

UNIVERZITA KARLOVA

Fakulta tělesné výchovy a sportu

**Analýza lokalizace impaktního impulzu a jeho průběhu při
srážce figuríny s tramvají**

Vedoucí diplomové práce:

doc. PaedDr. Karel Jelen, CSc.

Vypracovala:

Bc. Kristýna Vrabčková

Praha 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne:

.....

.....

podpis diplomanta

Evidenční list

Souhlasím se zapůjčením své diplomové práce ke studijním účelům.

Uživatel svým podpisem stvrzuje, že tuto diplomovou práci použil ke studiu a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno a Příjmení

Fakulta/katedra

Datum vypůjčení

Podpis

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce doc. PaedDr. Karlovi Jelenovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady při psaní této závěrečné práce. Dále také děkuji Ing. Petru Kubovému za odborné rady vztahující se k danému tématu.

Abstrakt

- Název:** Analýza lokalizace impaktního impulsu a jeho průběhu při srážce figuríny s tramvají
- Cíle:** Vytvořit metodickou práci zabývající se analýzou impaktního impulsu při srážce figuríny (Jasti Hybrid III) s různými typy tramvají (T3, KT8D5, 14T a 15T), na základě dat o zrychlení jejich jednotlivých segmentů při boční srážce figuríny v rychlosti 15 km/h.
- Metody:** Práce uvádí metodiku práce s daty o zrychlení jednotlivých segmentů těla figuríny při srážce s tramvají, za účelem interpretace průběhu impaktního impulsu. Data jsou interpretována pomocí nově zavedeného parametru PIIC, který byl vypočítán pomocí softwarového programu Microsoft Excel a graficky interpretován pomocí programu Origin 2023.
- Výsledky:** Metoda analýzy impaktního impulsu při srážce figuríny s tramvají založená na parametru PIIC (potažmo $PIIC_{kum}$) se zdá být přínosným nástrojem pro interpretaci průběhu tohoto impulsu. Při porovnání výsledků PIIC byla nalezena zřejmá souvislost s analýzou videozáznamů jednotlivých experimentálních měření.
- Klíčová slova:** srážka chodce s tramvají, analýza primárního impaktu, kritéria poranění, bezpečnost chodce

Abstract

- Title:** Analysis of the localization of the impact impulse and its course during a collision between a dummy and a tram
- Objectives:** To create a mehodical thesis dealing with the analysis of the impact impulse during a collision between Jasti Hybrid III dummy and different types of trams (T3, KT8D5, 14T and 15T), based on data of the acceleration of individual segmments during a side collision at speed of 15 km/h.
- Methods:** The thesis presents a method of working with acceleration data of individual body segments of a dummy during a collision with tram, in order to interpret the course of the impact impulse. Data are interpreted using newly introduced PIIC (Parametr Implementing Injury Criterion), which was calculated using the Microsowt software program and graphically interpreted using the Origin 2023 program.
- Results:** The method of analysis of the impact impulse during the collision between a dummy and a tram based on the PIIC (and also $PIIC_{kum}$) seems to be a useful tool for interpreting the course of this impulse. When comparing the PIC results, an obvious connection was found with the analysis of video recordings of individual experimental measurements.
- Keywords:** tram-pedestrian collision, analysis of primary impact, injury criteria, pedestrian safety

Obsah

Seznam použitých zkratk	9
1 Úvod	10
2 Cíle a úkoly práce	11
2.1 Cíle práce	11
2.2 Úkoly práce	11
3 Teoretický základ	12
3.1 Tramvajová doprava	12
3.1.1 Srážky s tramvají	13
3.1.2 Poranění při dopravních nehodách	17
3.1.3 Tramvaje provozované DPP	18
3.2 Aspekty srážky tramvaje s chodcem	20
3.2.1 Rychlost tramvaje	21
3.2.2 Čelo tramvaje	22
3.2.3 Zábrzdná dráha tramvaje	23
3.2.4 Psychologické aspekty	27
3.3 Biomechanika srážky chodce s tramvají	27
3.4 Biomechanika poranění	32
3.4.1 Kritérium poranění hlavy	33
3.4.2 Aspekt zrychlení	35
4 Metodika práce	37
4.1 Zpracování dat	37
5 Výsledky	40
5.1 Srážka s typem T3	45
5.2 Srážka s typem KT8D5	47
5.3 Srážka s typem 14T	49
5.4 Srážka s typem 15T	52
6 Diskuze	55

7 Závěr	57
Citovaná literatura.....	58
Příloha č. 1: seznam obrázků	62
Příloha č. 2: seznam tabulek	64

Seznam použitých zkratek

MU	Mimořádná událost
DPP	Dopravní podnik hlavního města Prahy
BESIP	Bezpečnost silničního provozu ČR
AIS	Abbreviated Injury Scale
HIC	Head Injury Criterion
PIIC	Parametr implementující kritérium poranění (Parametr Implementing Injury Criterion)

1 Úvod

Hromadná doprava se stává v posledních letech velmi využívanou. Jedním z důvodů je nárůst počtu automobilů, které přispívají k znečištění ovzduší a k dopravním zácpám. Tramvajový systém hromadné dopravy je klasifikován jako dlouhodobě udržitelný. I to je jeden z důvodů proč ji čím dál častěji lidé využívají.

S četnostní využívání tramvajové dopravy roste i počet srážek s tramvají, a to mimo jiné i s chodci. Ti jsou při střetu s tramvají takřka nechráněni. Při takovýchto kolizích se tedy často nacházejí v přímém ohrožení života. Ke vzniku nehod přispívají, jak aspekty tramvajových vozidel jako je jejich horší manévrovatelnost a dlouhá brzdná dráha, tak nezodpovědnost ostatních účastníků silničního provozu. Stále častější rozptýlení chodců mobilními telefony přispívá ve velké míře ke zvyšování nejen počtu střetů, ale také počtu vážných zranění.

Přesto, že automobilový průmysl je již ve vyšetřování a analýze nehod s chodci poměrně daleko, tramvajovými kolizemi se vědci začali zabývat až v posledních letech. Z těchto ale již vyvinutých systémů lze čerpat inspiraci a implementovat tyto poznatky do řešení nehod tramvají s chodci.

Do analýzy těchto situací vstupuje spousta faktorů. Tato práce si klade za úkol přiblížit danou problematiku v kontextu zahraničním a zejména českém. Popsat jednotlivé aspekty srážek chodců s tramvajemi a přiblížit problematiku biomechaniky srážky chodce s tramvají. V praktické části se práce zaměřuje na analýzu průběhu impaktního impulsu při srážce figuríny s různými typy tramvají.

2 Cíle a úkoly práce

2.1 Cíle práce

Zpracovat teoreticky téma srážky chodce s tramvají v kontextu českém i zahraničním.

Vytvořit metodickou práci zabývající se analýzou impaktního impulzu při srážce figuríny s různými typy tramvají, na základě dat o zrychlení jejich jednotlivých segmentů. Konkrétně zpracování dat při boční srážce figuríny Jasti Hybrid III s typy tramvají: T3, KT8D5, 14T a 15T v rychlosti 15 km/h.

2.2 Úkoly práce

- Úkolem práce je uvést čtenáře do problematiky srážky chodce s tramvají.
- Stanovit si výše uvedené cíle a zaměřit se na uvedené typy scénářů srážky tramvají s figurínou.
- Určit metodu pro teoretické zpracování a analýzu dat získaných při experimentálním měření v rámci grantu: GRANT OPVVV výzva 26, ANALÝZA NEHODOVÝCH DĚJŮ CHODEC TRAMVAJ – VALIDACE SIMULAČNÍCH MODELŮ (2019-2022).
- Zpracovat a analyzovat tyto získaná data. Diskutovat o použití zvolených metod zpracování dat a o zjištění z nich plynoucích.
- Interpretovat výsledky a závěr zjištění

3 Teoretický základ

3.1 Tramvajová doprava

Kolejová městská doprava má své výhody a nevýhody. Přínosem pro hromadnou dopravu je velká přepravní kapacita, snadná ovladatelnost pro řidiče a větší spolehlivost v chladnějších podmínkách. Jednou ze zásadních výhod je ekologický aspekt tramvajového provozu, a to jak z hlediska životnosti elektromotorů, tak z hlediska emisí (Drdla, 2018).

Kladem, avšak také záporem, tramvajové dopravy je její schopnost sdílení komunikace s ostatními druhy dopravy. Ve městech, kde je vybudována tato tramvajová síť, je tedy nutno dodržovat danou dopravní legislativu a být na komunikacích obezřetnější.

S rostoucím počtem obyvatel ve městech by měli být řidiči povzbuzováni k využívání městské hromadné dopravy (metro, vlaky, autobusy, tramvaje). Nejen v Evropě, ale také ve světě, dochází k zvyšování počtu tramvají a tramvajových linek. Spolu se zvýšením těchto počtů dochází také ke zvýšení interakcí tramvají s dalšími účastníky silničního provozu. Jedním z následků je tak zvýšení počtu nehod, při kterých je zaznamenána přítomnost tramvajového vozidla, a to i přes to, že se pohybuje v průměru rychlostí okolo 20 km/h. Faktorů ovlivňujících tyto události je mnoho a všechny mají vliv na chování účastníků silničního provozu, které může vést k rizikovým situacím (Castanier, 2012).

V současné době jezdí tramvaje ve 204 městech v Evropě, přičemž délka tramvajové sítě se v letech 2015-2018 prodloužila téměř o 4 % (420 km v Evropě). Současné znalosti jsou téměř výhradně založeny na analýzách hlášených údajů o nehodách, které často postrádají informace o faktorech přispívajících k nehodám souvisejícím s chodci, i tak jsou zásadní pro pochopení bezpečnostních trendů a rozpoznání některých rizikových faktorů nehod. K této problematice se vyjádřila i Evropská unie, jejíž technická komise zpracovala dokument v podobě Technického doporučení 17420 (2020). Doporučení poprvé definuje bezpečnostní požadavky na design přední části tramvaje v souladu s bezpečností chodců, které by se měly vztahovat na nově projektované tramvaje (Lackner, 2022).

3.1.1 Srážky s tramvají

Pokud se díváme na srážku tramvaje s dalším účastníkem silničního provozu můžeme zde identifikovat možnosti srážek hned několika typů a s různými zaviněními. Zákon č. 319/2016 Sb. definuje tzv. mimořádnou událost takto: „Mimořádnou událostí je nehoda nebo incident, ke kterým došlo v souvislosti s provozováním drážní dopravy nebo pohybem drážního vozidla na dráze nebo v obvodu dráhy a které ohrozily nebo narušily

- a) bezpečnost drážní dopravy,
- b) bezpečnost osob,
- c) bezpečnou funkci staveb nebo zařízení, nebo
- d) životní prostředí.“

Dále zákon také definuje nehodu a vážnou nehodu takto: „Nehodou je událost, jejímž následkem je smrt, újma na zdraví nebo jiná újma. Vážnou nehodou je nehoda způsobená srážkou nebo vykolejením drážních vozidel, jejímž následkem je smrt, újma na zdraví alespoň 5 osob nebo škoda velkého rozsahu podle trestního zákoníku na drážním vozidle, dráze nebo životním prostředí, nebo jiná nehoda s obdobnými následky.“ (2023).

Jelikož se tramvaj obecně pohybuje při nižších rychlostech než ostatní motorová vozidla, představují tramvaje větší riziko pro střet s chodci (případně cyklisty). Chodci jsou při takovém střetu ve velkém ohrožení, neboť možnost reakce řidiče je velmi omezená, a to zejména v délce brzdné dráhy. Samotní chodci jsou poté při střetu s tramvají takřka nechráněni. Pokud se zaměříme na statistiky MU (mimořádných událostí) tramvají Dopravního podniku hlavního města Prahy v letech 2008-2018, zjistíme, že v posledních letech zaznamenal DPP (Dopravní podnik hlavního města Prahy) nárůst těchto událostí (viz *Tabulka 1*) (Mikulka, 2019).

Rok	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Počet MU	1441	1421	1432	1279	1282	1302	1394	1359	1353	1572	1585

Tabulka 1 – četnost MU DPP v letech 2008-20018, převzato (Mikulka, 2019)

Dle Mikulky (2019) dochází obecně častěji ke srážce s motorovými vozidly, za rok 2018 z těchto 1585 MU však došlo v 7 % ke srážce s chodci. Celkově z těchto MU za rok 2018 došlo ke 4 % těžce zraněným účastníkům a 3 % usmrcení. Přičemž se tyto statistiky vztahují pouze k MU DPP.

3.1.1.1 Srážka tramvají s chodci

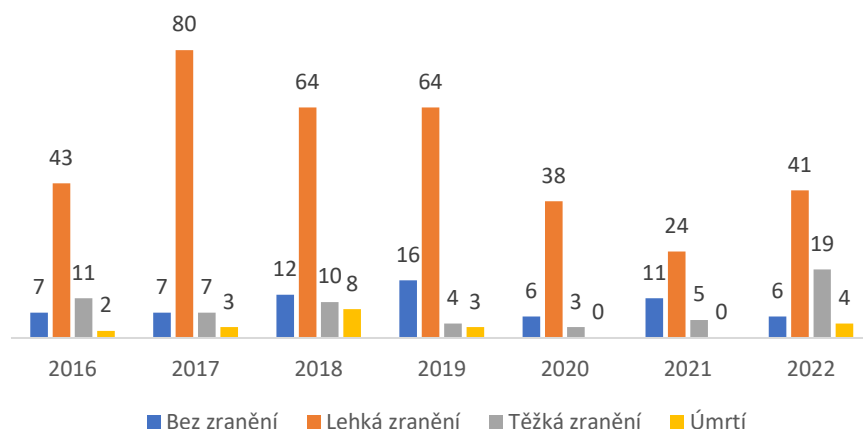
Při srážce tramvaje s chodci dochází při kombinaci mnoha faktorů, ve většině případů si za situaci ovšem může chodec vlastní vinout. Ať už se jedná o úmyslné či neúmyslné vstoupení chodce do vozovky, důvodem pro střetnutí může být poslech hudby ve sluchátcích, nedostatečná obezřetnost v okolí tramvajového pásu (nedostatečné rozhlédnutí, telefonování, sledování mobilního telefonu), či podcenění dopravní situace (dojem, že ještě chodec stihne přejít). Při těchto střetech s chodci je také záhodno zmínit, že k nim dochází, jak na přechodech pro chodce, tak také mimo ně.

Následující tabulka interpretuje počet srážek tramvají s chodci v letech 2016-2022 (Tabulka 2).

Rok	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Počet srážek tramvají s chodcem	75	111	105	87	47	40	83

Tabulka 2 – počet srážek tramvají s chodci v letech 2016-2022, data převzata (DPP, 2023)

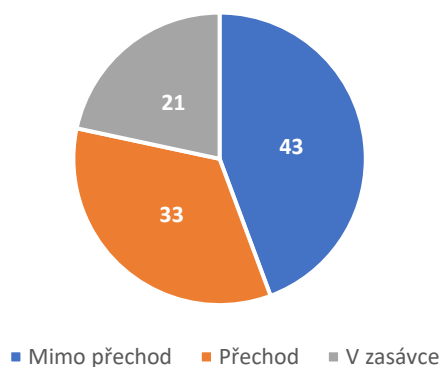
Vážnost těchto kolizí lze vyjádřit následným grafem (Obrázek 1), který popisuje jednotlivé počty srážek v daném roce, při kterých chodec obdržel žádná, lehká, těžká zranění či úmrtí.



Obrázek 1 – počet jednotlivých typů zranění a úmrtí při srážce chodce s tramvají v letech 2016-2022, data převzata (DPP, 2023)

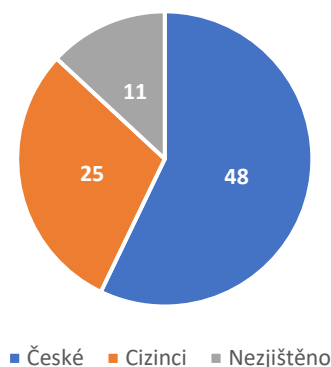
Z tabulky i grafu výše je čitelný propad, který lze přisuzovat zmenšenému objemu v přepravě v návaznosti na pandemii Covidu-19, avšak v navazujícím roce 2022 zaznamenal DPP celkem 83 incidentů tramvají s chodci, z nichž ve čtyřech případech došlo k úmrtí. Pokud se podíváme na srovnání roku 2019 (před pandemií Covidu-19) s rokem 2022 můžeme zaznamenat pokles celkového počtu MU tramvaje s chodcem (DPP, 2023).

Pokud se podíváme na okolnosti těchto srážek, můžeme z dat DPP vyčíst, že v roce 2022 docházelo ke srážkám převážně mimo přechod (viz Obrázek 2).



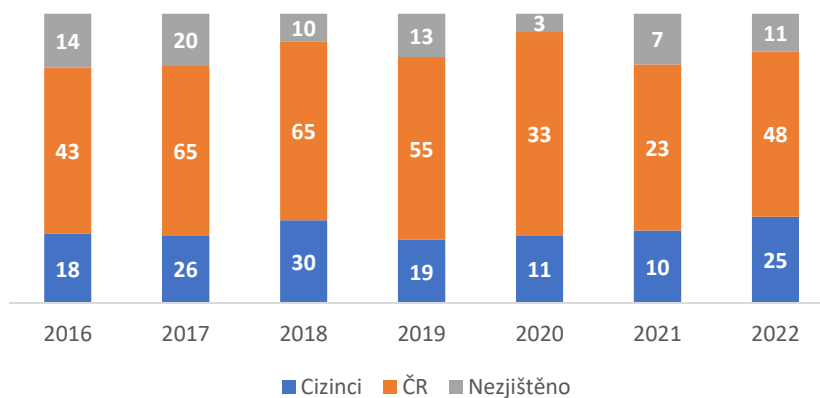
Obrázek 2 – místa srážky chodce s tramvají v roce 2022, data převzata (DPP, 2023)

Jedním z faktorů srážky se také zdá být občanství chodce, neboť cizinci navštěvující Českou republiku nemusí být dostatečně obeznámeni s tramvajovým provozem a pravidly silničního provozu (viz Obrázek 3).



Obrázek 3 – občanství sražených chodců tramvaji v roce 2022, data převzata (DPP, 2023)

V meziročním měřítku podíl cizinců na těchto srážkách roste, což je patrné na následujícím grafu (Obrázek 4).



Obrázek 4 – počet a poměr občanství chodců sražených tramvaji v letech 2016-2022, data převzata (DPP, 2023)

Ke všem výše uvedeným datům v této kapitole je nutné zdůraznit, že se jedná pouze o data DPP a ne záznamy pro celou Českou republiku, přesto jsou dobrým demonstrantem vývoje srážek tramvají s chodci mezi roky 2016-2020 (potažmo vývoj MU v letech 2008-2018).

3.1.2 Poranění při dopravních nehodách

Statistiky o dopravních nehodách pocházejí především z policejních záznamů, a i tyto statistiky mají tendenci podhodnocovat reálnou situaci na silnicích. Data tohoto typu se také dají získávat z lékařských záznamů, propojení těchto databází by bylo velkým přínosem pro studium dopravních nehod nejen v tramvajové dopravě.

V roce 2015 měla pouze jedna země (Francie) v Evropě specifickou databázi nehod tramvají na národní úrovni, zatímco na evropské úrovni taková databáze neexistovala. Některé země jako je Německo nebo Švýcarsko, zahrnují nehody tramvají do svých národních databází nehod v silničním provozu, které jsou zaštitěny policií. Na městských úrovních obvykle shromažďují údaje o nehodách tramvají jejich provozovatelé a zveřejňují je v podobě ročních zpráv, obdobně jako DPP (Lackner, 2022).

Pro klasifikaci zranění se užívají dvě kategorie: dočasné postižení a trvalé postižení. Dočasné postižení lze definovat jako zhoršení duševního nebo fyzického stavu jedince, které jedince omezuje ve standardním fungování, ale je možné zotavení. Trvalé postižení lze vysvětlit jako psychickou či fyzickou újmu jedince, která nemá šanci na zotavení a má vliv na standardní fungování jedince. Trvá-li dočasné postižení déle jak 1 rok lze tento stav klasifikovat jako dlouhodobě nepříznivý. K vyhodnocení následků dochází až za podmínky stabilizovaného stavu zraněného (Másilková, 2017)

Nejčastěji postiženou částí těla při účasti jedince na dopravní nehodě je hlava (Špírk, 2021). V lékařských záznamech tak můžeme pozorovat nejčastější diagnózu v podobě otřesu mozku. Jak již bylo zmíněno chodci jsou při dopravních nehodách takřka nechráněni, a tak ve velkém množství případů dopravních nehod končí se závažnými zraněními a v některých případech končí i smrtí (Dhondt, 2013).

Celkové údaje o riziku nehod ukazují, že systémy tramvajové dopravy jsou relativně bezpečné ve srovnání s jinými druhy dopravy (Guerrieri, 2018). Závažnost zranění chodců je však vyšší u nehod s tramvajemi než u nehod s jinými motorovými vozidly, jak zmiňuje několik studií včetně Gaca (2021) a dalších. Zranění chodce může vzniknout při několika událostech, a to od nárazu tramvaje samotné, přes následný pád na zem až po případné přejetí chodce tramvají. Lidské faktory jako je věk, pohlaví a tělesná konstituce mohou hrát při závažnosti zranění také svou roli (Lackner, 2022).

3.1.2.1 Prevence srážky chodce s tramvají

Jedním z nejefektivnějších nástrojů prevence srážky chodce s tramvají je edukace chodců. Do takové edukace se zapojil i DPP, který spustil bezpečnostní kampaň „Neskákej mi pod kola“. Součástí kampaně jsou nejen polepy tramvají, ale také stejnojmenné webové stránky. Na webových stránkách je možné nalézt jednotlivé statistiky, zjednodušené poučky a také odstrašující videa. Kampaň vznikla ve spolupráci s BESIPEM (bezpečnost silničního provozu ČR), Policií české republiky, Pražskou integrovanou dopravou a Portálem hlavního města Prahy (DPP, 2019).

3.1.3 Tramvaje provozované DPP

Mezi tramvajové vozy DPP využívané k přepravě osob v Praze patří Tatra T3, Tatra KT8D5, Škoda 14T a Škoda 15T (viz *Obrázek 5-8*). V následující tabulce je možné nahlédnout jejich technickým specifikacím.

	T3	KT8D5	14T	15T
Výrobce	ČKD Praha	ČKD Praha	Škoda Transportation s.r.o.	Škoda Transportation s.r.o.
Délka	14,5 m (bez spráhel)	30,3 m	30,2 m	31,4 m (3članková)
Šířka	2,5 m	2,48 m	2,46 m	2,46 m
Hmotnost vozu	16 000 kg	38 000 kg	38 300 kg	42 000 kg
Počet míst k sezení/stání	31/71	54/177	69/210	60/119
Maximální rychlost	65 km/h	65 km/h	60 km/h	60 km/h (elektronicky omezená)

Tabulka 3 – technické údaje tramvají T3, KT8D5, 14T a 15T (Redakce portálu, 2011)



Obrázek 5 – Tatra T3, převzato (DPP)



Obrázek 6 – Tatra KT8D5, převzato (DPP)



Obrázek 7 – Škoda 14T, převzato (DPP)



Obrázek 8 – Škoda 15T, převzato (DPP)

3.2 Aspekty srážky tramvaje s chodcem

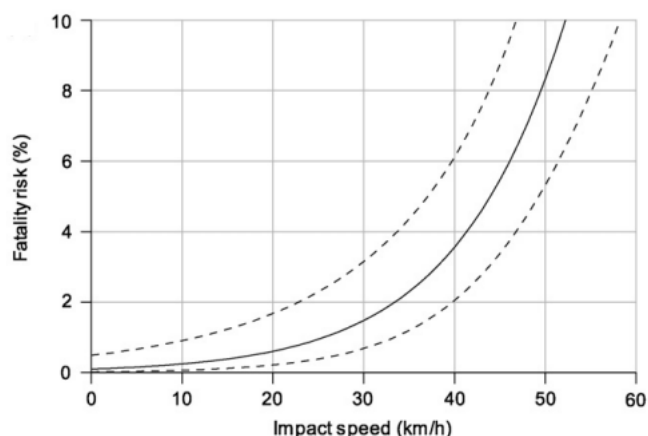
Jak již bylo zmíněno, chodci patří mezi nejzranitelnější účastníky silničního provozu při dopravních nehodách. Při srážce chodce s vozidlem může náraz způsobit chodci těžká zranění až smrt. Během posledních let tedy dochází k studiu bezpečnosti chodců, kteří jsou účastníky silničního provozu, a to i v rámci Evropské unie. Na téma srážky tramvaje s chodci vzniklo několik studií, avšak v Evropě se k tomuto tématu

dostáváme až v rámci posledních let. Pro studium těchto srážek se nabízí využití již velmi rozvinutého automobilového průmyslu, který má za sebou velkou řadu studií. Jako jsou například studie Ashtona et al. (1977), Walze et al. (1986) a z novějších například studie Cuerdena et al. (2007) a studie Kohliho a Chadha (2020). Snahou tedy je využít tyto systémy pro studium střetů tramvají s chodci, případně nalézt specifické postupy pro řešení těchto kolizí.

3.2.1 Rychlost tramvaje

Stejně jako při srážce s motorovým vozidlem hraje pro závažnost jeho zranění velkou roli rychlost vozidla. V tomto kontextu je dobré tedy mluvit o otázce „bezpečné“ rychlosti pro provoz tramvajové dopravy v daných exponovaných úsecích. Studium srážek chodců s tramvají může mít za následek nalezení této optimální rychlosti, která by mohla sloužit jako preventivní aspekt bezpečnosti chodců. Tato rychlost by poté samozřejmě měla být podrobena ekonomické otázce přepravy cestujících tramvajové dopravy, pro které musí být stále atraktivní hromadnou dopravu využívat. Důležitost rychlosti tramvají je dána přímou souvislostí vztahu rychlosti vozidla a fyzickými následky impaktu s chodcem. Tyto údaje lze získávat z kamerových záznamů a lékařských zpráv (Gaca, 2021).

Výsledky studií vlivu rychlosti osobního automobilu na pravděpodobnosti rizika úmrtí chodců vykazují silnou závislost rychlosti nárazu, kdy riziko úmrtí při rychlosti 50 km/h je více než dvakrát vyšší než riziko při rychlosti 40 km/h a více než pětkrát vyšší než riziko při rychlosti 30 km/h (viz *Obrázek 9*). Přerušované čáry na obrázku naznačují přibližně 95% meze spolehlivosti. Tyto kritéria jsou dobrým argumentem pro zavádění tzv. „třicítkových“ zón v rušnějších částech města, neboť při nárazu rychlostí menší než 30 km/h je pravděpodobnost úmrtí pouze 5 %. Do zkoumání tohoto vztahu vstupují ovšem další faktory ovlivňující riziko úmrtí nebo vážného zranění, jako je fyzická konstituce chodce a typ auta, takže i tyto data se mohou v individuálních situacích lišit a reprezentují pouze obecně danou situaci (Gaca, 2021).



Obrázek 9 – závislost rizika úmrtí na rychlosti vozidla při srážce chodce s osobním automobilem, převzato (Rosén, 2009)

Podobných údajů o tramvajích pohybujících se v Českém dopravním provozu je bohužel nedostatek. Uvažujeme-li riziko smrti v případě sražení chodce tramvají není graf pro tuto situaci zcela použitelný, neboť se jedná o nehodu těžkého vozidla se zranitelným účastníkem silničního provozu. V případě srážky „tramvaj-chodec“ je vhodné se věnovat případům, kdy ke kontaktům s chodci dochází s větší četností. Konflikt mezi chodcem a tramvají je nejvýraznější na místech, kde se chodci pohybují v blízkosti tramvaje nebo přecházejí koleje. Tím jsou zejména místa v okolí tramvajových zastávek, kde se tramvaj zpravidla pohybuje při nižších rychlostech, a to v důsledku brždění tramvaje do zastávky nebo jejího rozjezdu.

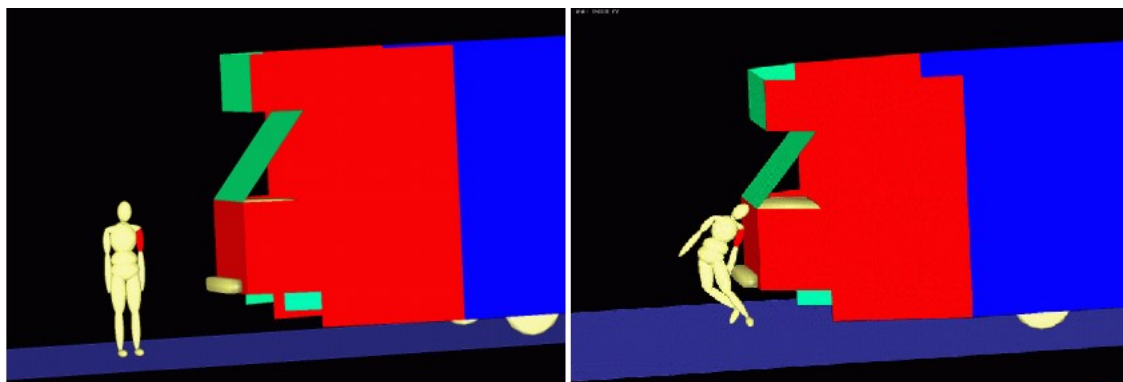
3.2.2 Čelo tramvaje

Důležitým aspektem mimo rychlosti pohybu tramvaje je samozřejmě také vývoj a zdokonalování bezpečnostních technologií vozidel ze strany výrobců, a to jak v podobě softwarových systémů, tak designu karoserie. Úprava přední části (čela) tramvaje totiž může zmírnit mohutnost primárního impaktu s tramvají a změnit okolnosti dopadu chodce na zem, tedy sekundárního impaktu (dopadu na zem či jiný předmět) (Lopot, 2019).

Dalším z aspektů při srážce chodce s tramvají je konstrukce předních částí tramvají, neboť materiály, ze kterého jsou vyráběny, tvoří deformační zónu při této kolizi. Pokud se v této oblasti nacházejí pevné materiály, v nepříznivé výšce například hlavy, může

dojít k závažnějším poraněním chodce. Mimo užitých materiálů se zdá být důležitá i celková geometrie přední části tramvaje. Nesmíme také opomenout, že jedním z úkolů přední části tramvaje je ochrana řidiče před srážkou s ostatními účastníky silničního provozu (zejména automobily). V ideálním případě by tedy čelo tramvaje mělo při kolizi chránit řidiče tramvaje v silničním provozu, při případné srážce s chodcem být co nejbezpečnější a jeho konstrukce by měla být ekonomicky přijatelná.

Studie Grzebieta a Rechnitzera (2000) ukázala, že některá čela tramvají v Melbourne jsou zbytečně agresivní vůči ostatním účastníkům silničního provozu, a to i při nízkých rychlostech. K tomuto závěru byli schopni dojít za pomoci programu MADYMO (viz *Obrázek 10*), který označili za dobrý nástroj nápomocný pro snížení rizika poranění při kolizích. V případě nárazu s chodcem demonstrovali, že změna v materiálu čela jedné z tramvají pomohla snížit zranění hlavy na únosnou míru. Poukázali také na to, že změny ve prospěch bezpečnosti srážky s automobilem mohou vést k rozporu s bezpečností při střetu s chodcem. Článek tedy poukazuje na důležitost inženýrské práce na konstrukci bezpečných čel tramvají.



Obrázek 10 – boční srážka chodce s tramvají v programu MADYMO, převzato (Bartlett, 1999)

3.2.3 Zábrazdná dráha tramvaje

K problematice brždění tramvajových vozidel se vztahují právní předpisy České republiky tvořené zákony a vyhláškami. Dále se k tomuto tématu vztahují technické normy a vnitřní předpisy jednotlivých dopravců.

Z předpisů plyne, že tramvajová vozidla by měla disponovat brzdnými systémy zajišťující následující režimy brždění:

- Provozní
- Zajišťovací
- Nouzové
- Záchranné

Úkolem provozního brždění je zastavit vozidlo se zátěží do 0,5 t s minimálním středním zpomalením $1,12 \text{ m/s}^2$.

Součástí brzdného systému také musí být brzda, která je nezávislá na trakčním napětí a při výpadku provozní brzdy, je schopna nahradit její funkci se stejnými požadavky jako na brzdu provozní.

Zajišťovací brzda musí zajistit vozidlo při maximálním zatížení na největším sklonu tratě, pro kterou je vozidlo konstruováno.

Funkcí nouzové brzdy je zastavit vozidlo se zatížením 0,5 t se středním zpomalením $2,3 \text{ m/s}^2$ a ovládání této brzdy musí být uskutečňováno stejným prvkem řidiče jako brzda provozní.

Záchranná brzda má stejnou funkci jako brzda nouzová, její ovládací prvek však musí být v řídicím stanovišti pro řidiče a minimálně ještě jeden ovládací prvek musí být v prostoru pro cestující. Ovládací prvky této brzdy musejí být zabezpečeny proti nechtěnému spuštění (Kocourek, 2015).

K délce maximální zábrzdě vzdálenosti při využití jednotlivých brzdných systémů se vyjadřuje technická norma ČSN 28 1300 a ČSN EN 13452-1. ČSN 28 1300 udává hodnoty pro vztah vzdálenosti a rychlosti $40 \text{ km/h} \pm 10 \%$ (viz *Tabulka 4*).

Počáteční rychlost [km/h]	Maximální zábrzdě vzdálenost brzdového systému [m]	
	Provozní a zajišťovací	Nouzový a záchranný
36	44,64	21,74
37	47,16	22,96
38	49,74	24,22
39	52,39	25,51
40	55,11	26,84
41	57,9	28,2

42	60,73	29,59
43	63,69	31,01
44	66,69	32,47

Tabulka 4 – maximální zábrzdě dráhy pro rychlosti 40 km/h ± 10 %, data převzata (Kocourek, 2015)

Teoreticky se zábrzdě dráha dá vypočítat z následujícího vztahu, za předpokladu:

- že je tramvaj na přímé, vodorovné a suché koleji
- během aktivační doby brzdých systémů jede tramvaj konstantní rychlostí
- po aktivační době brzdí tramvaj konstantním zpomalením

$$s = v_0 \cdot t_a + \frac{v_0^2}{2a}$$

kde

s ... zábrzdě dráha [m]

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

t_a ... aktivační doba [s]

a ... zpomalení [$m \cdot s^{-2}$]

Pro popis zatížení tramvajových vozidel se používá zatížení EL E, představující plně vybavený tramvajový vůz, a EL 6, představující plně vybavený vůz obsazený 6 stojícími cestujícími na 1 m². Požadavky na tramvaje užívané hromadnou dopravou plynou dále také z normy ČSN EN 13452-1:

- Provozní brždění využívá minimální zpomalení 0-1,2 m/s²
- Záchranné brždění využívá minimální zpomalení 2.8 m/s²
- Zajišťovací brzda musí vydržet zatížení EL 6 s maximálním sklonem tratě 8 % po dobu 1 hodiny (Kocourek, 2015)

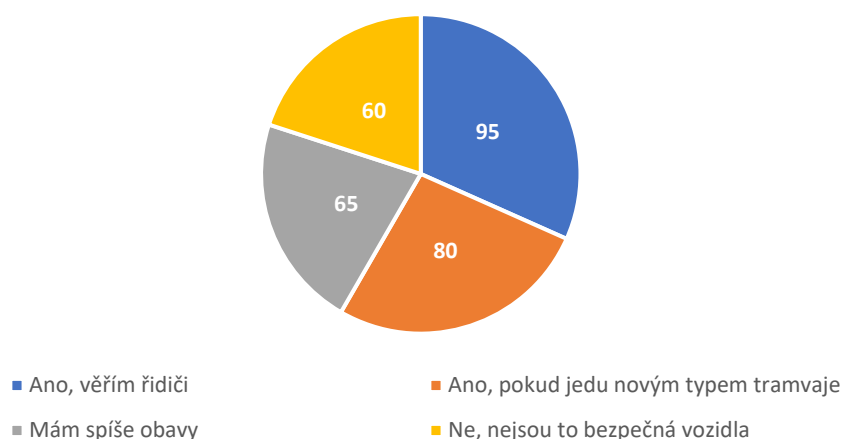
Vnitřní normy dopravců bývají v mnoha případech přísnější než tyto technické normy (viz Tabulka 5).

Předpis	Maximální zábrzdná vzdálenost brzdového systému [m]	
	Provozní/zajišťovací	Nouzový/záchranný
Požadované zábrzdné vzdálenosti dle normy ČSN 28 1300	55,11	26,84
Požadované zábrzdné vzdálenosti dle normy ČSN EN 13452-1	67,99	31,44
Požadované zábrzdné vzdálenosti dle vnitropodnikového předpisu DPP a. s.	54,6	26,8

Tabulka 5 – porovnání maximálních zábrzdných drah v rámci předpisů, data převzata (Kocourek, 2015)

Zpomalení tramvaje má vliv na dráhu, kterou tramvaj během brždění urazí. Délka této dráhy je ohrožujícím faktorem pro ostatní účastníky silničního provozu, a to zejména chodce, kteří se pohybují v blízkosti tramvají.

Zpomalení tramvaje ovšem tvoří bezpečnostní riziko i z pohledu cestujících v tramvaji (obzvláště stojícím). Skupová (2012) se v rámci své práce zabývala stanovisky cestujících využívající tramvaje na jejich obavy při využívání tramvaje (viz Obrázek 11).



Obrázek 11 – odpovědi Brněnské populace na otázku, zda se cítí bezpečně v tramvaji, data převzata (Skupová, 2012)

Jedním ze zajímavých poznatků práce je také bezpečné zpomalení pro stojícího cestujícího. Jeho hodnotou stanovila okolo 3 m/s^2 .

3.2.4 Psychologické aspekty

Většina lidí věří, že pravděpodobnost, že se v budoucnu setkají s negativními událostmi je nižší než u ostatních lidí. Tato víra byla nazývána Weinsteinem (1980) nerealistickým optimismem. Vnímání rizika může ovlivnit chování účastníků provozu a může souviset s tím, jak lidé vnímají bezpečnostní doporučení.

Ve studii Castanierové a dalších (2012) pozorovali globálně nízké vnímané riziko nehody pro sebe i pro ostatní. Toto pozorování může být způsobeno nízkými rychlostmi tramvají a obezřetnou jízdou řidičů tramvají, které vedou účastníky silničního provozu k podceňování rizika střetu s tramvají. Z praktického hlediska je důležité zvýšit komunikaci o přednosti tramvají a celkově edukovat o dopravních předpisech.

Na „druhou stranu“ se autoři studie Naznin a další (2018), v případě srážky chodce s tramvají, zaměřili na řidiče tramvají z Melbourne. Ty se zabývali jejich vnímáním bezpečnosti silničního provozu. Jedním z jejich zjištění bylo, že téměř všichni řidiči vyjádřili názor, že neexistuje žádný bezpečný úsek na jejich trase. Toto vnímání jim pomáhá se soustředit na všechny úseky trasy, aby se vyhnuli nehodě. Na všech typech zastávek byl zjištěn od řidičů častý problém, a to nebezpečné chování cestujících a chodců pohybujících se v tramvajových zastávkách. Tramvajoví řidiči uvedli, že mnoho cestujících například vystupuje vzadu za tramvají, aby přešli vozovku, což představuje vážné riziko srážky s přijíždějící tramvají z opačného směru.

Řidiči se v běžné praxi musí setkávat s nevyzpytatelným chováním jak cestujících, tak chodců přecházející kolejiště.

3.3 Biomechanika srážky chodce s tramvají

Ke srážce chodce s tramvají může dojít v různých případech postavení chodce. Pro většinu studií je však vhodné se omezit pouze na postavení chodce čelné a boční. Kinematická analýza průběhu srážky dvou těles se zabývá časovými úseky před, během a po jejich vzájemném kontaktu. Je důležitá pro pochopení mechanické a biomechanické odezvy na náraz (Vangi, 2020).

Při zjednodušení srážky chodce s tramvají můžeme identifikovat 3 fáze:

- Fáze primárního impaktu: kontakt chodce s tramvají, silové působení tramvaje na chodce
- Fáze „letová“: po konci silového působení tramvaje před dopadem
- Fáze sekundárního impaktu: náraz chodce na okolní prostředí (zem či jiná pevná překážka v trajektorii chodce) (viz *Obrázek 12*)

Jednotlivé fáze se postupně ovlivňují, je tedy potřeba věnovat pozornost celému průběhu události nehody, a to od primárního impaktu, až po sekundární. První fáze srážky může významně ovlivnit fázi poslední. Vhodný design čela tramvaje může například chodce nadnést a zmírnit tak následky sekundárního impaktu jehož zdravotní následky bývají pro chodce větší než impakt primární. V opačném případě může nevhodný design tohoto čela způsobit „sklápňý“ efekt (lze vidět na *Obrázek 12* vlevo a vpravo dole) a srazit chodce přímo pod kola tramvaje (Lopot, 2019).



Obrázek 12 – začátek 1. fáze (vlevo nahoře), průběh 1. fáze (vpravo nahoře), začátek 2. fáze (vlevo dole), 3. fáze (vpravo dole), převzato (Lopot, 2019)

Dle Tomšovského a dalších autorů (2022) je pro ilustraci kinematického popisu bočního nárazu chodce výhodné fázi kontaktu s tramvají popsat za následujících předpokladů:

- Boční náraz chodec-tramvaj je symetrická, tedy probíhá v jedné rovině (kolmo na sagitální rovinu chodce)
- Počáteční rychlost chodce je nulová
- Srážka je neelastická (hybnost systému tramvaj-chodec je zachována a mění se vnitřní kinetická energie)
- Po vypuštění (po ztrátě kontaktu chodce s tramvají) považujeme chodce za hmotný bod a uvažují se pouze posuvné pohyby (rotační jsou zanedbávány)
- Srážka začíná v okamžiku prvního kontaktu chodce s tramvají a končí při začátku brždění tramvaje
- Země je rovná a tření mezi nohama chodce a zemí je zanedbatelné (stejně jako odpor vzduchu)

Pro výpočet ztráty vnitřní kinetické energie při fázi impaktu, je v tomto případě vhodné využít rovnice zachování hybnosti, koeficient restituce (rázu) a přeměnu vnitřní kinetické energie. Obecná rovnice zachování hybnosti pro nepružnou srážku

$$p_1 + p_2 = p'_1 + p'_2$$

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v'_1 + m_2 \cdot v'_2$$

kde

$p_1, p'_1 \dots$ je hybnost chodce před a po srážce v jednotkách $[kg \cdot m \cdot s^{-1}]$

$p_2, p'_2 \dots$ je hybnost tramvaje před a po srážce v jednotkách $[kg \cdot m \cdot s^{-1}]$

$m_1, m_2 \dots$ je hmotnost figuríny a hmotnost tramvaje v $[kg]$

$v_1, v'_1 \dots$ je rychlost chodce před a po srážce $[m \cdot s^{-1}]$

$v_2, v'_2 \dots$ je rychlost tramvaje před a po srážce $[m \cdot s^{-1}]$

Výsledné rychlosti v'_1, v'_2 se dají ze vztahu vyjádřit takto

$$v'_1 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_2 v'_2}{m_1} \quad \text{a} \quad v'_2 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_1 v'_1}{m_2}$$

Koeficient restituce se poté spočítá takto

$$e = \frac{|\text{relativní rychlost po srážce}|}{|\text{relativní rychlost před srážkou}|}$$

Pro tento případ tedy

$$e = \frac{|v'_2 - v'_1|}{|v_1 - v_2|}$$

kde

e ... je bezrozměrná veličina nabývající hodnoty z intervalu $[0; 1]$

Výsledné rychlosti se dají dle vztahu pro hybnost a koeficientu restituce vyjádřit takto (postup uveden pro v'_1 , obdobně by došlo k odvození v'_2)

$$v'_1 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_2 v'_2}{m_1}$$

$$v'_2 = e(v_1 - v_2) + v'_1$$

$$v'_1 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 - m_2 (e(v_1 - v_2) + v'_1)}{m_1} =$$

$$= \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1} - \frac{em_2(v_1 - v_2) + m_2 v'_1}{m_1}$$

$$v'_1 + \frac{v'_1 m_2}{m_1} = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1} - \frac{em_2(v_1 - v_2)}{m_1}$$

$$v'_1 \frac{m_1 + m_2}{m_1} = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1} - \frac{em_2(v_1 - v_2)}{m_1}$$

$$v'_1 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} - \frac{em_2(v_1 - v_2)}{m_1 + m_2}$$

$$v'_1 = v_1 \frac{m_1 - m_2 e}{m_1 + m_2} + v_2 \frac{m_2(1 + e)}{m_1 + m_2}$$

$$v'_2 = v_1 \frac{m_1(1 + e)}{m_1 + m_2} + v_2 \frac{m_2 - m_1 e}{m_1 + m_2}$$

Změna vnitřní kinetické energie lze obecně zapsat jako rozdíl vnitřní kinetické energie soustavy chodec-tramvaj před a po srážce, tedy

$$\Delta E_k = E_k - E'_k$$

$$\Delta E_k = \left(\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \right) - \left(\frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \right)$$

s využitím předpokladu, že počáteční rychlost chodce je nulová (tedy $v_1 = 0$) a využitím vztahu pro koeficient restituce (tedy $e = \frac{v_2'}{v_2}$), lze předchozí vztahy upravit následovně

$$v_1' = v_2 \frac{m_2(1+e)}{m_1+m_2} \quad v_2' = v_2 \frac{m_2 - m_1 e}{m_1 + m_2}$$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} (m_2 v_2^2 - m_1 v_1'^2 - m_2 v_2'^2)$$

$$\begin{aligned} \Delta E_k &= \frac{1}{2} \left(m_2 v_2^2 - m_1 v_2^2 \frac{m_2^2(1+e)^2}{(m_1+m_2)^2} - m_2 v_2^2 \frac{(m_2 - m_1 e)^2}{(m_1+m_2)^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} v_2^2 \left(m_2 - m_1 \frac{m_2^2(1+2e+e^2)}{(m_1+m_2)^2} - m_2 \frac{m_2^2 - 2m_2 m_1 e + m_1^2 e^2}{(m_1+m_2)^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} v_2^2 \left(\frac{m_1^2 m_2 + 2m_1 m_2^2 + m_2^3 - m_1 m_2^2(1+2e+e^2) - m_2^3 + 2em_1 m_2^2 - e^2 m_1^2 m_2}{(m_1+m_2)^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} v_2^2 \left(\frac{m_1^2 m_2(1-e^2) + m_1 m_2^2(1-e^2)}{(m_1+m_2)^2} \right) = \frac{1}{2} v_2^2 \left(\frac{(1-e^2)(m_1^2 m_2 + m_1 m_2^2)}{(m_1+m_2)^2} \right) \\ &= \frac{1}{2} v_2^2 (1-e^2) \frac{m_1 m_2 (m_1+m_2)}{(m_1+m_2)^2} \end{aligned}$$

tedy

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_2^2 \cdot (1 - e^2)$$

Koeficient restituce se dle autorů zdá být užitečným parametrem pro popis ztráty vnitřní kinetické energie během srážky, která by mohla vést k deformaci karoserie a ke zranění chodce. Tento ilustrační popis může být využíván k popisu příčiny a závažnosti zranění chodce.

Ve výše zmíněném vzorci figuruje mimo jiné hmotnost tramvaje, která například u tramvaje Škoda 15T v podobě tříčlankové soupravy činí okolo 43 000 kg, kterých v této

tramvaji může být přepravováno až 286 (2023). Ze vzorce je také patrná souvislost s počáteční rychlostí tramvaje, která zde figuruje jako činitel ve své druhé mocnině (je také součástí definice koeficientu restituce).

3.4 Biomechanika poranění

Poranění lze definovat jako zatížení tkáně, které překročí tolerovanou mez selhání. Tuto zátěž chápeme jako součet sil a momentů působících na tělo nebo jeho tkáňovou strukturu. Když je materiál zatížen, podléhá deformaci, protože vazby atomů, ze kterých je materiál složen, se ohýbají, natahují nebo stlačují. Protože dochází k narušení těchto vazeb, atomy mají tendenci se navracet do původních poloh, čímž vzniká napětí uvnitř materiálu. Napětí (mechanické) uvnitř materiálu je měřítkem jeho schopnosti odolávat působící síle. Vyjádřit tento vztah lze vzorcem

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

kde

σ ... je mechanické napětí [Pa]

F ... působící síla [N]

S ... plocha kolmá na působící sílu [m^2]

Deformací rozumíme změnu tvaru materiálu vyjádřenou změnou hodnoty specifického rozměru materiálu a jeho původní hodnotou. Vyjádřeno vztahem

$$e = \frac{\Delta r}{r}$$

kde

e ... je deformace

Δr ... změna hodnot daného rozměru [v příslušných jednotkách]

r ... hodnota původního rozměru [v příslušných jednotkách]

Deformace je bezrozměrnou veličinou, často vyjadřovanou v procentech. K deformaci dochází mechanickým namáháním, a to různého typu: tahem, tlakem, ohybem, smykem či torzí. V případě, že se po odstranění síly materiál navrátí do původního tvaru, lze hovořit o pružné (elastické) deformaci, pokud tomu tak není a materiál se do původního stavu nevrátí, hovoříme o nepružné (plastické) deformaci (Bartlett, 1999).

3.4.1 Kritérium poranění hlavy

Biomechanická kritéria využívají matematických vzorců k určení míry poranění daného segmentu těla. Pro tyto výpočty využívají jednotlivé fyzikální vlastnosti okolností poranění. Uvádí také maximální únosné hodnoty pro přežití člověka (Kovanda, 2000).

Stupeň poranění se v literatuře nejčastěji určuje na základě mezinárodní stupnice AIS (Abbreviated Injury Scale), kde jednotlivé stupně se interpretují následovně:

- 0 – bez zranění
- 1 – lehká zranění
- 2 – střední zranění
- 3 – závažné zranění (život neohrožující)
- 4 – velmi závažné zranění (život ohrožující, přežití je pravděpodobné)
- 5 – kritické zranění (život ohrožující, přežití nejisté)
- 6 – maximální (smrtné úrazy, nelze přežít)
- 9 – dále nedefinováno (Kovanda, 2000)

Možná interpretace AIS na jednotlivých segmentech těla:

Stupeň	Hlava	Hrudník	Břicho/Pánev
1	Bolest, malátnost	Zlomenina (1 žebra)	Povrchové poranění
2	Bezvědomí 1 h, lineární zlomenina	Zlomenina hrudní kosti, 2-3 žeber	Poranění jater, ledvin/ zlomenina pánve
3	Bezvědomí 1-6 h, vpáčená zlomenina	Zlomenina více jak 4 žeber, pneumothorax	Velká poranění sleziny, ledvin

4	Bezvědomí 6-24 h, otevřená zlomenina	Možný kolaps hrudníku	Velká poranění jater (roztržení)/rozdrčená pánev
5	Bezvědomí více jak 24 h, velký hematom	Roztržení aorty	Roztržení ledvin, jater, otevřená rozdrčená pánev

Tabulka 6 – interpretace stupňů AIS v rámci hlavy, hrudníku a oblasti břicha/pánve, převzato (Stránská, 2019)

Pro poranění hlavy se využívá při testování vozidel kritérium HIC (Head Injury Criterion), které je dáno následujícím vzorcem

$$HIC = \max_{t_1, t_2} \left\{ \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \, dt \right)^{2,5} (t_2 - t_1) \right\}$$

kde

a ... výsledné zrychlení hlavy v [$g = 9,81 \, m \cdot s^{-2}$]

a je velikost výslednice zrychlení, tedy pokud značíme jednotlivé složky zrychlení v prostoru a_x, a_y, a_z

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

t_1, t_2 ... krajní hodnoty jednotlivých časových intervalů [ms] (Schmit, 2010)

Pro usnadnění výpočtů se při srážkách využívá HIC_{15} , pokud dojde ke kontaktu hlavy s vozidlem, a HIC_{36} , pokud nedojde ke kontaktu. Kde HIC_{15} je maximum z výše uvedené definice, ale pouze přes intervaly ($t_1; t_2$) délky 15 ms, obdobně HIC_{36} je maximum přes intervaly délky 36 ms (Rablau, 2016).

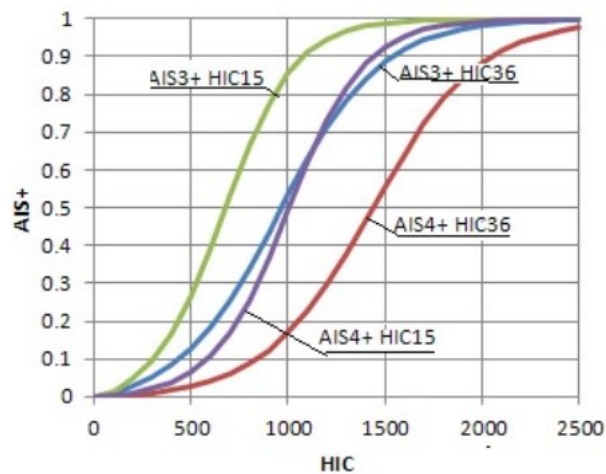
Parametr HIC neposkytuje přímou interpretaci zranění, vzniklo tak několik interpretací vůči stupnici AIS. Tyto interpretace nejsou jednotné a neexistují žádné všeobecně uznávané konverzní faktory (Mariotti, 2019). Studie se snaží spojit zrychlení hlavy s pravděpodobností smrtelnosti zranění. Parasad a Mertzem (2010) vyjádřili vztahy pro HIC_{15} a HIC_{36} a pravděpodobnost poranění AIS 4+ (pravděpodobnost poranění stupně 4 dle AIS) jako funkci hodnoty HIC. Pravděpodobnost AIS 4+ je asi 17 % pro

$HIC_{36} = 1000$ nebo $HIC_{15} = 700$. Pro $HIC_{36} = 1500$ nebo $HIC_{15} = 1100$ se tato pravděpodobnost zvyšuje cca na 55 % (viz Obrázek 13).

Tyto pravděpodobnosti vyjádřili autoři dle následujících vzorců (dle využívaného HIC)

$$p(AIS\ 4\ +) = \frac{1}{1 + e^{\frac{4,9+200}{HIC_{36}} - (0,00351 \cdot HIC_{36})}}$$

$$p(AIS\ 4\ +) = \frac{1}{1 + e^{\frac{4,9+140}{HIC_{15}} - (0,00501 \cdot HIC_{15})}}$$



Obrázek 13 – interpretace AIS 4+a AIS 3+ dle HIC_{36} a HIC_{15} , převzato (Prasad, 2010)

3.4.2. Aspekt zrychlení

V klasické mechanice je impuls (zn. J) integrálem aplikované síly F v časovém intervalu $(t_1; t_2)$. Protože je síla vektorovou veličinou, je i její impuls vektorovou veličinou (má tedy směr). Impuls aplikovaný na objekt vytváří ekvivalentní vektorovou změnu v jeho hybnosti (ve stejném směru). Jednotkou impulzu je newtonsekunda ($[N \cdot s]$).

Nenulová výsledná síla působící na těleso, způsobuje jeho zrychlení a změnu jeho rychlosti po dobu působení síly. Impuls interpretuje účinky působící síly, neboť zahrnuje i dobu jejího působení. Síla působící po delší dobu vyvolává větší změnu v hybnosti tělesa než stejná síla působící po kratší časový úsek. Naopak se dá také tvrdit, že malá síla

aplikovaná na těleso po delší dobu může vyvolat stejnou změnu v hybnosti (stejný impuls) jako větší síla aplikovaná krátce (Hibbeler, 2010).

Impuls je integrálem výsledné síly F přes časový interval $(t_1; t_2)$, pokud se nejedná o konstantní sílu (pak lze zjednodušit pouze jako $J = F \cdot (t_2 - t_1)$), tedy

$$J = \int_{t_1}^{t_2} F dt$$

Za předpokladu, že těleso nemění svou hmotnost (ve většině makroskopických scénářích, vztahuje se na srážku například tramvaje a chodce), můžeme danou sílu vyjádřit dle druhého Newtonova pohybového zákona a její impuls následovně

$$J = m \int_{t_1}^{t_2} a dt$$

Impuls síly tedy lze vyjádřit i jako funkci zrychlení přenásobenou hmotností tělesa. Při zkoumání uděleného impulsu při aplikované síle na těleso, je tedy zřejmé, že jedním z důležitých faktorů pro jeho výsledky je právě udělené zrychlení, i proto je podstatou definice kritéria HIC (Moradi, 2012).

4 Metodika práce

Diplomová práce byla realizována v rámci grantu: GRANT OPVVV výzva 26, ANALÝZA NEHODOVÝCH DĚJŮ CHODEC TRAMVAJ – VALIDACE SIMULAČNÍCH MODELŮ (2019-2022) katedry Anatomie a biomechaniky na Univerzitě Karlově FTVS vedeném doc. PaedR. Karlem Jelenem, Csc.

Práce zpracovává teoretické základy problematiky srážky chodce s tramvají. Tyto odborné informace byly vyhledávány pomocí vědeckých databází: Scopus, EBSCO, Web of Science, jednotlivé databáze českých i zahraničních univerzit a další. Využity byly jak elektronické zdroje, tak zdroje v tištěné podobě.

Praktická část práce se věnuje metodice zpracování dat o zrychlení jednotlivých segmentů těla figuríny při její srážce tramvají. Úkolem zpracování těchto dat je analyzovat průběh impaktního impulsu. Toto zpracování proběhlo za pomoci softwarových programů Microsoft Excel a Origin 2023.

4.1 Zpracování dat

Pro analýzu průběhu impaktního impulsu při srážce figuríny Jasti Hybrid III, byla využita data získaná při experimentálních měřeních, kdy tato figurína byla srážena v daných rychlostech (5, 10, 15 a 20 km/h) a to různými typy tramvajových vozidel provozovaných DPP. Jednalo se konkrétně o tramvaje typu: T3, KT8D5, 14T a 15T, jejichž specifikace jsou uvedeny v kapitole 3.1.3 *Tramvaje provozované DPP*. Měření byla provedena, jak pro scénář boční srážky, tak pro scénář čelního nárazu. Průběh experimentálního měření je patrný na (Obrázek 14).



Obrázek 14 – průběh boční srážky tramvaje T3 s figurínou, převzato (Plešková, 2022)

Analýza jako taková se omezuje pouze na boční náraz při rychlosti 15 km/h. Tyto okolnosti srážky byly vybrány kvůli četnosti bočních srážek v reálném provozu. Z důvodů náročnosti experimentů byla vybrána nejvyšší rychlost, při které bylo možné získat data z figuríny pro všechny typy tramvaje. Z tohoto důvodu byla vybrána rychlost 15 km/h.

Analýza průběhu impaktního impulsu byla provedena na základě dat o zrychlení, získaných z akcelerometrů figuríny. Pro tuto interpretaci byly vybrány akcelerometry umístěné v segmentech: hlava, hrudník a pánev figuríny Jasti Hybrid III. Tyto segmenty byly vybrány pro interpretaci nárazu aplikovaného na jednotlivé segmenty. Data byla vizuálně propojována s videografickým záznamem pořízeným vysokorychlostní kamerou, pro přesnější interpretaci naměřených dat.

Pro analýzu crash testů v automobilovém průmyslu se využívá pro poranění hlavy kritéria HIC (viz 3.4.1 *Kritérium poranění hlavy*), které má své interpretace v rámci poranění. Svou definicí je však úzce spjaté se samotným impaktním impulzem (viz 3.4.2. *Aspekt zrychlení*).

V rámci této práce je tedy zavedeno nové kritérium, využívané při vyhodnocování naměřených dat impaktů. Toto kritérium je využíváno jako parametr implementující HIC kritérium – PIIC (Parametr Implementing Injury Criterion). Tento parametr již nemůžeme chápat jako biomechanické kritérium, nýbrž jako nástroj pro interpretaci impaktního impulsu na jednotlivé části figuríny. Lze ho tedy chápat jako porovnávací kritérium mezi jednotlivými naměřenými daty z těžišť jednotlivých segmentů, kde pouze pro hlavu

bychom mohli mít i přímou interpretaci v podobě zranění (škála AIS). Pro ostatní segmenty ho lze také chápat jako jistý koeficient změny hybnosti (z definice impulzu síly, který je součástí definice PIIC/HIC), tedy i jako jistou změnu kinetické energie daného segmentu (viz 3.3 *Biomechanika srážky chodce s tramvají*).

Konkrétně bylo pro tyto srážky využito kritérium HIC_{15} . HIC_{15} bylo vybráno z důvodu přímé srážky figuríny s tramvají, při které tedy dojde ke kontaktu segmentů s impaktorem (tramvají). Toto kritérium je tedy dále v práci označováno pro hlavu jako HIC_{15} a pro hrudník a pánev jako PIIC, kde tyto parametry jsou oba definovány vzorcem pro HIC_{15} , tedy

$$PIIC = HIC_{15} = \max_{t_1, t_2} \left\{ \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right)^{2,5} (t_2 - t_1) \right\}$$

kde

a ... je zrychlení daného segmentu [$m \cdot s^{-2}$]

t_1, t_2 ... hodnoty časového intervalu při srážce [ms], kde $t_2 - t_1 = 15 ms$, daný vzorec tedy mohl být vyjádřen i takto

$$PIIC = \max_{t_1, t_2} \left\{ \left(\frac{1}{15} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right)^{2,5} \cdot 15 \right\}$$

5 Výsledky

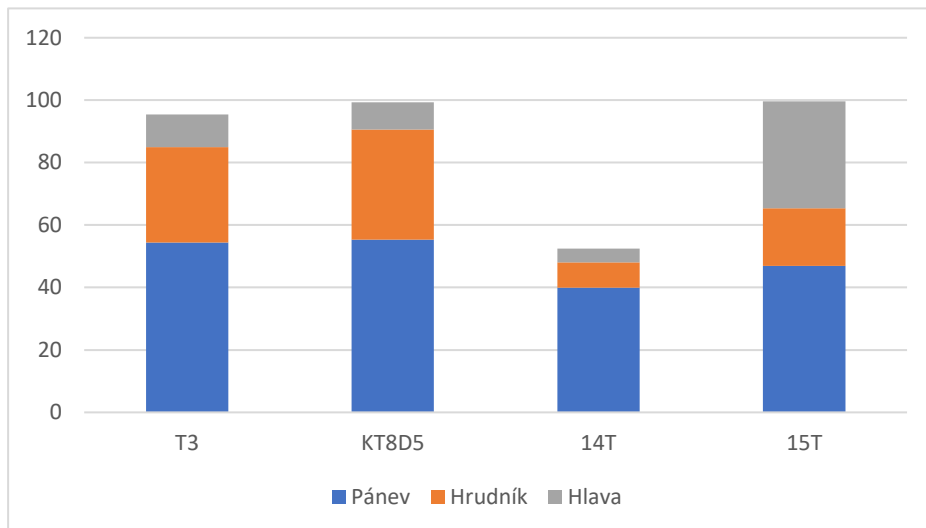
Následující *Tabulka 7* vyjadřuje vypočítané hodnoty PIIC pro hlavu, hrudník a pánev při sagitálních srážkách daných typů tramvají při rychlosti 15 km/h.

Typ tramvaje	Hodnoty PIIC			
	T3	KT8D5	14T	15T
Hlava	10,513	8,705	4,385	34,258
Hrudník	30,481	35,260	8,133	18,423
Pánev	54,452	55,357	39,929	46,954

Tabulka 7 – hodnoty PIIC při experimentálním měření v rychlosti 15 km/h

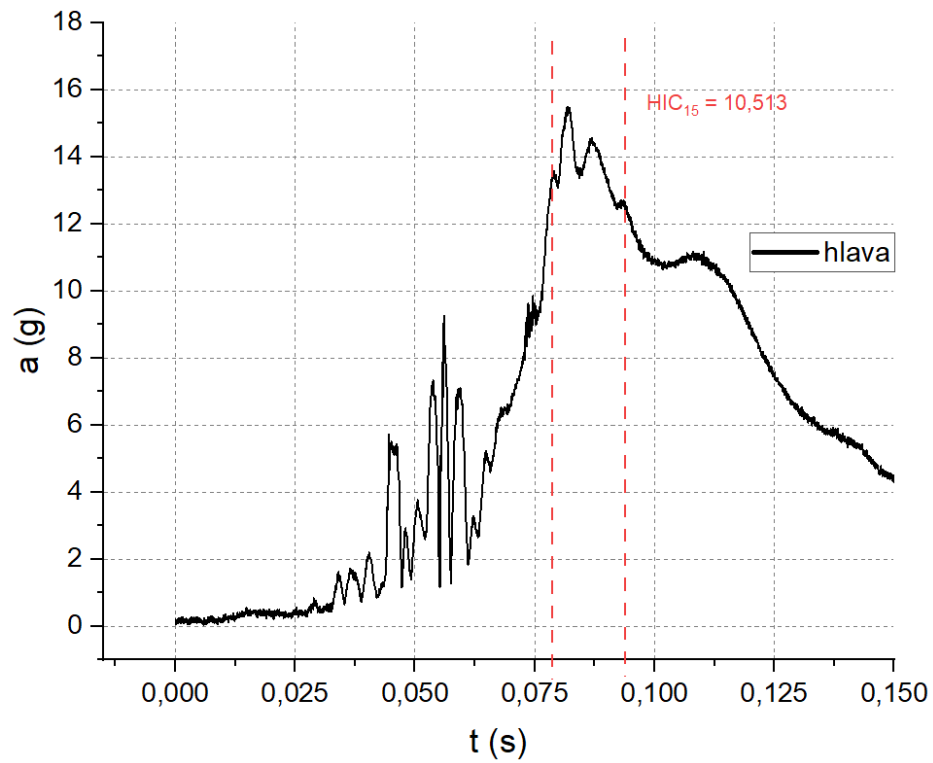
Z dané tabulky lze vyčíst, že hodnoty HIC_{15} jsou při těchto rychlostech pro poranění hlavy relativně bezpečné, neboť hranice pro AIS 4 je stanovena hrubě na $HIC_{15} = 700$. Porovnáním hodnot vypočítaných z jednotlivých segmentů, je patrné, který segment byl ovlivněn impaktním impulzem nejvíce. Globálně pro všechny typy tramvaje se stala pánev primárním segmentem, který sagitální srážka postihla. Z hodnot je taky zřejmé, že jednotlivé typy tramvají (konkrétně jejich konstrukce přední části) mají vliv na distribuci impaktního impulsu. Pokud se podíváme pouze na hodnoty HIC_{15} pro hlavu, je už z této tabulky čitelné, že hodnota pro typ 15T je skoro 8 krát větší než hodnota pro 14T přesto, že tyto tramvaje jsou obě jedny z nejnovějších typů využívaných DPP.

Pokud zavedeme něco jako kumulativní parametr PIIC těchto tří segmentů, můžeme říci, že se pohybuje pro tramvaje typu T3, KT8D5 a 15T okolo hranice 100 ($PIIC_{kum} = 100$) a pro tramvaj 14T je téměř o polovinu nižší (viz *Obrázek 15*). Fakt, že se hodnoty pohybují u většiny z typů tramvají okolo stejné hranice, můžeme interpretovat tak, že data ze zvolených segmentů dobře ilustrují podíl jednotlivých segmentů na impaktním impulzu a nedochází k větší „ztrátě“ informací o impulzu v ostatních segmentech figuríny. Je to také důvod pro bližší zkoumání scénáře s tramvají typu 14T, neboť i přesto, že PIIC nemá přímou souvislost se zraněním jedince, obdobně jako u HIC_{15} , je v našem zájmu aby jeho hodnota byla co nejnižší.

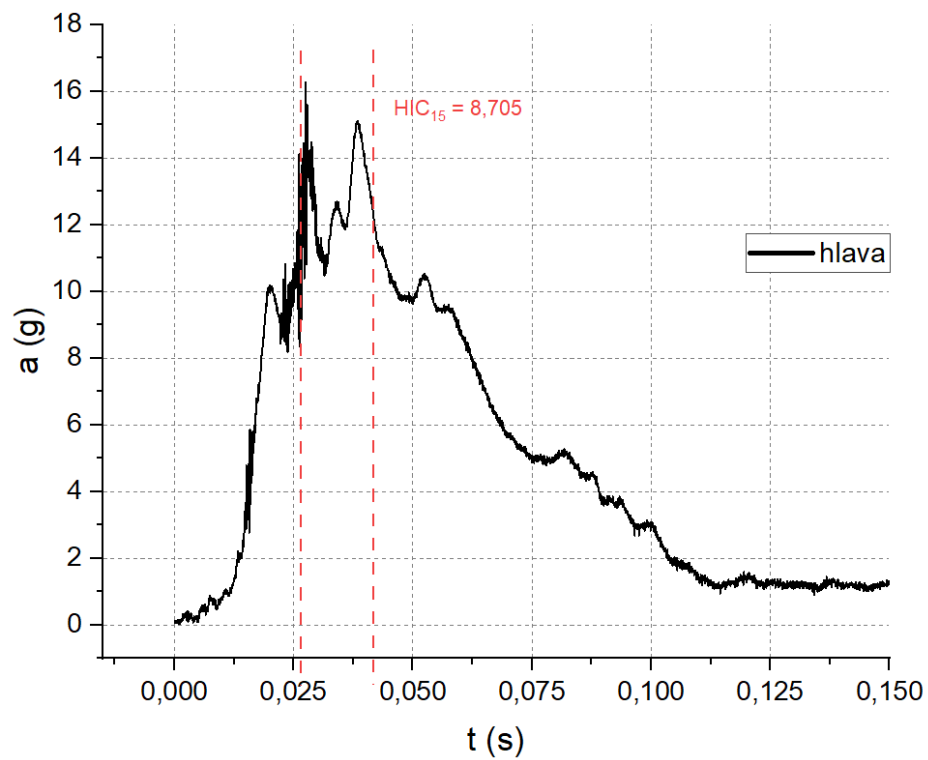


Obrázek 15 – ilustrace $PIIC_{kum}$

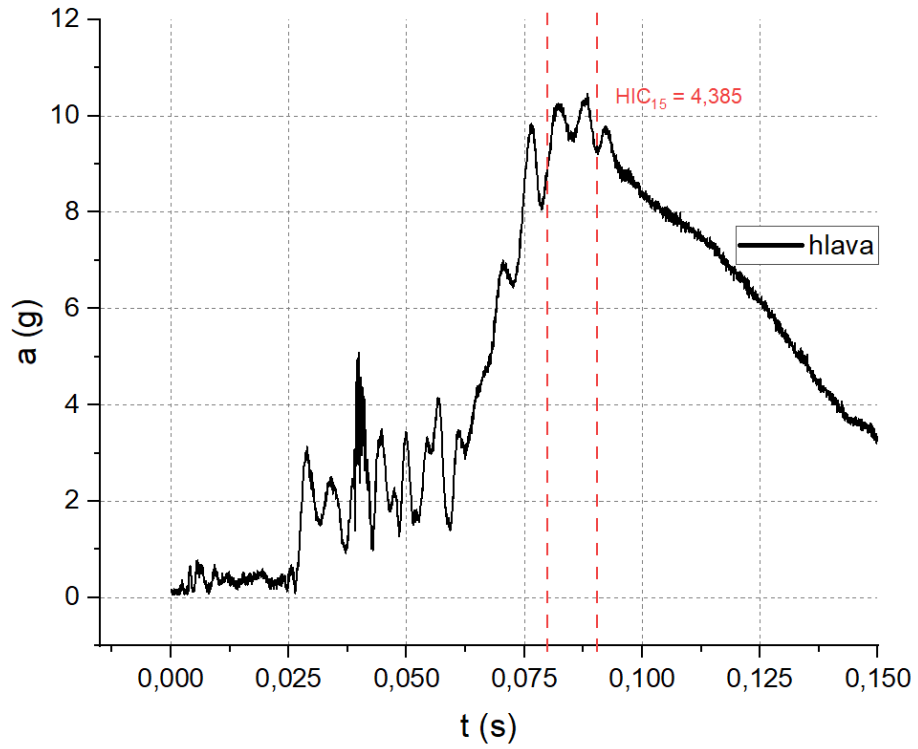
Z definice PIIC je zřejmé, že jedná-li se o jistý parametr maxima integrálu zrychlení daného segmentu, obsahuje daný interval maximální zrychlení udělené tomuto segmentu (v grafu viditelný jako „peak“). Tento fakt je interpretován na následujících grafech, které znázorňují data o zrychlení hlavy v závislosti na čase, při srážce různých typů tramvají. V grafech (Obrázek 16-19) je červeně graficky znázorněn interval, ze kterého je PIIC počítán (označen jako HIC_{15} , neboť se jedná o hlavu).



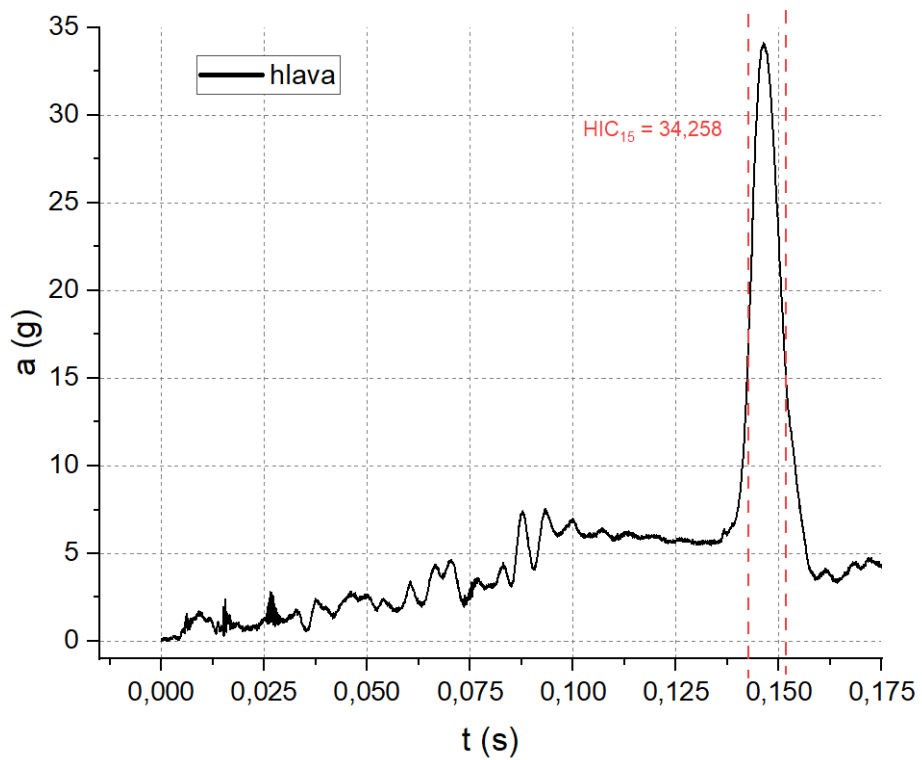
Obrázek 16 – graf závislosti zrychlení hlavy na čase při sagitální srážce tramvají T3



Obrázek 17 – graf závislosti zrychlení hlavy na čase při sagitální srážce tramvají KT8D5



Obrázek 18 – graf závislosti zrychlení hlavy na čase při sagitální srážce tramvají 14T



Obrázek 19 – graf závislosti zrychlení hlavy na čase při sagitální srážce tramvají 15T

Při analýze průběhu impaktního impulzu, je na místě zabývat se časovým údajem nástupu PIIC jednotlivých segmentů. Ty nám pomáhají ukotvit v časovém sledu událostí kdy k tomuto impulzu došlo. Jelikož je PIIC počítán pouze přes intervaly délky 15 ms podstatné je, kdy tyto intervaly začínají. *Tabulka 8* vyjadřuje jednotlivé nástupy PIIC pro jednotlivé segmenty při srážce jednotlivými tramvajemi. K časovým údajům je nutné dodat, že data o zrychlení začínají všechna od stejného referenčního počátku (jsou tedy vůči sobě synchronizována podle reálného průběhu srážky), posun nástupu PIIC je tedy vždy dán okolnostmi dané srážky (tvarem tramvaje, případně lehké nepřesnosti v umístování figuríny). Tento referenční bod v čase byl stanoven prvním dotykem figuríny s tramvají, který byl při bočních srážkách zpravidla v oblasti ruky levé horní končetiny figuríny.

Typ tramvaje	Čas nástupu PIIC [s]			
	T3	KT8D5	14T	15T
Hlava	0,078	0,027	0,080	0,142
Hrudník	0,053	0,018	0,039	0,060
Pánev	0,036	0,023	0,028	0,010

Tabulka 8 – čas nástupu PIIC při sagitální srážce jednotlivými typy tramvají

Posun těchto jednotlivých událostí byl již patrný na obrázcích výše (*Obrázek 16-19*). Sled nástupu PIIC jednotlivých segmentů by měl přibližně odpovídat časovým intervalům, při kterých byly jednotlivé segmenty v kontaktu s tramvají. Lze z nich tedy i vyčíst, který ze segmentů se dostal do kontaktu s tramvají dříve (pokud se tedy do kontaktu vůbec dostal). U tramvají T3, 14T a 15T došlo nejspíše nejdříve ke kontaktu s pávní, což teoreticky podporuje teorii, že pávněvní segment v porovnání s ostatními segmenty zaznamenal největší PIIC. U tramvaje KT8D5 došlo nejspíše ke krátkému sledu kontaktu s hrudníkem a poté pávní, kde pro hrudník bylo zaznamenáno v porovnání s ostatními typy tramvají nejvyšší PIIC (35,260). Uvedené pozorování je dále nutno analyzovat v rámci širšího kontextu okolností jednotlivých crash testů

V dalších kapitolách se tedy dále tato práce podrobněji zaměřuje na průběh srážek jednotlivých typů tramvají a spojení vizuálního záznamu s daty uvedenými výše.

5.1. Srážka s typem T3

Při kontrole záznamu z vysokorychlostní kamery při boční srážce figuríny tramvají T3 je patrné, že k prvnímu kontaktu s tramvají dochází přes horní končetinu v oblasti ruky. Tramvaj T3 má výrazný nárazník v místě stehna/boku figuríny. Jelikož je figurína pasivním účastníkem této kolize, její ruka neklade tramvaji téměř žádný odpor. Poté dochází ke kontaktu s oblastí pánve. Následně dochází ke zprostředkovanému kontaktu s hrudníkem připažením horní končetiny k tělu figuríny. Hlava se při srážce s tímto typem vozu nedostává do přímého kontaktu s čelem tramvaje. Průběh je znatelný na sekvenci obrázků (Obrázek 20).

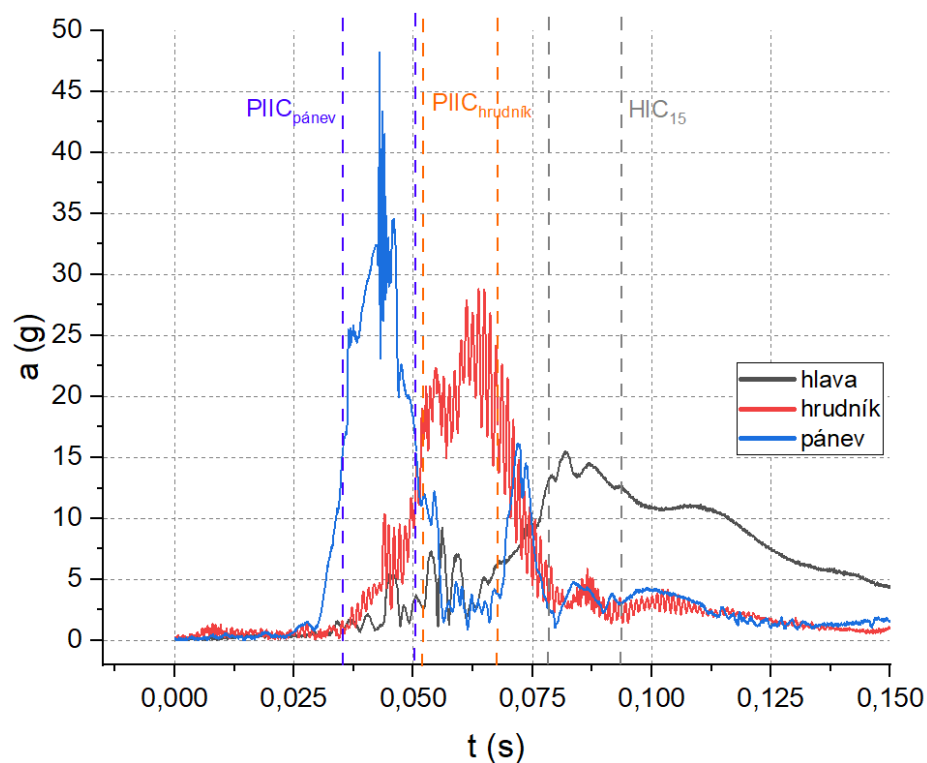


Obrázek 20 – sekvence srážky s tramvají T3, vlevo nahoře první kontakt s rukou, vpravo nahoře kontakt s pánví, vlevo dole kontakt s hrudníkem a vpravo dole unášení figuríny

Ke kontaktu s rukou dochází v referenčním počátečním čase 0 s. Kontakt s pánví je dle záznamu patrný cca v čase 0,036 s. K zprostředkovanému kontaktu, tedy k začátku zrychlení hrudníku dochází okolo 0,069 s, tento údaj se velice nepřesně určuje, neboť

není zcela zřejmé, v jakém čase dochází k překonání faktoru pružnosti horní končetiny. Hlava se za okolností této srážky nedostala do kontaktu s tramvají, její zrychlení je tedy přeneseno z ostatních segmentů těla, jimž bylo zrychlení v důsledku srážky předáno.

Stejnou situaci lze interpretovat pomocí dat o zrychlení v závislosti na čase a parametru PIIC. V následujícím grafu jsou barevně vyznačena data o zrychlení jednotlivých segmentů. Zvýrazněn je také korespondující barvou interval nástupu PIIC (Obrázek 21).



Obrázek 21 – jednotlivá zrychlení segmentů a jejich intervaly PIIC, při boční srážce figuríny s tramvají T3

Dle spočítaných dat nastal nejdříve interval PIIC pánve, a to v čase 0,036 s, poté interval PIIC hrudníku v čase 0,053 s a interval PIIC (HIC_{15}) hlavy v čase 0,078 s. Z těchto údajů lze rychle porovnat, že data pozorovaná z videozáznamu (hrubě odhadnutá) korespondují s daty naměřenými figurínou. Z dat o zrychlení hlavy je patrné, že nemají tak strmý peak jako pánev a hrudník, což by mohlo být právě v důsledku toho, že hlava nebyla v přímém kontaktu s tramvají. Na zrychlení hrudníku je parné ještě jedno lokální maximum před nástupem globálního maxima, tento jev by se dal vysvětlit překonáváním pružnosti srážky s horní končetinou figuríny, která před plným kontaktem

s hrudníkem může ovlivňovat zrychlení hrudníku (patrné i na zrychlení hlavy ve stejném časovém intervalu). Konkrétně se jedná o interval (0,05;0,06).

V důsledku pohlcení impaktního impulzu v pánevní oblasti a oblasti hrudníku došlo k menšímu přenosu impulzu na segment hlavy a nedošlo tak ani ke srážce hlavy s čelem tramvaje.

5.2. Srážka s typem KT8D5

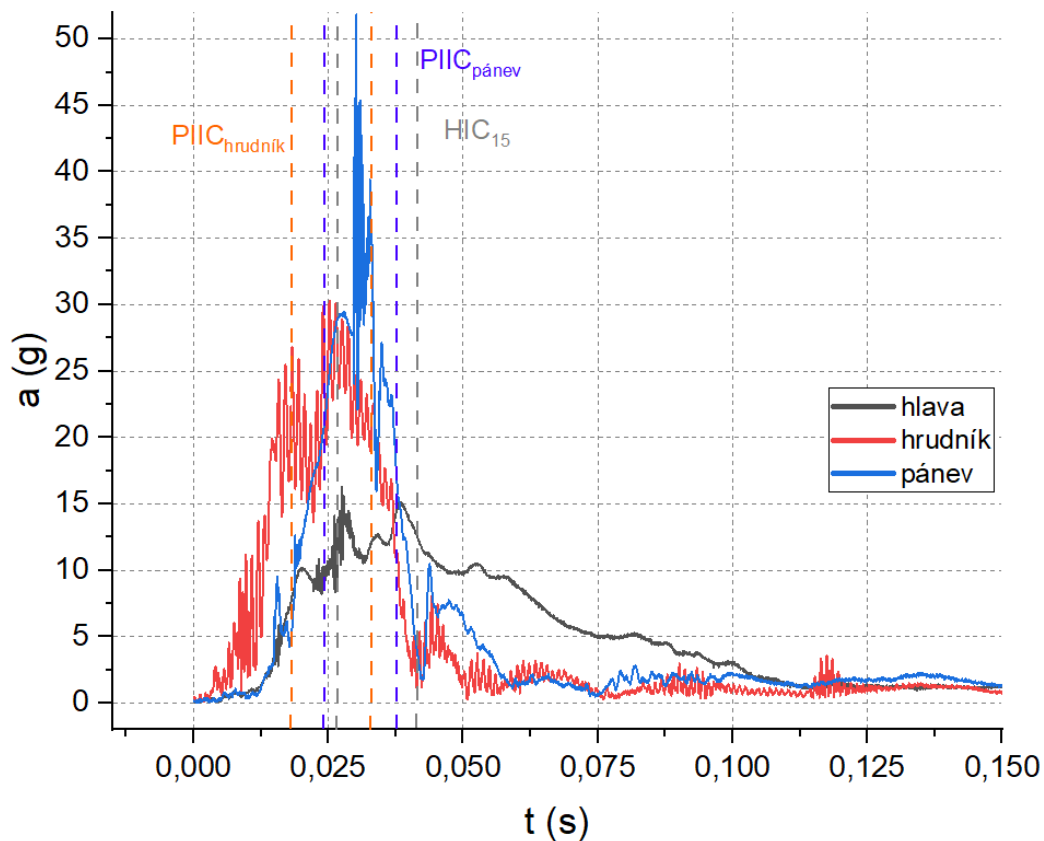
Analýza záznamu srážky s tímto typem tramvaje je obtížná kvůli umístění vysokorychlostní kamery a „oploštělého“ čela tramvaje KT8D5. Čelo této tramvaje způsobuje, že jednotlivé pozorované segmenty se dostávají do kontaktu s tramvají v rychlém sledu, i tak by se situace dala zachytit sledem fotografií (*Obrázek 22*).



Obrázek 22 – sekvence srážky s tramvají KT8D5, vlevo nahoře první kontakt s rukou, vpravo nahoře kontakt s pánví/hrudníkem vlevo dole začátek zrychlení pánve/hrudníku a vpravo dole unášení figuríny

Prvotní kontakt s rukou figuríny je referenčním bodem v čase 0 s. Dále je obtížné rozeznat, zda došlo nejdříve ke kontaktu s pánví či hrudníkem, ale je možné tento kontakt odhadnout časovým údajem 0,03 s. Ke kontaktu hlavy figuríny s tramvají KT8D5, obdobně jako při srážce s tramvají T3, nedošlo. Zrychlení hlavy bylo tedy opět dodáno díky střetu tramvaje s ostatními segmenty těla figuríny.

Údaje z figuríny jsou v případě analýzy impaktního impulsu při srážce s touto tramvají stěžejní, neboť analýza videozáznamu této srážky je velice obtížná. Průběh srážky popisuje následující graf zrychlení jednotlivých segmentů závislý na čase. Příslušnou barvou jsou také zvýrazněny intervaly nástupu PIIC jednotlivých segmentů (viz *Obrázek 23*).



Obrázek 23 – jednotlivá zrychlení segmentů a jejich intervaly PIIC, při boční srážce figuríny s tramvají KT8D5

Začátek intervalu PIIC pro hrudník byl zaznamenán jako první v čase 0,018 s. Hned poté ještě v intervalu PIIC pro pánev začal interval PIIC pro hrudník v čase 0,023 a interval PIIC pro hlavu v čase 0,027 s. V časovém intervalu (0,027;0,033) tedy došlo k překryvu všech těchto intervalů PIIC. Hlava se stejně jako v případě srážky s tramvají T3 nedotkla tramvaje, je však na grafu možno pozorovat, že její zrychlení do jisté míry s jistým poměrným zmenšením kopíruje na intervalu (0,018;0,033) zrychlení hrudníku.

5.3. Srážka s typem 14T

Tato srážka je charakterizována tím, že tramvaj 14T je jedna z nejnovějších typů, které DPP provozuje. Její čelo je tedy dosti odlišné od tramvají T3 a KT8D5. Tramvaj má vůči vodorovné rovině vozovky sklon čela výraznější. Situace kolize této srážky je patrna na následující sekvenci (Obrázek 24).

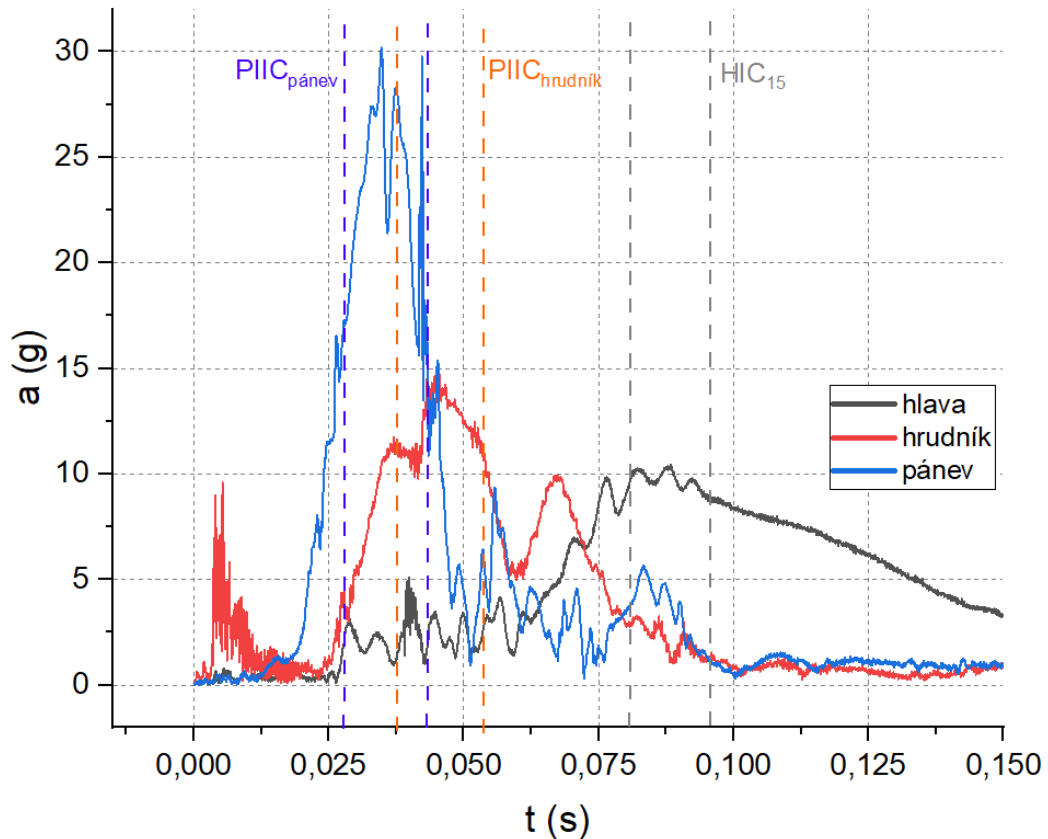


Obrázek 24 – sekvence srážky s tramvají 14T, vlevo nahoře první kontakt s rukou, vpravo nahoře kontakt s pánví, vlevo dole začátek zrychlení hrudníku a vpravo dole unášení figuríny

Cca v čase 0,036 s došlo ke kontaktu oblasti pánve s tramvají. Poté v čase 0,042 s došlo ke „kontaktu“ s hrudníkem. Obdobně jako u tramvají T3 a KT8D5 nedošlo k nárazu hlavy do čela tramvaje.

Při důkladné analýze videozáznamu z této kolize, je pravděpodobné, že kumulativní PIIC ($PIIC_{kum}$) je pro tento typ tramvaje téměř o polovinu menší než u ostatních typů tramvají zkoumaných v této práci, z důvodu deformačních zón čela tohoto typu tramvaje ve výšce hrudníku figuríny. Materiály čela tramvaje se v tomto místě znatelně prohnu, čím zmenšují impaktní impuls a zrychlení odevzdané segmentu v oblasti hrudníku potažmo hlavy. Impaktní impuls vztahující se na oblast pánve je přibližně podobný ostatním typům tramvají, výjimkou jsou u tohoto typu tramvaje právě hodnoty PIIC pro hrudník a hlavu, které jsou v porovnání s ostatními typy tramvají nižší.

Nižší hodnoty můžeme také pozorovat na grafickém znázornění zrychlení jednotlivých segmentů v závislosti na čase (barevně zvýrazněny intervaly PIIC segmentů) (viz Obrázek 25).



Obrázek 25 – jednotlivá zrychlení segmentů a jejich intervaly PIIC, při boční srážce figuríny s tramvají 14T

Jako první tedy nastává interval PIIC pro pánev v čase 0,028 s , poté interval pro hrudník v čase 0,039 s a pro hlavu v čase 0,08 s. Na výsledcích zrychlení hlavy je znovu patrné obdobně jako u typu T3, že zrychlení nenabývá zřetelného peaku, což podporuje vizuálně podpořenou teorii, že hlava se nedostala do kontaktu s tramvají. Intervaly PIIC pro pánev a hrudník se překrývají, neboť ke kontaktům dochází v krátkém časovém rozmezí. Okolo času 0,039 je možné znovu pozorovat lokální maximum, které je přisuzováno zrychlení horní končetiny, které je přeneseno na hrudník. Na začátku na intervalu (0;0,025) se zdá být šum dat, protože při snaze jejich interpretace, nebyl znám důvod těchto hodnot ani na videozáznamu.

5.4 Srážka s typem 15T

Čelo tramvaje 15T má přes svůj moderní vzhled výrazný nárazník v oblasti kolen a pánve figuríny. Nad tímto nárazníkem má znatelný „shod“, který je přechodem od nárazníku k čelnímu sklu tramvaje (viz *Obrázek 26*).

Z videozáznamu je možné odhadnout, že přibližně v čase 0,03 s došlo ke kontaktu s oblastí pánve. Ke zrychlení hrudníku začalo docházet dříve, než došlo ke kontaktu ramene s čelem tramvaje (z důvodu tvaru čela tramvaje - „shod“). K tomuto zrychlení začalo docházet cca v čase 0,048 s. Jako u jediné ze sledovaných typů tramvají, došlo u typu 15T ke kontaktu hlavy s tramvají a to cca v čase 0,147 s. Náráz do skla je patrný na fotografii níže (*Obrázek 27*).

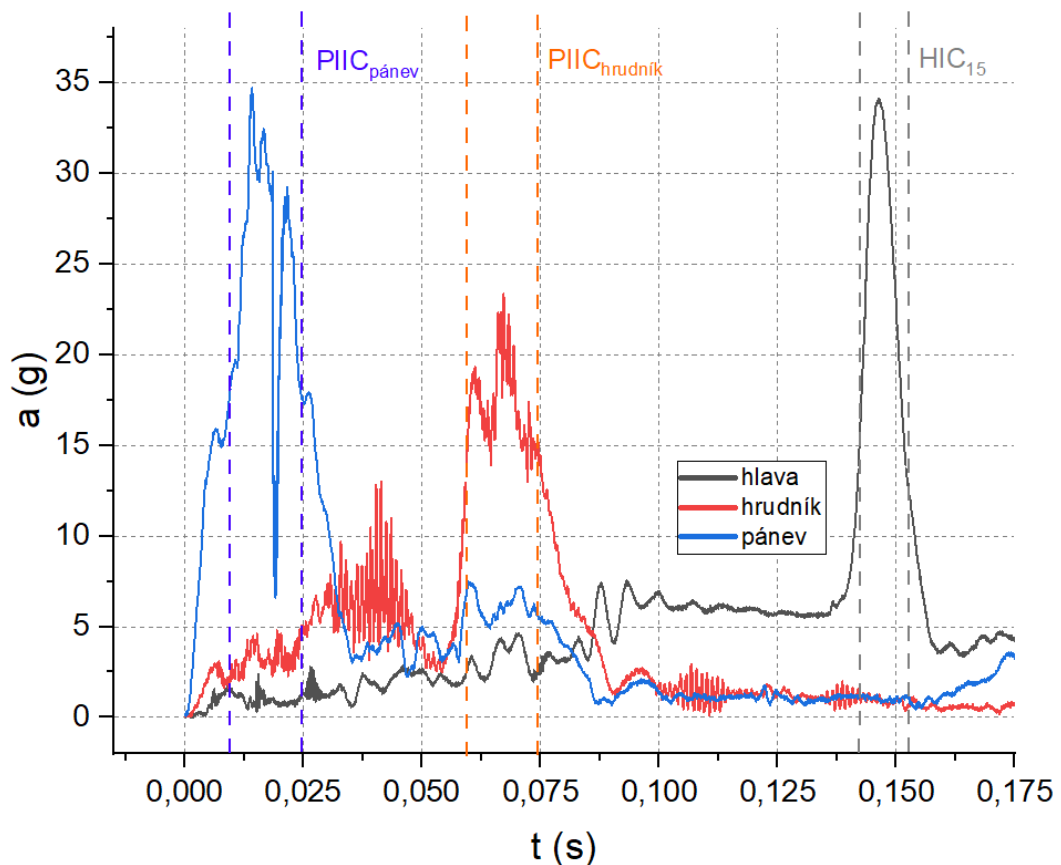


Obrázek 26 – sekvence srážky s tramvají 15T, vlevo nahoře první kontakt s rukou, vpravo nahoře kontakt s pánví, vlevo dole začátek zrychlení hrudníku a vpravo dole unášení figuríny



Obrázek 27 – kontakt hlavy při srážce s tramvají typu 15T

Zajímavé a názorné je v tomto případě grafické znázornění dat na následujícím grafu (*Obrázek 28*).



Obrázek 28 – jednotlivá zrychlení segmentů a jejich intervaly PIIC, při boční srážce figuríny s tramvají 15T

Intervaly nástupu PIIC pro jednotlivé segmenty jdou jasně za sebou od pánve, přes hrudník až po hlavu. Časový interval pro pánev nastal v čase 0,01 s, pro hrudník v 0,06 s a pro hlavu v čase 0,142 s. Tyto časy odpovídají hrubým odhadům při analýze videozáznamu.

Na zrychlení hrudníku je opět patrné v časovém intervalu (0,025;0,05) zrychlení udělené přenesením z horní končetiny, která se v tomto časovém intervalu připezuje k tělu. Na rozdíl od ostatních typů tramvají analyzovaných v této práci, došlo ke kontaktu hlavy s čelem tramvaje. Tato skutečnost je jasně interpretována peakem, který u ostatních grafů pro jiné tramvaje nemohl být takto čitelný, neboť se hlava nedostala do styku s tramvají. Toto pozorování je možné zachytit v intervalu HIC_{15} na grafu výše (Obrázek 28).

6 Diskuze

Pro průběh a lokalizaci impaktního impulsu při srážce figuríny s tramvají se zdají být dobrými parametry pro jeho interpretaci jednotlivá zrychlení segmentů figuríny.

Při zkoumání impaktního impulsu by se daly použít například maximální hodnoty zrychlení, pro tuto práci se však zdá být užitečnější využít parametru definovaného pomocí impulsu síly, který je již v oboru crash testů hojně využíván.

Z dat o zrychlení jednotlivých segmentů při kolizi lze na základě uvedeného vzorečku závislém na těchto zrychleních vypočítat zavedený parametr PIIC/HIIC₁₅. Ten se zdá být adekvátním nástrojem pro analýzu těchto dat. Neboť spojením poznatků z grafické interpretace těchto parametrů a videozáznamu, získáváme poměrně dobrou interpretaci průběhu impaktního impulsu tělem figuríny.

Své opodstatnění má v interpretacích výsledků také zavedené tzv. kumulovaný PIIC, který by se za předpokladu srážky různými typy tramvají za co nejpodobnější podmínek (ve stejné rychlosti, umístění figuríny) měl pohybovat velmi zhruba okolo jedné hodnoty. Stal se tak jedním z dalších parametrů, který pomohl k objasnění například propadu hodnot pro typ tramvaje 14T.

Přesto, že dané parametry byly pro tento účel vybrány na základě teoretických základů, nebyli tyto parametry v dostupné literatuře pro takovéto zpracování dat použity. Může být tedy na místě rozporovat jejich užití. Ve výsledcích jsou ovšem takto zpracovaná data konfrontována s analýzou záznamu uskutečněného při daných srážkách vysokorychlostní kamerou.

Tato práce má nedostatky v počtu využitých dat pro tuto analýzu. V rámci zmíněného grantu totiž došlo pouze k jednotlivým měřením srážek daných okolností. Jednalo se tedy pouze o jedno experimentální měření sagitální srážky figuríny daným typem tramvaje v rychlosti 15 km/h (tedy 4 měření). Při dalším zkoumání a provedení více měření bychom mohli získat přesnější data a hlubší analytické „pochopení“ daných výsledků.

Čtenář může nabýt dojmu, že zavedení parametru PIIC, které využívá již známého parametru HIC₁₅ (který je určen pouze pro nárazy hlavy), je v jistých ohledech vágní. Však při analýze dat z experimentálního měření, jehož součástí je sbírání dat o zrychlení z jednotlivých segmentů těla figuríny, je tento parametr dobrým nástrojem pro

porovnávání. Nemusíme tedy být schopni jasně interpretovat jednotlivá data, ale můžeme hodnoty HIC_{15} využít jako vzor pro ostatní segmenty. Nehledě na to, že při výpočtech jednotlivých parametrů PIIC byl využíván vždy stejně definovaný vzoreček zahrnující v sobě koeficient impulzu síly, měl by tedy být vhodným parametrem pro porovnávání jak jednotlivých segmentů, tak jednotlivých typů tramvají.

7 Závěr

Při analýze dat zrychlení byl využit nově zavedený parametr PIIC a také PIIC_{kum}. PIIC, který se zdá být dobrým analyzačním nástrojem pro sledování průběhu impaktního impulzu při srážce chodce s tramvají, neboť na výsledcích je zřejmá souvislost s analýzou videozáznamů jednotlivých experimentálních měření. Užitím poznatků z jednotlivých výsledků PIIC a PIIC_{kum} bylo možné objasnit i některé neznámé okolnosti srážky, jako anomálie v nízké hodnotě PIIC_{kum} tramvaje 14T nebo vyšší HIC₁₅ pro srážku s tramvají 15T. V některých případech byly údaje z PIIC dokonce přehlednější než samotná analýza videozáznamu.

Uvedené zvolené metodické postupy pro analýzu dat splnily cíl práce, tedy interpretaci průběhu impaktního impulzu při srážce figuríny s tramvají. Práce je spíše odrazovým můstkem v tomto směru analýzy impaktního impulzu, neboť se věnuje pouze malému vzorku naměřených dat.

Přesto, že definice nově zavedeného parametru stojí na definici již do jisté míry standardizovaného kritéria HIC₁₅ (obzvláště v automobilovém průmyslu), tak je jeho užití na jiné segmenty těla jakousi inovativní metodou. Tato metoda jistě bude chtít ověření v podobě dalších empirických studií, ale potenciál tohoto užití byl v této práci demonstrován.

Zavedené parametry v rámci této diplomové práce zůstaly v roli pouze porovnávacích parametrů, v budoucnu by tedy bylo záhodno tyto parametry spojit s větším množstvím empirických dat, jako tomu bylo u samotného kritéria HIC.

Citovaná literatura

2023. 15T. *Opravná tramvají.* [Online] červenec 2023.
<http://www.opravnatramvaji.cz/cz/reference/tramvaje/15t>.

Ashton, Stephen et al. 1977. Pedestrian injuries and the car exterior. *SAE Transactions.* 1977.

Bartlett, Roger. 1999. *Sports biomechanics: reducing injury and improving performance.* místo neznámé : Taylor & Francis, 1999. ISBN 0419248102.

Castanier, Carole, Paran, Françoise, Delhomme, Patricia. 2012. Risk of crashing with a tram: Perceptions of pedestrians, cyclists, and motorists. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour.* 2012, ISSN 1369-8478.

Cuerden, Richard et al. 2007. Pedestrians and their survivability at different impact speeds. *Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Lyon, France.* 2007.

Dhondt, Stijn et al. 2013. Health burden of road traffic accidents, an analysis of clinical data on disability and mortality exposure rates in Flanders and Brussels. *Accident Analysis & Prevention.* 2013, ISSN 0001-4575.

DPP. 2023. DPP loni zaznamenal 83 srážek tramvají s chodci, čtyři případy skončily smrtí. *Dopravní podnik hlavního města Prahy.* [Online] DPP, leden 2023.
https://www.dpp.cz/spolecnost/pro-media/tiskove-zpravy/detail/278_2008-dpp-loni-zaznamenal-83-srazek-tramvaji-s-chodci-ctyri-pripady-skoncily-smrti.

—. Fotografie pro média. *Dopravní podnik hlavního města prahy.* [Online] DPP.
<https://www.dpp.cz/spolecnost/pro-media/fotografie-pro-media>.

—. **2019.** Neskákej mi pod kola. [Online] Dopravní podnik hlavního města Prahy, březen 2019. <https://www.neskakejmipodkola.cz/>.

Drdla, Pavel. 2018. *Osobní doprava regionálního a nadregionálního významu.* Pardubice : Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2018. ISBN 978-80-7560-189-6.

Gaca, Stanislaw, Franek,Lukasz. 2021. Pedestrian fatality risk as a function of tram impact speed. *Open Engineering.* 2021, ISSN 2391-5439.

Grzebieta, Raphael H., Rechnitzer, George. 2000. Tram interface crashworthiness. *International Crashworthiness Conference-ICRASH*. 2000.

Guerrieri, Marco. 2018. Tramways in Urban Areas: An Overview on Safety at Road Intersections. *Urban Rail Transit*. 2018, ISSN 2199-6687.

Hibbeler, Russell C. 2010. *Engineering Mechanics*. místo neznámé : Pearson Prentice Hall, 2010. ISBN 978-0-13-607791-6.

Kocourek, Ondrej. 2015. *Problematika jízdy a brzdění tramvajových vozidel*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2015.

Kohli, Puneet, Chadha, Anjali. 2020. Enabling pedestrian safety using computer vision techniques: A case study of the 2018 uber inc. self-driving car crash. *Advances in Information and Communication: Proceedings of the 2019 Future of Information and Communication Conference (FICC)*. 2020.

Kovanda, Jan, Šatochin, Vladimír. 2000. *Pasivní bezpečnost vozidel. 1. vydání*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02235-8.

Lackner, Christian, et al. 2022. Tram to Pedestrian Collisions—Priorities and Potentials. *Frontiers in future transportation*. 2022.

Lopot, F., et al. 2019. Collision between a Pedestrian and Tram—Pilot Experiment. *Manufacturing Technology*. 2019, ISSN 1213–2489.

Mariotti, G. Virzi, et al. 2019. Head injury criterion: Mini review. *American Journal of Biomedical Science & Research*. 2019.

Másilková, Monika. 2017. Health and social consequences of road traffic accidents. 2017, ISSN 1212-4117.

Mikulka, Karel. 2019. *Statistika mimořádných událostí tramvajové dopravy*. Pardubice : Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2019.

Moradi, Rasoul. 2012. *Impact dynamics of mechanical systems and structures, and applications in crash energy management, impulse mitigation, and impact injury biomechanics*. místo neznámé : Wichita State University, 2012.

Naznin, Farhana et al. 2018. Exploring road design factors influencing tram road safety – Melbourne tram driver focus groups. *Accident Analysis & Prevention*. 2018, ISSN 0001-4575.

Plešková, Kristína. 2022. *Mechanika a důsledky impaktního zatížení hlavy.* Praha : Univerzita Karlova, Fakulta tělesné výchovy a sportu, 2022.

Prasad, P, Mertz, HJ. 2010. Evaluation of the Field Relevance of Several Injury Risk Functions. *Stapp Car Crash Journal.* 2010.

Rablau, Gina. 2016. Calculus in Crash Safety Tests: The Head Injury. *WordPress sites for Kettering University Organizations.* [Online] 2016. <http://newb.kettering.edu/wp/experientialcalculus/wp-content/uploads/sites/15/2017/05/crash-safety-test.pdf>.

Redakce portálu. 2011. Pražské tramvaje. *Praha.eu.* [Online] Portál hlavního města Prahy, 9. červen 2011. https://www.praha.eu/jnp/cz/doprava/mhd/prazske_tramvaje.html.

Rosén, Erik, Sander, Ulrich. 2009. Pedestrian fatality risk as a function of car impact speed. *Accident Analysis & Prevention.* 2009, ISSN 0001-4575.

Schmit, K. U., et al. 2010. *Trauma Biomechanics: Accidental Injury in Traffic and Sport.* 2010.

Skupová, Dagmar. 2012. *Analýza zpomalování tramvají a vyhodnocení jeho účinků na stojící.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství,, 2012.

Stránská, Jana. 2019. *Biomechanická kritéria poranění a autonomní vozidla .* Praha : České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, 2019.

Špírk, Stanislav et al. 2021. Utilization of the Validated Windshield Material Model in Simulation of Tram to Pedestrian Collision. *Materials.* 2021, ISSN 1996-1944.

Technical Committee CEN/TC . 2020. *Railway Applications - Vehicle End Design for Trams and Light Rail Vehicles with Respect to Pedestrian Safety.* Brusel : European Committee for Standardization, 2020.

Tomsovsky, Lubos, Kubovy Petr, Lopot, Frantisek, Jelen, Karel. 2022. Kinematic Analysis of the Tram-pedestrian Collision - a Preliminary Case Study. *Manufacturing Technology.* 2022, ISSN 1213-2489.

Vangi, Dario. 2020. *Vehicle collision dynamics: Analysis and reconstruction.* místo neznámé : Butterworth-Heinemann, 2020.

Walz, F. H. et al. 1986. The car-pedestrian collision, injury reduction, accident reconstruction, mathematical and experimental simulation, headinjuries in two wheeler collisions. *Interdisciplinary Working Group for Accident Mechanics, University of Zurich and Swiss Federal Institute of Technology.* 1986.

Weinstein, N. D. 1980. Unrealistic optimism about future life events. *Journal of Personality and Social Psychology.* 1980.

2023. Zákony pro lidi. [Online] AION CS, 2023.
<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-319>.

Příloha č. 1: seznam obrázků

Obrázek 1 – počet jednotlivých typů zranění a úmrtí při srážce chodce s tramvají v letech 2016-2022, data převzata (DPP, 2023).....	15
Obrázek 2 – místa srážky chodce s tramvají v roce 2022, data převzata (DPP, 2023)...	15
Obrázek 3 – občanství sražených chodců tramvají v roce 2022, data převzata (DPP, 2023)	16
Obrázek 4 – počet a poměr občanství chodců sražených tramvají v letech 2016-2022, data převzata (DPP, 2023).....	16
Obrázek 5 – Tatra T3, převzato (DPP)	19
Obrázek 6 – Tatra KT8D5, převzato (DPP)	19
Obrázek 7 – Škoda 14T, převzato (DPP).....	20
Obrázek 8 – Škoda 15T, převzato (DPP).....	20
Obrázek 9 – závislost rizika úmrtí na rychlosti vozidla při srážce chodce s osobním automobilem, převzato (Rosén, 2009)	22
Obrázek 10 – boční srážka chodce s tramvají v programu MADYMO, převzato (Bartlett, 1999).....	23
Obrázek 11 – odpovědi Brněnské populace na otázku, zda se cítí bezpečně v tramvaji, data převzata (Skupová, 2012).....	26
Obrázek 12 – začátek 1. fáze (vlevo nahoře), průběh 1. fáze (vpravo nahoře), začátek 2.fáze (vlevo dole), 3. fáze (vpravo dole), převzato (Lopot, 2019)	28
Obrázek 13 – interpretace AIS 4+a AIS 3+ dle HIC ₃₆ a HIC ₁₅ , převzato (Prasad, 2010)	35
Obrázek 14 – průběh boční srážky tramvaje T3 s figurínou, převzato (Plešková, 2022)	38
Obrázek 15 – ilustrace PIIC _{kum}	41
Obrázek 16 – graf závislosti zrychlení hlavy na čase při sagitální srážce tramvají T3 ..	42
Obrázek 17 – graf závislosti zrychlení hlavy na čase při sagitální srážce tramvají KT8D5	42
Obrázek 18 – graf závislosti zrychlení hlavy na čase při sagitální srážce tramvají 14T	43
Obrázek 19 – graf závislosti zrychlení hlavy na čase při sagitální srážce tramvají 15T	43
Obrázek 20 – sekvence srážky s tramvají T3, vlevo nahoře první kontakt s rukou, vpravo nahoře kontakt s pánví, vlevo dole kontakt s hrudníkem a vpravo dole unášení figuríny	45

Obrázek 21 – jednotlivá zrychlení segmentů a jejich intervaly PIIC, při boční srážce figuríny s tramvají T3	46
Obrázek 22 – sekvence srážky s tramvají KT8D5, vlevo nahoře první kontakt s rukou, vpravo nahoře kontakt s pánví/hrudníkem vlevo dole začátek zrychlení pánve/hrudníku a vpravo dole unášení figuríny	48
Obrázek 23 – jednotlivá zrychlení segmentů a jejich intervaly PIIC, při boční srážce figuríny s tramvají KT8D5	49
Obrázek 24 – sekvence srážky s tramvají 14T, vlevo nahoře první kontakt s rukou, vpravo nahoře kontakt s pánví, vlevo dole začátek zrychlení hrudníku a vpravo dole unášení figuríny.....	50
Obrázek 25 – jednotlivá zrychlení segmentů a jejich intervaly PIIC, při boční srážce figuríny s tramvají 14T	51
Obrázek 26 – sekvence srážky s tramvají 15T, vlevo nahoře první kontakt s rukou, vpravo nahoře kontakt s pánví, vlevo dole začátek zrychlení hrudníku a vpravo dole unášení figuríny.....	52
Obrázek 27 – kontakt hlavy při srážce s tramvají typu 15T	53
Obrázek 28 – jednotlivá zrychlení segmentů a jejich intervaly PIIC, při boční srážce figuríny s tramvají 15T	54

Příloha č. 2: seznam tabulek

Tabulka 1 – četnost MU DPP v letech 2008-20018, převzato (Mikulka, 2019)	13
Tabulka 2 – počet srážek tramvají s chodci v letech 2016-2022, data převzata (DPP, 2023)	14
Tabulka 3 – technické údaje tramvají T3, KT8D5, 14T a 15T (Redakce portálu, 2011)	18
Tabulka 4 – maximální zábrzdne dráhy pro rychlosti 40 km/h \pm 10 %, data převzata (Kocourek, 2015)	25
Tabulka 5 – porovnání maximálních zábrzdných drah v rámci předpisů, data převzata (Kocourek, 2015)	26
Tabulka 6 – interpretace stupňů AIS v rámci hlavy, hrudníku a oblasti břicha/pánve, převzato (Stránská, 2019)	34
Tabulka 7 – hodnoty PIIC při experimentálním měření v rychlosti 15 km/h.....	40
Tabulka 8 – čas nástupu PIIC při sagitální srážce jednotlivými typy tramvají	44