvar rozdělení je možné zapsat jako

$$g(x) = \theta(x) A x^\alpha e^{-\frac{\beta}{x}} e^{-\lambda x}, \quad (6-10)$$

kde  $\alpha \in \mathbb{R}$  je tenze,  $\beta > 0$  je intenzita,  $\lambda > 0$  je koncentrace a  $A$  je opět normalizační konstanta.

Normované a škálované rozdělení hustoty pravděpodobnosti je definováno upravenou rovnicí

$$g(s) = \theta(s) A s^\alpha e^{-\frac{\beta}{s}} e^{-\lambda s}, \quad (6-11)$$

kde je získán škálovací vztah pro koncentraci  $\lambda = \lambda(\alpha, \beta)$  ve tvaru

$$\lambda = \alpha + \beta + \frac{3 + e^{-\sqrt{\frac{4(\alpha+\beta+2)}{6-\alpha}}}}{2} \quad (6-12)$$

a normalizační konstanta je definována následovně

$$A^{-1} = 2 \left( \frac{\beta}{\lambda} \right)^{\frac{\alpha+1}{2}} \kappa_{\alpha+1}(2\sqrt{\beta\lambda}). \quad (6-13)$$

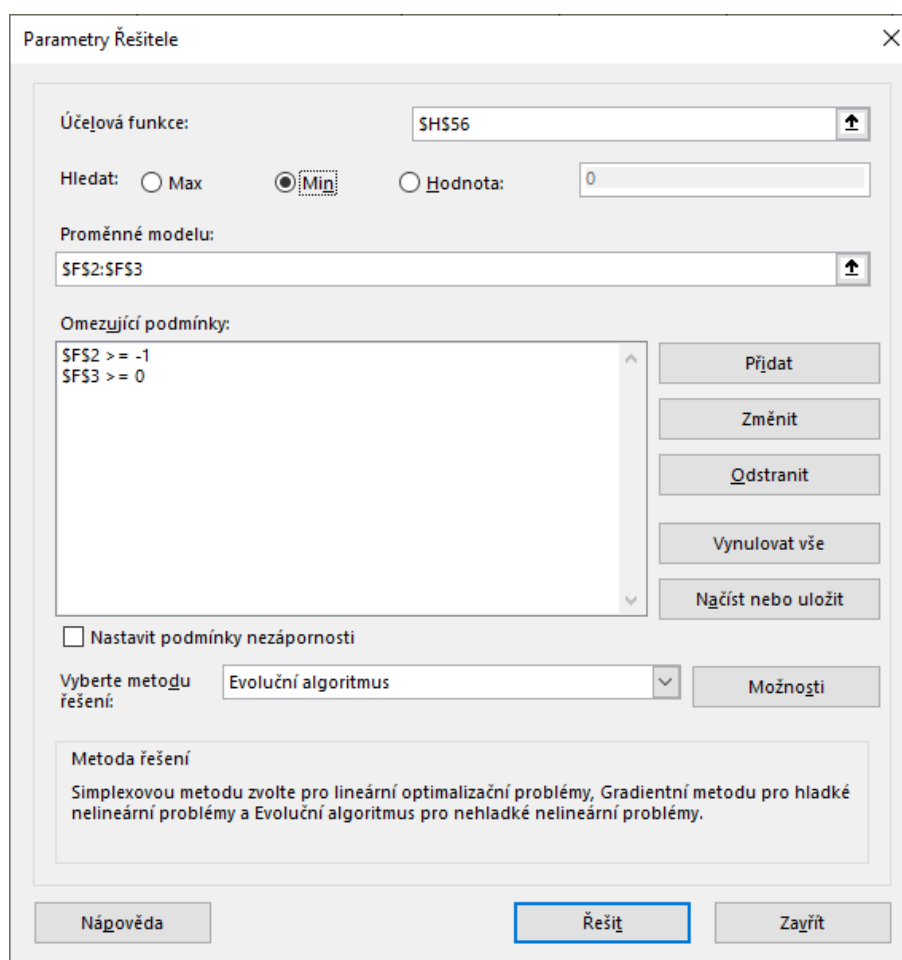
$\kappa_\alpha$  je Macdonaldova funkce řádu  $\alpha$ , která je rovněž známa jako Besselova funkce 2. druhu. Člen  $e^{-\beta/s}$  řídí funkci v oblastech  $s \rightarrow 0$  (viz Obr. 6.34,  $s < 0,5$ ). Jelikož v reálném dopravním proudu nebude nikdy časová světlost mezi vozidly nulová, je i hustota pravděpodobnosti výskytu nulové časové světlosti (a blízkých hodnot) rovna nule. Člen  $e^{-\lambda s}$  pak řídí exponenciální chvost funkce (viz Obr. 6.34,  $s \gg 2$ ), kdy se teoretická časová světlost mezi vozidly blíží nekonečnu (v praxi je maximální možná mezera dána nastavením detektoru) [57].

### 6.5.3 Fitování

Fitování je klíčovou částí procesu odhadu parametrů zvolených teoretických normalizovaných a škálovaných rozdělení  $g(s)$ , kdy je cílem najít takové hodnoty parametrů, aby aproximace empirických dat byla co nejvěrnější. Pro tento účel byl použit software MS Excel, konkrétně jeho doplněk Řešitel.



Doplňěk Řešitel pracuje se třemi skupinami buněk. První se nazývají *Proměnné modelu*, které vstupují do zadaného vzorce v řádku *Účelová funkce*, a přitom se musí řídit mezemi zadanými v buňkách *Omezující podmínky*. Řešitel postupně upravuje hodnoty v buňkách *Proměnné modelu* tak, aby jednak vyhověl omezujícím podmínkám výpočtu, a jednak aby dosáhl požadovaného cíle definovaného buď minimem, maximem nebo přesnou hodnotou funkce. Uživatelské rozhraní Řešitele je uvedeno na Obr. 6.33.



Obr. 6.33: Nastavení Řešitele v programu MS Excel před spuštěním fitovacího procesu.

Jako *Proměnné modelu* vstupovaly do fitovacího procesu parametry  $\alpha$  a  $\beta$  u rozdělení GIG a  $\alpha$  u rozdělení Gamma. *Omezující podmínky* byly dány definičními obory těchto parametrů. Kvantitativní srovnání úspěšnosti aproximace bylo provedeno pomocí statistické vzdálenosti  $L_1$  [41], [56] dále označené jako  $\chi$ , která v Řešiteli figurovala jako *Účelová funkce* definovaná rovnicí

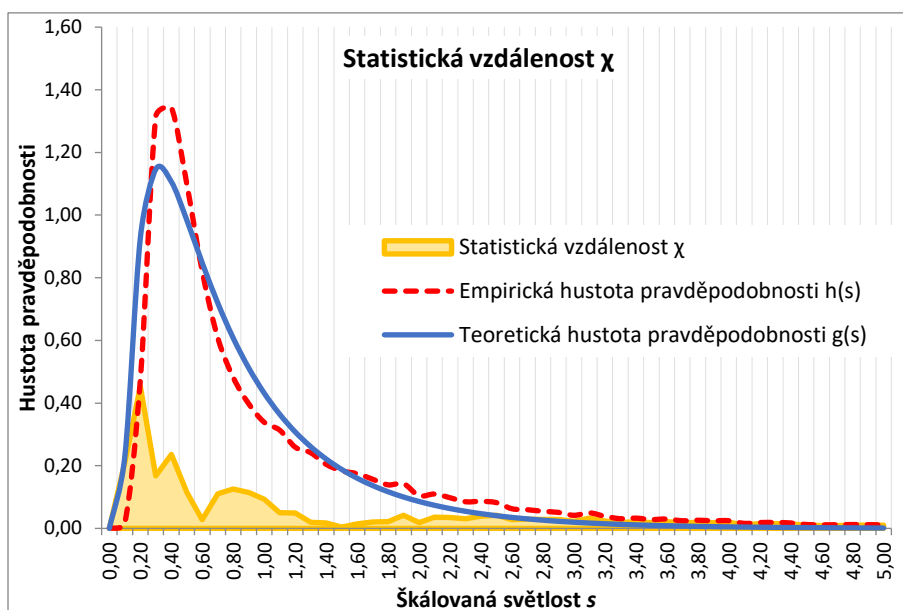
$$\chi = \int_0^{\infty} |g(s) - h(s)| ds, \quad (6-14)$$

kde je:

$g(s)$  teoretická škálovaná hustota pravděpodobnosti

$h(s)$  empirická škálovaná hustota pravděpodobnosti.

Graficky je význam statistické vzdálenosti patrný z Obr. 6.34.



Obr. 6.34: Grafické znázornění statistické vzdálenosti  $\chi$ .

Řešitel dále umožňuje zvolit jednu ze tří metod řešení. Simplexová metoda se používá pro lineární optimalizační problémy, gradientní metoda pro hladké nelineární problémy a evoluční algoritmus pro nehladké nelineární problémy. Úloha řešená v rámci této práce jednoznačně spadá mezi nehladké nelineární problémy, a proto byl pro výpočty zvolen evoluční algoritmus [58].

Pro každou datovou sadu byla vytvořena excelovská tabulka (ukázka pro Gamma rozdělení viz Tab. 6-1 a pro rozdělení GIG viz Tab. 6-2), ve které byly vypočteny hodnoty empirické i teoretické hustoty pravděpodobnosti pro každou třídu škálované světlosti  $s$  v intervalu 0,0 až 5,0.

Tab. 6-1: Ukázka tabulky pro fitování rozdělením Gamma ( $\alpha=0,2532$ )

Škálovaná světlost $s$	Četnost	Empirická hustota pravděpodobnosti $h(s)$	Teoretická hustota pravděpodobnosti Gamma $g(s)$	Statistická vzdálenost $L_1 \chi$
0,00	5	0,001099	0,004308	0,003209
0,10	84	0,018466	0,721480	0,703014
0,20	2156	0,473950	0,758591	0,284641
0,30	5981	1,314794	0,741587	0,573207
0,40	6111	1,343372	0,703667	0,639705
0,50	5001	1,099362	0,656866	0,442496
0,60	3730	0,819960	0,606873	0,213087
0,70	2768	0,608485	0,556701	0,051784
0,80	2192	0,481864	0,508018	0,026154
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
5,00	51	0,011211	0,004184	0,007028
$\Sigma =$	45490	10,000000	9,716132	3,813271

Tab. 6-2: Ukázka tabulky pro fitování rozdělením GIG ( $\alpha=-1,0000$  a  $\beta=0,4396$ )

Škálovaná světlost $s$	Četnost třídy	Empirická hustota pravděpodobnosti $h(s)$	Škálovací konstanta $\lambda$	Normalizační konstanta $A$	Teoretická hustota pravděpodobnosti GIG $g(s)$	Statistická vzdálenost $L_1$ $\chi$
0,00	5	0,001099	1,141444	2,097603	0,000000	0,001099
0,10	84	0,018466			0,230732	0,212266
0,20	2156	0,473950			0,926887	0,452937
0,30	5981	1,314794			1,146931	0,167863
0,40	6111	1,343372			1,106913	0,236460
0,50	5001	1,099362			0,984200	0,115163
0,60	3730	0,819960			0,847158	0,027198
0,70	2768	0,608485			0,719281	0,110796
0,80	2192	0,481864			0,607330	0,125466
...	...	...			...	...
...	...	...			...	...
5,00	51	0,011211			0,001276	0,009935
$\Sigma =$	45490	10,000000			9,992697	2,558972

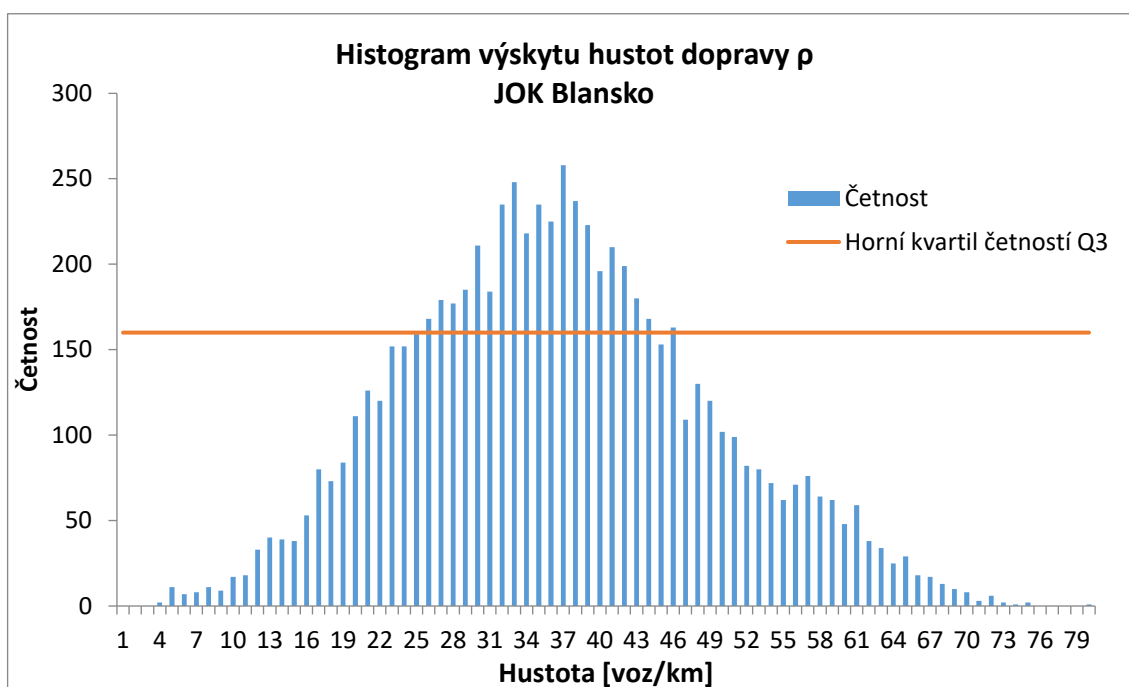
V předcházejícím textu byly přiblíženy možnosti a funkce excelovského Řešitele, nyní bude tedy celá fitovací procedura shrnuta. Jako *Účelová funkce* byla zvolena buňka  $\Sigma \chi$ , tedy součet statistických vzdáleností pro všechny třídy  $s$ . Jako *Proměnné modelu* byly vybrány buňky obsahující hodnoty parametrů  $\alpha$  a  $\beta$  pro funkci GIG a  $\alpha$  pro funkci Gamma. U exponenciální funkce proces fitování vůbec neprobíhal, protože po provedení normalizace a škálování v předpisu rozdělení nezbyl parametr, který by bylo možné upravovat. Do pole omezující podmínky byly pro jednotlivé parametry zadány jejich definiční obory. Cílem následující iterace bylo najít minimum účelové funkce  $\Sigma \chi$  při různých hodnotách parametrů funkcí v rámci omezujících podmínek. Tímto postupem bylo zajištěno, že Řešitel zastavil iteraci v momentě, kdy se k sobě křivky empirické hustoty pravděpodobnosti  $h(s)$  a teoretické pravděpodobnosti  $g(s)$  nejvíce přimknuly.

#### 6.5.4 Výsledky – mezery na okružním pásu

Výsledky fitovací procedury provedené na datech z průjezdových bran umístěných na okružním pásu budou dále shrnuty po jednotlivých lokalitách. Pro každou lokalitu bude nejdříve uveden histogram četnosti výskytu různých hustot v rozmezí 0 až 80 voz/km. Na základě tohoto histogramu budou dále uvedena jen ta hustotní pásma, která přesáhla úroveň horního kvartilu  $Q_3$ . Následně budou uvedeny tabulky shrnující výsledky fitovací procedury pro vybraná rozdělení a hustotní pásma. Úspěšnost

aproximace bude u jednotlivých rozdělení vyjádřena hodnotou statistické vzdálenosti  $\chi$  vypočítanou dle (6-14). Nejnižší hodnota  $\chi$  v rámci daného hustotního pásma znamená nejpřesnější aproximaci. V kapitolách 11.2.1 až 11.2.5 jsou uvedeny grafy zobrazující empirická data formou histogramu a průběh vybraných teoretických rozdělení hustot pravděpodobností  $g(s)$  po provedení fitovací procedury. Tvary křivek těchto funkcí odpovídají použitým parametrům, jejichž hodnoty vzešly z fitovací procedury a jsou uvedeny v tabulkách v kapitolách 6.5.4.1 až 6.5.4.5.

### 6.5.4.1 JOK Blansko

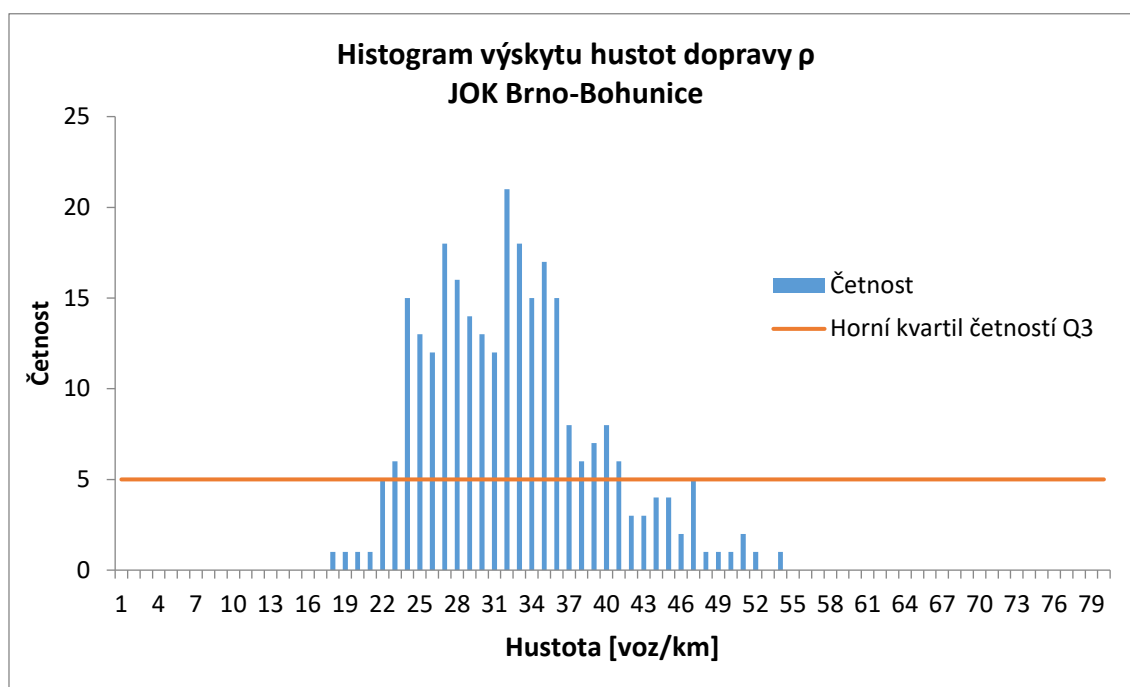


Obr. 6.35: JOK Blansko – histogram výskytu hustot  $\rho$  na okružním pásu.

Tab. 6-3: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu JOK Blansko pro hustotní pásma 25 – 30 až 40 – 45 voz/km.

<b>JOK Blansko</b>						
	Hustotní pásma [voz/km]					
	25 - 30			30 - 35		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	0,4396	2,5590	-1,0000	0,4947	2,3499
Gamma	0,2532		3,8133	0,5609		4,0819
Exp			4,8619			5,4316
	Hustotní pásma [voz/km]					
	35 - 40			40 - 45		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	0,7734	2,2458	-1,0000	0,8857	2,0791
Gamma	0,8532		4,0376	1,8294		3,7880
Exp			5,7691			6,3638

### 6.5.4.2 JOK Brno-Bohunice

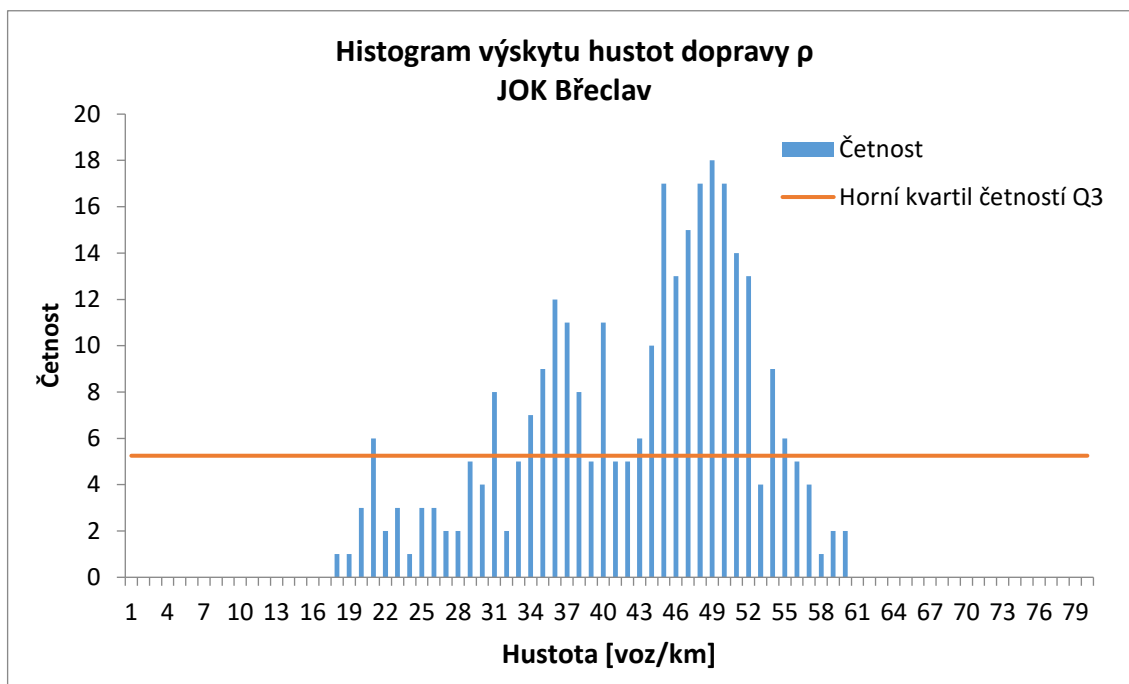


Obr. 6.36: JOK Brno-Bohunice – histogram výskytu hustot  $\rho$  na okružním pásu.

Tab. 6-4: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu JOK Brno-Bohunice pro hustotní pásma 25 – 30 až 35 – 40 voz/km.

JOK Brno-Bohunice						
	Hustotní pásma [voz/km]					
	25 - 30			30 - 35		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	0,4433	2,6324	-1,0000	0,6092	1,9907
Gamma	0,3331		3,9336	0,6402		3,7449
Exp			5,2040			5,5392
Hustotní pásma [voz/km]						
	35 - 40					
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$			
GIG	-1,0000	0,9766	2,0830			
Gamma	1,8038		3,7291			
Exp			6,6539			

### 6.5.4.3 JOK Břeclav

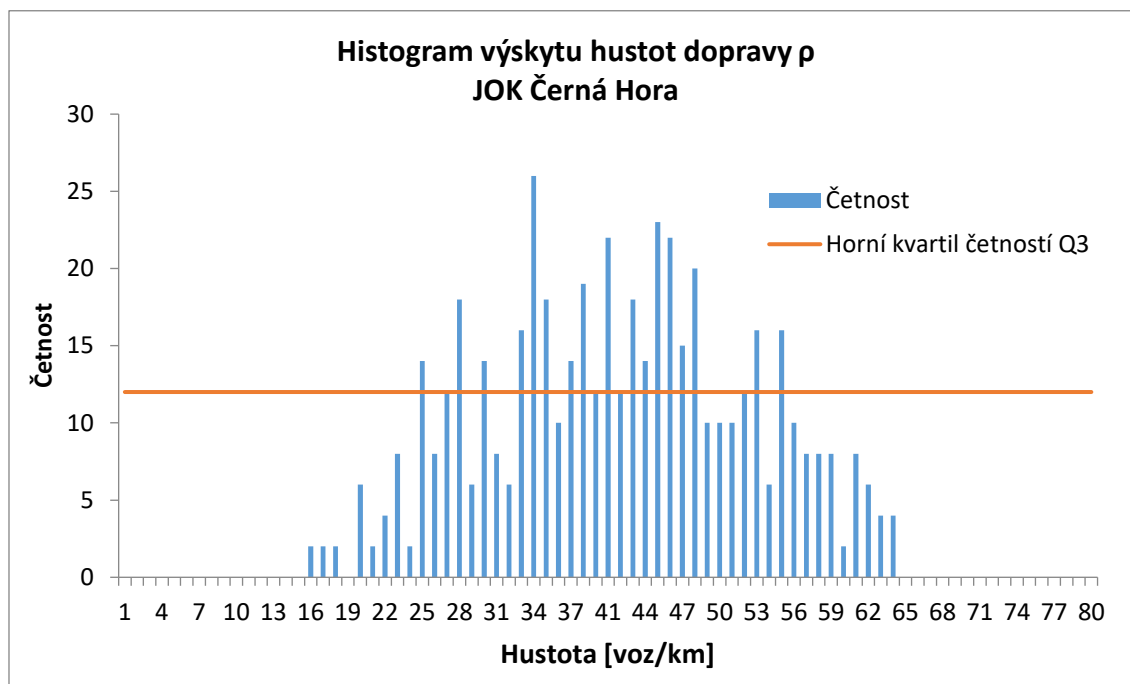


Obr. 6.37: JOK Břeclav – histogram výskytu hustot  $\rho$  na okružním pásu.

Tab. 6-5: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu JOK Břeclav pro hustotní pásma 35 – 40 až 50 – 55 voz/km.

JOK Břeclav						
	Hustotní pásma [voz/km]					
	35 - 40			40 - 45		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	0,7463	2,4548	-1,0000	1,0326	1,5838
Gamma	0,8942		4,4861	1,8402		3,3755
Exp			6,0709			6,8156
Hustotní pásma [voz/km]						
	45 - 50			50 - 55		
	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	1,4798	1,1370	-1,0000	1,8030	1,0967
Gamma	2,6491		2,4378	3,0428		2,1833
Exp			7,2923			8,0766

#### 6.5.4.4 JOK Černá Hora



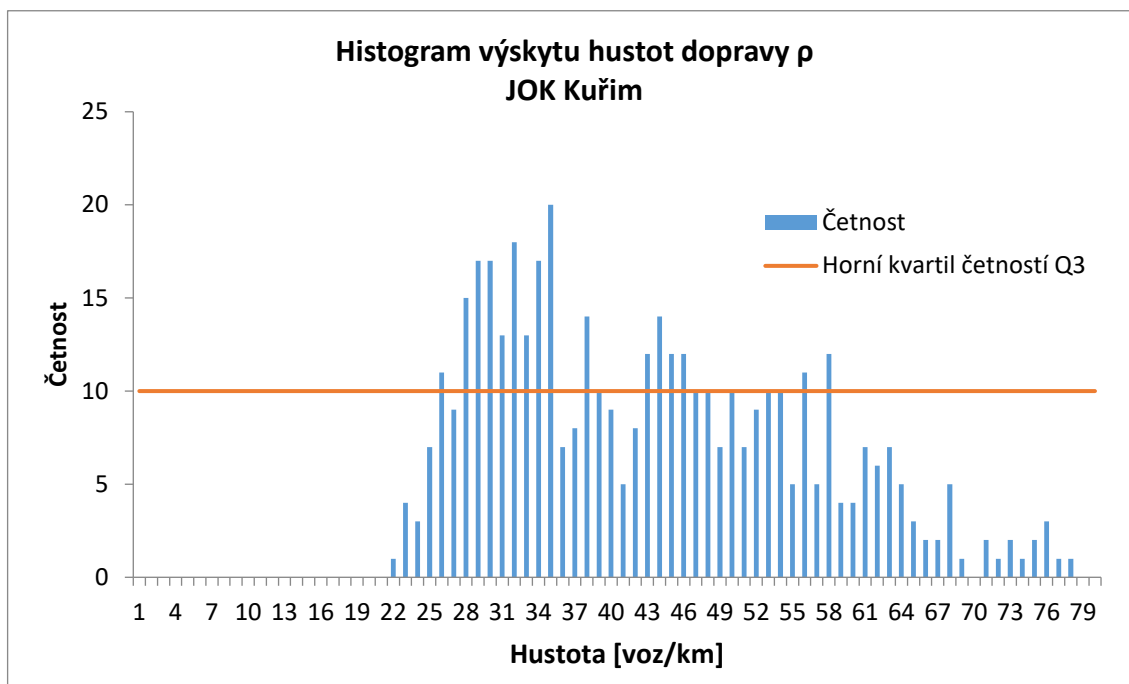
Obr. 6.38: JOK Černá Hora – histogram výskytu hustot  $\rho$  na okružním pásu.

Tab. 6-6: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu JOK Černá Hora pro hustotní pásma 25 – 30 až 50 – 55 voz/km.

JOK Černá Hora						
	Hustotní pásma [voz/km]					
	25 - 30			30 - 35		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	0,4603	3,2053	-1,0000	0,7190	2,5924
Gamma	0,4415		5,2359	1,0143		4,8120
Exp			6,5242			6,8953
	Hustotní pásma [voz/km]					
	35 - 40			40 - 45		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	1,0268	2,6607	-1,0000	1,2880	1,5940
Gamma	2,1665		4,5428	2,5769		3,3447
Exp			7,2680			7,4998
	Hustotní pásma [voz/km]					
	45 - 50			50 - 55		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	1,1062	1,7317	-1,0000	1,3645	1,9884
Gamma	2,0447		3,3823	2,2248		3,7076
Exp			7,4654			8,2363



### 6.5.4.5 JOK Kuřim



Obr. 6.39: JOK Kuřim – histogram výskytu hustot  $\rho$  na okružním pásu.

Tab. 6-7: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu JOK Kuřim pro hustotní pásma 25 – 30 až 50 – 55 voz/km.

JOK Kuřim						
	Hustotní pásma [voz/km]					
	25 - 30			30 - 35		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	0,4186	2,7319	-1,0000	0,5467	2,6790
Gamma	0,2859		4,6885	0,8364		4,8451
Exp			5,6851			6,4023
	Hustotní pásma [voz/km]					
	35 - 40			40 - 45		
g(x)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	0,7160	2,7410	-1,0000	1,0401	2,3660
Gamma	1,1574		4,8160	2,1788		4,2337
Exp			6,5925			7,1886
	Hustotní pásma [voz/km]					
	45 - 50			50 - 55		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	1,2302	1,3464	-1,0000	1,1540	1,7078
Gamma	2,1775		3,0664	2,1714		3,5127
Exp			6,8817			7,5311

## 6.5.5 Výsledky – akceptační řád světlosti

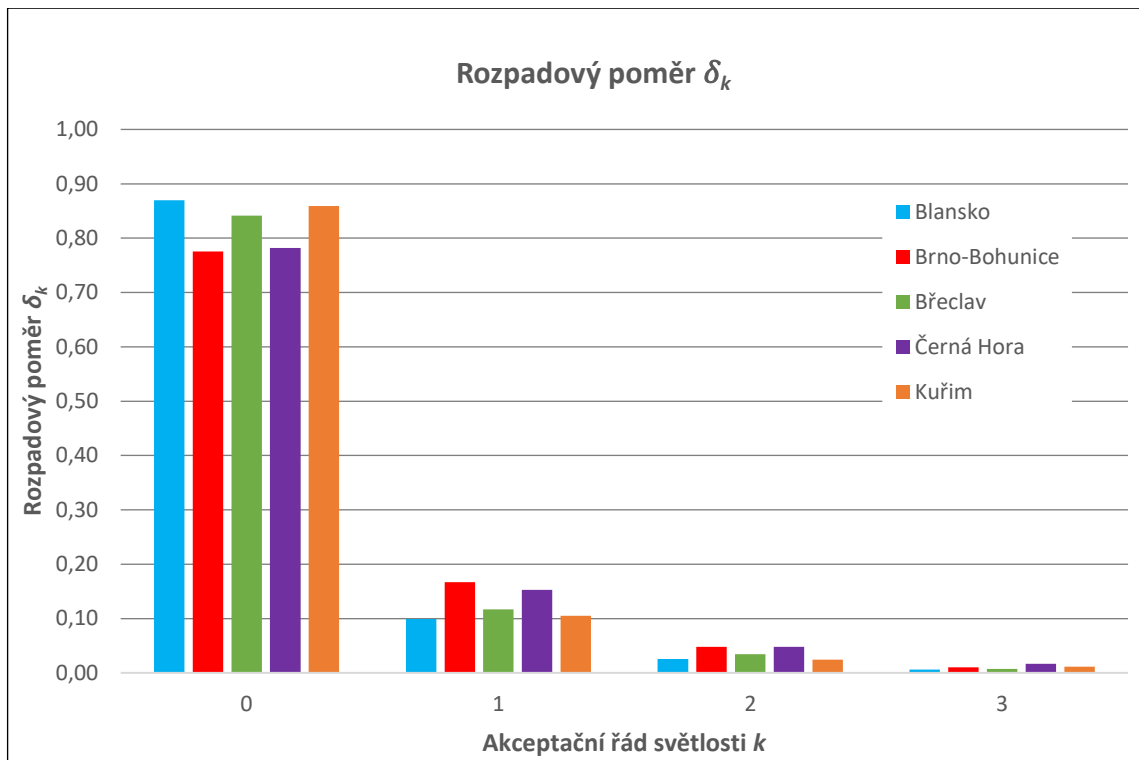
Výsledky fitovací procedury provedené na datech z detekčních uzlů, umístěných na vjezdech sledovaných okružních křižovatek, budou v této kapitole tříděny podle akceptačního řádu  $k$ . Úspěšnost aproximace bude opět vyjádřena hodnotou statistické vzdálenosti  $L_1$  označené jako  $\chi$  a vypočítané dle (6-14). Nižší hodnota  $\chi$  v rámci daného akceptačního řádu znamená přesnější aproximaci.

V Tab. 6-8 jsou uvedeny rozpadové poměry  $\delta_k$  vypočtené pro jednotlivé lokality dle vzorce (5-11) a názorně jsou potom vykresleny v Obr. 6.40. Z něj jasně vyplývá, jak obtížné je získat větší množství dat pro vyšší hodnoty akceptačního řádu  $k$ .

Tab. 6-8: Přehled rozpadových poměrů  $\delta_k$  na zkoumaných lokalitách pro akceptační řády  $k = 0, \dots, 3$ .

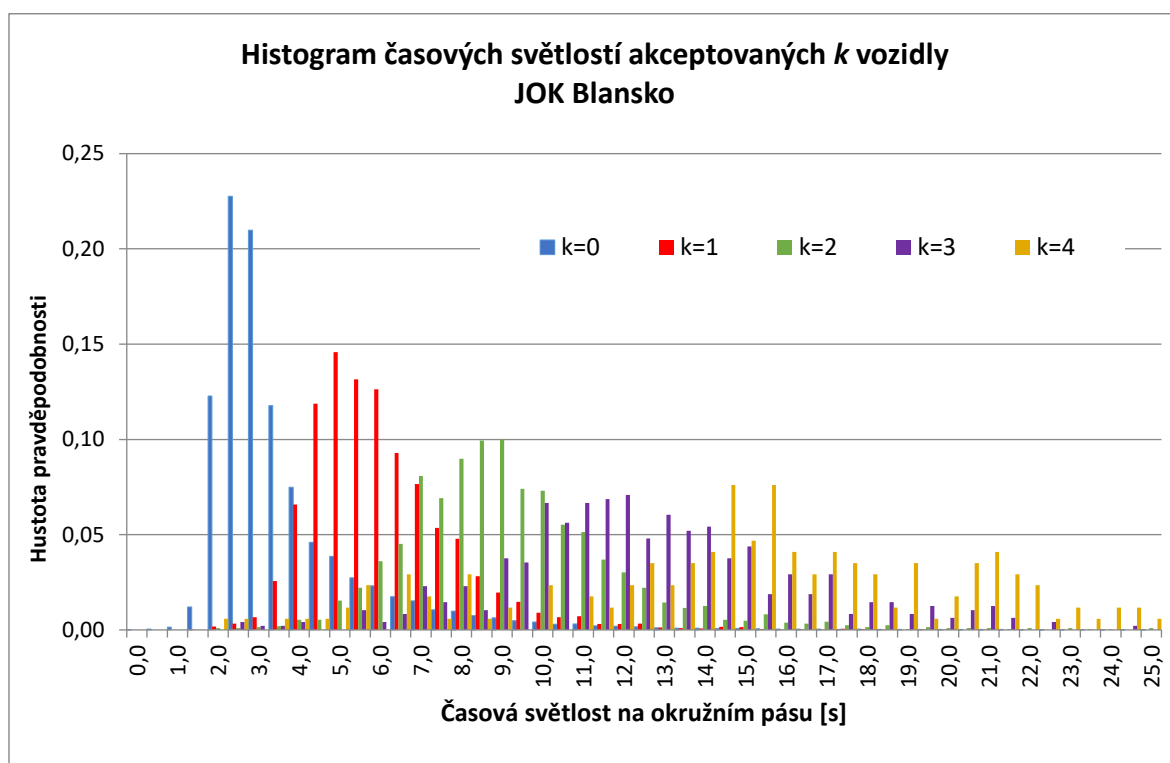
Akceptační řád $k$		0	1	2	3	Celkem
Blansko	Četnost	71 099	8 104	2 082	480	81 765
	Rozpadový poměr $\delta_k$	0,87	0,10	0,02	0,01	1,00
Brno-Bohunice	Četnost	776	167	48	10	1 001
	Rozpadový poměr $\delta_k$	0,77	0,17	0,05	0,01	1,00
Břeclav	Četnost	1 396	194	57	12	1 659
	Rozpadový poměr $\delta_k$	0,84	0,12	0,03	0,01	1,00
Černá Hora	Četnost	3 548	694	218	76	4 536
	Rozpadový poměr $\delta_k$	0,78	0,15	0,05	0,02	1,00
Kuřim	Četnost	1 158	142	33	15	1 348
	Rozpadový poměr $\delta_k$	0,86	0,11	0,02	0,01	1,00

V kapitolách 11.3.1 až 11.3.5 jsou uvedeny grafy zobrazující empirická data formou histogramu a průběh vybraných teoretických rozdělení hustot pravděpodobností  $g(s)$  po provedení fitovací procedury. Tvary křivek těchto funkcí odpovídají použitým parametrům, jejichž hodnoty vzešly z fitovací procedury a jsou uvedeny v tabulkách v kapitolách 6.5.5.1 až 6.5.5.5.



Obr. 6.40: Graf rozpadových poměrů  $\delta_k$  v závislosti na akceptačním řádu světlosti  $k$  pro všechny zkoumané lokality.

### 6.5.5.1 JOK Blansko

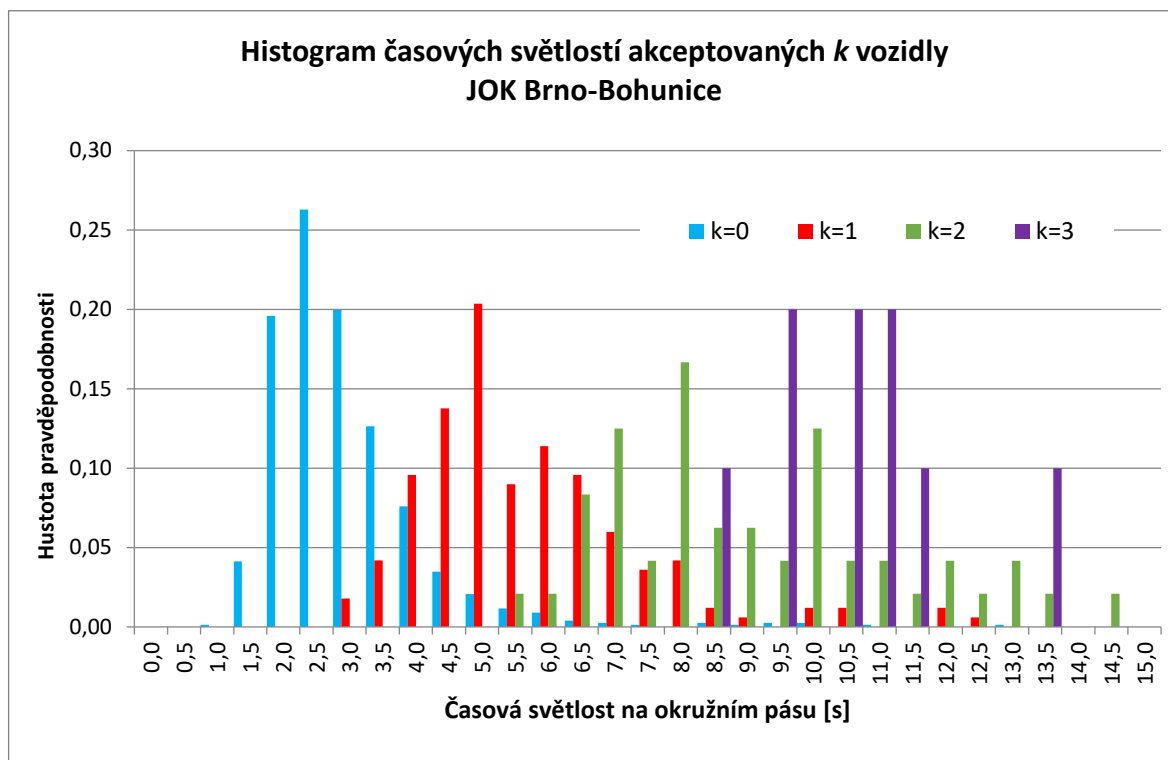


Obr. 6.41: Histogramy časových světlostí pro jednotlivé akceptační řády  $k = 0, \dots, 4$  pro JOK v Blansku. Akceptační řád  $k = 4$  je ponechán pro ilustraci, jaký vliv má nedostatek dat.

Tab. 6-9: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení k vozidel do mezer na okružním pásu JOK v Blansku.

JOK Blansko									
	Akceptační řád světlosti								
	k = 0			k = 1			k = 2		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	6,6120	1,2101	-1,0000	7,1123	1,3419	-1,0000	8,2240	1,7282
Gamma	14,1006		1,7960	12,9784		1,4474	15,1885		1,3946
	Akceptační řád světlosti								
	k = 3			k = 4			k = 5		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	7,2731	2,2231	-1,0000	2,8082	4,8675	-1,0000	13,4548	4,2750
Gamma	14,1909		1,7177	5,6958		4,1099	22,6144		3,9057

### 6.5.5.2 JOK Brno-Bohunice

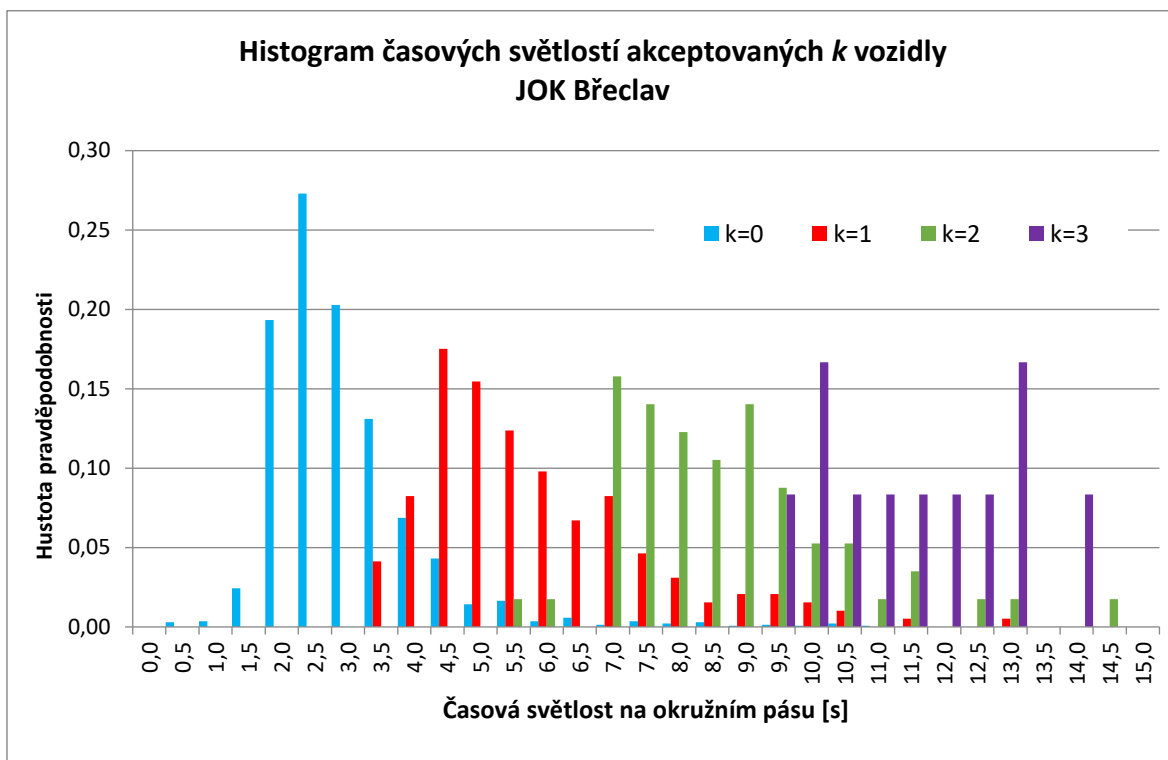


Obr. 6.42: Histogramy časových světlostí pro jednotlivé akceptační řády  $k = 0, \dots, 3$  pro JOK v Brně-Bohunicích. Akceptační řád  $k = 3$  je ponechán pro ilustraci, jaký vliv má nedostatek dat.

Tab. 6-10: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení  $k$  vozidel do mezer na okružním pásu JOK v Brně-Bohunicích.

JOK Brno-Bohunice									
	Akceptační řád světlosti								
	k = 0			k = 1			k = 2		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	4,5932	1,5461	-1,0000	8,4949	2,3066	-1,0000	10,9920	3,9242
Gamma	9,1928		2,1703	15,7505		2,3240	21,1652		4,1370
	Akceptační řád světlosti								
	k = 3								
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$						
GIG	-1,0000	50,0167	4,9263						
Gamma	99,6975		4,8881						

### 6.5.5.3 JOK Břeclav

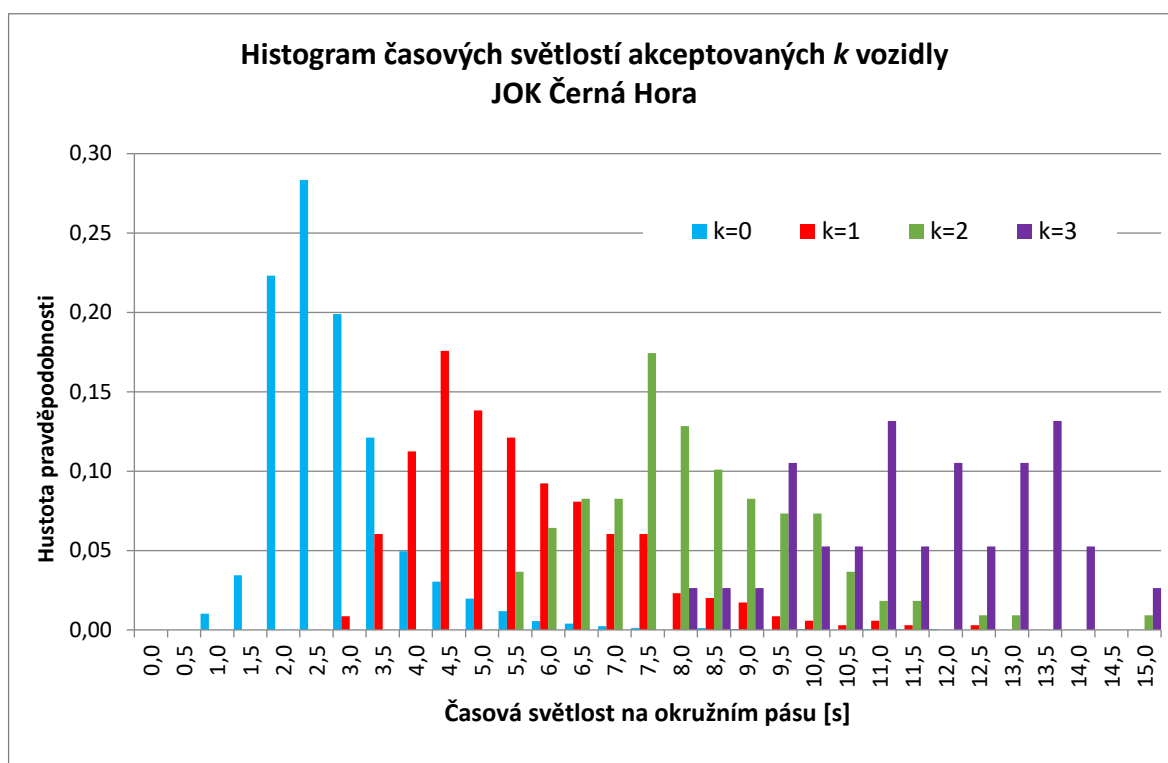


Obr. 6.43: Histogramy časových světlostí pro jednotlivé akceptační řády  $k = 0, \dots, 3$  pro JOK v Břeclavi. Akceptační řád  $k = 3$  je ponechán pro ilustraci, jaký vliv má nedostatek dat.

Tab. 6-11: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení k vozidel do mezer na okružním pásu JOK v Břeclavi.

JOK Břeclav									
	Akceptační řád světlosti								
	k = 0			k = 1			k = 2		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	5,2902	1,5553	-1,0000	7,1248	2,4879	-1,0000	19,0386	3,0356
Gamma	10,8203		2,0302	17,6835		2,7436	34,4576		3,2071
	Akceptační řád světlosti								
	k = 3								
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$						
GIG	-1,0000	19,3883	4,0376						
Gamma	38,4362		4,1576						

### 6.5.5.4 JOK Černá Hora

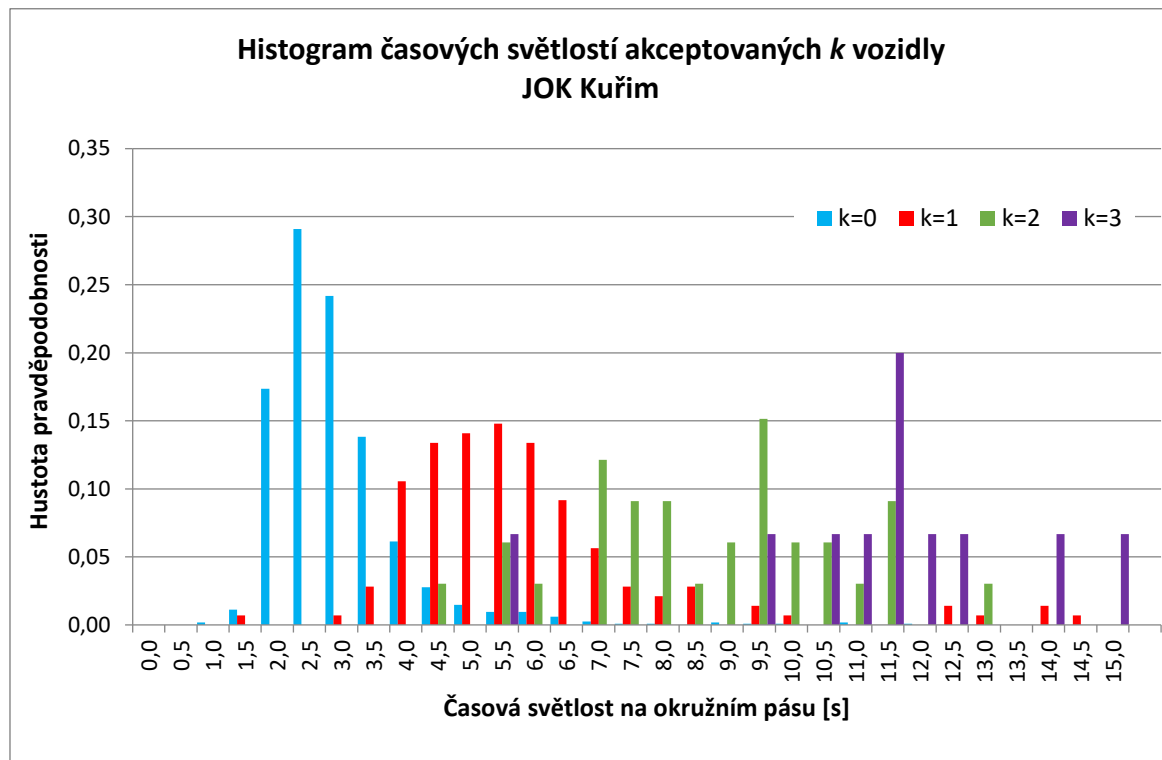


Obr. 6.44: Histogramy časových světlostí pro jednotlivé akceptační řády  $k = 0, \dots, 3$  pro JOK v Černé Hoře. Akceptační řád  $k = 3$  je ponechán pro ilustraci, jaký vliv má nedostatek dat.

Tab. 6-12: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení  $k$  vozidel do mezer na okružním pásu JOK v Černé Hoře.

JOK Černá Hora									
	Akceptační řád světlosti								
	k = 0			k = 1			k = 2		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-1,0000	5,3085	1,5631	-1,0000	6,8289	1,3880	-1,0000	14,7106	2,5085
Gamma	10,0974		1,8648	13,4447		1,5846	29,8050		2,3682
	Akceptační řád světlosti								
	k = 3			k = 4					
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$			
GIG	-1,0000	21,9609	3,5380	6,0000	26,1117	6,1187			
Gamma	45,2745		3,3122	58,2429		6,2944			

### 6.5.5.5 JOK Kuřim



Obr. 6.45: Histogramy časových světlostí pro jednotlivé akceptační řády  $k = 0, \dots, 3$  pro JOK v Kuřimi. Akceptační řád  $k = 3$  je ponechán pro ilustraci, jaký vliv má nedostatek dat.

Tab. 6-13: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení k vozidel do mezer na okružním pásu JOK v Kuřimi.

JOK Kuřim									
	Akceptační řád světlosti								
	k = 0			k = 1			k = 2		
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$	$\alpha$	$\beta$	$\chi$
GIG	-0,0948	5,5359	1,4708	-1,0000	9,6267	2,0989	5,0122	9,8908	5,3780
Gamma	13,1237		2,1778	2,5661		2,5661	25,7990		5,3366
	Akceptační řád světlosti								
	k = 3								
g(s)	$\alpha$	$\beta$	$\chi$						
GIG	-1,0000	7,3478	6,6709						
Gamma	12,6698		6,9227						



## 6.6 Shrnutí výsledků

Ze srovnání hodnot statistické vzdálenosti  $\chi$  uvedených v tabulkách Tab. 6-3 až Tab. 6-7 i z průběhu funkcí v grafech uvedených v kapitolách 11.2.1 až 11.2.5 je zřejmé, že hustotu pravděpodobnosti výskytu časových mezer (světlostí) v nadřazeném dopravním proudu na okružním pásu jednopruhových okružních křižovatek lze, v rámci srovnávaných a v dopravní praxi běžně užívaných funkcí, nejlépe aproximovat dvouparametrickým rozdělením GIG, což je přehledně shrnuto v Tab. 6-14.

Tab. 6-14: Souhrnná tabulka výsledků fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu v různých hustotních pásmech

Lokalita	Hustotní pásmo [voz/km]					
	25 - 30	30 – 35	35 - 40	40 - 45	45 - 50	50 - 55
Blansko	GIG	GIG	GIG	GIG	-	-
Brno-Bohunice	GIG	GIG	GIG	-	-	-
Břeclav	-	-	GIG	GIG	GIG	GIG
Černá Hora	GIG	GIG	GIG	GIG	GIG	GIG
Kuřim	GIG	GIG	GIG	GIG	GIG	GIG

Na rozdíl od analýzy rozdělení mezer na okružním pásu, nejsou v případě akceptačního řádu světlosti výsledky fitovací procedury tak jednoznačné. Na všech zkoumaných lokalitách se projevil podobný fenomén, kdy pro akceptační řád  $k = 0$  a  $k = 1$  vychází jako vhodnější teoretické rozdělení GIG, pro vyšší řády se však občas parametr  $\beta$  blíží nule a v těchto případech se z rozdělení GIG stává Gamma. Dobře je to patrné v souhrnné tabulce Tab. 6-15.

Tab. 6-15: Souhrnná tabulka výsledků fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení  $k$  vozidel do mezer na okružním pásu

Lokalita	Akceptační řád světlosti					
	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$
Blansko	GIG	GIG	Gamma*	Gamma*	Gamma*	Gamma*
Brno-Bohunice	GIG	GIG	GIG	Gamma*	-	-
Břeclav	GIG	GIG	GIG	GIG	-	-
Černá Hora	GIG	GIG	Gamma*	Gamma*	GIG	-
Kuřim	GIG	GIG	Gamma*	GIG	-	-

\* Rozdělení Gamma je zvláštní případ rozdělení GIG s parametrem  $\beta = 0$ .

V tomto ohledu bylo dosaženo podobného závěru jako u výzkumu stykových křižovatek popsáných v kapitole 5.2.2. Tento fenomén je pravděpodobně způsoben přibližováním funkcí při jejich konvoluci. Konvoluce je matematická operace zpracovávající dvě nezávislé veličiny, v tomto případě dvě konvolučně kompatibilní hustoty pravděpodobnosti, jejíž pomocí je možné vypočítat kombinovanou hustotu pravděpodobnosti. Její úplný popis je již nad rámec této práce, proto jsou uvedeny pouze zdroje, kde je možné podrobnou definici dohledat [59], [36].

## 7 Závěr a doporučení

Motivací pro výzkum v této oblasti dopravního inženýrství byly nedostatky tzv. Sieglochovy metody (podrobněji viz kapitola 5), která je základem pro kapacitní výpočty všech neřízených úrovnových křižovatek, které se v inženýrské praxi aktuálně provádí podle Technických podmínek 188 [7].

V rámci výzkumného projektu Technologické agentury ČR CK01000152 Pokročilé matematicko-fyzikální metody modelování mikrostruktury dopravního proudu [33], kde je autor disertační práce členem řešitelského týmu, bylo prokázáno, že rozdělení hustoty pravděpodobnosti výskytu časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu a jejich využití vozidly z podřazeného dopravního proudu na jednoduché stykové křižovatce je možné poměrně přesně popsat zobecněným inverzním Gaussovým rozdělením (GIG), případně jeho zvláštním případem pro parametr  $\beta = 0$ , rozdělením Gamma.

V disertační práci bylo prokázáno na rozsáhlém vzorku empirických dat získaných pomocí inovativní metody analýzy obrazu z videozáznamů pěti jednopruhových okružních křižovatek (JOK) v Jihomoravském kraji, že pomocí hustoty pravděpodobnosti odpovídající GIG je možné popsat i dopravně-inženýrskou úlohu nazývanou gap-acceptance theory (teorii časových odstupů) na JOK.

Vhodnost aproximace empirických dat dokumentujících výskyt časových světlostí na okružním pásu teoretickou hustotou pravděpodobnosti definovanou dvouparametrickým rozdělením GIG, jednoparametrickým rozdělením Gamma nebo aktuálně používanou exponenciální funkcí, byla posuzována pomocí statistické vzdálenosti  $L_1$ . Nejlepších výsledků bylo dosaženo s rozdělením GIG, protože s nejvyšší přesností popisuje výskyt krátkých časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu při vysokých hustotách dopravy, tedy ve stavu dopravního proudu, při kterém potřebujeme znát kapacitu křižovatky nejvíce.

Co se týče odhadu akceptačního řádu světlostí, bude předmětem dalšího výzkumu, zda bude použito rozdělení GIG nebo Gamma. Z dosavadních poznatků vyplývá, že převážná většina naměřených dat spadá do akceptačních řádů  $k = 0$  a  $k = 1$ , které tedy budou mít nejvýznamnější vliv na výslednou kapacitu křižovatky. Vzhledem k tomu, že u těchto akceptačních řádů na všech měřených lokalitách dosahovalo přesnějších výsledků rozdělení GIG, lze se v tuto chvíli domnívat, že bude použito i ve výsledném kapacitním modelu jak pro odhad výskytu časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu, tak pro odhad počtu vozidel podřazeného dopravního proudu, která tyto světlosti využijí pro svůj zařazovací manévr.

Aktuálnost hlubšího poznání problematiky kapacity okružních křižovatek je tím naléhavější, že se jedná o křižovatky určené pro vyšší dopravní zátěže než ve výzkumném projektu analyzované křižovatky stykové, případně průsečné. Zároveň lze konstatovat, že návrh okružních křižovatek se v posledních

cca 10 letech stal na české silniční síti výrazným trendem, a proto je nutné znát jejich reálné kapacitní možnosti.

Přínosem inovovaného přístupu je kromě nahrazení nevhodného předpokladu o rozdělení časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu a příliš zjednodušující lineární aproximaci Sieglochovy funkce i to, že nová metodika nebude odvozovat charakteristiky řidičů na křižovatce pomocí deterministicky stanoveného kritického a následného časového odstupe jako v současném předpisu TP 188 [7], ale budou přiřazeny náhodným výběrem pro každou nabídnutou časovou světlost v nadřazeném dopravním proudu na základě pravděpodobnosti definované obecným rozdělením hustoty pravděpodobnosti. Tento fakt napraví i další příliš velké zjednodušení stávající metodiky, která považovala všechny řidiče za konzistentní, tedy že se jejich individuální hodnota kritické časové světlosti  $t_g$  v čase nemění. Řidič se při řízení vozidla zcela jistě nechová jako stroj, ba naopak jeho rozhodovací proces má stochastický charakter, který se snaží vystihnout právě princip popsany v této disertační práci.

Tyto poznatky mají významný vliv na reálné posouzení kapacity neřízených křižovatek. Právě křižovatky definují propustnost silniční sítě, a proto je jim třeba věnovat zvýšenou pozornost. Stávající český předpis TP 188 [7] využívající Sieglochovu metodu má tendenci podhodnocovat pravděpodobnost, že kratší časovou mezeru využije 0 vozidel a tím, v rozporu s realitou, nadhodnocuje kapacitu křižovatky. Tento fakt byl prokázán v [34] a chyba může činit až 15 %. To může vést k nesprávnému návrhu typu křižovatky, kdy se projektant mylně domnívá, že jím zvolený typ křižovatky zajistí dostatečnou úroveň kvality dopravy. Vzhledem k tomu, že se křižovatky posuzují na výhledové období minimálně 20 let, pravděpodobně se tento chybný předpoklad neprojeví hned, ale až několik let po realizaci stavby.

Dalším cílem výzkumu na tomto poli, který bude mimo jiné probíhat i v rámci již zmiňovaného výzkumného projektu TAČR [33], je implementovat pravděpodobnostní funkce využívající rozdělení GIG do nového výpočtového modelu pro stanovení kapacity okružních křižovatek a popsat kompletní proceduru kapacitního posouzení od sběru dat, příp. odhadu zatížení u plánovaných křižovatek, definice nového akceptačního pravidla až po stanovení předpokládané úrovně kvality dopravy na posuzované křižovatce na konci jejího návrhového období.

## 8 Seznam obrázků

Obr. 4.1: Schéma stykové křižovatky s popisem zkoumaných veličin. $H_i$ značí vozidla jedoucí po hlavní komunikaci, $V_i$ pak vozidla na vedlejší komunikaci. Symbolem $A_i$ je označena přijatá časová světlost na hlavní komunikaci, $R_i$ zamítnutá časová světlost.....	12
Obr. 4.2: Schéma stykové křižovatky popisující sběr dat pomocí Sieglochovy metody. Vozidla v nadřazeném dopravním proudu jsou označena $H_i$ , v podřazeném dopravním proudu $V_i$ a jednotlivé časové světlosti na hlavní komunikaci jako $t_i$ .....	15
Obr. 4.3: Odhad lineární aproximace Sieglochovy funkce získaný lineární regresí na středních hodnotách $tg, k$ individuálních kritických světlostí $tg, i$ . ....	17
Obr. 4.4: Grafy kumulativních distribučních funkcí $F_c(t)$ , $F_r(t)$ a $F_a(t)$ .....	20
Obr. 4.5: Schématické znázornění typů vjezdů do okružních křižovatek [7].....	28
Obr. 4.6: Vztah mezi intenzitou a hustotou dopravního proudu – $J/\rho$ diagram. ....	32
Obr. 4.7: Vztah mezi rychlostí a hustotou dopravního proudu – $v/\rho$ diagram. ....	33
Obr. 4.8: Reálný tvar diagramu rychlosti a hustoty dopravního proudu – $v/\rho$ diagram. ....	34
Obr. 4.9: Vztah mezi intenzitou a rychlostí dopravního proudu – $J/v$ diagram. ....	35
Obr. 5.1: Ukázka umístění radarové detektoru u komunikace v intravilánu (silnice II/374 na průtahu městem Blanskem).....	39
Obr. 5.2: Idealizované schéma realizace měření časových světlostí v dopravním proudu pomocí radarového detektoru včetně provedení opravy délkové světlosti.....	39
Obr. 5.3: Fundamentální diagram intenzita-hustota z dat naměřených v intravilánu. Každý vyneseny bod reprezentuje 50 za sebou jedoucích vozidel zachycených radarovým detektorem na 11 lokalitách v ČR [12].....	41
Obr. 5.4: Odhad stochastické rezistivity. Pomocí metody maximální věrohodnosti zde jsou odhadnuty hodnoty $\gamma$ pro empirická data získaná měřením v zastavených oblastech. Pro účely srovnání byly z celkového objemu dat vybrány 3 vzorky z různých rychlostních zón po skupinách 50 následujících se vozidel s průměrnou rychlostí ( $v$ ) [12]. ....	42
Obr. 5.5: Odhad rozdělení světlostí v nadřazeném dopravním proudu. Vykresleno bylo několik rozdělení GIG dle (5-7) na základě empirických dat, která byla vybrána v úzkých hustotních intervalech (viz legenda obrázku). Ve všech případech byla provedena škálovací procedura zajišťující, že střední hodnota světlostí je rovna jedné [12].....	43
Obr. 5.6: Hustoty pravděpodobnosti výskytu časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu pro tři vzorky dat z Německa. Empirická data jsou znázorněna šedým histogramem, zelená křivka reprezentuje exponenciální rozdělení, modrá Gamma rozdělení a červená GIG [12]. ....	44
Obr. 5.7: Schéma uspořádání sledovaných křižovatek v Německu po dobu sběru dat a naznačení zařazovacího manévru. ....	45
Obr. 5.8: Empirická rozdělení pravděpodobnosti výskytu akceptovaných časových světlostí řádu $k = 0, 1, 2, 3$ a $4$ na třech lokalitách v Německu [12].....	47
Obr. 6.1: Schéma vjezdu do okružní křižovatky s vyznačením sledovaných časů. ....	49
Obr. 6.2: Hexakoptéra s podvěšenou kamerou s vysokým rozlišením.....	50
Obr. 6.3: Helikite s podvěšenou kamerou s vysokým rozlišením. ....	51

Obr. 6.4: Výsledný záběr stacionární kamery osazené na střeše výškové budovy u okružní křižovatky silnic II/374 a III/37440 v Blansku. ....	51
Obr. 6.5: Instalované zařízení pro sledování okružní křižovatky v Blansku z přilehlé výškové budovy.	52
Obr. 6.6: Rozmístění detekčních bran a pruhů na transformovaném a georeferencovaném videozáznamu v softwaru Data From Sky, podrobněji viz kapitola 6.3. ....	52
Obr. 6.7: Teleskopický stožár maximální výšky 17 m osazený dálkově ovládanou kamerou s vysokým rozlišením. ....	53
Obr. 6.8: Teleskopický stožár maximální výšky 7 m osazený kamerou s 360° záběrem a vysokým rozlišením (JOK Brno-Bohunice). ....	54
Obr. 6.9: Rozvinutý pohled z kamery s 360° záběrem (JOK Břeclav). ....	54
Obr. 6.10: Funkcionalita „Obvyklý provoz“ na mapovém serveru společnosti Google [49] umožňující lépe identifikovat den a čas dopravních špiček. ....	55
Obr. 6.11: Umístění okružní křižovatky v rámci města Blanska [50]. ....	56
Obr. 6.12: Letecký snímek sledované okružní křižovatky v Blansku s vyznačením budovy, na které byla instalována kamera [50]. ....	57
Obr. 6.13: Umístění okružní křižovatky v rámci městské části Brno-Bohunice [50]. ....	58
Obr. 6.14: Letecký snímek sledované okružní křižovatky v Brně-Bohunicích s vyznačením polohy kamery ve středovém ostrově [50]. ....	59
Obr. 6.15: Umístění okružní křižovatky v rámci města Kuřim [50]. ....	60
Obr. 6.16: Letecký snímek sledované okružní křižovatky v Kuřimi s vyznačením polohy kamery ve středovém ostrově [50]. ....	60
Obr. 6.17: Umístění okružní křižovatky mezi obcemi Černá Hora a Bořitov [50]. ....	61
Obr. 6.18: Letecký snímek sledované okružní křižovatky v Černé Hoře s vyznačením polohy kamery ve středovém ostrově [50]. ....	62
Obr. 6.19: Umístění okružní křižovatky v rámci města Břeclav [50]. ....	63
Obr. 6.20: Letecký snímek sledované okružní křižovatky v Břeclavi s vyznačením polohy kamery ve středovém ostrově [50]. ....	63
Obr. 6.21: Zaměření křižovatky pomocí GPS stanice, které umožňuje jednotlivým pixelům záběru přiřadit globální polohopisné souřadnice. ....	65
Obr. 6.22: Zanesení zaměřených bodů do snímku z pořízeného videozáznamu. ....	65
Obr. 6.23: Proces georeferencování videozáznamu v softwaru Data From Sky. ....	66
Obr. 6.24: Výsledek georeferencování videozáznamu v softwaru Data From Sky. ....	66
Obr. 6.25: Kontrola hodnot rychlosti a zrychlení vozidel po provedení georeference videozáznamu v softwaru Data From Sky. ....	67
Obr. 6.26: Zadání vyhodnocovaných oblasti videozáznamu a průjezdových bran v softwaru Data From Sky. ....	67
Obr. 6.27: Umístění průjezdové brány na okružním pásu za účelem analýzy časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu. ....	68
Obr. 6.28: Konfigurace detekčního uzlu za účelem analýzy akceptace časových světlostí. ....	70

Obr. 6.29: Rozhodovací tabulka ovlivňující parametry exportovaných dat při analýze kritických a následných časových odstupů v softwaru Data From Sky. ....	70
Obr. 6.30: Grafické znázornění horního kvartilu $Q_3$ v histogramu četnosti dat v jednotlivých hustotních pásmech. ....	74
Obr. 6.31: Histogram výskytu časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu v hustotním pásmu 25 – 30 voz/km. ....	75
Obr. 6.32: Empirická hustota pravděpodobnosti výskytu časových světlostí v nadřazeném dopravním proudu v hustotním pásmu 25 – 30 voz/km. ....	76
Obr. 6.33: Nastavení Řešitele v programu MS Excel před spuštěním fitovacího procesu. ....	79
Obr. 6.34: Grafické znázornění statistické vzdálenosti $\chi$ . ....	80
Obr. 6.35: JOK Blansko – histogram výskytu hustot $\rho$ na okružním pásu. ....	83
Obr. 6.36: JOK Brno-Bohunice – histogram výskytu hustot $\rho$ na okružním pásu. ....	84
Obr. 6.37: JOK Břeclav – histogram výskytu hustot $\rho$ na okružním pásu. ....	85
Obr. 6.38: JOK Černá Hora – histogram výskytu hustot $\rho$ na okružním pásu. ....	86
Obr. 6.39: JOK Kuřim – histogram výskytu hustot $\rho$ na okružním pásu. ....	87
Obr. 6.40: Graf rozpadových poměrů $\delta k$ v závislosti na akceptačním řádu světlosti $k$ pro všechny zkoumané lokality. ....	89
Obr. 6.41: Histogramy časových světlostí pro jednotlivé akceptační řády $k = 0, \dots, 4$ pro JOK v Blansku. Akceptační řád $k = 4$ je ponechán pro ilustraci, jaký vliv má nedostatek dat. ....	90
Obr. 6.42: Histogramy časových světlostí pro jednotlivé akceptační řády $k = 0, \dots, 3$ pro JOK v Brně-Bohunicích. Akceptační řád $k = 3$ je ponechán pro ilustraci, jaký vliv má nedostatek dat. ....	91
Obr. 6.43: Histogramy časových světlostí pro jednotlivé akceptační řády $k = 0, \dots, 3$ pro JOK v Břeclavi. Akceptační řád $k = 3$ je ponechán pro ilustraci, jaký vliv má nedostatek dat. ....	92
Obr. 6.44: Histogramy časových světlostí pro jednotlivé akceptační řády $k = 0, \dots, 3$ pro JOK v Černé Hoře. Akceptační řád $k = 3$ je ponechán pro ilustraci, jaký vliv má nedostatek dat. ....	93
Obr. 6.45: Histogramy časových světlostí pro jednotlivé akceptační řády $k = 0, \dots, 3$ pro JOK v Kuřimi. Akceptační řád $k = 3$ je ponechán pro ilustraci, jaký vliv má nedostatek dat. ....	94

## 9 Seznam tabulek

Tab. 4-1: Přehled zjištěných hodnot kritických a následných časových odstupů na jednopruhových okružních křižovatkách [5]. Hodnoty jsou uvedeny ve vteřinách.....	26
Tab. 4-2: Aktuálně platné hodnoty kritických a následných časových odstupů pro jednopruhové okružní křižovatky dle TP 188 [7]. $L_{kol}$ značí vzdálenost mezi kolizními body na vjezdu a výjezdu a $R_v$ poloměr vjezdu. ....	27
Tab. 4-3: Mezní hodnoty střední doby zdržení na vjezdu do úrovně neřízené křižovatky .....	29
Tab. 6-1: Ukázka tabulky pro fitování rozdělením Gamma ( $\alpha=0,2532$ ).....	80
Tab. 6-2: Ukázka tabulky pro fitování rozdělením GIG ( $\alpha=-1,0000$ a $\beta=0,4396$ ).....	81
Tab. 6-3: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu JOK Blansko pro hustotní pásma 25 – 30 až 40 – 45 voz/km. ....	83
Tab. 6-4: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu JOK Brno-Bohunice pro hustotní pásma 25 – 30 až 35 – 40 voz/km.....	84
Tab. 6-5: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu JOK Břeclav pro hustotní pásma 35 – 40 až 50 – 55 voz/km. ....	85
Tab. 6-6: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu JOK Černá Hora pro hustotní pásma 25 – 30 až 50 – 55 voz/km.....	86
Tab. 6-7: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu JOK Kuřim pro hustotní pásma 25 – 30 až 50 – 55 voz/km. ....	87
Tab. 6-8: Přehled rozpadových poměrů $\delta k$ na zkoumaných lokalitách pro akceptační řády $k = 0, \dots, 3$ . ....	88
Tab. 6-9: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení $k$ vozidel do mezer na okružním pásu JOK v Blansku.....	90
Tab. 6-10: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení $k$ vozidel do mezer na okružním pásu JOK v Brně-Bohunicích. ....	91
Tab. 6-11: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení $k$ vozidel do mezer na okružním pásu JOK v Břeclavi. ....	92
Tab. 6-12: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení $k$ vozidel do mezer na okružním pásu JOK v Černé Hoře.....	93
Tab. 6-13: Vyhodnocení fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení $k$ vozidel do mezer na okružním pásu JOK v Kuřimi.....	94
Tab. 6-14: Souhrnná tabulka výsledků fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu v různých hustotních pásmech.....	95
Tab. 6-15: Souhrnná tabulka výsledků fitovací procedury hustoty pravděpodobnosti zařazení $k$ vozidel do mezer na okružním pásu.....	95

## 10 Seznam použitých zdrojů

1. **Mauro, Raffaele.** *Calculation of Roundabouts: Capacity, Waiting Phenomena and Reliability.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. ISBN 978-3-642-04550-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-04551-6\_2.
2. **Siegloch, W.** *Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung: [Capacity calculations at unsignalized intersections].* Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 154. Bundesminister für Verkehr, 1973.
3. **Grabe, W.** *Leistungsermittlung von nicht lichtsignalgeregelten Knotenpunkten des Strassenverkehrs.* Bielefeld : Kirchbaum Verlag, 1954.
4. **Harders, J.** *Die Leistungsfähigkeit nicht signalregelter städtischer Verkehrsknoten.* Strassenbau und Strassenverkehrstechnik. Bundesminister für Verkehr, 1968, (76).
5. **Bartoš, Luděk.** *Poznátky z výzkumu kapacity vjezdu do okružní křižovatky.* Dopravní inženýrství [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <http://www.dopravniinzenyrstvi.cz/clanky/poznacky-z-vyzkumu-kapacity-vjezdu-do-okruzni-krizovatky/>.
6. **Bartoš, Luděk.** *Technické podmínky TP 234: Posuzování kapacity okružních křižovatek.* Liberec: EDIP, 2011, 56 s. ISBN 978-80-87394-02-1. Dostupné také z: [http://www.pjpk.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_234\\_2011\\_09.pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_234_2011_09.pdf).
7. **Bartoš, Luděk, Jan Martolos, Aleš Richtr a Petr Kolečko.** *Technické podmínky TP 188 Posuzování kapacity křižovatek a úseků pozemních komunikací.* www.pjpk.cz: Ministerstvo dopravy, srpen 2018, 152 s. Dostupné také z: [http://www.pjpk.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_188\\_2018.pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_188_2018.pdf).
8. **Krbálek, Milan.** *Analytical derivation of time spectral rigidity for thermodynamic traffic gas.* Kybernetika [online]. PRAGUE 8: Kybernetika, 2010, 46(6), 1108-1121 [cit. 2022-08-20]. ISSN 0023-5954. Dostupné z: <https://www.kybernetika.cz/content/2010/6/1108/paper.pdf>.
9. **Krbálek, Milan a Dirk Helbing.** *Determination of interaction potentials in freeway traffic from steady-state statistics.* Physica A [online]. AMSTERDAM: Elsevier B.V, 2004, 333(1-4), 370-378 [cit. 2022-08-20]. ISSN 0378-4371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2003.10.059.
10. **Krbálek, Milan.** *Inter-vehicle gap statistics on signal-controlled crossroads.* Journal of physics. A, Mathematical and theoretical [online]. BRISTOL: IOP Publishing, 2008, 41(20), 205004 [cit. 2022-08-20]. ISSN 1751-8121. Dostupné z: doi:10.1088/1751-8113/41/20/205004.
11. **Krbálek, Milan.** *Equilibrium distributions in a thermodynamical traffic gas.* Journal of physics. A, Mathematical and theoretical [online]. BRISTOL: IOP Publishing, 2007, 40(22), 5813-5821 [cit. 2022-08-20]. ISSN 1751-8121. Dostupné z: doi:10.1088/1751-8113/40/22/004.



12. **Krbálek, Milan, Tomáš Hobza, Miroslav Patočka, Michaela Krbálková, Jiří Apeltauer a Nikola Groverová.** *Statistical aspects of gap-acceptance theory for unsignalized intersection capacity.* Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2022, 594. ISSN 03784371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2022.127043.
13. **Miller, Alan J. ed.** *Nine Estimators of Gap-Acceptance Parameters.* In: NEWELL, G. Proceedings of the International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation. Berkeley, California: Elsevier Amsterdam, 1971, s. 215-235.
14. **Brilon, Werner, Ralph Koenig a Rod J. Troutbeck.** *Useful estimation procedures for critical gaps.* In: Transportation Research Part A: Policy and Practice. Bochum: PERGAMON, 1999, s. 161-186. ISSN 09658564. Dostupné z: doi:10.1016/S0965-8564(98)00048-2.
15. **Groverová, Nikola.** *Inovativní přístup k metodice kapacitních výpočtů pro neřízenou stykovou křižovatku.* Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. Vedoucí práce Doc. Mgr. Milan Krbálek, Ph.D.
16. **Akcelik, Rahmi.** *A Review of Gap-Acceptance Capacity Models.* CAITR 2007. Adelaide: University of South Australia, 2008, 29, 24.
17. **Beanland, Vanessa, Michael G Lenné, Nimmi Candappa a Bruce Corben.** *Gap acceptance at stop-controlled T-intersections in a simulated rural environment. Transportation research. Part F, Traffic psychology and behaviour [online]. OXFORD: Elsevier India Pvt, 2013, 20, 80-89 [cit. 2022-08-20].* ISSN 1369-8478. Dostupné z: doi:10.1016/j.trf.2013.05.006.
18. **Hewitt, R. H.** *Measuring Critical Gap.* Transportation science [online]. INFORMS, 1983, 17(1), 87-109 [cit. 2022-08-18]. ISSN 0041-1655. Dostupné z: doi:10.1287/trsc.17.1.87.
19. **Hewitt, R. H.** *A comparison between some methods of measuring critical gap.* Traffic Engineering and Control. 1985, (26(1), 13 - 22.
20. **Troutbeck, Rod J. a Werner Brilon.** *Unsignalized intersection theory.* In: . 8-1 - 8-47 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: <http://tft.eng.usf.edu/docs/chap8.pdf>.
21. *Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen: HBS. Ausg. 2001, Fassung 2009.* Köln: FGSV-Verl, 2009. ISBN 978-394-1790-353.
22. **Hála, Martin.** *Způsob stanovení hodnoty kritického časového odstupu.* Silniční obzor. Praha: Česká silniční společnost, 2009, 70(7/8), 170 - 174. ISSN 0322-715447320..
23. *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Köln: FGSV, 2015. ISBN 978-3-86446-103-3.*
24. *ČSN 73 6102 ed. 2 Projektování křižovatek na pozemních komunikacích. 2. vydání.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
25. National research council. *HCM 2010: Highway Capacity Manual.* 5. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2010. ISBN 9780309160773..

26. Transportation research board. *Highway Capacity Manual 6th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. 6. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2016. ISBN 978-0-309-36997-8. Dostupné z: doi:10.17226/24798.
27. *Handbuch für die bemessung von Strassenverkehrsanlagen: HBS. Fassung 2005*. Köln: FGSV, 2001, 1 sv. ISBN 3-937356-44-4.
28. **Medelská, Viera**. *Dopravné inžinierstvo*. Bratislava: Alfa, 1991. Edícia stavebníckej literatúry (Alfa). ISBN 80-050-0737-X.
29. **Drew, D. R.** *Traffic Flow Theory and Control*. McGraw-Hill, New York 1966.
30. **Haight, F. A.** *Mathematical Theory of Traffic Flow*. Academic Press, New York, London 1963.
31. **Schnabel, Werner a Dieter Lohse**. *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 1: Straßenverkehrstechnik*. 3. přepracované. Berlín: Beuth, 2011, 636 s. ISBN 978-3-410-17271-0.
32. **Wen-Long, Jin**. *Introduction to Network Traffic Flow Theory: Principles, Concepts, Models, and Methods*. Elsevier Science, 2021, 282 s. ISBN 978-0-12-815840-1. Dostupné také z: <https://www.proquest.com/legacydocview/EBC/6550933?accountid=17115>.
33. TAČR STARFOS: Pokročilé matematicko-fyzikální metody modelování mikrostruktury dopravního proudu [online]. [Online] [cit. 2022-10-15]. Dostupné z: <https://starfos.tacr.cz/cs/project/CK01000152#project-main>.
34. **Krbálek, Milan, Jiří Apeltauer a Tomáš Apeltauer**. *Vliv třídy rozdělení časových odstupů na kapacitu neřízených křižovatek*. SILNICE ŽELEZNICE. 2017, (4), 90 - 92.
35. **Krbálek, Milan**. *Quantitative analysis of interaction range in vehicular flows*. Transportation Research Procedia [online]. Elsevier B.V, 2017, 25, 1268-1275 [cit. 2022-08-17]. ISSN 2352-1465. Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2017.05.146.
36. **Krbálek, Milan**. *Matematické modelování dopravních systémů*. Praha, 2022. Skripta k předmětu MMDS. ČVUT v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
37. **LI, Li a Xiqun (Michael) CHEN**. *Vehicle headway modeling and its inferences in macroscopic/microscopic traffic flow theory: A survey*. Transportation research. Part C, Emerging technologies [online]. OXFORD: Elsevier India Pvt, 2017, 76, 170-188 [cit. 2022-08-20]. ISSN 0968-090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2017.01.007.
38. **Krbálek, Milan**. *Theoretical predictions for vehicular headways and their clusters*. Journal of physics. A, Mathematical and theoretical [online]. BRISTOL: IOP Publishing, 2013, 46(44), 445101-19 [cit. 2022-08-20]. ISSN 1751-8113. Dostupné z: doi:10.1088/1751-8113/46/44/445101.
39. **Krbálek, Milan, Jiří Apeltauer, Tomáš Apeltauer a Zuzana Szabová**. *Three methods for estimating a range of vehicular interactions*. Physica A [online]. AMSTERDAM: Elsevier B.V, 2018, 491, 112-126 [cit. 2022-08-20]. ISSN 0378-4371. Dostupné z: doi:10.1016/j.

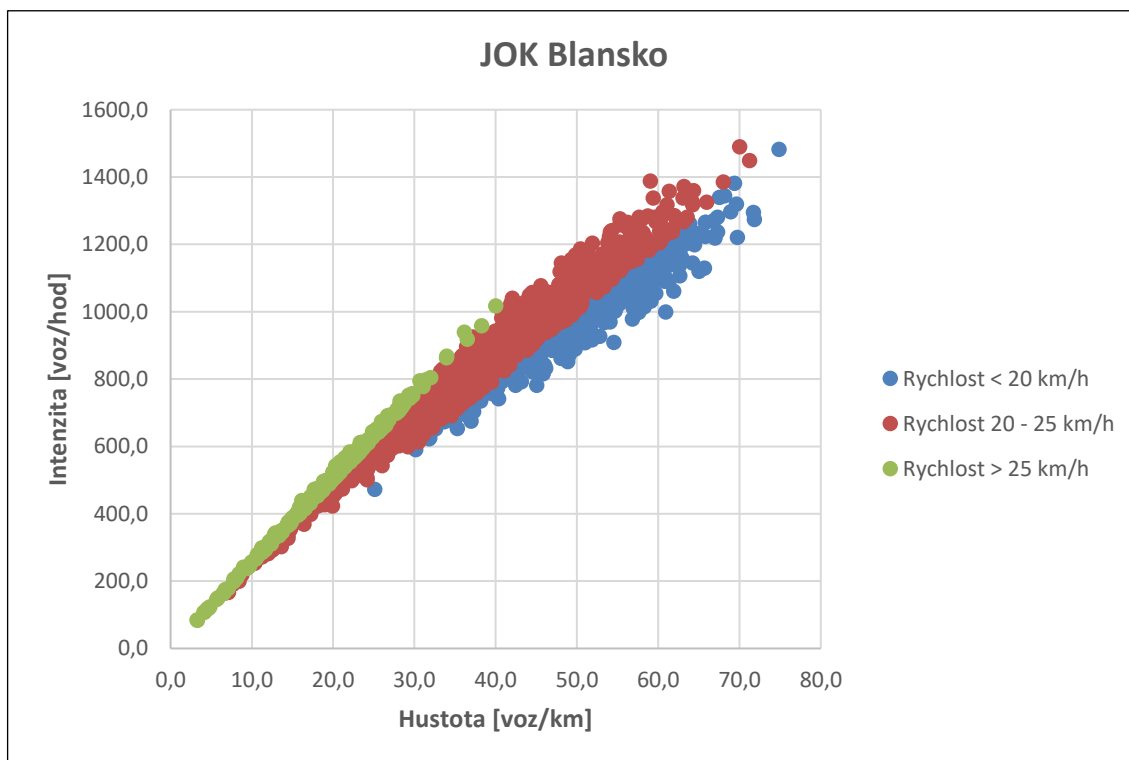
40. **LI, Li, Wang FA, Jiang RUI, Hu JIAN-MING a Ji YAN.** *A new car-following model yielding log-normal type headways distributions.* Chinese Physics B. 2010, 19(2). ISSN 1674-1056. Dostupné z: doi:10.1088/1674-1056/19/2/020513.
41. **Krbálek, Milan a Jiří Šleis.** *Vehicular headways on signalized intersections: theory, models, and reality.* Journal of physics. A, Mathematical and theoretical [online]. BRISTOL: IOP Publishing, 2014, 48(1), 15101-22 [cit. 2022-08-20]. ISSN 1751-8113. Dostupné z: doi:10.1088/1751-8113/48/1/015101.
42. **Treiber, Martin a Arne Kesting.** *Traffic flow dynamics: data, models and simulation.* Heidelberg: Springer, 2013, 503 s. ISBN 978-3-642-32459-8.
43. **Kerner, Boris S.** *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control [online].* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009 [cit. 2022-08-21]. ISBN 978-3-642-02604-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-02605-8.
44. **Fisk, C.S a H.H Tan.** *Delay analysis for priority intersections.* Transportation research. Part B: methodological [online]. OXFORD: Elsevier, 1989, 23(6), 453-469 [cit. 2022-08-20]. ISSN 0191-2615. Dostupné z: doi:10.1016/0191-2615(89)90044-1.
45. **Spek, A.C.E, P.A Wieringa a W.H Janssen.** *Intersection approach speed and accident probability.* Transportation research. Part F, Traffic psychology and behaviour [online]. OXFORD: Elsevier India Pvt, 2006, 9(2), 155-171 [cit. 2022-08-20]. ISSN 1369-8478. Dostupné z: doi:10.1016/j.trf.2005.10.001.
46. **Alexander, Jennifer, Philip Barham a Ian Black.** *Factors influencing the probability of an incident at a junction: results from an interactive driving simulator. Accident analysis and prevention [online].* OXFORD: Elsevier, 2002, 34(6), 779-792 [cit. 2022-08-21]. ISSN 0001-4575. Dostupné z: doi:10.1016/S0001-4575(01)00078-1.
47. *Zákon č. 49/1997 Sb.: Zákon o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů.* In: . 1997, 17/1997..
48. *Zákon č. 361/2000 Sb.: Zákon o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů.* In: . 2000, 98/2000.
49. *Mapy Google: vrstva Provoz [online].* 2022 [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/>. [Online]
50. *Mapy.cz [online].* [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>. [Online]
51. *Ředitelství silnic a dálnic ČR: Sčítání dopravy [online].* [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.rsd.cz/web/guest/silnice-a-dalnice/scitani-dopravy#zalozka-celostatni-scitani-dopravy-2020>. [Online]
52. *Datový portál města Brna: Mapa cyklistických opatření [online].* [cit. 2022-09-02]. Dostupné z: <https://data.brno.cz/apps/cyklisticky%C3%A1-opat%C5%99en%C3%AD/explore>.

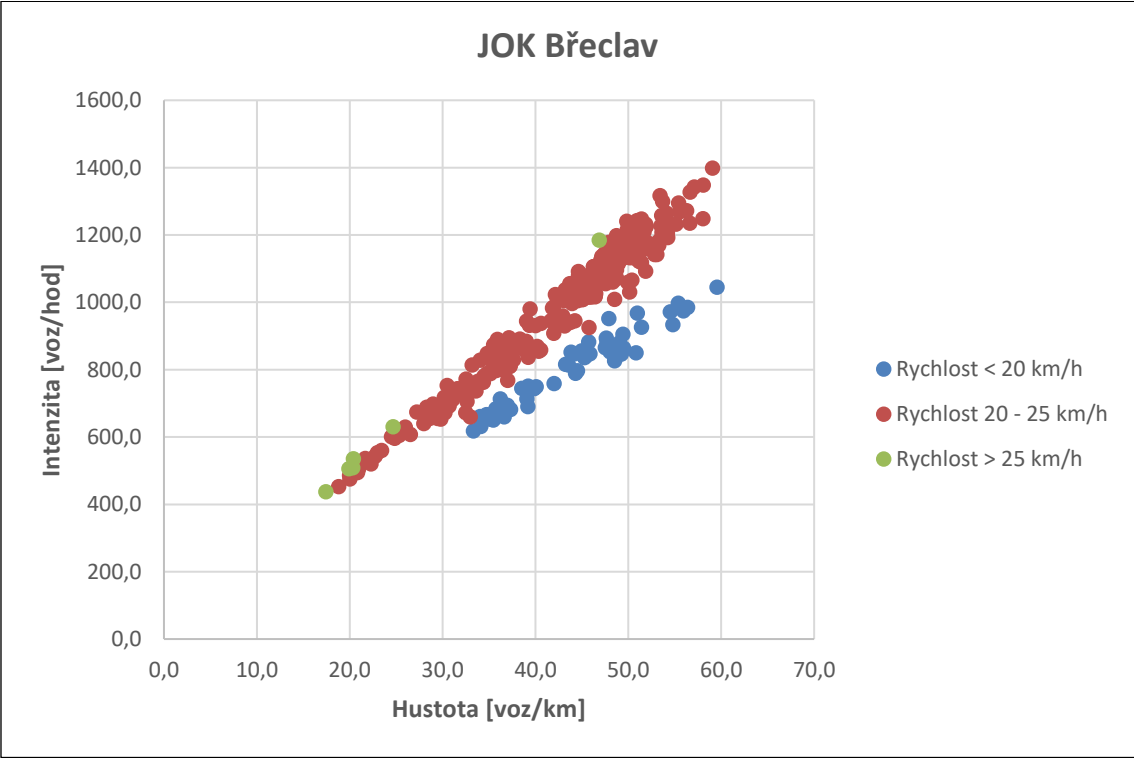
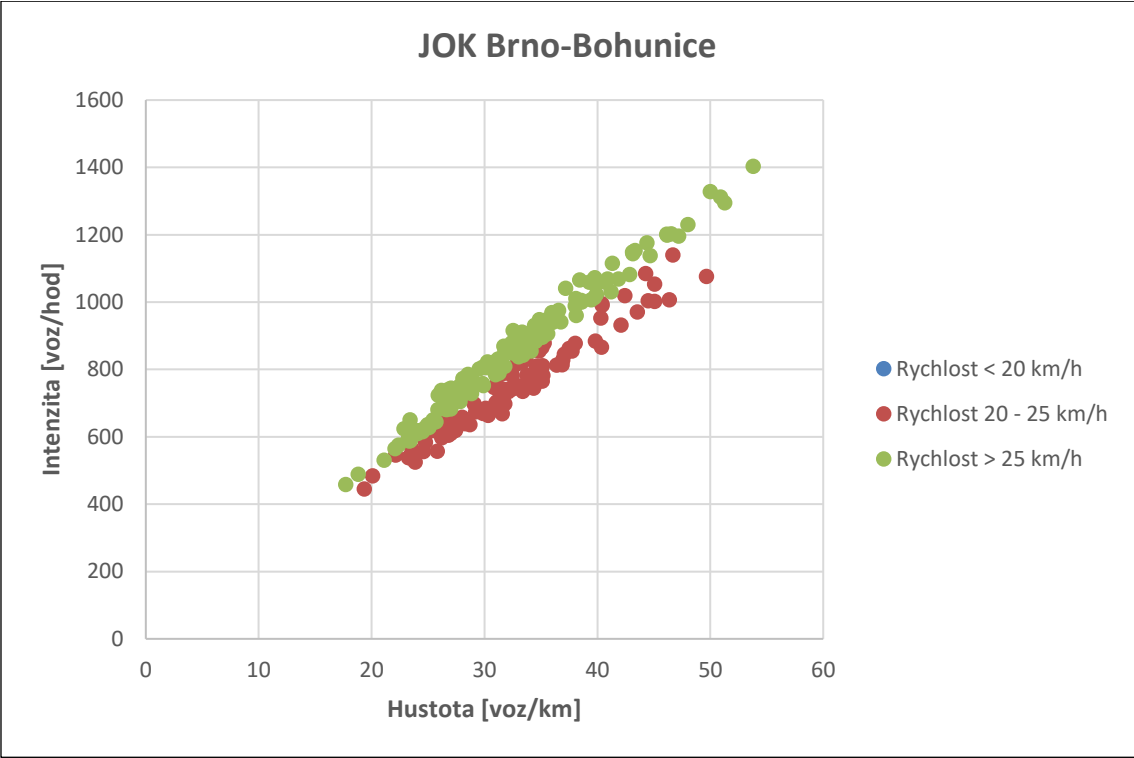
53. Data From Sky [online]. [Online] [cit. 2022-09-13]. Dostupné z: <https://datafromsky.com/>.
54. **Apeltauer, J., M. Všetěčka, I. Krčmová, P. Holcner a T. Apeltauer.** Využití autonomních systémů při podrobném dopravně-inženýrském průzkumu křižovatek. *Silniční obzor. Česká silniční společnost*, 2013, 2013(3), 72-75. ISSN 0322-7154.
55. **Florek, Matej.** *Analýza reakčních dob řidičů v reálném silničním provozu [online]*. Brno, 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/207725>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Ústav soudního inženýrství. Odbor znaleství ve strojírenství, analýza dopravních nehod a oceňování motorových vozidel. Vedoucí práce Michal Belák.
56. **Krbálek, Milan a Tomáš Hobza.** *Inner structure of vehicular ensembles and random matrix theory*. Physics Letters A. 2016, Issue 21(Volume 380), 1839-1847. ISSN ISSN 0375-9601. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.03.037](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.03.037).
57. **Apeltauer, Jiří.** *Statistické vlastnosti mikrostruktury dopravního proudu*. Brno, 2018, 88 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.
58. *Frontline Solvers: EXCEL SOLVER - NON-SMOOTH OPTIMIZATION [online]*. [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: <https://www.frontsys.com/excel-solver-non-smooth-optimization>.
59. Konvoluce. Wikipedie [online]. [cit. 2022-09-19]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Konvoluce>. [Online]
60. **Ashworth, Robert.** *The Analysis and Interpretation of Gap Acceptance Data. Transportation science [online]*. INFORMS, 1970, 4(3), 270-280 [cit. 2022-08-20]. ISSN 0041-1655. Dostupné z: [doi:10.1287/trsc.4.3.270](https://doi.org/10.1287/trsc.4.3.270).
61. **Maurya, Akhilesh Kumar, Harsh J. Amin a Arvind Kumar.** *Estimation of Critical Gap for through Movement at Four Leg Uncontrolled Intersection*. Transportation Research Procedia [online]. Elsevier B.V, 2016, 17, 203-212 [cit. 2022-08-20]. ISSN 2352-1465. Dostupné z: [doi:10.1016/j.trpro.2016.11.076](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.076).

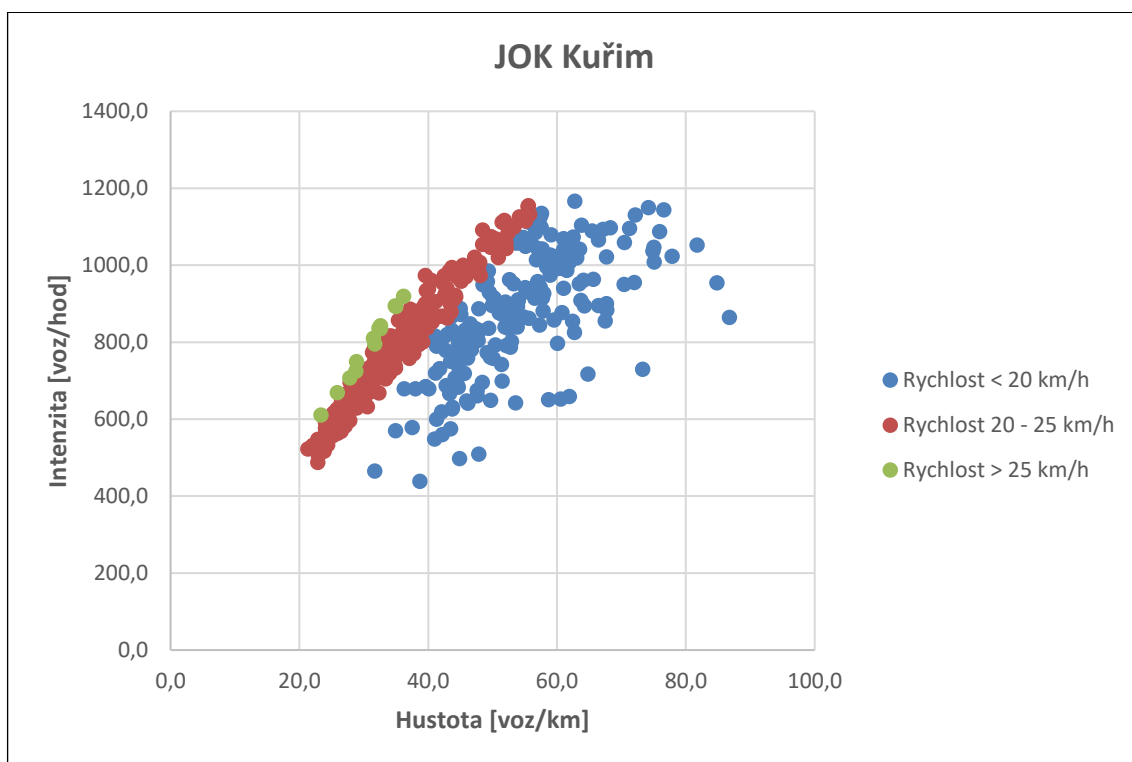
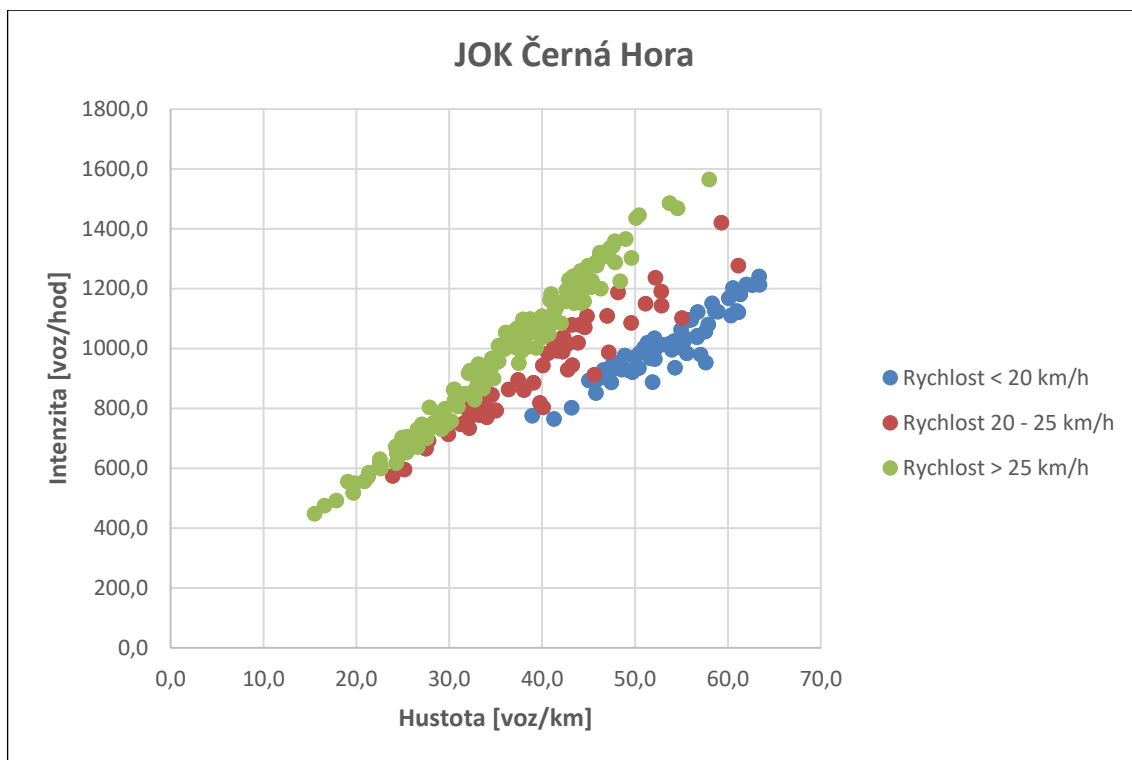
## 11 Přílohy

### 11.1 Fundamentální diagramy

Pro dokreslení představy o charakteru dopravního proudu na okružním pásu sledovaných jednopruhových okružních křižovek jsou dále uvedeny fundamentální diagramy  $J/\rho$ . Každý bod v grafu reprezentuje 50-tici následujících se vozidel, pro která byly zjištěny tři základní charakteristiky – rychlost  $v$ , hustota  $\rho$  a intenzita  $J$ . V grafech  $J/\rho$  jsou měření rozdělena pro lepší přehlednost do tří rychlostních pásem. Z grafů je možné zřetelně vyčíst, jaké dopravní režimy na zkoumaných křižovatkách v době průzkumu převažovaly. Například u křižovatky JOK Brno-Bohunice zcela chybí měření v rychlostním pásmu  $v < 20$  km/h, což lze vysvětlit velkým průměrem okružního pásu, který umožní vyšší rychlosti průjezdu a absencí výskytu vzduť dopravního proudu na výjezdech z křižovatky. Naopak u JOK Kuřim je poměrně velký podíl měření, kde rychlost klesla pod 20 km/h, což odpovídá pozorování. Na křižovatce došlo několikrát ke vzduť dopravního proudu na výjezdu směrem do centra města. Na fundamentálním diagramu pro JOK Blansko jsou hojně zastoupeny všechny fáze dopravního proudu a to z toho důvodu, že se zde podařilo zajistit více než měsíční kontinuální sledování křižovatky.

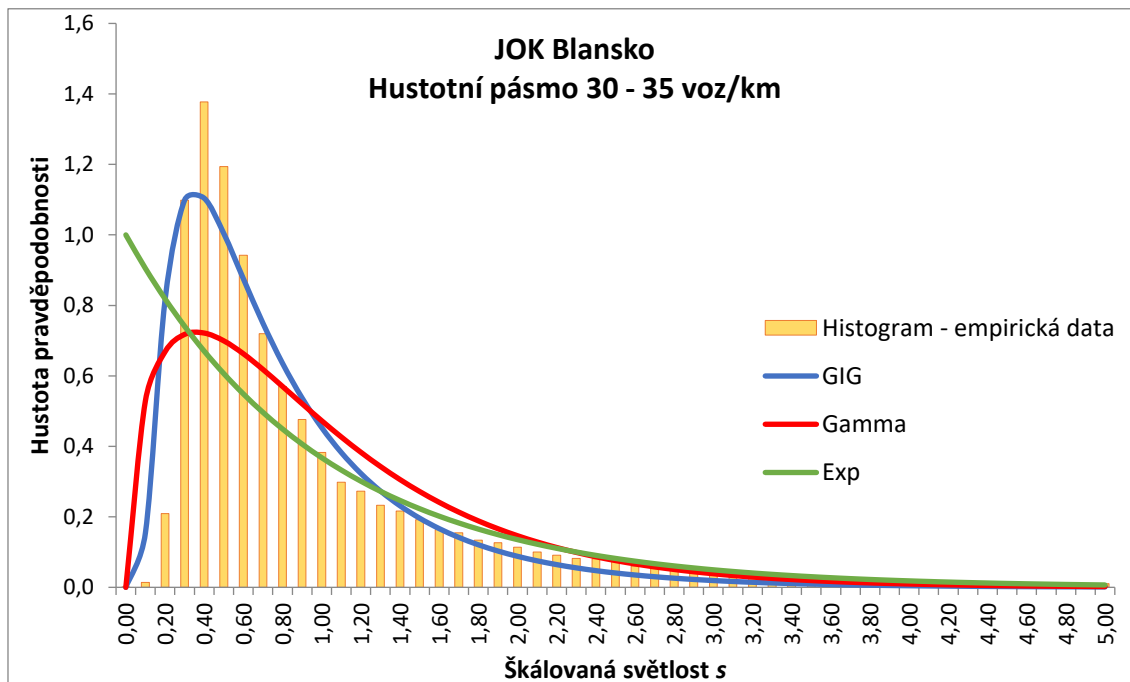
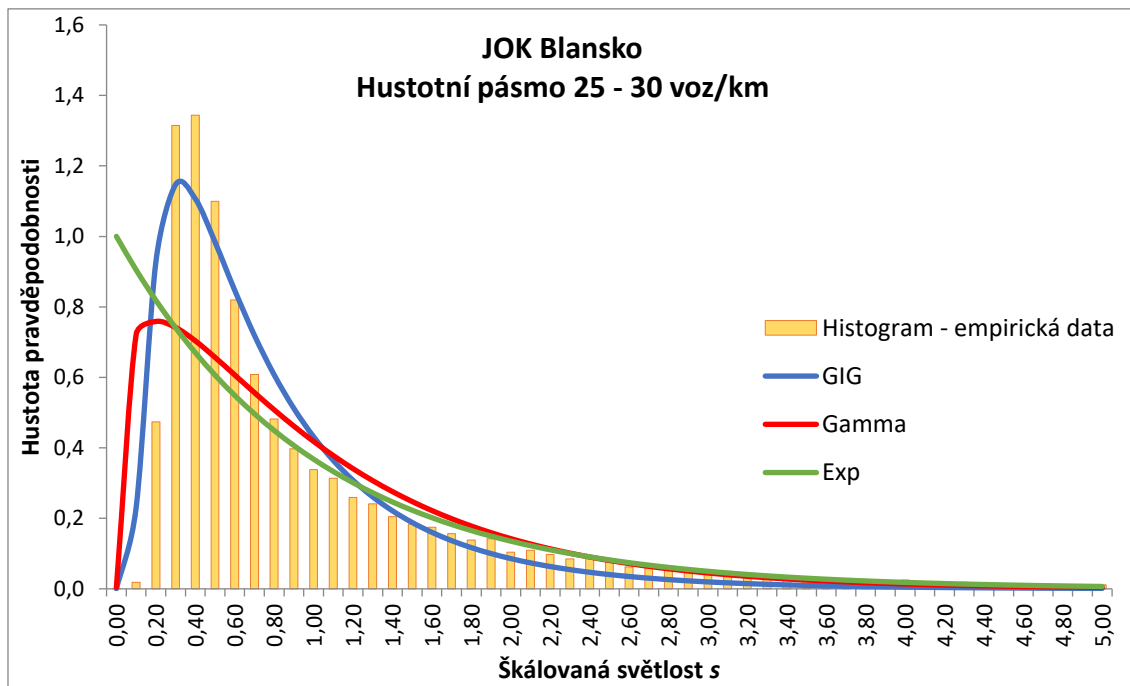




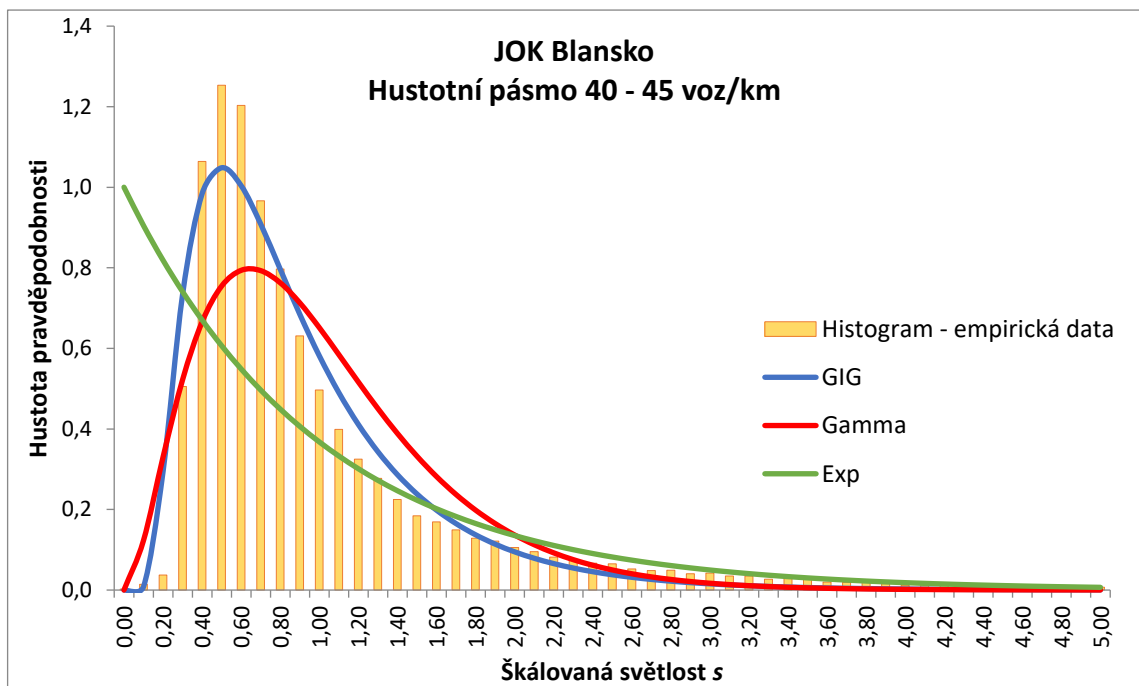
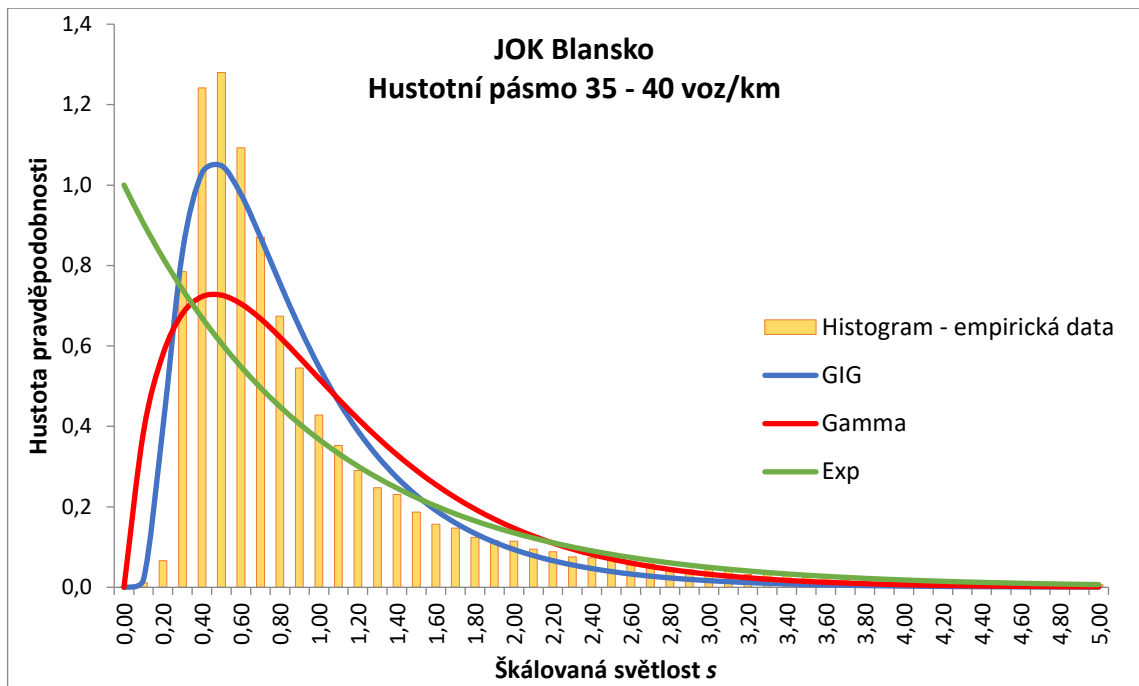


## 11.2 Aproximace hustoty pravděpodobnosti výskytu mezer na okružním pásu

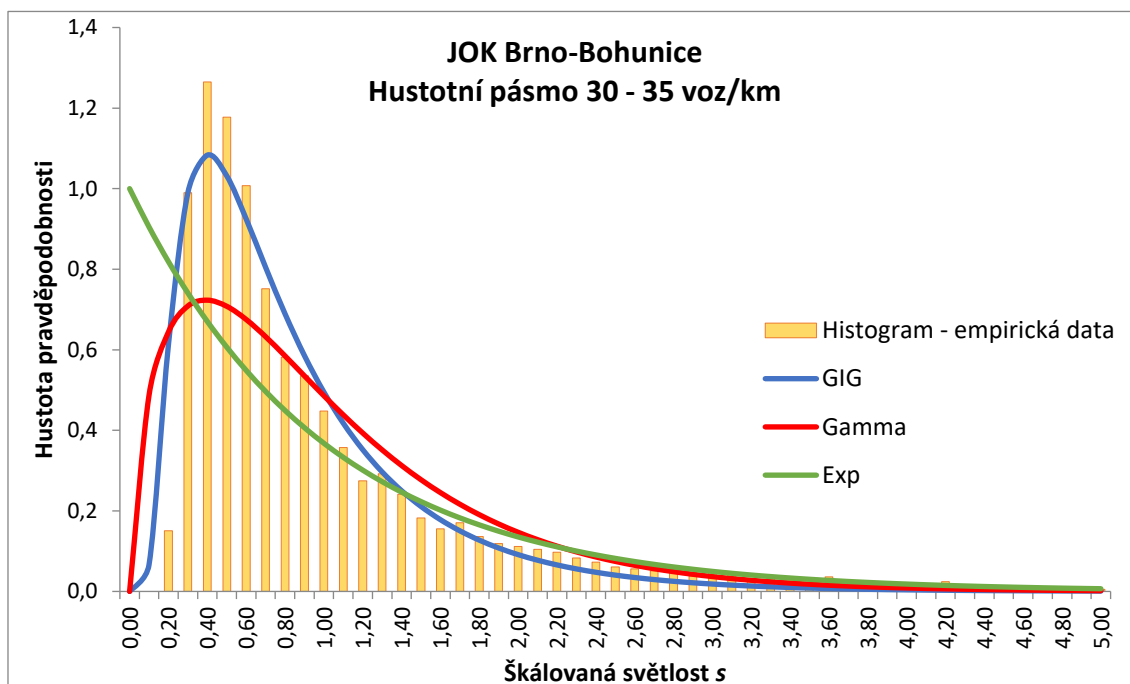
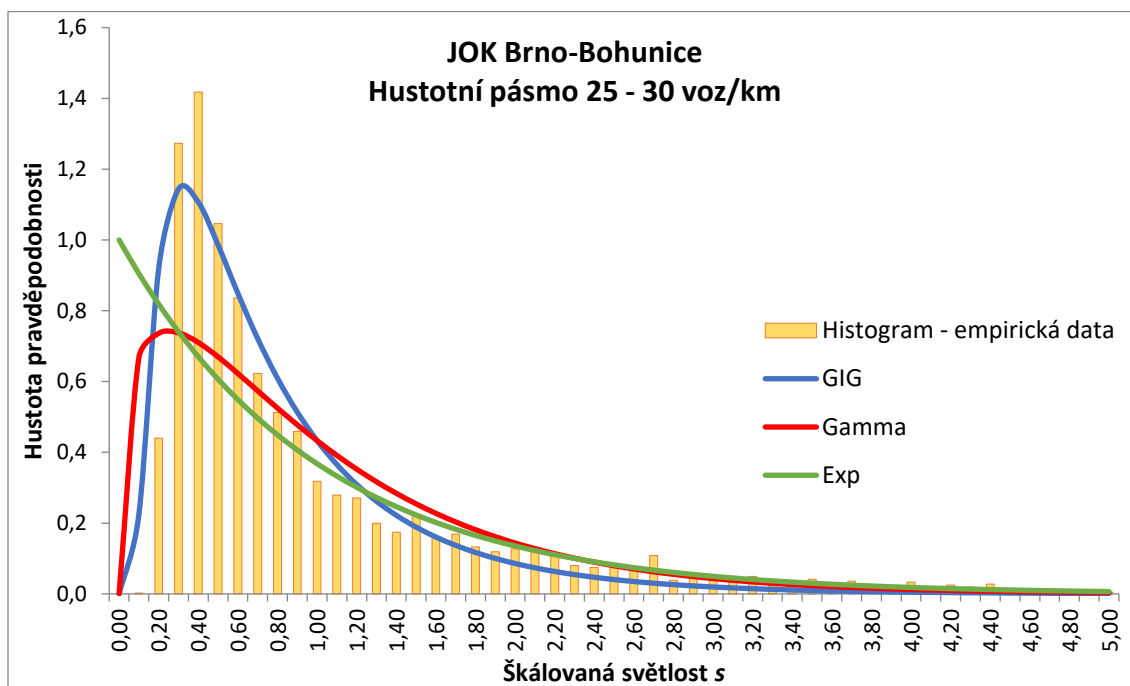
### 11.2.1 JOK Blansko

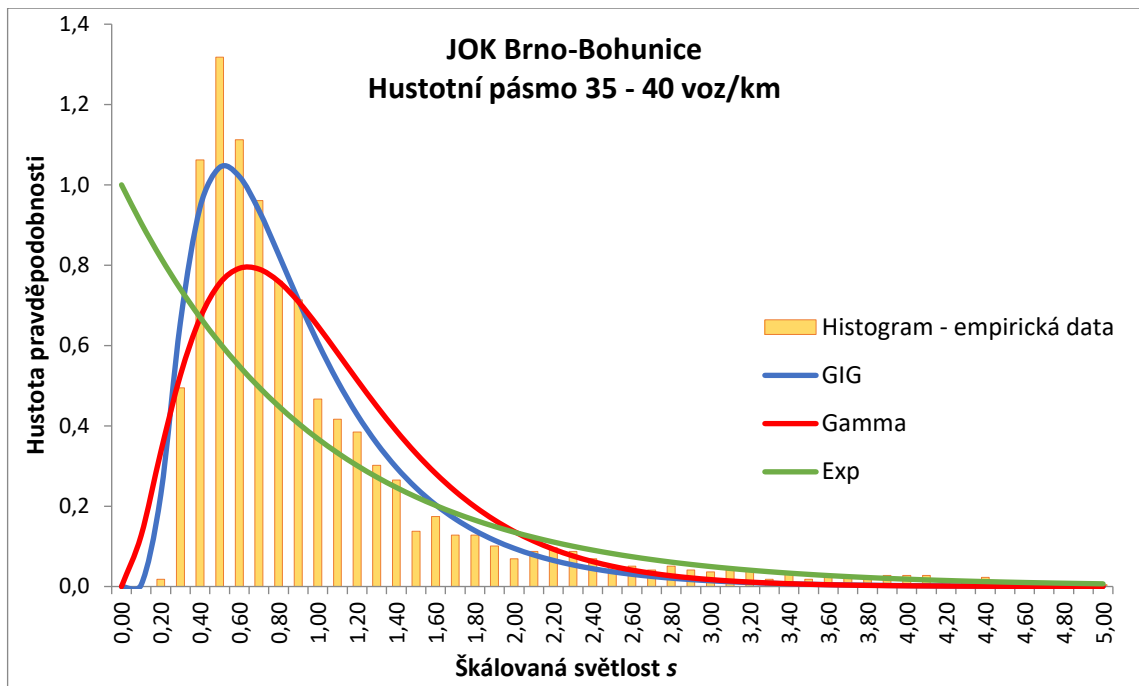




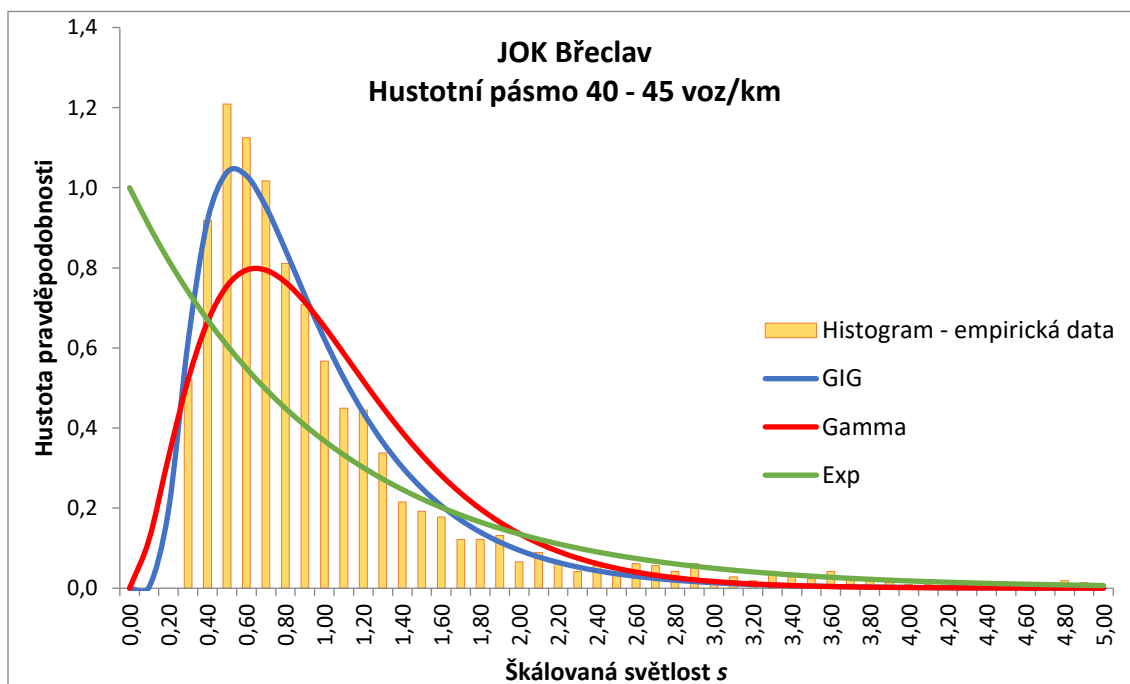
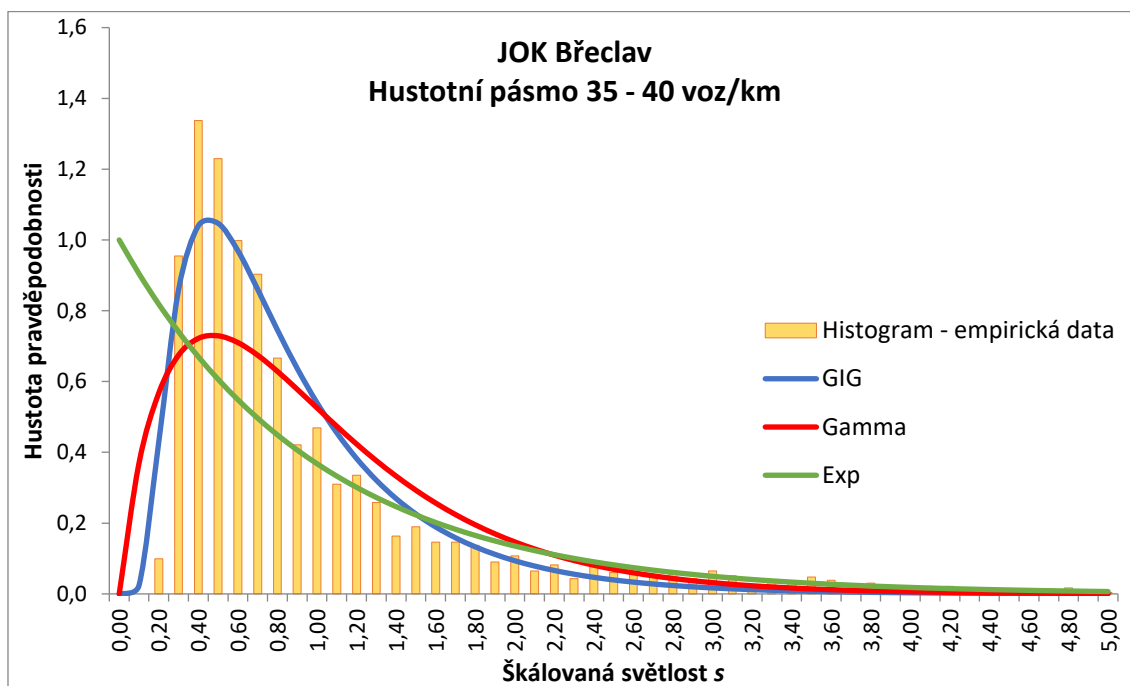


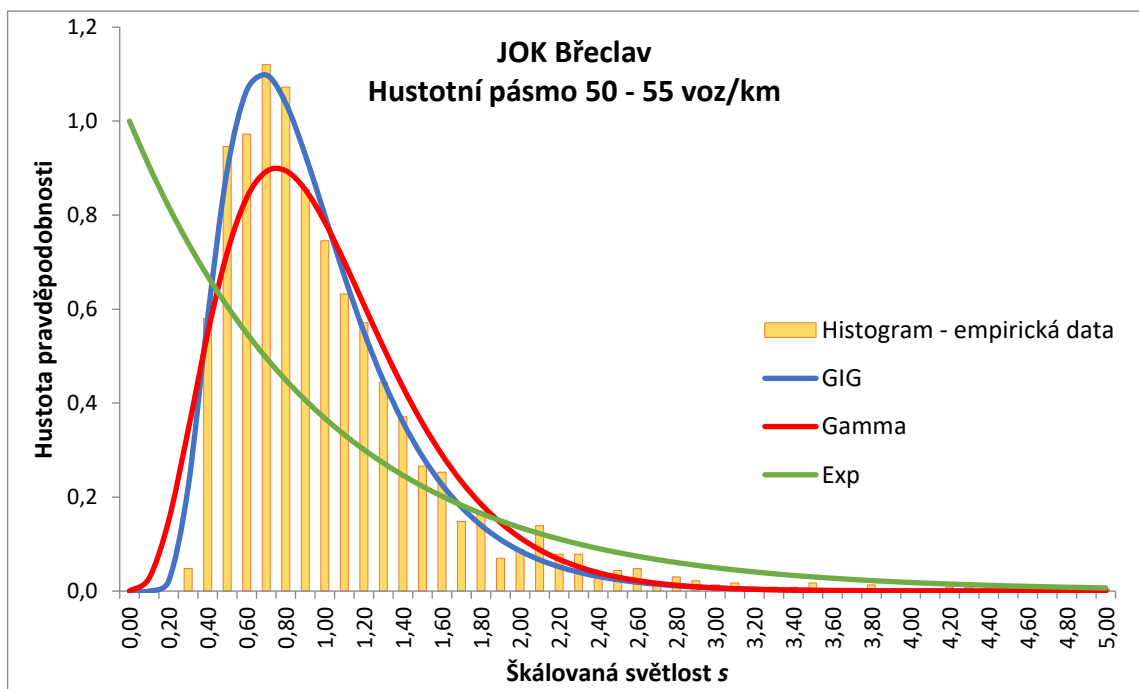
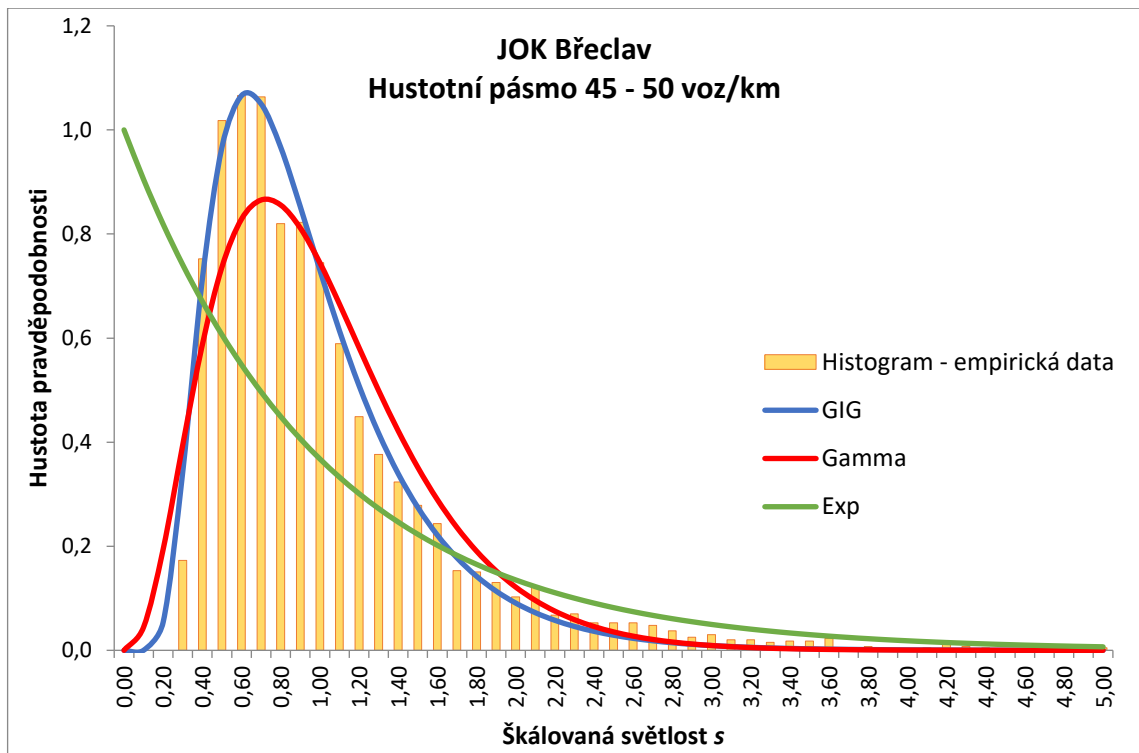
## 11.2.2 JOK Brno-Bohunice



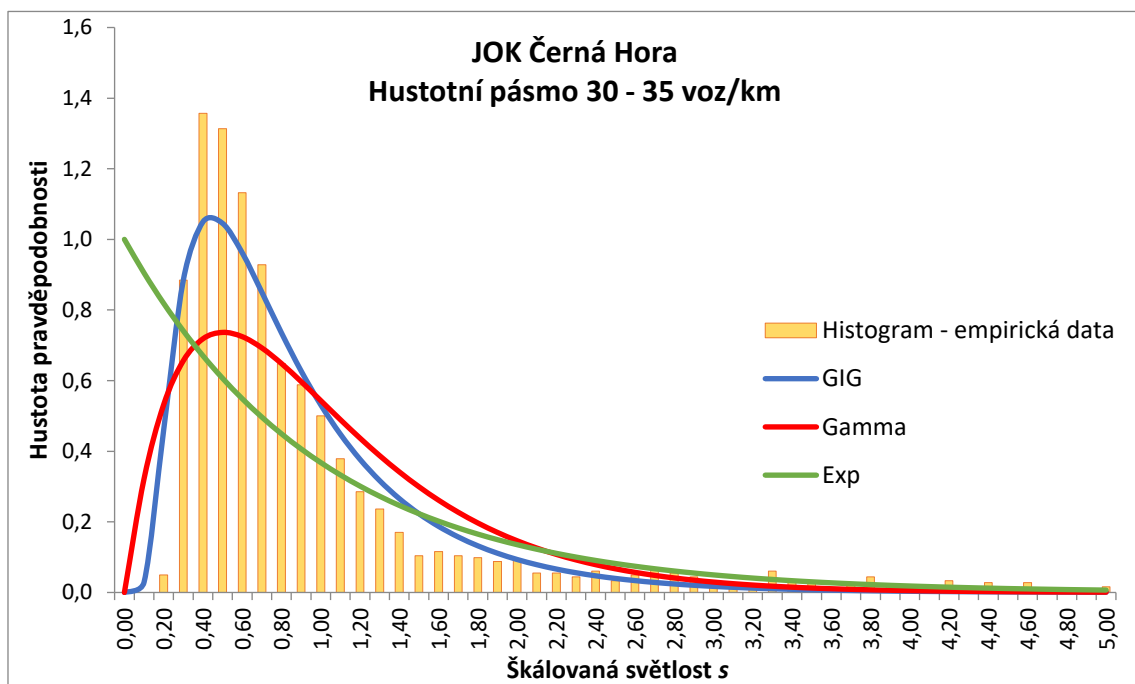
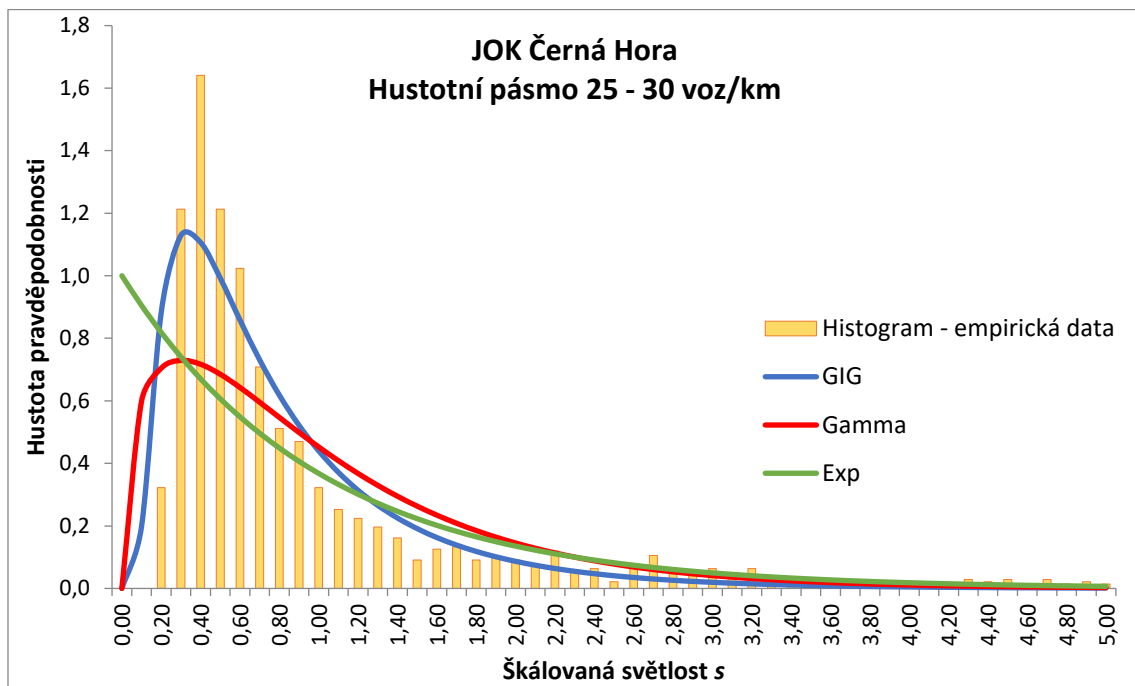


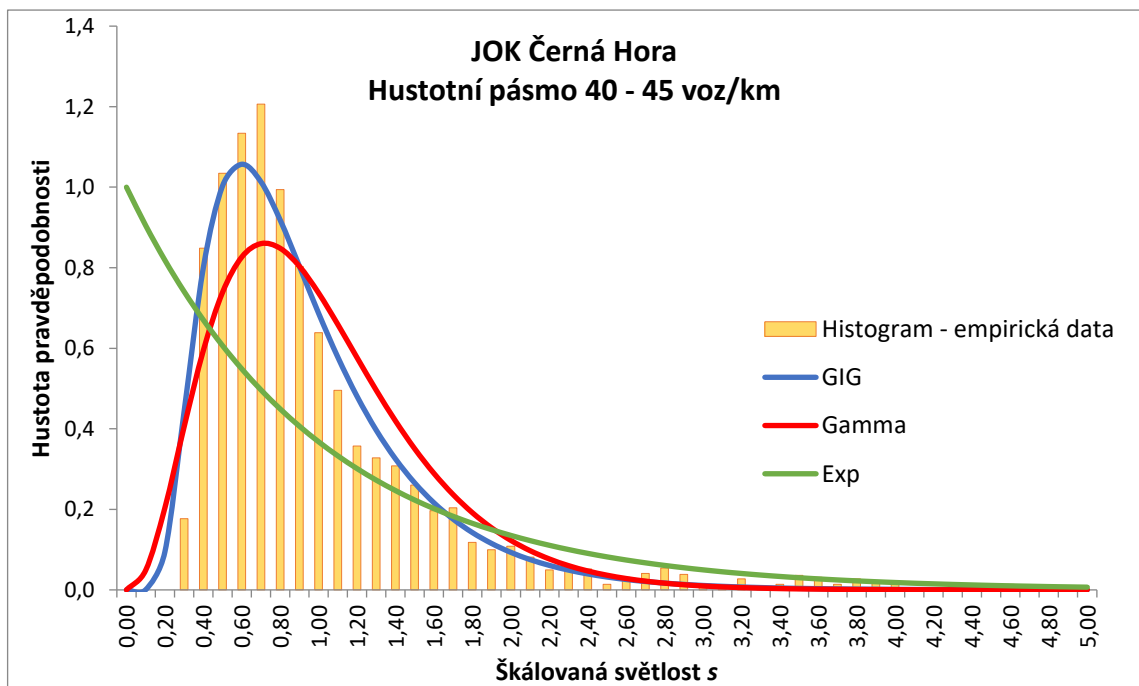
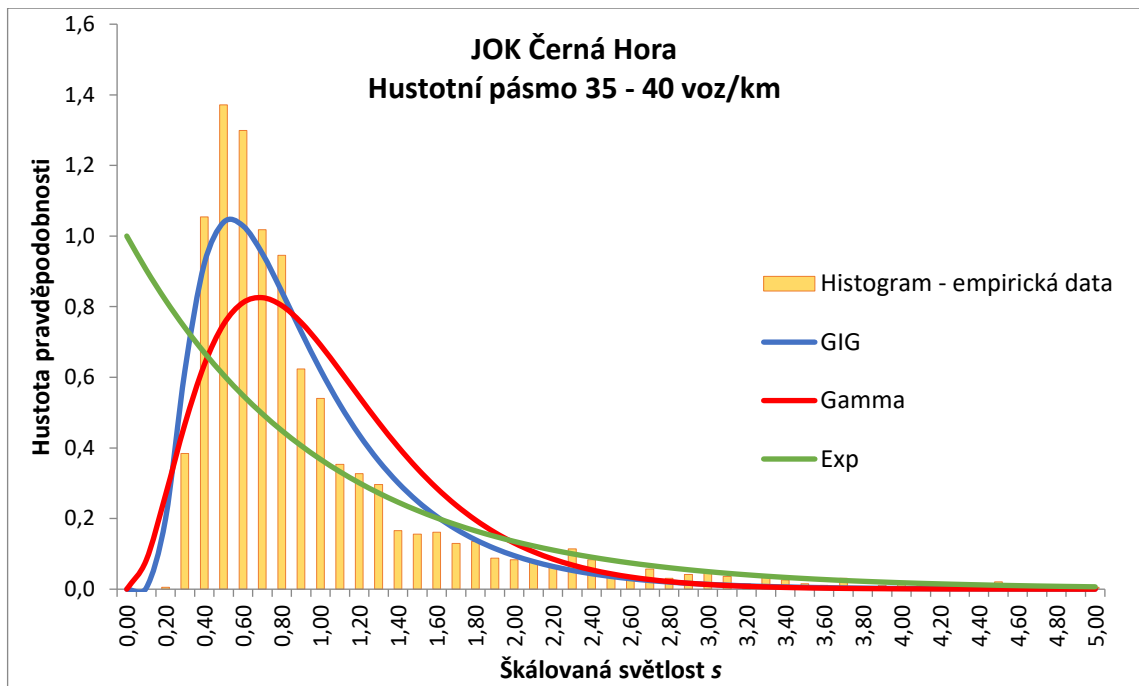
### 11.2.3 JOK Břeclav

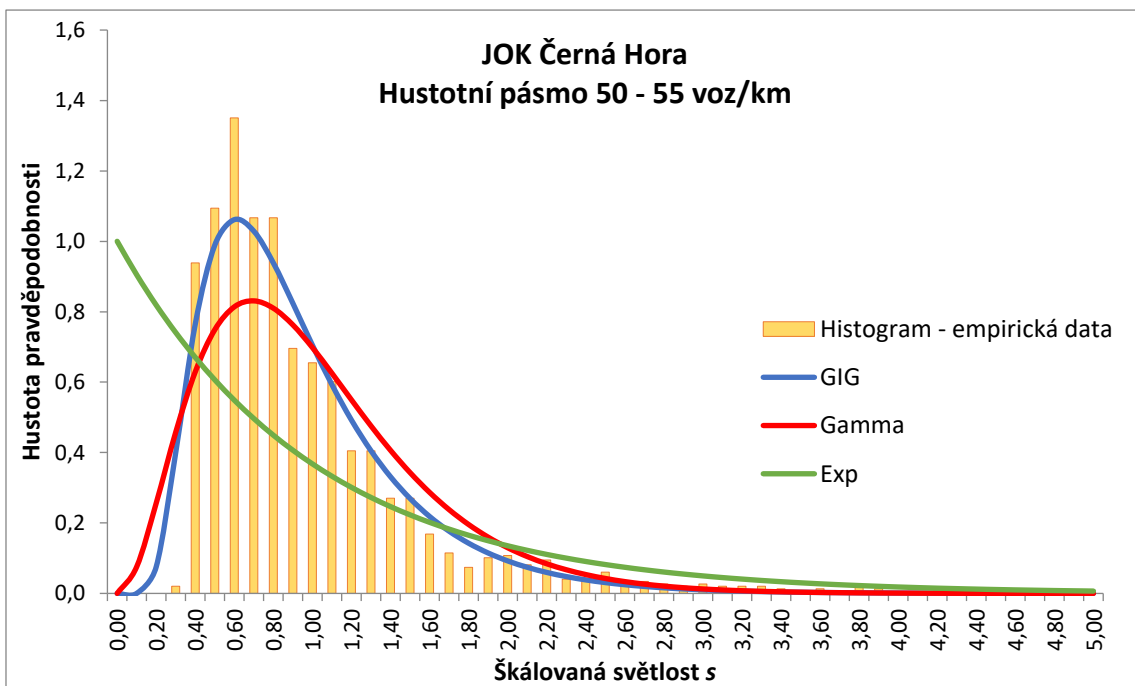
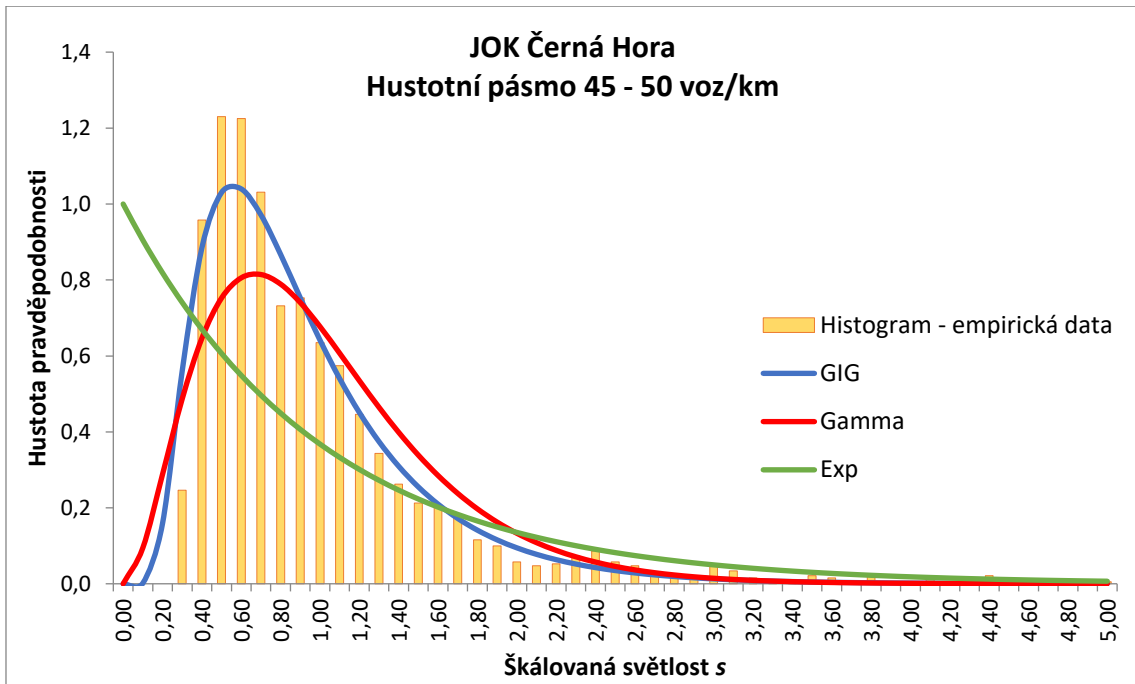




## 11.2.4 JOK Černá Hora

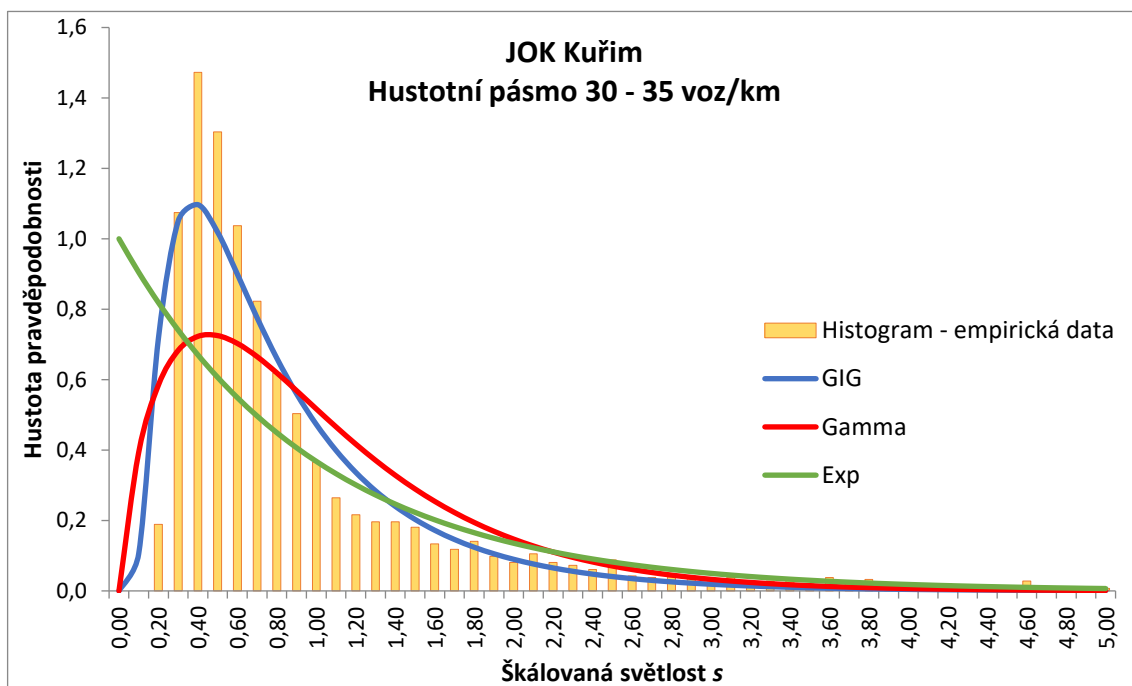
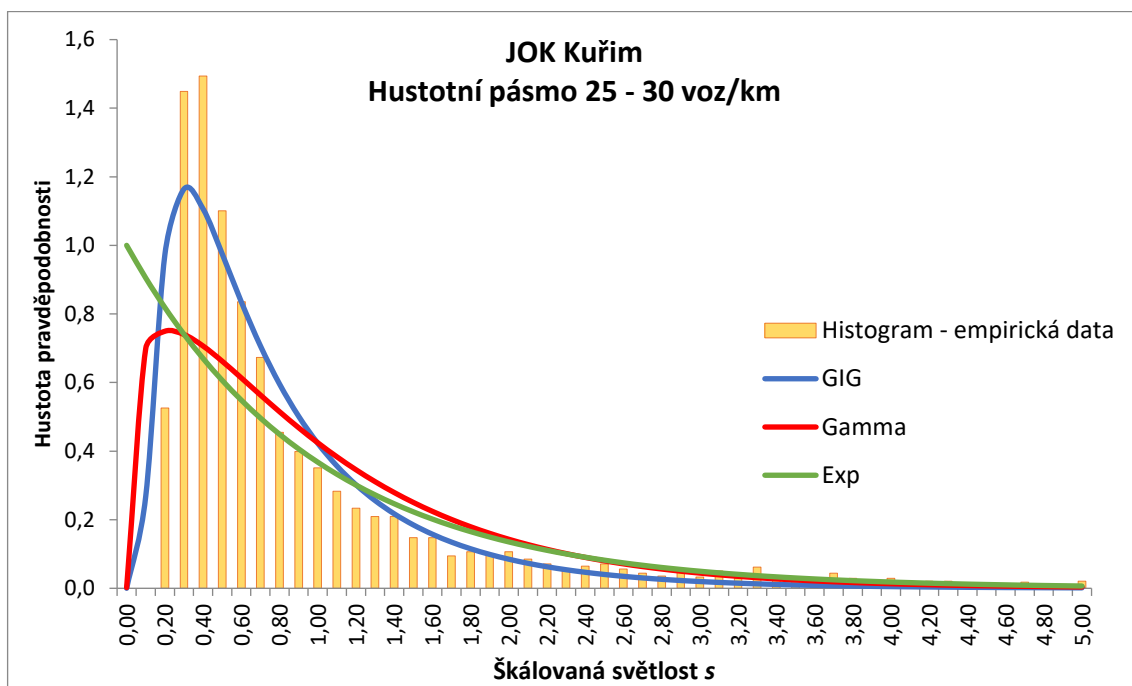


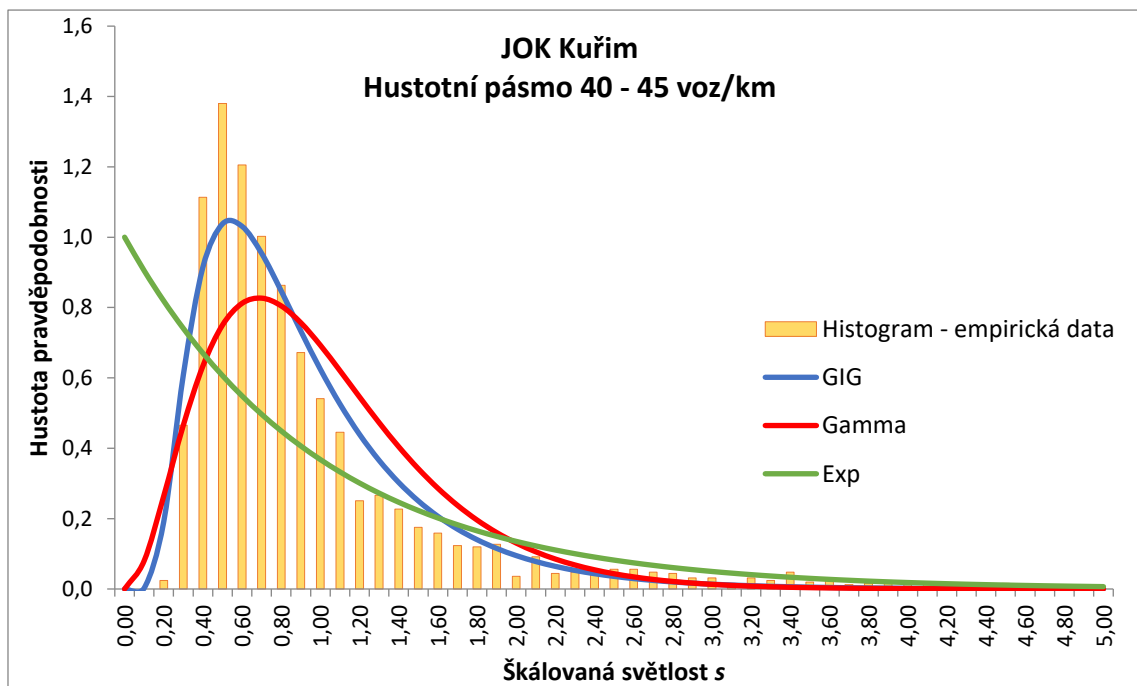
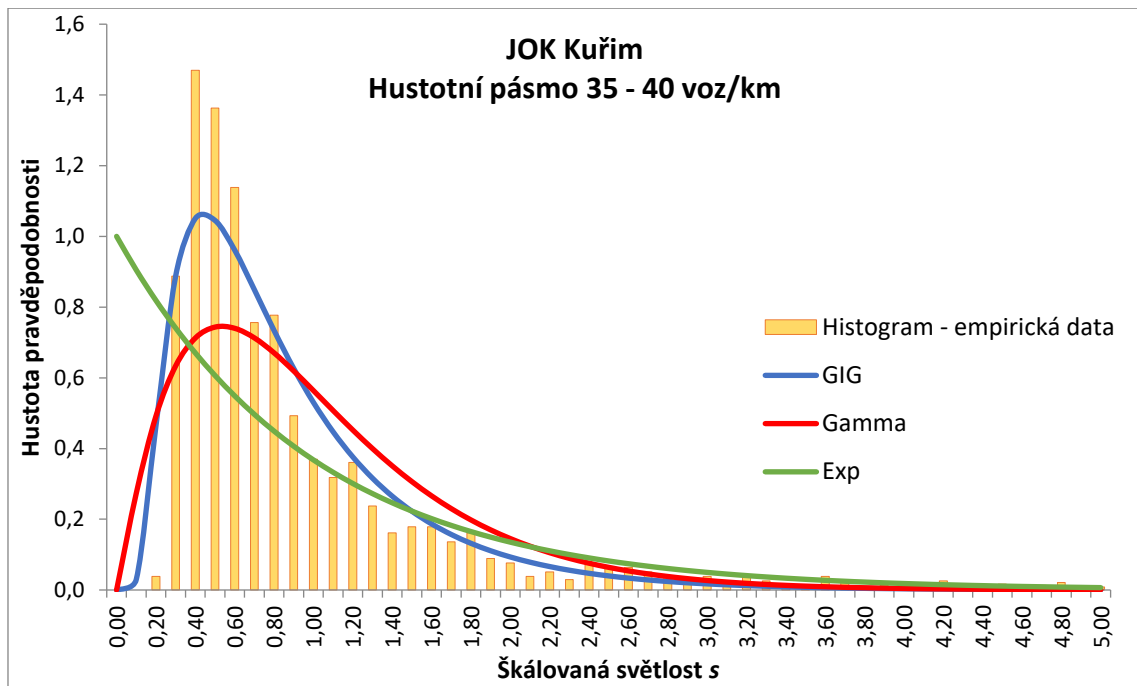


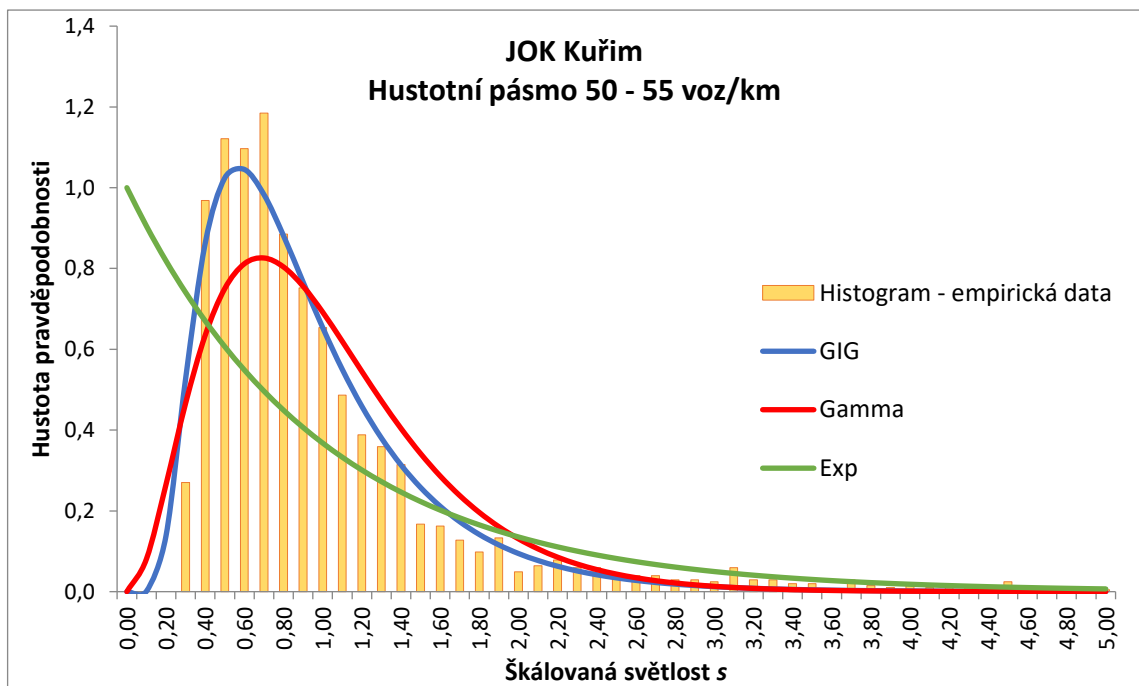
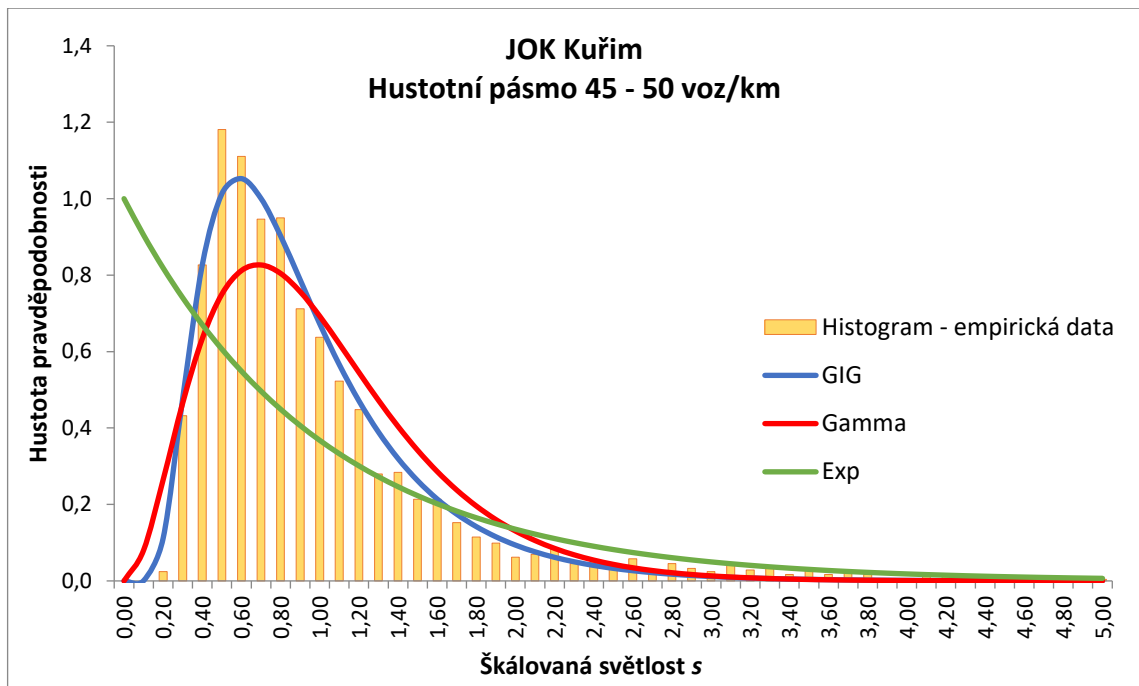




### 11.2.5 JOK Kuřim

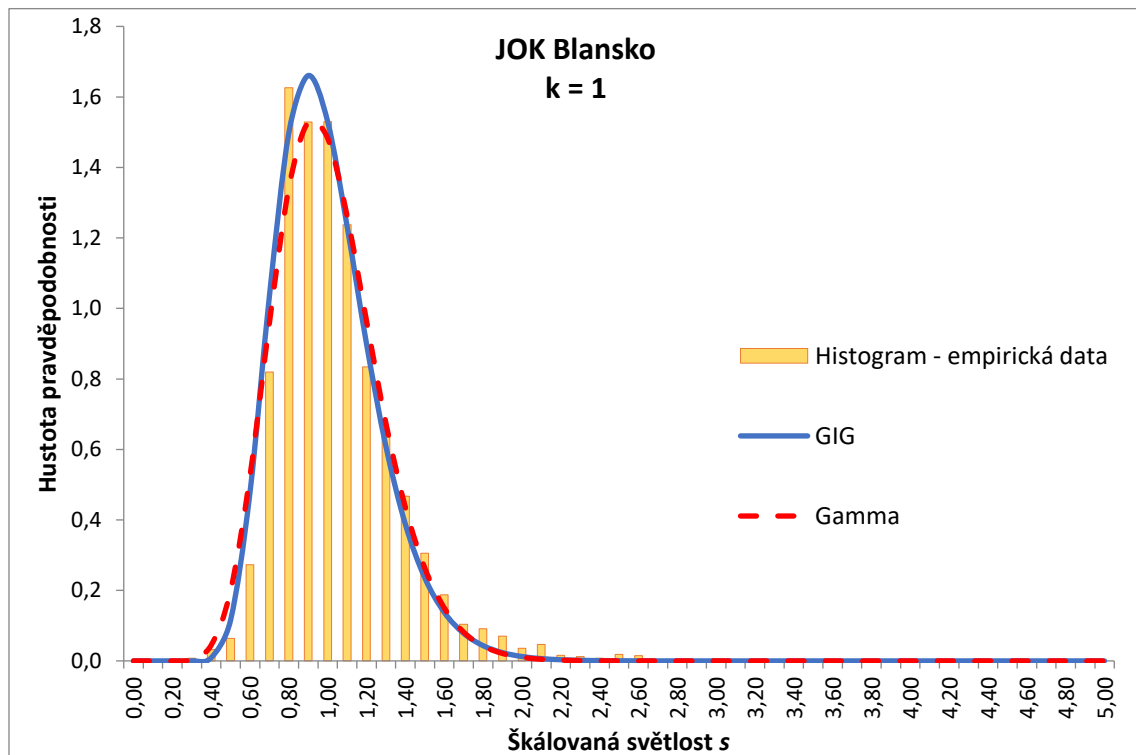
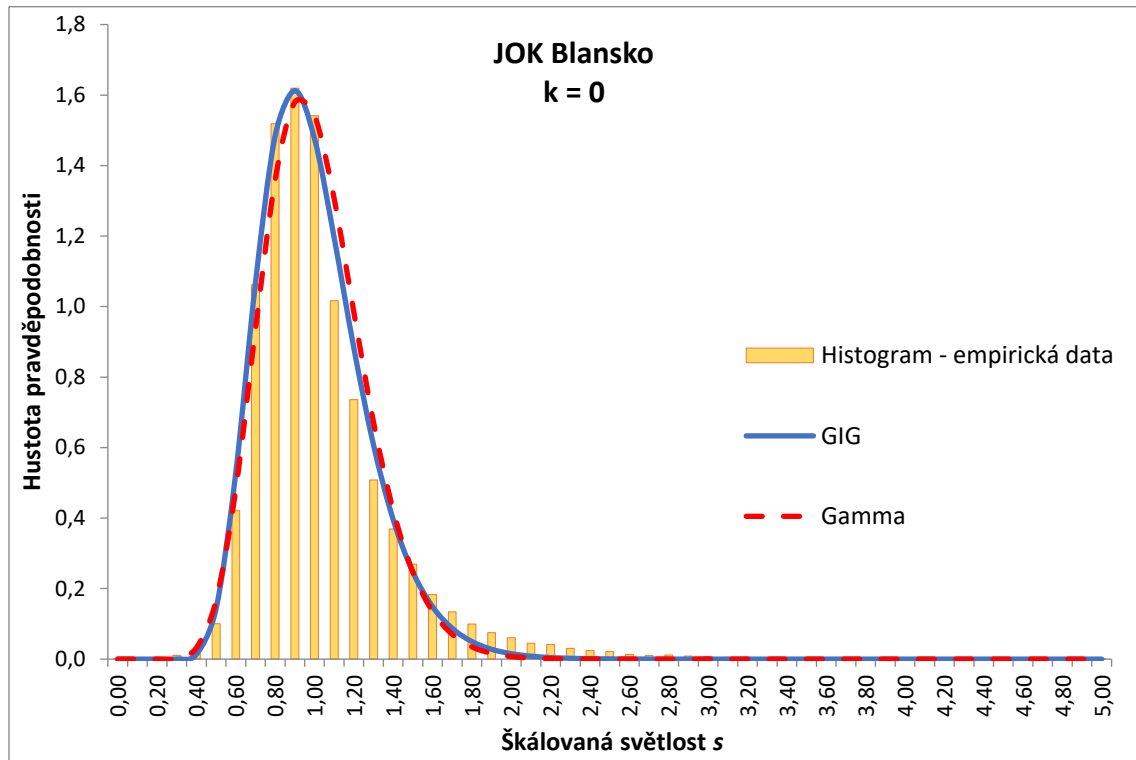


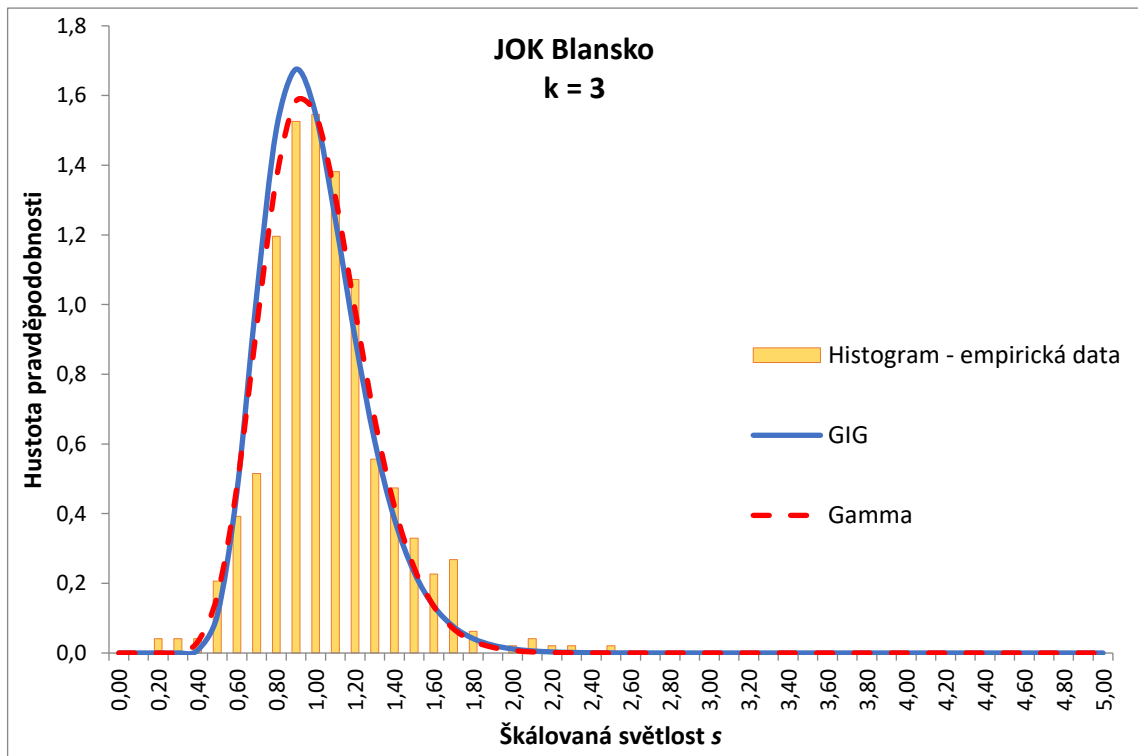
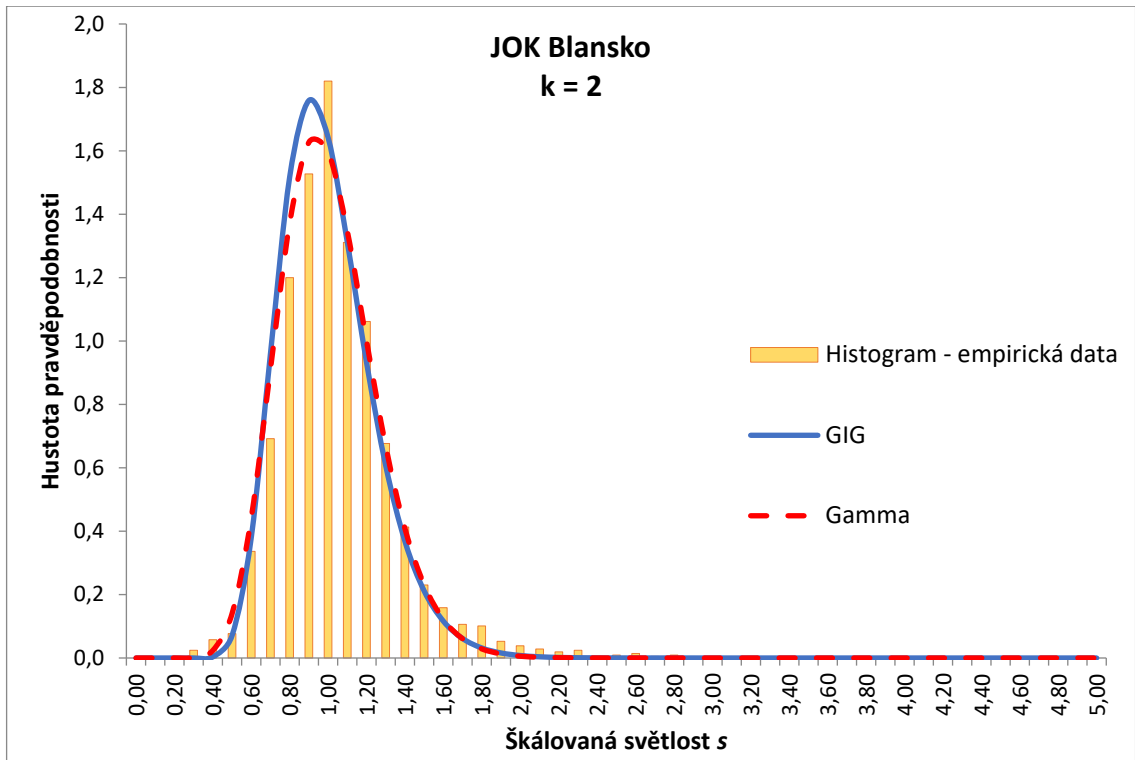


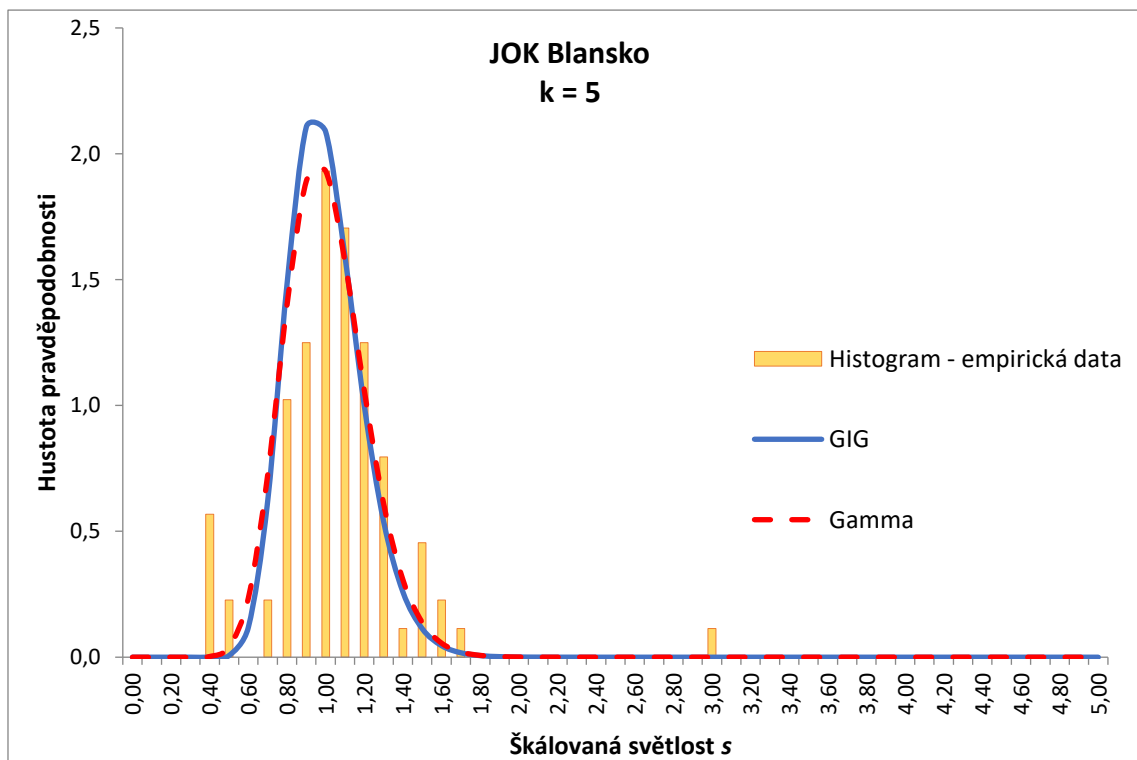
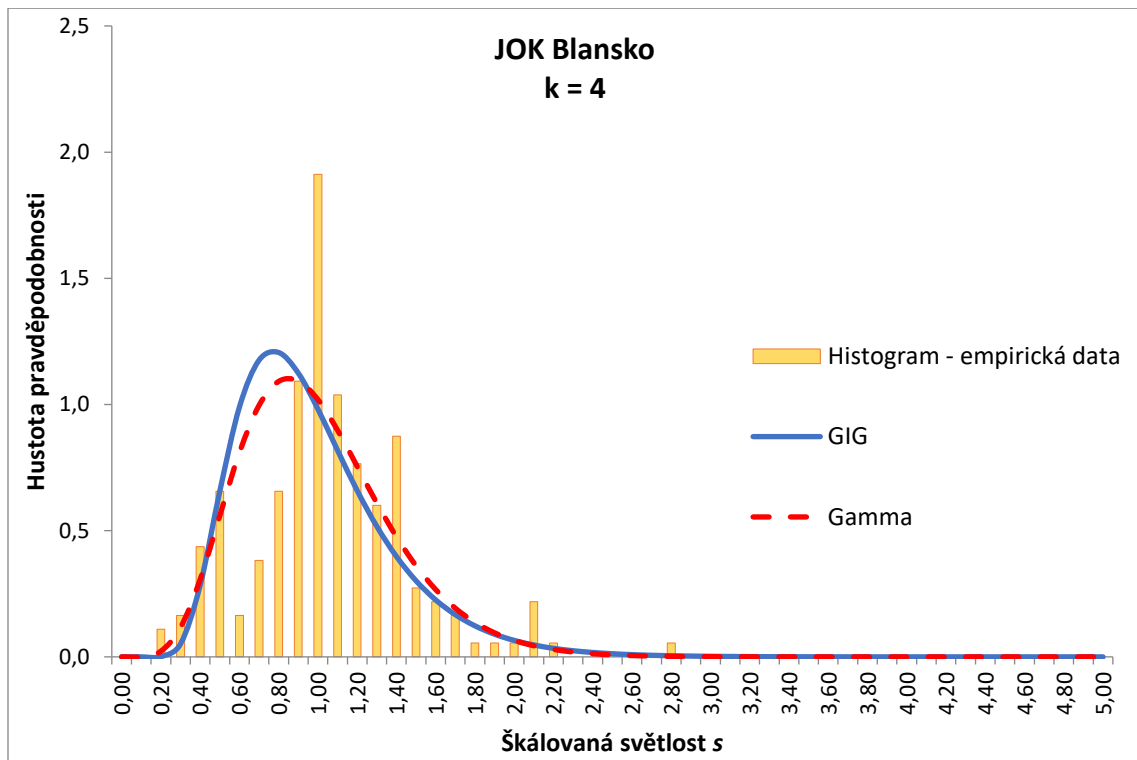


## 11.3 Akceptace časových světlostí

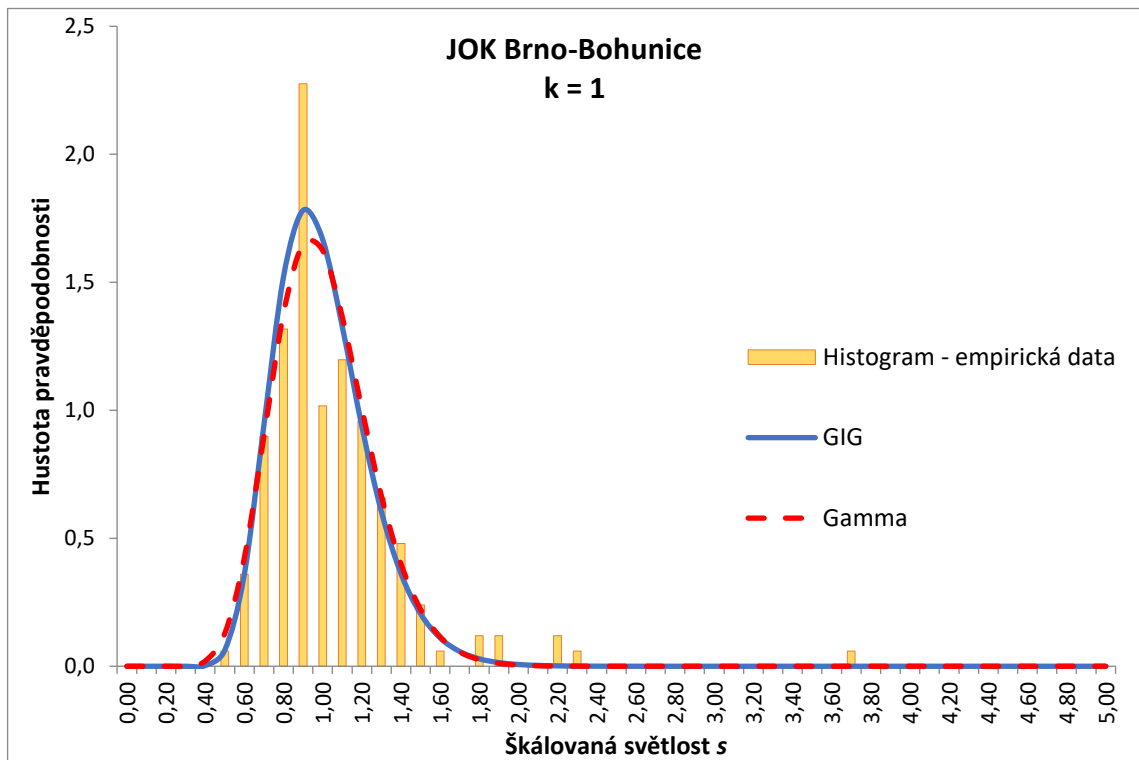
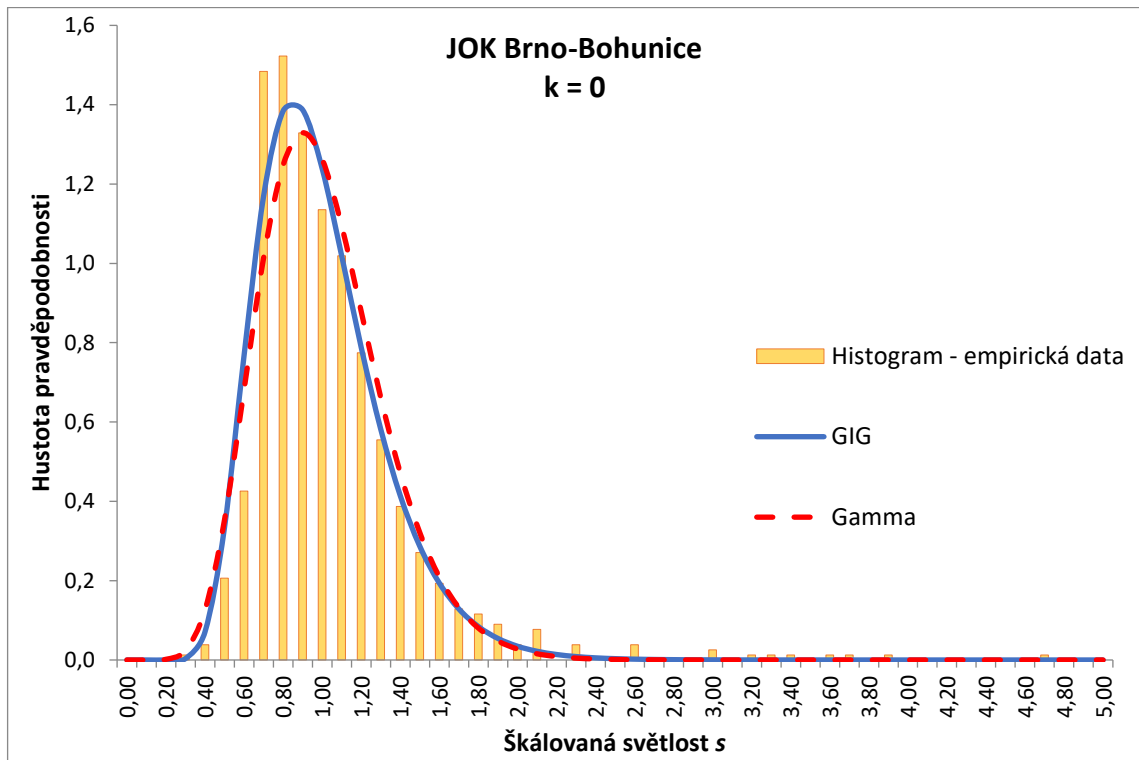
### 11.3.1 JOK Blansko

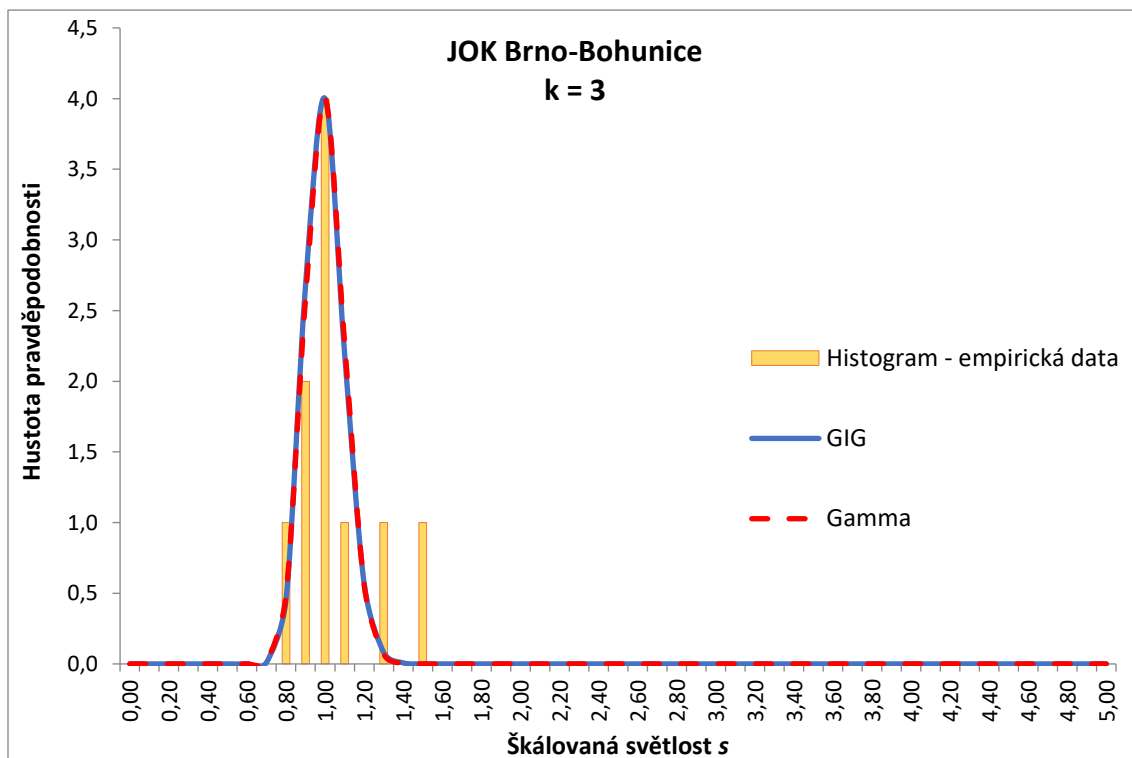
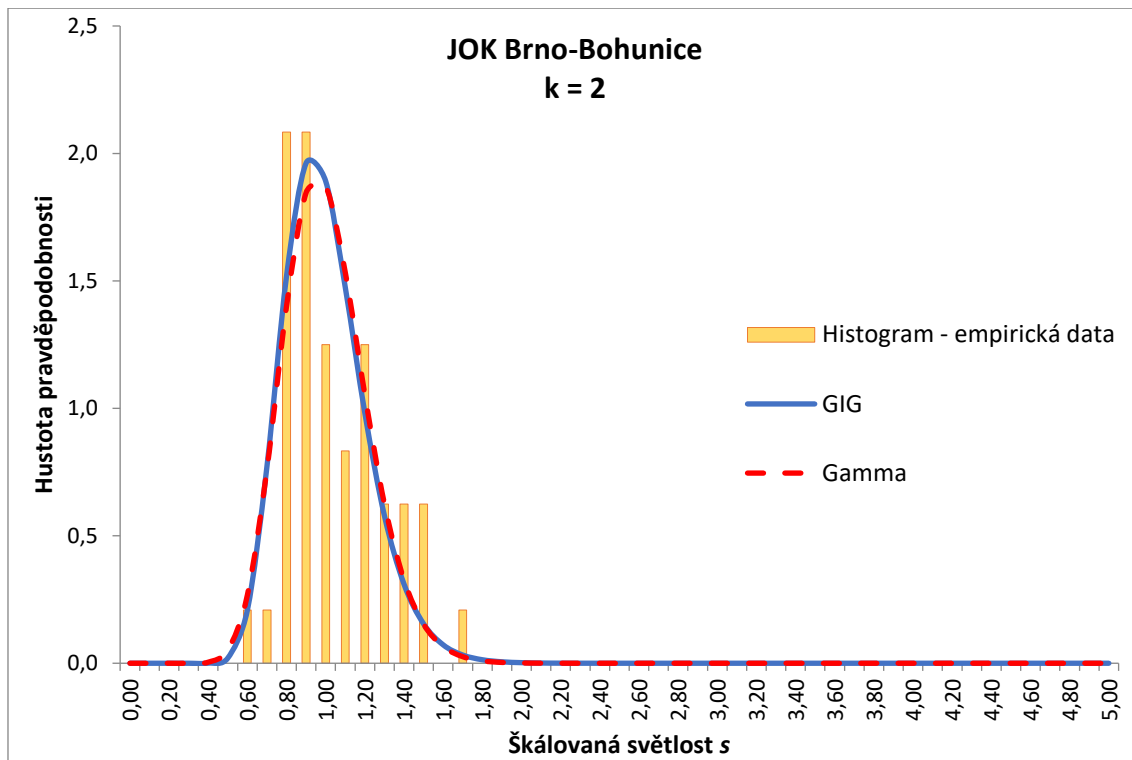






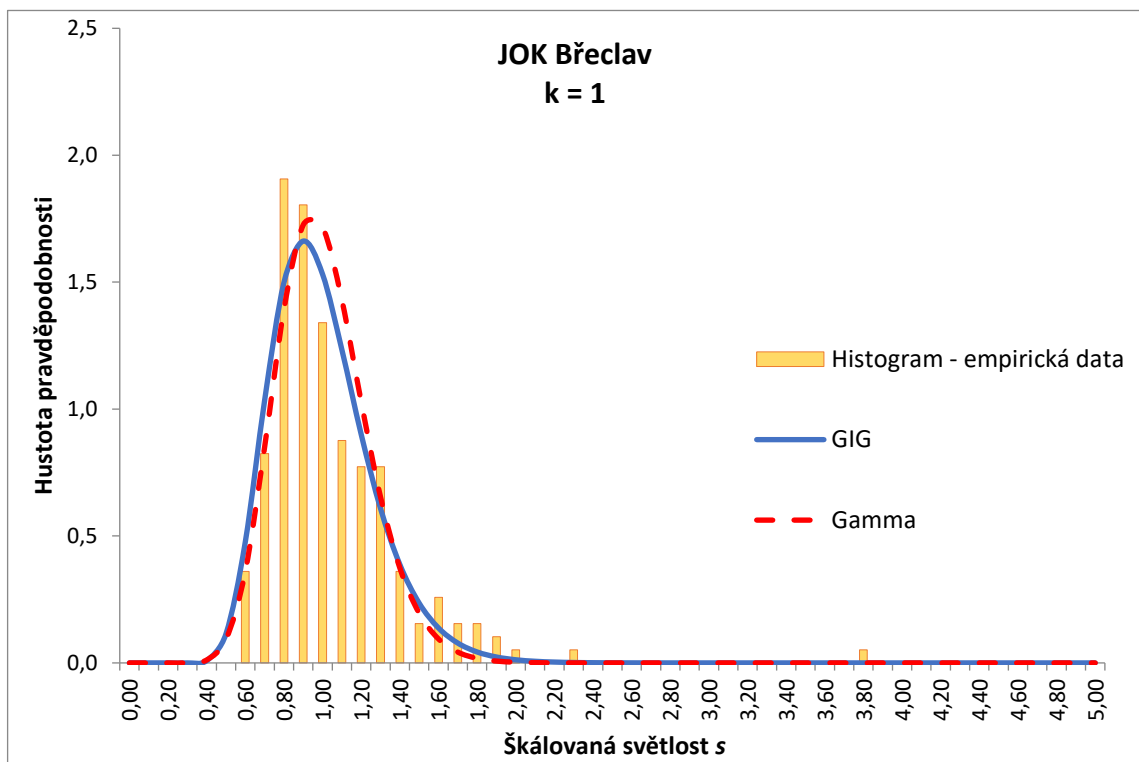
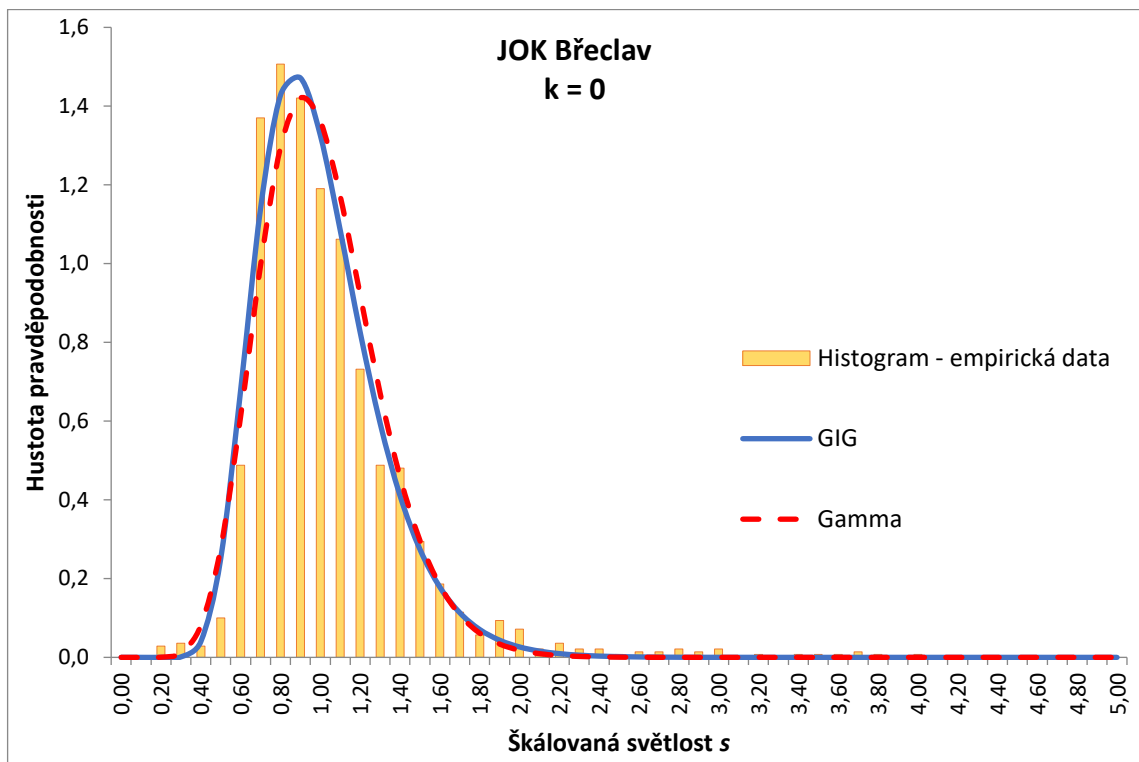
### 11.3.2 JOK Brno-Bohunice

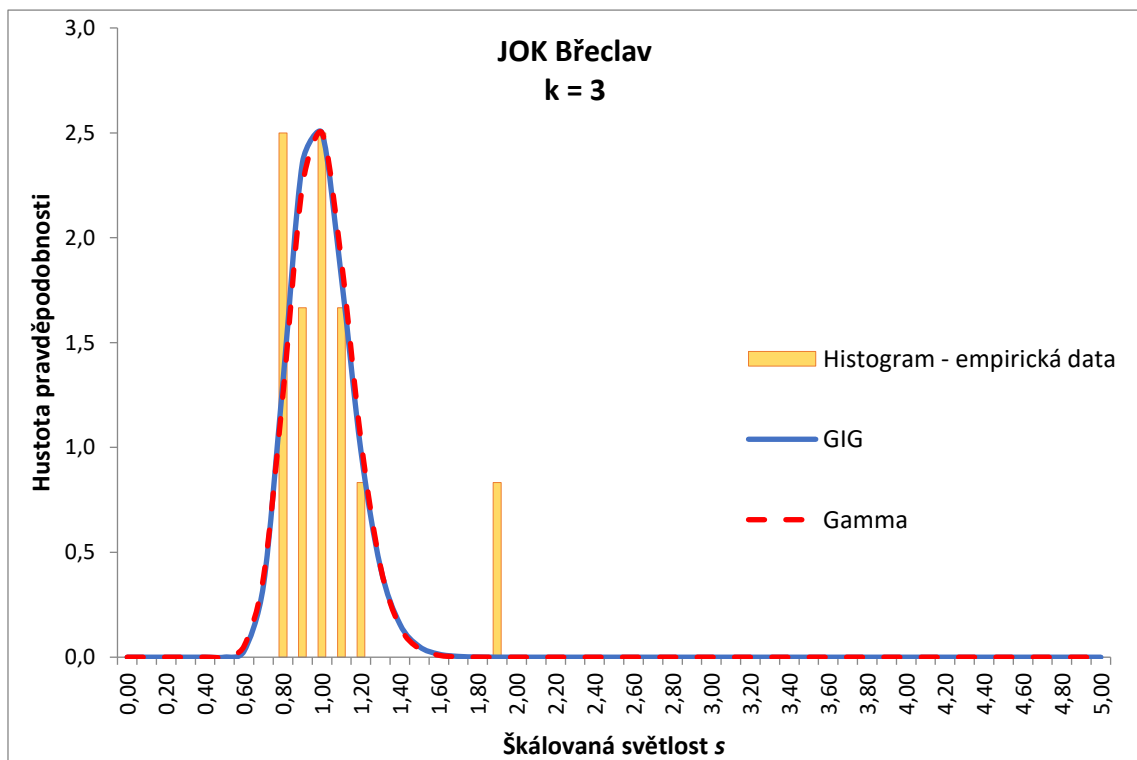
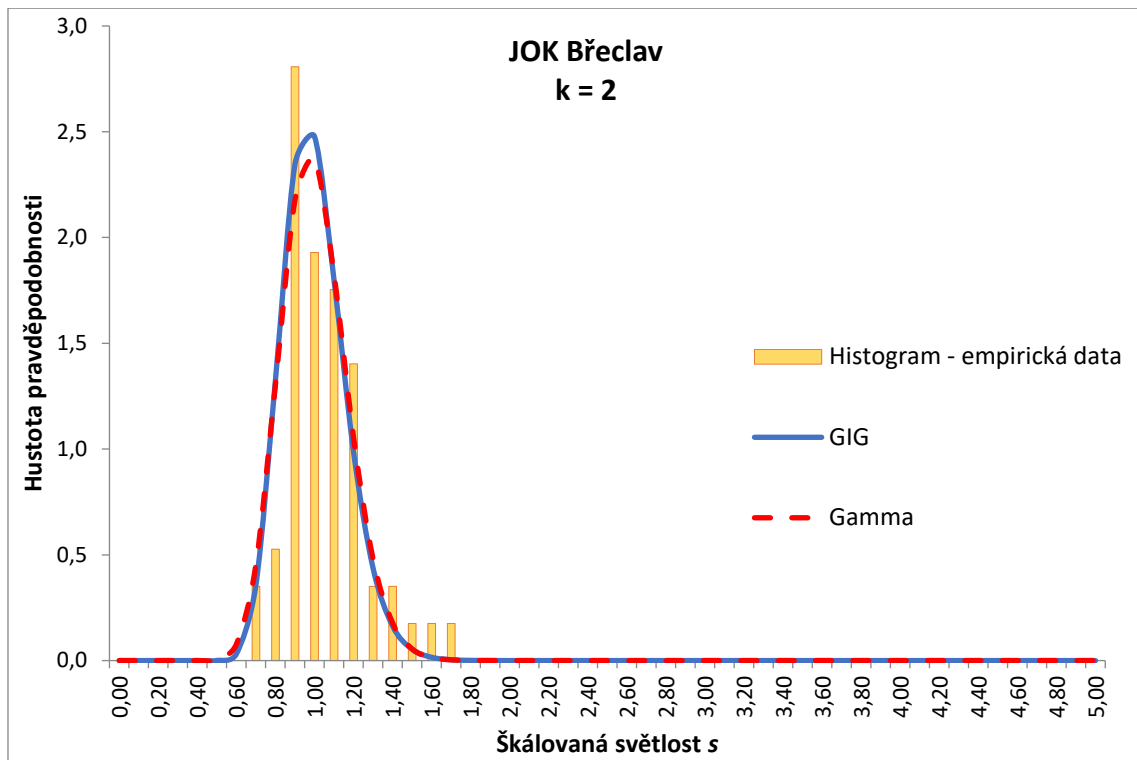




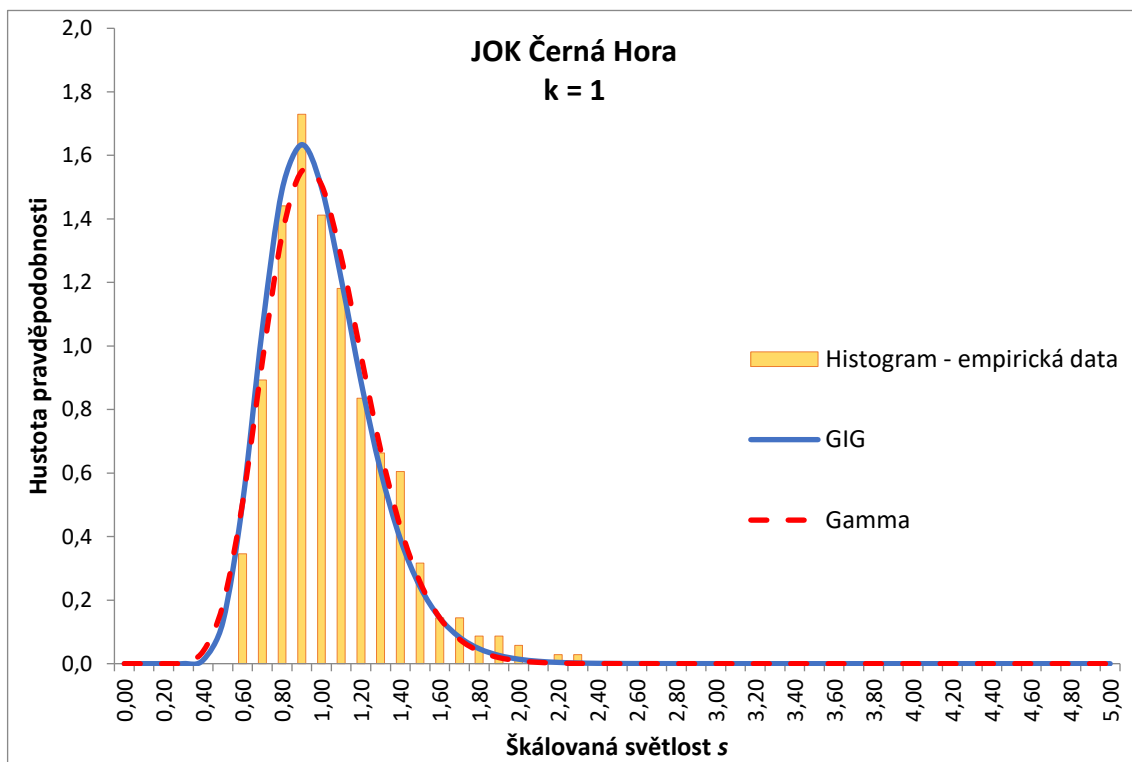
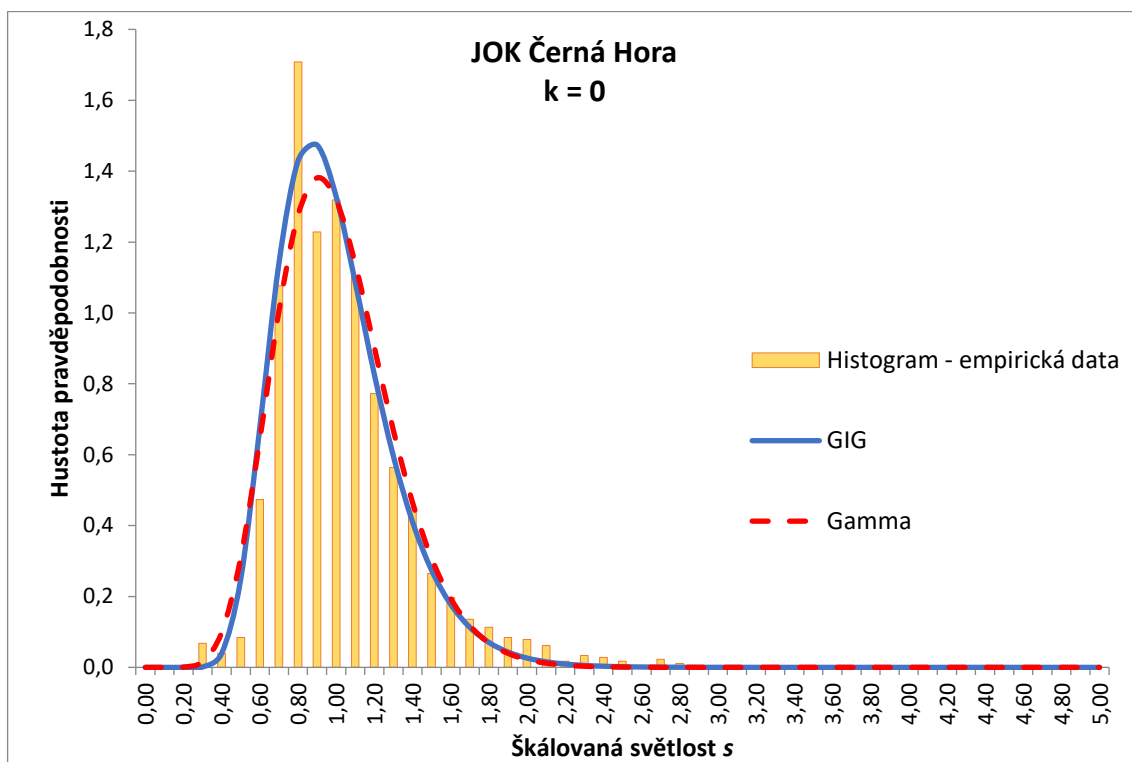


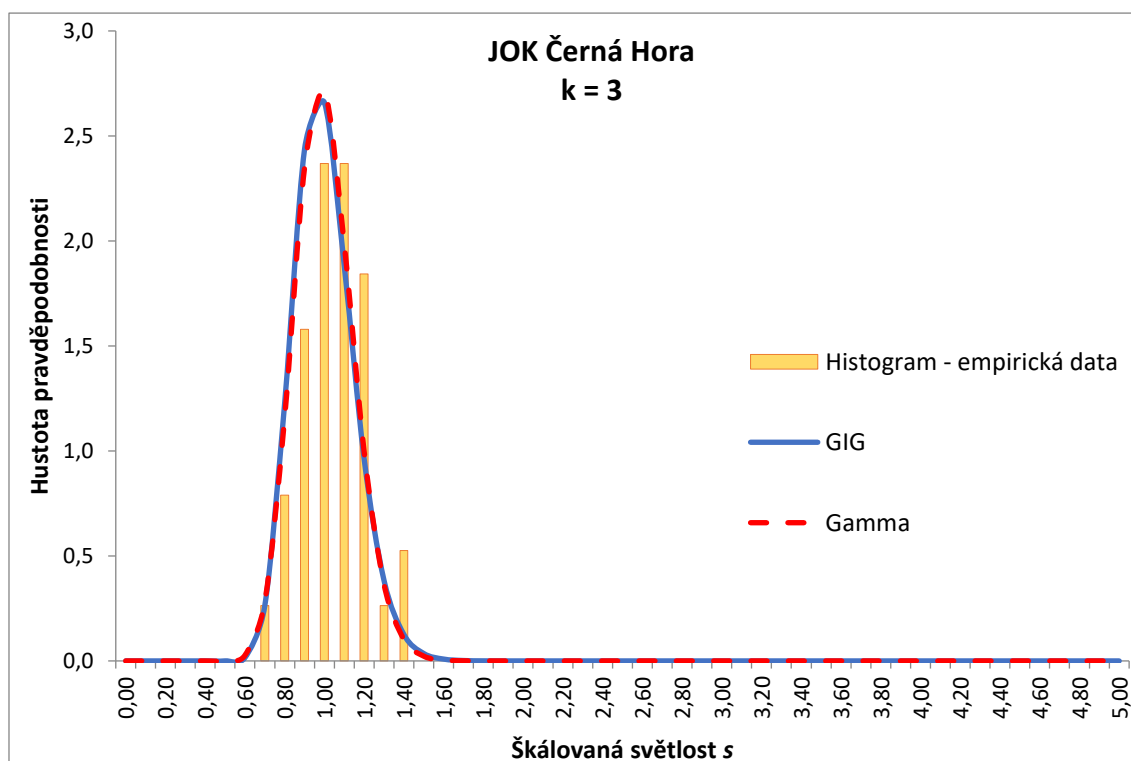
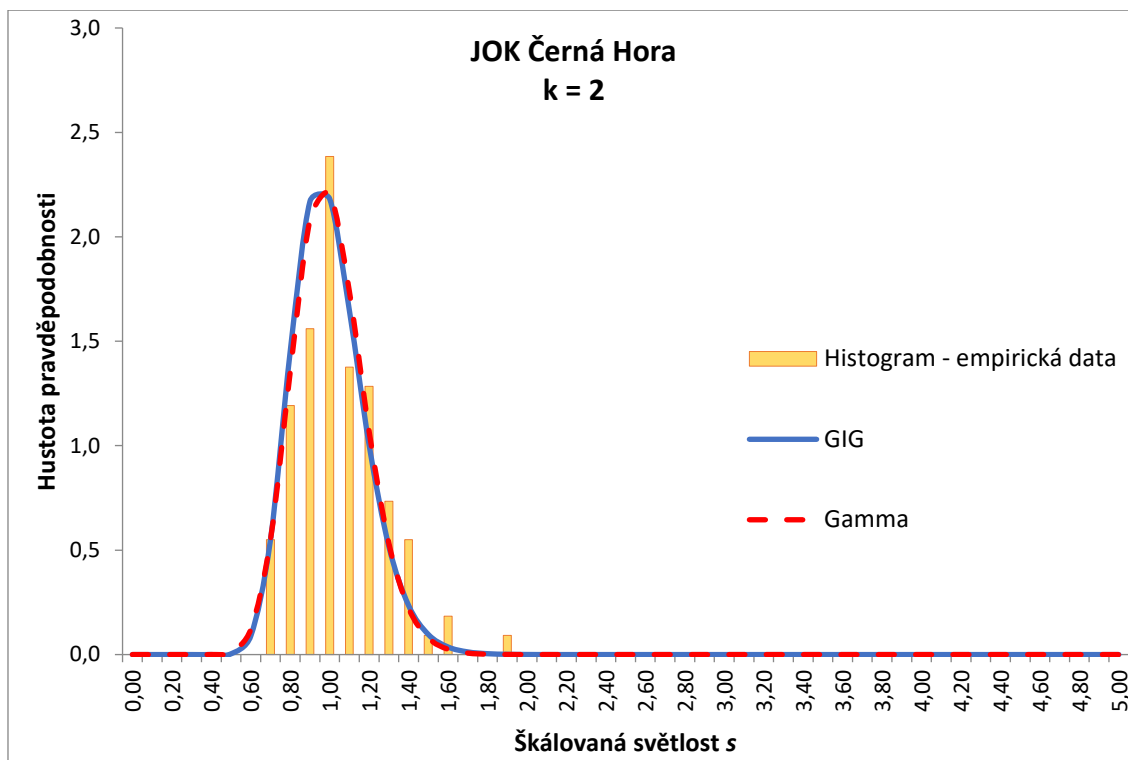
### 11.3.3 JOK Břeclav

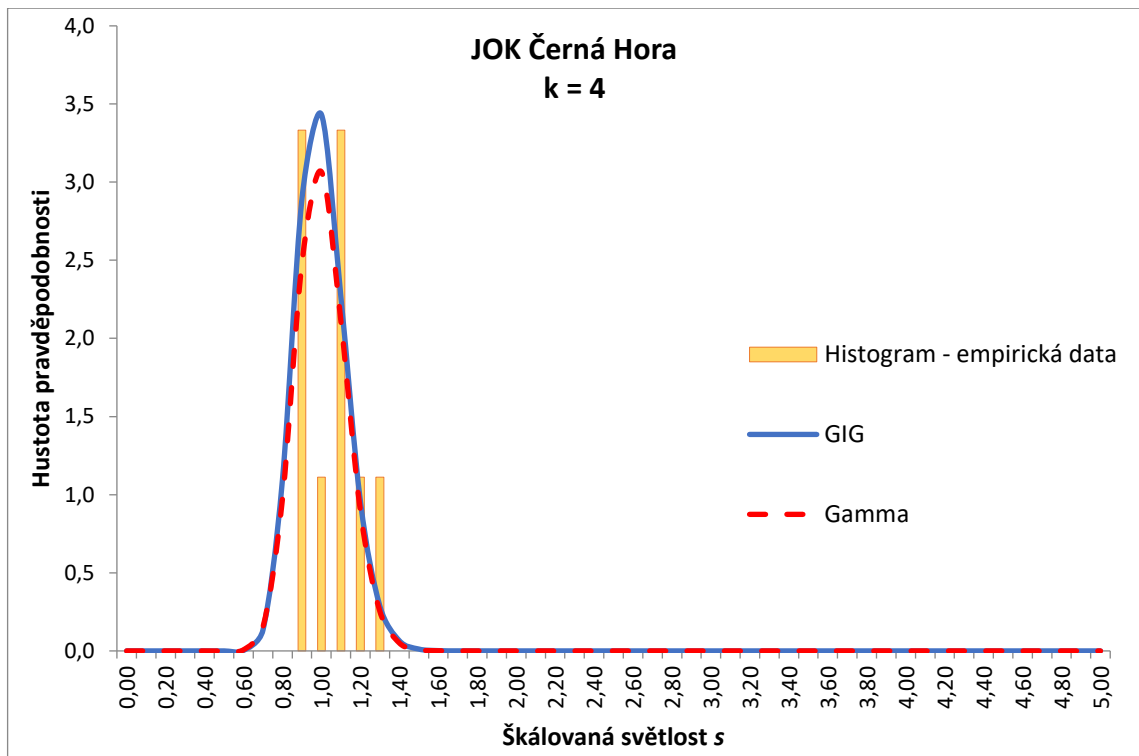




### 11.3.4 JOK Černá Hora







### 11.3.5 JOK Kuřim

