

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2020

Bc. Martin Pašta

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Vyhodnocování běžného provozu vozidla při vybraných dopravních situacích

Bc. Martin Pašta

Diplomová práce

2020

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Pašta**
Osobní číslo: **D17496**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Téma práce: **Vyhodnocování běžného provozu vozidla při vybraných dopravních situacích**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je navržení metodiky sběru dat pomocí nových komunikačních technologií jako nenákladný způsob získávání dat a navržení postupu pro jejich vyhodnocování a následně vyhodnocení těchto dat dle příslušných kritérií.

1. Úvod.
2. Základy analýzy dopravních nehod.
3. Metodika měření.
4. Výběr a analýza dopravních situací.
5. Vyhodnocování dat.
6. Závěr.

Rozsah pracovní zprávy: **50 stran**
Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] BRADÁČ, A.: Soudní inženýrství. 1. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 1997. str. 719. ISBN 80-7204-057-X.
[2] HUGEMANN, W.: Unfall-rekonstruktion. Erzhausen : Schönbach-Druck, 2007. str. 1300. ISBN 3-00-019419-3.
[3] RÁBEK, V.: Vybrané postupy analýzy dopravních nehod: (sborník převzatých cizojazyčných publikací). 2009. Olomouc: Properus, 2009. ISBN 978-80-554-0033-4.
[4] RÁBEK, V.: Vnímání a rozhodování účastníků silničního provozu – noční doba : (sborník tuzemských a převzatých cizojazyčných publikací). 2014. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-7395-816-9.
[5] RÁBEK, V.: Vnímání a rozhodování účastníků silničního provozu – denní doba : (sborník tuzemských a převzatých cizojazyčných publikací). 2014. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014. ISBN 978-80-904944-2-8.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Mrázek, Ph.D.**
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: **18. února 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2020**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Jakub Vágner, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 18. února 2020

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato diplomová práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

Ve Lhotě Netřebě dne 29. 7. 2020

Bc. Martin Pašta

PODĚKOVÁNÍ:

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňku Mrázkovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, cenné rady a konzultace, které mi pomohly při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Pokornému, Ph.D. za pomoc při porovnávacím měření. V neposlední řadě bych na tomto místě chtěl poděkovat mé rodině a přítelkyni za trpělivost a velkou podporu při mém studiu.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá zrychlením vozidla během vybraných dopravních situací. Cílem práce je navržení metodiky sběru dat pomocí nových komunikačních technologií jako nenákladný způsob získávání dat, navržení postupu pro jejich vyhodnocování a následně vyhodnocení těchto dat dle příslušných kritérií. Z teoretického hlediska jsou vymezeny základní pojmy související s touto problematikou jako je doprava, dopravní nehoda, zrychlení, akcelerometr a vybrané síly působící na vozidlo. Součástí práce je také zodpovězení otázky, zda lze užít mobilní telefony jako alternativní způsob měření zrychlení vozidel během jízdy. V rámci analýzy byly vybrány čtyři standardní situace, se kterými se může řidič během silničního provozu setkat a to konkrétně: průjezd zatáčkou v obou směrech, rozjezd do křižovatky, vběhnutí zvířete do vozovky a reakce na chodce na přechodu.

KLÍČOVÁ SLOVA

silniční doprava, akcelerometry, příčné zrychlení, podélné zrychlení, brzdění

TITLE

Evaluation of normal vehicle operation in selected traffic situations

ANNOTATION

The diploma thesis deals with vehicle acceleration during selected traffic situations. The aim of the work is to design a methodology for data collection using new communication technologies as an inexpensive way of obtaining data, to design a procedure for their evaluation and subsequent evaluation of this data according to the relevant criteria. From a theoretical point of view, the basic concepts related to this issue are defined, such as traffic, accident, acceleration, accelerometer and selected forces acting on the vehicle. Part of the work is also answering the question of whether mobile phones can be used as an alternative way to measure the acceleration of vehicles while driving. The analysis selected four standard situations that the driver may encounter during road traffic, namely: cornering in both directions, starting at an intersection, running the animal into the road and pedestrian reactions at the crossing.

KEYWORDS

road transport, accelerometers, lateral acceleration, longitudinal acceleration, braking

OBSAH

| | |
|---|----|
| Úvod | 12 |
| 1. Doprava | 13 |
| 1.1. Historie silniční dopravy | 14 |
| 2. Dopravní nehody | 16 |
| 2.1. Stopy dopravních nehod | 17 |
| 3. Vybrané síly působící na vozidlo | 21 |
| 3.1. Adhezní elipsa | 21 |
| 3.2. Příčné přemístování vozidla..... | 23 |
| 3.3. Brzdná dráha automobilu..... | 25 |
| 4. Měření zrychlení..... | 28 |
| 4.1. Akcelerometry | 29 |
| 4.2. Měření zrychlení mobilním telefonem | 31 |
| 4.3. Ověření přesnosti použité technologie | 34 |
| 5. Výběr a analýza dopravních situací..... | 40 |
| 5.1. Průjezd zatáčkou mezi obcemi Mastý a Bílý Újezd..... | 41 |
| 5.1.1. Metodika zpracování naměřených dat..... | 44 |
| 5.1.2. Průjezd zatáčkou po vnějším oblouku..... | 45 |
| 5.1.2.1. Analýza vybraných průjezdů se standardní rychlostí vozidla | 47 |
| 5.1.2.2. Analýza průjezdů s nestandardním průměrným příčným zrychlením..... | 50 |
| 5.1.3. Průjezd zatáčkou po vnitřním oblouku..... | 51 |
| 5.1.2.3. Analýza vybraných průjezdů..... | 52 |
| 5.1.2.4. Analýza průjezdů s nestandardním průměrným příčným zrychlením..... | 57 |
| 5.1.4. Vzájemné porovnání průjezdů zatáčkou v obou směrech | 58 |
| 5.1.5. Celkové vyhodnocení průjezdu zatáčkou | 60 |
| 5.2. Rozjezd do křižovatky v obci Bílý Újezd..... | 61 |
| 5.2.1. Metodika zpracování naměřených dat..... | 63 |
| 5.2.2. Analýza naměřených dat | 63 |
| 5.2.3. Porovnání naměřených dat s výpočtem..... | 67 |
| 5.2.4. Analýza vybraných rozjezdů do křižovatky | 73 |
| 5.3. Vybrané situace | 75 |
| 5.3.1. Vběhnutí zvířete do vozovky..... | 75 |
| 5.3.2. Reakce na chodce na přechodu pro chodce..... | 79 |
| Závěr..... | 83 |
| Použitá literatura..... | 86 |
| Přílohy | 88 |

SEZNAM ZKRATEK

ČR Česká republika

VVCD Výukové a výzkumné centrum v dopravě

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tabulka 1: Dopravní nehody v ČR v období 2014-2018 | 16 |
| Tabulka 2: Součinitel adheze na různém povrchu | 23 |
| Tabulka 3: Orientační hodnoty reakční doby řidiče | 26 |
| Tabulka 4: Reakční dráha podle rychlosti vozidla | 26 |
| Tabulka 5: Dráha zastavení vozidla v závislosti na stavu vozovky a rychlosti vozidla..... | 27 |
| Tabulka 6: Technické parametry vozidel | 41 |
| Tabulka 7: Četnost maximálních, průměrných a vypočtených hodnot příčného zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnějším oblouku [$m \cdot s^{-2}$]..... | 46 |
| Tabulka 8: Četnost průměrných rychlostí vozidla při průjezdu zatáčkou po vnějším oblouku [$km \cdot h^{-1}$]..... | 47 |
| Tabulka 9: Rychlost vozidla a průměrné příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnějším oblouku | 47 |
| Tabulka 10: Četnost maximálních, průměrných a vypočtených hodnot příčného zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku [$m \cdot s^{-2}$]..... | 51 |
| Tabulka 11: Četnost průměrných rychlostí vozidla při průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku [$km \cdot h^{-1}$]..... | 52 |
| Tabulka 12: Rychlost vozidla a průměrné příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku (A) | 53 |
| Tabulka 13: Rychlost vozidla a průměrné příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku (B)..... | 53 |
| Tabulka 14: Porovnání četností dosahovaného maximálního příčného zrychlení v obou směrech [$m \cdot s^{-2}$] | 58 |
| Tabulka 15: Porovnání četností dosahovaného průměrného příčného zrychlení v obou směrech [$m \cdot s^{-2}$] | 59 |
| Tabulka 16: Porovnání četností průměrných rychlostí v obou směrech [$km \cdot h^{-1}$] | 59 |
| Tabulka 17: Četnost maximálních hodnot podélného zrychlení během rozjezdu do křižovatky [$m \cdot s^{-2}$] | 64 |
| Tabulka 18: Četnost průměrných hodnot podélného zrychlení pro jednotlivé časové úseky [$m \cdot s^{-2}$]..... | 64 |
| Tabulka 19: Četnost průměrných hodnot podélného zrychlení během prvních čtyř sekund rozjezdu do křižovatky [$m \cdot s^{-2}$]..... | 65 |
| Tabulka 20: Četnost maximálních hodnot příčného zrychlení během rozjezdu do křižovatky [$m \cdot s^{-2}$] | 66 |
| Tabulka 21: Četnost rychlostí vozidla po 4. sekundě rozjezdu do křižovatky [$km \cdot h^{-1}$]..... | 66 |
| Tabulka 22: Četnost ujeté dráhy vozidla po 4. sekundě rozjezdu do křižovatky [m] | 67 |
| Tabulka 23: Četnost časových odchylek [s]..... | 68 |
| Tabulka 24: Četnost odchylek ujeté dráhy [m] | 68 |
| Tabulka 25: Naměřené hodnoty vybraných rozjezdů do křižovatky..... | 73 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Adhezní elipsa..... | 21 |
| Obrázek 2: Mezní situace – adhezní elipsa | 22 |
| Obrázek 3: Využívané příčné zrychlení | 24 |
| Obrázek 4: Využívání součinitele adheze pro jízdu obloukem při bezpečné jízdě | 24 |
| Obrázek 5: Fáze pohybu brzděného vozidla..... | 25 |
| Obrázek 6: Konstrukce piezoelektrického akcelerometru..... | 29 |
| Obrázek 7: Konstrukce tenzometrického akcelerometru..... | 30 |
| Obrázek 8: Konstrukce kapacitního akcelerometru..... | 30 |
| Obrázek 9: Aplikace Torque Pro | 32 |
| Obrázek 10: Aplikace Torque Pro – Track recorder | 32 |
| Obrázek 11: Zaznamenaná data aplikací Torque Pro | 33 |
| Obrázek 12: Zapojení akcelerometru ve vozidle | 34 |
| Obrázek 13: Snímač pro měření rychlosti vozidla | 34 |
| Obrázek 14: Trasa Lhota Netřeba – Solnice..... | 40 |
| Obrázek 15: Vozidla..... | 41 |
| Obrázek 16: Nájezd do zatáčky v obou směrech..... | 42 |
| Obrázek 17: Poloměr zatáčky podle mapy | 43 |
| Obrázek 18: Schematické zobrazení měření poloměru zatáčky pomocí opsané kružnice trojúhelníku..... | 43 |
| Obrázek 19: Schematické zobrazení průjezdů zatáčkou po vnějším oblouku (A)..... | 48 |
| Obrázek 20: Schematické zobrazení průjezdů zatáčkou po vnějším oblouku (B) | 49 |
| Obrázek 21: Schematické zobrazení průjezdů zatáčkou po vnitřním oblouku (A)..... | 54 |
| Obrázek 22: Schematické zobrazení průjezdů zatáčkou po vnitřním oblouku (B) | 55 |
| Obrázek 23: Schematické zobrazení ovlivnění průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku | 56 |
| Obrázek 24: Způsoby najetí do pravotočivé zatáčky..... | 56 |
| Obrázek 25: Křižovatka v obci Bílý Újezd | 62 |
| Obrázek 26: Příjezd vozidla do křižovatky | 62 |
| Obrázek 27: Výhled z vozidla stojícího před křižovatkou | 63 |
| Obrázek 28: Rozdíl ujeté dráhy průměrného rozjezdu do křižovatky (DP_37)..... | 70 |
| Obrázek 29: Největší rozdíl ujeté dráhy rozjezdu do křižovatky (DP_27) | 72 |
| Obrázek 30: Rozjezdy do křižovatky | 74 |
| Obrázek 31: Kočka na vozovce | 76 |
| Obrázek 32: Kočka na vozovce – uvolnění brzdového pedálu | 78 |
| Obrázek 33: Výhled z vozidla při zahájení brzdění | 80 |
| Obrázek 34: Míjení chodce při konstantní rychlosti vozidla..... | 81 |
| Obrázek 35: Chodec na přechodu – uvolnění brzdového pedálu | 82 |

SEZNAM GRAFŮ

| | |
|---|----|
| Graf 2: Porovnání výsledku měření podélného zrychlení – pozvolný rozjezd a brzdění..... | 35 |
| Graf 3: Porovnání výsledků měření podélného zrychlení – prudký rozjezd a brzdění | 36 |
| Graf 4: Porovnání výsledků měření podélného zrychlení | 37 |
| Graf 5: Porovnání výsledků měření příčného zrychlení..... | 37 |
| Graf 6: Porovnání výsledků měření náklonu | 38 |
| Graf 7: Porovnání výsledků měření rychlosti..... | 39 |
| Graf 8: Příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnějším oblouku vybraných cest (A)..... | 48 |
| Graf 9: Porovnání vybraných průjezdů zatáčkou po vnějším oblouku | 50 |
| Graf 10: Příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou vybraných cest (B)..... | 54 |
| Graf 11: Porovnání vybraných průjezdů zatáčkou po vnitřním oblouku | 57 |
| Graf 12: Průběh podélného zrychlení rozjezdu do křižovatky (DP_37) | 69 |
| Graf 13: Průběh podélného zrychlení rozjezdu do křižovatky (DP_27) | 71 |
| Graf 14: Podélné zrychlení během rozjezdu do křižovatky pro vybrané rozjezdy | 73 |
| Graf 15: Průběh podélného zrychlení – situace s kočkou | 76 |
| Graf 16: Průběh podélného zrychlení – situace s chodcem..... | 79 |

ÚVOD

V dnešním moderním světě, kdy většina lidí vlastní automobil a stává se každodenním účastníkem provozu zapříčiňuje skutečnost, že silnice již nejsou tak bezpečné, jako tomu bylo v historii. Nárůst intenzity silniční dopravy a pokles výstavby nových silnic vede k výraznému zhoršení kvality již existující silniční sítě. V důsledku nižší kvality silnic a vyšší hustoty provozu se také zvyšuje pravděpodobnost dopravních nehod, při kterých často dochází k situacím, kdy nevznikají znatelné stopy a objasnění dopravních nehod se tak stává komplikovanější.

Cílem této diplomové práce je tedy navržení metodiky sběru dat pomocí nových komunikačních technologií jako nenákladný způsob získávání dat, navržení postupu pro jejich vyhodnocování a následně vyhodnocení těchto dat dle příslušných kritérií. Řeč je zejména o mobilních telefonech, které jsou v dnešní době vybaveny mnoha snímači a detektory, které za pomoci vhodné aplikace lze užít i ke zcela jiným účelům, než kvůli kterému byly do zařízení primárně umístěny. Diplomová práce tedy zodpovídá otázku, zda je možné využít mobilní telefony jako alternativní způsob měření zrychlení vozidel během jízdy.

K analýze jsou vybrány čtyři obvyklé situace, se kterými se může řidič setkat během silničního provozu. Jedná se o:

- průjezd zatáčkou v obou směrech,
- rozjezd do křižovatky,
- vběhnutí zvířete do vozovky,
- reakce na chodce na přechodu pro chodce.

Diplomová práce je zpracována na základě odborné české literatury, důvěryhodných webových stránek a dat z databáze Českého statistického úřadu. Pro výzkumnou část byla užita data získaná prostřednictvím mobilního telefonu Samsung Galaxy S5 a aplikace Torque Pro.

1. DOPRAVA

Stěžejním tématem této diplomové práce je doprava zejména doprava silniční, proto je nutné nejprve zachytit význam samotného pojmu doprava. Podle Porady (2000, s.7) lze dopravu charakterizovat jako: „organizovanou a záměrně vykonávanou činnost, která slouží k přemísťování osob nebo věcí z jednoho místa do druhého cílového místa.“ Z této definice vyplývá, že za výsledný produkt dopravní činnosti lze označit ono zmíněné přemísťování osob a věcí, které se v rámci této problematiky označuje jako přeprava. (Porada, 2000)

Doprava má nesporně mnoho společenských i ekonomických přínosů jako je např. přemísťování hotových výrobků z oblasti výroby do oblasti spotřeby či uspokojování potřeby lidí na změnu prostorového bytí. Doprava také významně ovlivňuje rozvoj a osídlení jednotlivých regionů ČR. Na druhou stranu je nutné zmínit, že s dopravou jsou spojené také jisté negativní důsledky, mezi které lze jednoznačně zařadit její hlučnost a také negativní vliv na životní prostředí, neboť jejím prostřednictvím dochází ke znečišťování ovzduší a vod. (Porada, 2000)

Dopravu lze klasifikovat dle různých hledisek, resp. kritérií. Porada (2000) dopravu člení podle čtyř kritérií jimiž jsou:

- prostředí, ve kterém leží dopravní cesta,
- způsob uskutečňování na dopravní cestě v daném prostředí,
- vzdálenost a místo provádění,
- druh přepravy.

Podle prvního kritéria neboli prostředí, ve kterém leží dopravní cesta lze dopravu členit na:

- pozemní (kolejovou, bezkolejovou),
- podzemní (mobilní, nemobilní),
- vzdušnou,
- vodní.

Podle způsobu uskutečňování dopravy lze rozlišit čtyři druhy dopravy. Jedná se o dopravu:

- silniční,
- železniční,
- leteckou,
- plavební.

Kritérium vzdálenosti a místa provádění dopravy rozděluje dopravu na:

- dálkovou,
- místní,
- městskou,
- závodní.

Posledním kritériem pro rozdělení dopravy je druh přepravy, podle kterého se doprava dělí na:

- nákladní,
- osobní.

1.1. Historie silniční dopravy

První náznaky dopravy v historii lidstva, lze zaznamenat v dobách, kdy lidé žily kočovným stylem života. Kočovníci ke svému přemísťování začali využívat různé druhy zvířat (nejčastěji koně) a prvními primitivními dopravní prostředky byly vleky a saně. Jedním ze zásadních mezníků ve vývoji dopravy byl vynález kola, které je dodnes označováno jako technický revoluční pokrok v pozemní dopravě. Po vynálezu kola se zrodila myšlenka znásobování počtu kol což vedlo k sestrojení prvního vozidla s čímž úzce souvisí i výstavba prvních silnic.

Rozvoj silniční dopravy včetně silniční sítě byl značně ovlivněn vznikem motorizace. Koncem 19. století byl vynalezen spalovací motor a následně v roce 1886 byl veřejnosti představen první benzínový automobil, který zkonstruoval německý automobilový konstruktér Karl Benz. Rozvíjí se také městská hromadná doprava v podobě kolejové dopravy s tažnou koňskou silou.

Po rozpadu Rakouska-Uherska a následného vzniku samostatného Československého státu v roce 1918 nastal dočasný útlum silniční dopravy v důsledku neúměrného daňového zatížení v prvních letech nové republiky. Postupem času se však odvětví dopravy opět dočkává dalšího rozvoje, a to nejen v oblasti individuální přepravy osob a věcí, ale také hromadné, kdy města začínají být propojována kromě dosavadních železničních tratí také autobusovými spoji. Tento rozvoj byl však výrazně omezen vypuknutím druhé světové války. V období po druhé světové válce dochází i přes prvotní nedostatek pohonných hmot k opětovnému rozmachu automobilové dopravy a počátkem devadesátých let 20. století se počet silničních motorových vozidel výrazně navýšil a do popředí se dostává také mezinárodní silniční doprava. (Porada, 2000)

Po Sametové revoluci v roce 1989 nastalo v ČR období transformace, která se dotýkala zejména politické a ekonomické sféry, neboť v souvislosti s touto demokratickou revolucí byl

na našem území současný totalitní režim postupně nahrazen parlamentní demokracií a v rámci ekonomické transformace došlo k přechodu od centrálně plánované ekonomiky k ekonomice tržního typu. (Kunešová a kol., 2006) Transformace ekonomiky následně zasáhla i dopravu, zejména dopravu silniční. V souvislosti se změnou systému ekonomiky došlo ke vzniku živnostenskému podnikání a rodí se i malé a střední podniky soukromého charakteru, které jsou velmi často závislé na dopravě. Začínají se ve velkém množství dovážet automobily ze zahraničí, a to nejen v rámci podnikání, ale také k uspokojení základních transportních potřeb široké veřejnosti. Narůstá intenzita silniční dopravy, nové silnice téměř nepřibývají, a to vede k výraznému zhoršení kvality již existující silniční sítě. V důsledku nižší kvality silnic a vyšší hustoty provozu se také zvyšuje pravděpodobnost dopravních nehod. (Porada, 2000)

2. DOPRAVNÍ NEHODY

Podle § 47 zákona č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů, se dopravní nehodou rozumí: „Událost v provozu na pozemních komunikacích, například havárie nebo srážka, která se stala nebo byla započata na pozemní komunikaci a při níž dojde k usmrcení nebo zranění osoby nebo ke škodě na majetku v přímé souvislosti s provozem vozidla v pohybu.“ Chmelík (2009, s.17) dopravní nehodu definuje jako: „Nepředvídanou, ale zpravidla předvídatelnou událost, která vznikla během provozu na dopravní cestě a měla za následek škodu na životě, zdraví nebo majetku či jiný, zvláště závažný následek.“ Dopravní nehodu lze také chápat jako: „Souhrn člověkem vykonávaných řídicích činností dopravního prostředku, který se dostává do rozporu se zákonnými normami a ostatními speciálními předpisy.“ (Porada, 2000, s. 102)

Dopravní nehody lze pro účely evidence a statistiky členit do několika skupin. Podle Porady (2000) jsou pro klasifikaci dopravních nehod užívána následující kritéria:

- následky dopravní nehody,
- zavinění dopravní nehody,
- hlavní příčina dopravní nehody,
- vozidla zúčastněná na dopravní nehodě,
- místo dopravní nehody,
- vzniklé škody na zdraví a majetku.

Následující tabulka 1 zachycuje vývoj počtu dopravních nehod zaznamenaných na území ČR v letech 2014-2018 včetně počtu zraněných a usmrcených osob a výši způsobené hmotné škody.

Tabulka 1: Dopravní nehody v ČR v období 2014-2018

| Rok | Nehody celkem | Pod vlivem alkoholu | Usmrcené osoby | Zraněné osoby | | Hmotná škoda v tis. Kč |
|------|---------------|---------------------|----------------|---------------|--------|------------------------|
| | | | | těžce | lehce | |
| 2014 | 85 859 | 4 637 | 629 | 2 762 | 23 655 | 4 933 234 |
| 2015 | 93 067 | 4 544 | 660 | 2 540 | 24 426 | 5 439 125 |
| 2016 | 98 864 | 4 373 | 545 | 2 580 | 24 501 | 5 804 204 |
| 2017 | 103 821 | 4 251 | 502 | 2 339 | 24 740 | 6 316 257 |
| 2018 | 104 764 | 4 626 | 565 | 2 465 | 25 215 | 6 547 904 |

Zdroj: ČSÚ (2020)

Z tabulky 1 je na první pohled patrné, že celkový počet dopravních nehod, které jsou na území ČR každoročně zaznamenány, s každým dalším rokem narůstá. Zatímco v roce 2014

bylo na území ČR zaznamenáno celkem 85 859 dopravních nehod, v roce 2018 se jejich počet navýšil o necelých 19 000 a celkový počet dopravních nehod byl 104 764. Tabulka 1 také vypovídá o skutečnosti, že z celkového počtu dopravních nehod je každoročně necelých 5 % spácháno pod vlivem alkoholu.

V důsledku dopravních nehod každoročně zemře na českých silnicích v průměru 580 osob, přibližně 2 500 osob je těžce zraněno a necelých 25 000 osob vyvázne pouze s lehkými zraněními. Co se týče způsobené hmotné škody v souvislosti s dopravními nehodami, tak ta se dle tabulky 1 vyvíjí v závislosti na celkovém počtu zaznamenaných dopravních nehod. Lze tedy tvrdit, že s rostoucím počtem dopravních nehod roste i výše způsobené hmotné škody.

2.1. Stopy dopravních nehod

Na místě, kde došlo k dopravní nehodě vzniká zpravidla velké množství stop. Tyto stopy se dle Chmelíka (2009) dělí na paměťové a materiální.

Paměťové stopy účastníků dopravní nehody a jiných osob (náhodných svědků) jsou velmi důležité pro objasnění dopravní nehody, a to zejména z hlediska otázky zavinění. Paměťové stopy napomáhají objasnit nejen samotný průběh dopravní nehody, ale také chování účastníků dopravní nehody před dopravní nehodou a těsně po ní. Z paměťových stop lze získat informace např. o způsobu jízdy vozidla a jeho pravděpodobné rychlosti, použití signalizace, skřípění brzd, pohybu osob či zvířat přes vozovku aj.

I přes možné riziko omylu jako je např. chybný odhad vzdálenosti či rychlosti vozidla, přispívají paměťové stopy ke komplexnímu posouzení dopravní nehody. Samotný proces získávání informací na základě paměťových stop lze považovat za velmi náročný, neboť vyžaduje znalosti forenzní psychologie, které se uplatňují při výslechu, kdy je vyžadován individuální přístup k vyslychaným svědkům. (Chmelík, 2009)

Materiální stopy se dle Chmelíka (2009) dělí na:

- stopy na vozovce,
- stopy na zúčastněných vozidlech,
- stopy na pevných objektech,
- stopy na tělech obětí nebo zraněných osob.

Stopy na vozovce

Stopy na vozovce jsou tvořeny především stopami pneumatik na vozovce, ze kterých lze obvykle rozpoznat místo, kde začal řidič dopravního prostředku reagovat na změněnou dopravní situaci, umožňují odvodit mechanismus vzniku dopravní nehody a také sledovat pohyb účastníků dopravní nehody na vozovce. Stopy na vozovce lze dle Chmelíka (2009) dále členit na:

- stopy jízdy vozidla,
- brzdné stopy (stopy brzdění),
- blokovací stopy,
- stopy smyku vozidla,
- stopy dření a vlečení, rýhy,
- stopy lokomoce (chůze, běhu a skoků) osob a zvířat, biologické stopy a stopy různých kapalin.

Stopy jízdy vozidla vznikají na vozovce v důsledku volně se otáčejících nebrzděných kol, přičemž kvalita stop je závislá na řadě faktorů, jako je např. povrch vozovky, hmotnost vozidla a stav pneumatik. Pro jízdné stopy je charakteristické to, že jejich tvar včetně reliéfu dezénu pneumatik zanechaných na vozovce odpovídá skutečnosti. Tyto stopy jsou nejlépe rozpoznatelné např. na prašných cestách, rozmoklé zemině či na sněhu. Na druhou stranu na vozovkách se zpevněným povrchem či dlažebních kostkách je jejich zjištění velmi obtížné.

Brzdné stopy (stopy brzdění) vznikají v místech kontaktu brzděných pneumatik a vozovky. Brzděním je sice zpomalován pohyb vozidla, ale v důsledku setrvačnosti se kola vozidla stále otáčejí. Brzdné stopy jsou tedy vytvářeny otáčejícími se, ale již brzděnými koly vozidla. Lze je rozpoznat podle otisku dezénu brzděných pneumatik, který bývá rozmazaný a jejich tvar a obrazec dezénu je zkreslený (ve stopě vypadá větší než ve skutečnosti). Na měkkém povrchu vozovky je brzdná stopa zpravidla hlubší než stopa jízdy, protože se brzděním zvyšuje tlak vozidla na vozovku. Specifické stopy vznikají v důsledku antiblokovacího brzdového systému neboli ABS, které je možné charakterizovat jako kombinaci stop jízdy vozidla a brzdných stop, které vznikají ve velmi krátkém časovém sledu.

Blokovací stopy jsou vytvářeny neotáčejícími se koly v důsledku tření v brzdách (mezi brzdovými destičkami a kotoučem, mezi obložením a brzdovým bubnem) vozidla, které je větší než tření mezi pneumatikou a vozovkou. Blokovací stopy jsou zpravidla velmi výrazné a mají podobu tmavých pruhů bez rozeznatelného vzorku dezénu pneumatik. Na základě blokovacích stop lze zjistit, jakou rychlostí jelo vozidlo před blokováním.

Stopy smyku vozidla vznikají v důsledku současného nachýlení vozidla do strany a pohybem vpřed. Příčinou smyku bývá zejména nepřiměřená rychlá jízda v zatáčkách, náhlé brzdění na kluzké vozovce, prudké otáčení volantem při větší rychlosti, skvrny a listí na vozovce, sjetý vzorek pneumatik či rozdílné nahuštění pneumatik. Stopy smyku vozidla mají zpravidla tvar křivky.

Stopy dření a vlečení, rýhy jsou způsobeny tlakem tvrdých předmětů na vozovku při pohybu vozidla. Vznikají zejména při převrácení vozidla nebo nárazu vozidla na překážky či předměty nacházející se na vozovce, které v důsledku tlačení či vlečení změni polohu. Vznikají tak různé stopy odřeného laku na vozidlech, stopy dření brzdového kotouče na vozovce či rycí stopy po střepech ze světlometů, dveří a oken. Stopy vlečení, které vznikají vlečením předmětů, popřípadě těl vozidlem, zpravidla nepoškozují vozovku.

Stopy lokomoce (chůze, běhu a skoků) osob a zvířat, biologické stopy a stopy různých kapalin jsou poslední skupinou stop řadící se ke stopám zanechaných v důsledku dopravní nehody na vozovce. Mezi nejčastější kapaliny, které se nacházejí v místě dopravní nehody patří např. brzdová kapalina, olej a pohonné hmoty. Do této skupiny stop se řadí také stopy obuvi, které jsou velmi významné v případě kdy došlo ke srážce dopravního prostředku s chodcem. (Chmelík, 2009)

Stopy na zúčastněných vozidlech

Za stopy na zúčastněných vozidlech jsou považovány různé deformace a destrukce, poškrábání a odření a také stopy uvnitř vozidel (uvolněné sedačky, deformovaný volant či přístrojová deska aj.) U vozidel, která se zúčastnila dopravní nehody je důležité zjistit místo nárazu (střetu) podle kterého lze usuzovat průběh nehodového děje. V rámci zjištěných stop na vozidlech je nutné u každé jednotlivé stopy zjistit následující informace:

- zda souvisí s dopravní nehodou,
- zda existuje protistopa a kde se nachází,
- jaký byl mechanismus vzniku,

Stopy na pevných objektech

Stopy na pevných objektech vznikají zejména v případech, kdy vozidlo sjede mimo vozovku. Jedná se o stopy na zdech domů, plotech, zábradlích, svodidel, stromů, telegrafních sloupů aj. Na místech výskytu těchto stop lze nalézt také části vozidla jako jsou např. střepy ze světlometů a oken, části laku, část rozsypaného nákladu aj. Krom částí vozidel se na místě střetu s pevným objektem mohou nacházet také osobní věci zúčastněných osob jako jsou např. brýle, šperky, čepice, boty aj.

Stopy na tělech obětí nebo zraněných osob

Do této skupiny stop patří různá vnitřní a vnější zranění na tělech obětí nebo zraněných osob a také stopy na jejich oděvech, která rovněž slouží k objasnění průběhu dopravní nehody. Podle rozsahu zranění a jejich závažnosti lze předpokládat mechanismus jejich vzniku. Na základě zranění lze zjistit, kdo skutečně řídil vozidlo během dopravní nehody, neboť v důsledku nárazu vozidla jsou dobře rozeznatelná zranění hrudníku o volant či přístrojovou desku vozidla.

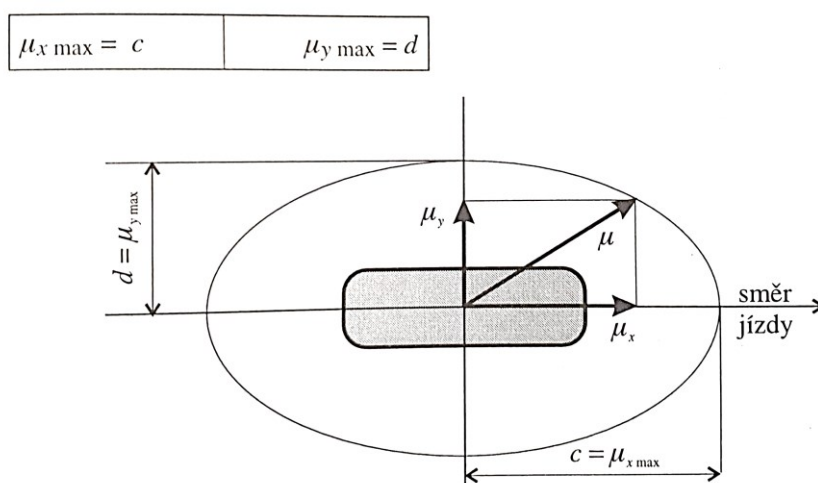
3. VYBRANÉ SÍLY PŮSOBÍCÍ NA VOZIDLO

3.1. Adhezní elipsa

Adhezní síla ve styku s vozovkou je využívána:

- v podélném směru (ve směru podélné roviny otáčení kola) na rozjezd a brzdění,
- ve směru kolmém na boční vedení (vyvolání zatáčení – dostředivého zrychlení, překonání odstředivé síly).

Tato síla je však jen jedna a její rozdělení na podélnou a příčnou složku určuje tzv. adhezní elipsa. (Porada, 2000) Viz následující obrázek 1.



Obrázek 1: Adhezní elipsa

Zdroj: Bradáč a kol, 1997

Adhezní elipsa udává maximálně využitelnou součtovou adhezi v požadovaném směru. Na poloosách adhezní elipsy jsou:

- maximální využitelná adheze v podélném směru X,
- maximální využitelná adheze v příčném směru Y.

Využití adheze na styku kola s vozovkou je dáno vektorovým součtem využití adheze ve směru podélném (μ_x) a ve směru příčném (μ_y). Tento součet nemusí dosahovat mezní hodnoty μ , která je dána adhezní elipsou, ale nemůže ji překročit. Rovnice adhezní elipsy je vyjádřena následovně:

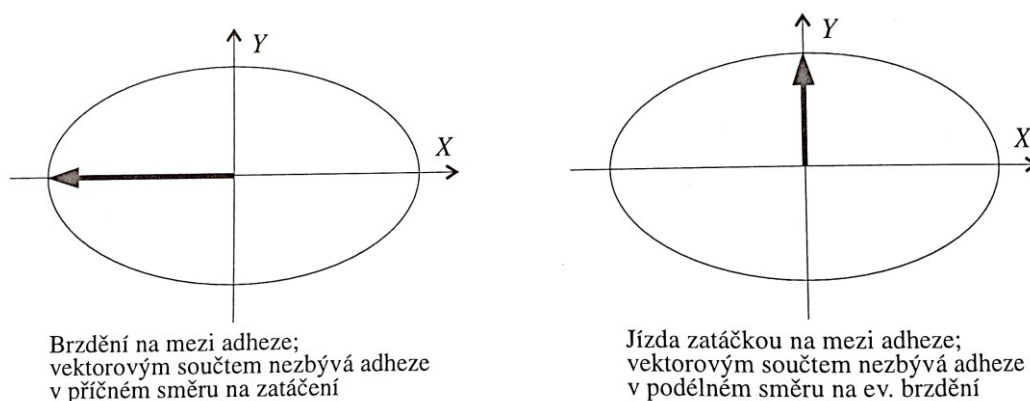
$$\frac{\mu_x^2}{c^2} + \frac{\mu_y^2}{d^2} = 1$$

- kde:
- μ_x ... adheze ve směru podélném,
 - μ_y ... adheze ve směru příčném,
 - c... maximální využitelná adheze v podélném směru,
 - d... maximální využitelná adheze v příčném směru.

Nejvyšší možné využití adheze na brzdění při zatáčení je dáno vztahem:

$$\mu_x = \frac{c}{d} \sqrt{d^2 - \mu_y^2}$$

Pokud je při brzdění veškerá adheze využita na zpomalování, pak vektorovým součtem teoreticky nic nezbyvá na vedení kola ve směru Y. V tomto případě zde tedy není boční síla na zatáčení. Na druhou stranu při jízdě mezní rychlostí v oblouku, kdy je veškerá adheze spotřebována v příčném směru na vyvození dostředivé síly k zatáčení (překonání odstředivé síly), již nic nezbyvá na brzdění. Pokud tedy dojde k zabrzdění, není dost na dostředivou sílu a vozidlo tak jede po větším poloměru. (Bradáč a kol, 1997) Viz následující obrázek 2.



Obrázek 2: Mezní situace – adhezní elipsa

Zdroj: Bradáč a kol, 1997

Součinitel adheze mezi pneumatiky na vozovce závisí dle Bradáče (1997) na následujících faktorech:

- jakosti a stavu povrchu vozovky,
- jakosti a stavu povrchu pneumatiky,
- rychlosti jízdy,
- poměrech ve stopě kola, především na velikosti skluzu.

Následující tabulka 2 ukazuje součinitel adheze na různých typech povrchu.

Tabulka 2: Součinitel adheze na různém povrchu

| Povrch vozovky | | Součinitel adheze μ | Povrch vozovky | | Součinitel adheze μ |
|----------------|-------|-------------------------|---------------------|-------|-------------------------|
| beton | suchý | 0,8 – 1,0 | polní cesta | suchý | 0,4 – 0,6 |
| | mokrý | 0,5 – 0,8 | | mokrý | 0,3 – 0,4 |
| asfalt | suchý | 0,6 – 0,9 | tráva | suchá | 0,4 – 0,6 |
| | mokrý | 0,3 – 0,8 | | mokrý | 0,2 – 0,5 |
| dlažba | suchá | 0,6 – 0,9 | hluboký písek, sníh | | 0,2 – 0,4 |
| | mokrý | 0,3 – 0,5 | náledí | 0°C | 0,05 – 0,10 |
| makadam | suchý | 0,6 – 0,8 | | -10°C | 0,08 – 0,15 |
| | mokrý | 0,3 – 0,5 | | -20°C | 0,15 – 0,20 |

Zdroj: Bradáč a kol, 1997

Pro výpočet maximálního dosažitelného zrychlení, resp. zpomalení na vodorovné vozovce lze užít následující vztah:

$$a \leq g \cdot \mu$$

kde: a...zrychlení, resp. zpomalení vozidla [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],
g...tíhové zrychlení ($9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$),
 μ ...součinitel adheze.

Zdroj: Bradáč a kol, 1997

3.2. Příčné přemístování vozidla

Síla tření mezi vozovkou a pneumatikou je využívána pro rozjezd a brzdění. Boční síla je využívána pro překonání odstředivé síly během zatáčení vozidla. Odstředivá síla vyvolává v příčném směru klopný moment, díky kterému dochází k odlehčení vnitřních kol a přitížení kol vnějších. Může dojít i k převrácení vozidla. Na vodorovné vozovce je odstředivá síla dána vztahem:

$$F_o = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

kde: F_o ...odstředivá síla [N],
m...hmotnost vozidla [kg],
v...rychlost vozidla [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
R...poloměr zatáčky [m].

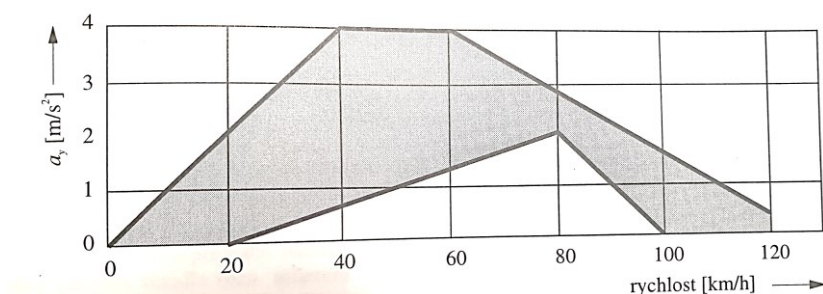
Výše uvedený vztah lze upravit pro výpočet příčného zrychlení působící na vozidlo při průjezdu zatáčkou do tvaru:

$$a = \frac{v^2}{R}$$

kde: v ... rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

R ... poloměr zatáčky [m].

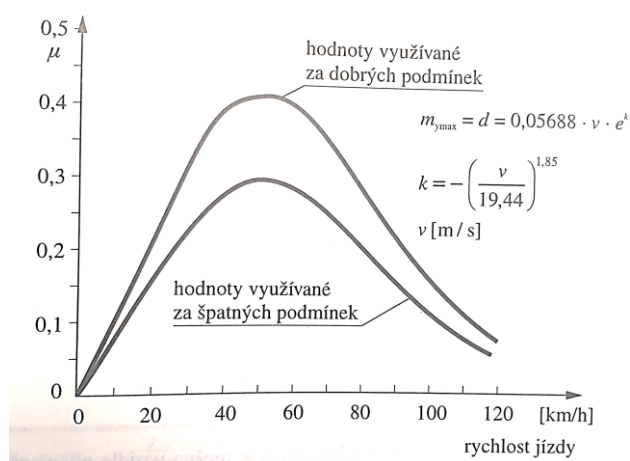
Využitá adheze příčného přemístění je dána mezemi, které jsou výsledkem řady měření. Vyšších hodnot je však dosahováno jen výjimečně a platí pro suchou vozovku. Nižší hodnoty platí pro horší podmínky. Omezení je dáno nejen adhezně, ale také psychologicky. (Bradáč a kol, 1997) Níže uvedený obrázek 3 zachycuje využívané příčné zrychlení.



Obrázek 3: Využívané příčné zrychlení

Zdroj: Bradáč a kol, 1997

Následující obrázek 4 zachycuje využívání součinitele adheze pro jízdu obloukem při bezpečné jízdě za dobrých a špatných podmínek.

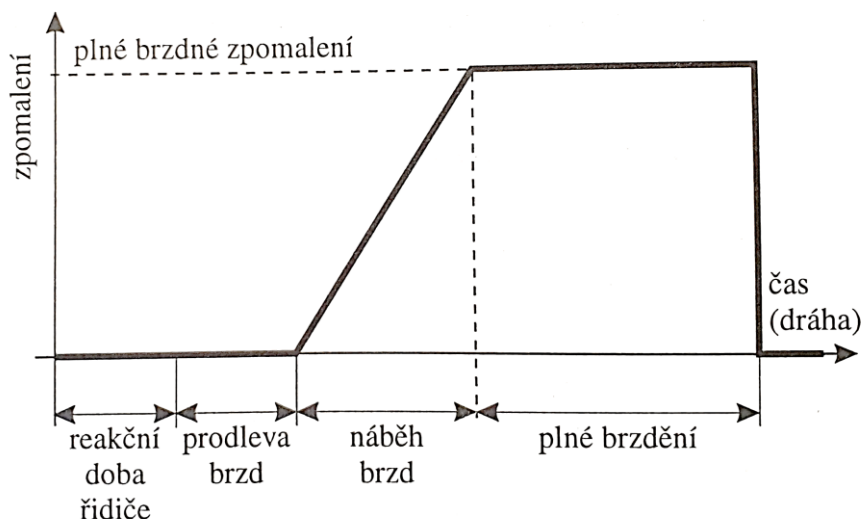


Obrázek 4: Využívání součinitele adheze pro jízdu obloukem při bezpečné jízdě

Zdroj: Bradáč a kol, 1997

3.3. Brzdná dráha automobilu

V souvislosti s brzděním vozidla je nutné zmínit, že samotnou dráhu pro zastavení vozidla tvoří tři faktory, jimiž jsou reakční doba řidiče, odezva vozidla a vlastní brzdná dráha. Fáze pohybu brzděného vozidla zobrazuje následující obrázek 5.



Obrázek 5: Fáze pohybu brzděného vozidla

Zdroj: Bradáč a kol, 1997

Reakční dobu řidiče lze definovat jako dobu, která je potřebná k tomu, aby řidič vozidla, resp. jeho biologický systém zareagoval na podnět (objekt) z jeho zorného pole, a to i v případech, jedná-li se o podnět náhlý či neočekávaný. (Plch, 2010) Zjednodušeně lze reakční dobu řidiče chápat jako dráhu, kterou vozidlo ujede až do okamžiku, kdy řidič vozidla rozpozná kritickou situaci, zpracuje ji a následně začne brzdit. (Policie ČR, 2020) Reakční dobu řidiče lze rozdělit na tři části. Podle Plcha (2010) se jedná o:

- počátek vidění podnětu (objektu) neboli optická reakce,
- doba nutná k rozpoznání podnětu (objektu) neboli psychická reakce,
- vlastní odpověď biologického systému na podnět (objekt) neboli svalová reakce.

Reakční doba řidiče je ovlivňována řadou faktorů, mezi které se dle Porady (2000) řadí např. únava, denní doba, schopnost předvídání určitých situací, koncentrace alkoholu v krvi, popřípadě požití léků či drog viz následující tabulka 3.

Tabulka 3: Orientační hodnoty reakční doby řidiče

| | |
|--|--------------|
| Zkušený řidič připravený brzdít | 0,6 – 0,7 s |
| Pozorný řidič, který nečeká překážku | 0,7 – 0,9 s |
| Řadící nebo předjíždějící řidič | 1,0 – 1,2 s |
| Nepozorný řidič | 1,4 – 1,8 s |
| Indisponovaný řidič (únavou, nemocí, požitím alkoholu) | 1,6 s a více |

Zdroj: Czudková, 2010

Následující tabulka 4 udává vzdálenost, kterou vozidlo ujede během reakční doby řidiče pro různé rychlosti. Reakční doba odpovídá 1 sekundě.

Tabulka 4: Reakční dráha podle rychlosti vozidla

| Rychlost vozidla | Reakční dráha |
|------------------------|---------------|
| 10 km·h ⁻¹ | 2,77 m |
| 50 km·h ⁻¹ | 14,00 m |
| 90 km·h ⁻¹ | 25,00 m |
| 110 km·h ⁻¹ | 30,47 m |
| 130 km·h ⁻¹ | 36,00 m |

Zdroj: Policie ČR, 2020

Z tabulky 4 je na první pohled patrné, že se zvyšující se rychlostí jedoucího vozidla, se reakční dráha prodlužuje. Zatímco při rychlosti 10 km·h⁻¹ představuje reakční dráha ujetou vzdálenost pouhých 2,77 m, při rychlosti 130 km·h⁻¹ odpovídá reakční dráha vzdálenosti až 36,00 m.

Po reakci řidiče následuje odezva vozidla, která zahrnuje prodlevu brzd a samotný náběh brzd. Doba prodlevy brzd představuje dobu od sešlápnutí brzdového pedálu řidičem až po první dotyk třecích ploch brzd (čelistí brzd s bubnem či brzdových destiček s kotoučem). Doba prodlevy brzd je ovlivňována rychlostí sešlapování pedálu, která se liší u normálních řidičů (0,5 m·s⁻¹) a řidičů, kteří jsou trénováni na kritické brzdění (1 m·s⁻¹).

V okamžiku, kdy dojde k prvnímu dotyku třecích ploch brzd začíná doba náběhu brzdného účinku. Náběh brzd končí ve chvíli, kdy pneumatiky zanechávají na vozovce první viditelné stopy čímž začíná vlastní brzdná dráha vozidla. (Porada, 2000) Dráha zastavení vozidla je také závislá na počasí, resp. stavu vozovky v důsledku počasí viz následující tabulka 5.

Tabulka 5: Dráha zastavení vozidla v závislosti na stavu vozovky a rychlosti vozidla

| Stav vozovky | Rychlost vozidla | Reakční dráha | Brzdná dráha | Dráha zastavení |
|--------------|------------------------|---------------|--------------|-----------------|
| Sucho | 50 km·h ⁻¹ | 14 m | 14 m | 28 m |
| | 90 km·h ⁻¹ | 25 m | 45 m | 70 m |
| | 130 km·h ⁻¹ | 36 m | 93 m | 129 m |
| Mokro | 50 km·h ⁻¹ | 14 m | 19 m | 33 m |
| | 90 km·h ⁻¹ | 25 m | 63 m | 88 m |
| | 130 km·h ⁻¹ | 36 m | 130 m | 166 m |
| Náledí | 50 km·h ⁻¹ | 14 m | 64 m | 78 m |
| | 90 km·h ⁻¹ | 25 m | 208 m | 233 m |
| | 130 km·h ⁻¹ | 36 m | 435 m | 471 m |

Zdroj: Policie ČR, 2020

Z tabulky 5 je zřejmé, že reakční doba řidiče při daných rychlostí vozidla zůstává stále stejná bez ohledu na stav vozovky vlivem počasí. Co se však mění je brzdná dráha vozidla. Zatímco na suché vozovce jsou brzdné dráhy nejkratší, vlivem mokré vozovky se brzdné dráhy prodlužují. Nejhorší variantou je náledí, v jehož důsledku se brzdné dráhy prodlužují, a to o více než čtyřnásobek brzdné dráhy na suché vozovce při stejné rychlosti. Pokud by nastala situace, kdy bude vozovka pokryta náledím a řidič vozidla pojedí rychlostí 130 km·h⁻¹, bude v důsledku reakční doby řidiče a brzdné dráhy vozidla celková dráha zastavení 471 m.

4. MĚŘENÍ ZRYCHLENÍ

Samotný pojem zrychlení lze chápat jako změnu rychlosti tělesa v čase. Jedná se o vektorovou veličinu udávající jednak velikost změny a také její směr. Rozlišuje se zrychlení okamžité a zrychlení průměrné. (Voděrek, 2011)

Okamžité zrychlení lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

A průměrné zrychlení lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

kde: a...velikost zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],
dv...změna rychlosti v čase dt [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
dt... nekonečně krátký časový okamžik [s],
 Δv ...změna rychlosti za časový interval Δt [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 Δt ...časový interval, po který se mění rychlost Δv [s].

Vypočtená hodnota zrychlení se zpravidla uvádí v $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Pro porovnání s tíhovým zrychlením se však využívá jednotka g, která nepatří mezi základní jednotky SI. V našich zeměpisných šířkách je hodnota jednoho g rovna $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. (Cholasta, 2010)

Způsob měření zrychlení vozidla

Pro samotné měření zrychlení vozidla jsou využívány především elektronická zařízení (snímače), jejichž systém vychází ze základního zákona síly:

$$F = m \cdot a$$

kde: F...síla působící na těleso [N],
m...hmotnost tělesa [kg],
a...zrychlení tělesa [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$].

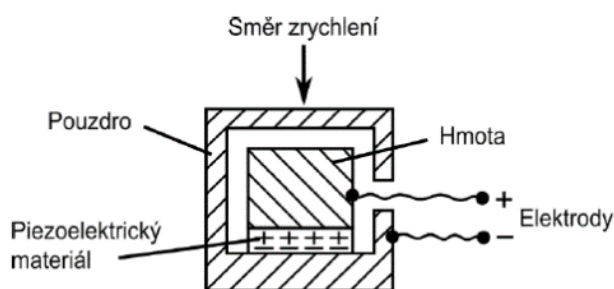
U vozidel je měřeno zrychlení ve třech osách, v podélné (x), příčné (y) a svislé (z). V ose x je zjišťováno podélné zrychlení (akcelerace) a zpomalení (decelerace) vozidla, v ose y příčné zrychlení vozidla (např. při průjezdu zatáčkou) a v ose z vertikální zrychlení vozidla (kmitání). (Cholasta, 2010)

4.1. Akcelerometry

Akcelerometr je elektronické zařízení (senzor), který měří statické a dynamické zrychlení. Statickým zrychlením je míněna síla působení zemské gravitace a dynamickým zrychlením se rozumí síla vzniklá změnou rychlosti pohybujícím se senzorem. Akcelerometry jsou využívány v rámci široké škály měření, mezi které patří zejména měření odstředivých a setrvačných sil, určování pozice tělesa včetně jeho naklonění a vibrací či měření a detekce seismické aktivity. Akcelerometry jsou také součástí mobilních telefonů, MP3 přehrávačů, herních simulátorů a jiných zařízení. Podle principu fungování se akcelerometry dělí na:

- piezoelektrické,
- piezoodporové,
- kapacitní. (Voděrek, 2011)

Piezoelektrické akcelerometry využívají principu piezoelektrického jevu, tedy schopnosti piezoelektrického materiálu (piezokrystalu) generovat elektrický náboj při jeho deformaci. Následující obrázek 6 demonstruje konstrukci piezoelektrického akcelerometru. (Hruška, 2014)

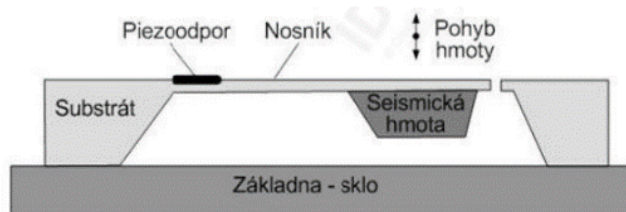


Obrázek 6: Konstrukce piezoelektrického akcelerometru

Zdroj: Krupař, 2019

Z obrázku 6 je patrné, že tento typ akcelerometru se skládá ze dvou hlavních částí, a to seismické hmoty a piezoelektrického materiálu, které jsou uloženy do pouzdra. Při vystavení akcelerometru zrychlení dochází k deformaci piezoelektrického materiálu což způsobí vygenerování náboje, resp. napětí na výstupu senzoru. Tato síla je podle Newtonova zákona úměrná zdroji zrychlení a seismické hmotě. Piezoelektrický efekt tak generuje na výstupu náboj q , který je úměrný působící síle. Z důvodu konstantní hmotnosti seismické hmoty je výstupní signál (vygenerovaný náboj) úměrný akceleraci senzoru. (Střelec, 2010)

Piezoodporové akcelerometry pracují na základě pohybující se seismické hmoty na volném konci vetknutého nosníku. Princip fungování piezoodporového akcelerometru lze vidět na následujícím obrázku 7.



Obrázek 7: Konstrukce tenzometrického akcelerometru

Zdroj: Hruška, 2014

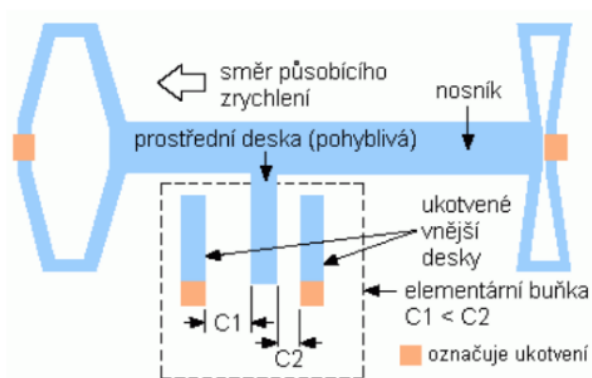
Při vystavení akcelerometru zrychlení dochází k pohybu seismické hmoty, který je přenášen do místa vetknutí nosníku, kde je umístěn tenzometr. Výchylka seismické hmoty odpovídá ohmické změně odporu, která je způsobena zkracováním či prodlužováním odporové dráhy.

Kapacitní akcelerometry patří v současné době mezi nejrozšířenější typy akcelerometrů. Jsou založeny na funkci deskového kondenzátoru, kterou lze popsat následujícím vztahem:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{l}$$

- kde:
- C...kapacita kondenzátoru [F],
 - ε ...permitivita dielektrika,
 - S...plocha desek kondenzátoru [m²],
 - l...vzdálenost desek kondenzátoru [m].

Princip fungování kapacitního akcelerometru je zachycen na následujícím obrázku 8.



Obrázek 8: Konstrukce kapacitního akcelerometru

Zdroj: Hruška, 2014

Na obrázku 8 lze vidět, že kapacitní akcelerometr se skládá ze dvou pevných desek a jedné pohyblivé desky připevněné na nosník. Při působení zrychlení dochází k pohybu pohyblivé desky čímž dochází ke zvětšování jedné kapacity a zároveň zmenšování druhé kapacity kondenzátoru. Jedná se o diferenciální uspořádání, které je využíváno ve složitějších strukturách. V současnosti jsou vyráběny kapacitní akcelerometry 1D (akcelerace je snímána pouze v jednom směru), 2D (akcelerace je snímána ve dvou směrech) a 3D (akcelerace je snímána ve třech směrech). (Hruška, 2014)

4.2. Měření zrychlení mobilním telefonem

Měření zrychlení mobilním telefonem přináší oproti klasickým akcelerometrům některé výhody jako jsou např.:

- nízké pořizovací náklady,
- jednoduchá obsluha,
- velikost,
- přenosnost,
- větší výběr softwaru aj.

V mobilních telefonech se zpravidla používají 3D kapacitní akcelerometry, které umožňují snímání zrychlení ve třech osách x, y, z. Primární funkcí akcelerometrů v mobilních telefonech je zjišťování polohy zařízení pro přizpůsobení natočení obrazu. Dále slouží pro ovládání mobilního telefonu pomocí gest, pro ovládání některých mobilních aplikací aj. (Krupař, 2019) Pro měření zrychlení vozidla při vybraných dopravních situacích v rámci této diplomové práce byl využit mobilní telefon Samsung Galaxy S5 a mobilní aplikace Torque Pro umožňující záznam podélného a příčného zrychlení vozidla.

Primárním účelem aplikace Torque Pro je získávání informací různého charakteru (otáčky motoru, teplota chladicí kapaliny, poloha škrtkové klapky, doba jízdy, průměrná spotřeba aj.) v reálném čase. Některá data jsou získávána z řídicí jednotky vozidla prostřednictvím OBD2 adaptéru do mobilního telefonu pomocí Bluetooth (průměrná spotřeba paliva, okamžitá spotřeba paliva, otáčky motoru, čtení chybových kódů v řídicí jednotce vozidla aj.). Další data získává aplikace přímo ze snímačů v mobilním telefonu (rychlost dle GPS, zrychlení, barometr aj.) Následující obrázek 9 ukazuje prostředí aplikace Torque Pro.



Obrázek 9: Aplikace Torque Pro

Zdroj: vlastní zpracování

Obrázek 9 zachycuje domovskou obrazovku aplikace Torque Pro, kde lze vidět některé nabízené funkce jako jsou informace v reálném čase, chybové kódy, náhled mapy, záznam trasy a výsledky testu. V rámci funkce informace v reálném čase si uživatel zvolí parametry, které chce během jízdy sledovat a aplikace je zobrazí formou ciferníků jejichž vzhled si volí sám uživatel viz prostřední náhled. Následující obrázek 10 zachycuje funkci Track recorder, která byla využita pro sběr dat pro další zpracování. Výhodou funkce Track recorder je že kromě informací v reálném čase zachycuje rovněž videozáznam jízdy.



Obrázek 10: Aplikace Torque Pro – Track recorder

Zdroj: vlastní zpracování

Na obrázku 10 lze vidět výhled z vozidla a zaznamenávaná data. V horní části obrázku jsou umístěny digitální ciferníky zobrazující zrychlení vozidla v ose x, y a z. V pravé horní části lze vidět ciferník zobrazující rychlost jízdy dle GPS. V levém dolním rohu je umístěn ciferník, který zobrazuje podélné a příčné zrychlení působící na vozidlo, resp. mobilní telefon během jízdy a druhý (menší) ciferník zobrazuje náklon vozidla během jízdy. V pravém dolním rohu jsou časové údaje (datum a čas pořízení záznamu a délka záznamu). Pro účely této práce byly využívány výhradně dva ciferníky, ciferník zaznamenávající rychlost a ciferník zaznamenávající podélné a příčné zrychlení umístěný v levém dolním rohu.

Do paměti mobilního telefonu je uložen jednak videozáznam z každé trasy a také textový soubor obsahující naměřená data ve formátu csv. Tato data byla následně převedena do tabulkového procesoru (Excel) a vhodně upravena pro další analýzu viz následující obrázek 11.

| 1 | Column1 | Column2 | Column3 | Column4 | Column5 | Column6 | Column7 | Column8 | Column9 | Column10 |
|---|---------------|----------------|----------------|----------|-----------|-----------------|----------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 2 | Time | Lat | Lon | Bearing | GPS Speed | GPS Sats Locked | GPS HDOP | G(x) | G(y) | G(z), "Tilt(y)(°)" |
| 3 | 1590101971949 | 00050.27280426 | 00016.22397232 | 00000.00 | 00000.00 | 00009.00 | 00005.00 | -00000.00954522 | 00000.00127183 | -00000.05743367 |
| 4 | 1590101972048 | 00050.27280426 | 00016.22397232 | 00000.00 | 00000.00 | 00009.00 | 00005.00 | -00000.00795506 | 00000.00126113 | -00000.05621644 |
| 5 | 1590101972148 | 00050.27280426 | 00016.22397232 | 00000.00 | 00000.00 | 00009.00 | 00005.00 | -00000.00724132 | -00000.00012439 | -00000.05480922 |
| 6 | 1590101972254 | 00050.27280426 | 00016.22397232 | 00000.00 | 00000.00 | 00009.00 | 00005.00 | -00000.00604616 | -00000.00244405 | -00000.05240531 |
| 7 | 1590101972350 | 00050.27280426 | 00016.22397232 | 00000.00 | 00000.00 | 00009.00 | 00005.00 | -00000.00640231 | -00000.00124537 | -00000.05269107 |

| AB | AC | AD | AE | AF | AG | AH | AI | AJ | AK |
|-------------------------|----------|----------|-----------|----------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Column28 | Column29 | Column30 | Column302 | Column31 | Column32 | Column33 | Column34 | Column37 | Column40 |
| Datum a čas | Krok | Time | Čas | Rychlost | G(x) | G(y) | G(z) | G(x) * 9.81 | G(y) * 9.81 |
| 21.05.2020 22:59:31.949 | 0.099 | 0.000 | 0.000 | 0 | 0.00954522 | 0.00127183 | -0.05743367 | 0.093638608 | 0.012476652 |
| 21.05.2020 22:59:32.048 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0 | 0.00795506 | 0.00126113 | -0.05621644 | 0.078039139 | 0.012371685 |
| 21.05.2020 22:59:32.148 | 0.106 | 0.206 | 0.206 | 0 | 0.00724132 | -0.00012439 | -0.05480922 | 0.071037349 | -0.001220266 |
| 21.05.2020 22:59:32.254 | 0.096 | 0.302 | 0.302 | 0 | 0.00604616 | -0.00244405 | -0.05240531 | 0.05931283 | -0.023976131 |
| 21.05.2020 22:59:32.350 | 0.098 | 0.400 | 0.400 | 0 | 0.00640231 | -0.00124537 | -0.05269107 | 0.062806661 | -0.01221708 |

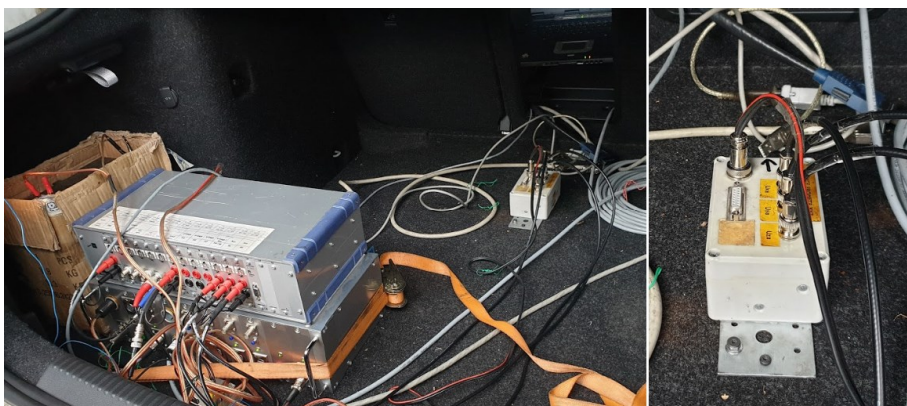
Obrázek 11: Zaznamenaná data aplikací Torque Pro

Zdroj: vlastní zpracování

Na obrázku 11 lze vidět postup při zpracování naměřených dat. První náhled zobrazuje výstup dat z aplikace Torque Pro prostřednictvím poznámkového bloku. Tato data byla následně převedena do tabulkového procesoru (Excel) viz druhý náhled. Třetí náhled nabízí již upravená data, která byla použita pro další analýzu.

4.3. Ověření přesnosti použité technologie

K ověření přesnosti zvolené technologie (mobilní telefon, aplikace Torque Pro) byl využit akcelerometr, který je dostupný ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě Dopravní fakulty Jana Pernera v Pardubicích (dále jen „VVCD“). Porovnávací měření bylo provedeno v areálu VVCD prostřednictvím školního testovacího vozidla Škoda Octavia Style 2.0, 110 kW, 4x4. Při zkušebním porovnávacím měření byla snímána rychlost a podélné a příčné zrychlení vozidla. Jako snímač pro měření rychlosti byl použit snímač Correvit S-CE s gyroskopem od výrobce Corrsys-Datron. K měření podélného a příčného zrychlení byl použit tříosý snímač zrychlení iMEMS typu ADXL311. Následující obrázek 12 zachycuje použitou technologii.



Obrázek 12: Zapojení akcelerometru ve vozidle

Zdroj: vlastní zpracování

Výše uvedený obrázek 12 zachycuje použitou technologii, konkrétně akcelerometr, měřící ústřednu pro sběr a záznam dat a také zdroj napájení (baterie). Všechna tato zařízení jsou umístěna v zavazadlovém prostoru testovacího vozidla. Na následujícím obrázku 13 lze vidět testovací vozidlo Škoda Octavia.



Obrázek 13: Snímač pro měření rychlosti vozidla

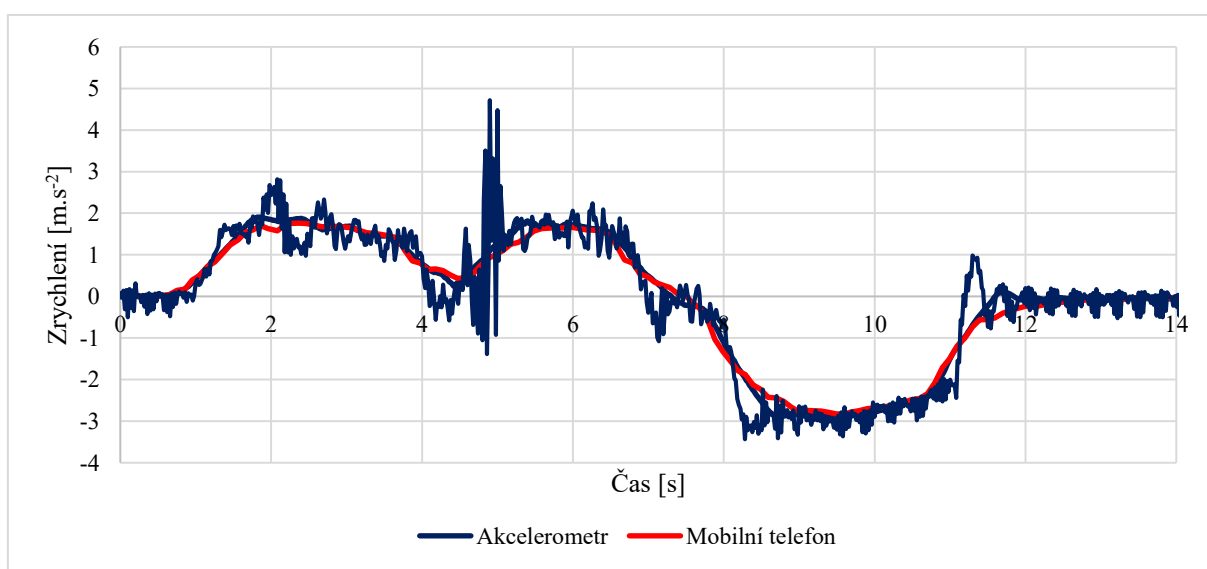
Zdroj: vlastní zpracování

Z výše uvedeného obrázku 13 je patrné, že testovací vozidlo Škoda Octavia má na svém levém boku umístěno zařízení pro snímání rychlosti vozidla (Correvit S-CE) během jízdy. S tímto vozidlem byla následně provedena série testovacích jízd a to:

- pozvolný rozjezd a následné zabrzdění vozidla,
- prudký rozjezd a následné zabrzdění vozidla,
- testovací jízda po areálu VVCD.

Data zaznamenaná pomocí výše uvedených snímačů byla porovnána s naměřenými daty prostřednictvím mobilního telefonu a aplikace Torque Pro. Mobilní telefon byl umístěn v držáku připevněném na čelním skle vozidla z důvodu pořízení videozáznamu jednotlivých testovacích jízd. Naměřená data byla následně převedena do grafické podoby. Z důvodu vyšší vzorkovací frekvence akcelerometru bylo nutné vyhladit průběh hodnot podélného zrychlení pomocí spojnice trendu (klouzavý průměr). Pro níže uvedené grafy platí následující:

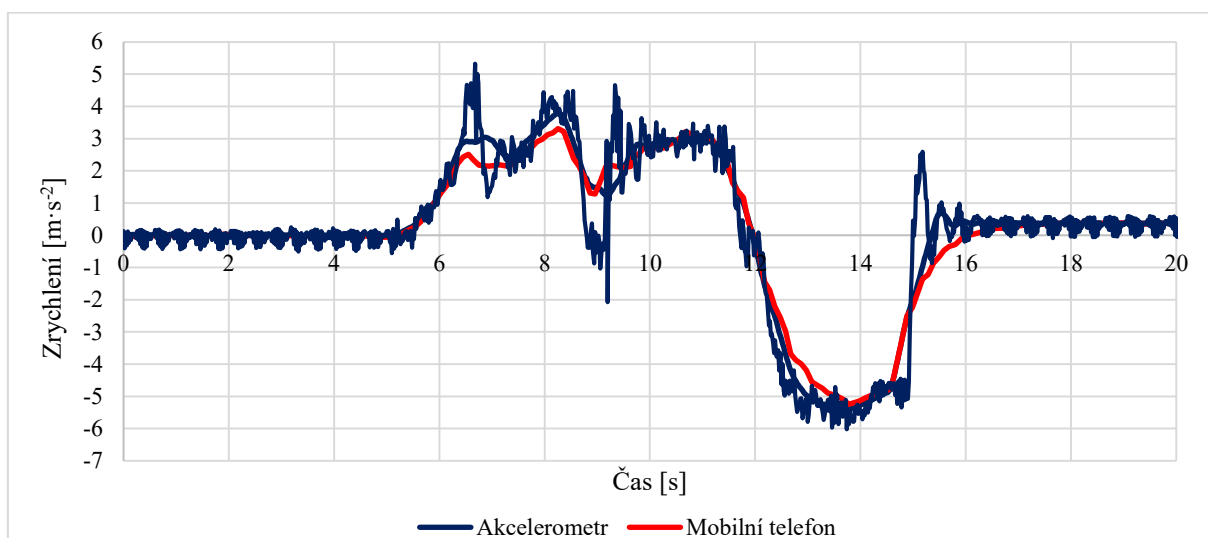
- kladné hodnoty podélného zrychlení představují akceleraci (zrychlení),
- záporné hodnoty podélného zrychlení představují deceleraci (brzdění),
- kladné hodnoty příčného zrychlení představují otočení volantem doprava,
- záporné hodnoty příčného zrychlení představují otočení volantem doleva.



Graf 1: Porovnání výsledku měření podélného zrychlení – pozvolný rozjezd a brzdění

Zdroj: vlastní zpracování

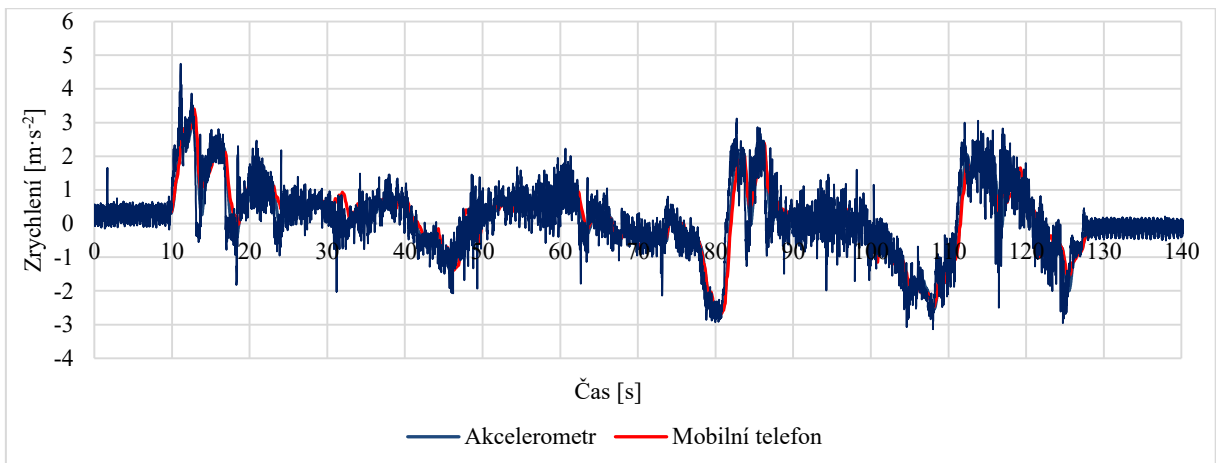
Graf 2 ukazuje podélné zrychlení vozidla při pozvolném rozjezdu a následném brzdění. Na první pohled je patrné, že průběh naměřených hodnot je velmi podobný. Maximální hodnota podélného zrychlení naměřená akcelerometrem byla $1,91 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a v případě mobilního telefonu byla naměřena maximální hodnota $1,76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Jedná se o rozdíl $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Minimální hodnota podélného zrychlení naměřená akcelerometrem byla $-2,90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a v případě mobilního telefonu se jednalo o hodnotu $-2,83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Při brzdění byl tedy rozdíl $0,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Následoval prudký rozjezd a brzdění viz graf 3.



Graf 2: Porovnání výsledků měření podélného zrychlení – prudký rozjezd a brzdění

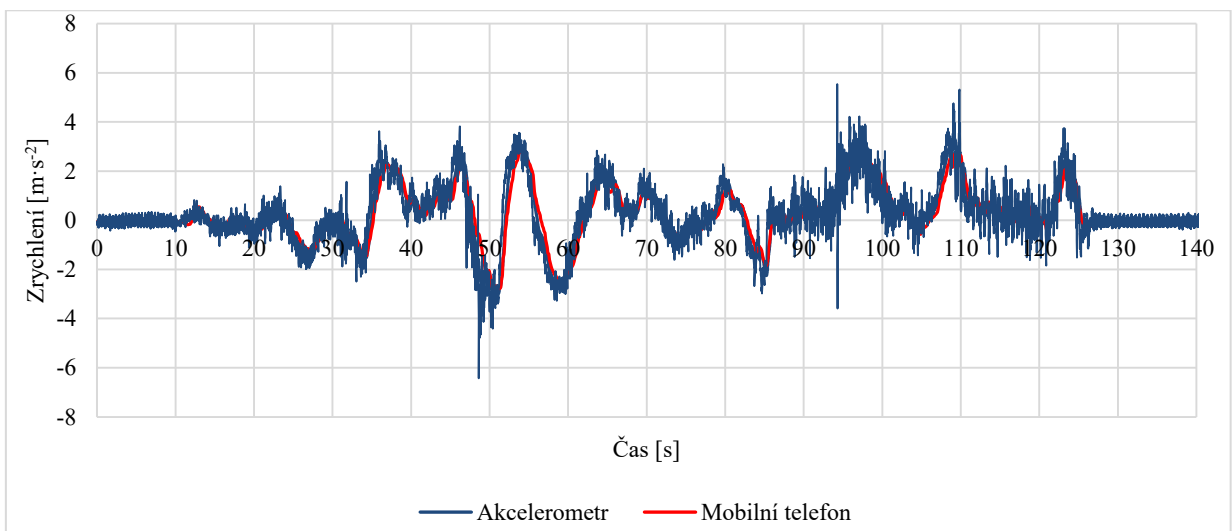
Zdroj: vlastní zpracování

Graf 3 ukazuje podélné zrychlení vozidla při prudkém rozjezdu a následném brzdění. Na první pohled je patrné, že v tomto případě se průběh naměřených hodnot mírně lišil. Maximální hodnota podélného zrychlení naměřená akcelerometrem byla $3,80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a v případě mobilního telefonu byla naměřena maximální hodnota $3,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Jedná se o rozdíl $0,49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Minimální hodnota podélného zrychlení naměřená akcelerometrem byla $-5,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a v případě mobilního telefonu se jednalo o hodnotu $-5,24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Při brzdění byl tedy rozdíl $0,16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Po pozvolném a prudkém rozjezdu následovala zkušební jízda po areálu VVCD jejíž záznam je zachycen níže.



Graf 3: Porovnání výsledků měření podélného zrychlení

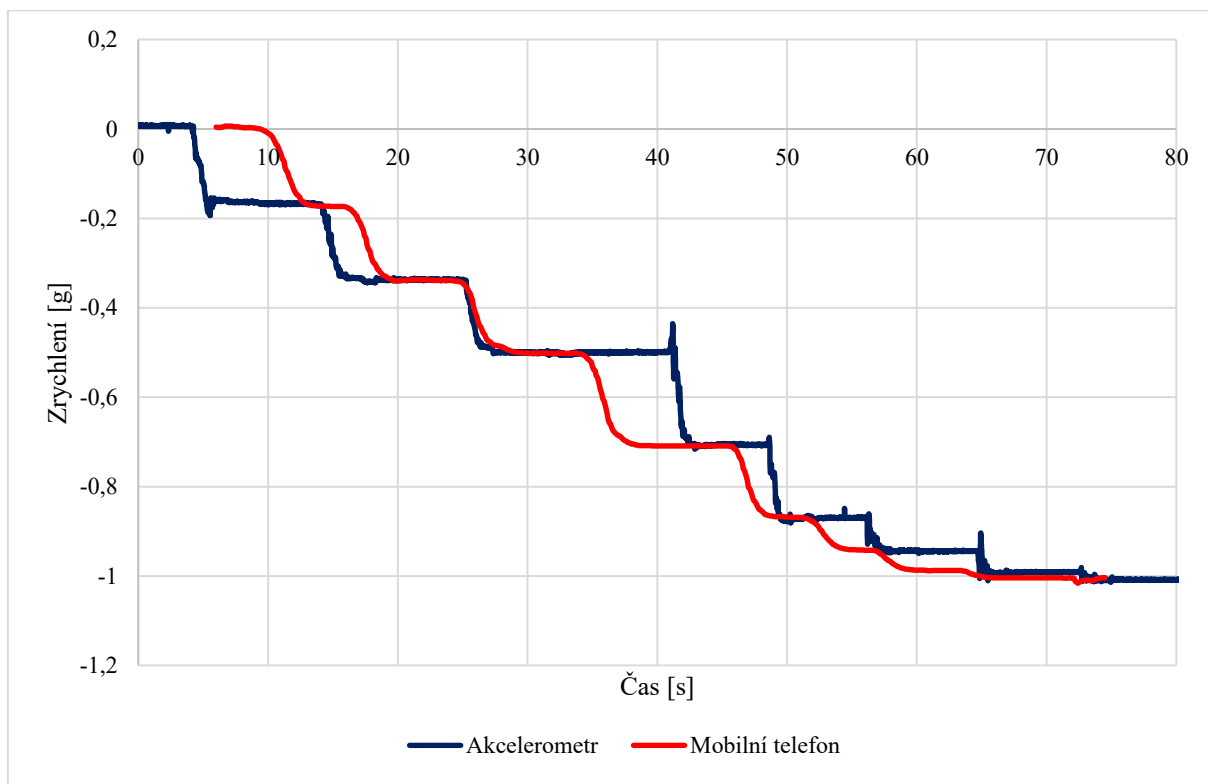
Zdroj: vlastní zpracování



Graf 4: Porovnání výsledků měření příčného zrychlení

Zdroj: vlastní zpracování

Průběhy podélného i příčného zrychlení naměřené akcelerometrem a mobilním telefonem jsou velmi podobné a naměřená data se příliš nelišila. Docházelo pouze k mírným odchýlkám zejména v oblasti lokálních extrémů.



Graf 5: Porovnání výsledků měření náklonu

Zdroj: vlastní zpracování

Graf 6 zachycuje porovnání výsledků měření příčného zrychlení pomocí úhlooměru. Hodnoty příčného zrychlení se měřily pro úhly 0°, 10°, 20°, 30°, 45°, 60°, 70°, 80° a 90°, nejprve mobilním telefonem a poté analogicky akcelerometrem. V rámci tohoto měření lze naměřené hodnoty ověřit pomocí následujícího vztahu:

$$a_{\alpha} = a \cdot \sin \alpha$$

kde: a_{α} ...hodnota zrychlení při úhlu natočení α ,

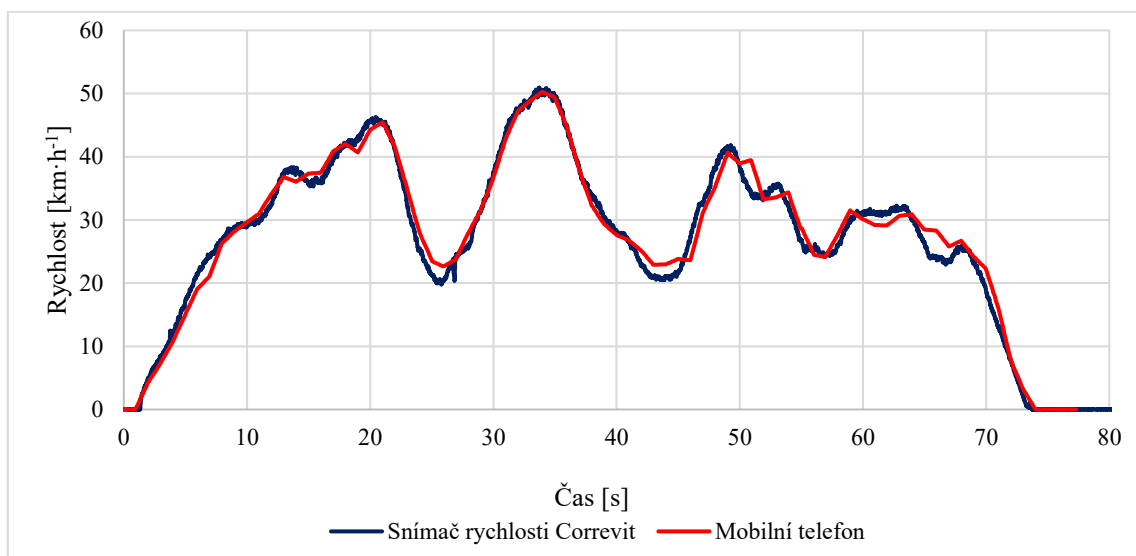
a ...hodnota zrychlení,

α ...úhel náklonu.

Zdroj: Porada, 2020

Z obrázku je patrné, že akcelerometr i mobilní telefon naměřili téměř shodné hodnoty. Při některých úhlech se mobilní telefon přibližoval vypočtené hodnotě více než akcelerometr např. při 10° naměřil mobilní telefon hodnotu -0,173 g, akcelerometr -0,169 g a dle výpočtu by se hodnota příčného zrychlení měla rovnat -0,174 g. Při úhlu natočení 90° je hodnota příčného zrychlení -1 g, mobilní telefon v tomto případě naměřil hodnotu -1,004 g

a akcelerometr -1,008 g. Následující graf 7 zachycuje porovnání naměřených hodnot rychlosti vozidla během testovacích jízd.



Graf 6: Porovnání výsledků měření rychlosti

Zdroj: vlastní zpracování

Z grafu 7 je na první pohled patrné, že obě zařízení naměřili téměř shodné hodnoty rychlosti vozidla. Odchytky hodnot naměřené mobilním telefonem jsou způsobeny nízkou vzorkovací frekvencí, kdy se hodnota rychlosti zjištěná pomocí GPS zaznamenává jednou za sekundu (akcelerometr zaznamenává hodnoty jednou za setinu sekundy).

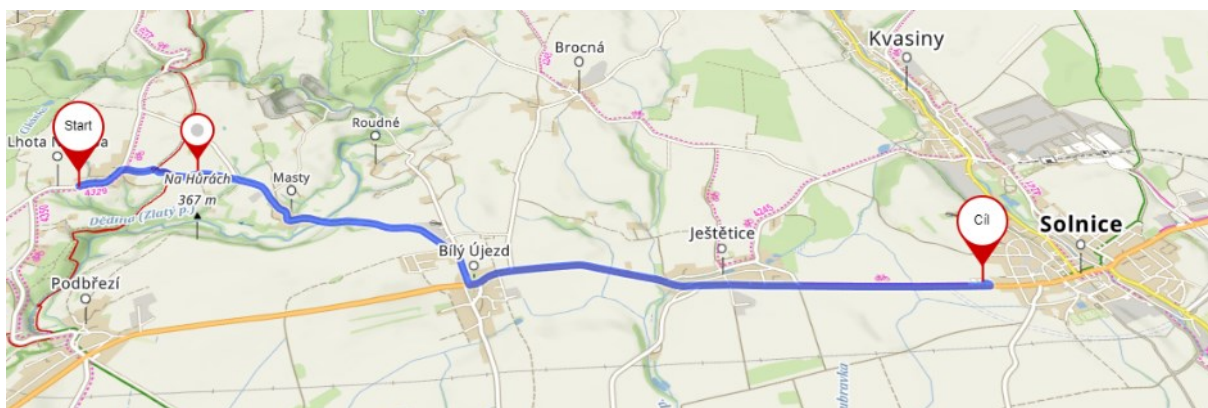
Během testovacích jízd byly zjištěny drobné odchytky mezi daty naměřených pomocí mobilního telefonu a akcelerometru. Nejvýraznější odchytky byly zjištěny při dynamičtějším změnách zrychlení, které mohou být způsobeny:

- rozdílným umístěním snímačů ve vozidle (mobilní telefon na čelním skle a akcelerometr v zavazadlovém prostoru v blízkosti zadních sedadel),
- připevněním snímačů ve vozidle (zejména u mobilního telefonu),
- rozdílnou vzorkovací frekvencí snímačů (mobilní telefon zaznamenává data zhruba každou desetinu sekundy a akcelerometr každou setinu sekundy).

Po provedených srovnávacích měřeních se aplikace Torque Pro jeví jako dostačující pro účely této diplomové práce.

5. VÝBĚR A ANALÝZA DOPRAVNÍCH SITUACÍ

Data pro účely této diplomové práce byla shromážděna prostřednictvím zaznamenávání náhodných jízd zejména v Královéhradeckém kraji, kterých bylo celkem 100, jejichž záznamy byly využity pro analýzu zajímavých (nahodilých) dopravních situací. Dále byla data získána opakovaným zaznamenáváním jedné trasy v Královéhradeckém kraji, konkrétně mezi obcemi Lhota Netřeba a Solnice, viz obrázek 14, která byla využita pro analýzu vybraných dopravních situací nacházející se na této trase.



Obrázek 14: Trasa Lhota Netřeba – Solnice

Zdroj: vlastní zpracování (Mapy.cz, 2020)

Výše vyobrazená trasa je dlouhá 7 km přičemž 3,4 km představuje silnice III. třídy a 3,6 km představuje silnice I. třídy. Projetí této trasy trvá přibližně 9 minut. Ve směru ze Lhoty Netřeba do Solnice bylo zaznamenáno celkem 60 tras, v opačném směru jich bylo zaznamenáno 43. K analýze byly vybrány dvě situace na této trase, a to průjezd zatáčkou ležící mezi obcemi Masty a Bílý Újezd a rozjezd do křižovatky v místě napojení silnice III. třídy na silnici I. třídy v obci Bílý Újezd. Veškeré trasy byly realizovány v rámci pracovních cest dvěma služebními vozy viz následující obrázek 15.



Obrázek 15: Vozidla

Zdroj: vlastní zpracování

Převážná většina cest byla realizována osobním automobilem Peugeot Partner (vpravo) a některé trasy byly uskutečněny dodávkovým vozidlem Fiat Ducato (vlevo). Parametry obou vozidle jsou uvedeny v následující tabulce 6.

Tabulka 6: Technické parametry vozidel

| Typ vozidla | Fiat Ducato | Peugeot Partner |
|-----------------------------------|-------------|-----------------|
| Rok výroby | 2017 | 2019 |
| Zdvihový objem [cm ³] | 2287 | 1560 |
| Výkon [kW] | 110 | 73 |
| Hmotnost [kg] | 2040 | 1382 |

Zdroj: vlastní zpracování

5.1. Průjezd zatáčkou mezi obcemi Mastý a Bílý Újezd

Jak už bylo zmíněno výše, vybraná zatáčka se nachází mimo obec, maximální povolená rychlost tedy činí 90 km·h⁻¹. Níže je zobrazen vizuální náhled z jedoucího vozidla na analyzovanou zatáčku v obou směrech (nejprve ve směru Mastý-Bílý Újezd a poté v opačném směru).

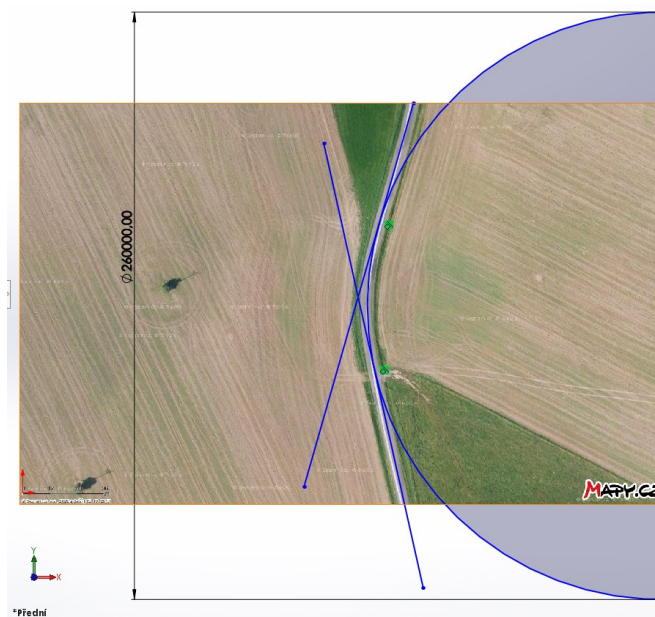


Obrázek 16: Nájezd do zatáčky v obou směrech

Zdroj: vlastní zpracování

Ve směru Mastý – Bílý Újezd (levotočivá zatáčka) analyzované zatáčky předchází výjezd do horizontu a mírná pravotočivá zatáčka. V opačném směru (pravotočivá zatáčka) se do analyzované zatáčky najíždí z přímého úseku, kterému předchází levotočivá zatáčka.

V rámci analýzy průjezdu touto zatáčkou byly vyhodnocovány hodnoty příčného zrychlení vozidla a jeho rychlost. K analytickému výpočtu příčného zrychlení vozidla je zapotřebí znát poloměr zatáčky a rychlost vozidla. Poloměr analyzované zatáčky byl zjišťován několika způsoby. Nejprve pomocí grafického zpracování mapy (obrázek 17), kdy byla do mapy zakreslena kružnice odpovídající profilu zatáčky a následně byl změřen její poloměr, který odpovídal hodnotě 130 m.

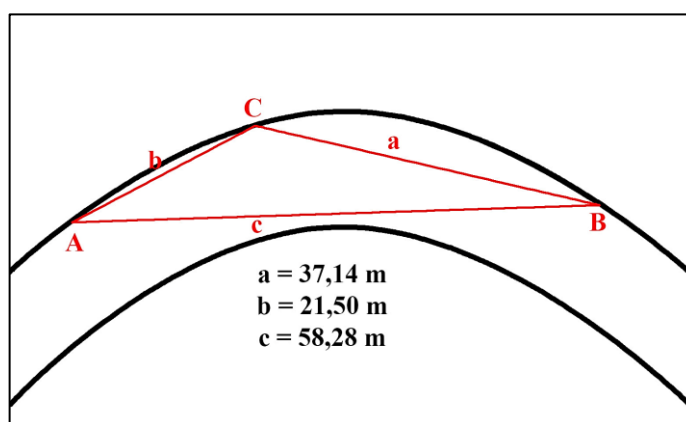


Obrázek 17: Poloměr zatáčky podle mapy

Zdroj: vlastní zpracování (Mapy.cz, 2020)

Poté byly provedeny dvě měření v terénu. Jedním způsobem bylo měření poloměru zatáčky pomocí lana, jehož jeden konec byl natažen do středu pomyslné kružnice, jehož poloha byla odhadnuta pomocí GPS souřadnic a druhým koncem lana bylo následně pohybováno po vnějším okraji zatáčky. Střed kružnice byl následně upravován až do momentu, kdy se lanem opisovaný oblouk shodoval s profilem zatáčky. Vnější poloměr zatáčky byl zjištěn na základě změření délky lana což odpovídalo hodnotě 128,65 m.

Druhým způsobem bylo zjištění poloměru zatáčky pomocí opsané kružnice trojúhelníku, jehož vrcholy se nacházejí na vnějším oblouku zatáčky. Pomocí pásma byla změřena délka všech tří stran trojúhelníku viz následující obrázek 18.



Obrázek 18: Schematické zobrazení měření poloměru zatáčky pomocí opsané kružnice trojúhelníku

Zdroj: vlastní zpracování

Z naměřených hodnot byl následně vypočten poloměr zatáčky dle vztahu:

$$r = \frac{abc}{4S}$$

kde: a, b, c...strany trojúhelníku [m],

S... obsah trojúhelníku [m²].

Obsah trojúhelníku byl vypočten dle Heronova vzorce:

$$S = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$$

kde: s...poloviční obvod trojúhelníku vypočtený dle vzorce:

$$s = \frac{a+b+c}{2}$$

(Mikulčák a kol., 1988)

Hodnota vnějšího poloměru zatáčky byla v tomto případě 127,77 m. Výsledky všech tří měření poloměru zatáčky byly téměř shodné, ale za nejpřesnější byl označen výpočet pomocí opsané kružnice trojúhelníku. Pro další výpočty bude tedy využita hodnota 127,7 m.

5.1.1. Metodika zpracování naměřených dat

V rámci každé zaznamenané trasy byla nejprve z datového záznamu vyjmuta část odpovídající průjezdu analyzovanou zatáčkou. S těmito daty byla následně provedena série úkonů, jejichž cílem bylo nalezení maximální hodnoty příčného zrychlení a následný výpočet průměrné hodnoty příčného zrychlení a průměrné rychlosti při průjezdu zatáčkou.

Do hodnoty průměrného příčného zrychlení byly započteny pouze hodnoty vypovídající o výrazném zakřivení zatáčky, tedy hodnoty naměřené v místě vrcholu oblouku zatáčky z důvodu zamezení zkreslení výsledku nízkými hodnotami při nájezdu a výjezdu ze zatáčky. Pro zjištění těchto hodnot bylo vyzkoušeno několik metod. Nejprve pomocí časového úseku 3 sekund (4.-7. sekunda záznamu), který byl zvolen na základě grafického zpracování příčného zrychlení vozidla v čase. Tento způsob se záhy ukázal jako nevhodný, neboť datová oblast mezi 4.-7. sekundou představovala jiný úsek zatáčky z důvodu rozdílné rychlosti v rámci jednotlivých průjezdů zatáčkou.

V rámci dalšího způsobu nalezení hodnot pro výpočet průměrného příčného zrychlení byla využita maximální hodnota příčného zrychlení, kdy do výpočtu bylo zahrnuto celkem 11 hodnot (5 hodnot před a po maximální hodnotě) což odpovídalo časovému úseku

1,1 sekundy. Tento způsob je však vhodný pouze pro průjezdy, u nichž jsou v grafickém zpracování hodnoty příčného zrychlení symetrické kolem maxima.

Při posledním způsobu nalezení hodnot pro výpočet průměrného zrychlení byla opět využita maximální hodnota příčného zrychlení, která byla následně snížena o 10 %, 15 %, 20 % a 30 %. Do výpočtu průměrného příčného zrychlení byly zahrnuty hodnoty, které byly shodné či větší než snížená hodnota maxima. Tento způsob se ukázal jako nejvhodnější a pro další vyhodnocování průjezdů zatáčkou byly zvoleny hodnoty shodné či větší než snížená hodnota maxima o 20 %. Pro tento úsek hodnot byla následně vypočtena průměrná rychlost.

Vypočtené hodnoty průměrné rychlosti v rámci jednotlivých průjezdů analyzovanou zatáčkou byly následně použity pro výpočet příčného zrychlení v zatáčce. Pro výpočty byla použita hodnota poloměru zatáčky 127,7 m od které bylo následně odečteno 0,7 m z důvodu umístění měřicího zařízení ve vozidle. V případě levotočivé zatáčky bylo tedy počítáno s poloměrem zatáčky 127 m a v případě pravotočivé zatáčky byl dosazen poloměr zatáčky 124 m.

5.1.2. Průjezd zatáčkou po vnějším oblouku

Jak už bylo zmíněno výše, po vnějším oblouku zatáčky (ve směru Masty – Bílý Újezd) bylo realizováno 60 průjezdů analyzovanou zatáčkou. Většina průjezdů v tomto směru byla realizována před 7 h ranní. Následující tabulka 7 zobrazuje četnosti maximálních, průměrných a vypočtených hodnot příčného zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnějším oblouku, rozdělených do intervalů.

Tabulka 7: Četnost maximálních, průměrných a vypočtených hodnot příčného zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnějším oblouku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

| Interval | Maximální hodnoty příčného zrychlení | Průměrné hodnoty příčného zrychlení | Vypočtené hodnoty příčného zrychlení |
|----------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| <0; 0,5> | 0 | 0 | 0 |
| (0,5; 1> | 1 | 1 | 0 |
| (1; 1,5> | 1 | 2 | 1 |
| (1,5; 2> | 2 | 4 | 2 |
| (2; 2,5> | 5 | 7 | 3 |
| (2,5; 3> | 14 | 17 | 5 |
| (3; 3,5> | 12 | 15 | 16 |
| (3,5; 4> | 11 | 7 | 22 |
| (4; 4,5> | 10 | 6 | 4 |
| (4,5; 5> | 3 | 0 | 4 |
| (5; 5,5> | 1 | 1 | 3 |
| suma | 60 | 60 | 60 |

Zdroj: vlastní zpracování

Z tabulky 7 je na první pohled patrné, že zatímco vypočtené hodnoty příčného zrychlení se pohybovali zejména v rozmezí hodnot od 3 do 4, ve skutečnosti byly průměrné hodnoty příčného zrychlení nižší a pohybovaly se v rozmezí hodnot od 2,5 do 3,5. Tato skutečnost je zapříčiněna zejména tím, že se vozidlo při průjezdu zatáčkou nepohybuje pouze při pravém kraji vozovky, ale dochází k nájezdu vozidla do středu vozovky či do protisměru v případě, že není míjeno protijedoucí vozidlo. Čímž dochází ke změně pomyslného poloměru zatáčky.

Hodnoty maximálního příčného zrychlení se nejčastěji pohybovaly v rozmezí od 2,5 do 4,5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Nejvíce hodnot (14) se nacházelo v intervalu (2,5; 3>.

Hodnoty průměrného příčného zrychlení se pohybovaly v rozmezí od 0,5 až 5,5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Více než 50 % hodnot průměrného příčného zrychlení náleželo do rozhraní hodnot od 2,5 do 3,5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Nejvíce hodnot (17) se nacházelo v intervalu (2,5; 3>.

Vypočtené hodnoty příčného zrychlení se pohybovaly od 1 do 5,5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, přičemž více než 60 % hodnot náleželo do rozhraní hodnot 3 až 4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Nejvíce hodnot (22) náleželo do intervalu (3,5; 4>.

Další zjišťovanou hodnotou byla průměrná rychlost vozidla v zatáčce. Hodnoty průměrné rychlosti byly obdobně jako u výše analyzovaných dat rozděleny do intervalů, jejichž četnosti zobrazuje následující tabulka 8.

Tabulka 8: Četnost průměrných rychlostí vozidla při průjezdu zatáčkou po vnějším oblouku [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]

| Interval | Četnost |
|----------|---------|
| <0;50> | 1 |
| (50;55> | 1 |
| (55;60> | 3 |
| (60;65> | 1 |
| (65;70> | 5 |
| (70;75> | 14 |
| (75;80> | 22 |
| (80;85> | 5 |
| (85;90> | 4 |
| (90;95> | 4 |
| suma | 60 |

Zdroj: vlastní zpracování

Z tabulky 8 vyplývá, že z celkového počtu 60 průjezdů zatáčkou jich bylo nejvíce uskutečněno v rychlosti $75\text{-}80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Při nejpomalejším průjezdu zatáčkou dosahovalo vozidlo rychlosti $44 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Na druhou stranu nejrychlejší průjezd byl realizován při rychlosti vozidla $92,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

5.1.2.1. Analýza vybraných průjezdů se standardní rychlostí vozidla

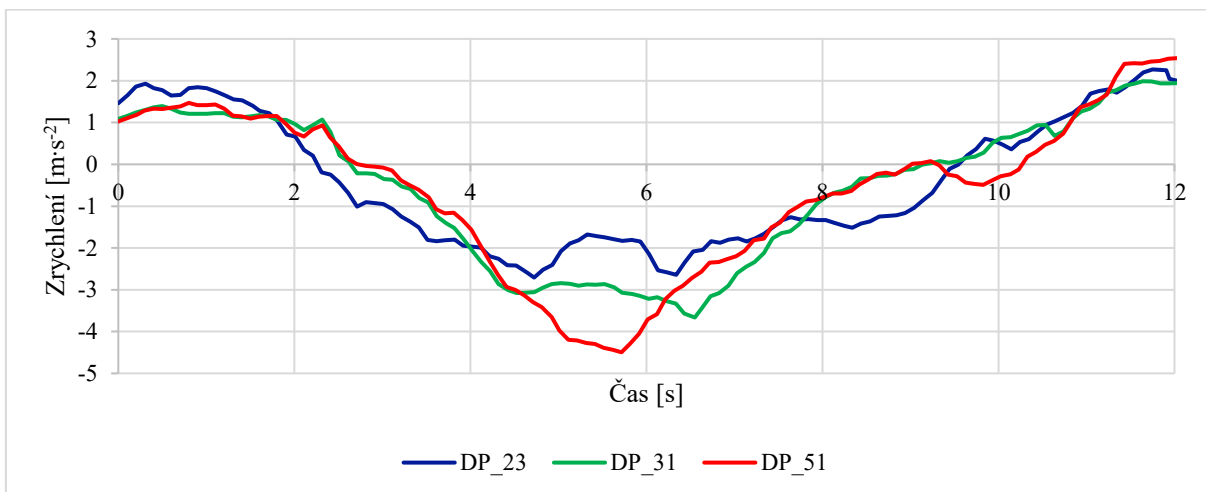
Následně byly k analýze vybrány tři průjezdy zatáčkou, jejichž rychlost náleží do nejvíce zastoupeného intervalu $(75;80>$. Jednalo se o průjezdy, u kterých byla naměřena téměř shodná rychlost vozidla při průjezdu zatáčkou, ale velmi rozdílná hodnota průměrného příčného zrychlení. Byl vybrán průjezd s nejnižší, nejvyšší a běžnou průměrnou hodnotou příčného zrychlení. Dva průjezdy byly uskutečněny osobním automobilem (DP_31 a DP_51) a jeden dodávkovým vozidlem přepravujícím zboží (DP_23). Následující tabulka 9 zobrazuje rychlost při průjezdu zatáčkou a hodnoty průměrného příčného zrychlení vybraných tří cest.

Tabulka 9: Rychlost vozidla a průměrné příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnějším oblouku

| Cesta | Typ vozidla | Rychlost vozidla | Průměrné příčné zrychlení |
|-------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| DP_23 | dodávkové vozidlo přepravující zboží | $78,6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ | 2,17 |
| DP_31 | osobní automobil | $78,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ | 3,10 |
| DP_51 | osobní automobil | $79,0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ | 4,16 |

Zdroj: vlastní zpracování

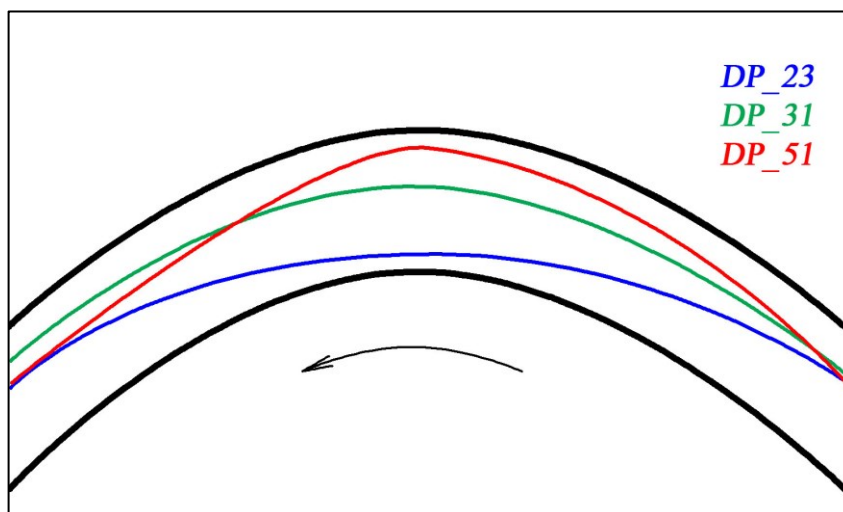
Cesta DP_31 je považována za obvyklou, a proto průměrná hodnota příčného zrychlení (3,10) bude brána jako výchozí pro následující porovnání. Při cestě DP_23 byla naměřena nižší průměrná hodnota příčného zrychlení oproti výchozí hodnotě a to o 30 % tedy 2,17. V případě cesty DP_51 byla naopak naměřena vyšší průměrná hodnota příčného zrychlení a to o 34,2 % tedy 4,16. Následující graf 8 zachycuje průběh příčného zrychlení při průjezdu zatáčkou v čase pro výše uvedené cesty.



Graf 7: Příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnějším oblouku vybraných cest (A)

Zdroj: vlastní zpracování

Hodnoty příčného zrychlení se liší na základě rozdílného způsobu projetí analyzovanou zatáčkou. Trajektorie pohybu vozidla při průjezdu zatáčkou v rámci výše uvedených cest jsou zachyceny na následujícím obrázku 19.



Obrázek 19: Schematické zobrazení průjezdů zatáčkou po vnějším oblouku (A)

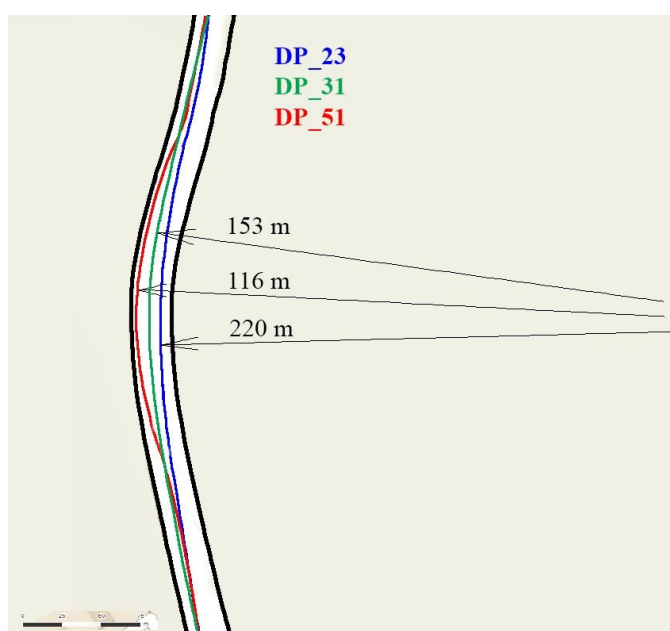
Zdroj: vlastní zpracování

Obrázek 19 zachycuje tři různé způsoby průjezdu zatáčkou. Při těchto průjezdech nebylo míjeno žádné protijedoucí vozidlo a řidič mohl využít celou šíři vozovky.

Cesta DP_31 představuje běžný průjezd zatáčkou, při kterém se vozidlo pohybuje pouze v pravém jízdním pruhu a přibližně kopíruje tvar zatáčky. Došlo pouze k mírnému nájezdu ke středu vozovky v místě vrcholu zatáčky.

Cesta DP_51 představuje ve srovnání se zbylými dvěma průjezdy o něco rychlejší průjezd zatáčkou. Při nájezdu do zatáčky se vozidlo nacházelo v pravém jízdním pruhu, avšak při výjezdu ze zatáčky řidič více otočil volantem a v důsledku toho se vozidlo přesunulo blíže ke středu vozovky.

Cesta DP_23 byla uskutečněna dodávkovým vozidlem přepravující zboží. Z důvodu pohodlnějšího průjezdu zatáčkou si řidič najel do levého jízdního pruhu, aby zamezil prudkému pohybu vozidla což by mohlo vést k pohybu zboží v zadní části vozu. V důsledku tohoto rozhodnutí byla výrazně upravena trajektorie vozidla. Tento průjezd zatáčkou zároveň vykazoval největší rozdíl mezi vypočtenou hodnotou a průměrnou hodnotou příčného zrychlení. Následující obrázek 20 zobrazuje dráhy vozidel při zmiňovaných průjezdech zatáčkou.



Obrázek 20: Schematické zobrazení průjezdů zatáčkou po vnějším oblouku (B)

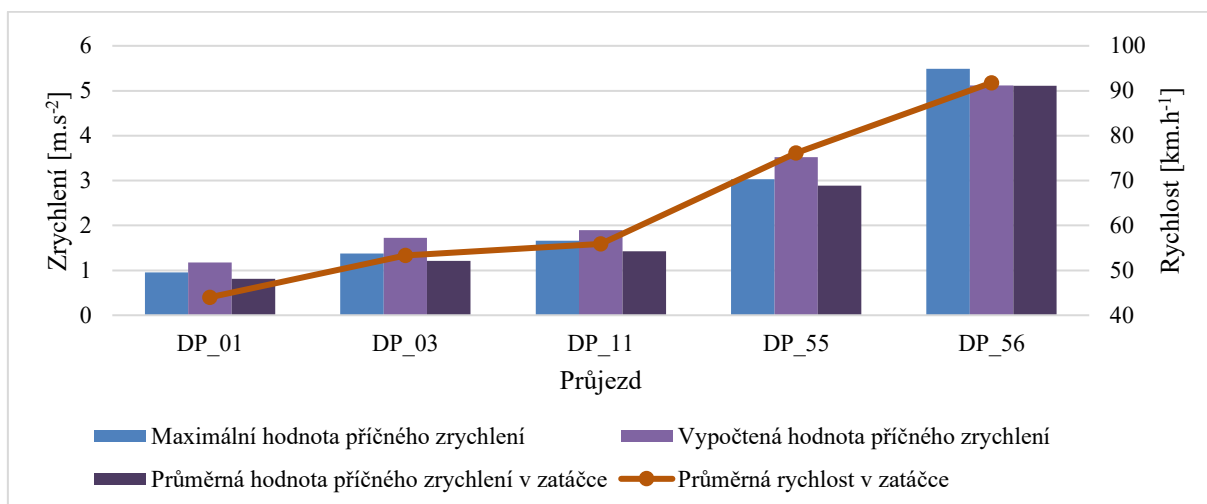
Zdroj: vlastní zpracování (Mapy.cz, 2020)

Výše uvedený obrázek 20 zachycuje vybrané průjezdy analyzovanou zatáčkou, u kterých byl výrazně upraven poloměr zatáčky v důsledku odlišného způsobu projetí danou zatáčkou.

Lze si povšimnout, že zatímco při cestě DP_31 se vozidlo pohybovalo po pomyslné kružnici s poloměrem 153 m, v případě cesty DP_51 se tento poloměr snížil na 116 m.

5.1.2.2. Analýza průjezdů s nestandardním průměrným příčným zrychlením

Na grafu 9 níže je zobrazeno pět průjezdů analyzovanou zatáčkou, z nichž čtyři byly vybrány z důvodu výrazně odlišných hodnot průměrného příčného zrychlení (DP_01, DP_03, DP_11 a DP_56). Průjezd DP_55 byl vybrán pro vizuální porovnání z nejčtetnějšího intervalu hodnot průměrného příčného zrychlení (2,5; 3>).



Graf 8: Porovnání vybraných průjezdů zatáčkou po vnějším oblouku

Zdroj: vlastní zpracování

Graf 9 zachycuje maximální, průměrnou a vypočtenou hodnotu příčného zrychlení. Rovněž zobrazuje také průměrnou rychlost vozidla při průjezdu zatáčkou u vybraných cest.

Průjezd DP_01 byl výrazně ovlivněn počasím. Sněžilo, vozovka byla pokryta souvislou vrstvou sněhu, byla nízká viditelnost a před nájezdem do zatáčky došlo také k předjetí cyklisty. Z těchto důvodů byl průjezd realizován při nízké rychlosti (cca 44 km·h⁻¹). Jedná se celkově o nejpomalejší průjezd analyzovanou zatáčkou. Hodnota průměrného příčného zrychlení byla při tomto průjezdu 0,8 m·s⁻².

Průjezd DP_03 byl rovněž ovlivněn nízkou viditelností a vrstvou sněhu na vozovce, která ovlivnila rychlost průjezdu analyzovanou zatáčkou (cca 53 km·h⁻¹). Při tomto průjezdu byla upravena trajektorie vozidla využitím levého jízdního pruhu, čímž řidič výrazně snížil riziko smyku. Hodnota průměrného příčného zrychlení byla při tomto průjezdu 1,2 m·s⁻².

Průjezd DP_11 byl také realizován za snížené viditelnosti, přšelo a na povrchu vozovky se místy tvořilo náledí. Řidič byl před tímto průjezdem informován o stavu povrchu vozovky

a z tohoto důvodu přizpůsobil rychlost vozidla (cca $55 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Hodnota průměrného příčného zrychlení byla při tomto průjezdu $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Průjezd DP_55 byl realizován za dobré viditelnosti na suché vozovce při rychlosti vozidla cca $76 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (spadá do nejčtetnějšího intervalu). Při tomto průjezdu najel řidič do zatáčky standardně z pravého pruhu, následovalo projetí zatáčky středem vozovky a při výjezdu se řidič zařadil zpět do pravého pruhu. Hodnota průměrného příčného zrychlení byla při tomto průjezdu $2,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (rovněž spadá do nejčtetnějšího intervalu).

Průjezd DP_56 byl realizován při dobré viditelnosti na suché vozovce a při vysoké rychlosti (cca $91 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Vozidlo se pohybovalo v pravém jízdním pruhu, došlo pouze k mírnému nájezdu ke středu vozovky ve vrcholu oblouku zatáčky což způsobilo zmenšení poloměru zatáčky. V důsledku toho byla maximální hodnota příčného zrychlení vyšší než hodnota vypočtená. Hodnota průměrného příčného zrychlení byla při tomto průjezdu $5,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

5.1.3. Průjezd zatáčkou po vnitřním oblouku

Po vnitřním oblouku zatáčky (ve směru Bílý Újezd – Masty) bylo realizováno 43 průjezdů analyzovanou zatáčkou. Většina těchto průjezdů byla realizována okolo 16 h. Následující tabulka 10 zobrazuje četnosti maximálních, průměrných a vypočtených hodnot příčného zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku, rozdělených do intervalů.

Tabulka 10: Četnost maximálních, průměrných a vypočtených hodnot příčného zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

| Interval | Maximální hodnoty příčného zrychlení | Průměrné hodnoty příčného zrychlení | Vypočtené hodnoty příčného zrychlení |
|----------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| <0,2> | 0 | 0 | 0 |
| (2;2,5> | 0 | 1 | 0 |
| (2,5;3> | 7 | 14 | 0 |
| (3;3,5> | 9 | 6 | 11 |
| (3,5;4> | 10 | 13 | 15 |
| (4;4,5> | 9 | 7 | 13 |
| (4,5;5> | 6 | 1 | 2 |
| (5;5,5> | 1 | 1 | 2 |
| (5,5;6> | 1 | 0 | 0 |
| suma | 43 | 43 | 43 |

Zdroj: vlastní zpracování

Z tabulky 10 je na první pohled patrné, že vypočtené hodnoty příčného zrychlení se pohybovaly ve vyšších intervalech což je rovněž způsobeno stylem projetí zatáčky.

Hodnoty maximálního příčného zrychlení se nejčastěji pohybovaly v rozmezí od 2,5 do 5 m·s⁻². Nejvíce hodnot (10) se nacházelo v intervalu (3,5;4>.

Hodnoty průměrného příčného zrychlení se pohybovaly v rozmezí od 2 do 5 m·s⁻², přičemž více než 75 % hodnot náleželo do rozhraní hodnot od 2,5 do 4 m·s⁻². Nejvíce hodnot (14) se nacházelo v intervalu (2,5;3>.

Vypočtené hodnoty příčného zrychlení se pohybovaly od 3 do 5,5 m·s⁻², přičemž více než 90 % hodnot náleželo do rozhraní 3 až 4,5 m·s⁻². Nejvíce hodnot (15) náleželo do intervalu (3,5;4>.

Další zjišťovanou hodnotou byla průměrná rychlost vozidla v zatáčce. Hodnoty průměrné rychlosti byly obdobně jako u výše analyzovaných dat rozděleny do intervalů jejichž četnosti zobrazuje následující tabulka 11.

Tabulka 11: Četnost průměrných rychlostí vozidla při průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku [km·h⁻¹]

| Interval | Četnost |
|----------|---------|
| (65;70> | 1 |
| (70;75> | 11 |
| (75;80> | 11 |
| (80;85> | 16 |
| (85;90> | 2 |
| (90;95> | 2 |
| suma | 43 |

Zdroj: vlastní zpracování

Z tabulky 11 vyplývá, že z celkového počtu 43 průjezdů zatáčkou jich bylo nejvíce uskutečněno v rychlosti 80-85 km·h⁻¹. Při nejpomalejším průjezdu zatáčkou dosahovalo vozidlo rychlosti 69,9 km·h⁻¹. Na druhou stranu nejrychlejší průjezd byl realizován v rychlosti 92,2 km·h⁻¹.

5.1.2.3. Analýza vybraných průjezdů

Následně byly k analýze vybrány dva průjezdy zatáčkou, jejichž rychlost náleží do nejvíce zastoupeného intervalu (80;85>. Jednalo se o průjezdy, u kterých byla naměřena téměř shodná rychlost vozidla při průjezdu zatáčkou, ale velmi rozdílná hodnota průměrného příčného zrychlení. Oba tyto průjezdy byly uskutečněny osobním automobilem. Následující tabulka 12 zobrazuje rychlost při průjezdu zatáčkou a hodnoty průměrného příčného zrychlení vybraných dvou cest.

Tabulka 12: Rychlost vozidla a průměrné příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku (A)

| Cesta | Rychlost vozidla | Průměrné příčné zrychlení |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| ZP_04 | 82,6 km·h ⁻¹ | 3,23 |
| ZP_21 | 83,3 km·h ⁻¹ | 4,31 |

Zdroj: vlastní zpracování

Z výše uvedené tabulky 12 je patrné, že rychlost vozidla v rámci těchto dvou cest se lišila pouze o 0,7 km·h⁻¹. Na druhou stranu hodnota průměrného příčného zrychlení se lišila o 1,08 m·s⁻². Což je způsobeno rozdílným stylem projetí analyzovanou zatáčkou.

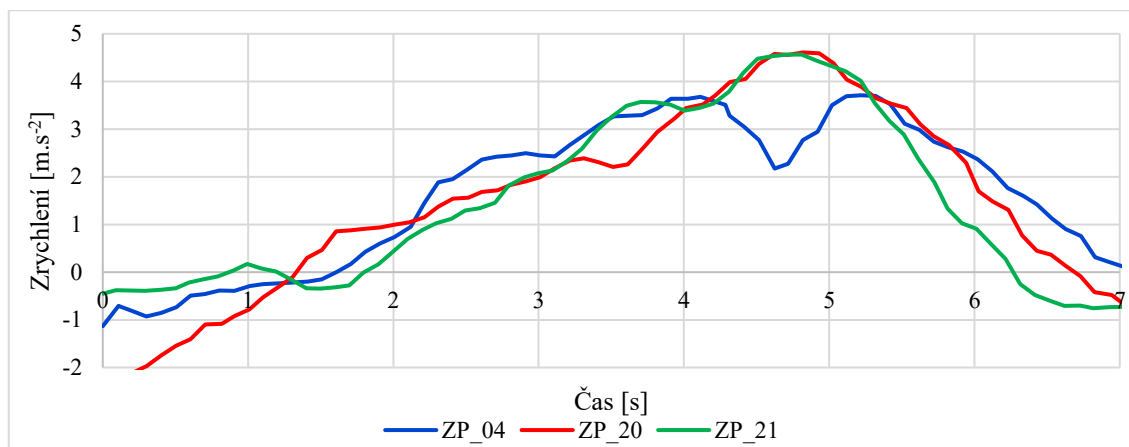
Další část analýzy je zaměřena na porovnání dvou průjezdů zatáčkou, u kterých byla naměřena přibližně shodná hodnota průměrného příčného zrychlení, ale velice odlišná rychlost vozidla. Oba tyto průjezdy byly rovněž realizovány osobním automobilem. Následující tabulka 13 zobrazuje rychlost při průjezdu zatáčkou a hodnoty průměrného příčného zrychlení vybraných dvou cest.

Tabulka 13: Rychlost vozidla a průměrné příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku (B)

| Cesta | Rychlost vozidla | Průměrné příčné zrychlení |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| ZP_20 | 90,9 km·h ⁻¹ | 4,25 |
| ZP_21 | 83,3 km·h ⁻¹ | 4,31 |

Zdroj: vlastní zpracování

Z výše uvedené tabulky 13 je patrné, že v tomto případě byla při rychlejším průjezdu zatáčkou naměřena hodnota průměrného příčného zrychlení nižší než při pomalejším průjezdu. Zatímco rychlost těchto dvou cest se lišila o 7,6 km·h⁻¹, hodnota průměrného příčného zrychlení se lišila pouze o 0,6 m·s⁻². I v tomto případě je příčinou rozdílný styl projetí analyzovanou zatáčkou. Následující obrázek zachycuje průběh příčného zrychlení při průjezdu zatáčkou v čase pro výše uvedené cesty.



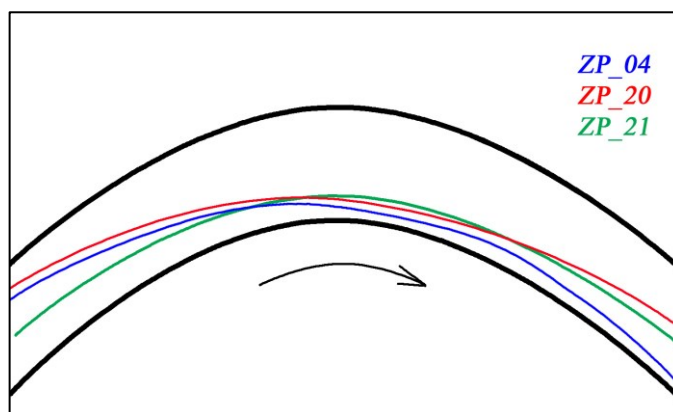
Graf 9: Příčné zrychlení při průjezdu zatáčkou vybraných cest (B)

Zdroj: vlastní zpracování

Z grafu 10 je patrné, že průjezd ZP_20 a ZP_21 jsou si velmi podobné navzdory rozdílné rychlosti při průjezdu zatáčkou. Oba tyto průjezdy byly plynulé, ale každý z průjezdů vedl jinou částí vozovky.

U průjezdu ZP_20 si lze povšimnout, že hodnoty příčného zrychlení vycházejí ze záporných hodnot, což značí, že došlo k nadjetí do analyzované zatáčky. Tím došlo ke zvětšení poloměru zatáčky a snížení hodnoty příčného zrychlení působící na vozidlo.

Z grafu 10 je také patrné že, křivka průjezdu ZP_04 má dva vrcholy, což je způsobeno najetím do zatáčky ze středu vozovky, poté došlo k mírnému srovnání volantu (poklesnutí hodnoty příčného zrychlení na $2,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) a následnému zatočení při výjezdu ze zatáčky (zařazení do pravého jízdního pruhu vozovky). Všechny tři způsoby projetí analyzovanou zatáčkou jsou zachyceny na následujícím schematickém obrázku 21.



Obrázek 21: Schematické zobrazení průjezdů zatáčkou po vnitřním oblouku (A)

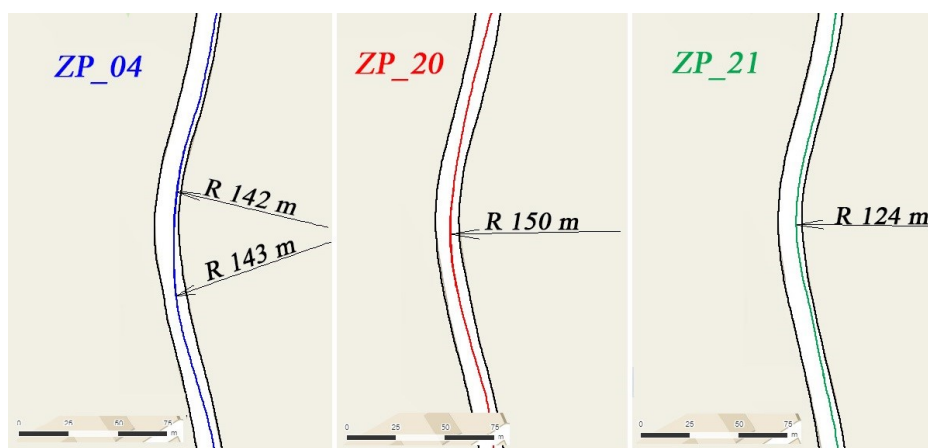
Zdroj: vlastní zpracování

Průjezd ZP_20 byl realizován za tmy. To mohlo zapříčinit skutečnost, že řidič před nájездem do zatáčky využil levý jízdní pruh (ve tmě by byla vidět světla protijedoucího vozidla). Po výjezdu ze zatáčky se vozidlo pohybovalo ve středu vozovky.

Průjezd ZP_21 byl realizován za světla a vozidlo se pohybovalo v pravém jízdním pruhu blíže ke středu vozovky. Při tomto průjezdu zatáčkou vozidlo přibližně kopírovalo tvar zatáčky.

Průjezd ZP_04 byl realizován za šera a řidič najel do zatáčky ze středu vozovky. Vozidlo se uprostřed zatáčky přiblížilo těsně k pravé krajnici vozovky.

Níže jsou jednotlivé průjezdy zakresleny do mapy v odpovídajícím měřítku. Jsou zde uvedeny také vypočtené poloměry zatáčky (závislé na rychlosti vozidla a hodnotě příčného zrychlení).

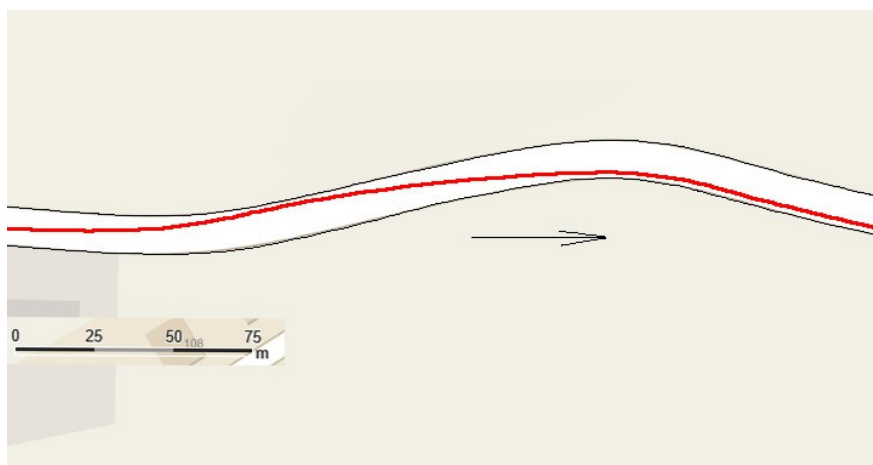


Obrázek 22: Schematické zobrazení průjezdů zatáčkou po vnitřním oblouku (B)

Zdroj: vlastní zpracování (Mapy.cz, 2020)

Z výše uvedeného obrázku 22 je patrné, že v případě průjezdu ZP_04 se vozidlo pohybovalo po dvou různých poloměrech zatáčky. Nejprve po poloměru 143 m při nájězdu do zatáčky a po poloměru 142 m při výjezdu ze zatáčky. V případě průjezdů ZP_20 a ZP_21 byl rozdíl v poloměru zatáčky 26 m, přičemž průjezd ZP_21 přibližně odpovídá naměřenému poloměru zatáčky.

Po prostudování videozáznamů všech průjezdů analyzovanou zatáčkou bylo zjištěno, že v případě pravotočivé zatáčky je její průjezd ovlivněn způsobem projetí předchozí levotočivé zatáčkou. A to i přes to, že jsou tyto dvě zatáčky od sebe vzdálené více než 50 m, viz následující obrázek 23.



Obrázek 23: Schematické zobrazení ovlivnění průjezdu zatáčkou po vnitřním oblouku

Zdroj: vlastní zpracování (Mapy.cz, 2020)

Na tomto úseku je velice dobrá viditelnost, protože silnice není lemována stromy. Z obrázku 23 je patrné, že pokud dojde ke zkrácení dráhy levotočivé zatáčky (využití levého jízdního pruhu), a pokud není míjeno protijedoucí vozidlo, není řidič nucen vrátit se do svého jízdního pruhu a najede do analyzované zatáčky z levého jízdního pruhu či ze středu vozovky viz následující obrázek 24.



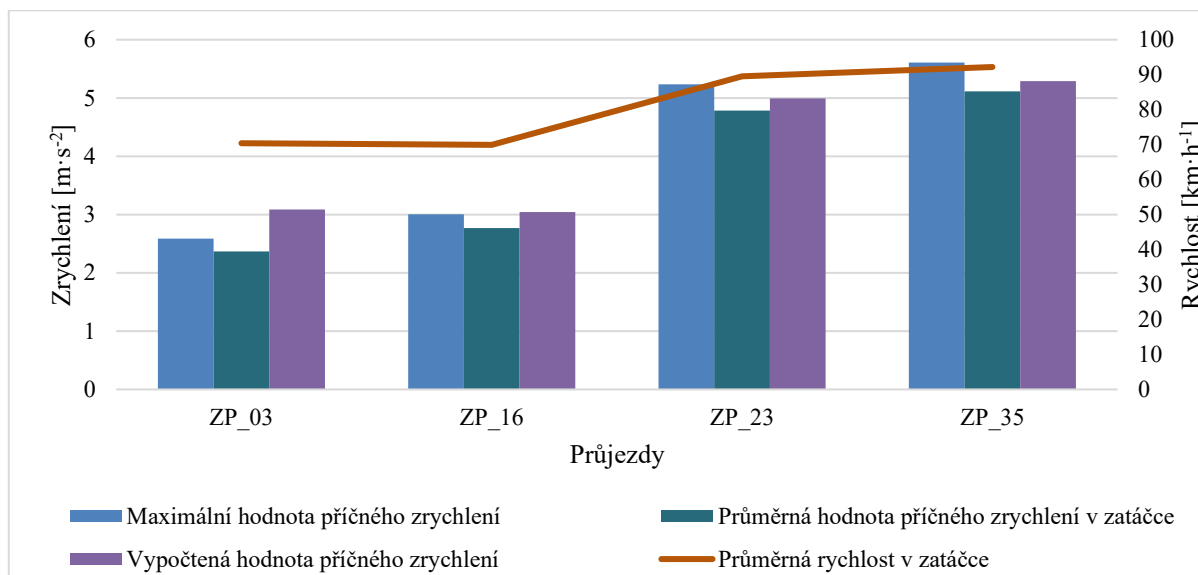
Obrázek 24: Způsoby najetí do pravotočivé zatáčky

Zdroj: vlastní zpracování

Výše uvedený obrázek 24 zachycuje způsoby najetí do pravotočivé zatáčky z pohledu řidiče. Modrá trajektorie představuje najetí z levého jízdního pruhu v důsledku využití protisměru u předcházející levotočivé zatáčky. Červená trajektorie představuje běžné najetí z pravého jízdního pruhu.

5.1.2.4. Analýza průjezdů s nestandardním průměrným příčným zrychlením

Na grafu 11 níže jsou zobrazeny čtyři průjezdy analyzovanou zatáčkou, z nichž tři byly vybrány z důvodu výrazně odlišných hodnot průměrného příčného zrychlení (ZP_03, ZP_23 a ZP_35). Průjezd ZP_16 byl vybrán pro vizuální porovnání z nejčtetnějšího intervalu hodnot průměrného příčného zrychlení (2,5; 3>.



Graf 10: Porovnání vybraných průjezdů zatáčkou po vnitřním oblouku

Zdroj: vlastní zpracování

Výše uvedený graf 11 zachycuje maximální, průměrnou a vypočtenou hodnotu příčného zrychlení. Rovněž zobrazuje také průměrnou rychlost vozidla při průjezdu zatáčkou u vybraných cest.

Průjezd ZP_03 byl realizován při sychravém počasí (sníh a mokro). Vozidlo se pohybovalo v pravém jízdním pruhu, při průjezdu zatáčkou došlo k mírnému přibrzdění vozidla a rychlost vozidla byla při průjezdu zatáčkou cca 70 km·h⁻¹. Hodnota průměrného příčného zrychlení byla 2,4 m·s⁻², což je sice nejnižší hodnota v rámci všech realizovaných průjezdů v tomto směru, ale na druhou stranu interval s největší četností hodnot průměrného příčného zrychlení je (2,5; 3>. Hodnota 2,4 m·s⁻² tedy nepadla do nejčtetnějšího intervalu přibližně o jednu desetinu.

Průjezd ZP_16 byl realizován při dobré viditelnosti a povrch vozovky byl suchý. Vozidlo najelo do zatáčky ze středu vozovky a průjezd zatáčkou a následný výjezd byl realizován v pravém jízdním pruhu. Rychlost během průjezdu zatáčkou dosahovala cca 70 km·h⁻¹. Hodnota průměrného příčného zrychlení byla 2,8 m·s⁻².

Průjezd ZP_23 byl rovněž realizován při dobré viditelnosti a povrch vozovky byl suchý. Řidič vezl spolujezdce, se kterým během jízdy komunikoval. Vozidlo se pohybovalo v pravém jízdním pruhu a v zatáčce došlo k mírnému zrychlení vozidla. Rychlost během průjezdu zatáčkou dosahovala cca $89 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Hodnota průměrného příčného zrychlení byla $4,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Průjezd ZP_35 byl také realizován při dobré viditelnosti a povrch vozovky byl suchý. Vozidlo se pohybovalo v pravém jízdním pruhu, těsně při krajnici vozovky. Z videozáznamu je patrné, že během jízdy hraje hlasitá rytmická hudba což mohlo mít vliv na způsob projetí zatáčky (projetí zatáčky po nejkratší možné dráze a vysoká rychlost vozidla cca $92 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Hodnota průměrného příčného zrychlení byla v tomto případě nejvyšší a to $5,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

5.1.4. Vzájemné porovnání průjezdů zatáčkou v obou směrech

Součástí analýzy je také vzájemné porovnání průjezdů zatáčkou v obou směrech. Níže jsou porovnávány jednotlivé hodnoty (maximální a průměrné příčné zrychlení a také rychlost vozidla) vždy pro oba směry.

Tabulka 14: Porovnání četností dosahovaného maximálního příčného zrychlení v obou směrech [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

| Interval | Četnost levotočivá zatáčka | Četnost pravotočivá zatáčka |
|----------|----------------------------|-----------------------------|
| <0;0.5> | 0 | 0 |
| (0,5;1> | 1 | 0 |
| (1;1.5> | 1 | 0 |
| (1,5;2> | 2 | 0 |
| (2;2.5> | 5 | 0 |
| (2,5;3> | 14 | 7 |
| (3;3.5> | 12 | 9 |
| (3,5;4> | 11 | 10 |
| (4;4.5> | 10 | 9 |
| (4,5;5> | 3 | 6 |
| (5;5.5> | 1 | 1 |
| (5,5;6> | 0 | 1 |
| suma | 60 | 43 |

Zdroj: vlastní zpracování

Z výše uvedené tabulky 14 vyplývá, že při průjezdu pravotočivou zatáčkou se hodnoty maximálního příčného zrychlení pohybovaly ve vyšších intervalech. Cca 63 % průjezdů v tomto směru dosahovalo vyšší hodnoty maximálního příčného zrychlení, než je $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. V opačném směru to bylo přibližně o 20 % méně. Vyšší hodnoty maximálního příčného

zrychlení mohou být důsledkem pohybu vozidla po menším poloměru zatáčky a také vyššími rychlostmi průjezdů viz tabulka 15.

Tabulka 15: Porovnání četností dosahovaného průměrného příčného zrychlení v obou směrech [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

| Interval | Četnost levotočivá zatáčka | Četnost pravotočivá zatáčka |
|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| <0;0.5> | 0 | 0 |
| (0,5;1> | 1 | 0 |
| (1;1.5> | 2 | 0 |
| (1,5;2> | 4 | 0 |
| (2;2.5> | 7 | 1 |
| (2,5;3> | 17 | 14 |
| (3;3.5> | 15 | 6 |
| (3,5;4> | 7 | 13 |
| (4;4.5> | 6 | 7 |
| (4,5;5> | 0 | 1 |
| (5;5.5> | 1 | 1 |
| suma | 60 | 43 |

Zdroj: vlastní zpracování

V případě průměrného příčného zrychlení platí obdobné zjištění jako u maximálních hodnot příčného zrychlení a tedy, že se z důvodu menšího poloměru zatáčky a vyšších rychlostí průjezdů naměřené hodnoty při průjezdu pravotočivou zatáčkou pohybovaly ve vyšších intervalech. Cca 51 % průjezdů v tomto směru dosahovalo vyšší hodnoty průměrného příčného zrychlení, než je $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. V opačném směru to bylo přibližně o 18 % méně.

Tabulka 16: Porovnání četností průměrných rychlostí v obou směrech [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]

| Interval | Četnost levotočivá zatáčka | Četnost pravotočivá zatáčka |
|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| <0;50> | 1 | 0 |
| (50;55> | 1 | 0 |
| (55;60> | 3 | 0 |
| (60;65> | 1 | 0 |
| (65;70> | 5 | 1 |
| (70;75> | 14 | 11 |
| (75;80> | 22 | 11 |
| (80;85> | 5 | 16 |
| (85;90> | 4 | 2 |
| (90;95> | 4 | 2 |
| suma | 60 | 43 |

Zdroj: vlastní zpracování

Z tabulky 16 je patrné, že při průjezdu pravotočivou zatáčkou dosahovalo vozidlo častěji vyšších rychlostí než při průjezdu v opačném směru, což je považováno za zajímavý jev. Cca 47 % průjezdů v tomto směru bylo realizováno při rychlosti vyšší než $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. V opačném směru to bylo přibližně o 25 % méně. To může být způsobeno tím, že průjezd pravotočivou zatáčkou je realizován v odpoledních hodinách, do zatáčky se najíždí z přímého úseku a je zde lepší výhled do zatáčky. Na druhou stranu průjezd levotočivou zatáčkou je realizován v ranních hodinách (30 minut po probuzení), zatáčce předchází prudký kopec a z tohoto směru je horší výhled do zatáčky.

5.1.5. Celkové vyhodnocení průjezdu zatáčkou

Při průjezdu zatáčkou v obou směrech byly zpravidla vypočtené hodnoty příčného zrychlení vyšší než hodnoty průměrného příčného zrychlení, což je způsobeno stylem projetí zatáčky. V obou směrech totiž mnohdy docházelo k úpravě trajektorie pohybu vozidla, využitím levého jízdního pruhu.

Při nájezdu do **levotočivé** zatáčky se řidič vždy drží ve svém pruhu, protože neví, zda bude možné projet zatáčku levým jízdním pruhem, neboť zatáčce předchází stoupání. Po vjezdu do zatáčky je již viditelnost dostačující na to, aby se řidič rozhodl, zda využije levý jízdní pruh (pokud není míjeno protijedoucí vozidlo). Při nájezdu do **pravotočivé** zatáčky je naopak dobrá viditelnost při nájezdu do zatáčky. Z tohoto důvodu došlo u některých průjezdů k nájezdu do pravotočivé zatáčky z levého jízdního pruhu či ze středu vozovky, ale při průjezdu a následném výjezdu ze zatáčky se vozidlo vždy drželo v pravém jízdním pruhu.

V rámci většiny průjezdů **levotočivou** zatáčkou, kdy nebylo míjeno protijedoucí vozidlo, došlo **ke zkrácení** dráhy vozidla v důsledku využití levého jízdního pruhu (pohyb vozidla po větším poloměru). A to pravděpodobně z důvodu, aby průjezd levotočivou zatáčkou byl:

- komfortnější (při pohybu vozidla po větším poloměru zatáčky, nepůsobí na posádku/náklad tak velké příčné zrychlení),
- rychlejší,
- nejkratší,
- bezpečnější (nižší pravděpodobnost smyku při namrzlé či zasněžené vozovce).

V rámci některých průjezdů **pravotočivou** zatáčkou, kdy nebylo míjeno protijedoucí vozidlo, došlo naopak **k prodloužení** dráhy vozidla v důsledku nadjetí do levého jízdního pruhu před zatáčkou (pohyb vozidla po větším poloměru). A to pravděpodobně opět z důvodu, aby průjezd pravotočivou zatáčkou byl:

- komfortnější,
- rychlejší.

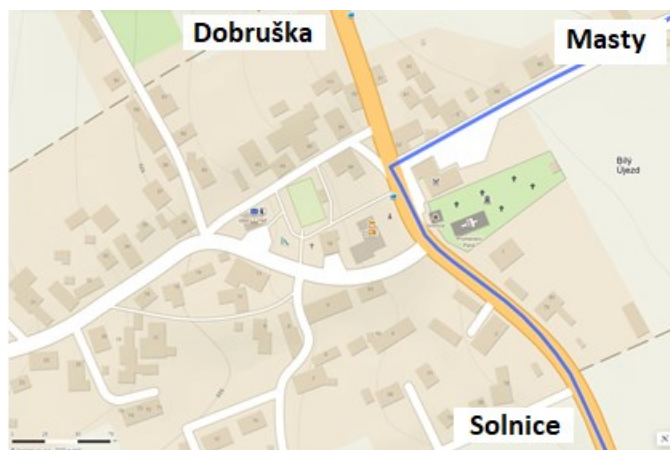
V rámci analýzy bylo také zjištěno, že průjezd **pravotočivou** zatáčkou byl ovlivněn také aktuálním rozpoložením (náladou) řidiče. U některých průjezdů, i když nebylo míjeno protijedoucí vozidlo, nebyl využit levý jízdní pruh k nadjetí do zatáčky, ale vozidlo se drželo pravé krajnice vozovky. Z videozáznamů bylo zjištěno, že se jednalo o agresivnější styl jízdy, který mohl být podpořen hlasitou rytmickou hudbou.

Co se týče rychlosti, bylo zjištěno, že při průjezdu **pravotočivou** zatáčkou dosahovalo vozidlo častěji vyšší rychlosti než při průjezdu **levotočivou** zatáčkou. Důvodem může být:

- různá denní doba průjezdu (levotočivá ráno po probuzení, pravotočivá odpoledne),
- výhled do zatáčky,
- pravotočivá zatáčka je projížděna v pravém jízdním pruhu.

5.2. Rozjezd do křižovatky v obci Bílý Újezd

Další částí analýzy je zpracování rozjezdů do křižovatky v místě napojení silnice III. třídy na silnici I. třídy (I/14) v obci Bílý Újezd. Silnice I. třídy vedoucí obcí Bílý Újezd je velice frekventovaná, zejména kvůli nedalekému automobilovému závodu Škoda Auto a. s. v obci Kvasiny. Na silnici I/14 v obci Bílý Újezd je nejhustší provoz mezi 5:30 – 6:30, 13:30 – 14:30 a 21:30 – 22:30 (důsledek střídání směn provozu v automobilovém závodě Škoda Auto a. s.). V rámci této analýzy byla křižovatka projížděna mimo tuto dopravní špičku. Analyzovaná křižovatka je zobrazena na následujícím obrázku 25.



Obrázek 25: Křižovatka v obci Bílý Újezd

Zdroj: vlastní zpracování (Mapy.cz, 2020)

Výše uvedený obrázek 25 zachycuje analyzovanou křižovatku včetně zaznamenané trasy vozidla ve směru Masty – Solnice. Jak už bylo zmíněno výše, křižovatka se nachází v obci Bílý Újezd, a proto je zde povolena maximální rychlost $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Ve směru od Solnice je rychlost upravena svislým dopravním značením na $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ z důvodu omezeného výhledu stojícího vozidla v křižovatce do tohoto směru.



Obrázek 26: Příjezd vozidla do křižovatky

Zdroj: vlastní zpracování (Mapy.cz, 2020)

Na obrázku 26 je zachycen výhled z vozidla přijíždějícího do křižovatky, ve které musí dle svislého dopravního značení vozidlo zastavit a dát přednost vozidlům jedoucím po hlavní pozemní komunikaci. Níže jsou zobrazen náhled do křižovatky z pohledu stojícího vozidla.



Obrázek 27: Výhled z vozidla stojícího před křižovatkou

Zdroj: vlastní zpracování (Mapy.cz, 2020)

Na výše uvedeném obrázku 27 je zachycen výhled z vozidla stojícího před křižovatkou do obou směrů. Aby byl zaručen přímý výhled do pravého směru, je nutné zastavit vozidlo těsně na hranici křižovatk, neboť po pravé straně stěhuje výhled zástavba, viz pravý náhled. Výhled do levého směru je omezený, protože se zde vozovka stáčí doleva kolem kostela, a proto je v křižovatce umístěno zrcadlo.

5.2.1. Metodika zpracování naměřených dat

V rámci každé zaznamenané trasy byla nejprve z datového záznamu vyjmuta část odpovídající rozjezdu do analyzované křižovatk. S těmito daty byla následně provedena série úkonů, jejichž cílem bylo nalezení maximální hodnoty podélného zrychlení, následný vypočet průměrné hodnoty podélného zrychlení, rychlost vozidla a ujetá dráha během prvních 4 sekund rozjezdu do křižovatk (za předpokladu, že zařazení do pravého jízdního pruhu netrvá déle než 4 sekundy). Byla vypočítána rychlost a ujetá dráha vozidla podle základních kinematických vztahů. Následně bylo vypočteno průměrné podélné zrychlení během 1., 2., 3. a 4. sekundy a průměrné podélné zrychlení za 4 sekundy.

5.2.2. Analýza naměřených dat

V rámci analýzy bylo uskutečněno 60 rozjezdů do křižovatk. Následující tabulka 17 zobrazuje četnosti maximálních hodnot podélného zrychlení během prvních čtyř sekund pro všechny rozjezdy.

Tabulka 17: Četnost maximálních hodnot podélného zrychlení během rozjezdu do křižovatky [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

| Interval | Četnost |
|-----------|---------|
| <0;1> | 0 |
| (1;1.2> | 1 |
| (1,2;1.4> | 0 |
| (1,4;1.6> | 1 |
| (1,6;1.8> | 3 |
| (1,8;2> | 5 |
| (2;2.2> | 12 |
| (2,2;2.4> | 12 |
| (2,4;2.6> | 7 |
| (2,6;2.8> | 7 |
| (2,8;3> | 4 |
| (3;3.2> | 3 |
| (3,2;3.4> | 2 |
| (3,4;3.6> | 3 |
| suma | 60 |

Zdroj: vlastní zpracování

Hodnoty maximálního podélného zrychlení se pohybovaly od 1,09 do 3,50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Nejčastěji byly naměřeny hodnoty v rozmezí od 2,01 do 2,40 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Tabulka 18 níže zobrazuje četnosti průměrných hodnot podélného zrychlení během prvních čtyř sekund pro všechny rozjezdy.

Tabulka 18: Četnost průměrných hodnot podélného zrychlení pro jednotlivé časové úseky [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

| Interval | 1. sekunda | 2. sekunda | 3. sekunda | 4. sekunda |
|-------------|------------|------------|------------|------------|
| <-0,4;-0,2> | 0 | 0 | 1 | 0 |
| (-0,2;0> | 0 | 0 | 0 | 1 |
| (0;0,2> | 0 | 0 | 2 | 1 |
| (0,2;0,4> | 1 | 0 | 2 | 9 |
| (0,4;0,6> | 1 | 0 | 8 | 6 |
| (0,6;0,8> | 5 | 2 | 6 | 8 |
| (0,8;1> | 8 | 0 | 10 | 7 |
| (1;1,2> | 9 | 1 | 6 | 7 |
| (1,2;1,4> | 12 | 1 | 11 | 8 |
| (1,4;1,6> | 5 | 2 | 5 | 3 |
| (1,6;1,8> | 7 | 14 | 2 | 4 |
| (1,8;2> | 8 | 12 | 3 | 3 |
| (2;2,2> | 3 | 18 | 3 | 1 |
| (2,2;2,4> | 0 | 6 | 1 | 1 |
| (2,4;2,6> | 1 | 3 | 0 | 1 |
| (2,6;2,8> | 0 | 0 | 0 | 0 |
| (2,8;3> | 0 | 0 | 0 | 0 |
| (3;3,2> | 0 | 1 | 0 | 0 |
| suma | 60 | 60 | 60 | 60 |

Pozn.: Záporné hodnoty byly naměřeny v důsledku výrazného poklesnutí rychlosti vozidla během přeražení na vyšší rychlostní stupeň

Zdroj: vlastní zpracování

Z výše uvedené tabulky 18 je patrné, že během 1. sekundy rozjezdu do křižovatky se hodnoty průměrného podélného zrychlení pohybovaly od 0,25 do 2,5 m·s⁻². Nejvíce naměřených hodnot padlo do intervalu (1,2;1,4> a to celkem 12.

Během 2. sekundy rozjezdu do křižovatky se hodnoty průměrného podélného zrychlení pohybovaly od 0,71 do 3,01 m·s⁻². Nejvíce naměřených hodnot padlo do intervalu (2;2,2> a to celkem 18. Četnosti hodnot průměrného podélného zrychlení byly během 2. sekundy ve vyšších intervalech oproti 1. sekundě.

Během 3. sekundy rozjezdu do křižovatky se hodnoty průměrného podélného zrychlení pohybovaly od -0,27 do 2,22 m·s⁻². Nejvíce naměřených hodnot padlo do intervalu (1,2;1,4> a to celkem 11.

Během 4. sekundy rozjezdu do křižovatky se hodnoty průměrného podélného zrychlení pohybovaly od -0,16 do 2,44 m·s⁻². Nejvíce naměřených hodnot padlo do intervalu (0,2;0,4> a to celkem 9. Z tabulky je také patrné, že v průběhu 3. a 4. sekundy došlo k poklesu hodnot průměrného podélného zrychlení do nižších hodnot, což je způsobeno přerazením na vyšší rychlostní stupeň. Následující tabulka 19 rovněž zobrazuje četnosti průměrných hodnot podélného zrychlení, ale v tomto případě se jedná o průměrné hodnoty získané za první čtyři sekundy rozjezdu do křižovatky.

Tabulka 19: Četnost průměrných hodnot podélného zrychlení během prvních čtyř sekund rozjezdu do křižovatky [m·s⁻²]

| Interval | Četnost |
|-----------|---------|
| <0;0,4> | 0 |
| (0,4;0,6> | 1 |
| (0,6;0,8> | 0 |
| (0,8;1> | 2 |
| (1;1,2> | 16 |
| (1,2;1,4> | 17 |
| (1,4;1,6> | 16 |
| (1,6;1,8> | 6 |
| (1,8;2> | 1 |
| (2;2,2> | 1 |
| suma | 60 |

Zdroj: vlastní zpracování

Z výše uvedené tabulky 19 je patrné, že během prvních čtyř sekund rozjezdu do křižovatky se hodnoty průměrného podélného zrychlení pohybovaly v rozmezí od 0,53 do 2,04 m·s⁻². Nejvíce naměřených hodnot padlo do intervalu (1,2;1,4> a to celkem 17. Níže jsou uvedeny také rychlosti vozidla po 4. sekundě rozjezdu do křižovatky.

Při rozjezdu do křižovatky působí na posádku krom podélného zrychlení také zrychlení příčné. Níže jsou tedy zachyceny četnosti maximálních hodnot příčného zrychlení během rozjezdu do křižovatky.

Tabulka 20: Četnost maximálních hodnot příčného zrychlení během rozjezdu do křižovatky [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

| Interval | Četnost |
|-----------------------------|---------|
| $\langle -0;-1,4 \rangle$ | 0 |
| $\langle -1,4;-1,8 \rangle$ | 2 |
| $\langle -1,8;-2,2 \rangle$ | 8 |
| $\langle -2,2;-2,6 \rangle$ | 23 |
| $\langle -2,6;-3 \rangle$ | 15 |
| $\langle -3;-3,4 \rangle$ | 4 |
| $\langle -3,4;-3,8 \rangle$ | 8 |
| Suma | 60 |

Pozn.: záporná hodnota značí odbočování vlevo

Zdroj: vlastní zpracování

Hodnoty maximálního příčného zrychlení se pohybovaly od $-1,41$ do $-3,76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Nejčastěji byly naměřeny hodnoty spadající do intervalu $\langle -2,2;-2,6 \rangle \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Následující tabulka 21 zobrazuje četnosti průměrných hodnot podélného zrychlení během prvních čtyř sekund pro všechny rozjezdy.

Tabulka 21: Četnost rychlostí vozidla po 4. sekundě rozjezdu do křižovatky [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]

| Interval | Četnost |
|-------------------------|---------|
| $\langle 0;4 \rangle$ | 0 |
| $\langle 4;8 \rangle$ | 1 |
| $\langle 8;12 \rangle$ | 0 |
| $\langle 12;16 \rangle$ | 9 |
| $\langle 16;20 \rangle$ | 25 |
| $\langle 20;24 \rangle$ | 18 |
| $\langle 24;28 \rangle$ | 6 |
| $\langle 28;32 \rangle$ | 1 |
| suma | 60 |

Zdroj: vlastní zpracování

Z tabulky 21 vyplývá, že z celkového počtu 60 rozjezdů do křižovatky byla nejčastější rychlost vozidla na konci 4. sekundy v intervalu $\langle 16;20 \rangle \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Při nejpomalejším rozjezdu do křižovatky, který byl realizován na sněhu, dosahovalo vozidlo na konci 4. sekundy rychlosti pouze $7,7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Na druhou stranu při nejrychlejším rozjezdu do křižovatky, kdy se vozidlo rychle zařadilo mezi jedoucí vozidla z pravého směru, dosahovalo vozidlo na konci 4. sekundy rychlosti $29,6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Následující tabulka 22 zachycuje četnost ujeté dráhy vozidla rovněž po 4. sekundě rozjezdu do křižovatky.

Tabulka 22: Četnost ujeté dráhy vozidla po 4. sekundě rozjezdu do křižovatky [m]

| Interval | Četnost |
|----------|---------|
| <0;5> | 0 |
| (5;6> | 1 |
| (6;7> | 0 |
| (7;8> | 2 |
| (8;9> | 0 |
| (9;10> | 6 |
| (10;11> | 13 |
| (11;12> | 10 |
| (12;13> | 13 |
| (13;14> | 7 |
| (14;15> | 4 |
| (15;16> | 2 |
| (16;17> | 1 |
| (17;18> | 1 |
| suma | 60 |

Zdroj: vlastní zpracování

Výše uvedená tabulka zachycuje vzdálenost, kterou vozidlo ujelo na konci 4. sekundy rozjezdu do křižovatky. Nejčastěji se ujetá dráha vozidla pohybovala v rozmezí od cca 10 do cca 13 m. Nejkratší vzdálenost, kterou vozidlo ujelo byla 5,2 m a na druhou stranu nejdelší vzdálenost činila 17,4 m.

5.2.3. Porovnání naměřených dat s výpočtem

Při vyšetřování dopravních nehod se zpravidla počítá s průměrnou hodnotou podélného zrychlení během celého manévru. Níže bude tedy porovnáno, jak se tyto průměrné hodnoty liší od skutečně naměřených dat včetně stanovení průměrné odchylky.

Z naměřených dat byla zjištěna hodnota průměrného podélného zrychlení a také délka dráhy, kterou vozidlo ujelo za 4 sekundy. Teoretický čas potřebný pro ujetí této dráhy byl vypočten pomocí následujícího vzorce:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}}$$

kde: t...čas [s],

s...ujetá dráha vozidla [m],

a...průměrné podélné zrychlení vozidla během prvních 4 sekund [m·s⁻²].

Zjištěné odchylky teoretického času potřebného pro ujetí dané vzdálenosti od skutečného času (4 sekundy) zachycuje následující tabulka 23.

Tabulka 23: Četnost časových odchylek [s]

| Interval | Četnost |
|------------------|---------|
| $<-0,8;-0,6>$ | 0 |
| $(-0,6;-0,4>$ | 1 |
| $(-0,4;-0,2>$ | 1 |
| $(-0,2;0>$ | 6 |
| $(0;0,2>$ | 16 |
| $(0,2;0,4>$ | 27 |
| $(0,4;0,6>$ | 8 |
| $(0,6;0,8>$ | 1 |
| suma | 60 |
| průměrná hodnota | 0,27 |

Pozn.: Záporné hodnoty značí, že čas potřebný pro ujetí dané dráhy měl být dle výpočtu pomocí průměrné hodnoty podélného zrychlení kratší než 4 sekundy.

Zdroj: vlastní zpracování

Časové odchylky se pohybovaly od -0,42 do 0,73 s. Nejvíce odchylek padlo do intervalu $(0,2;0,4>$. Největší časová odchylka představovala 18 % ze 4 sekund. Průměrná hodnota časové odchylky byla vypočtena na 0,27 sekund, což činí necelých 7 % ze 4 sekund. U 50 rozjezdů do křižovatky (z celkového počtu 60) nebyla časová odchylka větší, než 0,4 s což představuje 10 % ze 4 sekund.

Dále byla vypočítána teoreticky ujetá dráha za 4 sekundy. Rozdíly mezi skutečnou a teoreticky ujetou (vypočtenou) dráhou jsou uvedeny v následující tabulce 24.

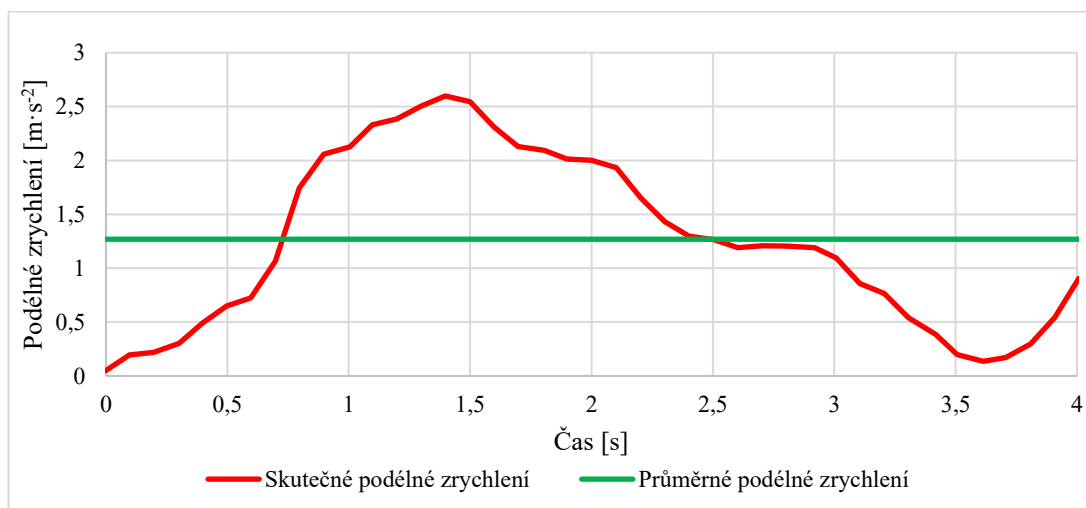
Tabulka 24: Četnost odchylek ujeté dráhy [m]

| Interval | Četnost |
|------------------|---------|
| $<-2,5;-2>$ | 0 |
| $(-2;-1,5>$ | 1 |
| $(-1,5;-1>$ | 1 |
| $(-1;-0,5>$ | 3 |
| $(-0,5;0>$ | 3 |
| $(0;0,5>$ | 5 |
| $(0,5;1>$ | 7 |
| $(1;1,5>$ | 18 |
| $(1,5;2>$ | 10 |
| $(2;2,5>$ | 7 |
| $(2,5;3>$ | 2 |
| $(3;3,5>$ | 3 |
| suma | 60 |
| průměrná hodnota | 1,41 |

Pozn.: Záporné hodnoty značí, že dle teoretického výpočtu měla být ujeta delší dráha.

Zdroj: vlastní zpracování

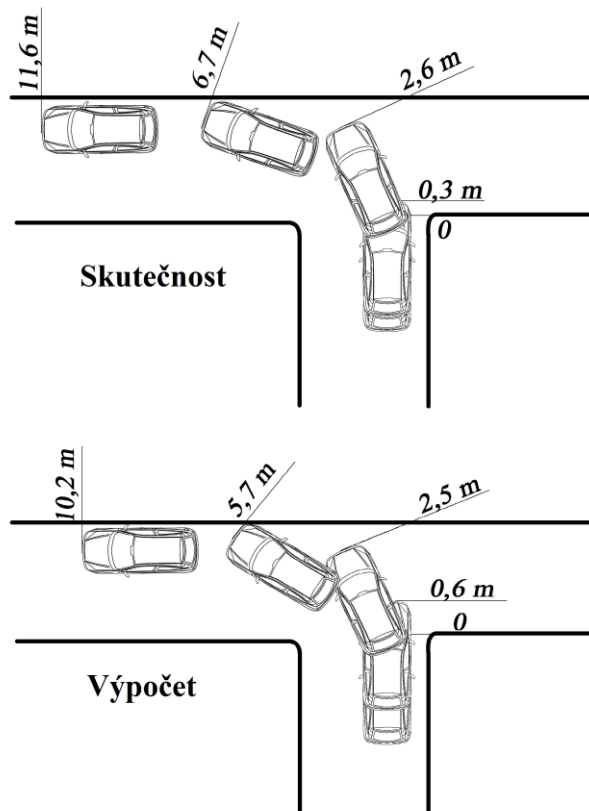
Z výše uvedené tabulky 24 vyplývá, že se rozdíly mezi skutečnou a teoreticky ujetou dráhou pohybovaly od -1,98 do 3,37 m. Nejvíce zastoupený interval byl (1;1,5> s celkovým počtem 18 hodnot. Největší odchylka (3,37 m) značí, že se skutečně ujetá dráha lišila od té teoretické o cca 28 %. Průměrná hodnota rozdílu mezi skutečně ujetou a teoreticky vypočtenou dráhou byla cca 1,41 m. Níže je zobrazen průběh podélného zrychlení pro vybraný rozjezd do křižovatky (DP_37), kde se odchylka v ujeté dráze přibližovala průměrné odchylce.



Graf 11: Průběh podélného zrychlení rozjezdu do křižovatky (DP_37)

Zdroj: vlastní zpracování

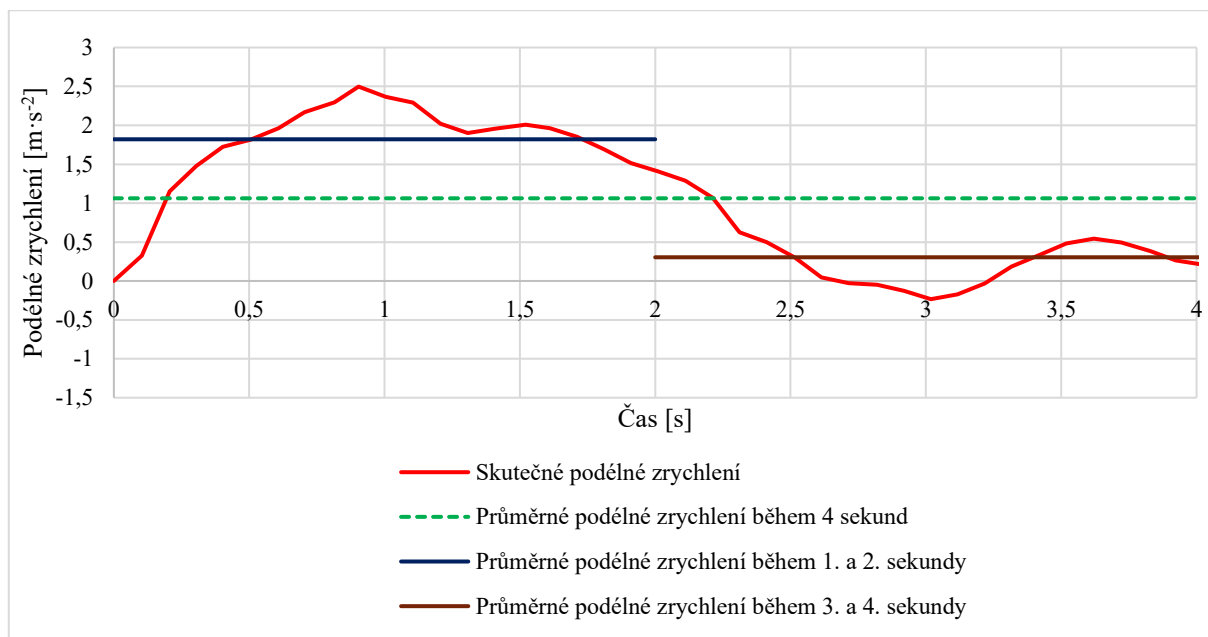
V grafu 12 je uveden skutečný průběh podélného zrychlení během vybraného rozjezdu do křižovatky (DP_37), díky kterému byla stanovena skutečně ujetá dráha. Dále je v grafu 12 zobrazena hodnota průměrného podélného zrychlení, která byla použita pro vypočtení teoreticky ujeté dráhy. Níže je vyobrazen rozdíl v ujeté dráze průměrného rozjezdu do křižovatky.



Obrázek 28: Rozdíl ujeté dráhy průměrného rozjezdu do křižovatky (DP_37)

Zdroj: vlastní zpracování

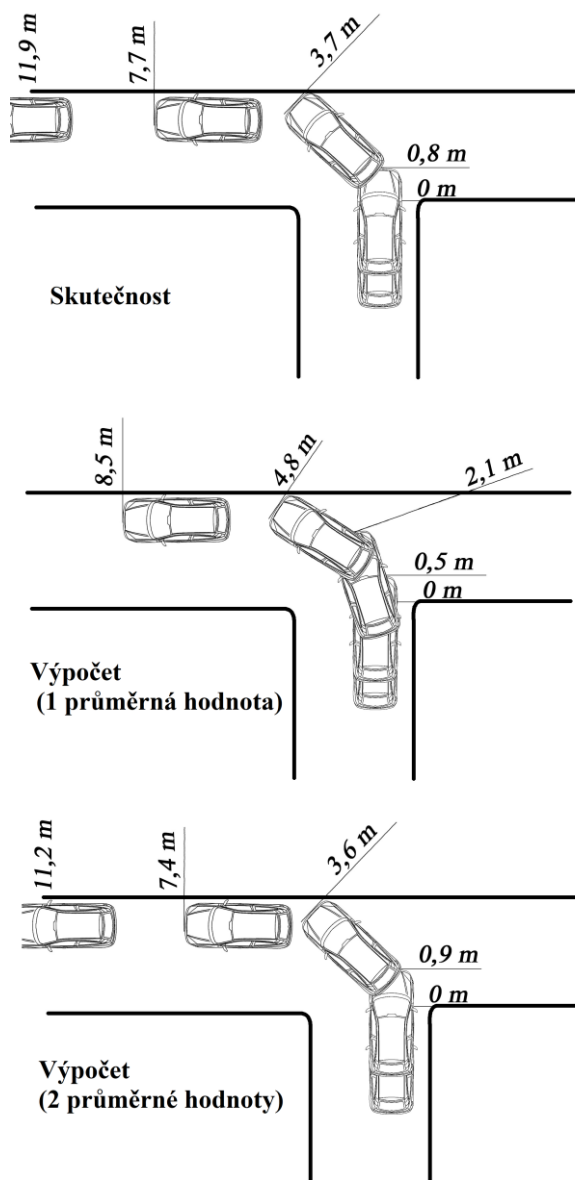
V obrázku 28 je zachycena skutečná dráha vozidla a teoreticky vypočtená dráha vozidla při rozjezdu do křižovatky. Z obrázku je patrné, že při tomto rozjezdu byl rozdíl v ujeté dráze na konci 4. sekundy 1,4 m. Jedná se o průměrnou hodnotu odchylky. Během 1. sekundy rozjezdu byla skutečná dráha vozidla kratší než teoreticky vypočtená a na konci 2. sekundy došlo k přibližnému vyrovnání obou drah. Od 2. sekundy již byla větší skutečná dráha vozidla. Níže je zobrazen průběh podélného zrychlení pro vybraný rozjezd do křižovatky (DP_27), u kterého byla zjištěna největší odchylka v ujeté dráze.



Graf 12: Průběh podélného zrychlení rozjezdu do křižovatky (DP_27)

Zdroj: vlastní zpracování

V grafu 13 je uveden skutečný průběh podélného zrychlení během vybraného rozjezdu do křižovatky (DP_27), díky kterému byla stanovena skutečně ujetá dráha. Dále jsou v grafu rovněž zobrazeny hodnoty průměrného podélného zrychlení a to během 4 sekund, 1. a 2. sekundy a 3. a 4. sekundy, které byly použity pro vypočtení teoreticky ujeté dráhy. Následuje obrázek 29 zachycující největší rozdíl skutečné a teoreticky vypočtené dráhy vozidla na konci 4. sekundy.



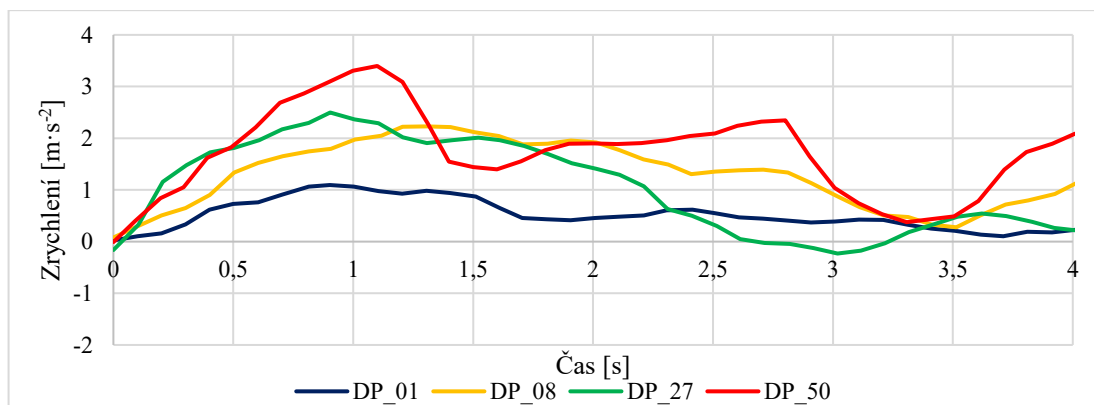
Obrázek 29: Největší rozdíl ujeté dráhy rozjezdu do křižovatky (DP_27)

Zdroj: vlastní zpracování

V obrázku 29 je zachycena skutečná dráha vozidla, a dvě teoreticky vypočtené dráhy vozidla při rozjezdu do křižovatky. Při tomto rozjezdu byl na konci 4. sekundy největší zaznamenaný rozdíl v ujeté dráze (při užití jedné průměrné hodnoty podélného zrychlení vozidla) a to konkrétně 3,37 m. V případě užití dvou průměrných hodnot podélného zrychlení vozidla byl rozdíl na konci 4. sekundy znatelně nižší, a to pouze 0,7 m. Při tomto extrémě (nestandardním rozjezdu do křižovatky) není tedy vhodné pro výpočet užit jedné průměrné hodnoty podélného zrychlení vozidla. Tento rozjezd bude více analyzován v následující kapitole.

5.2.4. Analýza vybraných rozjezdů do křižovatky

Na základě prozkoumání pořízených videozáznamů jednotlivých rozjezdů do křižovatky, byly vybrány 3 rozjezdy, u kterých došlo k zajímavým dopravním situacím. Jedná se o rozjezd DP_01, DP_27 a DP_50. Následně byl pro porovnání přidán ještě rozjezd DP_08 představující běžný rozjezd. Hodnoty podélného zrychlení během těchto rozjezdů zobrazuje následující graf 14.



Graf 13: Podélné zrychlení během rozjezdu do křižovatky pro vybrané rozjezdy

Zdroj: vlastní zpracování

Z grafu 14 je patrné, že rozjezd DP_01 byl z výše uvedených rozjezdů nejvíce pozvolný. Na druhou stranu nejintenzivnějším rozjezdem byl DP_50. Rozjezd DP_08 je považován za standardní a rozjezd DP_27 je považován za obvyklý pouze během prvních 2 sekund rozjezdu do křižovatky. Níže jsou zobrazeny vybrané údaje analyzovaných rozjezdů do křižovatky včetně bližší charakteristiky.

Tabulka 25: Naměřené hodnoty vybraných rozjezdů do křižovatky

| Rozjezd | Maximální podélné zrychlení [m·s ⁻²] | Průměrné podélné zrychlení [m·s ⁻²] | Skutečná dráha [m] | Vypočtená dráha [m] | Časová odchylka [s] |
|---------|--|---|--------------------|---------------------|---------------------|
| DP_01 | 1,09 | 0,53 | 5,2 | 4,2 | 0,41 |
| DP_08 | 2,23 | 1,32 | 12,1 | 10,6 | 0,27 |
| DP_27 | 2,50 | 1,06 | 11,9 | 8,5 | 0,73 |
| DP_50 | 3,40 | 1,75 | 15,7 | 14 | 0,24 |

Zdroj: vlastní zpracování

Během rozjezdu DP_01 bylo naměřeno maximální podélné zrychlení 1,09 m·s⁻², což je nejmenší hodnota v rámci všech 60 rozjezdů. Tomu odpovídá i nejnižší hodnota průměrného podélného zrychlení, která byla v tomto případě 0,53 m·s⁻². Rovněž byla ujeta nejkratší dráha

vozidla během prvních 4 sekund rozjezdu do křižovatky a to pouze 5,2 m a rozdíl oproti vypočtené dráze činil 1 m. Časová odchylka byla 0,41 s.

Během rozjezdu **DP_27** bylo naměřeno maximální podélné zrychlení $2,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a průměrného podélného zrychlení $1,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Dráha, kterou vozidlo ujelo během prvních 4 sekund rozjezdu do křižovatky, byla 11,9 m a rozdíl oproti vypočtené dráze činil 3,4 m, což bylo nejvíce v rámci všech 60 rozjezdů do křižovatky. S dráhou souvisí i hodnota časové odchylky, která byla rovněž největší a to 0,73 s.

Během rozjezdu **DP_50** bylo naměřeno maximální podélné zrychlení $3,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, což je čtvrtá nejvyšší hodnota v rámci všech 60 rozjezdů. Tomu odpovídá i jedna z nejvyšších hodnot průměrného podélného zrychlení, která byla v tomto případě $1,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Rovněž byla ujeta jedna z nejdelších drah vozidla během prvních 4 sekund rozjezdu do křižovatky a to 15,7 m a rozdíl oproti vypočtené dráze činil 1,7 m. Časová odchylka byla 0,24 s.

Během rozjezdu **DP_08** bylo naměřeno maximální podélné zrychlení $2,23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, což je hodnota z nejčtetnějšího intervalu. Tomu odpovídá i standardní hodnota průměrného podélného zrychlení, která byla v tomto případě $1,32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (nejčtetnější interval). Byla ujeta dráha 12,1 m a rozdíl oproti vypočtené dráze byl 1,5 m (nejčtetnější interval). Časová odchylka byla 0,27 s (jedná se o průměrnou odchylku). Níže jsou zobrazeny zajímavé dopravní situace analyzovaných průjezdů, díky kterým byly naměřeny výše uvedené hodnoty.



Obrázek 30: Rozjezdy do křižovatky

Zdroj: vlastní zpracování

Levý náhled představuje rozjezd do křižovatky **DP_01**, z kterého je patrné, že byl realizován na sněhu. Z tohoto důvodu byly naměřeny nejnižší hodnoty maximálního a průměrného podélného zrychlení a také nejkratší ujetá dráha. Jednalo se o nejpomalejší rozjezd.

Náhled uprostřed zachycuje rozjezd do křižovatky **DP_27**, který byl sice během prvních 2 sekund rozjezdu obvyklý, ale v důsledku výjezdu autobusu z vedlejší komunikace byl řidič nucen zpomalit což je patrné i z grafu 14. Tato skutečnost vedla ke snížení průměrné hodnoty

podélného zrychlení během rozjezdu, největší časové odchylce a největšímu rozdílu v ujeté dráze.

Pravý náhled představuje rozjezd do křižovatky DP_50, ze kterého lze rozpoznat přibližující se vozidlo z levého směru. Řidič tedy musel učinit prudký rozjezd, aby nedošlo k ohrožení vozidla jedoucího po hlavní pozemní komunikaci. Z videozáznamu bylo možné zachytit pouze zadní část vozidla přijíždějícího z levého směru (tmavé vozidlo v levé části náhledu DP_50).

5.3. Vybrané situace

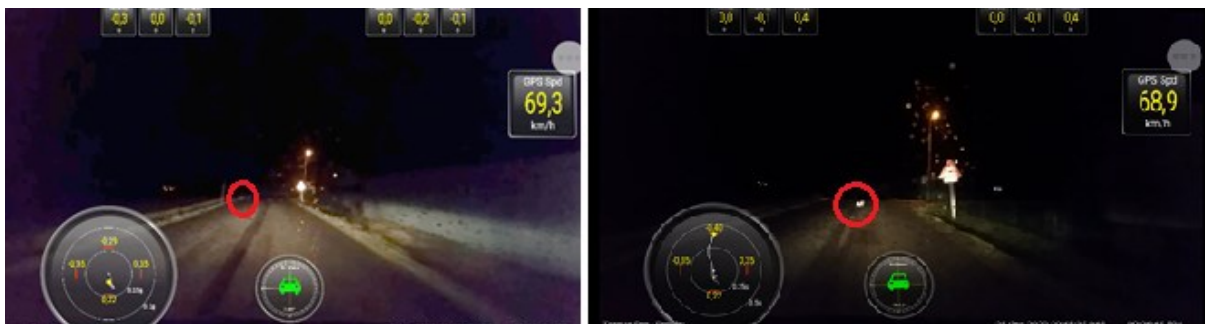
Poslední částí analýzy je zaměřena na rozbor dvou zajímavých situací, se kterými se řidič během sběru dat setkal. Jedná se o:

- vběhnutí zvířete do vozovky za snížené viditelnosti (mimo obec)
- pouštění chodce na přechodu (v obci).

Tyto dvě situace jsou níže detailně zpracovány.

5.3.1. Vběhnutí zvířete do vozovky

Během jízdy za snížené viditelnosti ve večerních hodinách (20:45 hod.), vběhla řidiči do cesty kočka. Stalo se to mezi obcemi Bílý Újezd a Mastý, konkrétně při výjezdu z obce Bílý újezd a povolená rychlost vozidla na tomto úseku byla tedy $90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Při výjezdu z obce vozidlo zrychlovalo a v momentu, kdy kočka vbíhala do vozovky, jelo vozidlo rychlostí $71 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Ze záznamu byl zjištěn moment sešlápnutí brzdového pedálu (počátek brzdění) a od tohoto momentu byla následně odečtena reakční doba řidiče, která byla v tomto případě 0,7 sekund. Jedná se o poměrně nízkou reakční dobu, ke které přispělo přepnutí tlumených světel na dálková, což je patrné z videozáznamu. Na následujícím obrázku 31 je zobrazena popsaná situace.

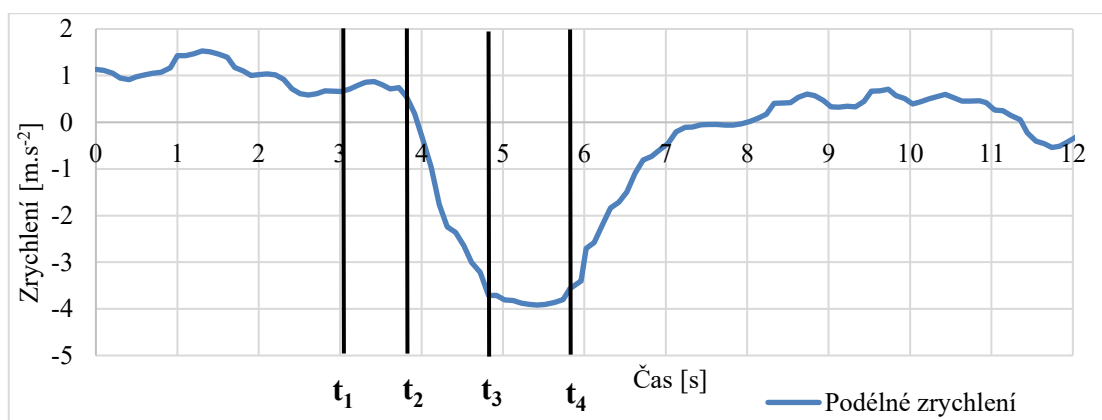


Obrázek 31: Kočka na vozovce

Pozn.: V momentu vbehnutí kočky do vozovky jelo vozidlo rychlostí $71 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (patrné z naměřených dat). Na obrázku je však zachycena rychlost $69,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, což je způsobeno zpožděním ukazatele rychlosti v aplikaci Torque Pro.

Zdroj: vlastní zpracování

V levé části náhledu si lze povšimnout vbíhající kočky na vozovku ($0,4 \text{ s}$ před začátkem brzdění). Kočka byla spatřena řidičem ve vzdálenosti cca 71 m od vozidla, a to v důsledku přepnutí tlumených světel na dálková. V pravé části náhledu je zachycena kočka ve vzdálenosti cca 40 m od vozidla v momentu nejintenzivnějšího brzdění. Níže je zobrazen průběh podélného zrychlení během výše popsané situace.



Graf 14: Průběh podélného zrychlení – situace s kočkou

Zdroj: vlastní zpracování

Výše uvedený graf 15 zachycuje průběh podélného zrychlení, ve kterém jsou vyznačeny čtyři časové mezníky (t_1 , t_2 , t_3 a t_4). Čas t_1 odpovídá okamžiku prvotního spatření kočky. Čas t_2 představuje okamžik sešlápnutí brzdového pedálu. Rozdíl mezi časy t_1 a t_2 představuje reakční dobu řidiče, která byla v tomto případě cca $0,7 \text{ sekundy}$. Mezi časy t_2 a t_3 docházelo k nárůstu intenzity brzdění a tím ke zvyšování podélného zrychlení resp. zpomalení. Časový interval mezi t_3 a t_4 představuje oblast maximálního zpomalení. Největší hodnota zpomalení byla naměřena

$3,92 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Přibližně 0,6 s před časem t_4 se kočka nacházela téměř na středu vozovky. V čase t_4 (cca 22 m před kočkou) dochází k uvolnění brzdového pendálu.

Rozhodovací proces řidiče v dané situaci

Při výjezdu vozidla z obce začal řidič zrychlovat a přepl z tlumených světel na dálková. Náhle spatřil u levé krajnice vozovky kočku, která vbíhala do vozovky. Situaci vyhodnotil tak, že musí začít brzdit, aby nedošlo ke srážce. Prudce sešlápl brzdový pedál (zřejmě i z důvodu leknutí) a vozidlo začalo zpomalovat a kočka mezitím přebíhala vozovku. V momentu kdy byla kočka téměř ve středu vozovky, řidič usoudil, že má situaci pod kontrolou a uvolnil brzdový pedál i když se kočka stále pohybovala po vozovce. Rychlost vozidla již nebyla tak vysoká, aby nestihl včas zareagovat na případné zastavení kočky.

Dle videozáznamu a GPS souřadnic byla odhadnuta vzdálenost mezi vozidlem a kočkou při počátku brzdění na cca 57 m. Rychlost vozidla při zahájení brzdění byla $71 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Níže jsou analyzovány dva alternativní průběhy této situace a to:

- pohyb vozidla konstantní rychlostí,
- brzdění do úplného zastavení.

Byla provedena série výpočtů pomocí následujících vztahů:

$$t = \frac{v_0 - v}{a}$$

$$s = v_0 \cdot t - \frac{1}{2}at^2$$

kde: t ...čas do zastavení vozidla [s],

v_0 ...počáteční rychlost vozidla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

v ...konečná rychlost vozidla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

a ...podélné zrychlení resp. zpomalení vozidla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],

s ...dráha do zastavení vozidla [m].

V případě pohybu vozidla konstantní rychlostí ($71 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) bylo zjištěno, že vzdálenost 57 m (vzdálenost vozidla od kočky) ujede vozidlo za 2,9 sekund. Z videozáznamu je patrné, že tento vypočtený čas by kočce na přeběhnutí celé šíře vozovky stačil, ale jednalo by se o velmi těsné míjení. Kočka z důvodu přibližujícího se vozidla zvýšila rychlost a to přispělo k tomu, že by v tomto případě nebyla poražena. Tato skutečnost je však závislá na rychlosti pohybu kočky.

V případě brzdění vozidla do úplného zastavení bylo pomocí průměrné hodnoty podélného zrychlení v čase mezi t_2 a t_3 ($1,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) nejprve vypočtena ujetá dráha (19 m) v časovém rozmezí $t_2 - t_3$. Poté následoval výpočet rychlosti, kterou se vozidlo pohybovalo v čase t_3 , ($65 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Následně byla pomocí průměrné hodnoty podélného zrychlení v čase mezi t_3 a t_4 ($3,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) vypočtena dráha do úplného zastavení vozidla (42 m). Celková dráha do úplného zastavení vozidla byla vypočtena na 61 m, což znamená, že by vozidlo zastavilo ve vzdálenosti 4 m za místem, kde kočka přebíhala vozovku.

Tato skutečnost neznamena, že by řidič neměl situaci pod kontrolou, protože mohl kdykoliv zvýšit intenzitu brzdění a zastavit vozidlo před místem, kde kočka přebíhala vozovku (například při zastavení kočky uprostřed vozovky). V tomto případě by řidič zastavil vozidlo v těsné blízkosti kočky.

Pokud by řidič brzdil s průměrným zpomalením $5,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (suchý asfalt viz tabulka 2), ujede vozidlo 33 m do úplného zastavení, což odpovídá vzdálenosti 24 m od místa, kde kočka přebíhala vozovku. V případě, že by řidič chtěl zastavit ve vzdálenosti 1 m před místem kde kočka přebíhala silnici, musel by brzdit s průměrným zpomalením $3,48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Skutečné průměrné zpomalení do zastavení včetně náběhu bylo $3,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (toto zpomalení odpovídá brzdě dráze 61 m). Následující obrázek 32 zachycuje kočku na vozovce v momentě uvolnění brzdového pedálu.



Obrázek 32: Kočka na vozovce – uvolnění brzdového pedálu

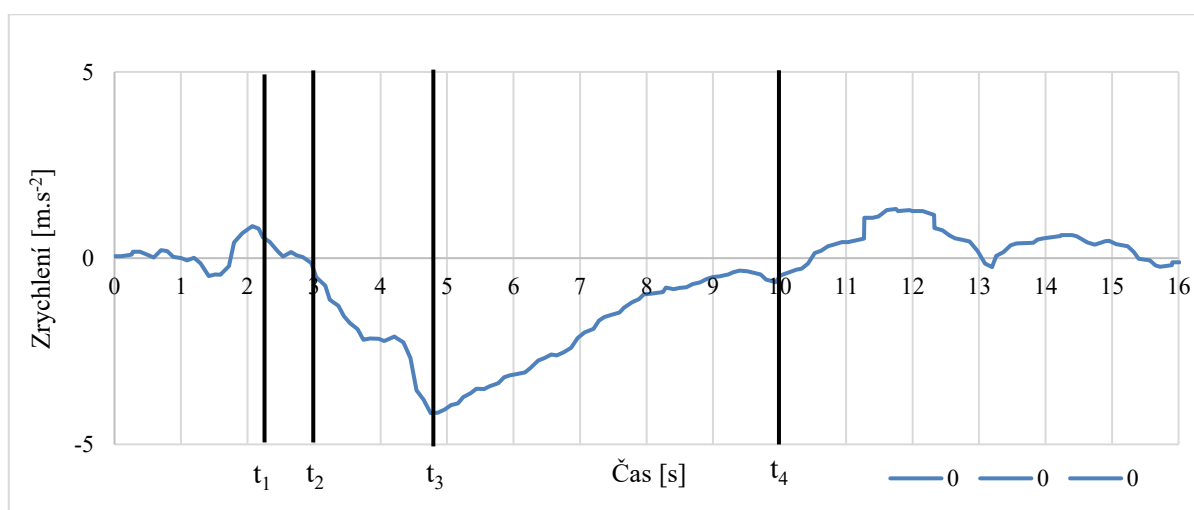
Zdroj: vlastní zpracování

Výše uvedený obrázek 32 zachycuje kočku na vozovce v momentě uvolnění brzdového pedálu (pravý náhled) a 0,6 sekundy před tímto momentem (levý náhled). Obdobně jako u sešlápnutí brzdového pedálu, tak i při jeho uvolnění, je nutné zohlednit reakční dobu řidiče. Podnětem pro uvolnění brzdového pedálu byl okamžik, kdy byla kočka téměř ve středu vozovky (levý náhled) a v momentě uvolnění brzdového pedálu již byla kočka téměř v polovině pravého jízdního pruhu.

5.3.2. Reakce na chodce na přechodu pro chodce

Během jedné z obvyklých denních jízd (11:25 hod.) dodávkovým vozidlem při dobré viditelnosti, musel řidič zareagovat na přecházejícího chodce na přechodu pro chodce (dále jen „přechod“). Stalo se to v centru obce Opočno, a to na úseku, kde je povolená rychlost vozidla snížena na $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a jednalo se o přechod s ostrůvkem uprostřed vozovky.

Z videozáznamu je patrné, že při levé krajnici vozovky stála řada zaparkovaných vozidel, tudíž řidič spatřil chodce až v momentu, kdy stál u přechodu (neviděl ho přicházet). Chodec se při zahájení přecházení vozovky rozhlédl pouze doleva, přešel levý jízdní pruh a v místě ostrůvku se teprve podíval doprava. Když bylo zřejmé, že řidič zpomaluje a dává tedy chodci přednost, chodec pokračoval v přecházení po přechodu (rychlejším tempem). V následujícím grafu 16 je zobrazen průběh podélného zrychlení během výše popsané situace.



Graf 15: Průběh podélného zrychlení – situace s chodcem

Zdroj: vlastní zpracování

Výše uvedený graf 16 zachycuje průběh podélného zrychlení, ve kterém jsou vyznačeny čtyři časové mezníky (t_1 , t_2 , t_3 a t_4). Čas t_1 odpovídá okamžiku prvotního spatření chodce (viz levý náhled obrázku 33). Čas t_2 představuje okamžik sešlápnutí brzdového pedálu (viz pravý náhled obrázku 33). Rozdíl mezi časy t_1 a t_2 představuje reakční dobu řidiče, která byla v tomto případě cca 0,8 sekundy. Mezi časy t_2 a t_3 docházelo k nárůstu intenzity brzdění a tím ke zvyšování podélného zrychlení resp. zpomalení. Z grafu si lze povšimnout, že zhruba v polovině časového intervalu mezi t_2 a t_3 došlo k situaci, kdy byla hodnota podélného zrychlení konstantní (okamžik před vstupem chodce na přechod). V čase t_3 byla naměřena maximální hodnota brzdného zpomalení a to $4,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. V časovém intervalu mezi t_3 a t_4 docházelo

ke snižování intenzity brzdění. V čase t_4 dochází k uvolnění brzdového pedálu a vozidlo nabírá rychlost. Na následujícím obrázku 33 je zachycen chodec při zahájení brzdění vozidla.



Obrázek 33: Výhled z vozidla při zahájení brzdění

Zdroj: vlastní zpracování

Výše uvedený obrázek 33 zachycuje chodce na přechodu v momentě sešlápnutí brzdového pedálu (pravý náhled) a 0,8 sekundy před tímto momentem (levý náhled). Z důvodu omezeného výhledu na přechod protijedoucím červeným vozidlem a také řady zaparkovaných vozidel při levé krajnici vozovky, byl chodec spatřen až u přechodu. Řidič tedy neviděl chodce přicházet.

Rozhodovací proces řidiče v dané situaci

Řidič měl ztížený výhled na levou část přechodu z důvodu zaparkovaných vozidel při levé krajnici vozovky a z toho důvodu spatřil chodce až v momentu, kdy stál u přechodu. V tu chvíli řidič instinktivně přibrzdil. Najednou začal chodec přecházet vozovku a řidič tedy začal brzdit intenzivněji. Zpomalil na cca $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a přibližoval se k přechodu velmi pomalou rychlostí, a to z toho důvodu, aby nemusel vozidlo zcela zastavit a následně se znovu rozjždět.

Dle videozáznamu a GPS souřadnic byla odhadnuta vzdálenost mezi vozidlem a chodcem na přechodu pro chodce při počátku brzdění na cca 49 m. Rychlost vozidla při zahájení brzdění byla $47 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Při zohlednění reakční doby řidiče (0,8 sekundy) lze stanovit, že při prvotním zahlédnutí chodce byla vzdálenost vozidla od přechodu 59,5 m. Níže jsou analyzovány dva alternativní průběhy této situace, obdobně jako u výše uvedené situace s kočkou a to:

- pohyb vozidla konstantní rychlostí,
- brzdění do úplného zastavení.

V případě pohybu vozidla konstantní rychlostí ($47 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) bylo zjištěno, že vzdálenost 49 m (vzdálenost vozidla od chodce na přechodu v momentu zahájení brzdění) ujede vozidlo za 3,74 sekund. Z videozáznamu je patrné, že tento vypočtený čas by chodci na přejítí celé šíře vozovky nestačil a vozidlo by projelo těsně před ním, jednalo by se o velmi nebezpečné míjení viz následující obrázek 34.



Obrázek 34: Míjení chodce při konstantní rychlosti vozidla

Zdroj: vlastní zpracování

Na obrázku 34 je zachycen chodec v momentu, kdy by jej míjelo vozidlo jedoucí konstantní rychlostí ($47 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Chodec se již chystal vstoupit do pravého jízdního pruhu a stál by tak těsně vedle jedoucího vozidla. K výše popsané situaci by v reálném provozu nemělo vůbec dojít, neboť v případě, kdy chodec vstupuje na přechod viz obrázek 33 řidič musí zpomalit, popř. zastavit, aby chodce neohrozil ani neomezil. Z tohoto důvodu řidič ve skutečnosti reagoval intenzivnějším brzděním, aby měl situaci plně pod kontrolou a popřípadě mohl zastavit vozidlo.

V případě brzdění vozidla do úplného zastavení bylo pomocí průměrné hodnoty podélného zrychlení v čase mezi t_2 a t_3 ($2,13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) nejprve vypočten čas potřebný k zastavení vozidla jedoucího rychlostí $47 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a to na 6,16 sekund. Následně byla vypočtena dráha, kterou vozidlo ujede do úplného zastavení (40,3 m). Vozidlo by tedy zastavilo 8,7 m před přechodem, což značí, že řidič měl situaci plně pod kontrolou.

Pokud by řidič brzdil s průměrným zpomalením $5,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (suchý asfalt viz tabulka 2), ujede vozidlo 14,5 m do úplného zastavení, což odpovídá vzdálenosti 34,5 m od přechodu. Tato situace tedy nenutí řidiče brzdit s maximálním zpomalením. V případě, že by řidič chtěl zastavit ve vzdálenosti 1 m před přechodem, musel by brzdit s průměrným zpomalením $1,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ což by trvalo 7,36 sekund. Následující obrázek 35 zachycuje chodce na přechodu v momentě uvolnění brzdového pedálu.



Obrázek 35: Chodec na přechodu – uvolnění brzdového pedálu

Zdroj: vlastní zpracování

Výše uvedený obrázek 35 zachycuje chodce na přechodu v momentě uvolnění brzdového pedálu (pravý náhled), 0,6 sekundy před tímto momentem (prostřední náhled) a okamžik snižování intenzity brzdění (levý náhled). Obdobně jako u sešlápnutí brzdového pedálu, tak i při jeho uvolnění, je nutné zohlednit reakční dobu řidiče. Podnětem pro uvolnění brzdového pedálu byl okamžik, kdy chodec opouštěl přechod pro chodce (prostřední náhled) a v momentě uvolnění brzdového pedálu již byl chodec zcela mimo přechod.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrzení metodiky sběru dat pomocí nových komunikačních technologií jako nenákladný způsob získávání dat, navrzení postupu pro jejich vyhodnocování a následně vyhodnocení těchto dat dle příslušných kritérií. Z teoretického hlediska byly vymezeny základní pojmy související s touto problematikou jako je doprava, dopravní nehoda, zrychlení, akcelerometr a vybrané síly působící na vozidlo.

Součástí analýzy bylo porovnání přesnosti měření mobilního telefonu s akcelerometrem dostupným na VVCD. Během porovnávání naměřených dat byly zjištěny pouze drobné odchylky, z nichž nejvýraznější byly zjištěny při dynamičtějším změnách zrychlení, které mohly být způsobeny:

- rozdílným umístěním snímačů ve vozidle,
- připevněním snímačů ve vozidle,
- rozdílnou vzorkovací frekvencí snímačů aj.

Největší odchylka byla naměřena při prudkém rozjezdu a to $0,49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ viz graf 3. Během pozvolného rozjezdu již nebyla odchylka příliš vysoká, jednalo se o $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ viz graf 2. Při ověření přesnosti pomocí úhloměru se mobilní telefon přibližoval vypočtené hodnotě více než akcelerometr např. při 10° naměřil mobilní telefon hodnotu $-0,173 \text{ g}$, akcelerometr $-0,169 \text{ g}$ a dle výpočtu by se hodnota příčného zrychlení měla rovnat $-0,174 \text{ g}$ viz graf 6. Lze tedy konstatovat, že je možné v tomto případě využít mobilní telefon jako kvalitní alternativu měření zrychlení vozidla ve srovnání s klasickým akcelerometrem.

Největší pozornost byla věnována analýze vybraných dopravních situací, a to konkrétně průjezdu zatáčkou v obou směrech, rozjezdu do křižovatky, vběhnutí zvířete do vozovky a reakce na chodce na přechodu pro chodce. První analyzovanou dopravní situací byl průjezd zatáčkou nacházející se mimo obec. Nejprve byly zjištěny poloměry zatáčky (levotočivá 127 m, pravotočivá 124 m), a to jak fyzickým měřením přímo na místě, tak i pomocí online map. Tyto hodnoty byly využity pro teoretické výpočty příčného zrychlení při průjezdu zatáčkou. Při průjezdu levotočivou zatáčkou bylo z naměřených dat zjištěno že:

- 78 % hodnot maximálního příčného zrychlení bylo z intervalu $(2,5;4,5> \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,
- 53 % hodnot průměrného příčného zrychlení bylo z intervalu $(2,5;3,5> \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,
- 63 % hodnot vypočteného příčného zrychlení bylo z intervalu $(3;4> \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,
- 60 % rychlostí bylo z intervalu $(70;80> \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Dále byly identifikovány nestandardní průjezdy zatáčkou, u kterých byly naměřeny extrémní hodnoty průměrného příčného zrychlení a to:

- $0,8 - 1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ vlivem nízké rychlosti ($49-55 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) z důvodu sněhu, náledí, snížené viditelnosti,
- $5,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ vlivem vysoké rychlosti (cca $91 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$).

Při průjezdu pravotočivou zatáčkou bylo z naměřených dat zjištěno že:

- 65 % hodnot maximálního příčného zrychlení bylo z intervalu $(3;4,5> \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,
- 77 % hodnot průměrného příčného zrychlení bylo z intervalu $(2,5;4> \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,
- 91 % hodnot vypočteného příčného zrychlení bylo z intervalu $(3;4,5> \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,
- 88 % rychlostí bylo z intervalu $(70;85> \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Dále byly rovněž identifikovány nestandardní průjezdy zatáčkou, u kterých byly naměřeny vysoké hodnoty průměrného příčného zrychlení a to $4,8$ a $5,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ realizované při vysokých rychlostech (89 a $92 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) způsobené komunikací se spolujezdcem a posloucháním hlasité hudby během jízdy.

Z naměřených dat dále vyplynulo, že vypočtené hodnoty příčného zrychlení byly zpravidla vyšší než hodnoty průměrného příčného zrychlení, což je způsobeno stylem projetí zatáčky. Při nájezdu do levotočivé zatáčky se řidič vždy držel ve svém pruhu, protože nevěděl, zda bude možné projet zatáčku levým jízdním pruhem, neboť zatáčka předchází stoupání. Po vjezdu do zatáčky je již viditelnost dostačující na to, aby se řidič rozhodl, zda využije levý jízdni pruh (pokud není míjeno protijedoucí vozidlo) a zvětší si tak poloměr zatáčky viz obrázek 20. Při nájezdu do pravotočivé zatáčky je naopak dobrá viditelnost při nájezdu do zatáčky. Z tohoto důvodu došlo u některých průjezdů k nájezdu do pravotočivé zatáčky z levého jízdniho pruhu či ze středu vozovky (nadjetí), ale při průjezdu a následném výjezdu ze zatáčky se vozidlo vždy drželo v pravém jízdni pruhu viz obrázek 24. Poloměr zatáčky si řidič upravuje zejména kvůli komfortnějšímu průjezdu (snížení odstředivé síly působící na vozidlo, resp. posádku).

V případě pravotočivé zatáčky bylo 51 % hodnot průměrného příčného zrychlení vyšších než $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a v případě levotočivé zatáčky pouze 23 % s čímž souvisí i skutečnost, že při průjezdech pravotočivou zatáčkou bylo dosahováno vyšších rychlostí vozidla a vozidlo se pohybovalo po menším poloměru zatáčky.

Druhou analyzovanou dopravní situací byl rozjezd do křižovatky, u kterého byly zjištěny následující skutečnosti:

- 72 % hodnot maximálního podélného zrychlení bylo z intervalu $(1,8;2,8> \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,
- 82 % hodnot průměrného podélného zrychlení bylo z intervalu $(1;1,6> \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,
- 72 % rychlostí vozidla po 4. sekundě rozjezdu do křižovatky bylo z intervalu $(16;24> \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,
- 60 % ujetých drah po 4. sekundě rozjezdu do křižovatky bylo z intervalu $(10;13> \text{ m}$.

Při vyšetřování dopravních nehod se zpravidla počítá s jednou průměrnou hodnotou podélného zrychlení během celého manévru. Součástí analýzy tudíž bylo i porovnání, jak se tyto průměrné hodnoty lišily od skutečně naměřených dat včetně stanovení průměrné odchylky. Z naměřených dat bylo zjištěno, že:

- 72 % časových odchylek bylo z intervalu $(0;0,4> \text{ s}$,
- průměrná hodnota časové odchylky byla 0,27 s,
- 47 % odchylek ujeté dráhy bylo z intervalu $(1;2> \text{ m}$,
- průměrná hodnota odchylky ujeté dráhy byla 1,41 m.

Ve většině případů byly zjištěné odchylky přiměřené, a proto je tedy možné v mnoha případech k výpočtu použít jednu průměrnou hodnotu podélného zrychlení. Nicméně pro některé případy by bylo vhodnější užít dvou průměrných hodnot podélného zrychlení viz obrázek 29.

Poslední částí analýzy bylo rozebrání dvou vybraných situací, a to vběhnutí kočky do vozovky a pouštění chodce na přechodu pro chodce. V rámci obou dvou situací byly nejprve analyzovány naměřené hodnoty podélného zrychlení, hodnoceny rozhodovací procesy řidiče a následně byly provedeny výpočty alternativních průběhů těchto situací (pohyb vozidla konstantní rychlostí a brzdění do úplného zastavení vozidla). Maximální hodnota podélného zrychlení, resp. zpomalení byla v případě kočky $3,92 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a v případě chodce $4,16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Z průběhu naměřených hodnot podélného zrychlení, resp. zpomalení bylo zjištěno, že v první fázi brzdění řidič intenzivně zpomaluje a v okamžiku, kdy má situaci pod kontrolou (při náhlé změně pohybu chodce či zvířete dokáže řidič včas zareagovat a zastavit vozidlo), snižuje intenzitu brzděného zpomalení a tím snižuje velikost setrvačné síly působící na posádku vozidla, resp. náklad. V této práci však byly analyzovány pouze dvě situace takového charakteru pro nastínění možných scénářů. Proto tedy nelze tyto závěry aplikovat v globálním měřítku.

POUŽITÁ LITERATURA

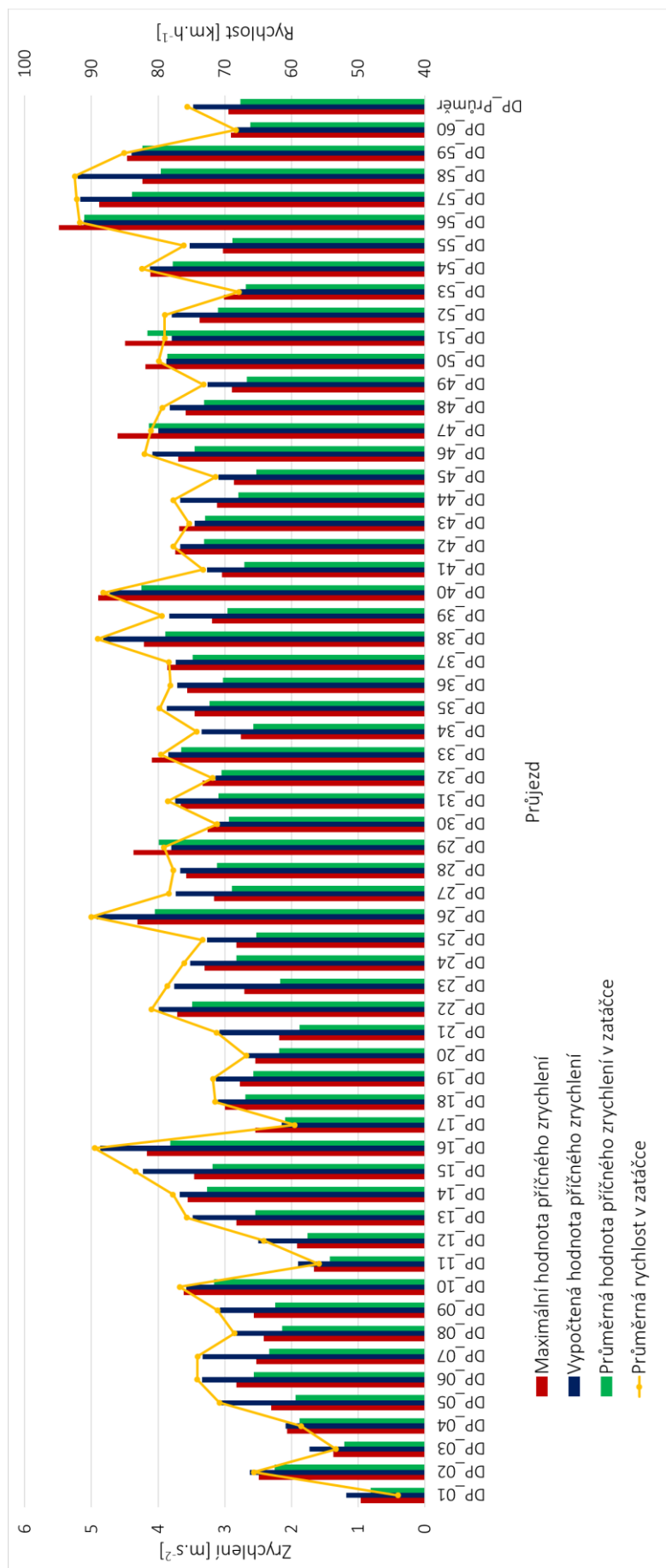
- [1] BRADÁČ A. a kol., 1997. Soudní inženýrství. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. ISBN 80-7204-057-X.
- [2] CZUDKOVÁ, L., 2010. Fyzika a dopravní nehody [online]. [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://www.physics.muni.cz/kof/clanky/nehody.pdf>
- [3] ČR, 2000. Zákon č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích a o změně některých zákonů [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-361>
- [4] ČSÚ, 2020. Nehody v silniční dopravě [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/index.jspx?_af=1&page=vystup-objekt&pvo=KRI07&z=T&f=TABULKA&katalog=31008&str=v4
- [5] HRUŠKA, F., 2014. Náklonměř s akcelerometrem [online]. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/24408/F3-BP-2014-Hruska-Frantisek-prace.pdf>
- [6] CHMELÍK, J. a kol., 2009. Dopravní nehody. Plzeň: Aleš Čeněk, s. r. o. ISBN 978-80-7380-211-0.
- [7] CHOLASTA, L., 2010. Měření a porovnání jízdních parametrů vozidel v různých jízdních režimech [online]. [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33506
- [8] KRUPAŘ, V., 2019. Vyhodnocování běžného provozu vozidla MHD při vybraných dopravních situacích [online]. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/73727/KruparV_VyhodnocovaniBezneho_ZM_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [9] KUNEŠOVÁ, H. a kol., 2006. Světová ekonomika: nové jevy a perspektiva. Praha: C. H. Beck, ISBN 80-7179-455-4
- [10] MIKULČÁK, J. a kol., 1988. Matematické, fyzikální a chemické tabulky. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n. p.
- [11] PLCH, J., 2010. Reakční doba řidiče [online]. [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: http://artmetal-cz.com/p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ky/osv%C4%9Btlov%C3%A1n%C3%AD%20p%C5%99echod%C5%AF%20pro%20chodce/Reak%C4%8Dn%C3%AD%20doba%20%C5%99idi%C4%8De_PLCH.pdf
- [12] POLICIE ČR, 2020. Preventivní rady II [online]. [cit. 2020-06-29]. Dostupné z: <https://www.policie.cz/clanek/preventivni-rady-ii.aspx?q=Y2hudW09OA%3D%3D>

- [13] PORADA, V. a kol., 2000. Silniční dopravní nehoda v teorii a praxi. Praha: Linde Praha, a. s. ISBN 80-7201-212-6.
- [14] STŘELEČEK, Z., 2010. Vlastnosti moderních akcelerometrů [online]. [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30291215.pdf>
- [15] VODĚREK, D., 2011. Využití 3D akcelerometru pro sledování pohybu vozidla [online]. [cit. 2020-07-08]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/41981/VoderekD_SledovaniVozidla_ZN_2011.pdf?sequence=2&isAllowed=n

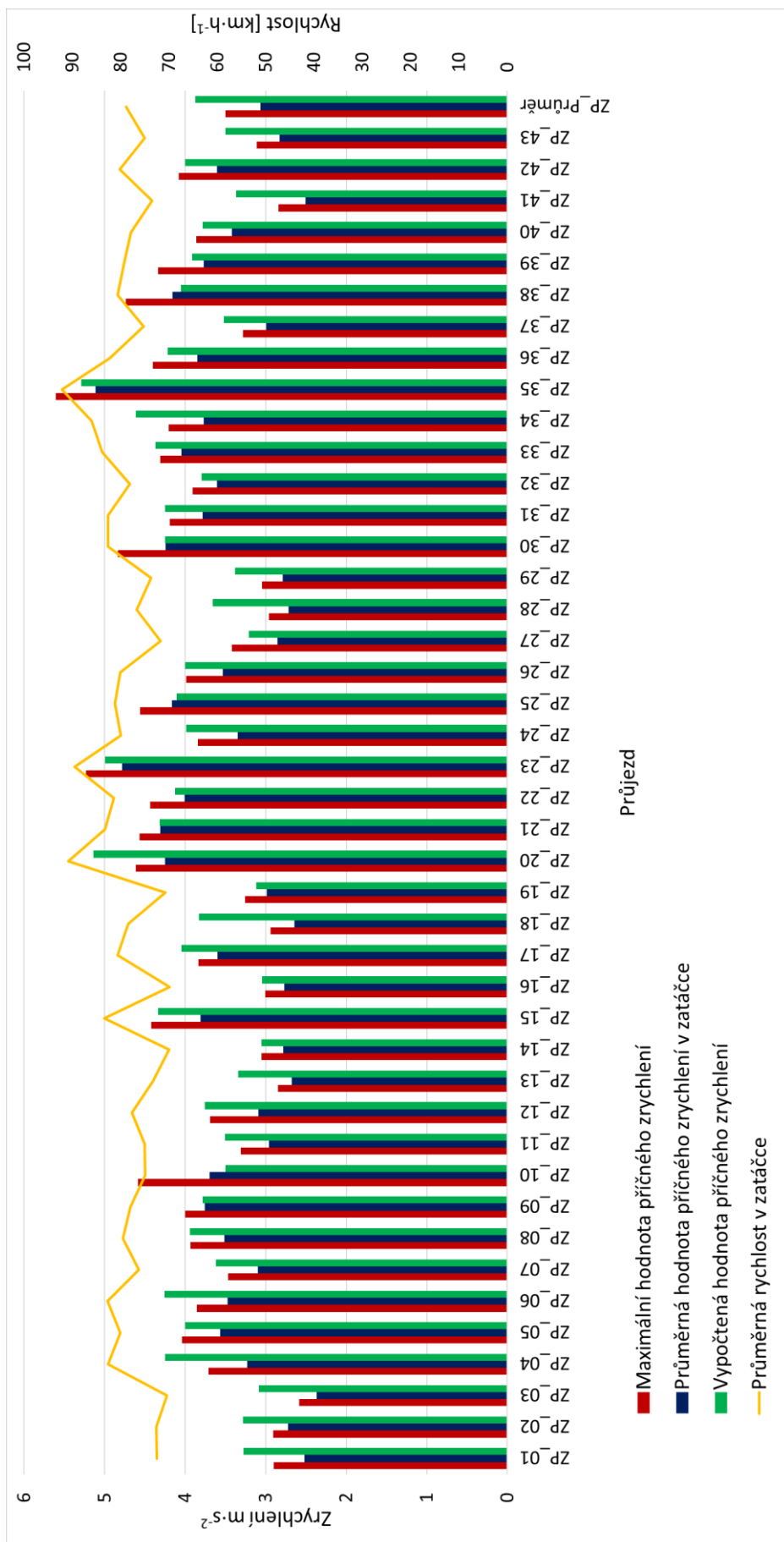
PŘÍLOHY

| | |
|---|----|
| Příloha A – Veškeré průjezdy levotočivou zatáčkou | 89 |
| Příloha B – Veškeré průjezdy pravotočivou zatáčkou | 90 |
| Příloha C – Veškeré rozjezdy do křižovatky | 91 |

Příloha A – Veškeré průjezdy levotočivou zatáčkou



Příloha B – Veškeré průjezdy pravotočivou zatáčkou



Příloha C – Veškeré rozjezdy do křižovatky

