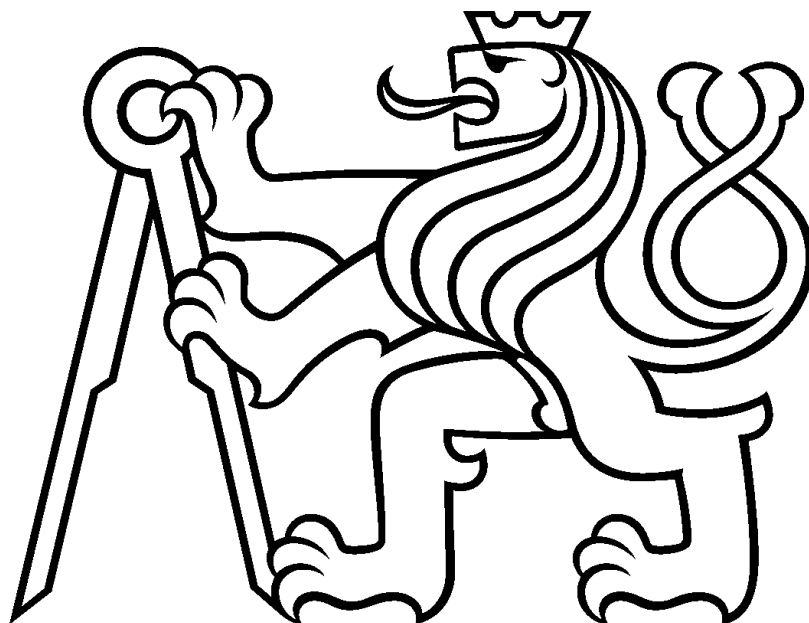


**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta strojní**

**Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**



**Disertační práce**

**Metodika návrhu čela tramvaje pro snížení následků  
nehod na osobní automobily**

**Ing. Jakub Seidl**

**2024**

**Studijní program:** Strojní inženýrství

**Specializace:** Dopravní stroje a zařízení

**Školitel:** doc. Ing. Josef Kolář, CSc.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji disertační práci vypracoval samostatně a uvedl jsem veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne.....

.....

Ing. Jakub Seidl

## Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomohli při tvorbě této disertační práce. Především chci poděkovat svému školiteli doc. Ing. Josefu Kolářovi, CSc. za cenné připomínky, odborné vedení a hlavně za trpělivost, kterou se mnou měl při tvorbě této disertační práce.

Dále bych rád poděkoval své ženě Věře, která byla pro mne oporou během těžkých chvil při tvorbě práce a po celou dobu doktorského studia.

## Anotace

V posledních letech dochází k velkému nárůstu osobní i hromadné dopravy ve městech. Zvýšení dopravního toku má za následek zvyšující se riziko vzniku dopravních nehod. Na výrobce i provozovatele tramvají jsou kladeny čím dál tím vyšší požadavky na zajištění bezpečnosti vozidel při nehodě.

V současnosti se při návrhu silničních vozidel prosazuje princip tzv. partnerské ochrany, kdy vozidlo svými bezpečnostními prvky nechrání pouze cestující uvnitř vozidla, ale i cestující v kolizním vozidle. U kolejových vozidel, jmenovitě u tramvají, je oblast partnerské ochrany řešena pouze při kolizi s chodci.

Následky reálných nehod tramvají se silničními motorovými vozidly z uplynulých let však jednoznačně naznačují, že je nutné tento princip začít řešit také při nehodách tramvají s osobními auty.

V první části této disertační práce je komplexně popsána problematika nehodovosti vozidel s ohledem na legislativní požadavky na pasivní bezpečnost a jejich prokazováním při schvalování vozidel do provozu. Druhá část je věnována problematice následků nehod tramvají s auty a návrhem čel tramvají s ohledem pro snížení následků nehod na autech.

**Klíčová slova:** ČSN EN 15227, kompatibilita vozidel, osobní automobil, nehoda, tramvaj.

## Abstract

In recent years, there has been a large increase in passenger and public transport in cities. The increase in traffic flow results in an increased risk of traffic accidents. Increasing demands are being placed on tram manufacturers and operators to ensure the safety of vehicles in the event of an accident.

Currently the principle of partner protection is being promoted in the design of road vehicles, whereby the vehicle's safety features not only protect the passengers inside the vehicle, but also the passengers of the collision vehicle. In the case of rail vehicles, namely trams, the area of partner protection is only addressed in the event of a collision with pedestrians.

However, the consequences of real accidents between trams and motor vehicles in recent years clearly indicate that this principle shall also be addressed in tram and car accidents.

In the first part of this dissertation thesis, the issue of vehicle accidents is comprehensively described with regard to the legislative requirements for passive safety and their demonstration when vehicles are approved for use. The second part is devoted to the problem of the consequences of tram and car accidents and the design of tram fronts with regard to reducing the consequences of accidents on cars.

**Keywords:** accident, car, EN 15227, tram, vehicle compatibility.

# Obsah

1	Úvod .....	8
1.1	Členění disertační práce .....	10
2	Současný stav problematiky .....	11
2.1	Dopravní nehody tramvajů .....	12
2.2	Bezpečnost tramvajových vozidel .....	22
2.3	Legislativní požadavky .....	28
2.4	Mechanismus nárazu vozidel .....	38
2.5	Kompatibilita vozidel při nárazu .....	40
2.6	Biomechanická kritéria poranění člověka .....	48
2.7	Mechanické lidské figuríny .....	51
2.8	Výpočtové modely lidí .....	53
2.9	Výpočtové modely osobních automobilů .....	59
2.10	Souhrn řešeršních částí .....	62
3	Cíle disertační práce .....	64
4	Řešení cílů disertační práce .....	65
4.1	Analýza statistiky nehodovosti tramvajů na území ČR .....	65
4.2	Definice výpočtového scénáře nehody tramvaje s autem .....	71
4.3	Výzkum na zjednodušených simulačních modelech .....	72
4.4	Tvorba komplexního simulačního modelu .....	84
4.5	Analýza vlivu parametrů deformačních prvků tramvajů na následky nehod na auta ....	99
4.6	Shrnutí analýzy vlivu parametrů deformačních prvků .....	111
5	Důsledky pro praxi .....	115
6	Závěr .....	116
7	Citovaná literatura .....	117
8	Aktivní účast na konferencích .....	127

9	Zapojení ve výzkumných projektech.....	129
10	Tabulka zkratk ..... 130	130
11	Tabulka použitých veličin ..... 131	131
12	Seznam obrázků ..... 132	132
13	Seznam tabulek..... 138	138
14	Seznam příloh..... 140	140



# 1 Úvod

Linky tramvajové dopravy jsou pro moderní města s počtem obyvatel nad 100 tisíc nezbytnou součástí jejich systému městské hromadné dopravy (dále jen MHD). Rozvoj a používání těchto systémů je často podporováno městy, a to nejen finančními dotacemi, ale i omezováním individuální automobilové dopravy. Moderní tramvajová doprava oproti individuální automobilové dopravě poskytuje přijatelnou rychlost přepravy, nižší energetickou náročnost, nižší míru znečištění ovzduší a velkou přepravní kapacitu. [1], [2], [3]

Tramvajová doprava bývá využívána k rychlé přepravě velkého počtu cestujících z odlehlejších částí města do jeho centra a zpět. Z důvodu historické zástavby většiny evropských měst není možné vést v centru měst tramvajové trati na samostatném tělese. Proto musí být vedeny v městských ulicích v těsné blízkosti komunikací pro ostatní účastníky silničního provozu (osobních a nákladních automobilů, autobusů a chodců). Z důvodu potřeby změny směru jízdy dochází ke křížení tramvajových kolejí s jízdními pruhy ostatních účastníků provozu. Každé toto křížení zvyšuje riziko vzniku dopravních nehod vozidel. [1], [2], [3]

Každá dopravní nehoda tramvajových vozidel s jiným účastníkem silničního provozu je velký zásah do plynulosti přepravy cestujících. Následkem nehody dojde k dočasnému lokálnímu ochromení tramvajového systému, jelikož s vozidly účastníky se nehody nesmí být manipulováno, dokud nedojde k zaznamenání nehody pracovníky dopravních podniků (dále jen DP) a dání povolení k odklizení nehody pracovníky Drážní inspekce (dále jen DI). Po celou dobu odklizení následků nehody je daný úsek tramvajové trati neprůjezdný, což vede k potřebě zavedení objízdnych tras, zpoždění dalších tramvajových spojů a nelibosti cestujících. [4], [5]

Dopravní nehody jsou nejčastěji způsobeny lidskou chybou. Bohužel v silniční dopravě je často za tyto chyby placeno cenou nejvyšší, a to zdravím nebo životem účastníků nehod. Návrh vozidel musí být tedy prováděn s vědomím, že lidé dělají chyby, které mohou vést ke vzniku dopravních nehod. Nově konstruované tramvaje musí být vybavovány dokonalejšími prvky pasivní bezpečnosti, které povedou ke zmírnění následků nehod na všech zúčastněných vozidlech. Tato představa přístupu ke zvýšení bezpečnosti silničního provozu a ke snížení následků nehod na zdraví cestujících vychází z cílů programu *Vize 0*, který byl představen v roce 1995 ve Švédsku. Základním cílem programu *Vize 0* je vytvořit a přijmout takové změny dopravního systému a vozidel, aby do roku 2050 přestalo docházet následkem dopravních nehod k úmrtím a těžkým zraněním účastníků nehody. [4], [5]

Pro snížení následků nehod nově konstruovaných tramvají byla v roce 2008 vydána norma ČSN EN 15227. Legislativní požadavky této normy jsou však pouze na odolnost tramvají při nehodě a na přežití cestujících a posádek uvnitř tramvají. Na nově navrhované tramvaje nejsou kladeny žádné požadavky na bezpečnost cestujících v kolizních vozidlech. [1], [2], [3]

Problematikou nehodovosti tramvají s jinými účastníky silničního provozu jsem se již zabýval ve své diplomové práci [6]. Při řešení jsem zjistil, že problematice nehodovosti tramvají s auty nebyla věnována dostatečná pozornost v rámci výzkumných projektů a odborných publikací, a proto jsem se rozhodl se jí věnovat v rámci doktorského studia. Tato práce se zabývá tematikou návrhu čela tramvají pro snížení následků nehod na osobních automobilech (dále jen autech).

## 1.1 Členění disertační práce

Práce je rozdělena do šesti kapitol.

První kapitola popisuje důležitost tramvajové dopravy na přepravě cestujících v každém moderním městě s vyšším počtem obyvatel a nastiňuje důvody, proč je nutné věnovat se problematice následků nehod tramvají s auty.

Druhá kapitola shrnuje rešerši problematiky nehodovosti tramvají s auty a popisuje poznatky, které autor považoval za důležité pro řešení disertační práce. Snahou autora je vysvětlit čtenáři komplexnost tématu snížení následků nehod, uvést ho do základů problematiky nehodovosti tramvají s auty a stručně popsat výzkumné práce, které se věnovaly této problematice ve světě či u nás.

Třetí kapitola definuje cíle disertační práce. Jednotlivé cíle jsou vytyčeny podle závěrů rešeršní části práce.

Čtvrtá kapitola se věnuje řešení jednotlivých cílů disertační práce stanovených ve třetí kapitole. Tato kapitola obsahuje hlavní výzkumnou část práce.

Pátá kapitola zhodnocuje závěry provedeného výzkumu pro praxi.

Šestá kapitola shrnuje závěry předešlých kapitol.

Zbylé kapitoly práce uvádějí soupis literatury, obrázků, tabulek a vědeckou činnost autora. Poslední kapitola obsahuje přílohy.

## 2 Současný stav problematiky

Tato kapitola uvádí současný stav znalostí nehodovosti tramvají s auty a vysvětluje důležité pojmy k řešení této problematiky. První část kapitoly definuje pojem dopravní nehoda a shrnuje poznatky z dříve publikovaných výzkumů z tematiky nehodovosti tramvají, které posloužily autorovi jako inspirace při řešení výzkumného problému. Druhá část popisuje další důležité poznatky, se kterými se autor musel seznámit při řešení této disertační práce.

Z důvodu malého rozsahu výzkumu pasivní bezpečnosti tramvají při srážce s auty jsou v této kapitole uvedeny i poznatky z výzkumných zpráv, publikací a předpisů týkajících se nehodovosti aut a nákladních motorových vozidel (dále jen NA).

V celé kapitole *Současný stav problematiky* je uveden autorův volný komentář k poznatkům a závěrům různých publikací a výzkumů k danému tématu. Na konci každého odstavce je uvedena citace publikací, ze kterých autor při svém komentáři vycházel.

## 2.1 Dopravní nehody tramvají

Pojem dopravní nehoda<sup>1</sup> je definován v § 47 zákona č.361/2000 (Zákon o provozu na pozemních komunikacích) takto:

*„Dopravní nehoda je 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.“ [7]*

Každá dopravní nehoda tramvají s jiným účastníkem silničního provozu, viz obrázek Obr. 2-1, je velkým zásahem do plynulosti přepravy cestujících. Následkem nehody dojde k dočasnému lokálnímu ochromení tramvajového systému, jelikož s vozidly účastnicími se nehody nesmí být manipulováno, dokud nedojde k zaznamenání nehody pracovníky DP a povolení k odklizení nehody od pracovníků DI. Po celou dobu odklizení nehody je daný úsek tramvajové trati neprůjezdný a DP jsou nuceny zavádět objízdné trasy pro tramvaje nebo zavádět náhradní autobusovou dopravu. [8]



Obr. 2-1: Nehoda tramvaje s autem, zdroj: [liberec.rozhlas.cz](http://liberec.rozhlas.cz).

<sup>1)</sup> V oboru drážních vozidel se při popisu dopravních nehod častěji používá pojem mimořádná událost. Tento pojem se však používá i pro události, které nemají nic společného s nehodami dvou vozidel. Jako příklad lze uvést vykolejení vlaků, průjezd návštěvidlem a další. Pro jednoznačnost je v této disertační práci pro popis srážky dvou vozidel používán pouze termín dopravní nehoda.

Podle informací od pracovníků Dopravního podniku hl. m. Prahy, kteří se zabývají nehodovostí tramvají, trvá odklizení následků dopravních nehod, při kterých došlo pouze k materiálním škodám, přibližně 20 minut. Odklizení nehod se závažnějšími následky (těžké zranění nebo úmrtí cestujících ve vozidlech nebo chodců) může dosahovat 2 až 3 hodin. Každé opatření, které zmírní následky nehod a tím i zkrátí dobu potřebnou k odklizení následků nehod, je proto DP velice vítáno.

Nehody tramvají s jinými účastníky silničního provozu jsou podle závažnosti zaznamenávány třemi institucemi: DP, Dopravní policií České republiky (dále jen DPČR) a DI. [8]

DP musí provést záznam o jakékoliv nehodě jimi provozovaných tramvají. Žádná platná legislativa nepředepisuje DP, jaká data musí o každé dopravní nehodě zaznamenávat. Proto se zápisy o nehodách mezi jednotlivými DP liší. Formu a objem zaznamenaných dat o nehodách nejvíce ovlivňuje velikost DP (počet provozovaných tramvají) a počet nehod tramvají za rok. **Příloha 1** zobrazuje rozhraní aplikace pro zaznamenávání údajů k dopravním nehodám v DP města Brna a **Příloha 2** zobrazuje formulář o dopravní nehodě DP měst Mostu a Litvínova. [8]

DPČR zaznamenává pouze nehody tramvají, při nichž došlo ke zranění nebo úmrtí člověka, škodě na vozidlech větší než 100 tisíc Kč nebo poškození majetku třetí osoby. DPČR zaznamenává u všech nehod stejné údaje, které následně zapisuje do kompletní databáze nehod všech silničních motorových vozidel (dále jen SMV) na území České republiky (dále jen ČR). **Příloha 3** znázorňuje výpis z databáze nehod DPČR a **Příloha 4** zobrazuje statistický formulář k nehodám DPČR. [8]

DI zaznamenává všechny nehody kolejových vozidel (dále jen KV) na území ČR a šetří příčiny a okolnosti vzniku nejzávažnějších dopravních nehod KV s cílem zabránit opakování se nehod stejného typu. Závěry šetření jednotlivých nehod zveřejňuje DI v závěrečných zprávách na svých webových stránkách [www.dicr.cz](http://www.dicr.cz). **Příloha 5** zobrazuje ukázkou závěrečné zprávy DI. [9]

Z výše uvedeného je patrné, že kompletní soupis všech nehod tramvají s jejich detailním popisem mají pouze jednotlivé DP, které provozují tramvaje na území ČR. Jmenovitě se jedná o dopravní podniky měst: Prahy (DPP), Brna (DPMB), Liberce a Jablonce nad Nisou (DPMLJ), Mostu a Litvínova (DPMOST), Plzně (PMDP), Olomouce (DPMO) a Ostravy (DPO). DP však často nezaznamenávají následky nehod na zdraví cestujících v kolizních vozidlech. Data o zdravotních následcích nehod všech tramvají na území ČR musí být zaznamenány DPČR.

## 2.1.1 Statistika nehodovosti tramvají

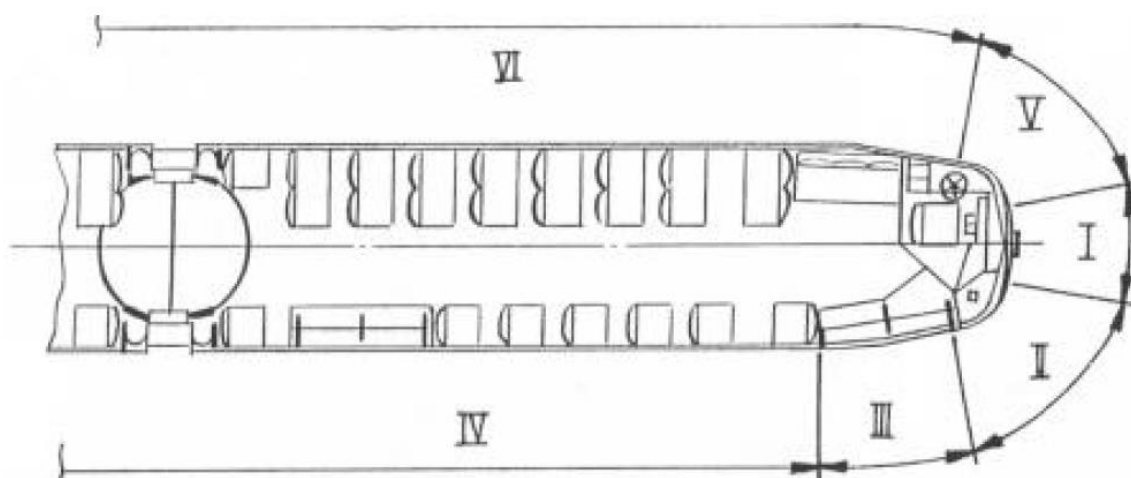
Statistika nehodovosti tramvají pro celé území ČR nebyla zatím žádnými autory publikována. Někteří autoři se věnovali tvorbě statistiky nehodovosti pro jednotlivé DP na území ČR. Jako příklad lze uvést publikaci [10], ve které autor uvádí statistiku nehodovosti tramvají DPMB za roky 2016 a 2017. Za toto období zaznamenal DPMB celkem 895 nehod tramvají s jiným účastníkem silničního provozu. Práce se zabývá vyhodnocením statistiky nehodovosti s ohledem na nejčastější typy nehod a definováním příčin vzniku těchto nehod. Následky nehod v publikaci nejsou řešeny.

Některé DP na území ČR publikují na svých webových stránkách souhrnné informace o celkové nehodovosti tramvají za uplynulý rok. Tento údaj porovnávají s předchozími roky a primárně slouží k vyhodnocení nárůstu či poklesu celkové nehodovosti. Informace o kolizních vozidlech, následcích nehod nebo slovní popis DP nepublikují. Uvedené informace jsou pro posouzení následků nehod tramvají s auty nepoužitelné. [11], [12]

Žádná z popsaných statistik nehodovosti tramvají na území ČR se nezabývá vyhodnocením statistiky nehodovosti s ohledem na následky nehod na zdraví cestujících v kolizních vozidlech.

Problematika nehodovosti tramvají není řešena pouze na území ČR, ale i v ostatních státech světa. Za příklad lze uvést publikaci [13], ve které se autoři zabývali problematikou nehodovosti tramvají na území Spolkové republiky Německo za roky 2009 až 2011 v 58 městech, ve kterých provozují tramvaje. Za zkoumané období bylo celkově zaznamenáno 4 100 nehod tramvají s jinými účastníky silničního provozu. Z vyhodnocení statistiky nehodovosti vyplynulo, že za většinu nehod mohou řidiči kolizních vozidel a chodci, zatímco řidiči tramvají mohou pouze za 16 % všech nehod. Nejdůležitějším závěrem publikace je doporučení na potřebu výzkumu úpravy čel tramvají s ohledem na snížení následků nehod na zdraví chodců a cestujících v autech.

Na závěr uvádím publikaci [14], ve které se autor zabýval poškozením hrubých staveb tramvají od firmy Duewag AG při nehodách s jinými účastníky silničního provozu a možností optimalizace hrubých staveb nově konstruovaných tramvají s ohledem na snížení nákladů na opravu v důsledku nehod. Z pohledu nehodovosti tramvají je v publikaci nejdůležitější vyhodnocení kolizních směrů nehod, při kterých dochází nejčastěji k poškození hrubých staveb tramvají, a tedy i nejzávažnějším následkům. Při 41.5 % ze všech nehod došlo k poruše hrubých staveb při nárazu do pravé části čela tramvaje (na obrázku Obr. 2-2 zóna II). Problematika následků na kolizních vozidlech v uvedené publikaci není řešena.



Obr. 2-2: Vyhodnocení kolizních směrů. [14]

## 2.1.2 Statistika nehodovosti v Praze

Magistrát hlavního města Prahy zveřejňuje na svých webových stránkách praha.eu údaje o nehodovosti na pražských komunikacích. Základní přehled statistik dopravní nehodovosti na území hl. m. Prahy za roky 2016 až 2018 je uveden v tabulce Tab. 2-1. Statistika ukazuje, že méně než 1 % nehod končí úmrtím či těžkým zraněním mezi cestujícími a méně než 10 % nehod končí lehkým zraněním. Přesto tyto počty nejsou společností akceptovány a je kladen velký důraz na zvýšení bezpečnosti provozu a snížení následků nehod. [15]

Tab. 2-1: Nehodovost na komunikacích v Praze. [15]

<b>Rok</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>Celkem</b>	<b>Poměr (%)</b>
<b>Nehody</b>	22 876	23 032	22 767	68 675	-
<b>Usmrceno</b>	21	17	31	69	0,1
<b>Těžkých zranění</b>	194	156	182	532	0,8
<b>Lehkých zranění</b>	1 983	1 951	2 165	6 099	8,9



### 2.1.3 Program *Vize 0*

Dopravní nehody jsou nejčastěji způsobeny lidskou chybou. Za tyto chyby je při dopravních nehodách často placeno cenou nejvyšší, a to zdravím nebo životem účastníků nehod. Společnost v minulosti přestala tolerovat zbytečná úmrtí a zranění lidí na pracovištích či při sportech. Novodobá společnost by měla též zastavit toleranci zbytečných úmrtí a těžkých zranění lidí v silniční, železniční a letecké dopravě. Pro zajištění snížení následků nehod byl v roce 1995 ve Švédsku prezentován tzv. program *Vize 0*. [16]

Základním cílem programu *Vize 0* je vytvořit a přijmout taková opatření dopravního systému a vozidel, aby do roku 2050 přestalo docházet k úmrtím, a aby byla minimalizována těžká zranění vzniklá následky dopravních nehod. Dalším inovativním přístupem je změna pohledu na zodpovědnost za výslednou bezpečnost provozu. Největší zodpovědnost mají nést ti, kdo navrhují parametry dopravního systému, jako jsou například politici, správci komunikací, policisté a v neposlední řadě výrobci vozidel. Jelikož mohou definovat parametry dopravního systému tak, aby byl schopný odpouštět chyby, kterých se účastníci silničního provozu dopouštějí. Účastníci silničního provozu pak budou povinni se definovaným pravidlům podřídit, řídit se jimi a dodržovat je. Vzniklá dopravní nehoda pak nebude chápána jako chyba jednotlivce neboli řidiče vozidla, ale jako chyba celého systému, jelikož dovolil, aby k nehodě došlo. [4], [16]

Návrh nových vozidel proto musí být prováděn s vědomím, že lidé dělají chyby a že i přes zavedení dokonalejších prvků aktivní bezpečnosti nelze s absolutní jistotou zabránit vzniku dopravních nehod. Proto je nutné stále provádět výzkum nových prvků pasivní bezpečnosti, zpřesňovat legislativní požadavky na pasivní bezpečnost a tím tlačit na výrobce vozidel, aby zvyšovali vlastní i partnerskou bezpečnost svých vozidel. Tento závěr by měl platit nejen pro výrobce silničních, ale i kolejových vozidel. [5]

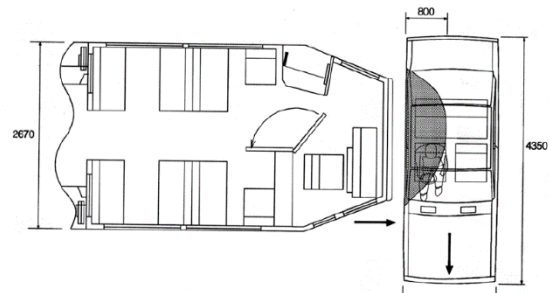
## 2.1.4 Následky nehod tramvají s auty

Výzkumem následků nehod tramvají s ostatními účastníky silničního provozu se v minulosti nezabývalo mnoho autorů. Většina autorů se spíše zaměřovala na výzkumy příčin vzniku dopravních nehod nebo na následky nehod dvou KV.

Z oblasti výzkumů na téma snížení následků nehod tramvají na autech je vhodné uvést publikaci [17]. Autoři se zabývali problematikou následků nehod na autech při srážce s tramvají s ohledem na tvar čela tramvaje. Při prozkoumání tramvají provozovaných v městě Melbourne v Austrálii autoři zjistili, že většina tramvají byla vybavena tuhými ocelovými nárazníky. Tyto nárazníky byly připevněny k hrubé stavbě tramvají ve výšce 550 mm nad rovinou temene koleje (dále jen TK), tedy ve výšce hrudi sedícího cestujícího v autě, viz obrázek Obr. 2-3. Při srážce tramvaje s bokem auta se tyto nárazníky chovaly jako tuhá beranidla, která při nehodách způsobila velkou deformaci boků aut. Při některých nehodách došlo k průniku nárazníku až do prostoru pro posádku auta, kde způsobil závažné zranění posádky, viz obrázky Obr. 2-4 a Obr. 2-5. [17]



Obr. 2-3: Výškové umístění nárazníků na tramvajích. [17]

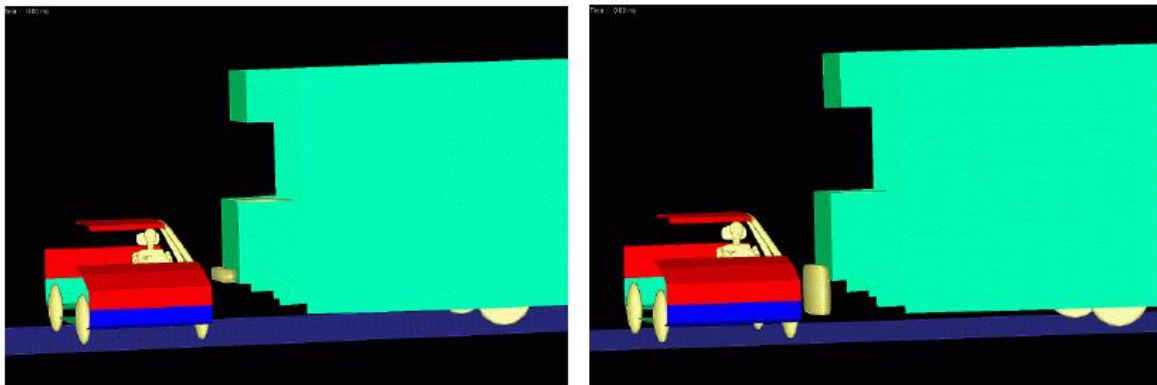


Obr. 2-4: Proniknutí nárazníku do prostoru posádky aut. [17]



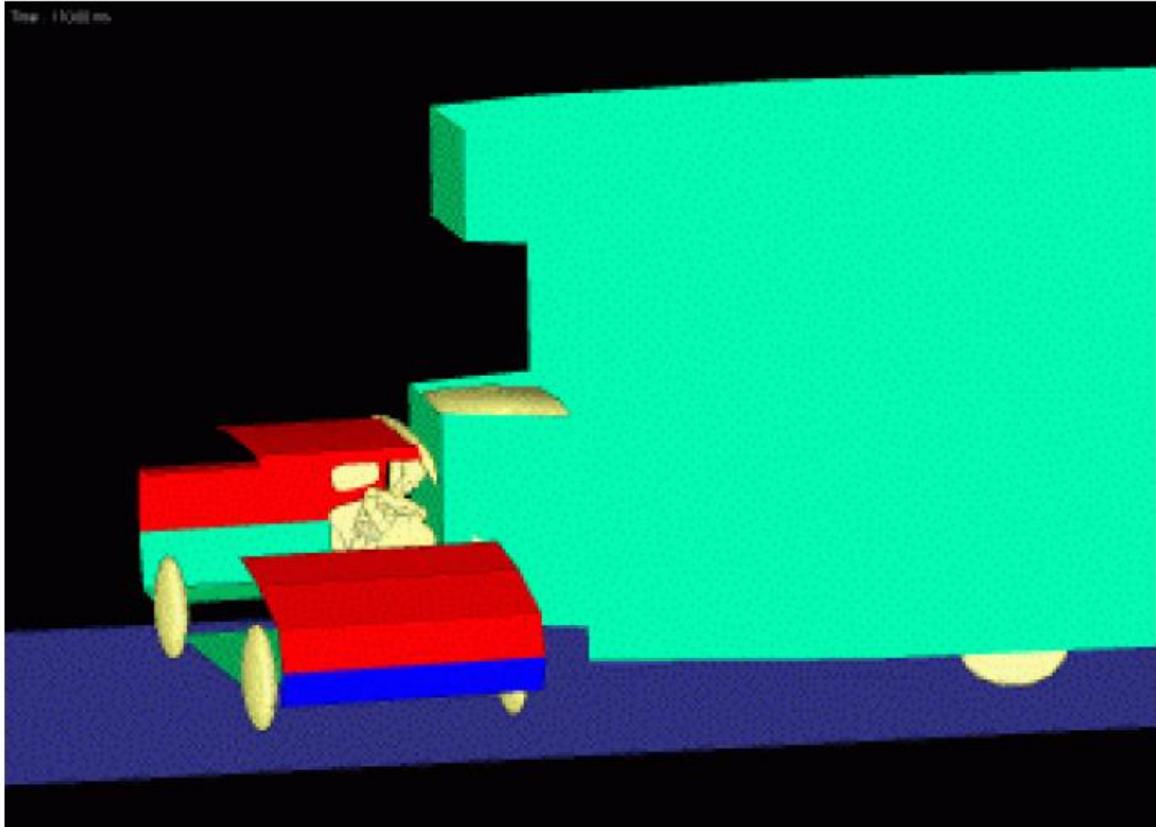
Obr. 2-5: Následek nárazu čela tramvaje do boku auta. [17]

Autoři se v článku dále zabývali možnostmi optimalizace tvaru čela tramvaje pro snížení následků nehod s autem typu Ford Sedan, který si autoři vybrali z důvodu největší prodejnosti na území Austrálie v roce 1997. Pro další výzkum autoři vytvořili tři numerické modely čel tramvajů, se kterými následně provedli simulaci nárazu tramvaje do boku auta. První model odpovídal současnému čelu tramvaje. Druhý model byl oproti prvnímu modelu vybaven modelem podjezdové ochrany (Under run barrier). Poslední model byl vybaven přídatným ochranným prvkem z polystyrenu, který byl umístěn do výšky hlavy řidiče osobního automobilu. První a druhý model jsou znázorněny na obrázku Obr. 2-6. Model auta reprezentoval pouze jeho délkové rozměry a hmotové parametry a byl uvažován jako dokonale tuhý. [17]



Obr. 2-6: Numerický model pro první a druhý případ úpravy čela tramvaje. [17]

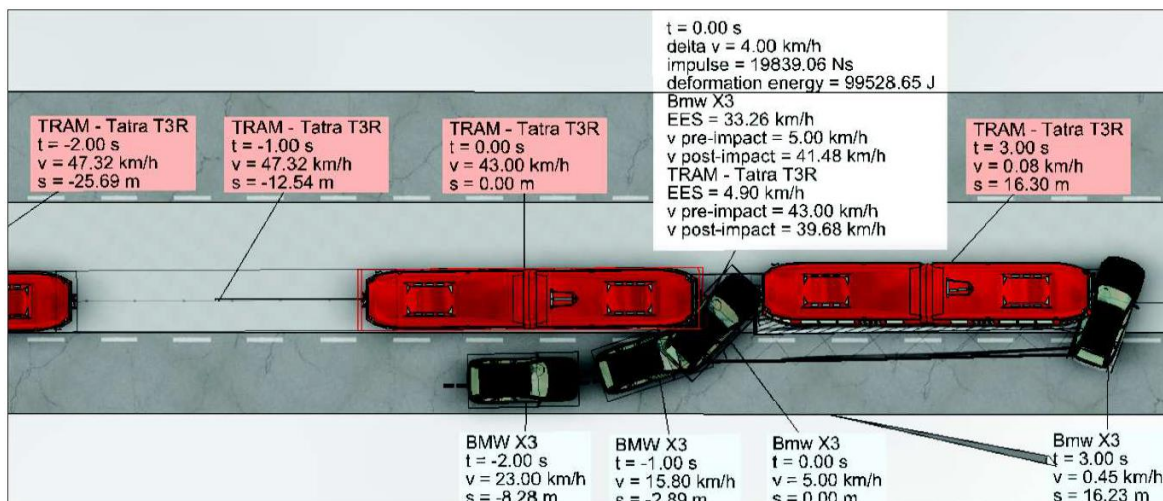
Na obrázku Obr. 2-7 je znázorněn výsledek numerické simulace nárazu tramvaje do boku auta. Tyto simulace autoři provedli pro všechny návrhy čel tramvajů. Ze simulací vyhodnotili deformace čela tramvaje a riziko vzniku poranění hlavy řidiče auta podle biomechanického kritéria HIC, které hodnotí riziko zranění řidiče z průběhu zrychlení jeho hlavy. U prvních dvou variant čel tramvajů došlo při srážce k překročení limitní hodnoty kritéria HIC kvůli kontaktu hlavy řidiče s tuhou strukturou čela tramvaje. Při úvaze polystyrenového ochranného prvku čela tramvaje došlo ke snížení zrychlení hlavy řidiče auta a snížení HIC kritéria pod limitní hodnoty. [17]



Obr. 2-7: Výsledek srážky tramvaje s bokem auta. [17]

Autoři v příspěvku naznačili možný směr výzkumu optimalizace tvaru čela tramvaje pro snížení následků při srážce s auty. Při výzkumu neuvažovali poddajnost samotného auta (uvažovali ho jako dokonale tuhé), což má zásadní vliv na výsledky výzkumu, jelikož při nehodě nedošlo k deformaci boku auta. Při tvorbě výzkumu byla také uvažována starší tramvaj, která nebyla konstruována podle požadavků normy ČSN EN 15227, která předepisuje požadavky na pasivní bezpečnost nově konstruovaných tramvajů. Norma ČSN EN 15227 upravuje požadavky na čela tramvajů a je závazná pro všechny nově konstruované tramvaje. Požadavky normy je nutné při výzkumu v rámci této disertační práce uvažovat.

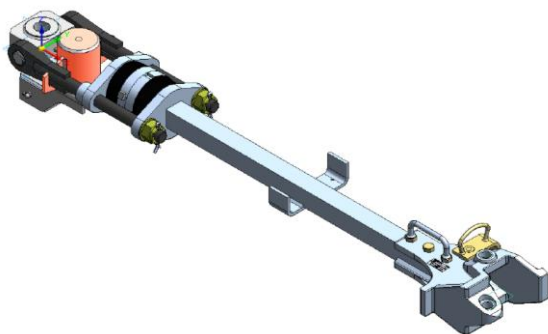
Problematice následků nehod tramvajů s auty se věnovali ve své publikaci [18] i autoři Mikulec a Semela. Ti se ve svém výzkumu zabývali detailním rozбором deseti nehod tramvajů s auty s ohledem na vliv tvaru čela tramvaje na následky nehod. Autoři získali detailní informace k deseti nehodám tramvajů s auty, které se staly v Brně. Podle získaných podkladů autoři nasimulovali v programu Virtual CRASH průběhy jednotlivých nehod, viz obrázek Obr. 2-8. Z výsledků simulací zkoumali průběhy nehodových dějů a vliv konstrukce čela tramvaje a konstrukce automobilu na zranění posádek aut. [18]



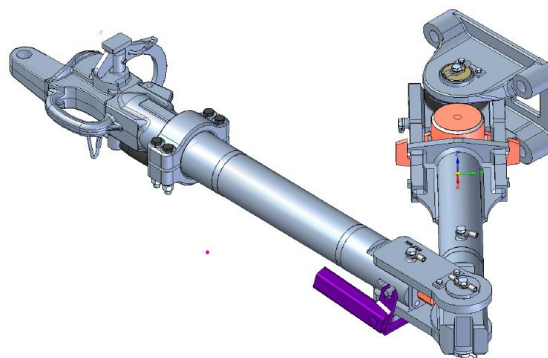
Obr. 2-8: Simulace nehody tramvaje s autem v programu Virtual CRASH. [18]

Z výsledků výzkumu stanovili závěr, že konstrukce čela tramvaje má na následky nehod s auty zásadní vliv. Největší negativní vliv na následky nehody mělo použití předního pevného spřáhla tzv. pražského typu u tramvají typu T3. Při nehodách se toto pevné spřáhlo chovalo jako tuhé beranidlo, které při nárazu tramvaje do boku auta proniklo dveřmi auta do prostoru pro posádku a způsobilo zranění cestujícím. Z provedeného porovnání jednoznačně vyplynula nutnost nahrazovat pevná spřáhla tramvají spřáhly skládacími, viz obrázek Obr. 2-10, či jiným způsobem spřahování. [18]

Autoři se v příspěvku nezabývali možnou optimalizací tvaru čela tramvaje s ohledem na následky nehod, ale pouze porovnali jednotlivé konstrukce tramvají DPMB mezi sebou s ohledem na následky nehod. Jako nejrizikovější prvek na čele tramvaje identifikovali pevná spřáhla, viz obrázek Obr. 2-9, která se u nově konstruovaných tramvají nepoužívají a jsou nahrazována skládacími spřáhly, která jsou umístěná až za deformačními prvky tramvaje, viz obrázek Obr. 2-10. [18], [19]



Obr. 2-9: SPP120 spřáhlo pomocné pevné. [19]

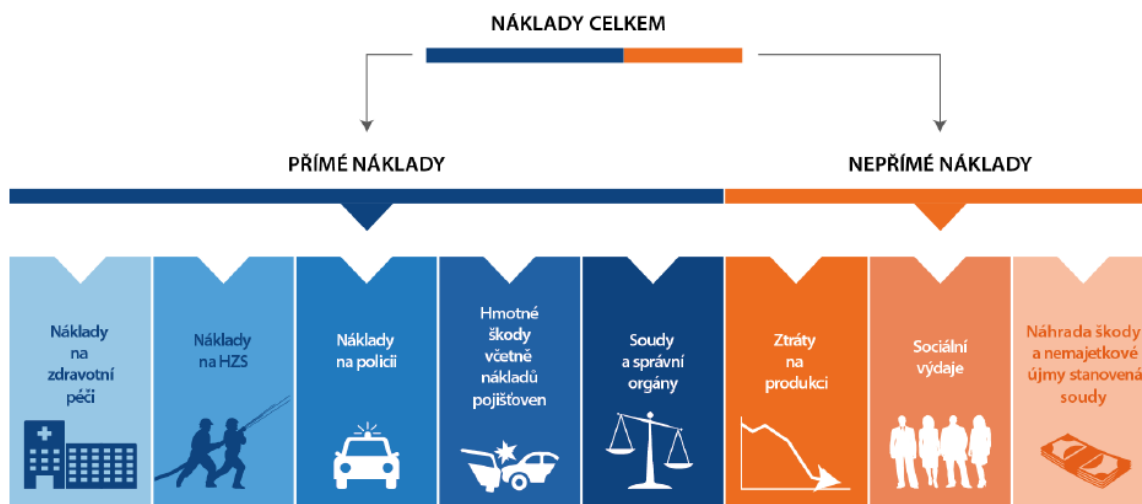


Obr. 2-10: Skládací spřáhlo ve složené pozici. [19]

## 2.1.5 Celospolečenské finanční ztráty

Pro úplnost nástinu problematiky nehodovosti považují za důležité uvést metodiku pro výpočet ztrát při dopravních nehodách [20], kterou vytvořili pracovníci Centra dopravního výzkumu. Tato metodika vznikla proto, že finanční následky nehod nelze zjednodušit pouze na hmotné škody na vozidlech a dopravní infrastrukturu. Do finančních následků nehod je nutné zahrnout finanční ztráty způsobené lehkým a těžkým zraněním nebo úmrtím účastníků nehody, náklady na integrovaný záchranný systém (dále jen IZS), soudy a další. Metodika při výpočtu následků nehody bere v potaz jak ztráty způsobené nehodou (hmotné škody, ztráty na produkci, atd.), tak i související náklady (náklady na IZS, soudy, pojišťovny, náhrada škod, atd.). Schéma rozdělení přímých a nepřímých nákladů je znázorněno na obrázku Obr. 2-11. [20]

V roce 2019 byla vyčíslena cena lidského života podle této metodiky na částku 25 miliard Kč, výše finančních ztrát v důsledku těžkého zranění na 5,6 miliard Kč a lehkého zranění na 810 tisíc Kč. Celkové finanční ztráty vlivem dopravních nehod činily za rok 2019 81,4 miliard Kč. To je přibližně 1,4 % hrubého domácího produktu v ČR v roce 2019. Dopravní nehody způsobují vysoké celospolečenské finanční ztráty, a proto by mělo být snahou výrobců i provozovatelů všech vozidel maximálně zvýšit bezpečnost provozu a snížit následky vzniklých nehod. [20]



Obr. 2-11: Rozdělení nákladů pro výpočet celospolečenských ztrát. [20]

## 2.2 Bezpečnost tramvajových vozidel

V současné době dochází k velkému nárůstu osobní i hromadné dopravy osob ve městech. Z důvodu nemožnosti rozšiřování stávajících komunikací dochází nárůstem dopravy ke zvyšování hustoty dopravního toku, což má za následek i vzrůstající riziko vzniku dopravních nehod vozidel. Na výrobce vozidel (jak silničních, tak i kolejových) jsou proto kladeny požadavky na zvyšování bezpečnosti nově konstruovaných vozidel. [21], [22]

Bezpečnost vozidel lze rozdělit do dvou základních skupin: aktivní a pasivní. Prvky a systémy aktivní bezpečnosti vozidel mají za úkol snižovat riziko vzniku dopravních nehod a prvky a systémy pasivní bezpečnosti vozidel mají za úkol minimalizovat následky vzniklých nehod na cestujících a vozidlech. [22], [23]

Mezi prvky aktivní bezpečnosti tramvají patří například: brzdné systémy vozidel, výhled z vozidla, stav infrastruktury, integrace mezi ostatními druhy dopravy, řídicí a antikolizní systémy (například od firem Bosch Engineering, Continental a Škoda Group, viz obrázek Obr. 2-12), světelná signalizace, autonomní řízení (například od společnosti Siemens Mobility) a další. Výzkum a vývoj prvků a systémů aktivní bezpečnosti zažívá v poslední době velký rozmach. Důvodem je fakt, že je vždy lepší nehodě předcházet než mírnit její následky. Zabránit vzniku nehod podstatnější měrou nebude možné, dokud nebude zaveden autonomní provoz všech vozidel účastnících se provozu. Ani zavedením dokonalejších prvků aktivní bezpečnosti nelze úplně zabránit vzniku dopravních nehod [24], [25]. Tato disertační práce se zabývá problematikou nehodovosti tramvají s auty, tedy pasivní bezpečností, a proto nejsou v této práci prvky aktivní bezpečnosti více rozebírány.



Obr. 2-12: Antikolizní systém od Škoda Group, zdroj: [technickytydenik.cz](http://technickytydenik.cz).

Mezi prvky pasivní bezpečnosti tramvají patří například: deformační prvky, protišplhová ochrana, jednotlivé prvky interiéru tramvají, podjezdová ochrana, tvarování čela tramvaje a další [24], [25]. Jednotlivé prvky pasivní bezpečnosti tramvají jsou dále v práci popsány.

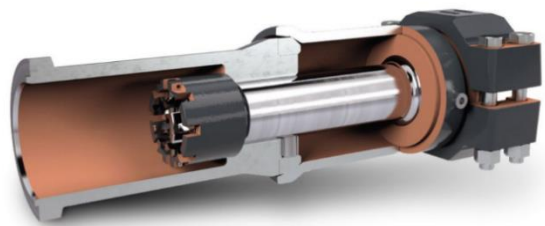
### 2.2.1 Deformační prvky

Deformační prvky jsou první součástí tramvaje, která při nehodě přichází do styku s kolizním vozidlem. Deformační prvky slouží k absorpci deformační energie při kolizích tramvaje s jiným vozidlem. Legislativní požadavky na deformační prvky tramvají jsou definovány v normě ČSN EN 15227 [26].

Nějakým typem deformačních prvků musí být vybaveny všechny nově konstruované tramvaje. Na tramvajích se nejčastěji používají dva typy deformačních prvků, a to buď sestava z ocelového nárazníku a dvou deformačních trubek, viz obrázky Obr. 2-13 a Obr. 2-14, nebo tzv. crush box, viz obrázek Obr. 2-15. Výhodou deformačních trubek je udržení „konstantní“ hodnoty deformační síly po celou délku deformace trubky, viz obrázek Obr. 2-16. Výhodou crush boxů je velká poměrná deformace a možnost navrhnout různou tuhost pro jednotlivé směry zatěžování. Velkou nevýhodou crush boxů může být problematika návrhu vhodné závislosti mezi deformací a silou, viz obrázek Obr. 2-17. [21]



Obr. 2-13: Sestava nárazníku a dvou deformačních trubek, zdroj: [vladan.foto.cz](http://vladan.foto.cz).

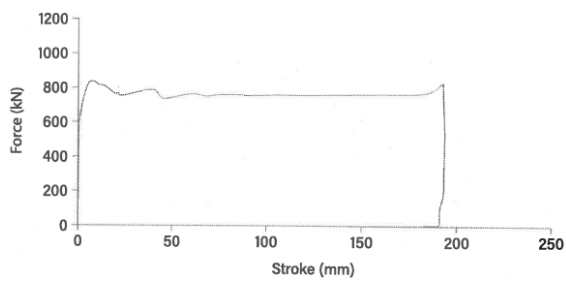


Obr. 2-14: Deformační trubka od firmy Voith, zdroj: [voith.com](http://voith.com).

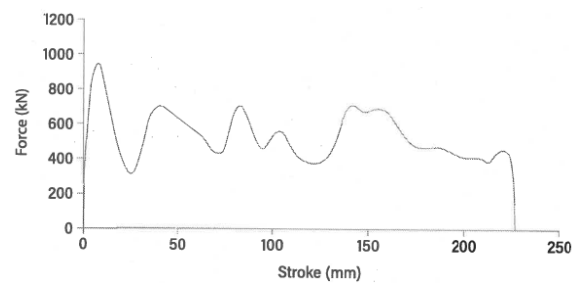




Obr. 2-15: Crush box na tramvaji Urbos 3 od firmy CAF, zdroj: [behance.net/gallery](https://www.behance.net/gallery).



Obr. 2-16: Příklad zatěžující charakteristiky deformační trubky, zdroj: [oleo.co.uk](http://oleo.co.uk)  
Force – Síla, Stroke – Zdvih.



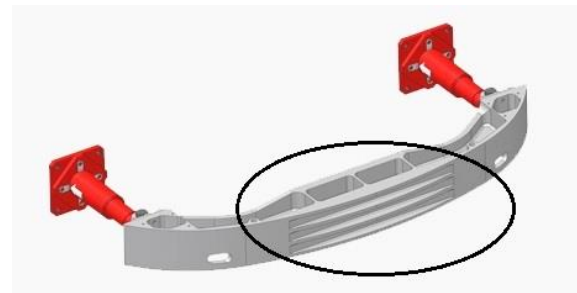
Obr. 2-17: Příklad zatěžující charakteristiky crush boxu, zdroj: [oleo.co.uk](http://oleo.co.uk)  
Force – Síla, Stroke – Zdvih.

## 2.2.2 Protišplhová ochrana

Následkem nehod dvou tramvají občas nastala situace, kdy jedna tramvaj ztratila vlivem nehody kontakt mezi koly a kolejnicí a následně vyšplhala na kolizní tramvaj, viz obrázek Obr. 2-18. Při nehodách, kdy došlo k vyšplhání jedné tramvaje na druhou, došlo statisticky k největším deformacím tramvají a nejzávažnějším následkům na zdraví cestujících. Aby se těmto následkům nehod zabránilo, tak jsou nově konstruované tramvaje podle požadavků normy ČSN EN 15227 vybavovány protišplhovou ochranou, viz obrázek Obr. 2-19. Protišplhová ochrana je nejčastěji řešena žebrováním na náraznících nebo crush boxech, jelikož tyto prvky přicházejí jako první do kontaktu s kolizním vozidlem. [25], [26]



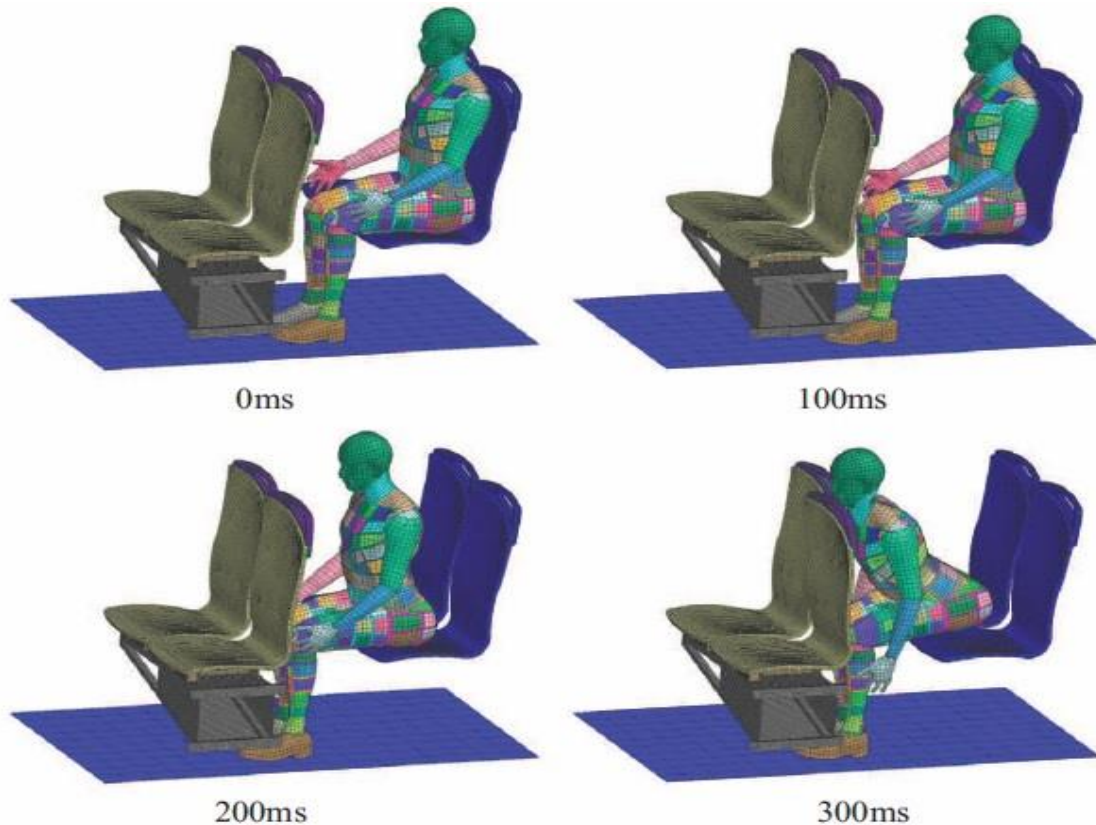
Obr. 2-18: Vyšplhání tramvají při nehodě. [66]



Obr. 2-19: Nárazník tramvaje s protišplhovou ochranou, zdroj: [axtoneglobal.com](http://axtoneglobal.com).

## 2.2.3 Interiér tramvaje

Při dopravní nehodě dochází vlivem nárazu tramvaje do druhého vozidla k náhlé a značné změně její rychlosti. Stojící a sedící cestující uvnitř tramvaje pokračují původní rychlostí ve směru jízdy, dokud nedojde ke kontaktu cestujících s prvky interiéru tramvaje. Každý náraz o prvky v interiéru tramvaje zvyšuje riziko zranění cestujících. V současné době se někteří výzkumníci začali zabývat problematikou chování cestujících uvnitř vozidel při nehodě a rizikem jejich zranění při kontaktu s interiérem vozidla, tedy vlivem tzv. sekundárního nárazu. Problematikou rizika zranění sedících cestujících při nárazu o sedačku se zabýval Ing. Stanislav Špirk Ph.D. ve své disertační práci [27]. Na obrázku Obr. 2-20 je znázorněn průběh simulace pohybu sedícího cestujícího při nehodě a jeho náraz do sedačky. Z výsledků jeho výzkumu vyplynulo, že pouhým zaoblením madel a použitím měkčích materiálů sedaček lze výrazně snížit riziko zranění sedících cestujících. [27]



Obr. 2-20: Pohyb cestujících po nehodě tramvaje. [27]

## 2.2.4 Podjezdová ochrana

Podjezdovou ochranu tramvají lze považovat za prvek aktivní i pasivní bezpečnosti vozidel. Jako prvek aktivní bezpečnosti slouží podjezdová ochrana při jízdě tramvaje k odstraňování větších překážek z tramvajové trati, které by se mohly zaklínit pod tramvají a zapříčinit její vykolejení. Jako prvek pasivní bezpečnosti slouží podjezdová ochrana při nehodě tramvaje s chodcem. Pokud je chodec vlivem nehody sražen pod tramvaj, tak je podjezdovou ochranou zachycen a odstrčen stranou. Tím se sníží riziko zaklínění chodce pod tramvají nebo jeho zranění nebo usmrcení koly tramvaje. Požadavky na parametry podjezdové ochrany jsou uvedeny v technické zprávě [28]. Příklady podjezdových ochran používaných na tramvajích jsou znázorněny na obrázcích Obr. 2-21 a Obr. 2-22. [25]



Obr. 2-21: Podjezdová ochrana tramvaje ŠKODA 15T,  
zdroj: [zpravy.aktualne.cz](http://zpravy.aktualne.cz).



Obr. 2-22: Podjezdová ochrana,  
zdroj: [hubner-group.com](http://hubner-group.com).

## 2.2.5 Tvarování čela tramvaje

Tvarování čela tramvají plnilo dříve pouze vzhledové požadavky designérů. Provedenými výzkumy v oblasti nehodovosti tramvají s chodci bylo však prokázáno, že tvar čela tramvaje má velký vliv na následky střetů tramvají s chodci. Jako vhodnější se jeví čelo tramvaje ve tvaru radlice, viz obrázek Obr. 2-23. U takto tvarovaného čela je chodec po nehodě odhozen mimo osu tramvaje. Naopak pokud má tvar čela tramvaje negativní sklony nebo je svislý, viz obrázek Obr. 2-24, tak při nehodě hrozí, že bude chodec sražen pod tramvaj, kde mu hrozí větší riziko vzniku zranění. Závěry výzkumů byly shrnuty do technické zprávy [28]. Požadavky technické zprávy [28] jsou detailně rozebrány v následující kapitole. [29]



Obr. 2-23: Vhodný tvar čela tramvaje,  
zdroj: [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org).



Obr. 2-24: Nevhodný tvar čela tramvaje,  
zdroj: [trendhunter.com](http://trendhunter.com).

## 2.3 Legislativní požadavky

Nejdůležitějšími normami, z pohledu pasivní bezpečnosti tramvají při srážce s jinými účastníky silničního provozu, jsou pro nově konstruované tramvaje normy ČSN EN 15227 „Požadavky na kolizní odolnost kolejových vozidel“ [26] a ČSN EN 12663+A1 „Pevnostní požadavky na konstrukce skříní kolejových vozidel“ [30].

Dalšími důležitými legislativními předpisy pro řešení této disertační práce je norma ČSN 28 0318 „Průjezdové průřezy tramvajových tratí a obrysy pro vozidla provozovaná na tramvajových drahách“ [31] a technická zpráva CEN/TR 17420 „Vehicle end design for trams and light rail vehicles with respect to pedestrian safety“ [28]. Tyto dva legislativní předpisy definují dovolené zástavbové prostory na čelech tramvají.

V této kapitole uvádím stručný výpis legislativních požadavků na nově konstruované tramvaje z výše uvedených norem.

### 2.3.1 Norma ČSN EN 15227 – Požadavky na kolizní odolnost kolejových vozidel

První verze normy ČSN EN 15227 vznikla v roce 2008 z důvodu velkého počtu nehod kolejových vozidel a vysokého počtu zraněných cestujících a posádek uvnitř KV. V roce 2020 byla vydána nová revize normy, ve které byly doplněny nové poznatky z provozu KV, které byly navrženy podle první verze normy. [26]

Hlavním cílem vzniku normy ČSN EN 15227 bylo snížení následků nehod KV a zajištění bezpečnosti cestujících a posádky uvnitř KV při nehodě. Jedná se tedy o přístup tzv. vlastní ochrany, kdy vozidlo chrání pouze cestující a posádku uvnitř KV a ostatní účastníky silničního provozu bere jako kolizní překážky. [26]

Norma ČSN EN 15227 rozděluje KV do čtyř konstrukčních kategorií odolnosti proti nárazu. Konstrukční kategorie KV jsou definovány podle typu železniční infrastruktury, na kterých je dané KV provozováno, a na typu provozu, jehož je KV účastníkem. Tramvaje jsou normou zařazeny do konstrukční kategorie vozidel C-IV. Jednotlivé konstrukční kategorie jsou uvedeny v tabulce Tab. 2-2. [26]

Tab. 2-2: Konstrukční kategorie KV definované normou ČSN EN 15227. [26]

Kategorie	Definice	Příklady typů vozidel
C-I	vozidla určená k provozu na tratích transevropské sítě, mezinárodních, národních a regionálních tratích (s úroňovými přejezdy)	lokomotivy, osobní vozy a pevné vlakové jednotky
C-II	městská vozidla určená k provozu pouze na vyhrazené železniční infrastruktuře bez vazby na silniční dopravu	vozidla metra
C-III	lehká železniční vozidla určená k provozu v městské, popř. regionální síti, v provozu sdílených tratí a s vazbou na silniční dopravu	tramvajové soupravy, předměstská tramvaj
C-IV	lehká železniční vozidla určená k provozu ve vyhrazených městských sítích s vazbou na silniční dopravu	tramvajová vozidla

Pro každou konstrukční kategorii KV jsou normou definovány scénáře srážek, na které musí být nově konstruované KV navrhováno a zkoušeno. Parametry jednotlivých scénářů srážek byly stanoveny tak, aby tyto scénáře co nejpřesněji reprezentovaly nehody, jichž se dané KV v provozu nejčastěji účastní. [26]

Pro tramvaje jsou normou předepsány tyto scénáře srážek:

- čelní náraz dvou totožných tramvajů,
- náraz tramvaje do pevné překážky o hmotnosti 3 tuny,
- náraz tramvaje do překážky o hmotnosti 7,5 tun.

### **První scénář srážky – čelní náraz dvou totožných tramvajů**

První scénář srážky reprezentuje čelní náraz dvou tramvajů. Čelní nehody dvou tramvajů nejsou tak časté, ale kladou největší nároky na velikost absorbované deformační energie a funkčnost protišplhových zařízení. Nejčastější příčinou těchto nehod je nepozornost řidiče zadní tramvaje, kdy pozdě zareaguje na před ním stojící tramvaj a nestihne včas zastavit.

Jako příklad lze uvést nehodu z 15. 1. 2021 z Ostravy, viz obrázek Obr. 2-25, při které se srazily dvě tramvaje typu Stadler Tango NF2. Nehoda byla způsobena řidičem zadní tramvaje, který se plně nevěnoval řízení a následně nebyl schopný včas zastavit před tramvají stojící vpředu. Následkem nehody došlo ke zranění 10 cestujících v obou tramvajích. [9], [26]

Scénář čelního nárazu dvou totožných tramvají je normou definován takto:

- první tramvaj stojí odbrzděná v přímé trati,
- druhá tramvaj se rozjede rychlostí 15 km/h,
- druhá tramvaj narazí zezadu do první tramvaje.

Pro ověření odolnosti tramvaje proti šplhání je nutné při numerických simulacích uvažovat počáteční přesazení jedoucí tramvaje vůči stojící tramvaji o 40 mm ve svislém směru. [26]



Obr. 2-25: Čelní nehoda dvou tramvají v Ostravě, zdroj: [moravskoslezsky.denik.cz](http://moravskoslezsky.denik.cz).

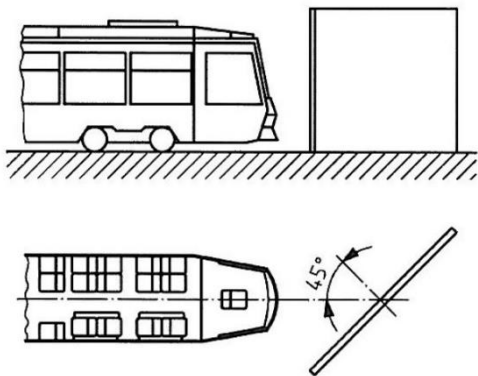
### **Druhý scénář srážky – náraz do pevné překážky o hmotnosti 3 tuny**

Druhý scénář srážky reprezentuje náraz tramvaje do auta. Nehody tramvají s auty se nejčastěji stávají na křížení tramvajové trati s vozovkou pro auta. Řidiči aut nedají při přejíždění tramvajové trati přednost souběžně nebo protiběžně jedoucí tramvaji a vjedou na tramvajovou trať. Schéma druhého scénáře srážky je znázorněno na obrázku Obr. 2-26.

Jako příklad lze uvést nehodu z 5. 10. 2021 z Prahy, viz obrázek Obr. 2-27, kdy došlo k nehodě tramvaje typu ŠKODA 15T s autem. Nehoda byla způsobena řidičem auta, který nedal přednost projíždějící tramvaji. Následkem nehody došlo ke zranění 3 cestujících uvnitř auta. [26], [32]

Scénář nárazu tramvaje do pevné překážky o hmotnosti 3 tuny je normou definován takto:

- tuhá překážka, reprezentující auto, stojící pod úhlem  $45^\circ$  přes celou šířku a výšku tramvaje,
- tuhé překážce jsou dovoleny posuvy v osách X a Y. Rotace kolem svislé osy Z není překážce dovolena,
- tramvaj se rozjede rychlostí 25 km/h,
- tramvaj čelně narazí do tuhé překážky.



Obr. 2-26: Schéma druhého scénáře srážky. [26]



Obr. 2-27: Nehoda tramvaje s autem. [32]

### **Třetí scénář srážky – náraz tramvaje do deformovatelné překážky o hmotnosti 7,5 tun**

Třetí scénář srážky reprezentuje náraz tramvaje do NA nebo do autobusu, viz obrázek Obr. 2-28. Tento scénář byl definován v nové revizi normy ČSN EN 15227 v roce 2020. Důvodem vzniku tohoto scénáře byly těžké následky nehod tramvajů s NA a autobusy. Při tomto typu nehod je kontaktní bod mezi vozidly ve výšce pultu řidiče tramvaje, tedy v místech, kde dřívější tramvaje nebyly dimenzovány na náraz s jiným vozidlem. Geometrie překážky tohoto scénáře, viz obrázek Obr. 2-29, vhodně reprezentuje tuto skutečnost. [26]

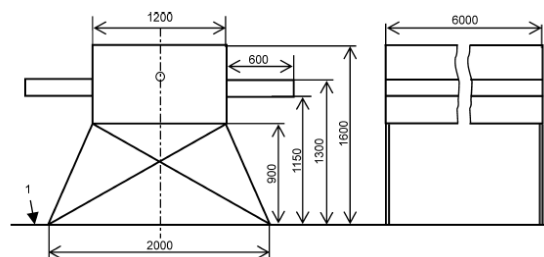
Scénář nárazu tramvaje do deformovatelné překážky vážící 7,5 tuny je normou definován takto:

- deformovatelná překážka, reprezentující NA nebo autobus, stojí kolmo na tramvajovou trať příčně vychýlena o 1 000 mm od osy koleje,
- deformovatelné překážce jsou dovoleny posuvy v osách X a Y a rotace kolem osy Z,
- tramvaj se rozjede rychlostí 15 km/h,
- tramvaj čelně narazí do deformovatelné překážky.





Obr. 2-28: Nehoda tramvaje s NA, zdroj: [novinky.cz](http://novinky.cz).



Obr. 2-29: Schéma deformovatelné překážky. [26]

### Kolizní hmotnost

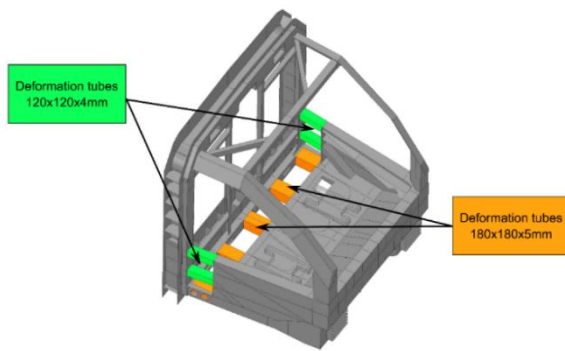
Hmotnost a kinetickou energii KV při nehodě značně ovlivňuje obsazenost KV cestujícími. Pro jednoznačnost definuje norma pojem kolizní hmotnost tramvaje, pro kterou mají být provedeny simulace ověřující kolizní odolnost. Kolizní hmotnost je dána vztahem:

$$m_{kol} = m + m_{cest} * \frac{p_{sed}}{2} \quad (2-1)$$

Kde:  $m_{kol}$  – kolizní hmotnost tramvaje,  $m$  – hmotnost prázdné tramvaje,  $m_{cest}$  – hmotnost cestujících a  $p_{sed}$  – maximální počet sedících cestujících v tramvaji.

### Ověřování odolnosti proti nárazu

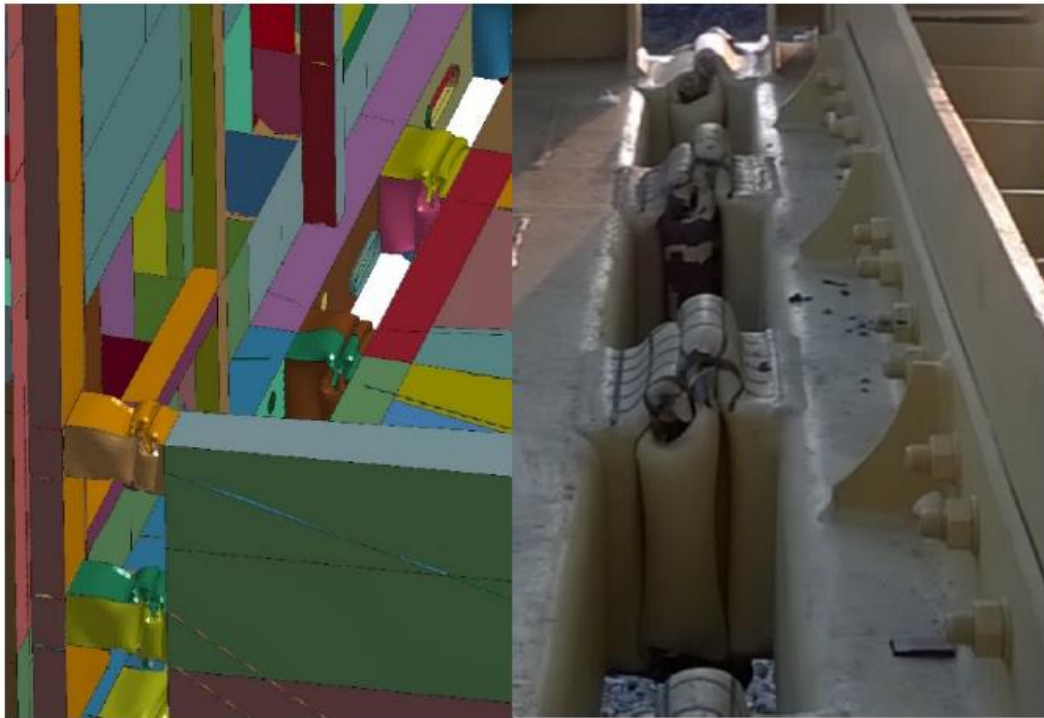
Většina nově produkováných tramvajů se vyrábí v malých sériích v řádu desítek kusů, kdy cena za jednu tramvaj je v řádu desítek miliónů korun. Poškození hotové tramvaje pro průkaz kolizní odolnosti by bylo velmi nákladné. Proto se při schvalování nově konstruovaných tramvajů prokazuje odolnost proti nárazu pomocí numerických simulací jednotlivých scénářů srážek a není nutné provádět reálné zkoušky nárazu celé tramvaje, viz obrázky Obr. 2-30 až Obr. 2-32. Pro ověření správnosti vstupů numerických modelů je nutné provést validaci simulačních modelů deformačních prvků vozidel podle zátěžových zkoušek reálných deformačních prvků, viz obrázky Obr. 2-33 a Obr. 2-34. [26], [33]



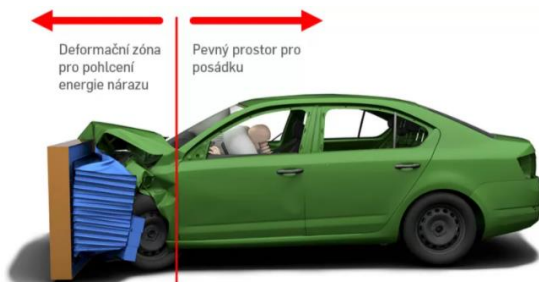
Obr. 2-30: Numerický model kabiny elektrické jednotky. [33]  
Deformation tubes – Deformační trubky.



Obr. 2-31: Model kabiny elektrické jednotky. [33]



Obr. 2-32: Porovnání výsledků deformace deformačních trubek numerické simulace a zkoušky. [33]



Obr. 2-33: Numerická simulace nárazu auta,  
zdroj: [bezpecneesty.cz](http://bezpecneesty.cz).



Obr. 2-34: Reálná zkouška nárazu auta,  
zdroj: [bezpecneesty.cz](http://bezpecneesty.cz).

### **2.3.2 Norma ČSN EN 12663 – Pevnostní požadavky na konstrukce skříní kolejových vozidel**

Norma ČSN EN 12663 definuje hodnoty zatížení hrubých staveb KV, jež musí být schopny přenést bez vzniku trvalé deformace po celou dobu své životnosti. Norma ČSN EN 12663 rozděluje KV do tří hlavních konstrukčních skupin podle provozního typu KV (lokomotivy, vozidla osobní dopravy a nákladní vozy) a pak dále do kategorií podle provozu KV. Tramvaje jsou normou zařazeny do konstrukční kategorie P-IV (např. lehká vozidla metra a vozidla tramvajové rychlodráhy) nebo P-V (např. tramvajová vozidla). [30]

Pro kategorii P-IV jsou normou předepsána tato zatížení hrubých staveb:

- podélná síla v prostoru nárazníku a/nebo spřáhel: 400 kN,
- tahová síla na uchycení spřáhla: 300 kN.

Pro kategorii P-V jsou normou předepsána tato zatížení:

- podélná síla v prostoru nárazníku a/nebo spřáhel: 200 kN,
- tahová síla na uchycení spřáhla: 150 kN.

Dopravní podniky většinou po výrobcích tramvají požadují, aby nové tramvaje konstruovaly podle požadavků skupiny P-IV, u které jsou větší požadavky na zátěžné síly.

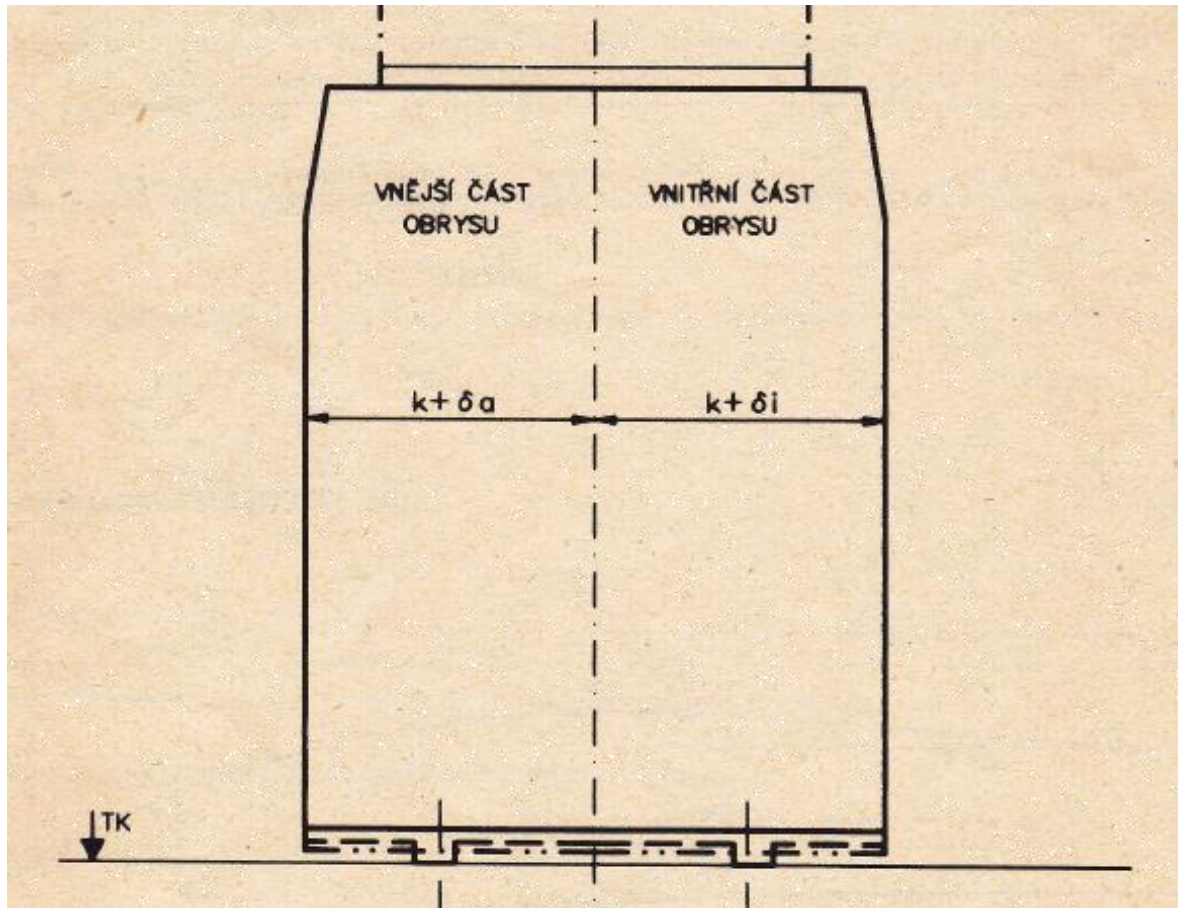
### **2.3.3 Norma ČSN 28 0318 – Průjezdne průřezy tramvajových tratí a obrysy pro vozidla provozovaná na tramvajových drahách**

Při konstrukci nových tramvají je velice důležité zajistit, aby při jejich provozu nedocházelo ke kolizím s okolní infrastrukturou či protijedoucími tramvajemi. Pro zajištění provozu tramvají bez rizika kolize s okolní infrastrukturou definuje norma ČSN 28 0318 obrysy pro konstrukci tramvají. Tyto obrysy omezují maximální možné rozměry tramvají v jednotlivých příčných řezech. [31]

Norma definuje tři různé druhy obrysů:

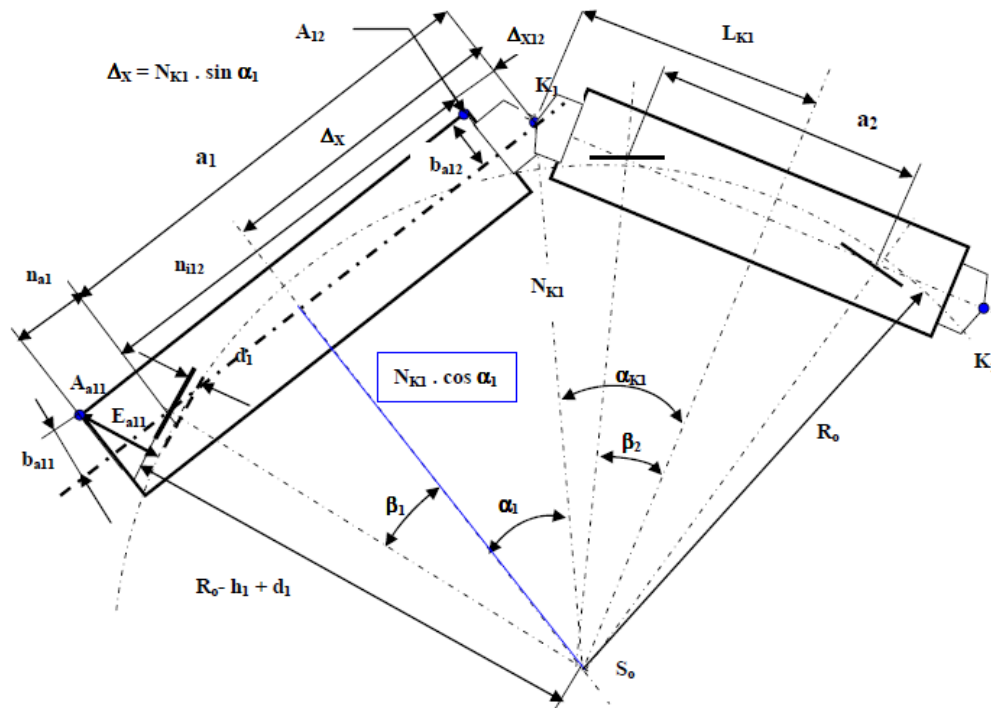
- obrys pro vozidla v přímé trati,
- obrys pro vozidla v oblouku,
- obrys pro vozidla při přechodu z přímé do oblouku.

Obrys pro vozidla v přímé trati a směrových obloucích o poloměru 1 000 m a větším je definován jako symetrický kolem střední osy. Obrysy pro vozidla ve směrových obloucích menších než 1 000 m jsou rozšířeny ve vnitřní části obrysu o  $\Delta_i$  a ve vnější části obrysu o  $\Delta_a$ , viz obrázek Obr. 2-35. Velikosti jednotlivých rozšíření jsou závislé na poloměru směrového oblouku. [31]



Obr. 2-35: Obrys pro tramvaje ve směrovém oblouku. [31]

Norma ČSN 28 0318 definuje vztahy pro výpočet vnitřního a vnějšího vybočení skříní čtyřnápravových tramvají. Tramvaje vyráběné v současnosti jsou však většinou vícečlánkové. Články jsou mezi sebou spojeny klouby v mezivozových přechodech. Výpočet obrysů těchto tramvají však norma nedefinuje [24]. Problematikou výpočtu obrysu článkových tramvají se ve své habilitační práci zabýval doc. Ing. Josef Kolář, CSc., viz obrázek Obr. 2-36 [34]. Tato práce může posloužit jako podklad pro výpočet obrysů vybraných koncepcí článkových tramvají.



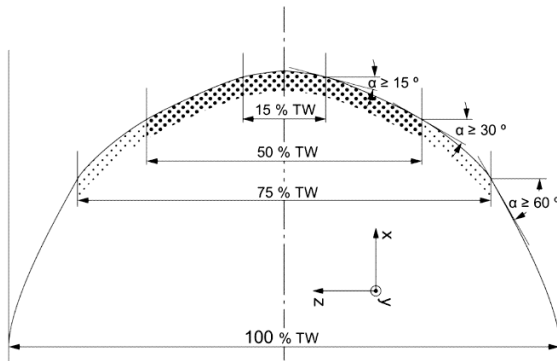
Obr. 2-36: Schéma vnějšího vybočení kabiny tříčlánkové tramvaje. [34]

### 2.3.4 Technická zpráva CEN/TR 17420 – Vehicle end design for trams and light rail vehicles with respect to pedestrian safety

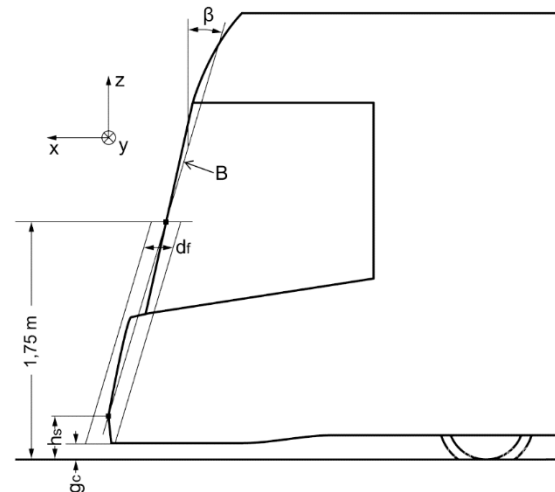
Technická zpráva vznikla z důvodu snahy minimalizovat následky nehod tramvají s chodci, které v současnosti bohužel často končí těžkým zraněním nebo úmrtím chodců. Technická zpráva uvádí postup, jak navrhovat tvar čel tramvají s ohledem na snížení následků nárazu tramvaje do chodce, snížení rizika sražení chodce pod tramvaj a snížení rizika přejetí sraženého chodce tramvají. Technická zpráva se zabývá problematikou primárního a terciárního nárazu tramvaje s chodcem. Sekundární náraz není ve zprávě řešen, jelikož jeho průběh a následky jsou ovlivněny okolím nehody, které nelze předvídat a konstrukcí tramvaje ovlivnit. [28]

Tvarem čela zpráva definuje dovolené zástavbové prostory vybavení na čelech tramvají. Proto jsou v této disertační práci uvedeny pouze požadavky zprávy týkající se tvaru čela.

Pro snížení následků nehod tramvaje s chodcem je nutné zajistit odražení chodce při nehodě do strany, ne před čelo tramvaje. Pro splnění tohoto předpokladu zpráva doporučuje navrhovat čelo tramvaje s různým sklonem v rovinách XY a XZ tramvaje. Doporučené sklony jsou uvedeny na obrázcích Obr. 2-37 a Obr. 2-38 a jednotlivé veličiny jsou vysvětleny v tabulce Tab. 2-3. [28]



Obr. 2-37: Doporučený sklon čela tramvaje v rovině XY. [28], TW – celková šířka



Obr. 2-38: Doporučený sklon čela tramvaje v rovině XZ. [28]

Tab. 2-3: Parametry definující doporučené sklony čel tramvajů na obrázcích Obr. 2-37 a Obr. 2-38. [28]

Parametr	Definice
$h_s$	$h_s$ odpovídá výšce nejvyššího bodu na čele tramvaje.
$\alpha$	úhel $\alpha$ je mezi osou y a tečnou k čelu tramvaje.
čára B	čára B je definována bodem $h_s$ a horním bodem dopadové plochy.
$\beta$	úhel $\beta$ definuje sklon čáry B vůči svislé ose z, $\beta \geq 10^\circ$ .
$d_f$	$d_f$ definuje rozměry tolerančního pásma od čáry B. Všechny body dopadové plochy musí ležet v tomto tolerančním pásmu. $d_f \leq 250 \text{ mm}$ .
$g_c$	$g_c$ odpovídá vůli mezi spodkem tramvaje a TK.

## 2.4 Mechanismus nárazu vozidel

Porozumění mechanismu nárazu vozidel je důležité pro správné pochopení silového působení mezi vozidly při nárazu a hodnoty zrychlení, které působí na cestující uvnitř kolizních vozidel. Pro zjednodušený popis mechanismu nárazu dvou vozidel lze použít vztahy klasické mechaniky. Z nich lze stanovit požadované hodnoty energie, kterou musí být deformační prvky vozidel schopny pohltit, zdvihy deformačních prvků i změny rychlostí jednotlivých kolizních vozidel. [22], [35]

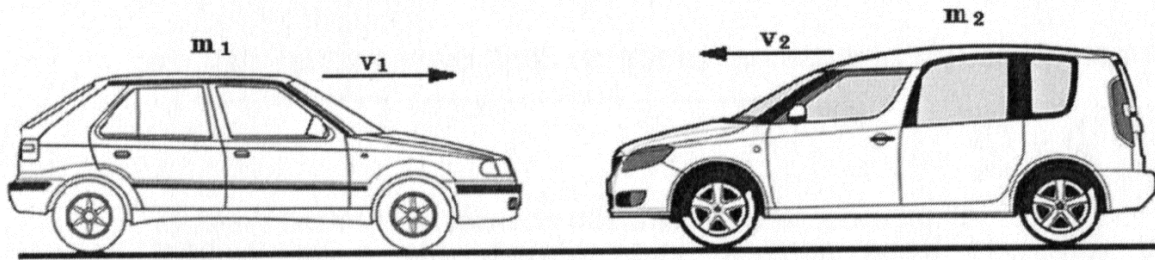
Nárazy vozidel lze obecně rozdělit na dva případy:

- náraz vozidla do pevné bariéry,
- náraz dvou stejných/různých vozidel.

Náraz vozidla do pevné bariéry reprezentuje náraz například do zdi domu, kdy po nárazu bude rychlost kolizního vozidla nulová. Náraz do pevné bariéry je velice důležitý pro návrh deformačních prvků SMV. Požadavky na ověření bezpečnosti SMV při tomto typu nárazu jsou popsány v předpisu EHK/OSN č. 94 [36]. Náraz do pevné bariéry neodpovídá žádnému předepsanému scénáři srážek v normě ČSN EN 15227 pro tramvaje [37], a proto zde nebude mechanismus tohoto nárazu více rozebírán.

### 2.4.1 Náraz dvou vozidel

Autoři v publikaci [38] uvádějí odvození vztahu pro výpočet rychlosti dvou vozidel po nárazu ze zákona o zachování hybnosti, tedy že součet hybností vozidel před nehodou se rovná součtu hybností po nehodě. Odvození bylo provedeno pro dvě vozidla s různou hmotností a rychlostí v okamžiku nárazu, viz obrázek Obr. 2-39. Vztah (2-2) popisuje čelní náraz dvou vozidel. Pokud by se jednalo o náraz zezadu, tak by se levá strana vztahu (2-2) upravila na součet daných členů, neboť rychlost zadního vozidla by působila ve stejném směru jako rychlost předního vozidla. Pro boční náraz by byl vztah shodný jako pro čelní náraz, pouze by se rychlost jednoho vozidla uvažovala jako nulová. [38]



Obr. 2-39: Čelní náraz dvou vozidel. [22]

$$m_1 * v_1 - m_2 * v_2 = (m_1 + m_2) * v_{12} \quad (2-2)$$

kde:  $m_{1,2}$  hmotnost vozidla 1 a 2 [kg],

$v_{1,2}$  absolutní hodnota nárazové rychlosti vozidla 1 a 2 [ $m * s^{-1}$ ],

$v_{12}$  rychlost vozidel po nárazu [ $m * s^{-1}$ ].

Úpravou vztahu (2-2) autoři vyjádřili vztah pro výpočet rychlosti vozidel 1 a 2 po nárazu:

$$v_{12} = \frac{m_1 * v_1 - m_2 * v_2}{m_1 + m_2} \quad (2-3)$$

Vozidla se po nárazu pohybují rychlostí  $v_{12}$  ve směru vozidla, které mělo před nárazem větší hybnost. V publikaci [39] autoři doplňují vztahy pro výpočet změn rychlostí obou vozidel  $\Delta v_1$  a  $\Delta v_2$ . Při odvození předpokládali větší hmotnost vozidla 1 než vozidla 2. [39]

$$\Delta v_1 = v_1 - v_{12} = \frac{m_2 * (v_1 + v_2)}{m_1 + m_2} \quad (2-4)$$

$$\Delta v_2 = v_2 + v_{12} = \frac{m_1 * (v_1 + v_2)}{m_1 + m_2} \quad (2-5)$$

Z podílu vztahů (2-4) a (2-5) vyplývá, že změna rychlosti vozidel je úměrná převrácenému poměru hmotností vozidel. Tedy, že čím větší je rozdíl v hmotnosti kolizních vozidel, tak tím větší bude i změna rychlosti a velikosti zrychlení lehčího vozidla. Větší zrychlení působící na vozidlo zvyšuje riziko zranění cestujících vozidel. Měla by být snaha zabránit kolizím vozidel s velkými rozdíly jejich hmotností. [39]

$$\frac{\Delta v_2}{\Delta v_1} = \frac{m_1}{m_2} = \mu \quad (2-6)$$



## 2.5 Kompatibilita vozidel při nárazu

Tato kapitola shrnuje poznatky v oblasti kompatibility SMV. Norma ČSN EN 15227, která popisuje požadavky na pasivní bezpečnost nově konstruovaných KV, vznikla z důvodu zvýšení bezpečnosti cestujících a posádek KV. Jedná se tedy o přístup tzv. vlastní ochrany, kdy vozidlo chrání svými pasivními prvky pouze cestující v daném vozidle. Z důvodu snahy o zvýšení bezpečnosti na silnicích a snížení rizika vzniku zranění při nehodách se v poslední době u vozidel zavádí přístup tzv. partnerské ochrany. Kdy vozidlo při nehodě má chránit svou konstrukcí i cestující v kolizním vozidle. Jako příklad lze u KV uvést technickou zprávu CEN/TR 17420 [28], která popisuje návrh čel tramvají s ohledem na zvýšení ochrany chodců při nehodě s tramvají, a u SMV uvést předpis ES č. 78/2009 [40], který předepisuje požadavky na nově konstruované SMV z hlediska ochrany chodců při čelním střetu. [22], [26]

Přístup zvyšování partnerské ochrany vozidel se obecně nazývá kompatibilitou vozidel při nehodě. Pojem kompatibilita vozidel lze vysvětlit tak, že je to snaha o zajištění stejné bezpečnosti cestujících v různých kolizních vozidlech. Výzkum v oblasti zvýšení kompatibility vozidel byl poprvé řešen u SMV již v roce 1970, bohužel nebyl do dnešní doby uspokojivě vyřešen. [41]

Kompatibilitu vozidel lze rozdělit do tří oblastí: [41]

- kompatibilita hmotností vozidel,
- kompatibilita tuhostí vozidel,
- kompatibilita geometrie vozidel.

### 2.5.1 Kompatibilita hmotností vozidel

Vysoký rozdíl hmotností kolizních vozidel vede k velkým změnám rychlostí a zrychlení lehčích vozidel při nehodě. Tento závěr vychází ze vztahu (2-5), který popisuje změnu rychlosti lehčího vozidla při nehodě. Pro názornost problematiky uvádějí autoři v publikaci [39] příklad čelního nárazu auta o hmotnosti  $m_1 = 1\,800\text{ kg}$  s kamionem o hmotnosti  $m_2 = 12\,000\text{ kg}$  při počáteční rychlosti obou vozidel  $v_1 = v_2 = 50\text{ km/h}$ . Při úvaze dokonalého nárazu se budou obě vozidla po nehodě pohybovat rychlostí  $v_{12} = 37\text{ km/h}$  ve směru jízdy kamionu. Změna rychlosti kamionu je  $\Delta v_2 = 13\text{ km/h}$ , což má za následek nízké riziko vzniku zranění řidiče kamionu. Zatímco změna rychlosti auta je  $\Delta v_1 = 87\text{ km/h}$ . Z porovnání je patrné, že při nehodě bude posádce auta hrozit větší riziko zranění než posádce kamionu. [39]

Autoři se v publikaci [39] detailněji věnovali problematice nárazů dvou vozidel s větším rozdílem hmotnosti. Ze závěrů jejich výzkumu vyplynulo, že riziko vzniku zranění řidičů při nehodě různě těžkých vozidel není závislé pouze na vlivu poměrů hmotností obou vozidel, ale je potřeba uvažovat i další parametry nehody. [39]

Pro zpřesnění výpočtu rizika vzniku zranění řidičů vozidel zavedli autoři v publikaci [39] první zákon nárazu dvou vozidel, který dává do souvislosti vztah mezi rizikem úmrtí řidiče jednoho vozidla vůči řidiči druhého vozidla, rozdílem hmotností obou vozidel, směrem nárazu a dalšími faktory ovlivňující následky nehody. Zákon byl odvozen pro nehody dvou SMV, ale předpoklady zavedené při jeho odvození ho umožňují aplikovat i pro nehody dvou vozidel s velkým rozdílem hmotností, tedy například nehodu tramvaje a auta. [39]

První zákon nárazu dvou vozidel je dán vztahem:

$$R = \alpha * \mu^\lambda \quad (2-7)$$

- kde:  $R$  riziko úmrtí řidiče vozidla 2 vůči řidiči vozidla 1,  
 $\alpha$  koeficient reflektující další podmínky nehody (směr, věk, pohlaví, atd.),  
 $\lambda$  koeficient reflektující další podmínky nehody (směr, věk, pohlaví, atd.),  
 $\mu$  poměr hmotností kolizních vozidel podle vztahu (2-6).

Hodnoty koeficientů  $\alpha$  a  $\lambda$  pro různé typy nehod jsou vypsány v tabulce Tab. 2-4.

Tab. 2-4: Hodnoty koeficientů  $\alpha$  a  $\lambda$ . [39]

	$\alpha$	$\lambda$
<b>čelní vs čelní náraz</b>	1	3,58
<b>pravý vs čelní náraz</b>	4,53	3,47
<b>levý vs čelní náraz</b>	10,08	3,24
<b>zadní vs čelní náraz</b>	1,09	3,71
<b>žena vs muž</b>	1,16	3,57
<b>věk &gt; 40 vs ≤25</b>	3,15	4,01

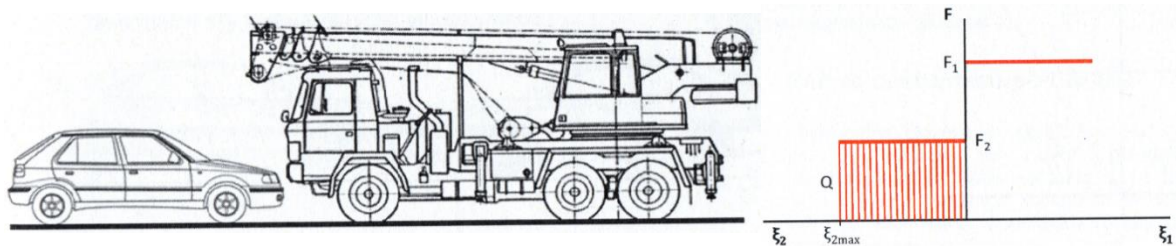
Z tabulky tab. 2-4 je patrné, že řidič má při nárazu do levé strany auta 10,08 krát větší riziko smrtelného zranění než řidič při čelním nárazu, zatímco při nárazu do pravé strany je riziko pouze 4,53 krát větší. Pro spolujezdce sedícím na pravém předním sedadle jsou hodnoty rizika obrácené. Náraz z boku je pro řidiče nebezpečnější než zepředu. Boky karoserie umožňují malé deformace, na kterých se musí absorbovat energie nárazu, což způsobí velké zrychlení cestujících, které může přesáhnout dovolené biomechanické limity. [22], [39]

## 2.5.2 Kompatibilita tuhostí vozidel

Tuhost deformačních prvků jednotlivých vozidel musí být navržena tak, aby při dané tuhosti plnilo vozidlo legislativní požadavky na pasivní bezpečnost. Pro KV jsou požadavky na deformační prvky definovány v normě ČSN EN 15227 [26] a pro SMV v předpisech EHK/OSN č. 94 [36] a č. 95 [42].

Pro zjednodušení lze při úvaze stejného zdvihu deformačních prvků a stejné rychlosti nárazu zavést předpoklad, že čím je vozidlo těžší, tedy má při nárazu větší kinetickou energii, tím musí mít i tužší deformační prvky. Při nárazu lehčího a těžšího vozidla tak může nastat situace, kdy nárazová síla působící na vozidla při nehodě nebude tak vysoká, aby došlo k deformaci těžšího vozidla a proto veškerou energii absorbuje lehčí vozidlo.

Na obrázku Obr. 2-40 je znázorněn náraz auta (vozidlo 2) do těžkého NA (vozidlo 1) a průběh deformací obou vozidel. Stejný průběh deformace vozidel lze předpokládat při nehodě tramvaje s autem. [41]



Obr. 2-40: Čelní náraz auta do těžkého NA. [22]

Zvýšení kompatibility tuhostí tramvají při srážce s auty lze provést dvěma přístupy:

- zvýšení tuhosti lehčího vozidla (auta),
- snížením tuhosti těžšího vozidla (tramvaje).

Zvýšení kompatibility tuhostí pomocí zvýšení tuhosti lehčího vozidla (auta) je obtížné a špatně proveditelné. Větší tuhost deformačních prvků povede k větším hodnotám zrychlení aut při nárazových testech a tím i zhoršení vyhodnocovacích biomechanických kritérií člověka a zvýšení rizika vzniku závažných zranění cestujících v autech. Tato úprava je proti smyslu výzkumu této práce, a proto zde není více rozebírána. [41]

Zvýšení kompatibility tuhostí pomocí snížení tuhosti těžšího vozidla (tramvaje) je možné, ale při návrhu je nutné stále plnit legislativní požadavky na pasivní bezpečnost daného vozidla. [41]

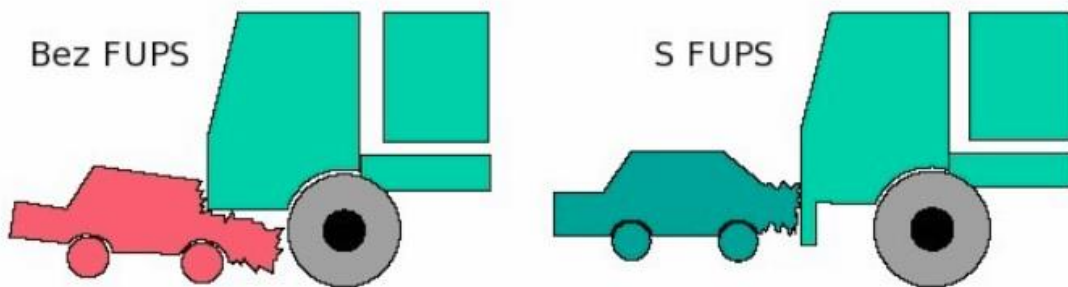
### 2.5.3 Kompatibilita geometrie vozidel

Kompatibilita geometrie vozidel se začala nejdříve řešit u NA. Z důvodu rozdílné geometrie (výšky nárazníků nad vozovkou) docházelo při nehodě aut s NA k zajetí aut pod NA. Následky těchto typů nehod jsou pro auta značně devastující a hrozí při nich velké riziko těžkého zranění nebo úmrtí cestujících v autech. Z následků nehody znázorněných na obrázku Obr. 2-41 je patrné, že z důvodu rozdílného výškového umístění deformačních prvků nad vozovkou nedošlo při nehodě ke kontaktu deformačních prvků vozidel účastnících se nehody. Při nárazu došlo ke kontaktu tuhé struktury návěsu NA s relativně měkkou strukturou kapoty a čelního skla auta, což mělo za následek průnik tuhé struktury návěsu do prostoru pro cestující auta a k jeho kompletní destrukci. [41], [43]



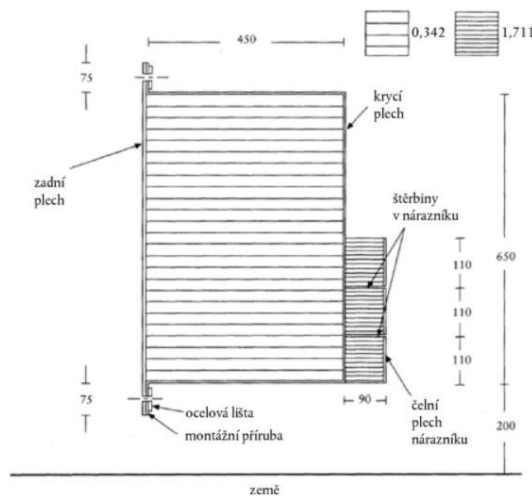
Obr. 2-41: Následky nehody auta s NA, zdroj: [idnes.cz/zpravy](http://idnes.cz/zpravy).

Problém rozdílné pozice nárazníků při nárazu aut do NA byl vyřešen zavedením systému FUPS (Front Under-run Protection System) v přední a zadní části NA. Systém FUPS se skládá z deformačních prvků, které jsou umístěny ve výšce deformačních prvků aut. Při nehodě dochází ke kontaktu deformačních prvků aut s prvky FUPS, funkčnosti obou systémů a zamezení zajetí aut pod NA. Princip systému FUPS je znázorněn na obrázku Obr. 2-42. [43]



Obr. 2-42: Průběh nehody auta s NA bez FUPS a s FUPS. [43]

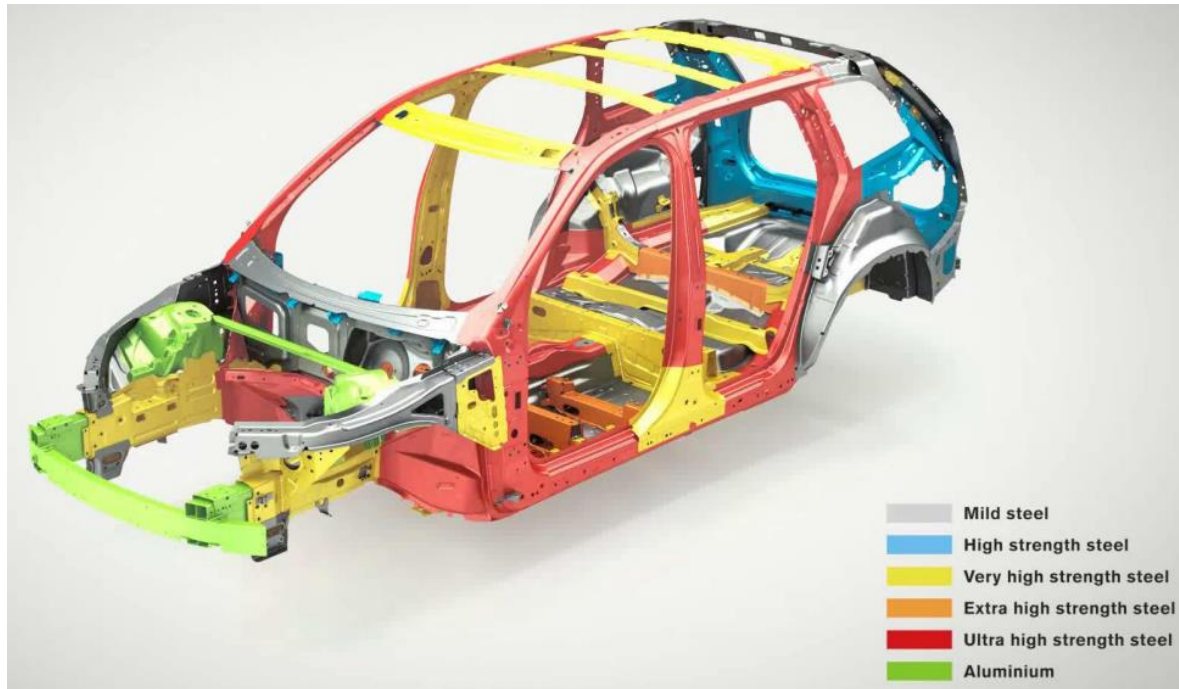
Nově konstruovaná auta jsou při homologaci zkoušena na odolnost při čelním nárazu podle požadavků EHK/OSN č. 94 [36] a při bočním nárazu podle požadavků předpisu EHK/OSN č. 95 [42]. Předpisy definují rozměry a tuhosti nárazových bariér, viz obrázky Obr. 2-43 a Obr. 2-44, a tím i výškové umístění deformačních prvků a tužších struktur karoserie aut, viz obrázek Obr. 2-45. Kontaktní místa bariéry pro čelní náraz jsou umístěna ve výšce 200 až 530 mm nad vozovkou a kontaktní místa bariéry pro boční náraz jsou umístěna ve výšce 300 až 550 mm nad vozovkou. [36], [42]



Obr. 2-43: Rozměry a tuhosti bariéry pro čelní náraz. [36]

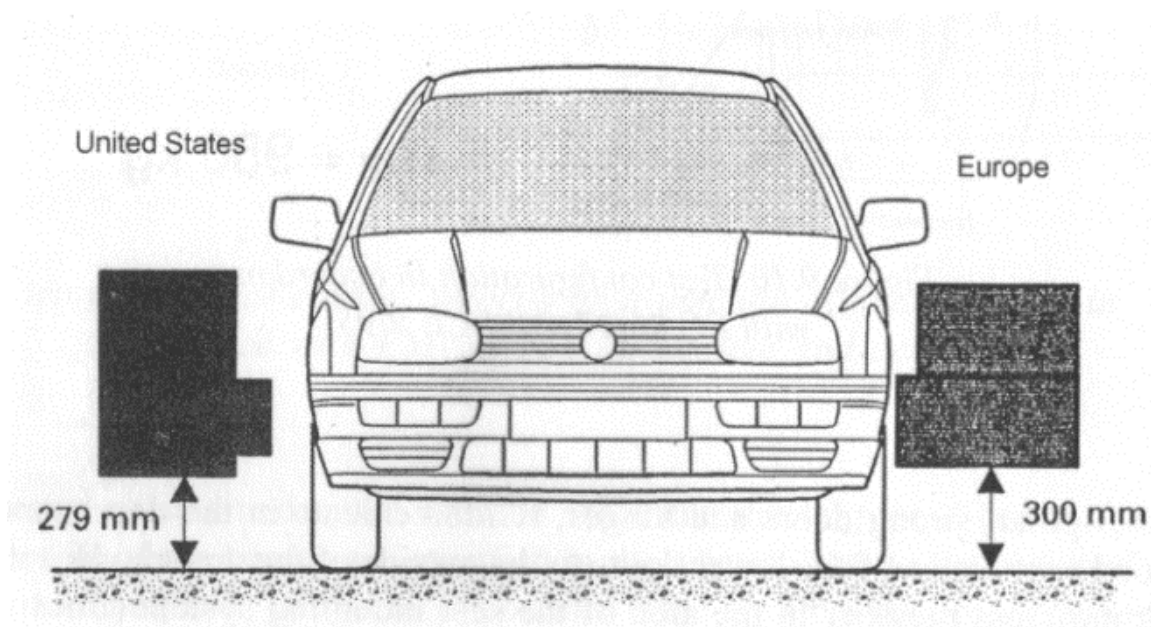


Obr. 2-44: Rozměry a tuhosti bariéry pro boční náraz. [22]



Obr. 2-45: Karoserie moderních aut, zdroj: [idnes.cz/auto](http://idnes.cz/auto).

Pro doplnění informací jsou na obrázku Obr. 2-46 znázorněny bariéry pro homologační testy aut v USA a Evropě. Kontaktní místa obou bariér jsou ve výšce 300 až 550 mm nad vozovkou. [38]



Obr. 2-46: Porovnání nárazových bariér pro homologační testy v Evropě a USA. [38]

Různé výškové umístění deformačních prvků vozidel může být problém i u nehod tramvají s auty. Tento závěr vychází z podmínek druhého scénáře srážky, který je definován normou ČSN EN 15227 pro tramvaje. Geometrie tuhé překážky je definovaná jako rovná deska překrývající celý průřez tramvaje. Požadavky normy budou splněny pro libovolné výškové umístění deformačních prvků tramvaje. [26]

Nárazníky některých tramvají provozovaných na území ČR jsou umístěny ve výšce 775 mm nad rovinou temene koleje (dále jen TK). Při nehodě proto hrozí stejná situace, jako dříve při nehodách aut s NA, tedy že auto zajede pod tramvaj a nedojde ke kontaktu deformačních prvků obou vozidel. Tramvaj na obrázku Obr. 2-47 není vybavena žádnými deformačními prvky na čele, ale lze na ní ukázat danou problematiku. Při nehodě nedošlo ke kontaktu deformačních prvků auta s žádnými prvky na čele tramvaje, což mělo za následek zjetí auta pod tramvaj, kontakt tuhé struktury hrubé stavby tramvaje s měkkou částí nad kapotou a čelním sklem auta, značnou destrukci auta a úmrtí řidičky auta. [44]



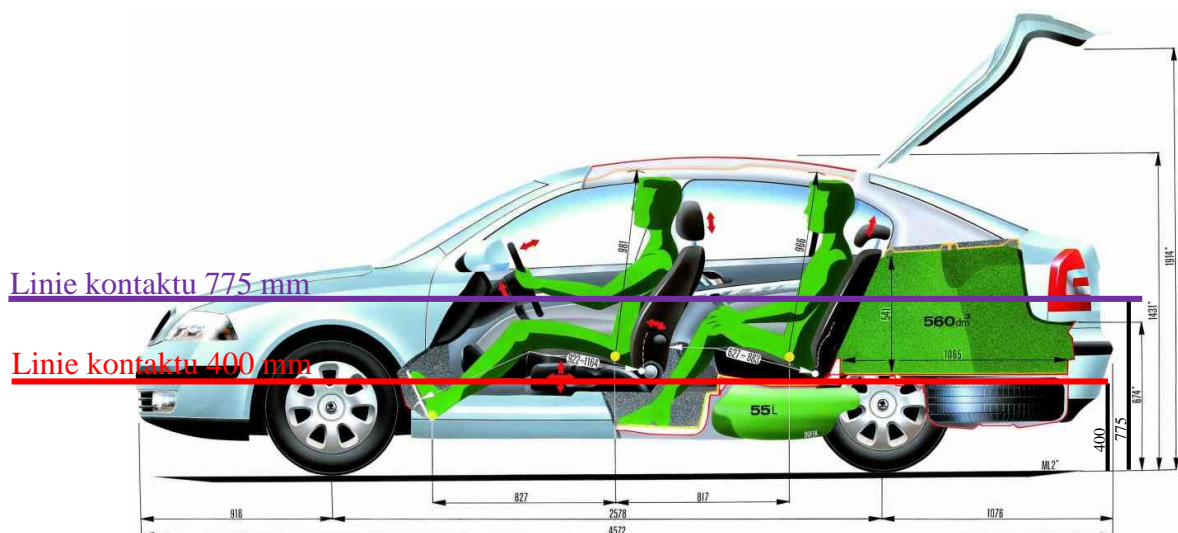
Obr. 2-47: Následky nehody auta s tramvají. [44]

Podobná situace nastala při nehodě tramvaje typu T3 s autem typu Škoda Octavia v roce 2013 v Liberci, viz obrázek Obr. 2-48. Následkem nehody bylo „pouze“ těžké zranění řidiče a lehké zranění spolujezdkyně v autě.



Obr. 2-48: Následky nehody auta s tramvají typu T3, zdroj: Archiv DPMLJ.

Obdobná situace nastává i při čelní nárazu tramvaje do boku auta. Při umístění deformačních prvků tramvaje do výšky 775 mm nad rovinou TK je linie kontaktu (místo, kde dojde ke kontaktu deformačních prvků tramvaje s bokem auta) ve výšce hrudi sedících cestujících, viz obrázek Obr. 2-49. Karoserie aut nejsou dimenzovány pro nárazy do těchto míst. Následkem nehody tak dochází k velké deformaci boků aut, což má za následek vyšší pravděpodobnost vzniku zranění cestujících o deformující se karoserii aut.



Obr. 2-49: Linie kontaktu nárazníku tramvaje s bokem auta. [71]



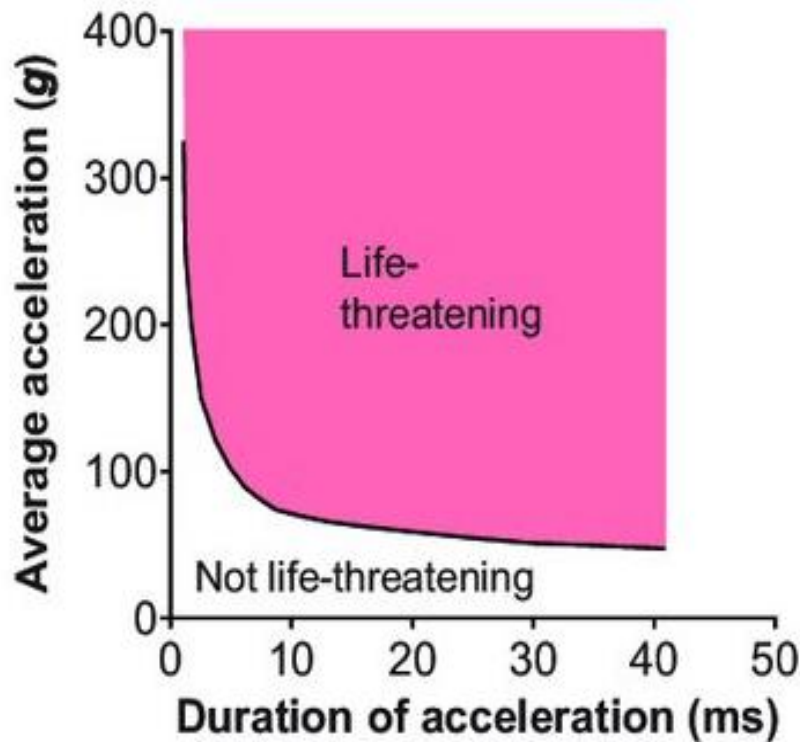
## 2.6 Biomechanická kritéria poranění člověka

Pro možnost vyhodnocení následků nehod na cestující byla definována biomechanická kritéria poranění člověka, která popisují vztahy mezi fyzikálními veličinami a rizikem vzniku poranění cestujících v SMV. Limitní hodnoty jednotlivých biomechanických kritérií byly stanoveny pomocí experimentů na různých subjektech: neživá těla, zvířata, mechanické modely, matematické modely a dobrovolníci. Při homologačních zkouškách pasivní bezpečnosti SMV musí být naměřené hodnoty biomechanických kritérií menší, než limitní hodnoty stanovené v legislativních požadavcích. [45], [46], [47]

Biomechanická kritéria poranění člověka se neustále zpřesňují a doplňují. V této kapitole uvádím a popisuji biomechanická kritéria poranění člověka, která byla použita při řešení této disertační práce.

### 2.6.1 Biomechanická kritéria poranění hlavy

Hlava člověka je při nehodách nejkritičtější částí lidského těla, proto jí bylo při stanovování biomechanických kritérií věnováno hodně pozornosti. Z provedených experimentů byla stanovena tzv. WSTC křivka, která popisuje vztah mezi velikostí zrychlení hlavy a dobou trvání zrychlení na riziko vzniku trvalého zranění hlavy. Průběh WSTC křivky je znázorněn na obrázku Obr. 2-50. Z této křivky byla následně definována některá biomechanická kritéria poranění hlavy. Pro hodnocení homologačních zkoušek aut podle EHK/OSN č. 94 a č. 95 se podle požadavků Euro NCAP používají biomechanická kritéria HIC a 3 ms. [22], [45], [48]



Obr. 2-50: WSTC - Wayne State Tolerance Curve. [69]

Average acceleration – průměrné zrychlení, Duration of acceleration – doba trvání zrychlení,  
Life-threatening – život ohrožující, Not life-threatening – život neohrožující

### 2.6.1.1 Kritérium HIC – Head Injury Criterion

Kritérium HIC (nazývané také HPC) je nejpoužívanější biomechanické kritérium pro hodnocení rizika vzniku poranění hlavy při homologačních zkouškách. Vyhodnocení HIC se provádí z naměřeného průběhu zrychlení v těžištích hlavy mechanických a numerických modelů lidí. Hodnota kritéria HIC je definována vztahem (2-8). [27], [45]

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} \right\}_{max} \quad (2-8)$$

kde:  $a$  výsledné zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ], výpočet podle vztahu (2-9),

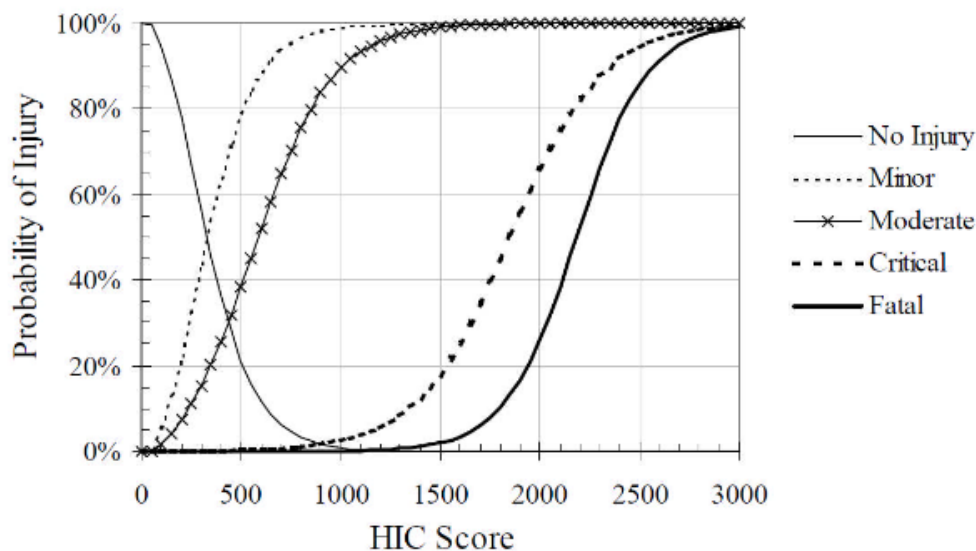
$t_1$  počátek sledovaného děje [s],

$t_2$  konec sledovaného děje [s].

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (2-9)$$

Dříve bylo kritérium HIC vyhodnocováno v časovém intervalu 36 ms, pokud došlo při zkoušce ke kontaktu hlavy s tvrdým povrchem, tak se vyhodnocení provádělo v časovém intervalu 15 ms. Podle posledních požadavků organizace Euro NCAP je požadováno provést vyhodnocení vždy pro časový interval 15 ms ( $HPC_{15}$ ). [48]

Podle požadavků vyhodnocení Euro NCAP jsou stanoveny dvě limitní hodnoty kritéria: přísnější limit 500 a benevolentnější limit 700. Vyšší hodnota kritéria značí vyšší pravděpodobnost vzniku zranění cestujících při nehodě. Výrobci nových vozidel se snaží, aby při homologačních zkouškách vozidel bylo dosahováno co nejnižších hodnot vyhodnocovacích kritérií, a proto byla pro výzkum v této disertační práci zvolena limitní hodnota kritéria  $HIC_{15lim} = 500$ , tedy přísnější limit. Na obrázku Obr. 2-51 jsou znázorněny křivky, které popisují pravděpodobnost vzniku různé závažnosti zranění podle hodnoty kritéria HIC. [48]



Obr. 2-51: Pravděpodobnost vzniku zranění na hodnotě HIC. [70]

Probability of Injury – Pravděpodobnost zranění, HIC Score – HIC hodnota, No Injury – Bez zranění,  
Minor – Lehké, Moderate – Střední, Critical – Kritické, Fatal - Smrtelné

### 2.6.1.2 Kritérium 3 ms

Biomechanické kritérium 3 ms vychází z průběhu křivky WSTC. Podle požadavků organizace Euro NCAP nesmí být zrychlení hlavy řidiče po dobu 3 ms větší než 72g (přísnější limit) nebo 80g (benevolentnější limit). Stejně jako u kritéria HIC, tak i u kritéria 3 ms, značí vyšší hodnota kritéria vyšší pravděpodobnost zranění cestujících při nehodě, a proto byla pro výzkum zvolena limitní hodnota kritéria 72g. [43], [48]

## 2.7 Mechanické lidské figuríny

Při schvalování nových motorových vozidel do provozu musí výrobci provést nárazové zkoušky, které ověří pasivní bezpečnost homologovaných vozidel. Předpis EHK/OSN č. 94 předepisuje podmínky zkoušky čelního nárazu vozidla do bariéry a předpis EHK/OSN č. 95 předepisuje podmínky zkoušky bočního nárazu bariéry do vozidla. U obou zkoušek je nutné vyhodnocovat bezpečí cestujících při nárazu pomocí biomechanických kritérií člověka. Pro možnost vyhodnocení biomechanických kritérií při reálných nárazových zkouškách a možnosti predikce následků nehod na cestující vznikly různé typy mechanických lidských figurín, tzv. Anthropomorphic test dummy (dále jen ATD). Figuríny ATD jsou tvořeny z moderních materiálů, aby se figurína při zatížení chovala co nejvěrněji jako lidské tělo. Podobnost chování lidského těla a figuríny při zatěžování se nazývá biofidelita. Při špatné biofidelitě mechanické figuríny mohou výsledky zkoušky vést ke špatným závěrům. Pro možnost měřit různé fyzikální veličiny jsou z důvodu vyhodnocování biomechanických kritérií mechanické figuríny vybaveny všemožnými snímači zrychlení, sil, vzdáleností a poloh. [27], [49]

Pro každou zkoušku vozidel vznikly různé typy mechanických figurín: [50]

- pro čelní náraz: rodina Hybrid III, THOR,...
- pro boční náraz: EuroSID, Euro SID2, SID, SID-HIII, SID-IIS,...
- pro zadní náraz: BioRID, RID2,...
- reprezentující chodce: POLAR, Hybrid III – pedestrian,...
- reprezentující děti: P0, P3/4, P3, P6, Q-dummies, CRABI,...

Na obrázku Obr. 2-52 je znázorněna figurína typu Hybrid III používaná pro zkoušky čelního nárazu, na obrázku Obr. 2-53 je znázorněna figurína typu EuroSid-2, která se používá pro zkoušky bočního nárazu, a na obrázku Obr. 2-54 je znázorněna figurína typu BioRID-2, která se používá pro zkoušky zadního nárazu.

Figuríny se dále dělí podle antropometrie lidské populace, aby bylo možné provádět výzkumy bezpečnosti cestujících pro většinu obyvatelstva. Důvodem je, že při nehodě se chová jinak tělo dospělého muže a dospělé ženy (vlivem rozdílných mechanických vlastností jednotlivých částí lidského těla). Nejčastěji používanou figurínou reprezentující dospělou osobu je figurína Q<sub>50/100</sub>, která reprezentuje průměrného dospělého muže. Tato figurína měří 175,1 cm a váží 78,2 kg. Dále lze zmínit figurínu malé ženy Q<sub>5/100</sub> (pouze 5 % žen je nižších, než tato figurína), která měří 151,0 cm a váží 46,82 kg a figurína velkého muže Q<sub>95/100</sub> (pouze 5 % mužské populace je vyšší, než tato figurína), která měří 187,3 cm a váží 102,73 kg. [27], [43]



Obr. 2-52: Figurína Hybrid III - muž 50%. [68]



Obr. 2-53: Figurína EuroSID-2. [68]



Obr. 2-54: Figurína BioRID-2. [68]

## 2.8 Výpočtové modely lidí

Výpočtové modely lidí vznikají často jako kopie mechanických modelů, které jsou používány pro jednotlivé nárazové zkoušky SMV. Důvodem je snaha o co nejpřesnější predikci následků jednotlivých typů nehod na posádky SMV a interakci člověka s interiérem vozidla a bezpečnostními prvky SMV (airbagy, bezpečnostními pásy, atd.) již při fázi návrhu vozidel a též snaha o případnou optimalizaci jejich konstrukce dříve, než bude zahájena sériová výroba SMV. Jako příklad lze uvést americkou firmu Humanetics, která vyrábí mechanické modely lidí a ke každému poskytuje výpočtový model, viz obrázek Obr. 2-55. [27], [50]



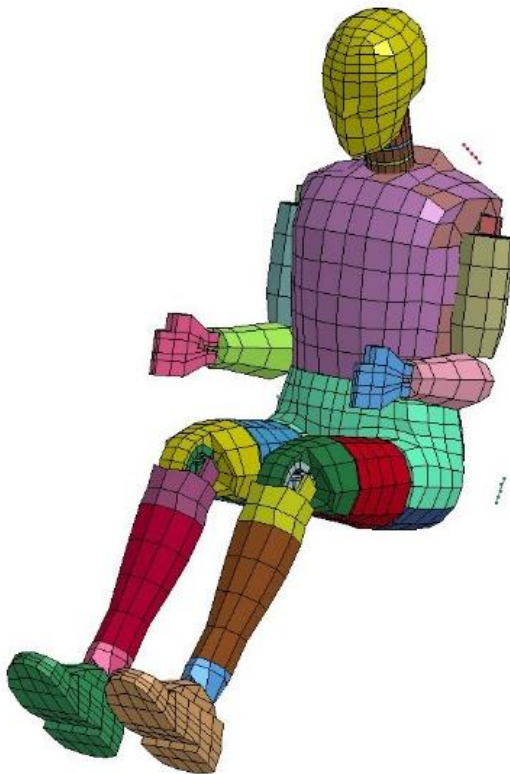
Obr. 2-55: Figurína Hybrid III: ATD a její výpočtový model. [68]

Současně používané výpočtové modely lidí lze rozdělit do tří základních skupin, podle typů těles reprezentujících části člověka:

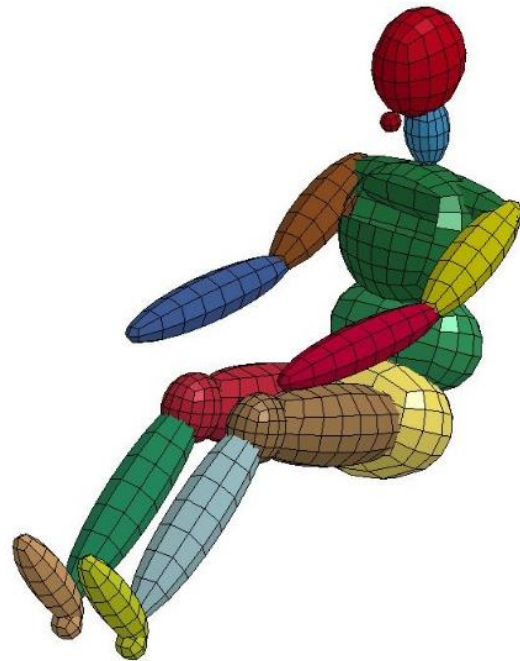
- tuhá tělesa,
- poddajná tělesa,
- kombinace tuhých a poddajných těles.

## 2.8.1 Výpočtové modely vytvořené z tuhých těles

Výpočtové modely vytvořené z tuhých těles pracují na principu MBS (multibody system). Model je vytvořen z více tuhých těles, které jsou mezi sebou propojeny vazbami a silovými prvky, které reprezentují lidské klouby. Pro správné vytvoření těchto modelů je nutné znát rozměry lidského těla, hmotové parametry jednotlivých částí těla a polohy kloubů. Všechny mechanické vlastnosti částí lidského těla potřebné k vytvoření MBS modelu člověka jsou shrnuty například v publikaci [51]. Výhodou modelů na principu MBS jsou menší nároky na výpočetní techniku než u ostatních modelů a také snadná polohovatelnost modelu. Tyto modely nelze použít pro zjištění zranění tkání, ale jsou schopné poskytnout dobrou představu o pohybu člověka při a po nehodě a o zrychleních působících na jednotlivé části lidského těla. Příklady těchto modelů jsou znázorněny na obrázcích Obr. 2-56 a Obr. 2-57. [27], [50]



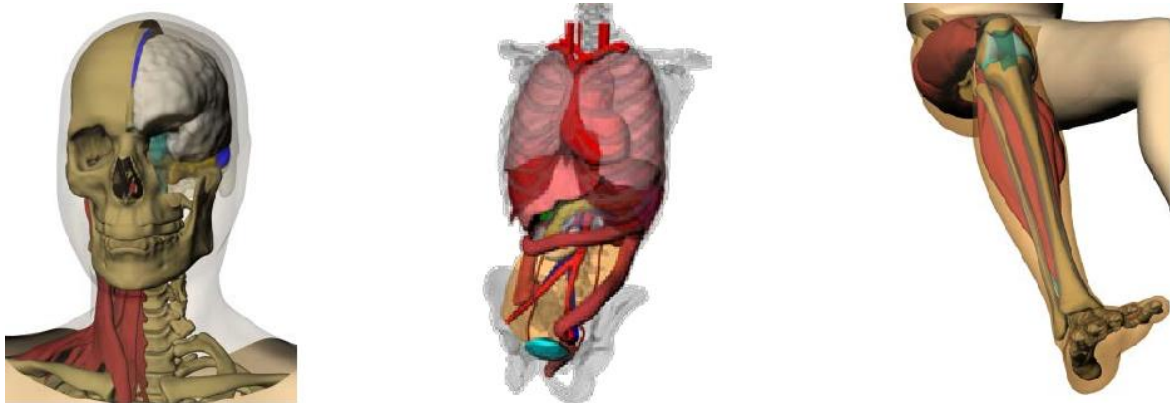
Obr. 2-56: Model figuríny III vytvořený na principu tuhých těles. [53]



Obr. 2-57: Model figuríny III vytvořený na principu tuhých těles. [53]

## 2.8.2 Výpočtové modely vytvořené z poddajných těles

Výpočtové modely vytvořené z poddajných těles jsou nejčastěji využívány pro detailní výpočet odezvy lidského těla na náraz. Velkou výhodou těchto modelů je možnost řešit lokální poranění vnitřních orgánů člověka. Nevýhodou těchto modelů, oproti modelům na bázi tuhých těles, jsou vysoké nároky na výpočetní čas simulací, nutnost přesné znalosti rozměrů orgánů člověka, mechanických vlastností biologických tkání a složitá polohování modelu do požadované polohy při simulaci. Příklady modelů z poddajných těles jsou znázorněny na obrázku Obr. 2-58. [27], [50]

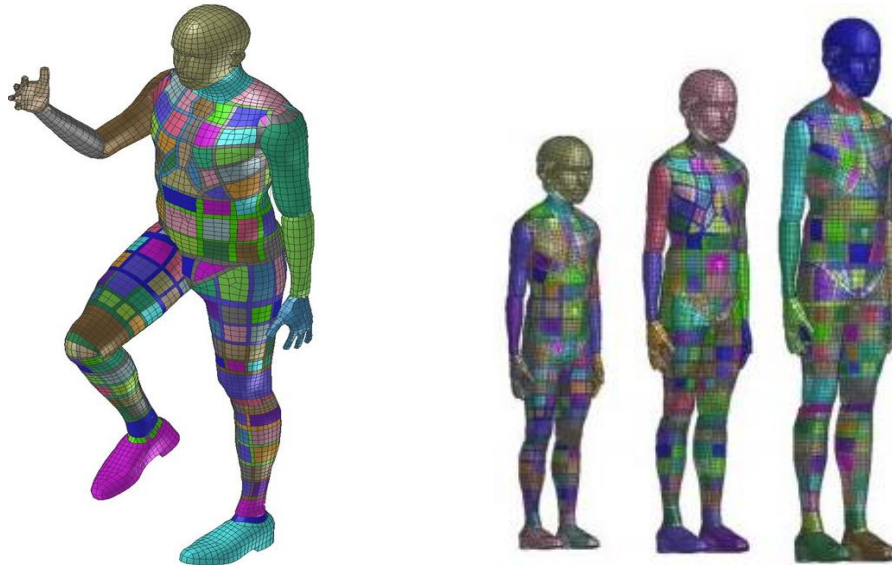


Obr. 2-58: Výpočtový model vytvořený na principu poddajných těles. [67]

## 2.8.3 Výpočtové modely vytvořené kombinací tuhých a poddajných těles

Výpočtové modely vytvořené z kombinací tuhých a poddajných těles kombinují výhody obou předchozích variant modelů. Model je většinou vytvořen z tuhých těles a pouze část modelu je nahrazena složitým modelem z poddajných těles (např. hlavy). Výhodou tohoto přístupu je získání přesného popisu zranění určité části lidského těla za kratší výpočetní čas. Jako příklad těchto modelů lze uvést model VIRTHUMAN, viz obrázek Obr. 2-59, který byl vytvořen v rámci projektu TA01031628 – Škálovatelné modely člověka pro zvýšení bezpečnosti v dopravě. Model je unikátní v možnosti rychlého škálování modelů podle věku a pohlaví člověka. [27], [50], [52]



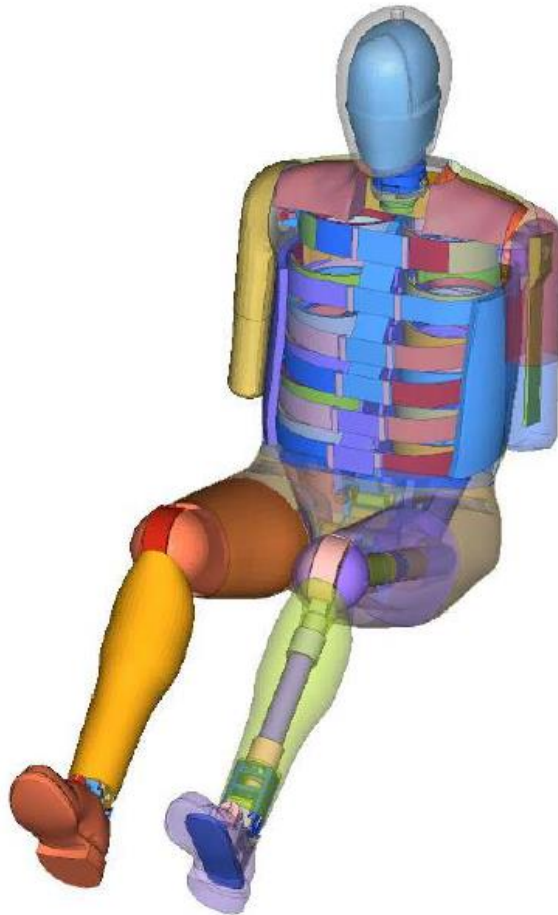


Obr. 2-59: Výpočtový model VIRTHUMAN. [50]

## 2.8.4 Výpočtový model – WorldSID 50<sup>th</sup> Male

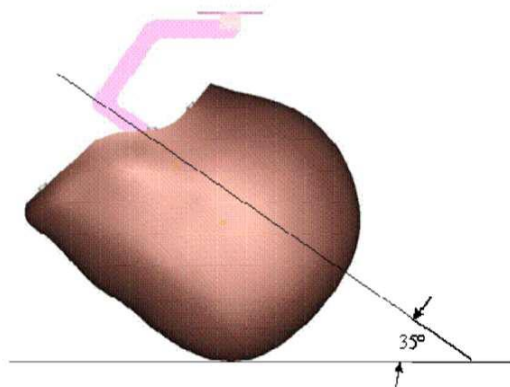
Z uvedených typů simulačních figurín se pro potřeby výzkumu v rámci této práce nejlépe hodí figuríny vytvořené na principu tuhých těles. Na těchto modelech je možné simulovat pohyby lidí při nehodách a vyhodnocovat zrychlení a síly působící na jednotlivé části těla bez velkých výpočtových kapacit. Vytvoření přesného a validovaného simulačního modelu lidské figuríny nebylo v rámci řešení této disertační práce možné, a proto bylo nutné převzít model z jiného výzkumného projektu. Americká firma Livermore Software Technology (LSTC), výrobce softwaru Ansys, poskytuje na svých webových stránkách (lstc.com) validované modely figurín dospělých i dětí pro čelní i boční nárazy.

V této kapitole je uveden popis výpočtového modelu figuríny LSTC WorldSID 50<sup>th</sup> Male od americké firmy LSTC, viz obrázek Obr. 2-60, který byl použit při výzkumu zpracovaném v této disertační práci. Figurína WorldSID 50<sup>th</sup> Male reprezentuje průměrného dospělého muže o hmotnosti 75 kg a je určena pro výpočty simulací bočního nárazu automobilů. [53], [54]

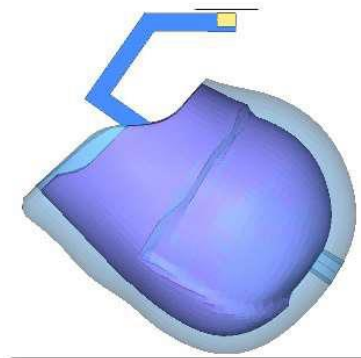


Obr. 2-60: Simulační model figuríny WorldSID 50th Male. [54]

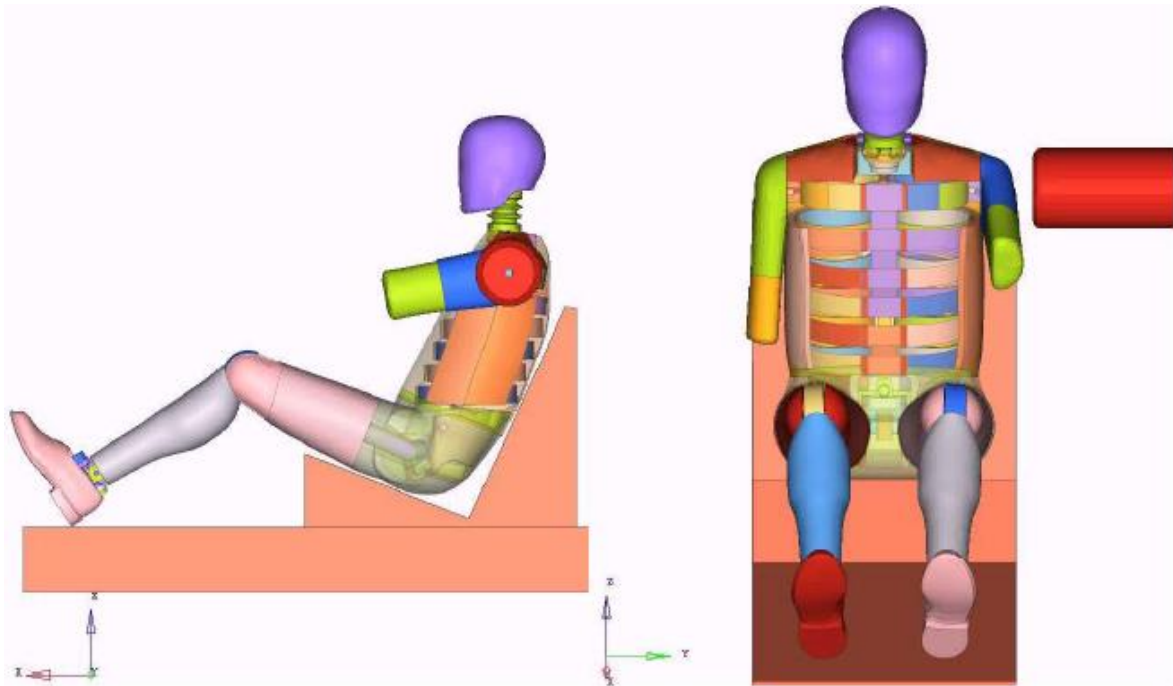
Simulační model WorldSID 50<sup>th</sup> Male byl validován podle požadavků předpisu WorldSID ISO 15830-2 [55]. Validace byla provedena porovnáním výsledků simulací a těchto reálných zkoušek: dvou dopadových zkoušek hlavy, zkoušky výkyvu krku a nárazových zkoušek do ramene, hrudníku, břicha a pánve, viz obrázky Obr. 2-61 až Obr. 2-63. [54]



Obr. 2-61: Zkouška čelního dopadu hlavy – reálná zkouška. [54]



Obr. 2-62: Zkouška čelního dopadu hlavy – FEM simulace. [54]



Obr. 2-63: FEM simulace nárazové zkoušky do ramene. [54]

Z výše uvedeného popisu výsledků validace modelu byl pro řešení výzkumu zpracovaném v této disertační práci zaveden předpoklad, že výsledky simulačních výpočtů nárazu tramvaje do auta provedených s modelem WorldSID 50<sup>th</sup> Male budou s vysokou přesností odpovídat průběhům reálné zkoušky.

## 2.9 Výpočtové modely osobních automobilů

Stejně jako simulační modely figurín vytvářejí výrobci automobilů simulační modely aut, které používají pro ověřování a případnou optimalizaci nárazových vlastností nově konstruovaných vozidel. Simulační modely co nejdříveji reprezentují reálná auta, čímž je dosaženo přesných výsledků simulací. Stejně tak byla pro výzkum snížení následků nehod na autech zásadní kvalita a přesnost použitého simulačního modelu auta. Nekvalitní a nepřesný model auta by vedl ke špatným výsledkům a nepřesným závěrům výzkumu. Pro vytvoření přesného a validovaného modelu je nutné znát detailní informaci o konstrukci auta, materiálové parametry použitých materiálů a provedení nárazových zkoušek pro možnost validace simulačního modelu. Vytvoření přesného a validovaného simulačního modelu auta nebylo v rámci řešení možné, a proto bylo nutné převzít model z jiného výzkumného projektu.

Pracovníci Center for Collision Safety and Analysis (CCSA) při americké univerzitě George Masone poskytují na svých webových stránkách ([ccsa.gmu.edu](http://ccsa.gmu.edu)) přesné a validované simulační modely různých SMV pro nárazové výpočty. [56]

Z dostupných modelů byl pro výzkum zvolen model auta Toyota Yaris 2010, viz obrázky Obr. 2-64 a Obr. 2-65, jelikož z dostupných modelů svými parametry nejlépe odpovídá modelu auta ŠKODA Fabia, který byl v roce 2021 nejprodávanějším modelem auta na území ČR. V této kapitole je uveden stručný popis tohoto modelu. [57]



Obr. 2-64: Auto typu Toyota Yaris 2010. [58]



Obr. 2-65: Simulační model auta typu Toyota Yaris 2010. [58]

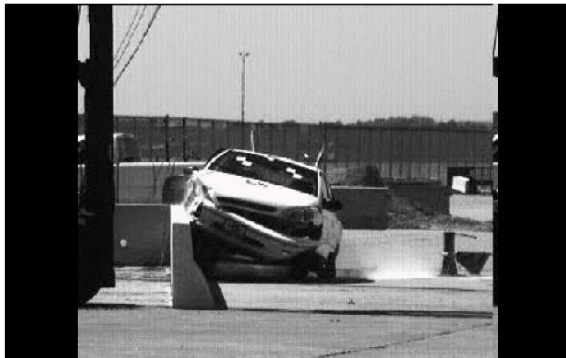
Simulační model auta Toyota Yaris 2010 byl vytvořen pracovníky National Crash Analysis Center (NCAC) při americké univerzitě George Washingtona pro možnost výzkumu současných trendů v oblasti pasivní bezpečnosti. Pro dosažení co největší přesnosti a podrobnosti byl model auta vytvořen pomocí principu reverzního inženýrství. Tento přístup znamená, že pracovníci NCAC při tvorbě modelu rozmontovali reálné vozidlo na jednotlivé součásti, těm změřili rozměry, tloušťky stěn a použitý materiál. Všechna data následně použili pro tvorbu simulačního modelu auta. Simulační model auta Toyota Yaris 2010 byl validován porovnáním výsledků simulací a výsledků reálných zkoušek, reprezentující čelní i boční nárazy auta, viz obrázky Obr. 2-66 až Obr. 2-69. Porovnání hmotových parametrů simulačního modelu a reálného auta jsou uvedeny v tabulce Tab. 2-5. [58], [59]



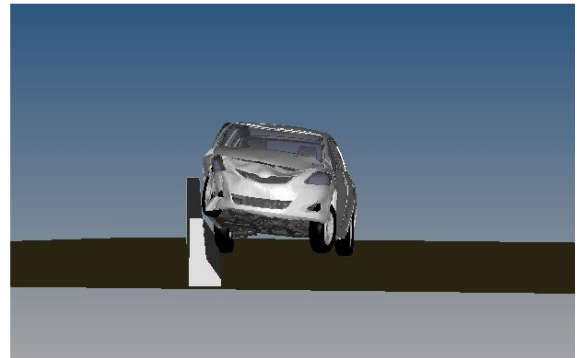
Obr. 2-66: Zkouška čelního nárazu. [59]



Obr. 2-67: Simulace čelního nárazu. [59]



Obr. 2-68: Zkouška nárazu do betonové bariéry. [59]



Obr. 2-69: Simulace nárazu do betonové bariéry. [59]

Tab. 2-5: Hmotnostní parametry auta Toyota Yaris 2010 a jeho simulačního modelu. [59]

Parametr	Jednotka	Reálné vozidlo	Simulační model
<b>Hmotnost</b>	[kg]	1 078	1 101
<b>Moment setrvačnosti <math>I_{xx}</math></b>	[kg*m <sup>2</sup> ]	388	395
<b>Moment setrvačnosti <math>I_{yy}</math></b>	[kg*m <sup>2</sup> ]	1 498	1 566
<b>Moment setrvačnosti <math>I_{zz}</math></b>	[kg*m <sup>2</sup> ]	1 647	1 739
<b>Poloha těžiště - <math>x_t</math></b>	[mm]	1 022	1 004
<b>Poloha těžiště - <math>y_t</math></b>	[mm]	-8,3	-4,4
<b>Poloha těžiště - <math>z_t</math></b>	[mm]	588	569

Z výše uvedeného popisu simulačního modelu auta Toyota Yaris 2010 byl pro řešení výzkumu zaveden předpoklad, že výsledky simulačních výpočtů nárazu tramvaje do čela i boku auta provedených s tímto modelem budou s vysokou přesností odpovídat průběhům reálné zkoušky.

## 2.10 Souhrn rešeršní části

Tato kapitola uvádí komentáře autora nad poznatky uvedené v rešeršní části práce a zamýšlení nad aplikací těchto poznatků pro řešení výzkumu této disertační práce.

Z výše uvedeného soupisu informací vyplývá, že problematika následků nehod tramvají s auty je komplexní problém, který klade na řešitele požadavky na znalosti z mnoha oborů. Problematice následků nehod tramvají s osobními a užitkovými automobily se v minulosti mnoho autorů nevěnovalo, což umožňuje velkou volnost při výzkumu, ale zhoršuje to počáteční pozici z důvodu nedostatku znalostí a poznatků. Pro doplnění znalostí byly použity závěry z výzkumů nehodovosti SMV.

Nedostatek znalostí je v oblasti následků nehod tramvají s auty, a tedy i v otázce nutnosti samotného výzkumu snížení následků nehod tramvají s auty. Autoři se ve svých výzkumech a publikacích zaměřovali na příčiny vzniku nehod, viníky nehod nebo následky nehod na tramvajích. Informace o následcích nehod na zdraví cestujících v kolizních vozidlech nebyly žádnými autory detailně zkoumány a publikovány. Z těchto důvodů je nutné se nejdříve zabývat tvorbou a vyhodnocením statistiky nehodovosti tramvají na území ČR s ohledem na zdravotní následky cestujících v autech. Závěry statistiky nehodovosti jednoznačně definují, zda je či není nutné se problematikou snížení následků nehod tramvají s auty dále zabývat. Vyhodnocení statistiky nehodovosti také definuje scénář nehody, při kterém dochází nejčastěji ke zranění posádek v autech.

Problematikou výzkumu snížení následků nehod tramvají s auty se zabývali autoři v publikaci [17]. Při svém výzkumu však neuvažovali poddajnost kolizního vozidla, což značně ovlivnilo výsledky jimi provedeného výzkumu. Z důvodu tuhého modelu auta nebyla zohledněna destrukce karoserie auta, což snížilo riziko zranění cestujících o deformující se bok auta. Toto zjednodušení značně ovlivnilo výsledky provedeného výzkumu. Při tvorbě simulačního modelu nehody tramvaje s autem je nutné uvažovat poddajnost simulačního modelu auta.

Současně platná legislativa k pasivní bezpečnosti nově konstruovaných tramvají nepředepisuje žádné požadavky na snížení následků nehod tramvají s auty. Norma bere auta pouze jako kolizní překážky a následky nehod u nich nehodnotí. Pro splnění požadavků programu *Vize 0* je však nutné, konstruovat tramvaje s ohledem na zvýšení bezpečnosti v kolizních vozidlech. Pro zvýšení partnerské bezpečnosti tramvají je možné aplikovat poznatky z oblasti kompatibility silničních vozidel, a to v oblastech hmotnosti, tuhosti a geometrie vozidel.

Poznatky z kompatibility hmotností nelze na nehody tramvají s osobními auty aplikovat, jelikož auta váží kolem 1,8 tuny a méně, zatímco nově konstruované tramvaje váží desítky tun (výslednou hmotnost tramvaje značně ovlivňuje obsazenost cestujícími). Auta budou vlivem nehody vždy dosahovat větších změn rychlosti a zrychlení a cestující v nich většího rizika zranění než cestující v tramvaji.

Poznatky z kompatibility tuhostí lze na nehody tramvají s auty aplikovat. Při návrhu je nutné zachovat bezpečnost tramvaje podle legislativních požadavků uvedených v normě ČSN EN 15227. Deformační prvky jsou prvním prvkem tramvaje, které při nehodě přicházejí do kontaktu s kolizním vozidlem. Proto se jako vhodné řešení kompatibility tuhostí jeví například umístění měkčích absorpčních prvků před nárazník či progresivní charakteristika současných nárazníků. Při tomto postupu bude zachována bezpečnost tramvaje při nehodě s jinou tramvají a dojde ke zvýšení kompatibility tuhostí tramvaje při nehodě s auty.

Poznatky z kompatibility geometrie vozidel lze na nehody tramvají s auty aplikovat. Jako vhodné řešení geometrické kompatibility tramvají s auty se jeví umístění deformačních prvků tramvaje do výšky tužších struktur karoserie aut, jako jsou deformační prvky na čelech aut a podélné prahy na bocích aut. Při umístění deformačních prvků tramvají do výšky kolem 400 mm nad rovinu TK (na obrázku Obr. 2-49 vyznačena červenou barvou) bude docházet při obou typech kolizí ke kontaktu deformačních prvků tramvaje s částmi aut, které jsou konstrukčně dimenzované na náraz a na přenos sil do dalších struktur auta. Při nehodách s tramvajemi nebude docházet k tak velkým destrukcím karoserie aut a dojde ke snížení rizika zranění cestujících o zdeformovanou karoserii.

Pro vyhodnocování úprav čel tramvají na snížení následků nehod na autech se jako nejvhodnější jeví použít biomechanická kritéria hlavy člověka HIC a 3 ms, která definují riziko závažného zranění nebo úmrtí lidí při nehodách z průběhu zrychlení hlavy. Pro obě kritéria jsou legislativou stanoveny limitní hodnoty.



### 3 Cíle disertační práce

S ohledem na souhrn poznatků uvedených v předešlé kapitole byly definovány následující cíle disertační práce:

- Analýza statistiky nehodovosti tramvají na území ČR. Získání dat o nehodovosti tramvají se předpokládá navázáním spolupráce s DP, které na území ČR provozují tramvaje, a PČR. Zisk dat o nehodovosti tramvají od obou institucí umožní vytvořit komplexní statistiku nehodovosti tramvají a provést její analýzu s ohledem na zdravotní následky nehod cestujících v osobních automobilech.
- Definice výpočtového scénáře nehody tramvaje s autem. Parametry výpočtového scénáře budou vycházet ze závěrů vyhodnocení statistiky nehodovosti. Scénář nehody bude reprezentovat typ nehody tramvaje s autem, při kterém dochází k nejzávažnějším následkům na zdraví cestujících v autech (úmrtní nebo lehké/těžké zranění).
- Vytvoření zjednodušených simulačních modelů nehody tramvaje s auty. Modely tramvají budou reprezentovat tramvaje, které byly konstruované podle požadavků normy ČSN EN 15227, jsou provozované na území ČR a mají různou koncepci čelních partií. Pro posouzení vlivu zavedení normy ČSN EN 15227 na následky nehod s auty bude vytvořen model tramvaje starší koncepce, která nebyla konstruována podle požadavků této normy.
- Vytvoření detailního simulačního modelu zvolené tramvaje, který bude reprezentovat koncepční uspořádání článků tramvaje, rozložení hmotnosti tramvaje, mezičlánkové spojení a silové prvky ve vypružení.
- Provedení analýzy vlivu parametrů deformačních prvků tramvaje na následky nehod na autech a návrh úprav čel tramvají pro snížení následků nehod na autech.

## 4 Řešení cílů disertační práce

Tato kapitola popisuje, jak autor řešil jednotlivé cíle disertační práce, které byly stanoveny v předešlé kapitole.

### 4.1 Analýza statistiky nehodovosti tramvají na území ČR

Při shromažďování podkladů k tvorbě statistiky nehodovosti tramvají na území ČR byla navázána spolupráce se všemi DP, které provozují v ČR tramvaje, viz tabulka Tab. 4-1, a PČR o poskytnutí dat k nehodám tramvají za roky 2016 až 2018. Jednotlivé instituce zaznamenávají k nehodám rozdílné informace, a proto bylo nutné pro vytvoření komplexní statistiky nehodovosti jednotlivé databáze propojit.

Od DP byly o nehodách pro tvorbu statistiky nehodovosti poskytnuty tyto údaje: datum nehody, místo nehody, informace o kolizních vozidlech a krátký slovní popis nehody. Od PČR byly o nehodách pro tvorbu statistiky nehodovosti poskytnuty údaje o následcích nehod na zdraví cestujících v autech a v tramvajích. [5], [60]

Tab. 4-1: Soupis dopravních podniků na území ČR, které provozují tramvaje. [5]

Dopravní podnik	Zkratka
Dopravní podnik města Brno a.s.	DPMB
Dopravní podnik měst Liberec a Jablonec nad Nisou a.s.	DPMLJ
Dopravní podnik měst Mostu a Litvínova a.s.	DPMOST
Dopravní podnik města Olomouce a.s.	DPMO
Dopravní podnik Ostrava a.s.	DPO
Dopravní podnik hlavního města Prahy a.s.	DPP
Plzeňské městské dopravní podniky a.s.	PMDP

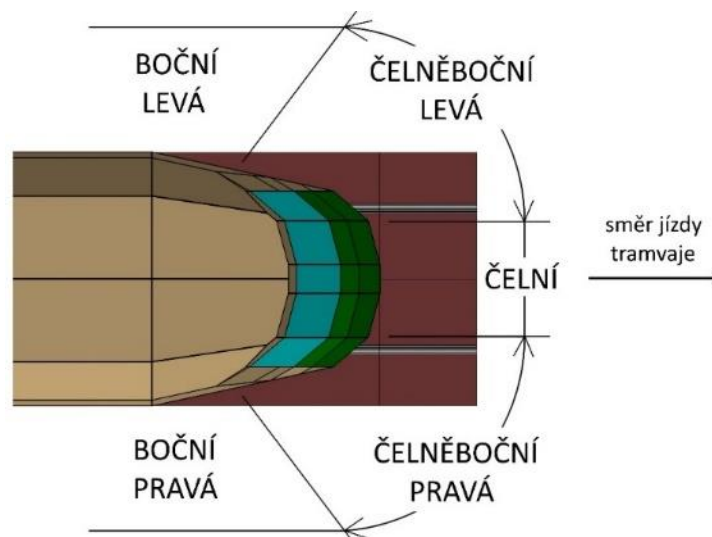
Celkově bylo za období 2016 až 2018 všemi dopravními podniky zaznamenáno 6 816 nehod tramvají s ostatními účastníky silničního provozu. V tabulce Tab. 4-2 jsou uvedeny počty nehod tramvají zaznamenaných v jednotlivých DP. [5], [60]

Tab. 4-2: Počty nehod zaznamenaných jednotlivými DP. [5]

Rok	DPMB	DPMLJ	DPMO	DPMOST	DPO	DPP	PMDP
<b>2016</b>	423	40	46	12	154	1 294	97
<b>2017</b>	453	43	35	6	199	1 566	98
<b>2018</b>	412	36	46	9	180	1 547	120
<b>Celkem</b>	1 288	119	127	27	533	4 407	315

Pro možnost analyzovat statistiku nehodovosti tramvají byla na pracovišti Ú12120 na FS ČVUT v rámci prací na projektu TN01000026 vytvořena metodika<sup>2</sup>, která jednotlivé nehody hodnotí podle těchto vyhodnocovacích kritérií:

- **typ kolizního vozidla:** tramvaj, auto, NA, autobus, motocykl, kolo a chodec,
- **kolizní směr:** čelní, čelněboční levá/pravá, boční levá/pravá a zezadu, viz obrázek Obr. 4-1,
- **viník nehody:** řidič tramvaje nebo řidič kolizního vozidla,
- **příčina vzniku nehody:** nedání přednosti v jízdě, neodhadnutí průjezdného průřezu, nerespektování svislého silničního značení (dále jen SSZ), nesprávný způsob jízdy nebo jiná příčina,
- **zranění nebo úmrtí osob při nehodě:** nehoda bez následků, lehké/těžké zranění nebo úmrtí.



Obr. 4-1: Vyhodnocovací kritérium: kolizní směry. [61]

Tato disertační práce se zabývá problematikou pasivní bezpečnosti tramvají a snížení následků nehod tramvají s auty<sup>3</sup>. Proto je zde uvedeno pouze vyhodnocení statistiky nehodovosti podle vyhodnocovacích kritérií: typ kolizního vozidla a zranění nebo úmrtí osob při nehodě s auty. Detailní vyhodnocení statistiky nehodovosti pro všechna vyhodnocovací kritéria a kolizní vozidla bylo publikováno ve výzkumné zprávě [2] a v publikaci [3].

<sup>2)</sup> Detailně byla metodika pro vyhodnocení statistiky nehodovosti tramvají popsána ve výzkumné zprávě [2], která byla publikována v rámci výzkumného projektu TN01000026 na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

<sup>3)</sup> Vytvořená statistika nehodovosti tramvají nemusí sloužit pouze výrobcům tramvají ke zvýšení pasivní bezpečnosti vozidel, ale mohou ji také využít jednotlivé DP nebo projektanti pozemních komunikací k identifikování míst častých dopravních nehod. Vhodná stavební úprava místa častých dopravních nehod může vést ke snížení rizika vzniku nehod a zvýšení bezpečnosti provozu. Problematikou identifikování míst častých dopravních nehod na území hl. m. Prahy jsem se zabýval v publikacích [61] a [62].

Pro ověření účelnosti požadavků normy ČSN EN 15227 na pasivní bezpečnost nově konstruovaných tramvají byla statistika nehodovosti nejdříve vyhodnocena podle vyhodnocovacích kritérií: typ kolizního vozidla a kolizního směru. Výsledky vyhodnocení jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-3.

Tab. 4-3: Vyhodnocení statistiky nehodovosti tramvají podle kolizního vozidla a směru. [5]

		Kolizní vozidlo							
		Autobus	Chodec	Kolo	Motocykl	NA	Auto	Tramvaj	
Kolizní směr	Čelní	-	9	89	6	4	95	859	122
	Čelněboční	pravá	18	162	3	7	277	1 838	1
		levá	10	54	2	3	49	339	6
	Boční	pravá	71	95	4	9	451	1 754	11
		levá	46	20	2	1	72	228	23
	Zezadu	-	5	2	0	3	2	28	36
<b>Celkový počet nehod</b>			<b>159</b>	<b>422</b>	<b>17</b>	<b>27</b>	<b>946</b>	<b>5 046</b>	<b>199</b>

Z výsledků v tabulce Tab. 4-3 je patrné, že všechny scénáře srážek uvedené v normě ČSN EN 15227 jsou zvoleny správně a vycházejí z nehod, jichž se tramvaje v běžném provozu pravidelně účastní. Čelních a zadních nehod dvou tramvají, které reprezentuje první scénář srážky, se za zkoumané období stalo celkem 158, tedy přibližně jedna nehoda tramvají týdně. Čelněbočních nehod tramvají s auty, které reprezentují druhý scénář srážky, se za zkoumané období stalo celkem 2 177. Jedná se o vůbec nejčastější typ nehody, jichž se tramvaje v provozu účastní. Čelních nehod tramvají s autobusy a NA, které reprezentují třetí scénář srážky, se za zkoumané období stalo 104.

Velmi časté jsou boční nehody tramvají s ostatními účastníky silničního provozu. Tento typ nehod je nejčastěji způsoben neodhadnutím průjezdného profilu jedním z řidičů a následným kontaktem boků vozidel. Následkem tohoto typu nehod jsou nejčastěji pouze odřené lak na bocích vozidel, tedy hmotné škody, a proto nemá význam do normy ČSN EN 15227 přidávat scénář srážky, který by reprezentoval tento typ nehod.

Za zkoumané období 2016 až 2018 bylo všemi DP celkově zaznamenáno 5 046 nehod tramvají s auty, což znamená, že se na území ČR průměrně stanou čtyři nehody tramvají s auty denně. Nejčastější typ nehod tramvají s auty byly čelněboční nehody z pravé strany, kterých se stalo celkem 1 838. Druhý nejčastější typ nehod byly boční nehody z pravé strany, kterých se stalo celkem 1 754.

Vyšší četnost nehod z pravé strany oproti levé je způsobena rozložením komunikací ve městech ČR. Tramvajová trať je nejčastěji vedena uprostřed ulic a jízdní pruhy pro silniční vozidla jsou vedeny po stranách, viz obrázek Obr. 4-2. Řidiči SMV si při přejíždění tramvajových kolejí nevšimnou souběžně jedoucí tramvaje a vjedou zprava před jedoucí tramvaj.



Obr. 4-2: Rozložení pozemních komunikací ve městech na území ČR, zdroj: [silnice-zeleznice.cz](http://silnice-zeleznice.cz).

Pro ověření potřeby výzkumu úprav čel tramvajů pro snížení následků nehod na autech byla statistika nehodovosti vyhodnocena podle vyhodnocovacího kritéria zranění nebo úmrtí cestujících v autech při nehodě. Výsledky vyhodnocení jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-4. Za zkoumané období nedošlo k úmrtí cestujících v autech při nehodách s tramvajemi, a proto nejsou tyto sloupce v tabulce Tab. 4-4 uvedeny.

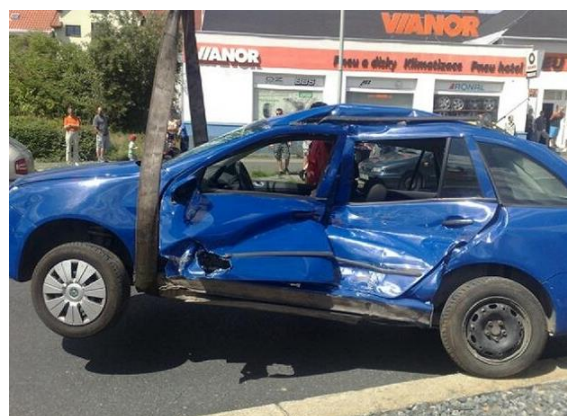
Tab. 4-4: Vyhodnocení statistiky nehodovosti tramvajů podle následků na zdraví cestujících v autech. [5]

Kolizní směr		celkový počet nehod	počet lehkých zranění (-)	počet lehkých zranění (%)	počet těžkých zranění (-)	počet těžkých zranění (%)
Čelní	-	859	141	16,4	9	1,0
Čelněboční	pravý	1 838	128	7,0	2	0,1
	levý	339	21	6,2	0	0,0
Boční	pravý	1 754	7	0,4	0	0,0
	levý	228	1	0,4	1	0,4
Zezadu	-	28	1	3,6	0	0,0
<b>Celkem</b>		<b>5 046</b>	<b>299</b>	<b>5,9</b>	<b>12</b>	<b>0,2</b>

Z vyhodnocení statistiky nehodovosti vyplývá, že při nehodách tramvajů s auty došlo za zkoumané období k 299 lehkým a 12 těžkým zraněním řidičů aut. K největšímu počtu zranění došlo při čelních a pravých čelněbočních nehodách. Ke zranění došlo při každé sedmé čelní a sedmnácté čelněboční nehodě. Tyto nehody jsou nejčastěji způsobeny řidiči aut, kteří při přejíždění přes tramvajový pás nedají přednost v jízdě souběžně nebo protisměrně jedoucí tramvaji. Z důvodu dlouhé brzdné dráhy řidiči tramvajů již nestihnou tramvaj zabrzdit a následně dochází k nárazu čela tramvaje do boku aut, což má často za následek destrukci boku auta, viz obrázky Obr. 4-3 a Obr. 4-4.



Obr. 4-3: Poškození boku auta po nehodě s tramvají, zdroj: archiv DPMLJ.

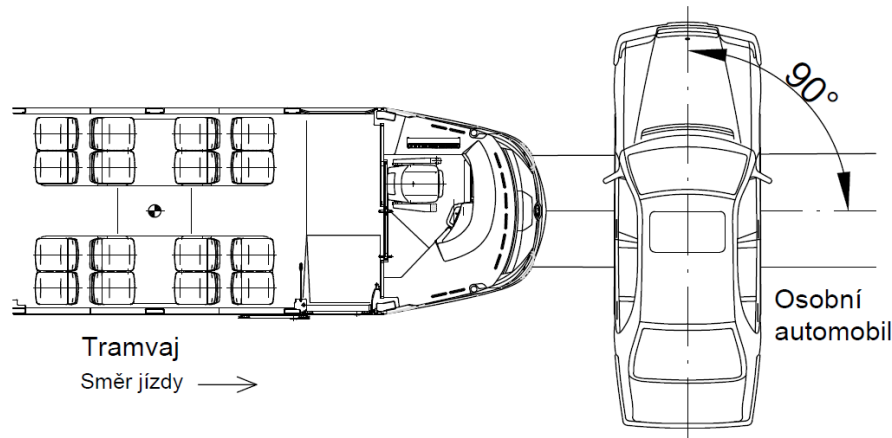

 Obr. 4-4: Následky na autě po čelní nehodě tramvaje do boku auta, zdroj: [idnes.cz/praha](https://www.idnes.cz/praha).

Z porovnání výsledků vyhodnocení statistik nehodovosti mezi tabulkami Tab. 2-1 a Tab. 4-4 je zřejmé, že riziko zranění při čelních a čelněbočních nehodách tramvají s auty je vyšší než u nehod silničních vozidel v Praze. Společnost není ochotna akceptovat závažné následky nehod silničních vozidel a pro jejich snížení vynakládá velké finanční prostředky. Stejně tak by neměla akceptovat závažné následky nehod tramvají s auty a měla by vynaložit obdobné úsilí pro snížení následků tohoto typu nehod.

Vyhodnocení statistiky nehodovosti potvrdilo potřebu dalšího výzkumu v oblasti snížení následků nehod tramvají s auty, jelikož velké množství nehod tramvají s auty končí zraněním cestujících v autech.

## 4.2 Definice výpočtového scénáře nehody tramvaje s autem

Podle vyhodnocení statistiky nehodovosti dochází nejčastěji ke zranění cestujících v autech při čelní nehodě tramvaje do boku auta. Výpočtový scénář nehody pro výzkum byl definován tak, aby reprezentoval náraz tramvaje do dveří řidiče auta, které stojí kolmo přes tramvajový pás. Schéma výpočtového scénáře je znázorněno na obrázku Obr. 4-5.



Obr. 4-5: Schéma výpočtového scénáře nehody. [72]

Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících následky nehod je rychlost tramvaje před nehodou. Při tvorbě statistiky nehodovosti nebyly dopravními podniky poskytnuty informace k rychlostem tramvají před všemi nehodami, a proto nebylo možné stanovit nejčastější kolizní rychlost. Z tohoto důvodu byly pro výzkum zvoleny tyto rychlosti tramvaje před nehodou: 10, 15, 20, 25, 30, 40 a 50 km/h. Rychlost jízdy 50 km/h je maximální provozní rychlost tramvají při smíšeném provozu ve městech. Z provedených simulací na zjednodušených modelech byla pro další výzkum vybrána limitní rychlost, při které docházelo k překračování limitních hodnot biomechanických kritérií lidí. S touto počáteční rychlostí byl prováděn další výzkum.

Auta při přeježdění přes tramvajové pásy zpomalují na rychlost blízkou nule, aby mohly bezpečně provést odbočení o 90° oproti předchozímu směru jízdy. Z tohoto důvodu byla pro výpočtový scénář nehody uvažována nulová počáteční rychlost auta.

Dalším z důležitých faktorů ovlivňujících následky nehod je pohyb auta při nehodě. Jedním z dat získaných od DP k jednotlivým nehodám byl slovní popis průběhu nehod. Z popisů nehod vyplynulo, že při nehodách obecně docházelo k posuvům a rotacím auta kolem všech os. Ve výpočtovém scénáři nehody byly autu dovoleny všechny pohyby i rotace.

Takto navržený výpočtový scénář nehody odpovídá průběhům čelních nehod tramvají do boků aut a byl použit pro všechny provedené simulace.



## 4.3 Výzkum na zjednodušených simulačních modelech

Simulační modely byly vytvořeny podle volně dostupných podkladů tak, aby co nejděleji reprezentovaly navržený scénář nehody jednotlivých tramvají s auty. Simulační modely byly sestaveny ze submodelů auta, řidiče, tramvaje a deformačního prvku. Parametry submodelů auta a řidiče byly popsány v kapitolách 2.8 a 2.9. Parametry submodelů tramvají a deformačních prvků jsou popsány v následujících kapitolách. Zjednodušenost modelu nehody byla v detailnosti simulačního modelu tramvaje, který reprezentoval pouze hrubou stavbu předního článku. Zbylé články a podvozky byly nahrazeny hmotnými body, které byly uchyceny k předním článkům. Jednotlivé submodely byly vytvořeny v prostředí softwarů Catia V5, Ansys a LS-PrePost.

### 4.3.1 Tvorba submodelů tramvají

Pro výzkum zaznamenaný v této disertační práci byly jako inspirace zvoleny celkem tři tramvaje provozované na území ČR, které mají rozdílnou konstrukci čel. Podklady a informace o jednotlivých tramvajích vycházely z volně dostupných zdrojů. Parametry reálných tramvají tak mohou být mírně odlišné, než bylo uvažováno při tomto výzkumu. V celé práci jsou proto dané tramvaje obecně označeny jako tramvaje typu A, B a C, aby bylo zřejmé, že reálné tramvaje byly pouze inspirací pro tramvaje použité při výzkumu.

**Tramvaj typu A**, viz obrázek Obr. 4-6, byla zvolena z důvodu absence deformačního prvku na čele tramvaje, a že nebyla konstruována podle požadavků normy ČSN EN 15227.

**Tramvaj typu B**, viz obrázek Obr. 4-7, byla zvolena z důvodu konstrukce podle požadavků normy ČSN EN 15227 a umístění os absorbérů energie do výšky 775 mm nad rovinou TK. Kontaktní místa nárazníku tramvaje s bokem auta jsou tak ve výšce hrudníku sedících cestujících v autech, viz obrázek Obr. 2-49.

**Tramvaj typu C**, viz obrázek Obr. 4-8, byla zvolena z důvodu konstrukce podle požadavků normy ČSN EN 15227 a umístění os absorbérů energie do výšky 525 mm nad rovinou TK. Z důvodu otevřené konstrukce nárazníku jsou kontaktní místa nárazníku tramvaje s bokem auta ve výšce 680 mm nad rovinou TK, tedy ve výšce břicha sedících cestujících v autech, viz obrázek Obr. 2-49.

Při konstrukci tramvají jsou jejich hrubé stavby dimenzovány podle legislativních požadavků kladených na životnost a pevnost při běžném provozu a při nehodě. Crashové simulační modely tramvají jsou běžně vytvářeny tak, aby co nejděleji reprezentovaly hrubé stavby reálných tramvají. Výpočty nárazů na takto vytvořených modelech dokáží s vysokou

přesností predikovat průběh nehod a případné deformace hrubých staveb článků. Při výzkumu v rámci disertační práce nebylo možné získat detailní výkresovou dokumentaci jednotlivých tramvají, aby podle nich bylo možné vytvořit přesné simulační modely. Z tohoto důvodu byla 3D geometrie simulačních modelů tramvají odměřena z volně dostupných zdrojů, viz obrázky Obr. 4-9 až Obr. 4-11.



Obr. 4-6: Čelo tramvaje typu A,  
zdroj: [mhd86.cz](http://mhd86.cz).



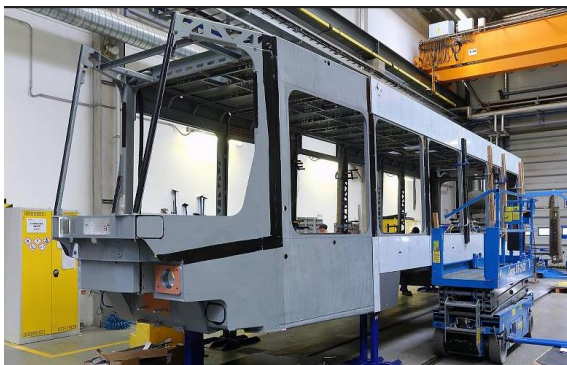
Obr. 4-7: Čelo tramvaje typu B,  
zdroj: [karlovarsky.denik.cz](http://karlovarsky.denik.cz).



Obr. 4-8: Čelo tramvaje typu C,  
zdroj: [cs-dopravak.cz](http://cs-dopravak.cz).



Obr. 4-9: Hrubá stavba předního článku tramvaje  
typu A, zdroj: [idnes.cz/technet](http://idnes.cz/technet).



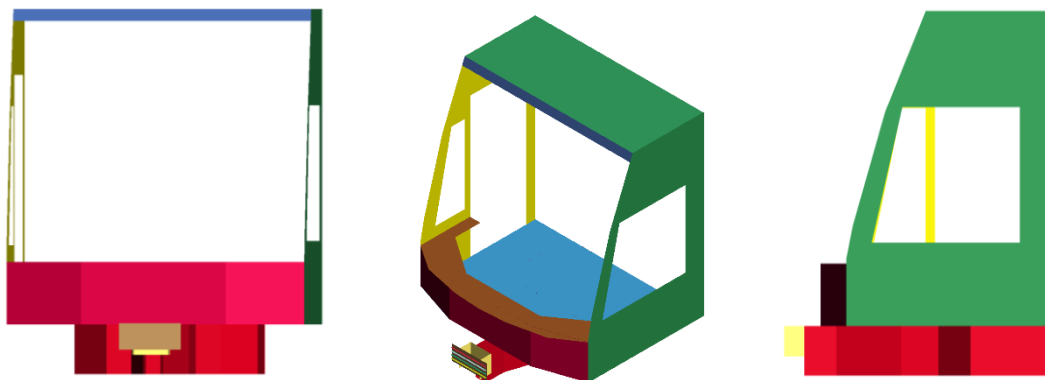
Obr. 4-10: Hrubá stavba předního článku tramvaje  
typu B, zdroj: [plzensky.denik.cz](http://plzensky.denik.cz).



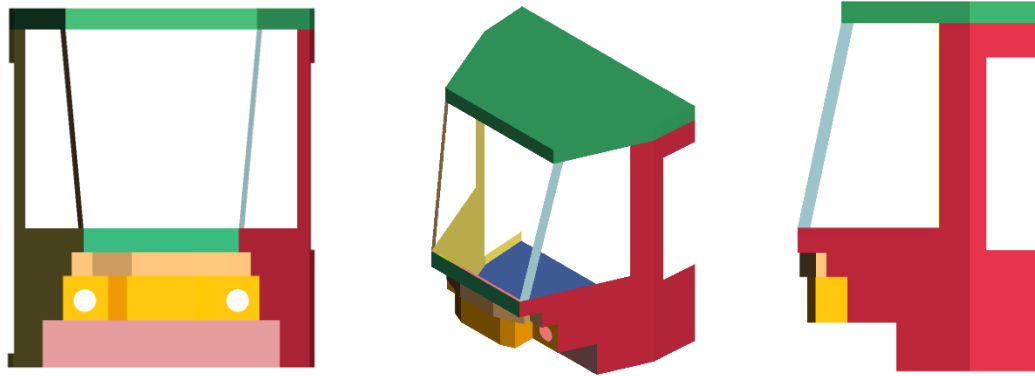
Obr. 4-11: Hrubá stavba předního článku tramvaje  
typu C, zdroj: [cs-dopravak.cz](http://cs-dopravak.cz).

Pro řešení výzkumu byl zaveden předpoklad, že z důvodu vysoké pevnosti hrubých staveb článků tramvají nedochází při nehodě s auty k jejich plastické deformaci. Argumentací byla velikost podélných sil, které musí být hrubé stavby článků schopny přenést po celou dobu životnosti, a maximální síly působící na deformační prvky tramvají. Podle uvedeného předpokladu byly při výpočtu uvažovány modely hrubých staveb tramvají jako dokonale tuhá tělesa. Tento předpoklad měl za následek menší chybu výzkumu, než kdyby byly modely tramvají uvažovány jako poddajné a vlivem špatného odměření 3D geometrie by při simulacích docházelo k nereálným deformacím tramvají a menším deformacím aut.

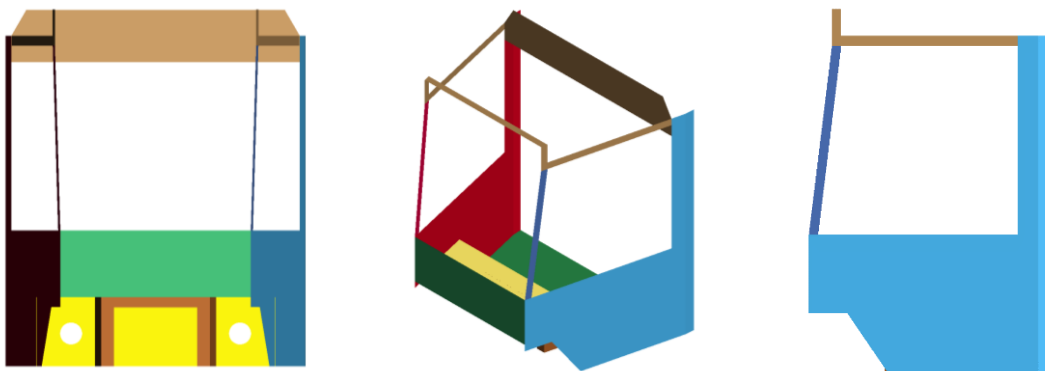
Z důvodu zavedeného předpokladu o dokonale tuhých modelech a pracnosti tvorby jednotlivých modelů reprezentovaly zjednodušené simulační modely pouze kabiny jednotlivých tramvají, viz obrázky Obr. 4-12 až Obr. 4-14. Zbylé části předního článku tramvaje nebyly uvažovány, jelikož by složitější model vedl k delším výpočtovým časům simulací bez většího přínosu k přesnosti výsledků. Kabinám tramvají byla přes hmotné body přiřazena kolizní hmotnost celé tramvaje bez deformačních prvků, viz tabulka Tab. 4-5. Kolizní hmotnost je definována vztahem (2-1) v kapitole 2.3. Hmotnost cestujících 70 kg/os je pro návrhové výpočty tramvají definována českou normou ČSN 28 1300 „Tramvajová vozidla – Technické požadavky a zkoušky“. [63]



Obr. 4-12: Simulační model kabiny tramvaje typu A.



Obr. 4-13: Simulační model kabiny tramvaje typu B.



Obr. 4-14: Simulační model kabiny tramvaje typu C.

Tab. 4-5: Hmotové parametry tramvají. [73], [74], [75]

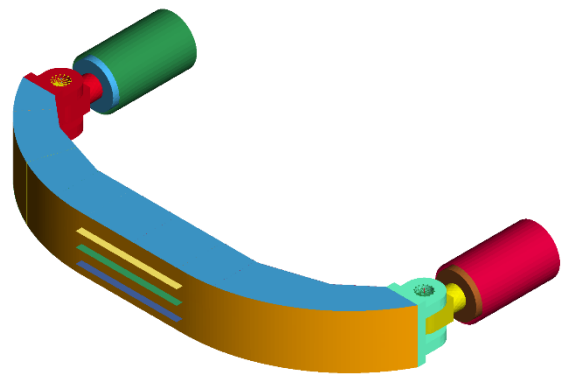
Parametr		Typ A	Typ B	Typ C
Hmotnost prázdné tramvaje	[kg]	44 300	36 835	34 500
Maximální počet míst k sezení	[-]	60	60	61
Hmotnost cestujících	[kg/os]	70	70	70
Kolizní hmotnost tramvaje	[kg]	46 400	38 935	36 670

### 4.3.2 Tvorba submodelů deformačních prvků

Tramvaj typu A není vybavena žádným deformačním prvkem. U zbylých dvou tramvajích se deformační prvky skládají ze dvou absorpčních členů propojených nárazníkem. Simulační modely deformačních prvků tramvajích typu B a C byly vytvořeny tak, aby co nejděleji reprezentovaly reálné deformační prvky zvolených tramvajích, viz obrázky Obr. 4-15 až Obr. 4-18. Modely se skládaly ze dvou absorpčních členů, ke kterým byl přes válcové vazby uchycen nárazník. Každému absorpčnímu členu byla definována zátěžová charakteristika pro absorpci požadované energie nárazu, viz obrázky Obr. 4-19 a Obr. 4-20. Charakteristiky byly navrženy podle interních podkladů od firmy Oleo, požadavků normy ČSN EN 15227 a zkušeností pracovníků pracoviště Ú12120 na Fakultě strojní ČVUT v Praze.



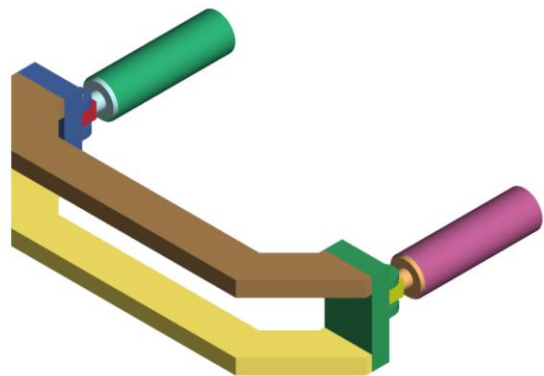
Obr. 4-15: Deformační prvek tramvaje typu B, zdroj: [seznam-autobusu.cz](http://seznam-autobusu.cz).



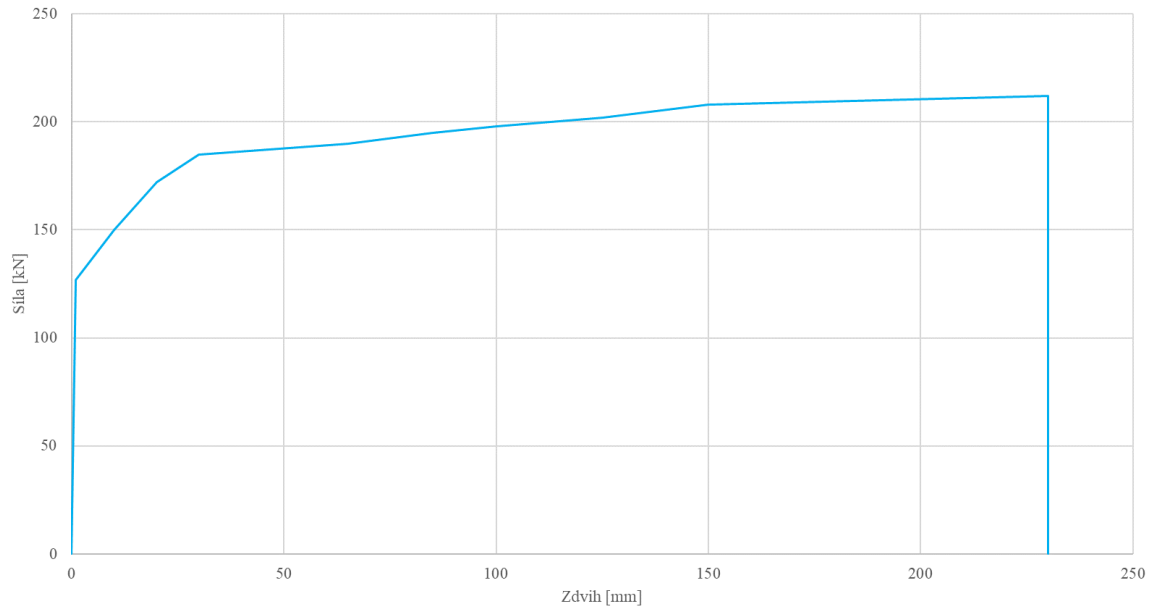
Obr. 4-16: Simulační model deformačního prvku tramvaje typu B. [5]



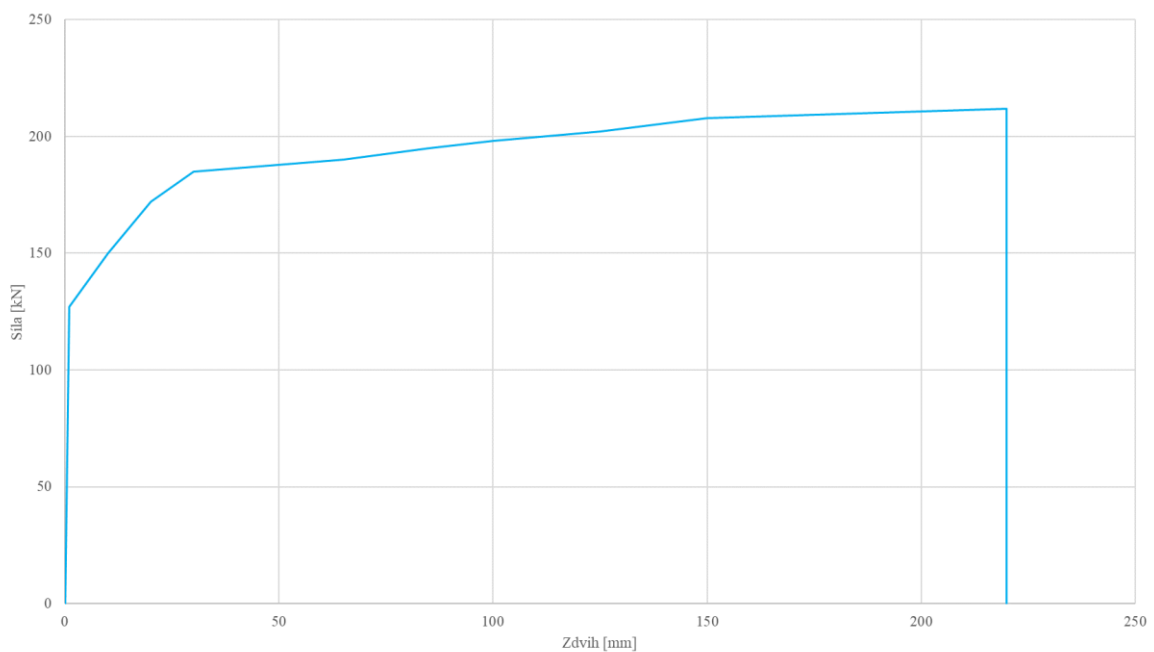
Obr. 4-17: Deformační prvek tramvaje typu C, zdroj: [novatramvajporuba.cz](http://novatramvajporuba.cz).



Obr. 4-18: Simulační model deformačního prvku tramvaje typu C. [5]

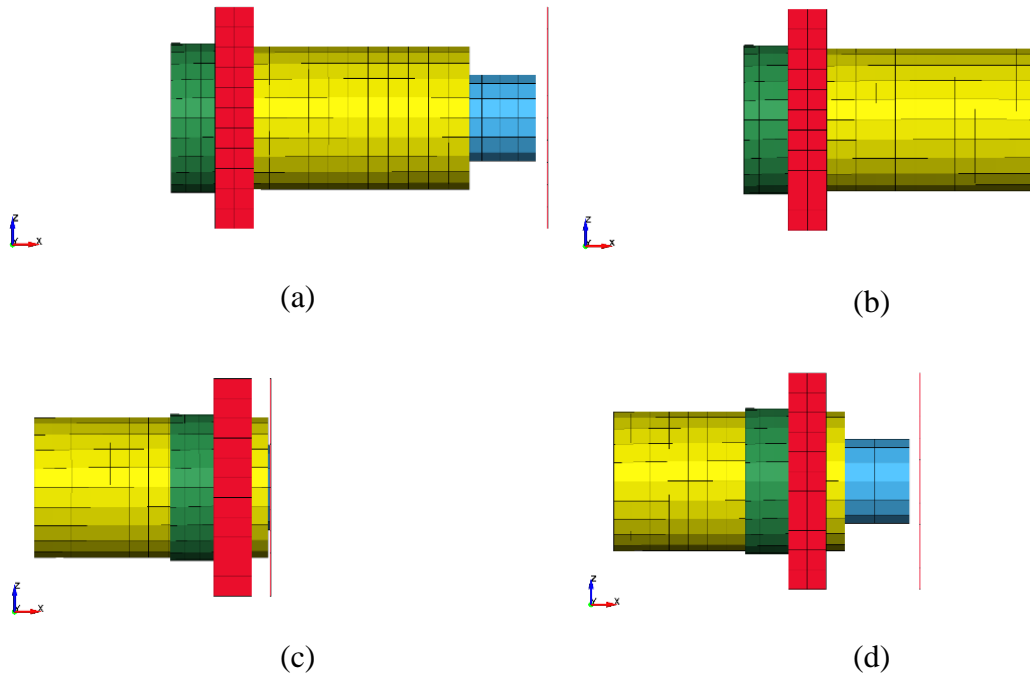


Obr. 4-19: Navržená charakteristika deformačního prvku tramvaje typu B.

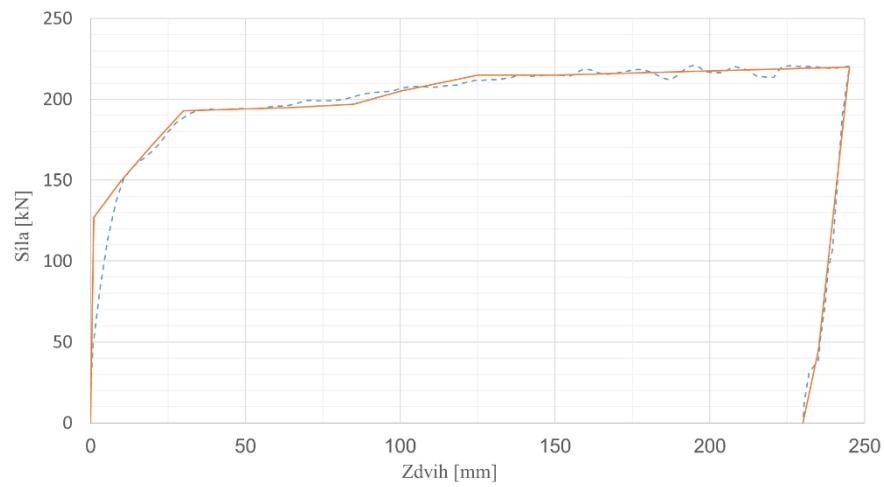


Obr. 4-20: Navržená charakteristika deformačního prvku tramvaje typu C.

Funkčnost simulačních modelů absorpčních členů u obou nárazníků byla ověřena pomocí simulace kalibrační zkoušky, při které byl absorpční člen stlačován zkušebním přípravkem až do oblasti přetížení, viz obrázek Obr. 4-21. Ze zkoušky byla vyhodnocena závislost síly na stlačení absorpčních členů, viz obrázek Obr. 4-22. Výsledky byly porovnány s navrženou charakteristikou. Porovnání dosahovalo velké shody a modely absorpčních členů byly vyhodnoceny jako verifikované.



Obr. 4-21: Průběh kalibrační zkoušky: (a) před zkouškou, (b) stlačení vratného zdvihu, (c) stlačení nevratného zdvihu, (d) po odlehčení. [5]

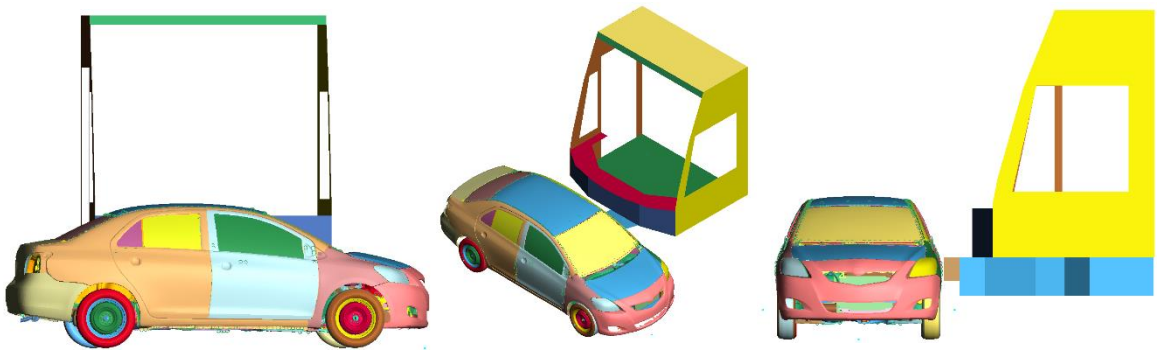


Obr. 4-22: Charakteristika absorpčního členu tramvaje typu B. [5]  
Oranžová čára – návrhová charakteristika, Modrá čára – charakteristika odečtena z validační zkoušky.

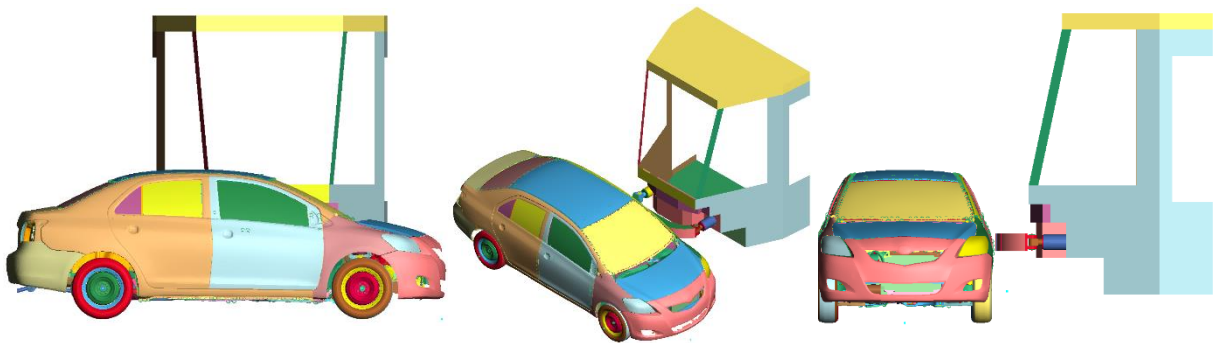
### 4.3.3 Sestavení zjednodušených simulačních modelů

Simulační modely byly sestaveny z dříve popsaných submodelů: auta, řidiče, tramvaje a deformačního prvku. Model řidiče byl k modelu sedadla auta uchycen pomocí tříbodového bezpečnostního pásu. V simulačním modelu auta nebyly definovány boční airbagy, jelikož bočními airbagy nejsou vybavována všechna nově prodavaná auta. Použití airbagů by vedlo k pozitivnějším výsledkům výzkumu. Čelní airbagy se při bočních nárazech nesmí aktivovat, a proto také nebyly v modelu uvažovány. Submodel tramvaje a deformačního prvku byl odsazen od boku auta, aby na začátku simulace nebyly modely v kontaktu. Sestavě tramvaje a deformačního prvku byla na začátku simulace definována počáteční rychlost.

Na takto sestavených modelech byly provedeny veškeré následující simulace.

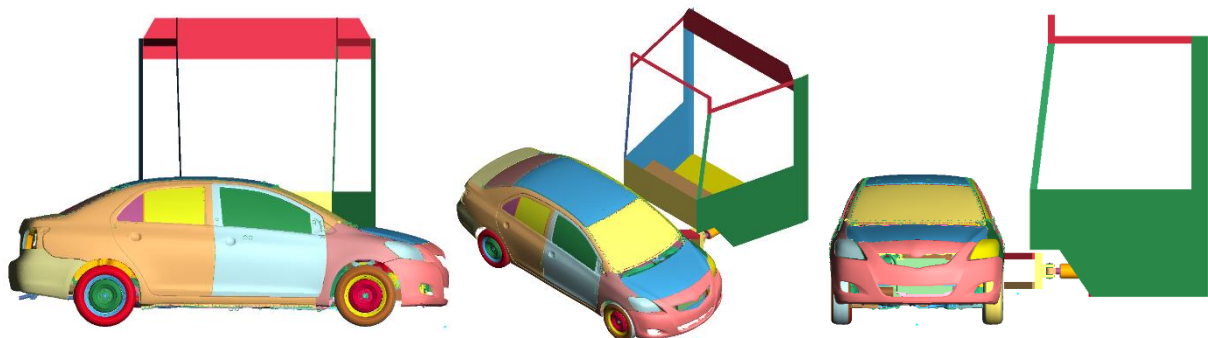


Obr. 4-23: Sestava zjednodušeného simulačního modelu tramvaje typu A.



Obr. 4-24: Sestava zjednodušeného simulačního modelu tramvaje typu B.

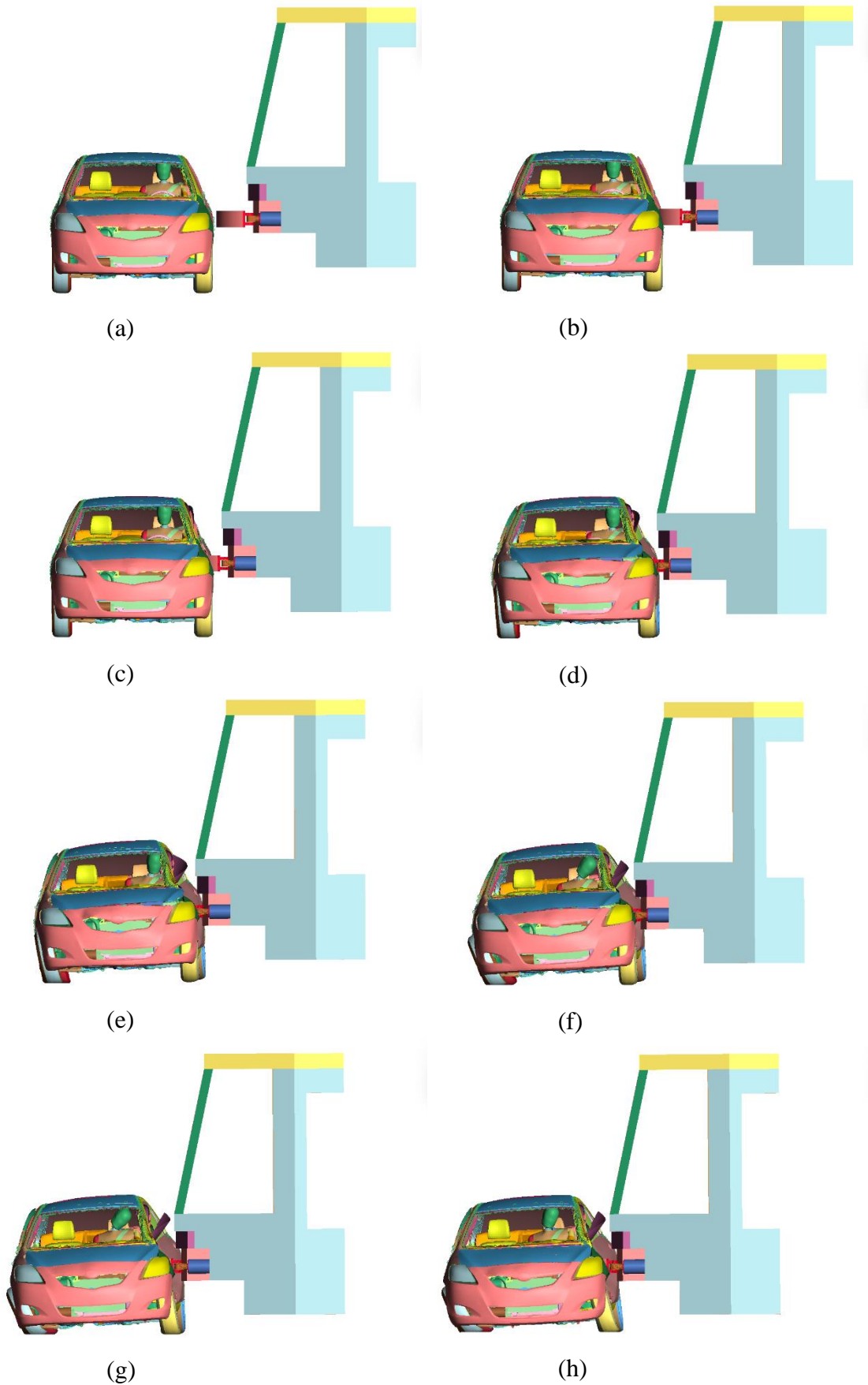




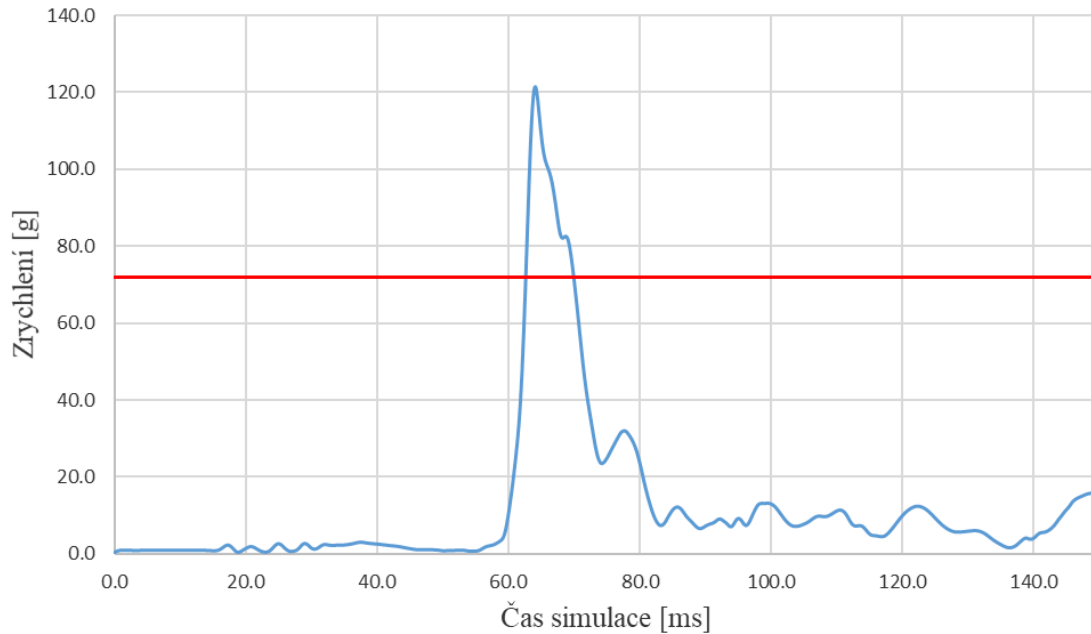
Obr. 4-25: Sestava zjednodušeného simulačního modelu tramvaje typu C.

#### 4.3.4 Simulace na zjednodušených simulačních modelech

Na simulačních modelech, viz obrázky Obr. 4-23 až Obr. 4-25, popsaných v předešlých kapitolách byly provedeny výpočty nárazu jednotlivých typů tramvají do boků auta při počáteční rychlosti tramvají: 10, 15, 20, 25, 30, 40 a 50 km/h. Veškeré simulace byly při úvaze stejných počátečních podmínek spočítány třikrát. Z výsledků všech tří simulací byl následně stanoven průměrný průběh simulací, který byl použit pro další výzkum. Z průměrného výsledku simulací byla vyhodnocena biomechanická kritéria člověka HIC a 3ms. Průběh simulace nárazu tramvaje typu B do boku auta při rychlosti 25 km/h je znázorněn na obrázku Obr. 4-26. Průběh zrychlení hlavy řidiče auta při nárazu tramvaje typu B při rychlosti 25 km/h je znázorněn na obrázku Obr. 4-27. Výsledné hodnoty jednotlivých biomechanických kritérií pro jednotlivé kolizní typy tramvají a rychlosti jsou uvedeny v tabulkách Tab. 4-6 a Tab. 4-7. Překročení limitních hodnot biomechanických kritérií je zvýrazněno červeně.



Obr. 4-26: Průběh nárazu tramvaje typu B do boku auta při rychlosti 25 km/h v čase simulace: (a) 0 ms, (b) 20 ms, (c) 40 ms, (d) 60 ms, (e) 80 ms, (f) 100 ms, (g) 120 ms, (h) 140 ms. [5]



Obr. 4-27: Průběh zrychlení těžiště hlavy řidiče. [5]  
Červená čára – Limitní hodnota 72g biomechanického kritéria 3ms.

Tab. 4-6: Vyhodnocení biomechanického kritéria HIC pro jednotlivé tramvaje a rychlosti. [5]

Rychlost tramvaje [km/h]	Typ A	Typ B	Typ C
10	25,7	44,6	39,6
15	73,7	157,0	122,9
20	165,8	348,7	266,0
25	335,5	<b>671,2</b>	<b>593,9</b>
30	478,0	<b>911,3</b>	<b>852,9</b>
40	<b>783,3</b>	<b>1797,0</b>	<b>1720,0</b>
50	<b>1255,0</b>	<b>2177,0</b>	<b>2128,0</b>

Tab. 4-7: Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé tramvaje a rychlosti. Hodnota v tabulce značí maximální hodnotu kritéria a dobu překročení limitní hodnoty. [5]

Rychlost tramvaje [km/h]	Typ A	Typ B	Typ C
10	37,0/0,0	44,6/0,0	43,7/0,0
15	49,7/0,0	49,7/0,0	49,8/0,0
20	65,3/0,0	83,7/2,1	71,8/0,0
25	83,3/1,9	<b>121,4/7,3</b>	<b>99,2/4,5</b>
30	<b>97,7/5,1</b>	<b>142,1/8,2</b>	<b>127,2/6,7</b>
40	<b>115,4/8,2</b>	<b>174,7/8,5</b>	<b>173,4/8,1</b>
50	<b>155,4/12,9</b>	<b>213,3/9,1</b>	<b>210,9/8,2</b>

### 4.3.5 Diskuse výsledků

Z výsledků simulací uvedených v tabulkách Tab. 4-6 a Tab. 4-7 vyplývá, že limitní hodnoty biomechanických kritérií řidiče auta při nehodách s tramvajemi typu B a C byly překročeny při rychlosti tramvají 25 km/h. Vyšších hodnot biomechanických kritérií bylo dosaženo při nehodách s tramvají typu B. U tramvaje typu A byly limitní hodnoty biomechanických kritérií překročeny až při rychlosti 30 km/h, přestože má tato tramvaj největší kolizní hmotnost a tedy i největší kinetickou energii při nárazu. Za příčinu méně závažných následků nehod u tramvaje typu A byla identifikována nižší výšková pozice kontaktního bodu nad rovinou TK než u zbylých dvou tramvají. U tramvají B a C byl kontaktní bod v místě hrudi a ramene řidiče auta. Při nehodě došlo ke kontaktu hlavy a ramene řidiče s deformujícím bokem auta. U tramvaje A byl kontaktní bod v místě stehen řidiče auta. Při nehodě došlo ke kontaktu pánve a nohou s deformujícím bokem auta, a proto následky nehod nebyly tak závažné.

Z dříve uvedených výsledků a závěrů simulací vyplývá, že konstrukce tramvají podle požadavků normy ČSN EN 15227 vede ke zmírnění následků nehod na tramvajích, ale může vést ke zhoršení následků nehod na kolizních vozidlech.

Pro naplnění cílů programu *Vize 0*, tedy snížení následků nehod a rizika vzniku zranění nebo úmrtí při dopravních nehodách, je vhodné vytvořit metodiku návrhu čela tramvají, která by poskytovala výrobcům vozidel návod, jak navrhnout čelo tramvaje s ohledem na snížení následků nehod na auta při zachování požadavků normy ČSN EN 15227.

Nejvyššího rizika zranění cestujících bylo dosahováno při nehodách s tramvají typu B. Tramvaj typu B byla proto zvolena pro další výzkum v rámci disertační práce.

### 4.3.6 Omezení zjednodušených simulačních modelů

Zjednodušené simulační modely reprezentovaly pouze kabiny zvolených tramvají, kterým byly přiřazeny hmotnostní parametry celých tramvají. Výhodou zjednodušeného modelu byla jeho snadná tvorba a krátký výpočtový čas simulací. Omezením zjednodušeného modelu bylo nerespektování reálné koncepce tramvaje, rozložení hmotností tramvaje a nepostihnutí pohybů tramvaje při nehodě, jako je sednutí ve vypružení podvozků, kývání článků tramvaje, atd. Veškerá tato zjednodušení vedla k ovlivnění výsledků simulací.

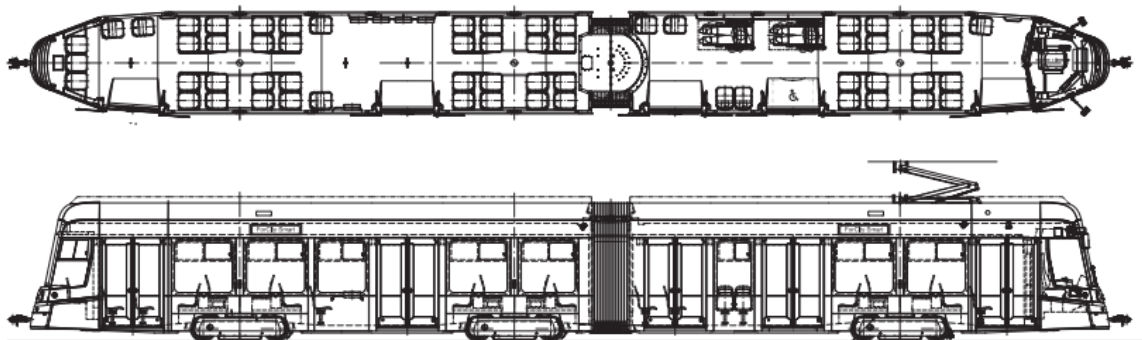
Pro výzkum v rámci disertační práce je nutné vytvořit komplexní model, který by s vysokou přesností reprezentoval reálnou tramvaj, a to jak v ohledu rozměrů, rozložení hmotností, vypružení v podvozcích a koncepce mezičlánekových spojení. Lze předpokládat, že simulace provedené na komplexním modelu budou věrněji reprezentovat reálnou nehodu.

## 4.4 Tvorba komplexního simulačního modelu

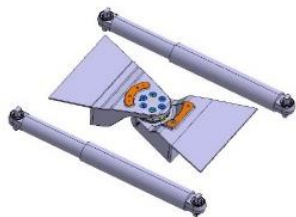
Ze závěrů předešlé kapitoly byla pro další výzkum v rámci disertační práce zvolena tramvaj typu B. Tato kapitola detailně popisuje tvorbu komplexního simulačního modelu nárazu tramvaje typu B do boku auta. Parametry modelů auta, řidiče a deformačního prvku byly popsány v předešlých kapitolách, a proto nejsou znovu popisovány. Stejně jako zjednodušené modely v předchozí kapitole byl i komplexní simulační model tramvaje vytvořen podle volně dostupných podkladů a zkušeností pracovníků Ú12120 na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Veškeré předpoklady výzkumu zavedené při simulacích se zjednodušenými simulačními modely byly aplikovány i při výzkumu s komplexním simulačním modelem.

### 4.4.1 Tvorba komplexního simulačního modelu tramvaje

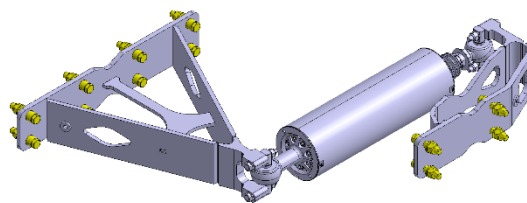
Simulační model tramvaje typu B byl vytvořen s ohledem na co největší přesnost reprezentace reálné tramvaje. Tramvaj typu B je dvoučlávková tramvaj se třemi podvozky. Typový výkres, který byl použit pro stanovení veškerých délkových rozměrů tramvaje a pozice podvozků a sedaček pro cestující, je znázorněn na obrázku Obr. 4-28. Přední podvozek byl v simulačním modelu uvažován jako netrakční a oba podvozky zadního článku byly uvažovány jako trakční. Ve volně dostupných zdrojích nebyly nalezeny žádné informace ohledně mezičlávkového spojení použitého na tramvaji typu B. Podle zkušeností autora disertační práce a koncepce tramvaje bylo stanoveno, že spojení musí umožňovat rotaci článků vůči sobě kolem všech tří os, jinak by tramvaj nebyla schopna projíždět horizontálními, vertikálními a převýšenými oblouky. Z uvedených důvodů bylo v simulačním modelu uvažováno spodní spojení typu sférické ložisko, viz obrázek Obr. 4-29, a horní spojení typu rozvolněná příčná tyč, viz obrázek Obr. 4-30. [64]



Obr. 4-28: Typový výkres tramvaje typu B, zdroj: [Skodagroup.com](http://Skodagroup.com).



Obr. 4-29: Spojení typu sférické ložisko. [64]



Obr. 4-30: Spojení typu rozvolněná příčná tyč. [64]

### **Hmotnostní analýza tramvaje typu B**

Hmotnostní analýza tramvaje typu B byla provedena podle zkušeností pracovníků Ú12120 na Fakultě strojní ČVUT v Praze a znalosti hmotnosti prázdné tramvaje 36 835 kg a kolizní hmotnosti tramvaje 38 935 kg, které byly definovány v předešlé kapitole. Kolizní hmotnost tramvaje byla rozdělena do těchto hlavních konstrukčních celků tramvaje: přední a zadní článek, cestující v předním a zadním článku, elektrická výzbroj na střeše předního a zadního článku a podvozky tramvaje. Souhrnná hmotnostní analýza celé tramvaje typu B je uvedena v tabulce Tab. 4-8. Podrobnější informace k jednotlivým konstrukčním celkům tramvaje jsou uvedeny dále.

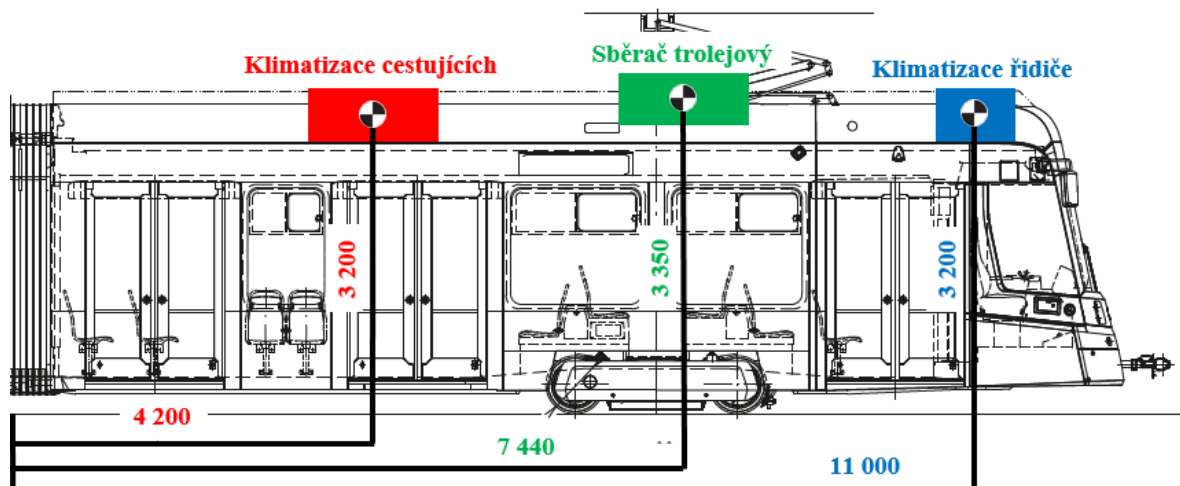
Tab. 4-8: Hmotnostní analýza tramvaje typu B. [76]

<b>Popis konstrukčního celku</b>	<b>Hmotnost [kg]</b>
Přední článek	10 177
Zadní článek	12 373
Elektrická výzbroj (přední článek)	1 015
Elektrická výzbroj (zadní článek)	1 570
Podvozek 1 (netrakční)	2 900
Podvozek 2 a 3 (trakční)	4 400
<b>Hmotnost prázdné tramvaje</b>	<b>36 835</b>
Cestující (přední článek)	770
Cestující (zadní článek)	1 330
<b>Kolizní hmotnost tramvaje</b>	<b>38 935</b>

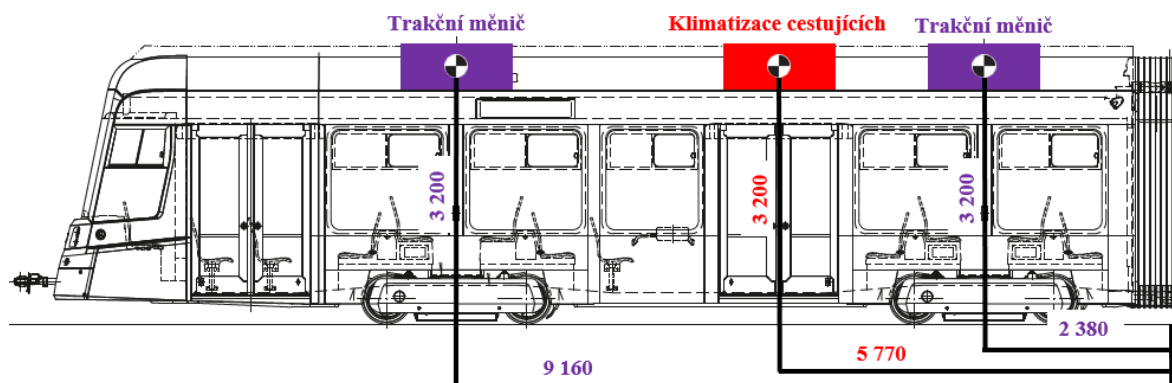
Při výzkumu byly uvažovány tyto komponenty elektrické výzbroje na střeše tramvaje: klimatizace cestujících, trakční měnič, sběrač trolejový a klimatizace řidiče. Hmotnostní analýza elektrické výzbroje pro jednotlivé články je rozepsána v tabulce Tab. 4-9 a rozmístění elektrické výzbroje na jednotlivých člancích je znázorněno na obrázcích Obr. 4-31 a Obr. 4-32. Vzdálenosti definující pozice jednotlivých elektrických komponent jsou vztaženy k rovině TK v ose mezičlánekového spojení.

Tab. 4-9: Hmotnostní analýza elektrické výzbroje tramvaje typu B.

Přední článek	Hmotnost [kg]	Zadní článek	Hmotnost [kg]
Klimatizace řidiče	215	Trakční měnič – přední	510
Sběrač trolejový	250	Klimatizace cestujících	550
Klimatizace cestujících	550	Trakční měnič – zadní	510
<b>Celkem</b>	<b>1 015</b>	<b>Celkem</b>	<b>1 570</b>



Obr. 4-31: Rozmístění elektrické výzbroje na předním článku tramvaje typu B.



Obr. 4-32: Rozmístění elektrické výzbroje na zadním článku tramvaje typu B.

Celková hmotnost podvozků byla při výzkumu rozdělena mezi tyto komponenty: kolébka, podélná táhla, rám podvozku, ložiskové komory a dvojkolí. U trakčních podvozků 2 a 3 byly uvažovány ještě komponenty pohonné jednotky. Hmotnostní analýza podvozků je uvedena v tabulce Tab. 4-10.

Tab. 4-10: Hmotnostní analýza podvozků tramvaje typu B.

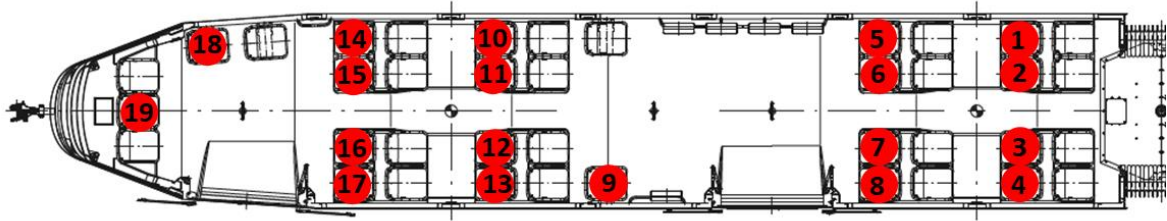
Komponent	Hmotnost [kg/ks]	Počet ks [-]	Celková hmotnost [kg]
Kolébka	490	1	490
Podélná táhla	20	2	40
Rám podvozku	1 050	1	1 050
Ložiskové komory	80	4	320
Dvojkolí	500	2	1 000
<b>Celková hmotnost podvozku 1</b>			<b>2 900</b>
Pohonná jednotka	750	2	1 500
<b>Celková hmotnost podvozků 2 a 3</b>			<b>4 400</b>

Podle údajů v typovém výkresu na obrázku Obr. 4-28 může tramvaj typu B maximálně přepravit 60 sedících cestujících. Podle požadavků normy ČSN EN 15227 pro výpočet kolizní hmotnosti má být uvažována polovina sedících cestujících, tedy 30. V předním článku bylo pro další výzkum uvažováno 11 cestujících o celkové hmotnosti 770 kg a v zadním článku 19 cestujících o celkové hmotnosti 1 330 kg. Při rozdělení cestujících byla snaha maximální počet cestujících umístit na sedačky proti směru jízdy tramvaje, aby byl zachován smysl vztahu pro výpočet kolizní hmotnosti tramvají uvedený v normě ČSN EN 15227. Rozmístění jednotlivých cestujících v tramvaji je znázorněno na obrázcích Obr. 4-33 a Obr. 4-34.



Obr. 4-33: Rozmístění cestujících v předním článku tramvaje typu B.





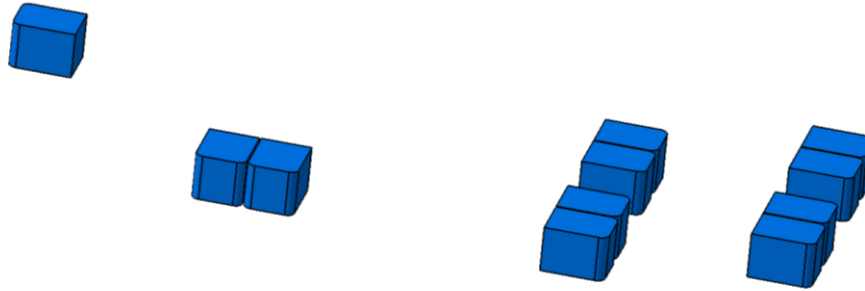
Obr. 4-34: Rozmístění cestujících v zadním článku tramvaje typu B.

Konstrukčním celkům přední a zadní článku byla přiřazena zbylá hmotnost do součtu kolizní hmotnosti celé tramvaje. Hmotnost mezi články byla rozdělena podle poměrů délek obou článků.

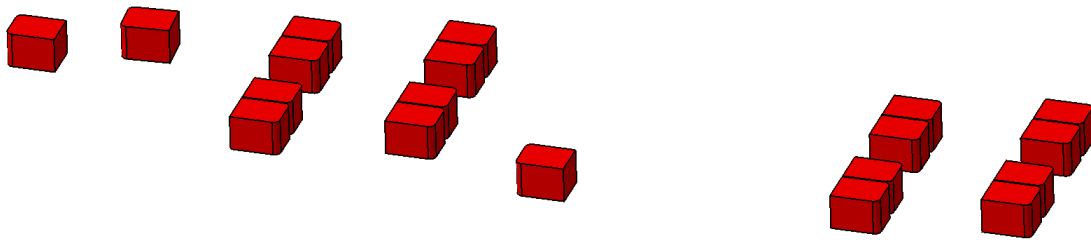
### **Tvorba 3D modelu tramvaje typu B**

Podle dříve uvedených podkladů k tramvaji typu B byl v softwaru CATIA V5 vytvořen 3D CAD model celé tramvaje. 3D model byl vytvořen jako podklad pro tvorbu MKP modelu jednotlivých článků a stanovení hmotových parametrů jednotlivých částí modelu, které byly v simulačním modelu definovány pomocí hmotných bodů, tedy pro modely cestujících a elektrické výzbroje.

Modely cestujících, viz obrázky Obr. 4-35 a Obr. 4-36, byly vytvořeny podle požadavků předpisu VDV152 pro tramvajová vozidla, který definuje pozici těžiště sedících cestujících 200 mm nad sedadlo [65]. Hmotové parametry modelu cestujícího jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-11. Modely komponentů elektrické výzbroje na střeše, viz obrázky Obr. 4-37 a Obr. 4-38, byly v modelu zjednodušeny na kvádry, kterým byla definována hustota, aby bylo dosaženo požadované hmotnosti daných komponent. Hmotové parametry jednotlivých modelů elektrických komponent jsou uvedeny v tabulkách Tab. 4-12 a Tab. 4-13. Rozměry hrubých staveb článků byly odměřeny z typového výkresu, viz obrázek Obr. 4-28, a volně dostupných fotografií konstrukce tramvaje typu B, viz obrázek Obr. 4-39. Z důvodu zavedení předpokladu o dokonale tuhých modelech hrubých staveb skříní tramvajů při tvorbě zjednodušených simulačních modelů byly 3D modely hrubých staveb, viz obrázky Obr. 4-40 a Obr. 4-41, a podvozků tramvaje typu B, viz obrázek Obr. 4-42, vytvořeny pouze z ploch. Tento postup usnadnil následnou tvorbu MKP modelu a snížil počet uzlů a elementů oproti prostorovému modelu, čímž došlo ke snížení výpočtového času jednotlivých simulací.



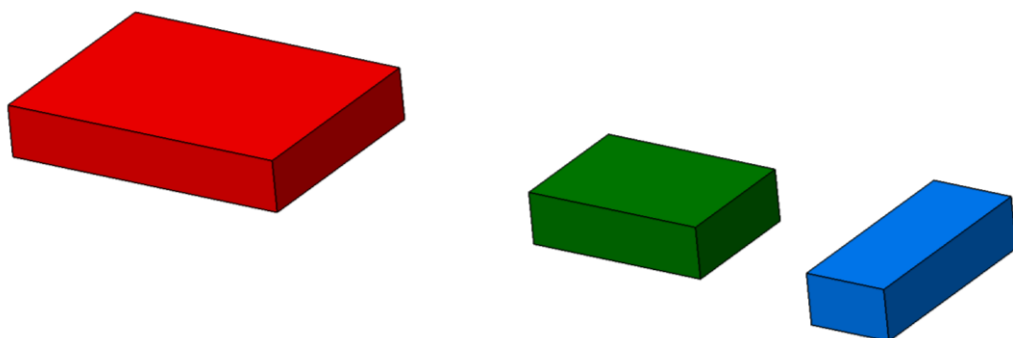
Obr. 4-35: 3D model cestujících v předním článku tramvaje typu B.



Obr. 4-36: 3D model cestujících v zadním článku tramvaje typu B.

Tab. 4-11: Hmotnostní parametry modelu cestujících.

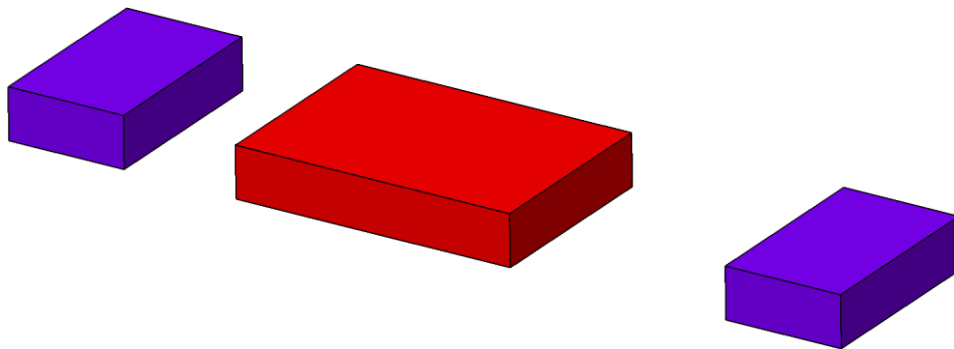
Parametr	Jednotka	Hodnota
Hmotnost	[kg]	70
Moment setrvačnosti $I_{xx}$	[kg*m <sup>2</sup> ]	2,0
Moment setrvačnosti $I_{yy}$	[kg*m <sup>2</sup> ]	2,6
Moment setrvačnosti $I_{zz}$	[kg*m <sup>2</sup> ]	2,8



Obr. 4-37: 3D model elektrické výzbroje předního článku tramvaje typu B.

Tab. 4-12: Hmotnostní parametry elektrické výzbroje předního článku.

Parametr	Jednotka	Klimatizace řidiče	Sběrač trolejový	Klimatizace cestujících
Hmotnost	[kg]	215	250	550
Moment setrvačnosti $I_{xx}$	[kg*m <sup>-2</sup> ]	48,8	24,1	124,6
Moment setrvačnosti $I_{yy}$	[kg*m <sup>-2</sup> ]	10,4	44,1	233,2
Moment setrvačnosti $I_{zz}$	[kg*m <sup>-2</sup> ]	53,5	61,6	343,1

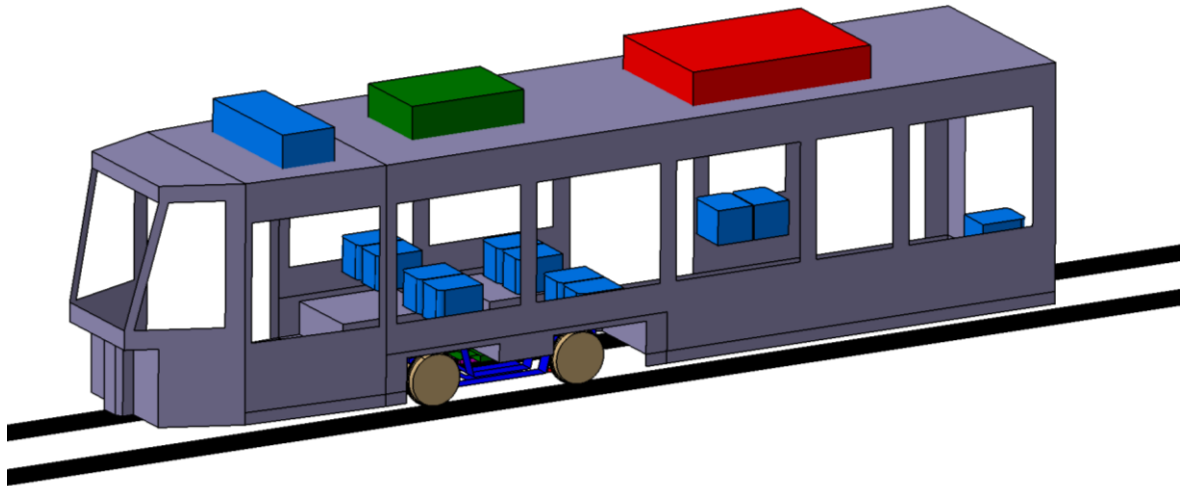


Obr. 4-38: 3D model elektrické výzbroje zadního článku tramvaje typu B.

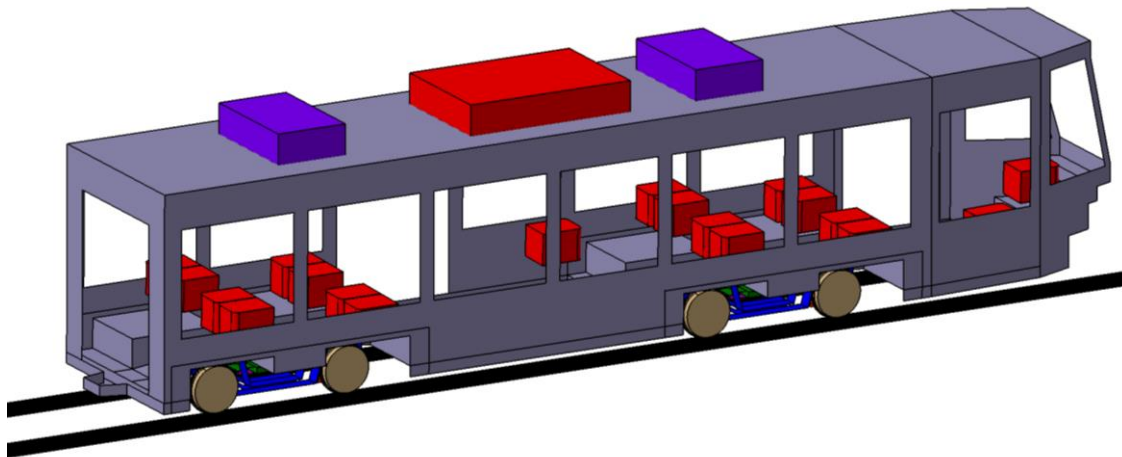
Tab. 4-13: Hmotnostní parametry elektrické výzbroje zadního článku.

Parametr	Jednotka	Trakční měnič	Klimatizace cestujících
Hmotnost	[kg]	510	550
Moment setrvačnosti $I_{xx}$	[kg*m <sup>-2</sup> ]	102,4	124,6
Moment setrvačnosti $I_{yy}$	[kg*m <sup>-2</sup> ]	43,2	233,2
Moment setrvačnosti $I_{zz}$	[kg*m <sup>-2</sup> ]	132,1	343,1

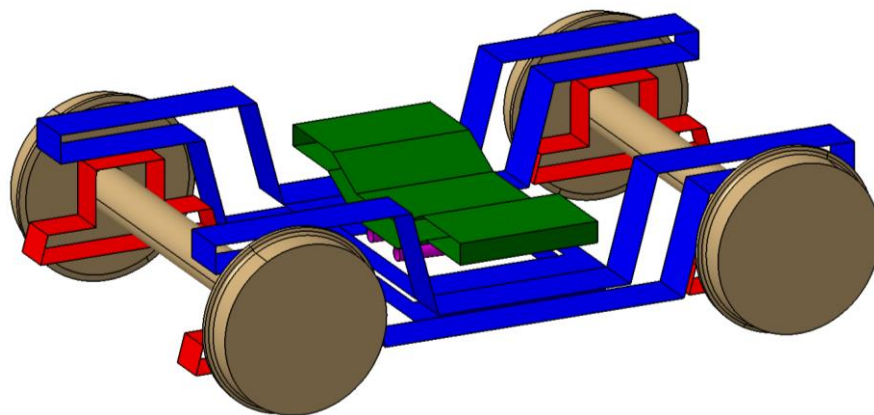

 Obr. 4-39: Konstrukce tramvaje typu B, zdroj: [plzensky.denik.cz](http://plzensky.denik.cz).



Obr. 4-40: 3D model předního članku tramvaje typu B.



Obr. 4-41: 3D model zadního članku tramvaje typu B. [77]

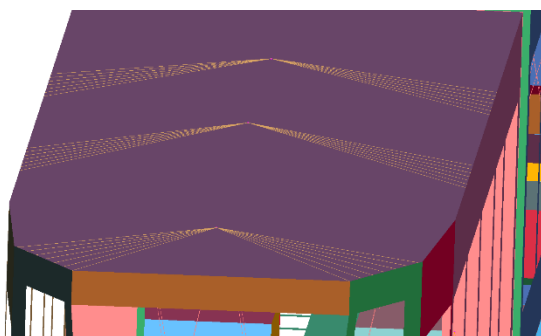


Obr. 4-42: 3D model podvozku 1.

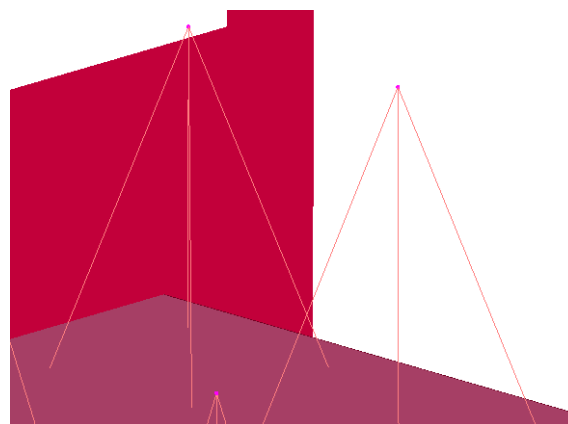
## Tvorba simulačního modelu tramvaje typu B

Simulační model tramvaje typu B byl vytvořen v softwarech Ansys a LS-Prepost z dříve vytvořeného 3D modelu. Veškerá MKP síť modelů článků a podvozků byla vytvořena z shell elementů, a ne z prostorových prvků. Volba shell elementů snížila celkový počet uzlů a elementů, čímž bylo dosaženo snížení výpočtového času jednotlivých simulací. Při tvorbě MKP sítě byla věnována velká pozornost rozměrům elementů, které definovaly MKP síť. Důvodem byla snaha maximalizovat časový krok  $\Delta t$  simulací, který je závislý na nejmenším charakteristickém rozměru všech elementů simulačního modelu.

Elektrické komponenty a jednotliví cestující byli v modelu reprezentováni pomocí hmotných bodů, které byly umístěny v těžištích jednotlivých komponent tramvaje a uchyceni k modelu článků pomocí rigid beam elementů. Hmotným bodům byly přiřazeny hmotové parametry nahrazované součásti. Simulační model klimatizace cestujících je znázorněn na obrázku Obr. 4-43 a simulační model cestujících je znázorněn na obrázku Obr. 4-44.

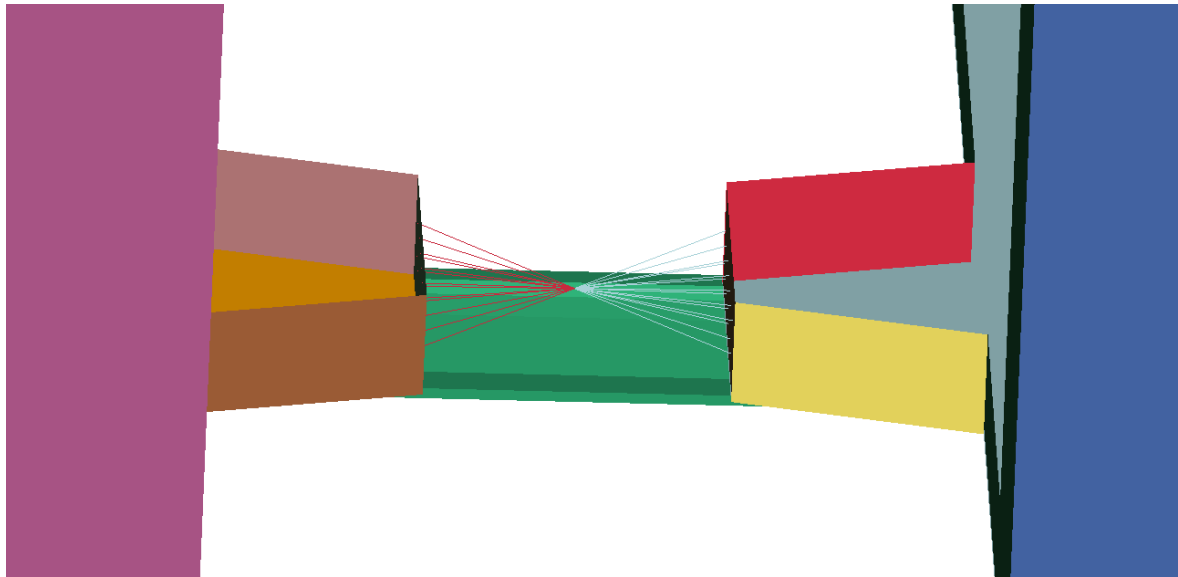


Obr. 4-43: Model elektrických komponent na předním článku.

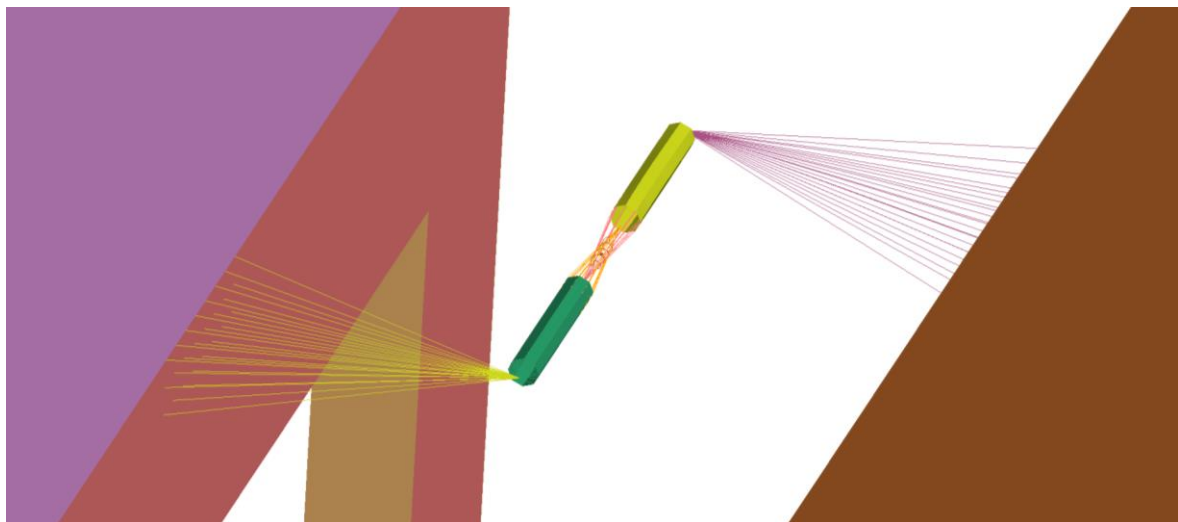


Obr. 4-44: Model cestujících.

Spodní mezičlánkové spojení bylo v modelu reprezentováno pomocí sférické vazby propojující oba články. Horní spojení bylo reprezentováno pomocí posuvné vazby mezi dvěma částmi příčné tyče doplněné o pružinu s konstantní tuhostí 100 N/mm. Jednotlivé části příčné tyče byly přes sférickou vazbu uchyceny k oběma článkům. Model spodního mezičlánkového spojení je znázorněn na obrázku Obr. 4-45 a horního mezičlánkového spojení je znázorněn na obrázku Obr. 4-46.



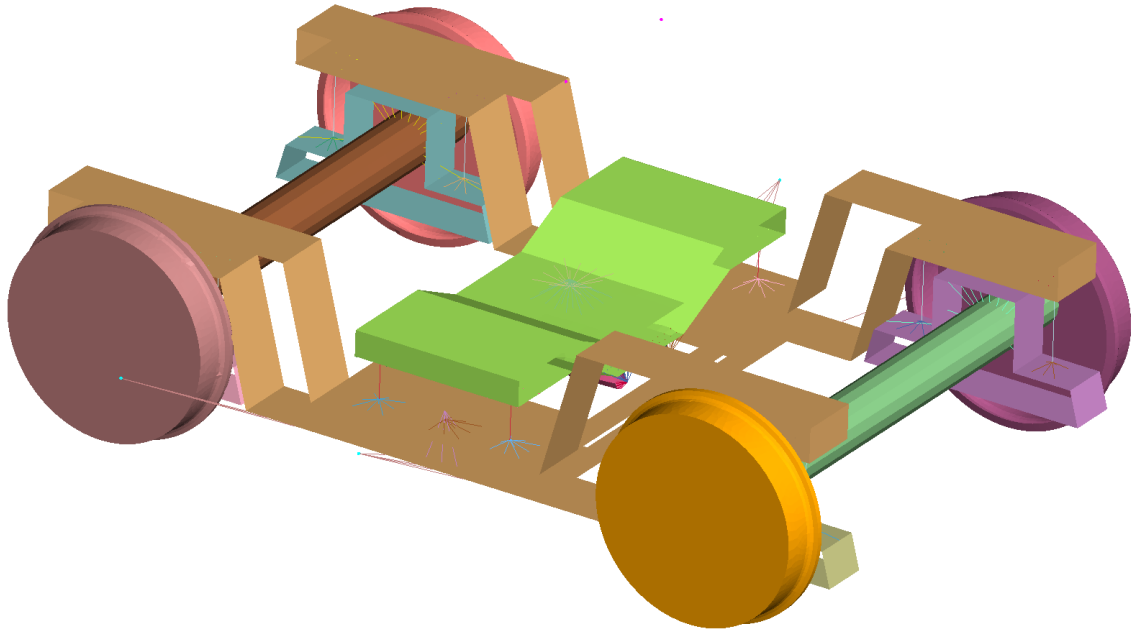
Obr. 4-45: Model spodního mezičlánekového spojení.



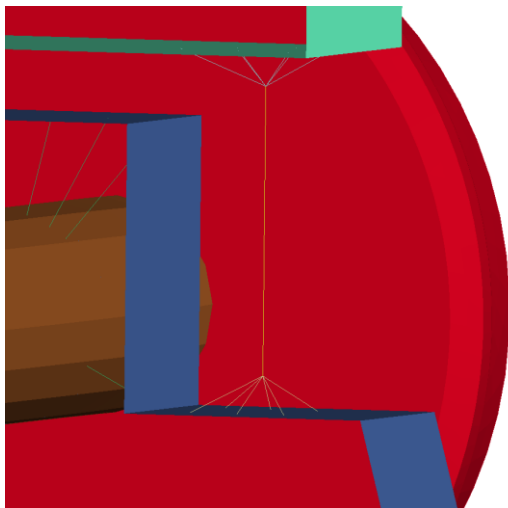
Obr. 4-46: Model horního mezičlánekového spojení.

Jednotlivé komponenty simulačního modelu podvozku, viz obrázek Obr. 4-47, byly mezi sebou propojeny silovými prvky reprezentujícími prvky vypružení a vazby. Typy silových prvků byly voleny tak, aby byla co nejvěrněji reprezentována funkce podvozku. Modely dvojkolí byly propojeny s ložiskovými domky přes jointy typu Revolute. Joint typu Revolute umožňuje pouze rotaci nápravy vůči ložiskovým domkům kolem příčné osy. Modely ložiskových domků byly s rámem podvozku propojeny pomocí dvou pryžových prvků s tuhostmi ve všech směrech a rotacích. Pružiny byly v modelu definovány pomocí beam elementů, kterým byl definován materiál 093 MAT\_Elastic\_6DOF, viz obrázek Obr. 4-48. Rám podvozku byl s kolébkou propojen pomocí čtyř vinutých pružin a dvou podélných táhel pro přenos podélných sil. Vinuté pružiny byly v modelu definovány stejně jako pryžové prvky primárního vypružení pomocí beam elementů a materiálem typu 093. Podélná táhla byla k rámu

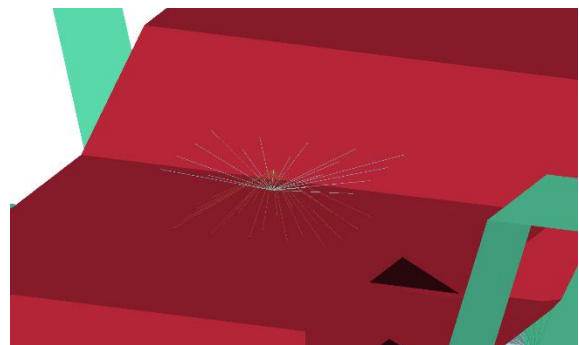
i kolébce uchycena pomocí dvou jointů typu Spherical, který umožňoval rotaci kolem všech tří os podvozku. Kolébka podvozku byla se skříní propojena pomocí otočového ložiska, které bylo v modelu reprezentováno jointem typu Revolute, který umožňoval rotaci kolem svislé osy z, viz obrázek Obr. 4-49. Modely všech tří podvozků byly vytvořeny jako totožné. U podvozků 2 a 3 byly navíc definovány hmotné body reprezentující pohonné jednotky na obou stranách podvozků.



Obr. 4-47: Model podvozku 2.

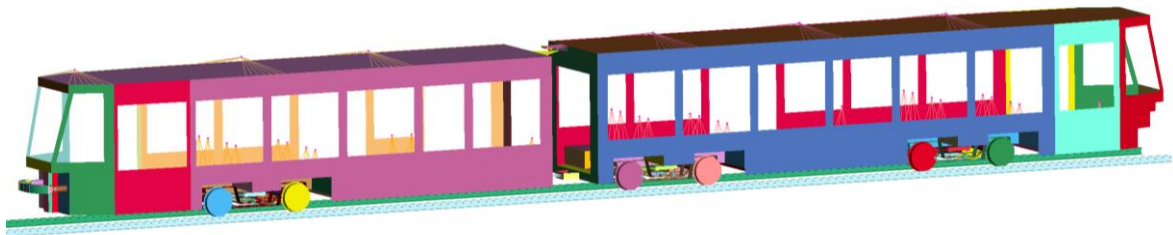


Obr. 4-48: Model primárního vypružení.



Obr. 4-49: Model otočového ložiska.

Simulační model vytvořený ze submodelů popsaných dříve umožnil oproti zjednodušeným modelům postihnout reálné rozložení hmotnosti tramvaje, sednutí ve vypružení podvozků a pohyby článků tramvaje vlivem nárazu do auta. Zpřesnění modelu umožnilo věrněji reprezentovat reálný průběh nehody než s výpočty na zjednodušených modelech. Finální podoba simulačního modelu tramvaje typu B je znázorněna na obrázku Obr. 4-50.



Obr. 4-50: Simulační model tramvaje typu B. [77]

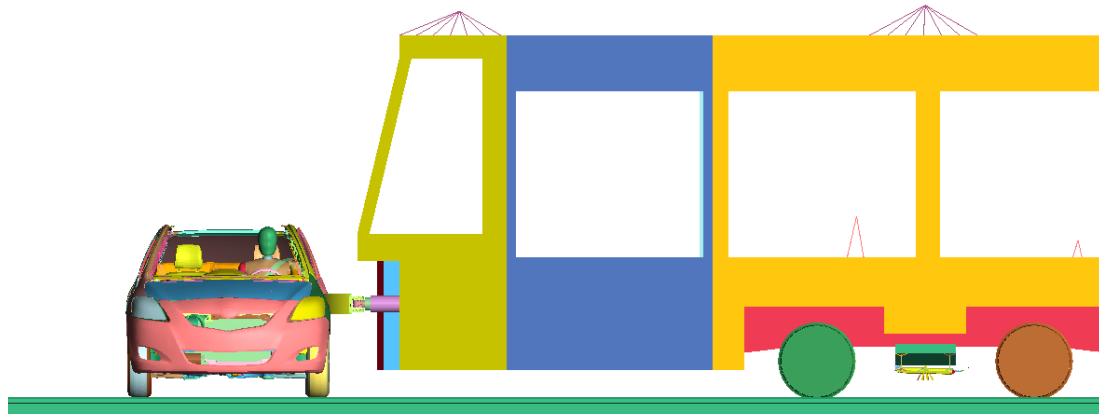
#### 4.4.2 Porovnání výsledků variant simulačních modelů

S vytvořeným komplexním model tramvaje typu B, jehož tvorba byla popsána v kapitole 4.4.1, byl proveden výpočet simulace nárazu do osobního auta podle požadavků navrženého výpočtového scénáře nehody popsaného v kapitole 4.2. Průběh nárazu tramvaje do auta na komplexním modelu je znázorněn na obrázku Obr. 4-51. Simulace byla provedena pro rychlost tramvaje 25 km/h. Stejně jako u výpočtů simulací se zjednodušenými simulačními modely byla simulace provedena třikrát při úvaze stejných počátečních podmínek. Z výsledků všech tří simulací byl následně stanoven průměrný průběh simulací.

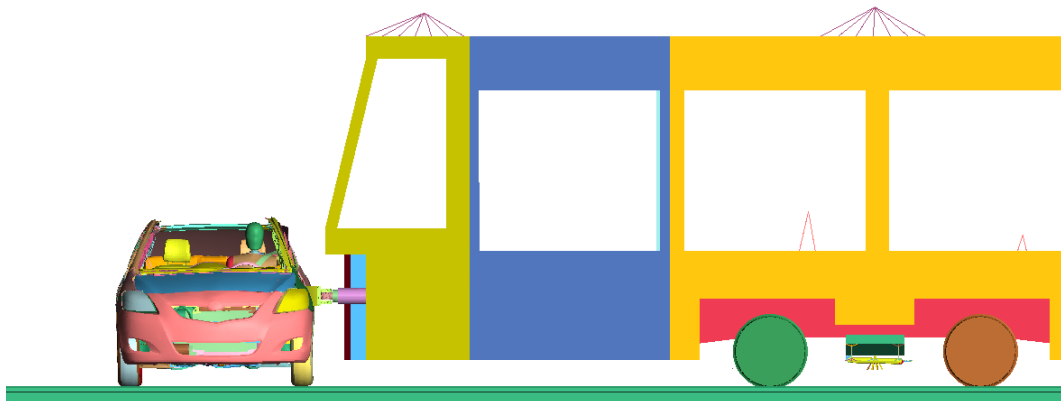
Pro ověření požadavků normy ČSN EN 15227 na bezpečnost cestujících a posádek v tramvajích bylo ze simulací na komplexním modelu vyhodnoceno zpomalení v předním a zadním článku a zdvih všech kol tramvaje. Maximální hodnota zpomalení v obou člancích nepřekročila hodnotu 0,25g. Podle normy ČSN EN 15227 je limitní hodnota 5g. Po celou dobu simulace nedošlo k vyšplhání okolků o více než 75% nominální výšky okolku. Z uvedených výsledků vyplývá, že při nehodě tramvaje s autem dochází k plnění požadavků normy ČSN EN 15227 na ochranu cestujících a posádky v tramvaji a je možné se věnovat optimalizaci čel tramvají pro snížení následků nehod na autech.

Výsledky simulace na komplexním modelu byly následně porovnány s výsledky na zjednodušeném simulačním modelu. Porovnání bylo provedeno pro průběh zrychlení hlavy řidiče a hodnoty biomechanického kritéria 3 ms. Průběh zrychlení hlavy je znázorněn na obrázku Obr. 4-52 a hodnoty kritéria 3 ms jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-14.





(a)



(b)

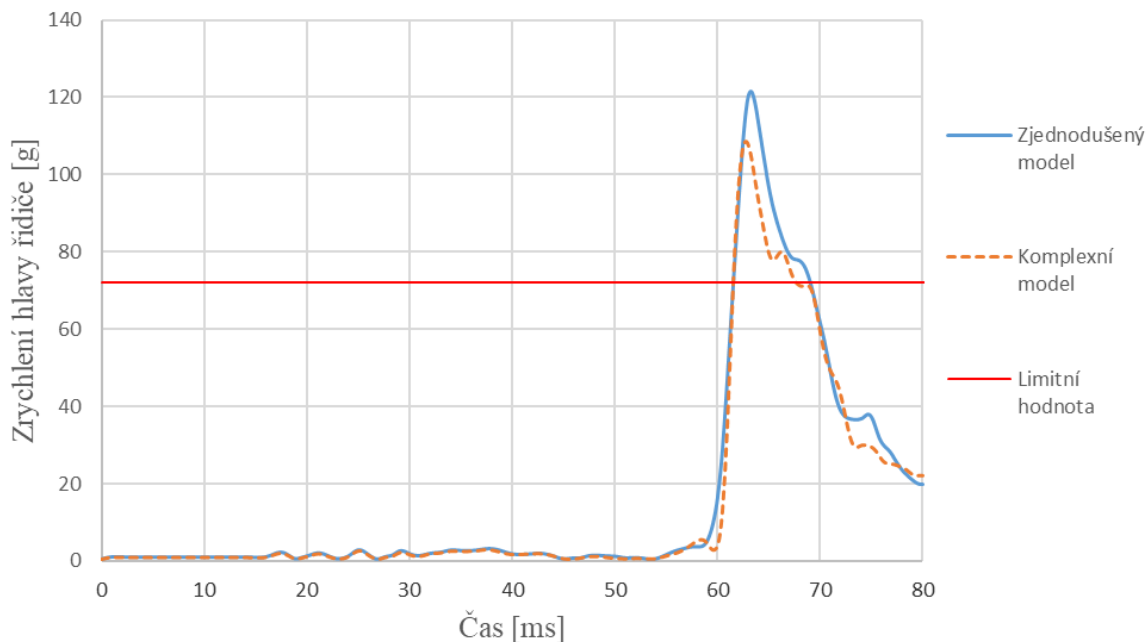


(c)



(d)

Obr. 4-51: Průběh nárazu komplexního modelu tramvaje typu B do boku auta při rychlosti 25 km/h v čase simulace: (a) 20 ms, (b) 40 ms, (c) 60 ms, (d) 80 ms.



Obr. 4-52: Průběh zrychlení hlavy řidiče.

Tab. 4-14: Porovnání výsledků kritéria 3ms.

Rychlost tramvaje [km/h]	Zjednodušený model		Komplexní model	
	[-/ms]	[%]	[-/ms]	[%]
25	121,4/7,3	100,0	108,6/6,1	89,5

Podle předpokladu byly výsledky simulací jednotlivých verzí modelů různé. U zjednodušeného modelu bylo dosaženo vyšších hodnot zrychlení hlavy řidiče auta než u komplexního modelu tramvaje, a tedy i horších výsledků. Z provedené citlivostní analýzy bylo stanoveno, že hlavním důvodem rozdílu ve výsledcích byla simplifikovaná definice hmotnosti tramvaje u zjednodušeného modelu, kdy byla celá hmotnost tramvaje přiřazena pouze kabině, a neuvažování pružného spojení podvozků k článkům tramvaje. Ze získaných závěrů byl stanoven předpoklad, že výsledky na komplexním modelu dosahují vyšší přesnosti.

Z dříve uvedených informací a závěrů k jednotlivým variantám simulačních modelů lze konstatovat, že každá varianta simulačního modelu má své výhody a nevýhody, a tedy i vhodnost použití v rámci výzkumu. Toto porovnání bude provedeno v následující kapitole.

### 4.4.3 Posouzení jednotlivých variant simulačních modelů

Při výzkumu byly jednotlivé verze modelu detailněji zkoumány a byly pro ně stanoveny výhody a nevýhody a případy vhodnosti jednotlivých variant modelů pro použití v praxi.

#### **Zjednodušený simulační model**

Výhodou zjednodušeného simulačního modelu byla jeho snadná tvorba, kratší výpočtový čas simulací nárazu (4h pro čas simulace 80 ms) a ne potřeba znalosti detailní informace o konstrukci tramvaje a rozložení její kolizní hmotnosti.

Nevýhodou modelu však bylo dosahování konzervativních výsledků, nepostižení pohybů tramvaje při nehodě (sednutí ve vypružení podvozků, rotace článků tramvaje) a nemožnost vyhodnocení požadavků normy ČSN EN 15227 na bezpečnost tramvajů při nehodě (maximální hodnoty zpomalení a maximální zdvih kol).

Zjednodušené simulační modely je proto vhodné použít na začátku řešení nového projektu, kdy o konstrukci zkoumané tramvaje není známo mnoho informací nebo pro porovnání následků nehod dvou zcela odlišných koncepcí tramvajů.

#### **Komplexní simulační model**

Výhodou komplexního simulačního modelu bylo uvažování pohybů tramvaje při nehodě s osobním autem, úvaha vlivu rozložení hmotnosti na následky nehod a možnost vyhodnocení požadavků ČSN EN 15227 na zajištění bezpečnosti cestujících a posádek uvnitř tramvaje.

Nevýhodou modelu však byla velká časová náročnost tvorby modelu, delší výpočtový čas simulací nárazu (12 h pro čas simulace 80 ms) a nutnost detailní znalosti konstrukce tramvaje, rozložení hmotnosti a parametrů podvozků.

Při výpočtu s komplexními simulačními modely lze z důvodu vyšší přesnosti reprezentace reálné tramvaje modelem předpokládat přesnější výsledky výpočtů. Modely je vhodné použít v pokročilých fázích projektu, kdy je o tramvajích známo více informací, nebo pro homologační výpočty dané tramvaje.

Z uvedených informací a výsledků výpočtů uvedených v kapitolách 4.3 a 4.4 o jednotlivých verzích modelů byl pro další fázi výzkumu zvolen komplexní model, a to pro jeho přesnější reprezentaci reálné tramvaje a očekávanou vyšší přesnost simulačních výpočtů. Veškeré další výpočty uvedené v této práci budou provedeny na komplexním simulačním modelu.

## 4.5 Analýza vlivu parametrů deformačních prvků tramvají na následky nehod na auta

Z provedené rešerše problematiky nehodovosti vozidel popsané v kapitole 2 bylo stanoveno, že snížení následků nehod tramvají s auty může být dosaženo aplikací poznatků z oblastí kompatibility tuhostí a geometrie silničních vozidel při nehodě na parametry deformačních prvků tramvají, jelikož jsou prvním prvkem tramvaje, který při nehodě přichází do kontaktu s kolizním vozidlem. Poznátky z oblasti kompatibility hmotností nelze na nehody tramvají s auty aplikovat, jelikož hmotnost osobního automobilu bude vždy o řád menší než u tramvají.

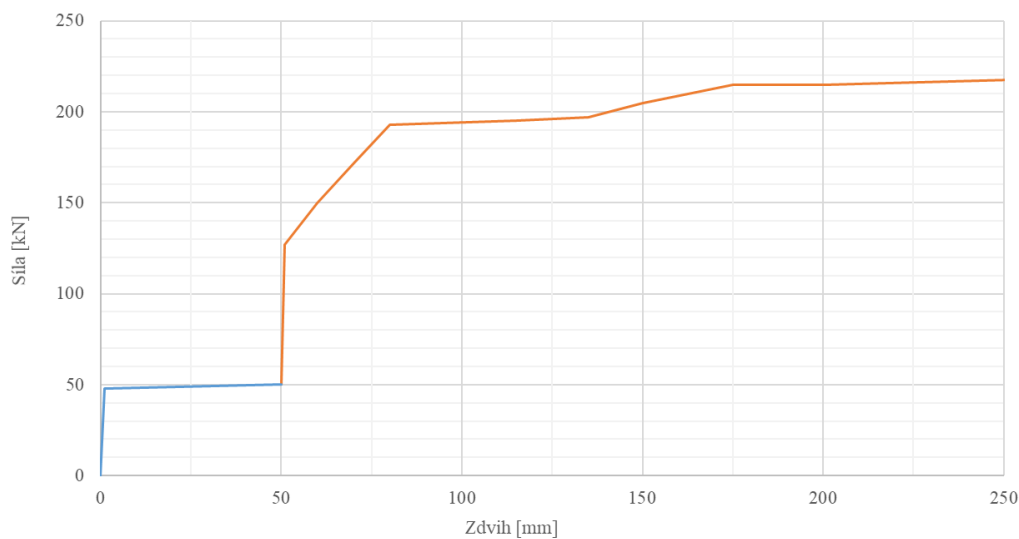
Všechny simulace uvedené v této kapitole byly provedeny podle požadavků navrženého výpočtového scénáře nehody popsaného v kapitole 4.2 a při úvaze počáteční rychlosti tramvaje 25 km/h. Veškeré simulace byly při úvaze stejných počátečních podmínek spočítány třikrát. Z výsledků všech tří simulací byl následně stanoven průměrný průběh, který byl použit pro další výzkum. Výsledky simulačních výpočtů uvedených v této kapitole byly porovnávány vůči nominální konstrukci čela tramvaje typu B. V každé provedené simulaci byla uvažována změna pouze jednoho parametru deformačních prvků tramvaje, aby bylo možné stanovit citlivostní analýzu vlivu jednotlivých parametrů deformačních prvků na následky nehod tramvají s auty. Vliv jednotlivých parametrů byl vyhodnocován podle rizika vzniku zranění člověka při nehodě podle biomechanického kritéria člověka 3 ms.

Cílem disertační práce není konstrukční řešení navrhovaných a analyzovaných úprav deformačních prvků, ale analýza vlivu parametrů deformačních prvků tramvaje na následky nehod a posouzení, kterým oblastem je vhodné se věnovat v rámci dalších výzkumů snížení následků nehod tramvají s osobními auty. Z tohoto důvodu také nebyl uvažován vliv analyzovaných změn na hmotnostní parametry deformačních prvků.

## 4.5.1 Vliv charakteristiky deformačních prvků

Poznatky z kompatibility tuhostí byly aplikovány na charakteristiku deformačních prvků tramvaje. Při snaze zvýšit kompatibilitu tuhostí vozidel při nehodě bylo však stále nutné zachovat bezpečnost tramvaje při nehodě s jinou tramvají podle požadavků normy ČSN EN 15227. Jako vhodná řešení bylo navrženo umístění měkčích absorpčních prvků před nárazník či progresivní začátek charakteristiky současných nárazníků při zachování zbytku původního průběhu charakteristiky deformačních prvků. Při nárazu obou vozidel tak bude energie absorbována oběma vozidly a nedojde pouze k destrukci osobního auta jako v příkladu na obrázku Obr. 2-40.

Cílem disertační práce nebylo konstrukční řešení navrhovaných úprav čel tramvají. Z tohoto důvodu bylo možné obě navrhovaná řešení v simulačním modelu reprezentovat stejně, a to zvětšením zdvihu deformačních prvků a změkčením počátku deformační charakteristiky. Příklad jedné z uvažovaných charakteristik je znázorněn na obrázku Obr. 4-53.

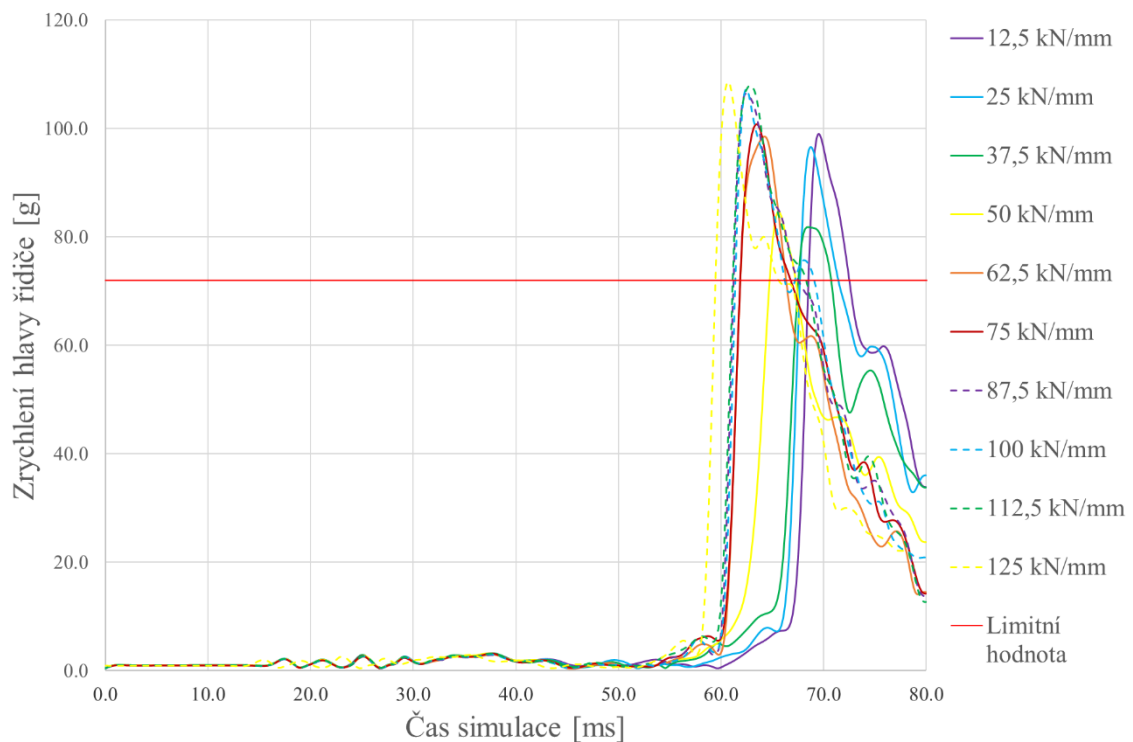


Obr. 4-53: Příklad rozšířené zátěžové charakteristiky deformačních prvků. [77]

Při výzkumu byla uvažována tuhost změkčené charakteristiky deformačních prvků v rozpětí od 12,5 do 112,5 kN/mm při zdvihu 50 mm. Zdvih 50 mm byl stanoven jako maximální dovolený zdvih s ohledem na limitní křivky pro obrys vozidla. Původní navržená charakteristika tramvaje typu B má počátek v tuhosti 125 kN/mm. Simulace nárazu byly provedeny pro každou tuhost změkčené charakteristiky deformačních prvků. Výsledky biomechanického kritéria 3 ms pro jednotlivé tuhosti jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-15 a průběhy zrychlení hlavy řidiče pro jednotlivé tuhosti jsou uvedeny na obrázku Obr. 4-54.

Tab. 4-15: Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé tuhosti. Hodnota v tabulce značí maximální hodnotu kritéria a dobu překročení limitní hodnoty. [77]

Tuhost deformačních prvků [kN/mm]	Biomechanické kritérium člověka 3 ms		
	Hodnota kritéria [-]	Hodnota kritéria [%]	Doba překročení limitní hodnoty [ms]
12,5	99,0	91,2	5,5
25,0	96,6	88,9	5,3
37,5	81,8	75,3	4,2
50,0	84,7	78,0	4,5
62,5	98,5	90,7	5,4
75,0	100,8	92,8	5,5
87,5	106,5	98,0	6,0
100,0	107,3	98,8	6,1
112,5	107,9	99,4	6,1
<b>125,0</b>	<b>108,6</b>	<b>100,0</b>	<b>6,1</b>

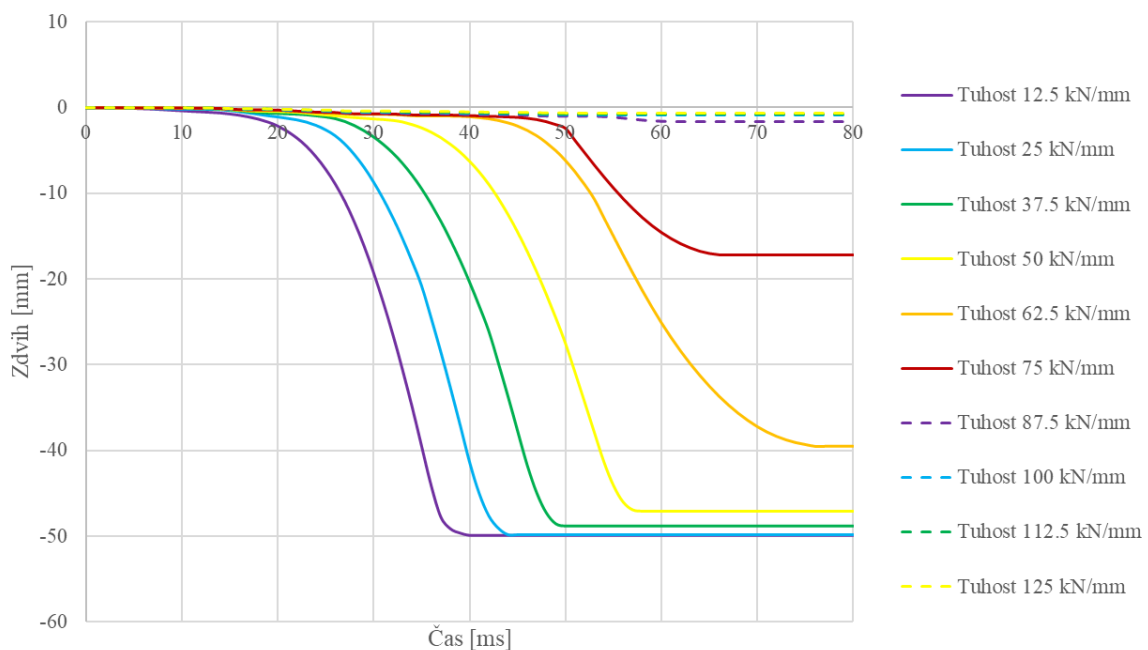


Obr. 4-54: Průběh zrychlení těžiště hlavy řidiče pro jednotlivé tuhosti deformačních prvků.

Z výsledků uvedených v tabulce Tab. 4-15 vyplynulo, že charakteristika deformačních prvků má zásadní vliv na následky nehod tramvají s automobily. Při vysoké počáteční tuhosti charakteristiky, od 87,5 do 125 kN/mm, byla tuhost absorbéru výrazně větší než tuhost boku osobního auta. To mělo za následek minimální zdvih absorbérů, viz obrázek Obr. 4-55, a výraznou deformaci karosérie auta, jelikož absorbovalo většinu energie nárazu. Podobná situace nastala při malé počáteční tuhosti, od 12,5 do 25 kN/mm. Nyní byla výrazně měkčí tuhost absorbérů energie než tuhost boku auta. Vlivem malého zdvihu byly však absorbéry schopny absorbovat malé množství energie. Po vyčerpání zdvihu 50 mm došlo ke ztužení charakteristiky na tuhost 125 kN/mm (původní tuhost vratného zdvihu navržené charakteristiky). Deformační prvek se následně choval jako tuhá překážka a zbylá energie nárazu byla absorbována přes deformaci boku auta, což vedlo ke zvýšení rizika vzniku zranění řidiče.

Nejvhodnější tuhost deformačních prvků, pro snížení následků nehod tramvají s osobními automobily, byla stanovena v rozmezí mezi **37,5 a 50 kN/mm**. Při nárazu byla energie pohlcena deformačními prvky, aniž by došlo k úplnému vyčerpání jejich zdvihu, a bokem automobilu, aniž by došlo k jeho výrazné deformaci. To mělo za následek menší riziko zranění řidiče auta.

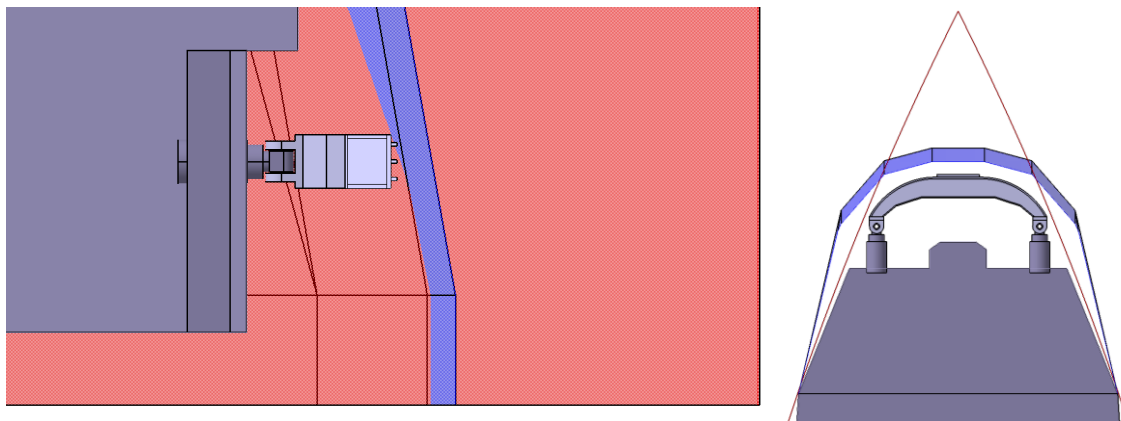
Při úvaze tuhosti 37,5 kN/mm na počátku deformační charakteristiky došlo ke snížení hodnoty kritéria 3 ms o 25 % vůči nominální tuhosti.



Obr. 4-55: Průběh zdvihu absorbérů pro jednotlivé tuhosti.

## 4.5.2 Vliv výškové pozice deformačních prvků nad rovinou TK

Poznatky z oblasti kompatibility geometrie vozidel byly aplikovány na polohu deformačních prvků nad rovinou TK a na rozměry nárazníku deformačních prvků. Maximální tvary a výškové pozice nárazníků nově konstruovaných tramvají jsou omezeny pouze dovoleným obrysem pro konstrukci tramvaje, viz kapitola 2.3.3, a požadavkem na tvar čela s ohledem na bezpečnost chodců při nehodě s tramvají, viz kapitola 2.3.4. Návrh parametrů nárazníků je jinak zcela v kompetenci výrobce tramvaje. Pro kontrolu zástavbových prostorů nárazníků byly v programu Catia V5 vytvořeny limitní křivky podle obou uvedených norem. Ze znalosti limitních křivek pro obrys tramvaje byly stanoveny maximální dovolené zástavbové prostory čela tramvaje, a tedy i rozměry a výškové pozice deformačních prvků. Ukázka kontroly přesahu obrysu tramvaje nárazníkem je znázorněna na obrázku Obr. 4-56. V této kapitole je uvedena citlivostní analýza výškové pozice deformačních prvků nad rovinou TK. Vlivy rozměrů deformačních prvků na následky nehod jsou popsány v následující kapitole 4.5.3.



Obr. 4-56: Kontrola přesahu obrysu nárazníkem tramvaje. [77]

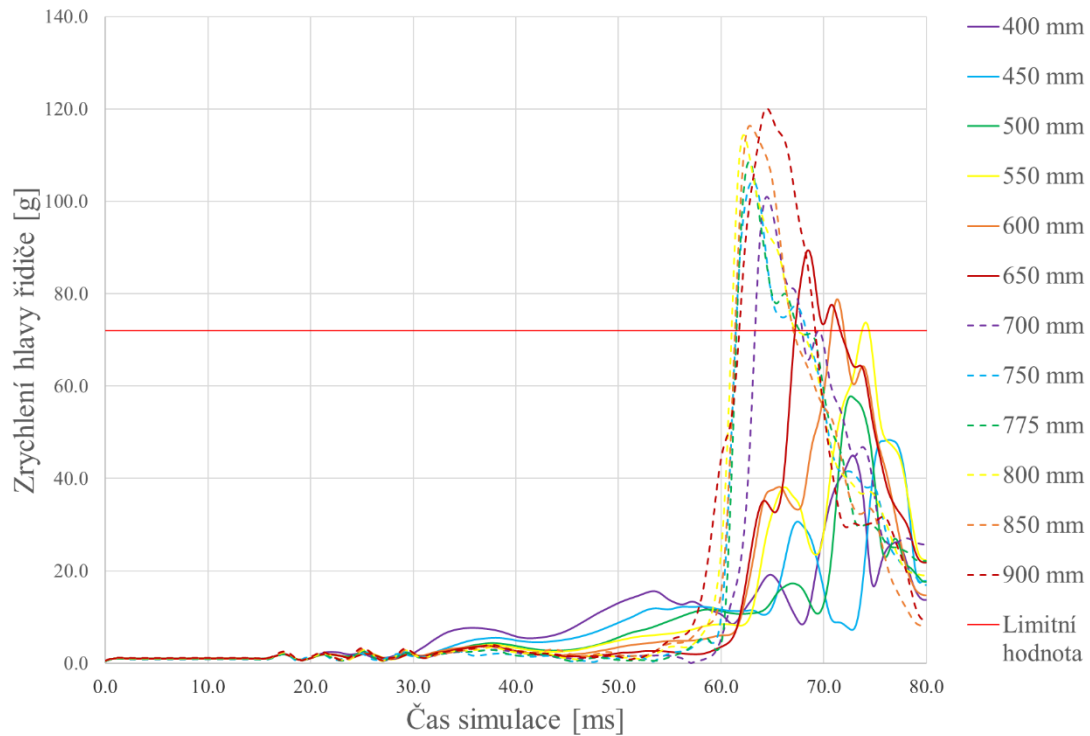
Podle požadavků na homologaci nově konstruovaných aut uvedených v publikacích [36] a [42] jsou tuhé struktury aut umístěny ve výšce 300 až 500 mm nad rovinou TK. Výšková pozice os deformačních prvků byla limitními křivkami pro obrys omezena na 400 až 900 mm nad rovinu TK. Deformační prvky nebylo možné umístit níže z důvodu malé vůle mezi nárazníkem a tratí při průjezdu vertikálními oblouky.



Při výzkumu byla uvažována výšková pozice deformačních prvků v rozpětí od 400 do 900 mm s krokem 50 mm. Simulace byly provedeny pro každou výškovou pozici deformačních prvků. U původní konstrukce tramvaje typu B byly osy deformačních prvků umístěny ve výšce 775 mm nad rovinou TK. Výsledky biomechanického kritéria 3 ms pro jednotlivé výškové pozice deformačních prvků jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-16 a průběhy zrychlení hlavy řidiče jsou uvedeny na obrázku Obr. 4-57.

Tab. 4-16: Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé výškové pozice deformačních prvků. Hodnota v tabulce značí maximální hodnotu kritéria a dobu překročení limitní hodnoty. [77]

Výšková pozice nad rovinou TK [mm]	Biomechanické kritérium člověka 3 ms		
	Hodnota kritéria [-]	Hodnota kritéria [%]	Doba překročení limitní hodnoty [ms]
400	44,9	41,4	0,0
450	48,3	44,5	0,0
500	57,8	53,2	0,0
550	73,8	67,9	0,7
600	78,8	72,6	1,2
650	89,4	82,3	3,9
700	100,9	93,0	4,5
750	104,4	96,1	5,5
<b>775</b>	<b>108,6</b>	<b>100,0</b>	<b>6,1</b>
800	114,4	105,3	6,3
850	116,4	107,1	6,9
900	120,1	110,6	7,3



Obr. 4-57: Průběh zrychlení těžiště hlavy řidiče pro jednotlivé výškové pozice deformačních prvků.

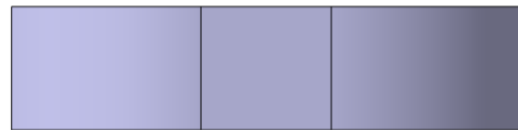
Z výsledků uvedených v tabulce Tab. 4-16 jednoznačně vyplynulo, že výšková pozice os deformačních prvků tramvají má zásadní vliv na následky nehod tramvají s auty. Čím níže byly deformační prvky tramvají umístěny, tím nižší hrozilo riziko vzniku zranění hlavy cestujícím v autech. U umístění os nárazníků do výšky 600 mm nad rovinu TK již nedošlo k překročení limitních hodnot biomechanického kritéria člověka 3 ms. Při umístění os deformačních prvků do výšky 400 mm nad rovinu TK došlo ke snížení hodnoty kritéria 3 ms o 59 % vůči nominální pozici. Primárním důvodem pozitivních výsledků byla menší deformace boku auta, která byla dána kontaktem nárazníku tramvaje s tuhými podélnými prahy karosérie osobního auta, které jsou dimenzovány na náraz jiného vozidla podle požadavků předpisu EHK/OSN č. 95, viz obrázek Obr. 2-45.

### 4.5.3 Vliv rozměrů deformačních prvků

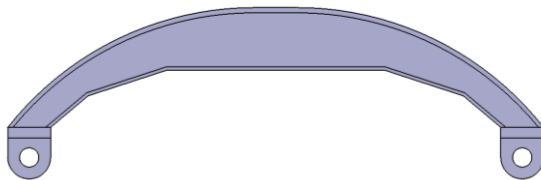
Vliv rozměrů deformačních prvků byl uvažován z důvodu stanovení vlivu zvětšení kontaktní plochy mezi vozidly na následky nehod tramvají s auty. Analyzovanými rozměry nárazníků byly výška čelního plechu nárazníku, viz obrázky Obr. 4-58 a Obr. 4-59, a šířka kontaktní (rovné) plochy nárazníku, viz obrázky Obr. 4-60 a Obr. 4-61. Hmotnost nárazníků v simulačních modelech nebyla pro jednotlivé varianty shodná, ale byla odměřena z 3D modelu nárazníku pro jednotlivou variantu rozměrového parametru.



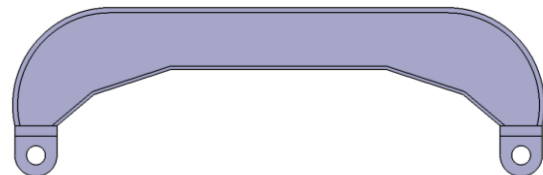
Obr. 4-58: Výška nárazníku 125 mm.



Obr. 4-59: Výška nárazníku 300 mm. [78]



Obr. 4-60: Šířka nárazníku 100 mm.



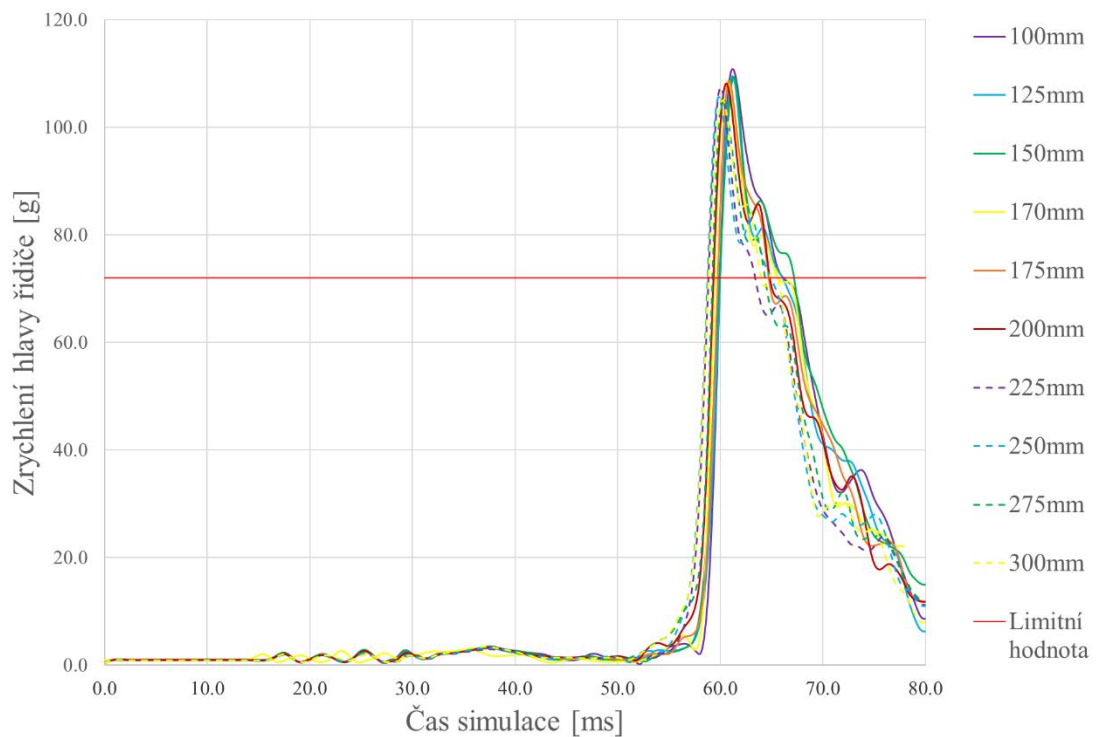
Obr. 4-61: Šířka nárazníku 800 mm. [78]

Limitní hodnoty výšky nárazníků byly stanoveny podle nárazníků současně používaných tramvají. Při výzkumu byla uvažována výška čelní plochy nárazníku v rozpětí od 100 do 300 mm s krokem 25 mm. U původní konstrukce tramvaje byla výška nárazníku 170 mm. Výsledky biomechanického kritéria 3 ms pro jednotlivé výšky nárazníků jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-16 a průběhy zrychlení hlavy řidiče jsou uvedeny na obrázku Obr. 4-57.

Limitní hodnoty šířky nárazníků byly stanoveny ze znalosti limitních křivek pro obrys tramvaje popsanych v kapitole 4.5.2. Při výzkumu byla uvažována šířka čelní plochy nárazníku v rozpětí od 0 do 1 000 mm s krokem 100 mm. U původní konstrukce byla šířka kontaktní plochy nárazníku 300 mm. Výsledky biomechanického kritéria 3 ms pro jednotlivé výšky nárazníků jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-18 a průběhy zrychlení hlavy řidiče jsou uvedeny na obrázku Obr. 4-65.

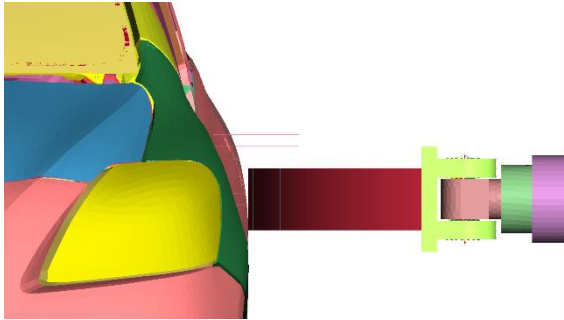
Tab. 4-17: Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé výšky nárazníku. Hodnota v tabulce značí maximální hodnotu kritéria a dobu překročení limitní hodnoty. [78]

Výška nárazníku [mm]	Biomechanické kritérium člověka 3 ms		
	Hodnota kritéria [-]	Hodnota kritéria [%]	Doba překročení limitní hodnoty [ms]
100	110,8	102,0	6,2
125	109,5	100,8	6,2
150	109,3	100,7	6,1
<b>170</b>	<b>108,6</b>	<b>100,0</b>	<b>6,1</b>
175	108,6	100,0	5,9
200	108,1	99,5	5,8
225	107,4	98,9	5,8
250	105,6	97,3	5,5
275	105,5	97,3	5,5
300	105,0	96,7	5,3

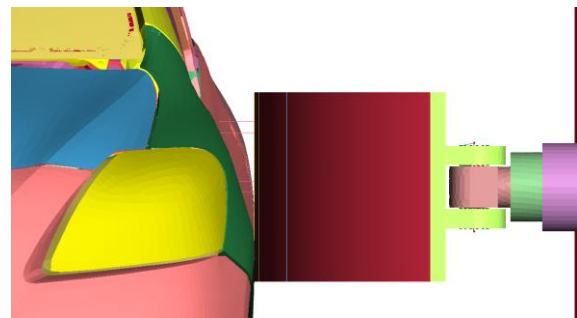


Obr. 4-62: Průběh zrychlení těžiště hlavy řidiče pro jednotlivé výšky nárazníku.

Z výsledků uvedených v tabulce Tab. 4-17 jednoznačně vyplynulo, že výška nárazníku má minimální vliv na zmírnění následků nehod tramvají s auty. Důvodem minimálního vlivu na následky nehod bylo zaoblení boku auta, čímž do kontaktu s karoserií auta nikdy nepřišla celá kontaktní plocha nárazníku, ale pouze její malá část, viz obrázky Obr. 4-63 a Obr. 4-64.



Obr. 4-63: Kontakt nárazníku s výškou 100 mm s bokem auta.

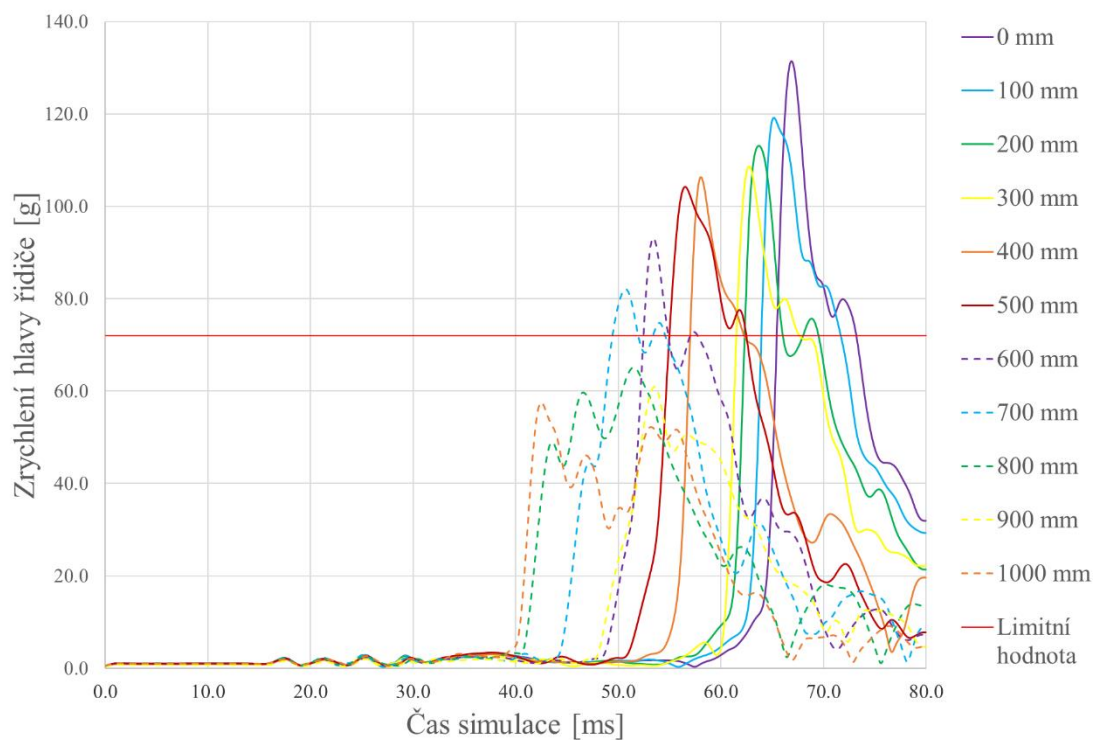


Obr. 4-64: Kontakt nárazníku s výškou 300 mm s bokem auta.

Při výzkumu v rámci této disertační práce byl uvažován pouze náraz do jednoho modelu auta. Přínos velké výšky nárazníku je v zachování kontaktu mezi nárazníkem tramvaje a podélným prahem auta i pro jiné výškové pozice podélných prahů u jiného typu osobního auta. Obdobně tak bude negována změna svislé polohy nárazníku tramvaje z důvodu ložení tramvaje cestujícími nebo opotřebení kol. Proto lze konstatovat, že je možné stanovit limitní výšku nárazníku, od které bude zaručen kontakt nárazníku tramvají s tuhými strukturami většiny aut. Tento výzkum je plánován v rámci budoucího výzkumu doktoranda na fakultě strojní ČVUT v Praze a nebyl v rámci této disertační práce více zkoumán.

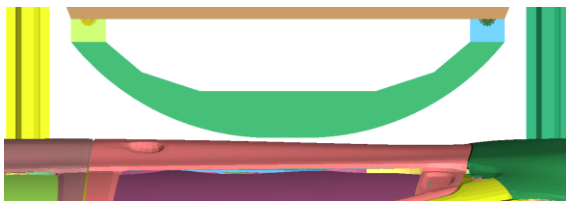
Tab. 4-18: Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé šířky nárazníku. Hodnota v tabulce značí maximální hodnotu kritéria a dobu překročení limitní hodnoty. [78]

Šířka nárazníku [mm]	Biomechanické kritérium člověka 3 ms		
	Hodnota kritéria [-]	Hodnota kritéria [%]	Doba překročení limitní hodnoty [ms]
0	131,4	121,0	7,7
100	119,2	109,7	7,7
200	113,1	104,1	6,7
<b>300</b>	<b>108,6</b>	<b>100,0</b>	<b>6,1</b>
400	106,3	97,9	5,5
500	104,2	96,0	5,3
600	93,1	85,7	3,4
700	82,1	75,6	2,5
800	65,1	59,9	0,0
900	60,9	56,1	0,0
1 000	57,6	53,0	0,0

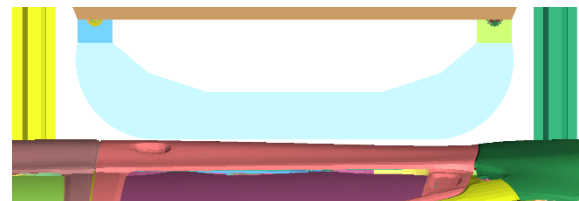


Obr. 4-65: Průběh zrychlení těžiště hlavy řidiče pro jednotlivé šířky nárazníku.

Z výsledků uvedených v tabulce Tab. 4-18 jednoznačně vyplynulo, že šířka čelní plochy nárazníků má zásadní vliv na následky nehod tramvají s auty. K zásadnímu zmírnění následků nehod došlo u šířky kontaktní plochy nárazníku od 800 mm. Při šířce čelní plochy 1 000 mm došlo ke snížení hodnoty kritéria 3 ms o 47 % vůči nominální šířce. Primárním důvodem pozitivních výsledků byla menší deformace boku auta, která byla způsobena kontaktem nárazníku s A a B sloupkem auta, tedy s tuhou strukturou auta, viz obrázek Obr. 2-45. Při menší šířce kontaktní plochy došlo ke kontaktu pouze s dveřmi řidiče, které byly nárazem zcela zdeformovány. Situace při nárazu pro různé šířky kontaktní plochy jsou znázorněny na obrázcích Obr. 4-66 a Obr. 4-67.



Obr. 4-66: Šířka čelní plochy 100 mm.



Obr. 4-67: Šířka čelní plochy 800 mm.

## 4.6 Shrnutí analýzy vlivu parametrů deformačních prvků

Simulace popsané v kapitole 4.5 jednoznačně prokázaly, že optimalizací parametrů deformačních prvků lze výrazně ovlivnit následky nehod tramvají s auty a tím významně snížit riziko vzniku zranění cestujících v autech.

Veškeré simulační výpočty zdokumentované v předchozích podkapitolách byly provedeny vždy při úvaze změny pouze jednoho parametru a pro kolizní rychlost jízdy tramvaje 25 km/h. Pro možnost posouzení ovlivnění jednotlivých parametrů mezi sebou byly v rámci dalšího výzkumu definovány tři různé kombinace analyzovaných úprav parametrů deformačních prvků. S těmito kombinacemi byly provedeny simulace nárazu tramvaje do boku auta pro kolizní rychlosti 25, 30, 35 a 40 km/h. Parametr svislého rozměru deformačních prvků měl na následky nehod zanedbatelný vliv, a proto nebyl v rámci dalšího výzkumu podrobněji analyzován.

Při simulacích byly uvažovány kombinace parametrů deformačních prvků uvedené v tabulce Tab. 4-19. Hodnoty parametrů u kombinací 1, 2 a 3 byly voleny podle výsledků uvedených v předešlých kapitolách jako parametry dosahující nejnižšího rizika vzniku zranění cestujících v osobních autech.

Tab. 4-19: Uvažované kombinace parametrů deformačních prvků

<b>Parametr</b>	<b>Charakteristika deformačních prvků [kN/mm]</b>	<b>Svislá pozice nárazníku nad TK [mm]</b>	<b>Výška nárazníku [mm]</b>	<b>Šířka nárazníku [mm]</b>
Kombinace 0	125,0	775	170	300
Kombinace 1	125,0	400	170	300
Kombinace 2	125,0	400	170	1 000
Kombinace 3	50,0	400	170	300



Vyhodnocení simulací pro jednotlivé kombinace a rychlosti jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-20.

Tab. 4-20: Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé kombinace a rychlosti. Hodnota v tabulce značí maximální hodnotu kritéria a dobu překročení limitní hodnoty.

<b>Rychlost tramvaje [km/h]</b>	<b>Kombinace 0</b>	<b>Kombinace 1</b>	<b>Kombinace 2</b>	<b>Kombinace 3</b>
25	<b>108,6/6,1</b>	49,3/0,0	47,5/0,0	41,5/0,0
30	-	64,8/0,0	62,7/0,0	59,3/0,0
35	-	77,9/1,5	77,3/1,5	71,9/0,0
40	-	<b>95,1/4,1</b>	<b>94,8/3,9</b>	<b>91,1/3,8</b>

Z provedených simulací vyplývá, že všechny tři uvažované kombinace dosahují prakticky stejných výsledků. K překročení limitních hodnot biomechanického kritéria člověka 3 ms došlo až při kolizní rychlosti 40 km/h. Navrženými úpravami čela tramvaje došlo k nárůstu kritické rychlosti oproti původní koncepci čela o 15 km/h.

Umístění deformačních prvků tramvají do výšky 400 mm nad rovinu TK, tedy do polohy deformačních prvků a podélných prahů automobilů, dojde k výraznému snížení následků nehod tramvají s auty a rizika vzniku zranění cestujících v autech. Kombinace úpravy parametrů 2 a 3 dosahují obdobných výsledků jako kombinace 1. Snížení rizika zranění cestujících oproti kombinaci 1 je minimální. Konstrukční řešení deformačních prvků pro kombinace 2 a 3 by však při pořizování tramvají vedlo k výraznému nárůstu pořizovací ceny za nákup, hmotnosti a složitosti konstrukce deformačních prvků, a tedy i celé tramvaje. Z těchto důvodů nejsou kombinace 2 a 3 vhodné pro aplikaci do praxe.

Z uvedených závěrů výzkumu na snížení následků nehod na osobní automobily popsaného v této disertační práci lze konstatovat závěr: *pro snížení následků nehod tramvají s auty je vhodné umístit kontaktní místo mezi tramvají a autem do výšky kolem 400 mm nad TK.*

#### **4.6.1 Vliv navržených úprav deformačních prvků na následky nehod tramvají s jinou tramvají, autobusem a nákladním autem**

Při diskusi nad výsledky výzkumu vyvstala otázka o vlivu svislého posuvu deformačních prvků na následky nehod tramvají s jinou tramvají či jinými typy silničních vozidel, jako jsou autobusy a NA.

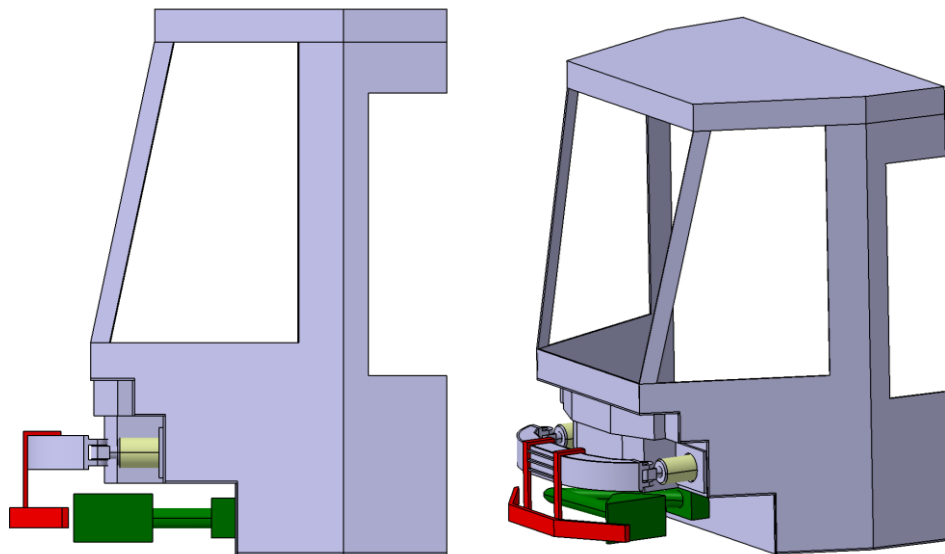
Změna parametru nebude mít vliv na průběh a následky nehody dvou tramvají, jelikož obě tramvaje budou mít čela o stejné konstrukci. Naopak umístění kontaktního bodu mezi tramvajemi níže k hlavnímu rámu skříně povede k menšímu namáhání skříně vozidla z důvodu menšího ramene podélných sil při nehodě.

Stejně tak nebude mít změna parametru vliv na průběh a následky nehod tramvaje s autobusem či NA. Tento typ nehody je definován jako třetí scénář srážky v normě ČSN EN 15227, viz kapitolu 2.3.1. Scénář definuje geometrii překážky, která má být použita pro průkaz odolnosti při tomto typu nehod. Kontaktní bod této překážky je ve výšce 1 225 mm nad rovinou TK, tedy nad současně používanými deformačními prvky. Nově konstruované tramvaje budou muset být vybavovány dodatečnou ochranou navrženou pro tento typ nehod. Řešení této ochrany nebylo cílem této disertační práce, a proto není více uvažováno.

## 4.6.2 Cíle pro další výzkum

V rámci dalšího výzkumu návrhu čela tramvaje pro snížení následků nehod tramvají s osobními automobily bude pozornost zaměřena na možné konstrukční řešení navržených úprav čel tramvají. Jako problematické se jeví zástavbové prostory pro deformační prvek a velikost rozteče deformačních trubek z důvodu nutnosti zachování dostatečného místa pro umístění spřáhla, v obrázku Obr. 4-68 znázorněno zelenou barvou. Toto vyšetření nebylo v rámci disertační práce řešeno.

Pro následky nehody je zásadní pozice kontaktního bodu mezi vozidly, tedy nemusí se jednat přímo o současně používané deformační prvky definované v normě ČSN EN 15227. Jako jednoduché řešení se jeví umístění menšího přídavného nárazníku do dříve definované pozice, v obrázku Obr. 4-68 znázorněn červenou barvou. U nárazníku bude nutné vyřešit uchycení k hrubé stavbě tramvaje, jako vhodné úchytné místo se jeví deformační prvek. U uchycení bude nutné vyřešit mechanismus pro vyklápění, aby v případě potřeby bylo možné vysunout spřáhlo, které by bylo za ním umístěné.



Obr. 4-68: Návrh konstrukčního řešení.

Prostorové vyšetření čela tramvaje a návrh možné konstrukce bude řešen v rámci dalších výzkumných prací doktoranda na fakultě strojní ČVUT v Praze.

## 5 Důsledky pro praxi

Ze společenského hlediska rostou požadavky na bezpečnost dopravních vozidel při nehodě. Z provedených výpočtů vyplynulo, že konstrukce čel tramvají má zásadní vliv na následky jejich nehod s auty. Vhodným navržením parametrů deformačních prvků tramvají, jako je jejich poloha, tuhost a tvar, lze výrazně snížit závažnost následků nehod s osobními auty, aniž by došlo ke zvýšení nebezpečí pro cestující a posádky v tramvajích.

Z uvedených výsledků statistiky nehodovosti vyplynulo, že průměrně došlo za dva dny k pěti čelním nebo čelněbočním nehodám tramvají s auty. Každá čtrnáctá nehoda těchto typů skončila zraněním posádky aut, tedy přibližně každých šest dní došlo k lehkému nebo těžkému zranění posádky aut. Každá taková nehoda znamená velký zásah do plynulosti přepravy, jelikož odklizení následků nehod může trvat až jednotky hodin. Aplikace poznatků výzkumu na nově konstruované tramvaje proto může vést ke snížení následků jejich nehod s auty a tím k úspoře času a nákladů DP na odklizení nehod a zajišťování náhradní dopravy.

Výzkum uvedený v disertační práci je ryze teoretické povahy a měl by být ověřen s více simulačními modely aut a následně na skutečném objektu. Provedení ověřovacích zkoušek nebylo vzhledem k časové a finanční náročnosti v rámci doktorského studia možné. Nárazové zkoušky jsou plánovány v rámci budoucího výzkumu doktoranda na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

## 6 Závěr

Výzkum popsáný v této disertační práci byl zaměřen na snížení následků nehod tramvají s auty. Z důvodu nedostatku odborné literatury na toto téma byla první část práce, kapitola 2, pojata jako komplexní seznámení čtenáře s problematikou nehodovosti se zaměřením na znalosti potřebné k řešení výzkumu, který byl předmětem této práce.

Z důvodu nedostatku informací o následcích nehod viz kapitoly rešeršní části 2.1.1 a 2.1.4 byla vytvořena a analyzována statistika nehodovosti tramvají na území České republiky za roky 2016 až 2018. Bližší popis je uveden v kapitole 4.1. Analýzou statistiky nehodovosti bylo stanoveno, že vysoké procento nehod tramvají s auty končí zraněním posádek aut. Tento závěr potvrdil nutnost výzkumu provedeného v této disertační práci. Vyhodnocení statistiky nehodovosti definovalo typ nehody, při kterém dochází nejčastěji k nejméně závažným následkům nehod. Tento typ nehody byl použit jako vzor pro definici výpočtového scénáře nehody detailně popsaného v kapitole 4.2. Všechny uvedené simulační modely byly provedeny podle podmínek navrženého výpočtového scénáře nehody.

Veškeré vytyčené cíle disertační práce uvedené v kapitole 3 byly splněny a jsou detailně popsány v kapitole 4.

Tato disertační práce byla vytvořena s podporou následujících grantů ČVUT:

- SGS19/161/OHK2/3T/12,
- SGS22/052/OHK2/1T/12,
- SGS23/161/OHK2/3T/12,

a grantu Technologické agentury České republiky č. TN01000026 – Národní centrum kompetence Josefa Božka pro pozemní dopravní prostředky.

## 7 Citovaná literatura

- [1] Josef Kolář; Jakub Seidl; Vojtěch Zelený. *Zpráva o možnosti zvyšování pasivní bezpečnosti železničních vozidel*. Výzkumná zpráva Z20-05, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2020.
- [2] Josef Kolář; Jakub Seidl; Vojtěch Zelený; Otomar Vincik. *Statistika nehodovosti tramvajů a vozidel regionální železnice*. Výzkumná zpráva Z20-03, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2020.
- [3] Jakub Seidl; Vojtěch Zelený. *Statistika nehodovosti tramvajových vozidel*. Sborník studentské konference ŽELVA 2019, s. 124-131, ISBN 978-80-01-06622-5, Fakulta stavební ČVUT, Praha, Česká republika, 2019.
- [4] Hans von Holst; Ake Nygren; Roland Thord. *Transportation, Traffic Safety and Health*. ISBN 978-3-662-03409-5, SpringerVerlag GmbH, Berlín, Německo, 1997.
- [5] Jakub Seidl. *The influence of the construction of tram fronts on the consequences of accidents with passenger cars*. Sborník konference Moderní železnice, Fakulta dopravní ČVUT, Praha, Česká republika, 2022. *Publikace byla v čase citace v recenzním řízení*.
- [6] Jakub Seidl. *Deformační prvky kabiny nízkopodlažní tramvaje*. Diplomová práce, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2018.
- [7] Bušta Pavel. *Zákon o silničním provozu s komentářem: zákon č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů*. ISBN 978-80-904270-2-0, Venice Music Production, Praha, Česká republika, 2011.
- [8] Zákon č. 266/1994 Sb. *Zákon o drahách*. Parlament České republiky, Praha, Česká republika, 1994.
- [9] Drážní inspekce. Dostupné online: [dicr.cz](https://dicr.cz) (přístup 17. února 2023).
- [10] Jan Petrás. *Nejčastější případy nehod tramvajů s ostatními účastníky silničního provozu*. Sborník XXVII. konference ExFoS, ISBN 978-80-214-5600-6, Ústav soudního inženýrství VUT, Brno, Česká republika, 2018.
- [11] DPMB. *Nehodovost s účastí vozů DPMB loni klesla*. Dostupné online: [dpmb.cz](https://dpmb.cz) (přístup 26. ledna 2022).
- [12] DPP. *Výroční zpráva 2021*. Dostupné online: [dpp.cz](https://dpp.cz) (přístup 18. ledna 2023).

- [13] Andreas Grießbach; Nadja Seiler; Ulrich Brannolte; Uwe Plank-Wiedenbeck; Jean Emmanuel Bakaba; Jörg Ortlepp. *Maßnahmen zur Reduzierung von Unfällen mit Straßenbahnen*. ISBN 978-3-939163-65-7, Unfallforschung der Versicherer, Berlín, Německo, 2016.
- [14] Jürgen Schnaas. *Reparaturfreundliche Fahrzeugkonstruktion Überlegungen am Beispiel des Combino*. Časopis Der Nahverkehr, Bus&Bahn.de, Vydání 4/97, Hamburk, Německo, 1997.
- [15] Praha.eu. *Nehodovost v Praze*. Dostupné online: [praha.eu](http://praha.eu) (přístup 15. dubna 2021).
- [16] *Platforma VIZE nula*. Dostupné online: [platformavize0.cz](http://platformavize0.cz) (přístup 14. ledna 2023).
- [17] Raphael H. Grzebieta; George Rechnitzer. *Tram interface crashworthiness*. Conference Proceedings of the International Crashworthiness Conference, ICrash 2000, Bolton, Velká Británie, 2000.
- [18] Roman Mikulec; Marek Semela. *Case study of vehicle side crashes with trams*. International conference on road and rail infrastructure, CETRA 2018, Zadar, Chorvatsko, 2018.
- [19] Michal Barnet. *Návrh spráhla pro nákladní tramvajovou soupravu*. Diplomová práce, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2019.
- [20] CDV. *Celkové ztráty z dopravní nehodovosti na pozemních komunikacích v roce 2019 opět překročily 80 mld. Kč*. Centrum dopravního výzkumu, Brno, Česká republika, 2020.
- [21] Vladislav Kemka. *Crashová odolnost skříní kolejových vozidel*. Disertační práce, Fakulta strojní ZČU, Plzeň, Česká republika, 2013.
- [22] Jan Kovanda a kolektiv autorů. *Bezpečnostní aspekty návrhu dopravních prostředků*. ISBN 978-80-01-05893-0, ČVUT, Praha, Česká republika, 2016.
- [23] Jan Kovanda; Riccardo Riva. *Vehicle – human interaction*. ISBN 978-88-76-60104-0, Spiegel, Milano, Itálie, 1998.
- [24] Josef Kolář. *Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel*. ISBN 978-80-01-04262-5, ČVUT, Praha, Česká republika, 2009.
- [25] Josef Kolář. *Konstrukce kolejových vozidel*. Podklady k přednáškám, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2017.
- [26] Český normalizační institut. *ČSN EN 15227, Železniční aplikace – Požadavky na kolizní odolnost kolejových vozidel*. Česká technická norma, Praha, Česká republika, 2021.

- [27] Stanislav Špirk. *Metodické problémy výzkumu pasivní bezpečnosti a deformační odolnosti konstrukcí kolejových vozidel*. Disertační práce, Fakulta strojní ZČU, Plzeň, Česká republika, 2015.
- [28] European committee for standardization. *CEN/TR 17420, Railway applications – Vehicle end design for trams and light rail vehicles with respect to pedestrian safety*. Technické doporučení, Brusel, Belgie, 2020.
- [29] Vojtěch Zelený. *Návrh modulární stavby čela nízkopodlažní tramvaje*. Diplomová práce, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2018.
- [30] Český normalizační institut. *ČSN EN 12663, Železniční aplikace – Pevnostní požadavky na konstrukce skříní kolejových vozidel*. Česká technická norma, Praha, Česká republika, 2015.
- [31] Český normalizační institut. *ČSN 28 0318: Průjezdové průřezy tramvajových tratí a obrysy pro vozidla provozovaná na tramvajových drahách*. Česká technická norma, Praha, Česká republika, 2015.
- [32] iDNES.cz. *Nehoda tramvaje 15T s autem*. Dostupné online: [idnes.cz](https://www.idnes.cz) (přístup 22. září 2022).
- [33] Pawel Watroba; Mariusz Pawlak; Damian Gasiorek. *Validation of the numerical model of impuls I electric multiple unit driver's cab*. ISBN 978-3-030-07222-3, Springer Vieweg, Lodž, Polsko, 2019.
- [34] Josef Kolář. *Modulární stavba nízkopodlažních tramvají*. Habilitační práce, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2006.
- [35] Florian Kramer; Ulrich Franz; Bernd Lorenz; James Remfrey; Rodolfo Schöneburg. *Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. ISBN 978-3-8348-2607-7, Springer Vieweg, Drážďany, Německo, 2013.
- [36] Evropská komise. *EHK/OSN č.94: Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska ochrany cestujících při čelním nárazu*. Předpis, 2016.
- [37] Jan Kovanda; Vladimír Šatochin. *Pasivní bezpečnost vozidel*. ISBN 80-01-02235-8, Fakulta dopravní ČVUT, Praha, Česká republika, 2000.
- [38] Ulrich Seiffert; Lothar Wech. *Automotive safety handbook*. ISBN 978-07-68-00912-5, SAE International, Spojené státy americké, 2003.



- [39] Leonard Evans. *Traffic Safety*. ISBN 978-09-75-48710-5, Science serving society, Spojené státy americké, 2004.
- [40] Rada Evropské unie. *Nářízení ES č. 78/2009 o schvalování typu motorových vozidel s ohledem na ochranu chodců a ostatních nechráněných účastníků silničního provozu*. Nářízení, 2009.
- [41] Jiří Vašíček. *Kompatibilita vozidel při čelním střetu*. Diplomová práce, Ústav soudního inženýrství VUT, Brno, Česká republika, 2013.
- [42] Evropská komise. *EHK/OSN č.95: Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska ochrany cestujících při bočním nárazu*. Předpis, 2014.
- [43] Michal Vašíček. *Pasivní bezpečnost motorových vozidel*. Podklady k přednáškám, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2017.
- [44] Nbcphiladelphia. *Deadly SEPTA Trolley crash*. Dostupné online: [nbcphiladelphia.com](http://nbcphiladelphia.com) (přístup 29. září 2021).
- [45] Hynek Purš. *Mechanismy poranění v oblastech extrémního zatížení*. Disertační práce, Fakulta tělesné výchovy a sportu UK, Praha, Česká republika, 2012.
- [46] Miroslav Hirt a kolektiv. *Dopravní nehody v soudním lékařství a soudním inženýrství*. ISBN 978-80-247-4308-0, Grada Publishing a.s., Praha, Česká republika, 2012.
- [47] Miroslav Hirt; František Vorel a kolektiv. *Soudní lékařství II. díl*. ISBN 978-80-271-0268-6, Grada Publishing a.s., Praha, Česká republika, 2016.
- [48] Euro NCAP. *Assessment protocol - AOP v9.1.3*. Dostupné online: [cdn.euroncap.com](http://cdn.euroncap.com) (přístup 15. srpna 2022).
- [49] Jan Kovanda. *Konstrukce automobilů: pasivní bezpečnost*. ISBN 80-01-01459-2, ČVUT, Praha, Česká republika, 1996.
- [50] Lukáš Čapek; Petr Hájek; Petr Henyš a kolektiv. *Biomechanika člověka*. ISBN 978-80-271-0367-6, Grada Publishing a.s., Praha, Česká republika, 2018.
- [51] D.H. Robbins. *Anthropometric specifications for mid-sized male dummy, volume 2*. UMTRI-83-53-2, Dopravní výzkumný ústav, Univerzita Michigan, Michigan, Spojené státy americké, 1983.
- [52] Luděk Hynčík. *Scalable human model for future mobility safety*. Konference Automotive safety summit Shanghai 2019, Shanghai, Čína, 2019.

- [53] LSTC. *Livermore software technology corporation*. Dostupné online: [lsdyna.ansys.com](https://lsdyna.ansys.com) (přístup 18. září 2020).
- [54] Fadi J. Tahan; Umashankar Mahadeviaiah; Dhafer Marzouhui; Cing-Dao Kan. *LSTC WorldSID 50<sup>th</sup> Male Finite Element Model*. Výzkumná práce, LSTC, Livermore, Spojené státy americké, 2018.
- [55] Technical committee. *ISO 15830: Road vehicles – Design and performance specifications for the WorldSID 50th percentile male side-impact dummy*. Technická norma, ISBN 978-0-539-18592-8, 2022.
- [56] CCSA. *Center for collision safety and analysis*. Dostupné online: [ccsa.gmu.edu](https://ccsa.gmu.edu) (přístup 25. května 2020).
- [57] Autosalon.tv. *Pohled do statistik nejprodávanějších aut ukazuje, že český trh je v Evropě ten nejpodivnější*. Dostupné online: [autosalon.tv](https://autosalon.tv) (přístup 25. května 2020).
- [58] Dhafer Marzougui; Randa Radwab Samaha; Chongzhen Cui; Cing-Dao Kan. *Extended validation of the Finite Element Model for the 2010 Toyota Yaris Passenger Sedan*. NCAC 2012-W-005, Výzkumná zpráva, Univerzita George Washingtona, Washington DC, Spojené státy americké, 2012.
- [59] CCSA. *2010 Toyota Yaris Finite element model validation detail mesh*. Doi 10.13021/G8CC7G, Univerzita George Masona, Washington DC, Spojené státy americké, 2016.
- [60] Vojtěch Zelený; Jakub Seidl. *Vliv statistiky nehodovosti na konstrukční prvky čel tramvajových a železničních vozidel*. XXIV. Sborník mezinárodní konference: Súčasný problémy v kol'ajových vozidlech, s. 339-348, ISBN 978-80-89276-59-2, VTS při ŽU, Žilina, Slovenská republika, 2019.
- [61] Jakub Seidl. *Nehodovost tramvají s osobními automobily v Praze za roky 2016 až 2018*. Sborník XIII. ročníku odborné konference doktorského studia, s. 60-65, ISBN 978-80-214-5963-2, Ústav soudního inženýrství VUT, Brno, Česká republika, 2021.
- [62] Jakub Seidl; Josef Kocourek, Roman Vávra. *Identifikování míst častých dopravních nehod tramvají v Praze*. Časopis Silniční obzor, číslo 6-7, s. 168-173, ISSN 0322-7154, Praha, Česká republika, 2021.

- [63] Český normalizační institut. *ČSN 28 1300, Tramvajová vozidla – Technické požadavky a zkoušky*. Česká technická norma, Praha, Česká republika, 1998.
- [64] Václav Kraus; Jakub Seidl. *Optimalizace dynamického chování tramvaje*. XXV. konference s mezinárodní účastí: Současné problémy v kolejových vozidlech, s. 147-153, ISBN 978-80-7560-377-7, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Česká Třebová, Česká republika, 2021.
- [65] VDV. *Doporučení 152: Doporučení pro dimenzování odolnosti osobních vozidel podle BOStrab*. VDV, Německo, 1992.
- [66] Jakub Seidl; Vojtěch Zelený; Otomar Vincik. *Zpráva o trendech a budoucích požadavcích na prvky pasivní bezpečnosti*. Výzkumná zpráva Z19-14, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2019.
- [67] F. Scott Gayzik; Daniel P. Moreno; Joel D. Stitzel. *Development of the global human body models consortium mid-sized male full body model*. Conference Proceedings of the International workshop on human subject for biomechanical research, 2011.
- [68] Humanetics. *Our engineering saves lives*. Dostupné online: [humaneticsgroup.com](http://humaneticsgroup.com) (přístup 18. září 2020).
- [69] Dhananjay Namjoshi; Craig A. Good; Wai Hang Cheng. *Towards clinical management of traumatic brain injury: a review of models and mechanisms from a biomechanical perspective*. Časopis Disease models & mechanisms, číslo 6, 2013.
- [70] Jingzhou Yang; Jichang Dai. *Simulation-based assessment of rear effect to ballistic helmet impact*. Časopis Computer-Aided design and applications, číslo 7, 2010.
- [71] Jakub Seidl. *Kompatibilita tramvají při nehodě s osobními automobily*. Sborník studentské konference ŽELVA 2021, s. 62-69, ISBN 978-80-01-06881-6, Fakulta stavební ČVUT, Praha, Česká republika, 2021.
- [72] Jakub Seidl. *Výzkum zvýšení partnerské ochrany tramvajových vozidel při nehodě s osobními automobily*. Sborník XXV. konference s mezinárodní účastí: Současné problémy v kolejových vozidlech, s. 295-302, ISBN 978-80-7560-377-7, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Česká Třebová, Česká republika, 2021.
- [73] mhd-ostrava. *STADLER Tango NF 2*. Dostupné online: [mhd-ostrava.cz](http://mhd-ostrava.cz) (přístup 19. března 2022).

- [74] mhd-ostrava. *Škoda 39T ForCity Smart*. Dostupné online: [mhd-ostrava.cz](http://mhd-ostrava.cz) (přístup 19. března 2022).
- [75] Tram.mobilnitabla. *Informace o tramvaji 15T ev. č. 9317*. Dostupné online: [tram.mobilnitabla.cz](http://tram.mobilnitabla.cz) (přístup 19. března 2022).
- [76] Jakub Seidl. *Vliv konstrukce čela tramvaje na následky nehod s osobními automobily*. Sborník studentské konference ŽELVA 2022, s. 76-87, ISBN 978-80-01-07046-8, Fakulta stavební ČVUT, Praha, Česká republika, 2022.
- [77] Jakub Seidl. *Výzkum snížení následků nehod tramvají s auty*. Sborník XXVI. Medzinárodná konferencia: Súčasný problémy v kol'ajových vozidlech, s. 235-242, ISBN 978-80-89276-61-5, VTS při ŽU, Žilina, Slovenská republika, 2023.
- [78] Jakub Seidl. *Analýza parametrů deformačních prvků tramvají na následky nehod s auty*. Sborník studentské konference ŽELVA 2023, ISBN 978-80-01-07244-8, Fakulta stavební ČVUT, Praha, Česká republika, 2023.

## Publikace autora související s disertační prací

- [1] Josef Kolář; Jakub Seidl; Vojtěch Zelený. *Zpráva o možnosti zvyšování pasivní bezpečnosti železničních vozidel*. Výzkumná zpráva Z20-05, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2020.
- [2] Josef Kolář; Jakub Seidl; Vojtěch Zelený; Otomar Vincik. *Statistika nehodovosti tramvají a vozidel regionální železnice*. Výzkumná zpráva Z20-03, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2020.
- [3] Jakub Seidl; Vojtěch Zelený. *Statistika nehodovosti tramvajových vozidel*. Sborník studentské konference ŽELVA 2019, s. 124-131, ISBN 978-80-01-06622-5, Fakulta stavební ČVUT, Praha, Česká republika, 2019.
- [5] Jakub Seidl. *The influence of the construction of tram fronts on the consequences of accidents with passenger cars*. Sborník konference Moderní železnice, Fakulta dopravní ČVUT, Praha, Česká republika, 2022. *Publikace byla v čase citace v recenzním řízení*.
- [6] Jakub Seidl. *Deformační prvky kabiny nízkopodlažní tramvaje*. Diplomová práce, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2018.
- [60] Vojtěch Zelený; Jakub Seidl. *Vliv statistiky nehodovosti na konstrukční prvky čel tramvajových a železničních vozidel*. XXIV. Sborník mezinárodní konference: Súčasný problémy v kol'ajových vozidlech, s. 339-348, ISBN 978-80-89276-59-2, VTS při ŽU, Žilina, Slovenská republika, 2019.
- [61] Jakub Seidl. *Nehodovost tramvají s osobními automobily v Praze za roky 2016 až 2018*. Sborník XIII. ročníku odborné konference doktorského studia, s. 60-65, ISBN 978-80-214-5963-2, Ústav soudního inženýrství VUT, Brno, Česká republika, 2021.
- [62] Jakub Seidl; Josef Kocourek, Roman Vávra. *Identifikování míst častých dopravních nehod tramvají v Praze*. Časopis Silniční obzor, číslo 6-7, s. 168-173, ISSN 0322-7154, Praha, Česká republika, 2021.
- [66] Jakub Seidl; Vojtěch Zelený; Otomar Vincik. *Zpráva o trendech a budoucích požadavcích na prvky pasivní bezpečnosti*. Výzkumná zpráva Z19-14, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2019.

- [71] Jakub Seidl. *Kompatibilita tramvají při nehodě s osobními automobily*. Sborník studentské konference ŽELVA 2021, s. 62-69, ISBN 978-80-01-06881-6, Fakulta stavební ČVUT, Praha, Česká republika, 2021.
- [72] Jakub Seidl. *Výzkum zvýšení partnerské ochrany tramvajových vozidel při nehodě s osobními automobily*. Sborník XXV. konference s mezinárodní účastí: Současné problémy v kolejových vozidlech, s. 295-302, ISBN 978-80-7560-377-7, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Česká Třebová, Česká republika, 2021.
- [76] Jakub Seidl. *Vliv konstrukce čela tramvaje na následky nehod s osobními automobily*. Sborník studentské konference ŽELVA 2022, s. 76-87, ISBN 978-80-01-07046-8, Fakulta stavební ČVUT, Praha, Česká republika, 2022.
- [77] Jakub Seidl. *Výzkum snížení následků nehod tramvají s auty*. Sborník XXVI. Medzinárodná konferencia: Súčasný problémy v kol'ajových vozidlech, s. 235-242, ISBN 978-80-89276-61-5, VTS při ŽU, Žilina, Slovenská republika, 2023.
- [78] Jakub Seidl. *Analýza parametrů deformačních prvků tramvají na následky nehod s auty*. Sborník studentské konference ŽELVA 2023, ISBN 978-80-01-07244-8, Fakulta stavební ČVUT, Praha, Česká republika, 2023.

## Ostatní publikace autora včetně spoluautorství

- [64] Václav Kraus; Jakub Seidl. *Optimalizace dynamického chování tramvaje*. XXV. konference s mezinárodní účastí: Současné problémy v kolejových vozidlech, s. 147-153, ISBN 978-80-7560-377-7, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Česká Třebová, Česká republika, 2021.
- [79] Josef Kolář; Jakub Seidl. *Tvorba matematického modelu nehody osobního motorového vozidla s lehkým železničním vozidlem*. Výzkumná zpráva Z20-11, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2020.
- [80] Jakub Seidl. *Accident rate of regional railway vehicles at railway crossing for the years 2014 to 2018*. Acta Polytechnica CTU Proceedings, pp. 37-41, ISBN 978-80-01-06996-7, 2022.
- [81] Petr Heller; Jan Beno; Jozef Bartko; Jakub Seidl. *Jednonápravový otočný podvozek pro regionální železniční vozidla*. Sborník 48. Mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů, s. 74-85, ISBN 978-80-7494-606-6, Technická univerzita v Liberci, Liberec, Česká republika, 2022.
- [82] Petr Heller; Jakub Seidl; Jan Beno; Jozef Bartko. *Jednonápravový podvozek pro regionální železniční vozidlo*. Časopis Nová železniční technika, číslo 5/2022, s. 26-29, ISSN 1210 - 3942, Brno, Česká republika, 2022.
- [83] Petr Heller; Jakub Seidl; Jan Beno; Jozef Bartko. *Jednonápravový podvozek pro regionální železniční vozidlo*. Časopis Nová železniční technika, číslo 6/2022, s. 22-28, ISSN 1210 - 3942, Brno, Česká republika, 2022.
- [84] Josef Kolář; Jakub Seidl. *Hodnocení přínosu plnění požadavků evropské normy EN 15227 pro regionální železniční vozidla*. Výzkumná zpráva Z22-01, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2022.

## 8 Aktivní účast na konferencích

- [1] 1. ročník studentské konference železniční výzkumné aktivity ŽELVA, 2019, Choceň, jazyk český. Příspěvek: Statistika nehodovosti tramvajových vozidel.
- [2] XXIV. Medzinárodná konferencia Súčasný problémy v koľajových vozidloch – PRORAIL, 2019, odborná konference konaná na Žilinskej univerzite v Žiline, jazyk český. Příspěvek: Vliv statistiky nehodovosti na konstrukční prvky čel tramvajových a železničních vozidel.
- [3] XIII. Ročník odborné konference doktorského studia JuFoS, 2021, Brno, jazyk český. Příspěvek: Nehodovost tramvají s osobními automobily v Praze za roky 2016 až 2018.
- [4] Sdružení dopravních podniků ČR – odborná skupina Tramvaje, 2021, Praha, jazyk český. Příspěvek: Výzkum nehodovosti tramvají s osobními automobily.
- [5] Studentská vědecká konference Moderní železnice pro 21. století, 2021, Praha, jazyk anglický. Příspěvek: Accident rate of regional railway vehicles at railway crossings for the years 2014 to 2018.
- [6] XXV. konference s mezinárodní účastí Současné problémy v kolejových vozidlech, 2021, Česká Třebová, jazyk český. Příspěvky: Výzkum zvýšení partnerské ochrany tramvajových vozidel při nehodě s osobními automobily; Optimalizace dynamického chování tramvaje.
- [7] 3. ročník studentské konference železniční výzkumné aktivity ŽELVA, 2021, Zruč nad Sázavou, jazyk český. Příspěvek: Kompatibilita tramvají při nehodě.
- [8] Konference studentské tvůrčí činnosti STČ, 2022, Praha, jazyk anglický. Příspěvek: The influence of the construction of tram fronts on the consequences of accidents with passenger cars.
- [9] Studentská vědecká konference Moderní železnice pro 21. století, 2022, Praha, jazyk anglický. Příspěvek: The influence of the construction of tram fronts on the consequences of accidents with passenger cars.
- [10] 4. ročník studentské konference železniční výzkumné aktivity ŽELVA, 2022, Jihlava, jazyk český. Příspěvek: Vliv konstrukce čela tramvaje na následky nehod s osobními automobily.



- [11] Konference studentské tvůrčí činnosti STČ, 2023, Praha, jazyk anglický.  
Příspěvek: Creating a simulation model of a tram and car accident.
- [12] 5. ročník studentské konference železniční výzkumné aktivity ŽELVA, 2023, Choceň,  
jazyk český. Příspěvek: Analýza parametrů deformačních prvků tramvají na následky  
nehod s auty.
- [13] XXVI. Medzinárodná konferencia Súčasnú problémy v koľajových vozidlech –  
PRORAIL, 2023, odborná konferencie konaná na Žilinskej univerzite v Žiline, jazyk  
český. Příspěvek: Výzkum snížení následků nehod tramvají s auty.

## 9 Zapojení ve výzkumných projektech

- [1] TE01000026 – „Národní centrum kompetence Josefa Božka pro pozemní dopravní prostředky“. Člen řešitelského týmu.
- [2] SGS18/130/OHK2/2T/12 – Analýza elektrických a mechanických dějů v pohonech moderních kolejových vozidel. Člen týmu. Výzkum zaměřen na dynamické děje v pohonech moderních kolejových vozidel.
- [3] SGS19/161/OHK2/3T/12 – Výzkum pasivní bezpečnosti kolejových vozidel. Navrhovatel projektu. Výzkum zaměřen na zlepšení kompatibility tramvají při srážce s osobními motorovými vozidly.
- [4] SGS22/052/OHK2/1T/12 – Výzkum pasivní bezpečnosti tramvají při nehodě s osobními automobily. Navrhovatel projektu. Výzkum zaměřen na zlepšení kompatibility tramvají při srážce s osobními automobily.
- [5] SGS23/161/OHK2/3T/12 – Zvýšení efektivity a bezpečnosti tramvajových vozidel. Člen týmu. Výzkum zaměřen na návrh čel tramvají pro snížení následků nehod na autech.

## 10 Tabulka zkratek

Zkratka	Vysvětlení zkratky
ATD	Anthropomorphic test dummy
Auto	Osobní motorové vozidlo
CCSA	Center for Collision Safety and Analysis
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DI	Drážní inspekce
DP	Dopravní podnik
DPČR	Dopravní policie České republiky
DPMB	Dopravní podnik města Brna
DPMLJ	Dopravní podnik měst Liberec a Jablonec nad Nisou
DPMO	Dopravní podnik města Olomouce
DPMOST	Dopravní podnik měst Mostu a Litvínova
DPO	Dopravní podnik Ostrava
DPP	Dopravní podnik hl. m. Prahy
EN	Evropská norma
Euro NCAP	The European New Car Assessment Programme
FEM	Finite element method
FS ČVUT	Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze
FUPS	Front Under-run Protection System
HIC	Head Injury Criterion
hl. m. Praha	Hlavní město Praha
HPC	Head Performance Criterion
IZS	Integrovaný záchranný systém
Kč	Koruna česká
KV	Kolejové vozidlo
LSTC	Livermore Software Technology
MBS	Multibody systém
MHD	Městská hromadná doprava
NA	Nákladní motorové vozidlo
NCAC	National Crash Analysis Center
PMDP	Plzeňské městské dopravní podniky
SMV	Silniční motorové vozidlo
SSZ	Svislé světelné značení
TK	Temeno koleje
WSTC	Wayne State Tolerance Curve

## 11 Tabulka použitých veličin

Název veličiny	Značka	Jednotka
Čas	t	ms, s
Dráha	s	mm, m
Energie	E	J
Hmotnost	m	kg
Moment setrvačnosti	I	kg/m <sup>2</sup>
Počet	p	-
Rychlost	v, V	m/s, km/h
Síla	F	N
Zrychlení	a	m/s <sup>2</sup> , g

## 12 Seznam obrázků

Obr. 2-1:	Nehoda tramvaje s autem.....	12
Obr. 2-2:	Vyhodnocení kolizních směrů.....	15
Obr. 2-3:	Výškové umístění nárazníků na tramvajích.....	17
Obr. 2-4:	Proniknutí nárazníku do prostoru posádky aut.....	17
Obr. 2-5:	Následek nárazu čela tramvaje do boku auta.....	17
Obr. 2-6:	Numerický model pro první a druhý případ úpravy čela tramvaje.....	18
Obr. 2-7:	Výsledek srážky tramvaje s bokem auta.....	19
Obr. 2-8:	Simulace nehody tramvaje s autem v programu Virtual CRASH.....	20
Obr. 2-9:	Pevné spřáhlo tramvaje typu T3.....	20
Obr. 2-10:	Skládací spřáhlo tramvaje ŠKODA 41T.....	20
Obr. 2-11:	Rozdělení nákladů pro výpočet celospolečenských ztrát.....	21
Obr. 2-12:	Antikolizní systém od Škoda Group.....	22
Obr. 2-13:	Sestava nárazníku a dvou deformačních trubek.....	23
Obr. 2-14:	Deformační trubka od firmy Voith.....	23
Obr. 2-15:	Crush box na tramvaji Urbos 3 od firmy CAF.....	24
Obr. 2-16:	Příklad zatěžující charakteristiky deformační trubky.....	24
Obr. 2-17:	Příklad zatěžující charakteristiky crush boxu.....	24
Obr. 2-18:	Vyšplhání tramvají při nehodě.....	25
Obr. 2-19:	Nárazník tramvaje s protišplhovou ochranou.....	25
Obr. 2-20:	Pohyb cestujících po nehodě tramvaje.....	26
Obr. 2-21:	Podjezdová ochrana tramvaje ŠKODA 15T.....	27
Obr. 2-22:	Podjezdová ochrana.....	27
Obr. 2-23:	Vhodný tvar čela tramvaje.....	27
Obr. 2-24:	Nevhodný tvar čela tramvaje.....	27
Obr. 2-25:	Čelní nehoda dvou tramvají v Ostravě.....	30

Obr. 2-26:	Schéma druhého scénáře srážky.....	31
Obr. 2-27:	Nehoda tramvaje s autem.....	31
Obr. 2-28:	Nehoda tramvaje s NA.....	32
Obr. 2-29:	Schéma deformovatelné překážky.....	32
Obr. 2-30:	Numerický model kabiny elektrické jednotky.....	33
Obr. 2-31:	Model kabiny elektrické jednotky.....	33
Obr. 2-32:	Porovnání výsledků deformace deformačních trubek numerické simulace a zkoušky.....	33
Obr. 2-33:	Numerická simulace nárazu auta.....	33
Obr. 2-34:	Reálná zkouška nárazu auta.....	33
Obr. 2-35:	Obrys pro tramvaje ve směrovém oblouku.....	35
Obr. 2-36:	Schéma vnějšího vybočení kabiny tříčlánkové tramvaje.....	36
Obr. 2-37:	Doporučený sklon čela tramvaje v rovině XY.....	37
Obr. 2-38:	Doporučený sklon čela tramvaje v rovině XZ.....	37
Obr. 2-39:	Čelní náraz dvou vozidel.....	39
Obr. 2-40:	Čelní náraz auta do těžkého NA.....	42
Obr. 2-41:	Následky nehody auta s NA.....	43
Obr. 2-42:	Průběh nehody auta s NA bez FUPS a s FUPS.....	44
Obr. 2-43:	Rozměry a tuhosti bariéry pro čelní náraz.....	44
Obr. 2-44:	Rozměry a tuhosti bariéry pro boční náraz.....	44
Obr. 2-45:	Karoserie moderních aut.....	45
Obr. 2-46:	Porovnání nárazových bariér pro homologační testy v Evropě a USA.....	45
Obr. 2-47:	Následky nehody auta s tramvají.....	46
Obr. 2-48:	Následky nehody auta s tramvají typu T3.....	47
Obr. 2-49:	Linie kontaktu nárazníku tramvaje s bokem auta.....	47
Obr. 2-50:	WSTC - Wayne State Tolerance Curve.....	49

Obr. 2-51:	Pravděpodobnost vzniku zranění na hodnotě HIC.....	50
Obr. 2-52:	Figurína Hybrid III - muž 50%.....	52
Obr. 2-53:	Figurína EuroSID-2.....	52
Obr. 2-54:	Figurína BioRID-2.....	52
Obr. 2-55:	Figurína Hybrid III: ATD a její výpočtový model.....	53
Obr. 2-56:	Model figuríny III vytvořený na principu tuhých těles.....	54
Obr. 2-57:	Model figuríny III vytvořený na principu tuhých těles.....	54
Obr. 2-58:	Výpočtový model vytvořený na principu poddajných těles.....	55
Obr. 2-59:	Výpočtový model VIRTHUMAN.....	56
Obr. 2-60:	Simulační model figuríny WorldSID 50th Male.....	57
Obr. 2-61:	Zkouška čelního dopadu hlavy – reálná zkouška.....	57
Obr. 2-62:	Zkouška čelního dopadu hlavy – FEM simulace.....	57
Obr. 2-63:	FEM simulace nárazové zkoušky do ramene.....	58
Obr. 2-64:	Auto typu Toyota Yaris 2010.....	59
Obr. 2-65:	Simulační model auta typu Toyota Yaris 2010.....	59
Obr. 2-66:	Zkouška čelního nárazu.....	60
Obr. 2-67:	Simulace čelního nárazu.....	60
Obr. 2-68:	Zkouška nárazu do betonové bariéry.....	60
Obr. 2-69:	Simulace nárazu do betonové bariéry.....	60
Obr. 4-1:	Vyhodnocovací kritérium: kolizní směry.....	66
Obr. 4-2:	Rozložení pozemních komunikací ve městech na území ČR.....	68
Obr. 4-3:	Poškození boku auta po nehodě s tramvají.....	69
Obr. 4-4:	Následky na autě po čelní nehodě tramvaje do boku auta.....	69
Obr. 4-5:	Schéma výpočtového scénáře nehody.....	71
Obr. 4-6:	Čelo tramvaje typu A.....	73
Obr. 4-7:	Čelo tramvaje typu B.....	73

Obr. 4-8:	Čelo tramvaje typu C.....	73
Obr. 4-9:	Hrubá stavba předního článku tramvaje typu A.....	73
Obr. 4-10:	Hrubá stavba předního článku tramvaje typu B.....	73
Obr. 4-11:	Hrubá stavba předního článku tramvaje typu C.....	73
Obr. 4-12:	Simulační model kabiny tramvaje typu A.....	74
Obr. 4-13:	Simulační model kabiny tramvaje typu B.....	75
Obr. 4-14:	Simulační model kabiny tramvaje typu C.....	75
Obr. 4-15:	Deformační prvek tramvaje typu B.....	76
Obr. 4-16:	Simulační model deformačního prvku tramvaje typu B.....	76
Obr. 4-17:	Deformační prvek tramvaje typu C.....	76
Obr. 4-18:	Simulační model deformačního prvku tramvaje typu C.....	76
Obr. 4-19:	Navržená charakteristika deformačního prvku tramvaje typu B.....	77
Obr. 4-20:	Navržená charakteristika deformačního prvku tramvaje typu C.....	77
Obr. 4-21:	Průběh kalibrační zkoušky.....	78
Obr. 4-22:	Charakteristika absorpčního členu tramvaje typu B.....	78
Obr. 4-23:	Sestava zjednodušeného simulačního modelu tramvaje typu A.....	79
Obr. 4-24:	Sestava zjednodušeného simulačního modelu tramvaje typu B.....	79
Obr. 4-25:	Sestava zjednodušeného simulačního modelu tramvaje typu C.....	80
Obr. 4-26:	Průběh nárazu tramvaje typu B do boku auta při rychlosti 25 km/h.....	81
Obr. 4-27:	Průběh zrychlení těžiště hlavy řidiče.....	82
Obr. 4-28:	Typový výkres tramvaje typu B.....	84
Obr. 4-29:	Spojení typu sférické ložisko.....	85
Obr. 4-30:	Spojení typu rozvolněná příčná tyč.....	85
Obr. 4-31:	Rozmístění elektrické výzbroje na předním článku tramvaje typu B.....	86



Obr. 4-32:	Rozmístění elektrické výzbroje na zadním článku tramvaje typu B.....	86
Obr. 4-33:	Rozmístění cestujících v předním článku tramvaje typu B.....	87
Obr. 4-34:	Rozmístění cestujících v zadním článku tramvaje typu B.....	88
Obr. 4-35:	3D model cestujících v předním článku tramvaje typu B.....	89
Obr. 4-36:	3D model cestujících v zadním článku tramvaje typu B.....	89
Obr. 4-37:	3D model elektrické výzbroje předního článku tramvaje typu B.....	89
Obr. 4-38:	3D model elektrické výzbroje zadního článku tramvaje typu B.....	90
Obr. 4-39:	Konstrukce tramvaje typu B.....	90
Obr. 4-40:	3D model předního článku tramvaje typu B.....	91
Obr. 4-41:	3D model zadního článku tramvaje typu B.....	91
Obr. 4-42:	3D model podvozku 1.....	91
Obr. 4-43:	Model elektrických komponent na předním článku.....	92
Obr. 4-44:	Model cestujících.....	92
Obr. 4-45:	Model spodního mezičlánkového spojení.....	93
Obr. 4-46:	Model horního mezičlánkového spojení.....	93
Obr. 4-47:	Model podvozku 2.....	94
Obr. 4-48:	Model primárního vypružení.....	94
Obr. 4-49:	Model otočového ložiska.....	94
Obr. 4-50:	Simulační model tramvaje typu B.....	95
Obr. 4-51:	Průběh nárazu komplexního modelu tramvaje typu B do boku auta při rychlosti 25 km/h v čase simulace.....	96
Obr. 4-52:	Průběh zrychlení hlavy řidiče.....	97
Obr. 4-53:	Příklad rozšířené zátěžové charakteristiky deformačních prvků.....	100
Obr. 4-54:	Průběh zrychlení těžiště hlavy řidiče pro jednotlivé tuhosti deformačních prvků.....	101
Obr. 4-55:	Průběh zdvihu absorbérů pro jednotlivé tuhosti.....	102

Obr. 4-56:	Kontrola přesahu obrysu nárazníkem tramvaje.....	103
Obr. 4-57:	Průběh zrychlení těžiště hlavy řidiče pro jednotlivé výškové pozice deformačních prvků.....	105
Obr. 4-58:	Výška nárazníku 125 mm.....	106
Obr. 4-59:	Výška nárazníku 300 mm.....	106
Obr. 4-60:	Šířka nárazníku 100 mm.....	106
Obr. 4-61:	Šířka nárazníku 800 mm.....	106
Obr. 4-62:	Průběh zrychlení těžiště hlavy řidiče pro jednotlivé výšky nárazníku.....	107
Obr. 4-63:	Kontakt nárazníku s výškou 100 mm s bokem auta.....	108
Obr. 4-64:	Kontakt nárazníku s výškou 300 mm s bokem auta.....	108
Obr. 4-65:	Průběh zrychlení těžiště hlavy řidiče pro jednotlivé šířky nárazníku.....	109
Obr. 4-66:	Šířka kontaktní plochy 100 mm.....	110
Obr. 4-67:	Šířka kontaktní plochy 800 mm.....	110
Obr. 4-68:	Návrh konstrukčního řešení.....	114

## 13 Seznam tabulek

Tab. 2-1:	Nehodovost na komunikacích v Praze.....	15
Tab. 2-2:	Konstrukční kategorie KV definované normou ČSN EN 15227.....	29
Tab. 2-3:	Parametry definující doporučené sklony čel tramvají na obrázcích obr. 2-37 a obr. 2-38.....	37
Tab. 2-4:	Hodnoty koeficientů $\alpha$ a $\lambda$ .....	41
Tab. 2-5:	Hmotnostní parametry auta Toyota Yaris 2010 a jeho simulačního modelu.....	61
Tab. 4-1:	Soupis dopravních podniků na území ČR, které provozují tramvaje.....	65
Tab. 4-2:	Počty nehod zaznamenaných jednotlivými DP.....	65
Tab. 4-3:	Vyhodnocení statistiky nehodovosti tramvají podle kolizního vozidla a směru.....	67
Tab. 4-4:	Vyhodnocení statistiky nehodovosti tramvají podle následků na zdraví cestujících v autech.....	69
Tab. 4-5:	Hmotové parametry tramvají.....	75
Tab. 4-6:	Vyhodnocení biomechanického kritéria HIC pro jednotlivé tramvaje a rychlosti.....	82
Tab. 4-7:	Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé tramvaje a rychlosti.....	82
Tab. 4-8:	Hmotnostní analýza tramvaje typu B.....	85
Tab. 4-9:	Hmotnostní analýza elektrické výzbroje tramvaje typu B.....	86
Tab. 4-10:	Hmotnostní analýza podvozků tramvaje typu B.....	87
Tab. 4-11:	Hmotnostní parametry modelu cestujícího.....	89
Tab. 4-12:	Hmotnostní parametry elektrické výzbroje předního článku.....	90
Tab. 4-13:	Hmotnostní parametry elektrické výzbroje zadního článku.....	90
Tab. 4-14:	Porovnání výsledků kritéria 3ms.....	97
Tab. 4-15:	Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé tuhosti.....	101

---

Tab. 4-16:	Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé výškové pozice deformačních prvků.....	104
Tab. 4-17:	Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé výšky nárazníku.....	107
Tab. 4-18:	Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé šířky nárazníku.....	109
Tab. 4-19	Uvažované kombinace parametrů deformačních prvků.....	111
Tab. 4-20	Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé kombinace a rychlosti.....	112

## 14 Seznam příloh

Příloha 1:	Aplikace pro zaznamenání nehod DPMB.....	141
Příloha 2:	Formulář o dopravní nehodě DPMOST.....	142
Příloha 3:	Výpis z databáze nehod PČR.....	143
Příloha 4:	Statistický formulář k nehodám PČR.....	144
Příloha 5:	Závěrečný zpráva DI o dopravní nehodě tramvají.....	147
Příloha 6:	Mapa hl. m. Prahy s místy častých dopravních nehod.....	149

## Příloha 1 – Aplikace pro zaznamenání nehod DPMB, zdroj: DPMB

Základní údaje | Účastníci nehody | Zraněné osoby

Otevři audit | Obnov tento záznam z auditu | Zapsal (-a) [redacted]

Číslo události: 193 Datum: 22.03.2019 Čas od: 08:02 Čas do: 08:02

Místo: zastávka AD+TD Anthrosop směr Osovč

Č. nehodového listu: 19/032201 Jednací č. PČR: N RZ DI PČR: [redacted]

Auto: 383 Dispečer 1: [redacted] Dispečer 2: [redacted]

Za DPMB: [redacted]

Šetření ukončeno: 09:30 Počet dispečerů: 2 Řešeno minut: 176 Fotografováno:  Č. fotoaparátu: 3

Karta tachografu vyjmuta  vyhodnotit pro PČR  Hlášeno DI  Událost pro OTK

Uznění viny	1. účastník	Předběžná škoda	do 20 000 Kč
Směr	přímý úsek	Křižovatka	jiné
Rozhled	pravostr.	Srážka	jiné
Stav vozovky	suchá	Přerušení dopravy	bez přerušení
Druh vozovky	živice	Alkohol	nebyl prokázán
Místo nehody	jiné	Technická prohlídka	ani PČR ani řidič DP
Místo vykolejení	jiné	Vozovka	rovina
Cestující	jiné	Teplota	obvyklá

**Popis nehody**

Řidič trolejbusu bez pokrytí couvl do osobního vozidla, stojícího za ním. Osobní vůz posunul na další v pořadí třetí stojící vozidlo. Řidič trolejbusu podepsal zavinění do nehodového listu.

**Dopravní opatření**

bez NAD. 03705 opožděný odjezd z Osovč jako náhrada za linku 25, na zastávce Čtvrť přestup na linku 26

**Hodnocení**

**Použité záložní autobusy**

50091

Základní údaje | Účastníci nehody | Zraněné osoby

Účastníci nehody

Č.	Typ
1	TR22
2	VW Golf
3	Suzuki sx 4

Pořadí účastníka: 1 Druh účastníka nehody: vozidlo MHD DPMB, a.s.

Kurz: 02531 Číslo vozu: 3606 0 0 Průvoznovna: 2220

Vozidlo odstaveno:  Čas odstavení: 07:58 Čas zařazení: 10:46

Řidič: [redacted]

Typ vozidla: TR22 RZ: [redacted] MPZ: [redacted]

Číslo pojistky: [redacted]

Popis poškození: bez poškození

Osobní údaje účastníka | Osobní údaje majitele

Jméno: [redacted]  
Příjmení: [redacted]  
Datum narození: [redacted]  
Bydliště: [redacted]  
Ulice: [redacted]  
Státní: [redacted]  
Číslo dokladu: [redacted]  
Poznámka: [redacted]

Telefon: [redacted]  
Poznámka neveřejná: [redacted]

## Příloha 2 – Formulář o dopravní nehodě DPMOST, zdroj: DPMOST

Věc: Vyhodnocení příčin a okolností vzniku mimořádné události v drážní tramvajové dopravě

**Vlastník a provozovatel dráhy:**

DOPRAVNÍ PODNIK měst Mostu a Litvínova, a.s.

**Označení MU, datum, čas a místo:**

MU byla klasifikována jako **nehoda**, u provozovatele je vedena pod číslem [redacted] ! a stala se dne [redacted] v [redacted], na úrovňovém křížení dráhy s pozemní komunikací mezi zastávkami Most, OD Prior – Most, Sportovní nala

**Popis události:**

Při projíždění výše uvedeného úseku trati ve směru z Mostu do Litvínova nedalo osobní motorové vozidlo přednost právě projíždějící tramvaji [redacted]. Z tohoto důvodu došlo ke střetu drážního vozidla s osobním automobilem. V tramvaji nebyl žádný cestující zraněn, ani řidička tramvaje, pouze řidič osobního automobilu utrpěl lehké zranění.

**Identifikační údaje:**

Tramvajové vozidlo T3 [redacted]. Osobní vozidlo VW Polo [redacted]

**Následky:**

Na drážním vozidle byla poškozena přední část vozu. Škoda na drážním vozidle byla odhadnuta na cca. 3000,- Kč, skutečná výše škody byla vyčíslena dle vnitropodnikové faktury na 5 549,- Kč. Škoda na osobním motorovém vozidle zjišťována nebyla.

**Omezení provozování drážní dopravy:**

Tramvajový provoz byl přerušen na nezbytně dlouhou dobu, a to do 12:00 hod. Autobusovou zálohou byla nahrazena pouze spoj výše uvedené tramvaje.

**Způsob obnovení drážní dopravy:**

Vozidlo po vlastní ose odjelo do provozovny k opravě.

**Příčina a okolnosti vzniku MU:**

Příčinou vzniku MU byla nedbalost řidiče osobního motorového vozidla, který nedal přednost v jízdě tramvajovému vozidlu.

**Určení odpovědnosti za vznik MU:**

Vzhledem k tomu, že řidič osobního motorového vozidla nedal přednost v jízdě tramvaji při průjezdu křížení dráhy s pozemní komunikací, je odpovědný za vznik MU. Policie ČR dopravní nehodu stále šetří, nicméně je pravděpodobné, že za viníka nehody určí rovněž řidiče osobního vozu. Škoda na tramvajovém vozidle ve výši 5 549,- Kč je uplatňována na pojišťovně Generali, kde je vozidlo viníka pojištěno a je očekáváno pojistné plnění v plné výši.

**Vyhodnocení zdravotního stavu a osobní situace:**

Vyhodnocení zdravotního stavu řidiče tramvaje bylo provedeno dechovou zkouškou s negativním výsledkem. Traťový dispečer rozhodl o pokračování řidiče tramvaje v pracovním výkonu. Jiné šetření provedeno nebylo.

**Návrh nápravných opatření k předcházení MU:**

S řidičem tramvaje byl proveden pracovní pohovor. Vzhledem k tomu, že dle tachografu řidič překročil rychlost přes tramvajový přejezd o 12 km/hod. a rovněž nepoužil před přejezdem výstražný zvonec, byl potrestán odejmutím měsíčních prémie a byla upozorněn na skutečnost, že použitím zvukového znamení mohl nehodě předejít.

**Datum a místo vyhotovení vyhodnocení:**

10. října 2012, Most

**Příloha 3 – Výpis z databáze nehod PČR, zdroj: PČR**

p1	id_vozidla	p44	p45a	p45b	p47	p48a	p48b	p49	p50a	p50b	p51	p52	p53	p55a	p55b	p56	p57	p58
2100180444	1	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	5	150	8	0	XX	1	1
2100180439	2	10	0	NULL	NULL	0	0	0	1	0	1	5	400	8	0	XX	1	1
2100180338	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	0	0	1	1	10	8	3	XX	1	1
2100180334	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	73	500	8	0	XX	1	1
2100180317	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	0	0	1	1	300	8	3	XX	1	1
2100180301	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	33	900	8	3	10	1	1
2100180282	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	500	8	0	XX	1	1
2100180248	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	50	8	3	10	1	1
2100180246	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	5	8	0	8	1	1
2100180206	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	900	8	0	XX	1	1
2100180122	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	73	300	8	1	1	1	1
2100180077	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	0	0	1	1	1000	8	0	XX	1	1
2100180061	1	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	0	8	0	XX	1	1
2100180057	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	100	8	3	10	1	1
2100180047	1	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	5	8	0	10	1	1
2100180488	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	5	100	8	0	20	1	1
2100180481	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	73	0	8	0	XX	1	1
2100180561	1	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	0	8	0	XX	1	1
30506180005	1	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	31	0	8	4	XX	1	1
60206180041	1	10	0	NULL	NULL	5	0	0	0	0	1	1	0	8	0	XX	1	1
70706180047	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	0	0	1	37	10	8	0	XX	1	1
70706180034	1	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	0	8	3	XX	1	1
70706180023	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	15	10	8	0	XX	1	1
70706180015	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	37	150	8	3	XX	1	1
2100180545	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	77	100	8	3	10	1	1
2100180539	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	5	150	8	3	7	1	1
2100180685	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	37	200	8	0	XX	1	1
2100180683	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	15	500	8	0	5	1	1
2100180641	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	300	8	0	XX	1	1
2100180579	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	0	0	1	73	1000	8	0	10	1	1
2100180571	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	200	8	0	XX	1	1
2100180718	1	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	50	8	0	XX	1	1
1,80506E+11	1	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	5	100	8	0	XX	1	1
2100180800	2	10	0	NULL	NULL	1	0	0	0	0	1	5	1200	8	0	XX	1	1
2100180795	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	0	0	1	83	100	8	0	XX	1	1
2100180751	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	37	300	8	0	XX	1	1
2100180876	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	5	800	8	0	XX	1	1
2100181751	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	0	0	1	5	100	8	3	15	1	1
2100180868	2	10	0	NULL	NULL	5	0	0	1	0	1	1	200	8	0	XX	1	1



## Příloha 4 – Statistický formulář k nehodám PČR, zdroj: PČR

01 IDENTIFIKAČNÍ ČÍSLO	305 při předjíždění došlo k ohrožení předjížděného řidiče vozidla (vynucované zařazení, předjížděný řidič musel prudce brzdít, měnit směr jízdy apod.)	03 nesprávné umístění, znečištění, chybějící dopravní značka
02 ČASOVÉ ÚDAJE O DOPRAVNÍ NEHODĚ	306 předjíždění vlevo vozidla odbočujícího vlevo	04 zvlhčený povrch v podélném směru
03 DATUM NAHLÁŠENÍ NEHODY	307 předjíždění v místech, kde je to zakázáno dopr. značkou	05 souvislé výtluky
04 ÚZEMNÍ MÍSTO DOPRAVNÍ NEHODY	308 při přeježdění byla přejeta podélná čára souvislá	06 nesouvislé výtluky
05a LOKALITA NEHODY	309 bránění v předjíždění	07 trvalé zúžení vozovky
1 v obci	310 přehlédnutí již předjíždějícího souběžně jedoucího vozidla	08 příčná stružka, hrboľ, vystouplé, propadlé kolejnice
2 mimo obec	311 jiný druh nesprávného předjíždění	09 neoznačená nebo nedostatečně označená překážka na komunikaci
05b KÓD OBCE	NEDÁNÍ PŘEDNOSTI V JÍZDĚ	10 přechodná uzavírka jednoho jízdního pruhu
06 DRUH NEHODY	401 jízda na "červenou" 3-barevného semaforu	11 přechodná uzavírka komunikace nebo jízdního pásu
1 srážka s jedoucím nekolovým vozidlem	402 proti příkazu dopravní značky STŮJ DEJ PŘEDNOST	12 jiný (neuvezený) stav nebo závada komunikace
2 srážka s vozidlem zaparkovaným, odstaveným	403 proti příkazu dopravní značky DEJ PŘEDNOST	18 POVĚTRNOSTNÍ PODMÍNKY V DOBĚ NEHODY
3 srážka s pevnou překážkou	404 vozidlu přijíždějícímu zprava	1 nezižené
4 srážka s chodcem	405 při odbočování vlevo	2 mlha
5 srážka s lesní zvířeti	406 tramvaji, která odbočuje	3 na počátku deště, slabý déšť, mrholení apod.
6 srážka s domácím zvířetem	407 protijedoucím vozidlu při objíždění překážky	4 déšť
7 srážka s vlakem	408 při zařazování do proudu jedoucích vozidel ze stanice, místa zastavení nebo stání	5 sněžení
8 srážka s tramvaji	409 při vjíždění na silnici	6 tvoří se námrza, náledí
9 havárie	410 při otáčení nebo couvání	7 nárazový vítr (boční, víchlice apod.)
0 jiný druh nehody	411 při přeježdění z jednoho jízdního pruhu do druhého	0 jiné ztižené
07 DRUH SRÁŽKY JEDOUČÍCH VOZIDEL	412 chodci na vyznačeném přechodu	19 VIDITELNOST
1 čelní	413 při odbočování vlevo souběžně jedoucím vozidlu	1 ve dne, viditelnost nezhoršená vlivem povětrnostních podmínek
2 boční	414 jiné nedání přednosti	2 ve dne, zhoršená viditelnost (svítání, soumrak)
3 z boku	NESPRAVNÝ ZPŮSOB JÍZDY	3 ve dne, zhoršená viditelnost vlivem povětrnostních podmínek (mlha, sněžení, déšť apod.)
4 zezadu	501 jízda po nesprávné straně vozovky, vjeti do protisměru	4 v noci - s veřejným osvětlením, viditelnost nezhoršená vlivem povětrnostních podmínek
0 nepřichází v úvalu, nejedná se o srážku jedoucích vozidel	502 vyhýbání bez dostatečného bočního odstupu (vůle)	5 v noci - s veřejným osvětlením, zhoršená viditelnost vlivem povětrnostních podmínek (mlha, déšť, sněžení apod.)
08 DRUH PEVNÉ PŘEKÁŽKY	503 neodržení bezpečné vzdálenosti za vozidlem	6 v noci - bez veřejného osvětlení, viditelnost nezhoršená vlivem povětrnostních podmínek
1 strom	504 nesprávné otáčení nebo couvání	7 v noci - bez veřejného osvětlení, viditelnost zhoršená vlivem povětrnostních podmínek (mlha, déšť, sněžení apod.)
2 sloup - telefonní, veřejného osvětlení, elektrického vedení, signalizace apod.	505 chyby při udání směru jízdy	20 ROZHLEDOVÉ POMĚRY
3 odrazník, patník, sloupek směrový, sloupek dopravní značky apod.	506 bezohledná, agresivní, neohleduplná jízda	1 dobré
4 svodidlo	507 náhle bezdůvodné snížení rychlosti jízdy, zabrzdění nebo zastavení	2 špatné - vlivem okolní zástavby (budovy, plně zábradlí apod.)
5 překážka vzniklá provozem jiného vozidla (např.: ztráta nákladu, výstroje vozidla nebo jeho části	508 řidič se plně nevěnoval řízení vozidla	3 špatné - vlivem průběhu komunikace, nebo podélného profilu nebo trasování (nepřehledný vrchol stoupání, zářez komunikace apod.)
6 zeď, pevná část mostu, podjezdu, tunelů apod.	509 samovolné rozjetí nezajištěného vozidla	4 špatné - vlivem vegetace - trvalé (stromy, keře apod.)
7 závory železničního přejezdu	510 vjeti na nezapevněnou krajnici	5 špatné - vlivem vegetace - přechodné (tráva, obilí apod.)
8 překážka vzniklá staveb. činností (přenosné dopravní značky, hromada šterku, písku nebo jiného stavebního materiálu apod.)	511 nezvládnutí řízení vozidla	6 výhled zakryt stojícím vozidlem
9 jiná překážka (zábradlí, oplocení, násep, nástupní ostrůvek apod.)	512 jízda (vjeti) jednosměrnou ulicí, silnicí (v protisměru)	0 jiné špatné
0 nepřichází v úvalu, nejedná se o srážku s pevnou překážkou	513 nehoda v důsledku použití (policii) prostředků k násilnému zastavení vozidla (zastavovací pásy, zábrana, vozidlo atd.)	21 DĚLENÍ KOMUNIKACE
09 CHARAKTER NEHODY	514 nehoda v důsledku použití služební zbraně (policii)	1 dvoupřuhová
1 nehoda s následky na životě nebo zdraví	515 nehoda při provádění služebního zákroku (pronásledování pachatele atd.)	2 třípruhová
2 nehoda pouze s hmotnou škodou	516 jiný druh nesprávného způsobu jízdy	3 čtyřpruhová s dělicím pásem
10 ZAVINĚNÍ NEHODY	TECHNICKÁ ZÁVADA VOZIDLA	4 čtyřpruhová s dělicí čarou
1 řidičem motorového vozidla	601 závada řízení	5 vícepruhová
2 řidičem nemotorového vozidla	602 závada provozní brzdy	6 rychlostní komunikace
3 chodcem	603 neúčinná nebo nefungující parkovací brzda	0 žádná z uvedených
4 lesní zvířeti, domácím zvířectvem	604 opotřebení běhounu pláště pod stanovenou mez	22 SITUOVÁNÍ NEHODY NA KOMUNIKACI
5 jiným účastníkem silničního provozu	605 defekt pneumatiky způsobený průrazem nebo náhlým únikem vzduchu	1 na jízdním pruhu
6 závadou komunikace	606 závada osvětlovací soustavy vozidla (neúčinná, chybějící, znečištěná apod.)	2 na odstavném pruhu
7 technickou závadou vozidla	607 nepřipojná nebo poškozená spojovací hadice pro brzdění přípojného vozidla	3 na krajnici
0 jiné zavinění	608 nesprávné uložení nákladu	4 na odbočovacím, přípojovacím pruhu
11 ALKOHOL U VINÍKA PŘÍTOMEN	609 upadnutí, ztráta kola vozidla (i rezervního)	5 na pruhu pro pomalá vozidla
1 Ano, obsah alkoholu v krvi do 0,24 ‰	610 zablokování kol v důsledku mechanické závady vozidla (zadřený motor, převodovka, rozvodovka, spadlý řetěz apod.)	6 na chodníku nebo ostrůvku
2 Ne	611 lom závěsu kola, pružiny	7 na kolejích tramvaje
3 Ano, obsah alkoholu v krvi od 0,24‰ do 0,5‰	612 nezajištěná nebo poškozená bočnice (i u přívěsu)	8 mimo komunikaci
4 Pod vlivem drog	613 závada závěsu pro přívěs	9 na stezce pro cyklisty
5 Pod vlivem alkoholu a drog	614 utržená spojovací hřídel	0 žádné z uvedených
6 Ano, obsah alkoholu v krvi od 0,5‰ do 0,8‰	615 jiná technická závada (vztahuje se i na přípojné vozidlo)	23 ŘÍZENÍ PROVOZU V DOBĚ NEHODY
7 Ano, obsah alkoholu v krvi od 0,8‰ do 1,0‰	13 NÁSLEDKY NEHODY – stav do 24 hodin	1 policistou nebo jiným pověřeným orgánem
8 Ano, obsah alkoholu v krvi od 1,0‰ do 1,5‰	a) usmrceno osob	2 světelným signalizačním zařízením
9 Ano, obsah alkoholu v krvi 1,5‰ a více	b) těžce zraněno osob	3 místní úprava (vyplní se následující položka č. 24)
0 Nezjišťováno	c) lechce zraněno osob	0 žádný způsob řízení provozu
12 HLAVNÍ PŘÍČINA NEHODY	14 CELKOVÁ HMOTNÁ ŠKODA	24 MÍSTNÍ ÚPRAVA PŘEDNOSTI V JÍZDĚ
100 nezaviněná řidičem	ve stokrunech	1 světelná signalizace přepnuta na přeřazovanou žlutou
NEPŘIMĚŘENÁ RYCHLOST JÍZDY	15 DRUH POVRCHU VOZOVKY	2 světelná signalizace mimo provoz
201 nepřizpůsobení rychlosti intenzitě ( hustotě) provozu	1 dlažba	3 přednost vyznačena dopravními značkami
202 nepřizpůsobení rychlosti viditelnosti (mlha, soumrak, jízda v noci na tlumené světlo apod.)	2 živice	4 přednost vyznačena přenosnými dopravními značkami nebo za řízením
203 nepřizpůsobení rychlosti vlastnostem vozidla a nákladu	3 beton	5 přednost nevyznačena - vyplývá z pravidel silničního provozu
204 nepřizpůsobení rychlosti stavu vozovky (náledí, výtluky, bláto, mokry povrch apod.)	4 panely	0 žádná místní úprava
205 nepřizpůsobení rychlosti dopravně technického stavu vozovky (zatačka, klesání, stoupání, šířka vozovky apod.)	5 šterk	27 SPECIFICKÁ MÍSTA A OBJEKTY V MÍSTĚ NEHODY
206 překročení předepsané rychlosti stanovené pravidly	6 jiný nezapevněný povrch	01 přechod pro chodce
207 překročení rychlosti stanovené dopravní značkou	0 žádný z uvedených (písek, dřevo atd.)	02 v blízkosti přechodu pro chodce (do vzdálenosti 20 m)
208 nepřizpůsobení rychlosti stanovené pravidly (i při míjení, předjíždění vozidlem)	16 STAV POVRCHU V DOBĚ NEHODY	03 železniční přejezd nezabezpečený závorami ani světelným výstražným zařízením
209 jiný druh nepřiměřené rychlosti	1 povrch suchý, neznečištěný	04 železniční přejezd zabezpečený
NESPRÁVNÉ PŘEDJÍŽDĚNÍ	2 povrch suchý, znečištěný (písek, prach, listí, šterk atd.)	05 most, nadjezd, podjezd, tunel
301 předjíždění vpravo	3 povrch mokry	06 zastávka autobusu, trolejbusu, tramvaje s nástup. ostrůvkem
302 předjíždění bez dostatečného bočního odstupu	4 na vozovce je bláto	07 zastávka tramvaje, autobusu, trolejbusu bez nástup. ostrůvku
303 předjíždění bez dostatečného rozhledu (v nepřehledné zatáčce nebo její blízkosti, před vrcholem stoupání apod.)	5 na vozovce je náledí, ujetý snih - posypané	08 výjezd z parkoviště, lesní cesty apod. (pol.36=7,8)
304 při předjíždění došlo k ohrožení protijedoucího řidiče vozidla (špatný odhad vzdálenosti potřebné k předjetí apod.)	6 na vozovce je rozlitý olej, nafta apod.	09 čerpadlo pohonných hmot
	8 souvislá sněhová vrstva, rozředlý snih	10 parkoviště přiléhající ke komunikaci
	9 náhlá změna stavu vozovky (námrza na mostu, místní náledí)	00 žádné nebo žádné z uvedených
	0 jiný stav povrchu vozovky v době nehody	28 SMĚROVÉ POMĚRY
	17 STAV KOMUNIKACE	
	01 dobrý, bez závad	
	02 podélný sklon vyšší než 8%	

1 přímý úsek  
2 přímý úsek pro projekci zatáčky (do vzdálenosti cca 100 m od optického konce zatáčky)  
3 zatáčka  
4 křižovatka průsečná - čtyřramenná  
5 křižovatka styková - tříramenná  
6 křižovatka pěti a vícerarmenná  
7 kruhový objezd

**29 KATEGORIE CHODCE**

1 muž  
2 žena  
3 dítě (do 15 let)  
4 skupina dětí  
5 jiná skupina

**30 STAV CHODCE**

1 dobrý - žádné nepříznivé okolnosti nebyly zjištěny  
2 nepozornost, roztržitost  
3 pod vlivem léků, narkotik  
4 pod vlivem alkoholu, obsah alkoholu v krvi do 0,99 ‰  
5 fyzická indispozice (nemoc, nevolnost, snížená pohyblivost apod.)  
6 pokus o sebevraždu, sebevražda  
7 invalida  
8 jiný neuvedený stav  
9 pod vlivem alkoholu, obsah alkoholu v krvi 1 ‰ a více  
0 nezjištěno

**31 CHOVÁNÍ CHODCE**

1 správné, přiměřené  
2 špatný odhad vzdálenosti a rychlosti vozidla  
3 náhle vstoupení do vozovky z chodníku, krajnice  
4 náhle vstoupení do vozovky z nástupního nebo dělicího ostrůvku  
5 zmatené, zbrklé, nerozhodné jednání  
6 náhla změna směru chůze  
7 náraz do vozidla z boku  
8 hra dětí na vozovce  
0 žádné z uvedených

**32 SITUACE V MÍSTĚ NEHODY**

01 vstup chodce na signál VOLNO  
02 vstup chodce na signál STUJ  
03 vstup chodce do vozovky v blízkosti přechodu (cca do 20 m)  
04 přecházení po vyznačeném přechodu  
05 přecházení těsně před nebo za vozidlem stojícím v zastávce  
06 přecházení těsně před nebo za vozidlem parkujícím  
07 chůze, stání na chodníku  
08 chůze po správné straně  
09 chůze po nesprávné straně  
10 přecházení mimo přechod (20 a více metrů od přechodu)  
00 jiná situace

**33 NÁSLEDKY NA ŽIVOTECH A ZDRAVÍ CHODCŮ**

c) pohlaví osoby:  
1 muž  
2 žena  
3 chlapec (do 15 let)  
4 dívka (do 15 let)

d) rok narození chodce (poslední dvojčíslí roku)

e) státní příslušnost (stát)

f) poskytnutí první pomoci:  
1 nebylo třeba poskytnout  
2 poskytnuta osádkou vozidel zúčast. na nehodě  
3 jinou osobou  
4 leteckou záchrannou službou  
5 vozidlem RZP  
6 nebyla poskytnuta, ale bylo nutno poskytnout

g) následky:

1 usmrcení  
2 těžké zranění  
3 lehké zranění  
4 bez zranění

**34 POČET ZÚČASTNĚNÝCH VOZIDEL**

uvádí se skutečný počet vozidel

**35 MÍSTO DOPRAVNÍ NEHODY**

00 mimo křižovatku  
10 na křižovatce, jedná-li se o křížení místních komunikací, účelových komunikací nebo jde o mezilehlu křižovatku (na sledovaném úseku ve sledovaných městech)  
11-18 uvnitř zóny 1-8 předmětné křižovatky  
19 na křižovatce, uvnitř hranic křižovatky definovaných pro systém evidence nehod (zóna 9)  
22-28 na vjezdové nebo vjezdové části větve při mimoúrovňovém křížení  
29 mimo zónu 11-19 a 22-28

**36 DRUH POZEMNÍ KOMUNIKACE**

0 dálnice  
1 silnice I. třídy  
2 silnice II. třídy  
3 silnice III. třídy  
4 uzel (křižovatka sledovaná ve vybraných městech)  
5 komunikace sledovaná (ve vybraných městech)  
6 komunikace místní  
7 komunikace účelová - polní a lesní cesty atd.  
8 komunikace účelová - ostatní (parkoviště, odpočívky apod.)

**37 ČÍSLO POZEMNÍ KOMUNIKACE**

vyplňuje se zleva a pouze jedná-li se o dálnici, silnici I. až 3. třídy  
dálnice - čísla 01 až 99  
silnice I. tř. - čísla 01 až 99  
silnice II. tř. - čísla 101 až 999  
silnice III. tř. - čtyř - šestimístná

**38 KILOMETR NEHODY**

uvádí se kilometr místa nehody, jedná-li se o dálnici, silnici I. až III. třídy  
(na 2 desetinná místa), místa před číslem se doplňují nulami

**39 DRUH KŘÍŽUJÍCÍ KOMUNIKACE**

1 silnice I. třídy  
2 silnice II. třídy  
3 silnice III. třídy  
6 místní komunikace  
7 účelová komunikace  
9 větve mimoúrovňové křižovatky

**40, 41 ČÍSLO UZLU**

uvádí se čtyřmístné číslo uzlu (sledované křižovatky) podle číselníků předaných dopravně inženýrskými útvary sledovaných měst (dosud hl. m. Praha, Plzeň, Karlovy Vary, Brno, Ostrava)

**44 DRUH VOZIDLA**

00 moped  
01 malý motocykl (do 50 cm)  
02 motocykl (včetně sidecarů, skútrů apod.)  
03 osobní automobil bez přívěsu  
04 osobní automobil s přívěsem  
05 nákladní automobil (včetně mulikářů, autojeřábů, cisterny atd.)  
06 nákladní automobil s přívěsem  
07 nákladní automobil s návěsem  
08 autobus  
09 traktor (i s přívěsem)  
10 tramvaj  
11 trolejbus  
12 jiné motorové vozidlo (zemědělské, lesní, stavební stroje atd.)  
13 jízdní kolo  
14 povoz, jízda na koni  
15 jiné nemotorové vozidlo  
16 vlak  
17 nezjištěno, řidič ujel  
18 jiný druh vozidla

**45a VÝROBNÍ ZNAČKA MOTOROVÉHO VOZIDLA**

kód osobní a nákladní automobily  
01 ALFA-ROMEO  
02 AUDI  
03 AVIA  
04 BMW  
05 CHEVROLET  
06 CHRYSLER  
07 CITROEN  
08 DACIA  
09 DAEWOO  
10 DAF  
11 DODGE  
12 FIAT  
13 FORD  
14 GAZ, VOLHA  
15 Ferrari  
16 HONDA  
17 HYUNDAI  
18 IFA  
19 IVECO  
20 JAGUAR  
21 JEEP  
22 LANCIA  
23 LAND ROVER  
24 LIAZ  
25 MAZDA  
26 MERCEDES  
27 MITSUBISHI  
28 MOSKVIČ  
29 NISSAN  
30 OLTCIT  
31 OPEL  
32 PEUGEOT  
33 PORSCHE  
34 PRAGA  
35 RENAULT  
36 ROVER  
37 SAAB  
38 SEAT  
39 ŠKODA  
40 SCANIA  
41 SUBARU  
42 SUZUKI  
43 TATRA  
44 TOYOTA  
45 TRABANT  
46 VAZ  
47 VOLKSWAGEN  
48 VOLVO  
49 WARTBURG  
50 ZASTAVA  
51 AGM  
52 ARO  
53 Austin  
54 Barkas  
55 Daihatsu  
56 Datsun  
58 Isuzu  
59 KAROSA  
60 Kia  
61 LUBLIN  
62 MAN  
63 Maserati  
64 MULTICAR  
65 Pontiac  
66 ROSS  
67 Simca  
68 SsangYong  
69 Talbot  
70 TAZ  
71 ZAZ

kód autobusy

3 AVIA  
10 DAF  
12 FIAT  
13 FORD  
19 IVECO  
26 MERCEDES  
35 RENAULT  
39 SKODA  
40 SCANIA  
48 VOLVO  
59 KAROSA  
62 MAN  
72 BOVA  
73 IKARUS  
74 NEOPLAN  
75 OASA  
76 RAF  
77 SETRA  
78 SOR

kód motocykly

4 BMW  
16 HONDA  
32 PEUGEOT  
42 SUZUKI  
79 APRILIA  
80 CAGIVA  
81 ČZ  
82 DERBI  
83 DUCATI  
84 GILERA  
85 HARLEY  
86 HERO

87 HUSQVARNA  
88  
89 KAWASAKI  
90 KTM

91 MALAGUTI  
92  
MANET  
94 PIAGGIO  
95 SIMSON  
96 VELOREX  
97 YAMAHA  
98 jiné vyrobené v ČR  
99 jiné vyrobené mimo ČR  
00 žádná z uvedených (v pol. 44 je kód 09 až 18)

**45b ÚDAJE O VOZIDLE**

v této položce se uvádí:  
- u motocyklů a osobních automobilů zdvihový objem válců v litrech (dle sdělení řidiče, z evidence vozidel apod.), u malých motocyklů a mopedů se nevyplňuje  
- u nákladních automobilů celková hmotnost v tunách  
- u autobusů obsaditelnost (počet míst k sezení)  
- nejedná-li se o výše uvedené druhy vozidel, tak se tato položka nevyplňuje  
- nelze-li zjistit, napište nulu (ve výjimečných případech)

**46 STÁTNÍ POZNÁVACÍ ZNAČKA**

v této položce se uvádí:  
- u vozidel registrovaných v ČR státní poznávací značka, včetně vozidel zastupitelských sborů  
- u vozidel registrovaných mimo území ČR mezinárodní poznávací značka (MPŽ)

**47 ROK VÝROBY VOZIDLA**

uvádí se poslední dvojčíslí roku výroby motorového vozidla, v případě, že nelze rok výroby zjistit uvede se kód "XX".

**48a CHARAKTERISTIKA VOZIDLA (vlastník vozidla)**

01 soukromé, nevyužívané k výdělečné činnosti  
02 soukromé, využívané k výdělečné činnosti  
03 soukromá organizace (podnikatel, s.r.o., v.o.s., a.s., atd.)  
04 veřejná hromadná doprava  
05 městská hromadná doprava  
06 mezinárodní kamionová doprava  
07 TAXI  
08 státní podnik, státní organizace  
09 registrované mimo území ČR  
10 zastupitelský úřad  
11 ministerstvo vnitra  
12 policie ČR  
13 městská, obecní policie  
14 soukromé bezpečnostní agentury  
15 ministerstvo obrany  
16 jiné  
17 odčizené  
18 vozidlo AUTOŠKOLY provádějící výcvik  
00 nezjištěno

**48b DOPLŇUJÍCÍ ÚDAJE O VOZIDLE**

1 přeprava nebezpečných nákladů - pevných  
2 přeprava nebezpečných nákladů - kapalných  
3 přeprava nebezpečných nákladů - plyných  
4 přeprava nadměrných nákladů  
5 jízda se zvláštním výstražným znamením oranžové barvy  
6 jízda s právem přednosti modré barvy  
7 motorová koloběžka  
8 tříkolka nebo čtyřkolka  
9 lehká čtyřkolka (výkon max. 4 kW a rychlost omezena do 45 km/hod)  
0 nepřichází v úvahu

**49 SMYK**

1 ano  
0 ne

**50a VOZIDLO PO NEHODĚ**

1 nedošlo k požáru  
2 došlo k požáru  
3 řidič ujel - zjištěn  
4 řidič ujel (utekl) - nezjištěn  
0 žádná z uvedených

**50b ÚNIK PROVOZNÍCH, PŘEPRAVOVANÝCH HMOT**

1 došlo k úniku pohonných hmot, oleje, chladicího média apod.  
2 došlo k úniku jiných nebezpečných látek - pevných  
3 došlo k úniku jiných nebezpečných látek - kapalných  
4 došlo k úniku jiných nebezpečných látek - plyných  
0 žádné z uvedených

**51 ZPŮSOB VYPROŠTĚNÍ OSOB Z VOZIDLA**

1 nebylo třeba užít násilí  
2 použitím páčidel apod.  
3 použitím speciální vyprošťovací techniky

**52 SMĚR JÍZDY NEBO POSTAVENÍ VOZIDLA**

01 vozidlo jedoucí - ve směru staničení (na komunikaci)  
02 vozidlo odstavené, parkující - ve směru staničení (na komunikaci)  
03 vozidlo jedoucí - proti směru staničení (na komunikaci)  
04 vozidlo odstavené, parkující - proti směru staničení (na komunikaci)  
05 vozidlo jedoucí - na komunikaci bez staničení  
06 vozidlo odstavené, parkující - na komunikaci bez staničení  
10 - 99 zachycuje postavení vozidla při nehodě na křižovatce

**53 ŠKODA NA VOZIDLE**

vyplňuje se zprava a uvádí se škoda pouze na příslušném vozidle (nikoliv nákladu) ve stokorunách.

**54 RODNÉ ČÍSLO ŘIDIČE**

uvádí se u řidičů vozidel majících české občanství, tj. v pol. č. 44 je uveden některý z kódů 00, 01 až 15. Jedná-li se o náraz do stojícího (zaparkovaného) vozidla (pol. č. 06=2) pak nemusí být rodné číslo řidiče tohoto vozidla vyplněno a pol. č. 55 až 59 se vyplňují jen v případech, jsou-li v zaparkovaném vozidle osoby.	3 lehké zranění 4 bez zranění			0604 0606 0612 0613	Břeclav Hodonín Vyškov Znojmo	
55a KATEGORIE ŘIDIČE (uveďte nejvyšší skupinu) 1 s řidičským oprávněním skupiny A 2 s řidičským oprávněním skupiny B 3 s řidičským oprávněním skupiny C 4 s řidičským oprávněním skupiny D 5 s řidičským oprávněním skupiny T 6 s řidičským oprávněním skupiny A s omezením do 50 cm 7 bez příslušného řidičského oprávnění 8 ostatní řidiči vozidel (např. cyklisté, vozkové, strojevodoucí atd.) 9 nezjištěno, řidič místo nehody opustil (v pol. č.:44 je kód 17, nebo v pol. č.: 50a je kód 4) 0 nezjištěno (např.: u cizinců)	kraj kraj okres od 1.1.2010			0613 0702 0703 0704 0706 0707 14 1405 1408 1409 1411 1412 15 1505 1508 1510 1511 1515 16 1607 1610	07 Bruntál 0701 Frydek Místek Karviná Nový Jičín Opava Olomouc Přerov Šumperk Jeseník Prostějov Zlín Kroměříž Uherské Hradiště 1511 Vsetín	
55b NEJVYŠŠÍ UKONČENÉ VZDĚLÁNÍ 1 základní škola 2 učňovská škola 3 střední škola 4 vysoká škola 0 nezjištěno						
56 DÉLKA ŘIDIČSKÉ PRAXE V ŘÍZENÍ MOTOROVÉHO VOZIDLA (uveďte se, kolik let jezdí s příslušným druhem vozidla) Pokud nelze tento údaj zjistit (usmrcení, těžké zranění řidiče, nebo jedná-li se o cizince) uveďte kód "XX".						
57 STAV ŘIDIČE 1 dobrý - žádné nepříznivé okolnosti nebyly zjištěny 2 unaven, usnul, náhla fyzická indispozice 3 pod vlivem léků, narkotik 4 pod vlivem alkoholu, obsah alkoholu v krvi do 0,99 ‰, 5 pod vlivem alkoholu obsah alkoholu v krvi 1 ‰ a více 6 nemoc, úraz apod. 7 invalida 8 řidič při jízdě zemřel (infarkt apod.) 9 pokus o sebevraždu, sebevražda 0 jiný nepříznivý stav						
58 VNĚJŠÍ OVLIVNĚNÍ ŘIDIČE 1 řidič nebyl ovlivněn 2 oslněn sluncem 3 oslněn světlomety jiného vozidla 4 ovlivněn jedním jiným účastníkem silničního provozu 5 ovlivněn při vyhýbání lesní zvěři, domácímu zvířectvu apod. 0 jiné ovlivnění						
59 NÁSLEDKY VE VOZIDLE a) označení osoby 1 řidič 2 spolucestující na předním sedadle vedle řidiče nebo spolujezdec (cestující) na motocyklu, jízdním kole 3 spolucestující na zadním sedadle 4 ostatní spolucestující (i v postranním vozíku motocyklu) b) bližší označení osoby 1 s přílbou (pouze u motocyklistů, příp. cyklistů) 2 bez přílby (pouze u motocyklistů, příp. cyklistů) 3 připoutaný bezpečnostními pásy (i na zadních sedadlech) 4 nepřipoutaný bezpečnostními pásy 5 sedící v dětské sedačce 6 vozidlo nevybaveno dětskou sedačkou 7 bezpečnostní vak (airbag) v činnosti - osoba připoutaná 8 bezpečnostní vak (airbag) v činnosti - osoba nepřipoutaná c) pohlaví osoby 1 muž 2 žena 3 chlapec (do 15 let) 4 dívka (do 15 let) d) rok narození (poslední dvojčíslí roku) e) státní příslušnost (stát) f) poskytnutí první pomoci 1 nebylo třeba poskytnout 2 poskytnuto osádkou vozidel zúčastněných na nehodě 3 jinou osobou 4 leteckou záchrannou službou 5 vozidlem RZP 6 nebyla poskytnuta, ale bylo nutno poskytnout g) následky 1 usmrcení 2 těžké zranění	Plzeňský Ústecký Královéhradecký Králové	03 0301 0304 0305 0308 0310 0311 04 0402 0403 0406 0407 0408 0409 0410 0502 0504 0505 0507 0510 06 0601 0602 0603	České Budějovice Český Krumlov Jindřichův Hradec Písek Prachatice Strakonice Tábor Domazlice Klatovy Plzeň Město Rokycany Tachov Plzeň Venkov Děčín Chomutov Litoměřice Louny Most Teplice Ústí nad Labem 05 Hradec 0502 Jičín Náchod Rychnov nad Kněžnou Trutnov Blansko Brno-město Brno-venkov	1616 1617 17 1703 1706 1709 1711 18 1801 1804 1805 1811 19 1902 1903 1909	Žďár nad Sázavou Havlíčkův Brod Pelhřimov Chrudim Pardubice Svitavy Ústí nad Orlicí Česká Lípa Jablonec nad Nisou Liberec Semily Cheb Karlovy Vary Sokolov	

## ***Příloha 5 – Závěrečná zpráva DI o dopravní nehodě tramvají, zdroj: DI***



**Česká republika**  
The Czech Republic



The Rail Safety Inspection Office

### **Závěrečná zpráva o výsledcích šetření mimořádné události**

Srážka dvou tramvajových vlaků linky č. 17 mezi zastávkami  
Palackého náměstí a Jiráskovo náměstí v Praze

Čtvrtek, 22. listopadu 2018

### **Accident and incident investigation report**

Collision of two trams No. 17 between Palackého náměstí and Jiráskovo  
náměstí tram stops in Prague

Thursday, 22<sup>nd</sup> November 2018

č. j.: 6-4310/2018/DI

ČR – Drážní inspekce  
IČ: 75009561

Těšnov 1163/5  
110 00 Praha 1

<http://www.dicr.cz>  
[mail@dicr.cz](mailto:mail@dicr.cz)

ID DS: vi6aigp  
tel.: +420 736 521 003



Závěrečná zpráva o výsledcích šetření mimořádné události

## 1 SHRNUÍ



Zdroj: D1

- Skupina události:** vážná nehoda.
- Vznik události:** 22. 11. 2018, 13.57 h.
- Popis události:** srážka tramvajového vlaku linky č. 17 pořadí 29 s tramvajovým vlakem linky č. 17 pořadí 3 (njetí zezadu) mezi zastávkami Palackého náměstí a Jiráskovo náměstí v Praze.
- Dráha, místo:** dráha tramvajová, hlavní město Praha, mezizastávkový úsek Palackého náměstí – Jiráskovo náměstí. Místo srážky se nacházelo na ulici Rašínovo nábřeží před křižovatkou s ulicí Resslerova na území městské části Praha 2.
- Zúčastnění:** Dopravní podnik hlavního města Prahy, akciová společnost (provozovatel dráhy a dopravce).
- Následky:** 11 zraněných;  
celková škoda 1 950 000 Kč.
- Bezprostřední příčina:**
- nepřizpůsobení jízdy rozhledovým poměrům a nedodržení bezpečné vzdálenosti mezi dvěma tramvajovými vlaky.

**Příloha 6 – mapa hl. m. Prahy s místy častých dopravních nehod, zdroj: DPP**

