

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

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

Ing. Jakub Seidl

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Dopravní stroje a zařízení

Školitel: doc. Ing. Josef Kolář, CSc.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

2024

Název anglicky: Methodology of tram head design for reducing the consequences of accidents on passenger cars

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Jakub Seidl

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel,
Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6

Školitel: doc. Ing. Josef Kolář, CSc.

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Fakulta
strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Strojní inženýrství.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.

předseda oborové rady oboru Dopravní stroje a zařízení

Fakulta strojní ČVUT v Praze

Technická 4, Praha 6

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. partner-ské ochrany, kdy vozidlo svými bezpečnostními prvky nechrání pouze cestující uvnitř vozidla, ale i cestující v kolizním vozidle. 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 neohodovosti vozidel s ohledem na legislativní požadavky na pasivní bezpečnost a jejich prokazování při schvalování vozidel do provozu. Druhá část této disertační práce je věnována problematice následků nehod tramvají s auty a návrhem čel tramvají s ohledem pro snížení následků nehod na autech.

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. 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 of this dissertation 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.

Obsah

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	3
1.1. Dopravní nehody tramvají	3
1.2. Následky nehod tramvají s auty	4
1.3. Bezpečnost tramvajových vozidel	5
1.4. Legislativní požadavky na pasivní bezpečnost	6
1.5. Kompatibilita vozidel při nárazu	7
1.6. Biomechanická kritéria poranění člověka	8
1.7. Výpočtové modely lidí	8
1.8. Výpočtové modely osobních automobilů	8
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	9
3. ŘEŠENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	10
3.1. Analýza statistiky nehodovosti tramvají na území ČR	10
3.2. Definování výpočtového scénáře nehody tramvaje s autem	11
3.3. Výzkum na zjednodušených simulačních modelech	11
3.4. Tvorba komplexního simulačního modelu	13
3.5. Analýza vlivu parametrů deformačních prvků na následky nehod	13
3.6. Cíle pro další výzkum	16
4. ZÁVĚR	17
5. CITOVANÁ LITERATURA	18
6. PUBLIKACE AUTORA SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRACÍ	20
7. OSTATNÍ PUBLIKACE AUTORA	22

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

1.1. Dopravní nehody tramvají

Každá dopravní nehoda tramvají s jiným účastníkem silničního provozu je velký zásah 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 dopravních podniků (dále jen DP) a povolení k odklizení nehody od pracovníků drážní inspekce (dále jen DI). Po celou dobu odklizení nehody je daný úsek tramvajové trati neprůjezdný. [1]



Obr. 1-1: Nehoda tramvaje s autem,
zdroj: liberec.rozhlas.cz.

Nehody tramvají s jinými účastníky silničního provozu jsou zaznamenávány třemi institucemi: DP, Dopravní policií České republiky (dále jen DPČR) a DI. DP musí provést záznam o jakékoliv nehodě jimi provozovaných tramvají, avšak nemusí zaznamenávat informace o zdravotních následcích nehod. DPČR zaznamenává pouze nehody tramvají, při nichž došlo ke zranění nebo úmrtí člověka. DPČR zaznamenává následky nehod na cestujících ve všech kolizních vozidlech účastnících se nehody. DI zaznamenává všechny nehody kolejových vozidel na území ČR, avšak vyšetřuje a hodnotí pouze nejzávažnější nehody s cílem zabránit opakování se nehod stejného typu. [1], [2]

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 nehod DP nepublikují. [3], [4]

Někteří autoři se věnovali tvorbě statistiky nehodovosti pro jednotlivé DP na území ČR s ohledem na nejčastější typy nehod a definováním příčin vzniku dopravních nehod. Žádní autoři do této doby nepublikovali analýzu statistiku nehodovosti tramvají pro celé území ČR s ohledem na následky na zdraví cestujících v kolizních vozidlech při nehodě tramvají s auty. [5]

1.2. Následky nehod tramvají s auty

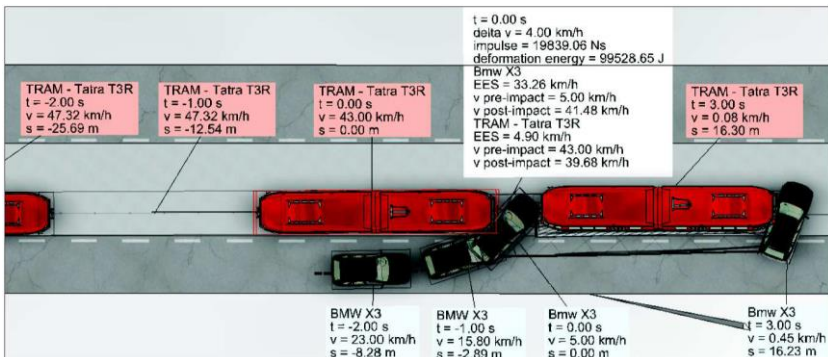
Problematikou následků nehod tramvají s auty se v minulosti nezabývalo mnoho výzkumných prací, jelikož byl primárně kladen důraz na výzkum snížení následků nehod dvou kolejových vozidel či hledáním příčin vzniku nehod.

Z oblasti výzkumů na téma snížení následků nehod tramvají na autech je vhodné uvést publikaci [6]. Autoři se v této publikaci 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. 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 obrázek Obr. 1-2. [6]



Obr. 1-2 Následek nárazu čela tramvaje do boku auta. [6]

Problematice následků nehod tramvají s auty se také věnovali autoři v publikaci [7]. Autoři se ve svém výzkumu zabývali detailním rozбором deseti nehod tramvají s auty s ohledem na vliv tvaru čela tramvaje na následky nehod. Tím získali detailní informace k deseti nehodám tramvají s auty, které se staly v Brně v ČR. Podle získaných podkladů nasimulovali v programu Virtual CRASH průběhy jednotlivých nehod, viz obrázek Obr. 1-3. Z výsledků simulací zkoumali průběhy nehodových dějů a vliv konstrukce čela tramvaje a konstrukce automobilu na zranění posádek aut. Na následky nehod měl největší vliv typ použitého spřáhla. Pevné spřáhlo se při nehodách chovalo jako tuhé beranidlo, které často proniklo do vnitřku auta a zranilo posádku. U nově konstruovaných tramvají je tento typ spřáhla nahrazován skládacím spřáhlem, které při nehodě nepřichází do kontaktu s kolizním vozidlem. [7]



Obr. 1-3 Simulace nehody tramvaje s autem v programu Virtual CRASH. [7]

1.3. Bezpečnost tramvajových vozidel

Bezpečnost vozidel lze rozdělit do dvou základních skupin: aktivní a pasivní bezpečnost vozidel. Prvky a systémy aktivní bezpečnosti vozidel mají za úkol snižovat riziko vzniku dopravních nehod. Výzkum a vývoj prvků a systémů aktivní bezpečnosti zažívá v poslední době velký rozmach. Důvodem je, že je vždy lepší nehodě předcházet než mírnit její následky. Tato disertační práce se zabývá problematikou zmírnění následků nehod tramvají s auty, tedy pasivní bezpečností, a proto nejsou v této práci prvky aktivní bezpečnosti více rozebírány. [8], [9]

Prvky a systémy pasivní bezpečnosti vozidel mají za úkol minimalizovat následky vzniklých nehod na cestujících a vozidlech. Nejdůležitějším prvkem pasivní bezpečnosti tramvají jsou deformační prvky, viz obrázky Obr. 1-4 a Obr. 1-5, jelikož jsou prvním prvkem tramvaje, který při nehodě přichází do styku s kolizním vozidlem. Deformační prvky slouží k absorpci deformační energie při nehodách. Legislativní požadavky na deformační prvky tramvají jsou definovány v normě ČSN EN 15227. Deformačním prvkem musí být vybaveny všechny nově konstruované tramvaje. [8], [9]

Obr. 1-4: Deformační prvek tramvaje, zdroj: vladan.foto.cz.Obr. 1-5: Deformační prvek tramvaje, zdroj: behance.net/gallery.

1.4. Legislativní požadavky na pasivní bezpečnost

Nejdůležitější normou z pohledu pasivní bezpečnosti tramvají při srážce s jiným vozidlem je pro nově konstruované tramvaje norma ČSN EN 15227 „Požadavky na kolizní odolnost kolejových vozidel“. [10]

Hlavním cílem normy ČSN EN 15227 je snížení následků nehod kolejových vozidel a zajištění bezpečnosti cestujících a posádek uvnitř kolejových vozidel. Jedná se tedy o přístup tzv. vlastní ochrany, kdy vozidlo chrání pouze cestující a posádku uvnitř vozidla a ostatní účastníky silničního provozu bere jako kolizní překážky. [10]

Norma rozděluje kolejová vozidla do čtyř konstrukčních kategorií odolnosti proti nárazu. Tramvaje jsou normou zařazeny do konstrukční kategorie vozidel C-IV. Pro každou konstrukční kategorii jsou normou definovány scénáře srážek, na které musí být nová vozidla navrhována a testována. Parametry jednotlivých scénářů reprezentují nejčastější typ nehod, jímž je dané vozidlo v provozu účastníkem. Pro tramvaje jsou normou předepsány tyto scénáře srážek: čelní náraz dvou tramvají, viz obrázek Obr. 1-6, náraz tramvaje do pevné překážky o hmotnosti 3 tuny a náraz tramvaje do překážky o hmotnosti 7,5 tun. [10]



Obr. 1-6: Čelní nehoda dvou tramvají v Ostravě, zdroj: moravskoslezsky.denik.cz.

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

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

Kde: m_{kol} – kolizní hmotnost tramvaje, m – hmotnost prázdné tramvaje, m_{cest} – hmotnost cestujícího a p_{sed} – maximální počet sedících cestujících v tramvaji. [10]

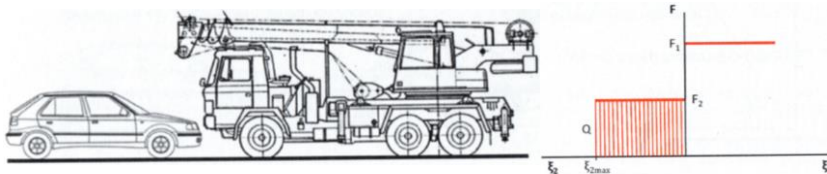
Požadavky normy ČSN EN 15227 je nutné prokázat při homologaci nových tramvají. Z důvodu konstrukce nových tramvají v malých sériích a ceny za jednu tramvaj v řádu desítek miliónů korun je dostatečné prokázat požadavky normy pomocí numerických simulací jednotlivých scénářů srážek na validovaném simulačním modelu. [10]

1.5. Kompatibilita vozidel při nárazu

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. Přístup zvyšování partnerské ochrany vozidel se obecně nazývá kompatibilitou vozidel při nehodě. Pojem kompatibilita vozidel lze vysvětlit tak, že je snaha zajistit stejnou bezpečnost cestujících v různých kolizních vozidlech. Kompatibilitu vozidel lze rozdělit do tří oblastí: hmotnosti, tuhosti a geometrie. [11]

Vysoký rozdíl hmotností kolizních vozidel vede k velkým změnám rychlosti a zrychlení lehčích vozidel při nehodě. Tento závěr vychází ze zákona o zachování hybnosti. Vyšší změna rychlosti a zrychlení zvyšuje riziko zranění cestujících při nehodě. Poznatky z oblasti kompatibility hmotnosti nelze při nehodách tramvají s auty z důvodu velkého rozdílu hmotností aplikovat. [12]

Tuhost deformačních prvků vozidel je navrhována podle legislativních požadavků na pasivní bezpečnost. Pro zjednodušení lze říci, že čím je vozidlo těžší, 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, viz obrázek Obr. 1-7. [8]



Obr. 1-7: Čelní náraz auta do kamionu. [8]

Z důvodu rozdílné výškové pozice nárazníků nad vozovkou kolizních vozidel nedocházelo při nehodách ke kontaktu deformačních prvků vozidel a zjetí jednoho vozidla pod druhé, viz obrázek Obr. 1-8. Nově konstruovaná auta jsou při homologaci zkoušena na odolnost při čelním a bočním nárazu podle platné legislativy. Těmito zkouškami je jednoznačně definována pozice tuhých struktur aut. U nehod osobních aut s nákladními auty byla problematika řešena umístěním systémů podjezdové ochrany (FUPS) v přední a zadní části nákladních aut. [13], [14]



Obr. 1-8: Následky nehody auta s tramvají. [29]

1.6. Biomechanická kritéria poranění člověka

Biomechanická kritéria poranění člověka popisují vztahy mezi různými fyzikálními veličinami a rizikem vzniku poranění lidí. Kritéria se používají při homologačních zkouškách aut. [15]

Pro hodnocení homologační zkoušky EHK/OSN č. 95 se podle požadavků Euro NCAP používá biomechanické kritérium 3 ms. Kritérium vyhodnocuje riziko zranění z průběhu zrychlení hlavy řidiče v závislosti na době trvání zrychlení. Předpis stanovuje pro kritérium 3 ms limitní hodnotu 72 g. [16], [17]

1.7. Výpočtové modely lidí

Výpočtové modely lidí, viz obrázků Obr. 1-9, vznikly z důvodu nutnosti predikce následků jednotlivých homologačních zkoušek aut a interakci člověka s interiérem vozidla již při fázi návrhu vozidel. [18], [19]

Výpočtové modely lidí lze rozdělit do tří skupin, podle typů těles reprezentující části člověka: tuhá tělesa, poddajná tělesa a kombinace obou. Pro výzkum v rámci disertační práce jsou nejvhodnější modely na principu tuhých těles, které jsou schopné přesně reprezentovat pohyb člověka při a po nehodě a vyhodnotit zrychlení působící na hlavu člověka, které je nutné pro stanovení biomechanických kritérií člověka. [18]

Pro výzkum disertační práce byl použit model člověka WorldSID 50th Male od americké firmy LSTC. Model reprezentuje průměrného dospělého člověka o hmotnosti 75kg a byl validován podle výsledků reálných zkoušek. [20]



Obr. 1-9: Figurína Hybrid III: ATD a její výpočtový model. [19]

1.8. Výpočtové modely osobních automobilů

Výrobci automobilů a výzkumní pracovníci vytvářejí simulační modely aut, které používají pro ověřování a případnou optimalizaci nárazových vlastností nově konstruovaných aut.

Pracovníci CCSA při americké univerzitě George Mason poskytují na svých webových stránkách validované simulační modely aut pro nárazové výpočty. Z dostupných modelů byl zvolen model auta Toyota Yaris 2010, jelikož svými parametry nejlépe odpovídá modelu auta ŠKODA Fabia, který byl v roce 2021 nejprodávanějším model auta na území ČR. [21], [22]



Obr. 1-10: Simulační model auta typu Toyota Yaris 2010. [30]

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

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

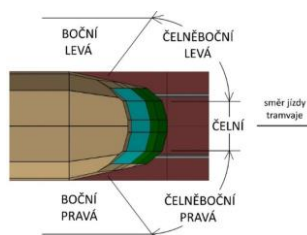
- Analýza statistiky nehodovosti tramvají na území ČR. Získání dat o nehodovosti tramvají se předpokládá navázáním spolupráce s DP, které na území ČR provozují tramvaje, a PČR. Získáním dat o nehodovosti tramvají od obou institucí umožní vytvořit komplexní statistiku nehodovosti tramvají a provést její 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 (úmrťi 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.

3. ŘEŠENÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

3.1. Analýza statistiky nehodovosti tramvají na území ČR

Při shromažďování dat k tvorbě statistiky nehodovosti tramvají na území ČR byla navázána spolupráce se všemi DP, které provozují v ČR tramvaje a DPČR o poskytnutí podkladů k nehodám tramvají za roky 2016 až 2018. [23], [24]

Za zkoumané období bylo na území ČR celkem zaznamenáno 5 046 nehod tramvají s auty. Pro ověření potřeby výzkumu úprav čel tramvají pro snížení následků nehod na autech byla statistika nehodovosti vyhodnocena podle vyhodnocovacích kritérií: kolizní směr, viz obrázek Obr. 3-1, a následky nehod na zdraví cestujících. Výsledky jsou uvedeny v tabulce Tab. 3-1.



Obr. 3-1: Vyhodnocovací kritérium: kolizní směry. [26]

Tab. 3-1: Vyhodnocení statistiky nehodovosti tramvají podle následků na zdraví cestujících v autech. [23]

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
Celkem		5 046	299	5,9	12	0,2

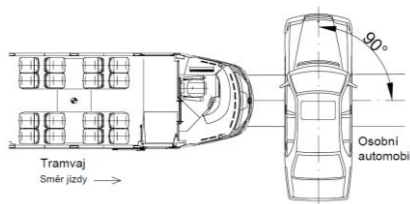
Za zkoumané období došlo k 299 lehkým a 12 těžkým zraněním řidičů aut. K největšímu počtu zranění došlo při čelních a pravých čelněbočních nehodách. Tyto nehody jsou nejčastěji způsobeny řidiči aut, kteří při přejíždění přes tramvajový pás nedají přednost v jízdě souběžně nebo proti jedoucí tramvaji.

Četnost zranění při čelních a čelněbočních nehodách tramvají s auty je vyšší než u nehod dvou aut v Praze, u kterých dochází k nehodám v 8,9 % nehod. Společnost není ochotna akceptovat závažné následky nehod aut, a proto by neměla ani akceptovat závažné následky nehod tramvají s auty. [25]

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.

3.2. 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. 3-2.



Obr. 3-2: Schéma výpočtového scénáře nehody. [27]

3.3. Výzkum na zjednodušených simulačních modelech

Simulační modely byly vytvořeny podle volně dostupných podkladů tak, aby co nejdříveji reprezentovaly navržený scénář nehody. Zjednodušenost simulačních modelů byla v detailnosti simulačního modelu tramvaje, který reprezentoval pouze kabinu předního článku. Simulační modely byly sestaveny ze submodelů: auta, řidiče, tramvaje a deformačního prvku.

Pro výzkum byly zvoleny tři tramvaje provozované na území ČR, které mají rozdílnou konstrukci čel. V celé práci jsou dané tramvaje obecně označeny jako tramvaje typu A, B a C. Tramvaj typu A byla zvolena z důvodu absence deformačního prvku na čele tramvaje, a že nebyla konstruována podle požadavků normy ČSN EN 15227. Tramvaje typu B a C byly zvoleny z důvodu konstrukce podle požadavků normy ČSN EN 15227. Obě mají ale jinak výškově umístěný deformační prvek nad rovinou koleje.

Pro řešení výzkumu byl zaveden předpoklad, že z důvodu vysoké pevnosti hrubých staveb článků tramvajů nedochází při nehodě s auty k jejich plastické deformaci. Podle uvedeného předpokladu byly při výpočtu uvažovány modely hrubých staveb tramvajů jako dokonale tuhá tělesa. Tramvaje byly v modelu reprezentovány kabinami, kterým byla přes hmotný bod přiřazena kolizní hmotnost celé tramvaje, která je definována vztahem (1-1). Tramvaj typu A má kolizní hmotnost 46 400 kg, tramvaj typu B 38 935 kg a tramvaj typu C 36 670 kg.

Tramvaje typu B a C jsou vybaveny deformačními prvky. Jejich modely se skládaly ze dvou absorpčních členů a nárazníku. Každému absorpčnímu členu byla definována zatěžující charakteristika pro absorpci požadované energie. Funkčnost simulačních modelů u obou nárazníků byla ověřena pomocí simulace kalibrační zkoušky, při které byl absorpční člen stlačován po celý zdvih.

Sestavy všech zjednodušených simulačních modelů jsou znázorněny na obrázku Obr. 3-3.



Obr. 3-3: Simulační modely tramvají typu A, B a C (zleva do prava).

Na dříve popsaných simulačních modelech byly provedeny výpočty nárazu jednotlivých tramvají do boků auta při počáteční rychlosti tramvají 10 až 50 km/h. Z výsledků simulací bylo vyhodnoceno biomechanické kritérium člověka 3ms. Výsledky jsou uvedeny v tabulce Tab. 3-2.

Tab. 3-2: Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé tramvaje a rychlosti. [23]

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	121,4/7,3	99,2/4,5
30	97,7/5,1	142,1/8,2	127,2/6,7
40	115,4/8,2	174,7/8,5	173,4/8,1
50	155,4/12,9	213,3/9,1	210,9/8,2

Z výsledků uvedených v tabulce Tab. 3-2 vyplývá, že limitní hodnoty biomechanického kritéria 3 ms byly při nehodách s tramvajemi typu B a C překročeny při rychlosti 25 km/h a u tramvaje typu A až při rychlosti 30 km/h. Tramvaj typu A je příznivější pro řidiče než tramvaje typu B a C z důvodu nižší výškové pozici kontaktního bodu mezi tramvají a autem. U tramvají B a C byl kontaktní bod ve výšce hrudi cestujících, což mělo za následek velkou deformaci boku auta, kontakt hlavy řidiče s bokem auta a vyšší riziko zranění.

Z uvedených závěrů 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 při dopravních nehodách, je nutné se výzkumem vlivu parametrů deformačních prvků na následky nehod dále zabývat.

3.4. Tvorba komplexního simulačního modelu

Zjednodušené simulační modely ne zcela věrohodně reprezentovaly chování tramvaje při nehodě. Proto bylo nutné pro další výzkum vytvořit komplexní model, který by svými parametry co nejpřesněji reprezentoval reálnou tramvaj. Ze závěrů předešlé kapitoly byla pro další výzkum zvolena tramvaj typu B. Model byl vytvořen podle typového výkresu výrobce, volně dostupných podkladů k tramvaji a zkušeností pracovníků Ú12120 na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

Komplexní simulační model tramvaje byl sestaven ze submodelů: předního a zadního článku, elektrické výzbroje na předním a zadním článku, tří podvozků a cestujících. Jednotlivé submodely byly mezi sebou propojeny silovými prvky, které reprezentují prvky vypružení a vazby reálné tramvaje. Typy silových prvků byly voleny tak, aby co nejděleji reprezentovaly chování reálné tramvaje. Simulační model tramvaje je znázorněn na obrázku Obr. 3-4.



Obr. 3-4: Simulační model tramvaje typu B. [28]

3.5. Analýza vlivu parametrů deformačních prvků na následky nehod

Z provedené rešerše problematiky nehodovosti vozidel 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. Při výzkumu byl vyhodnocován vliv těchto parametrů deformačních prvků: charakteristika, výšková pozice a rozměr.

Při výzkumu byla uvažována tuhost změkčené charakteristiky deformačních prvků v rozpětí od 12,5 do 112,5 kN/mm. Původní navržená charakteristika deformačních prvků měla tuhost 125 kN/mm. Z provedených simulací vyplynulo, že při vysoké počáteční tuhosti charakteristiky, od 87,5 do 125 kN/mm, byla tuhost absorbérů výrazně větší než tuhost boku osobního auta. To mělo za následek minimální zdvih absorbérů a výraznou deformaci karoserie auta. Obdobná situace nastala při malé počáteční tuhosti, od 12,5 do 25 kN/mm. Nyní byla výrazně měkčí tuhost absorbérů energie než tuhost boku auta, a tedy po vyčerpání zdvihu deformačních prvků došlo ke ztužení charakteristiky na tuhost 125 kN/mm (původní tuhost vratného zdvihu navržené charakteristiky).

Nejvhodnější tuhost deformačních prvků, pro snížení následků nehod tramvají s auty, byla stanovena tuhost 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 (snížení hodnoty biomechanického kritéria 3 ms o 25 %).

Při výzkumu byla uvažována výšková pozice deformačních prvků v rozpětí od 400 do 900 mm nad temenem koleje. U původní konstrukce tramvaje byly osy deformačních prvků umístěny ve výšce 775 mm nad temenem koleje. Z provedených simulací jednoznačně vyplynulo, že výšková pozice os deformačních prvků má zásadní vliv na následky nehod tramvají s auty. Čím níže byly deformační prvky umístěny, tím nižší hrozilo riziko vzniku zranění hlavy řidiče auta. Při umístění os deformačních prvků do výšky 400 mm nad temenem koleje došlo ke snížení hodnoty kritéria 3 ms o 59 % vůči nominální pozici. Důvodem pozitivních výsledků byla menší deformace boku auta, která byla dána kontaktem nárazníku tramvaje s tuhými podélnými prahy karosérie auta, které jsou dimenzovány na náraz jiného vozidla.

Vliv rozměrů deformačních prvků byl uvažován z důvodu stanovení vlivu zvětšení kontaktní plochy mezi vozidly. Při výzkumu byla uvažována výška čelní plochy nárazníku v rozpětí od 100 do 300 mm a šířka čelní plochy nárazníku v rozpětí od 0 do 1 000 mm. Z provedených simulací vyplynulo, že výška nárazníku má minimální vliv na následky nehod, zatímco šířka čelní plochy nárazníku má vliv na následky nehod. Při šířce čelní plochy od 800 mm došlo ke kontaktu nárazníku tramvaje s A a B sloupkem auta, tedy s touhou strukturou auta, což mělo za následek menší deformaci boku auta.

Provedené simulace prokázaly, že optimalizací některých parametrů deformačních prvků lze výrazně ovlivnit následky nehod tramvají s auty a tím snížit riziko vzniku zranění cestujících v autech. Pro možnost posouzení ovlivnění jednotlivých parametrů mezi sebou byly v rámci dalšího výzkumu definovány tři různé kombinace analyzovaných parametrů, viz tabulka Tab. 3-3.

Tab. 3-3: Uvažované kombinace parametrů deformačních prvků

Parametr	Charakteristika deformačních prvků [kN/mm]	Svislá pozice nárazníku nad TK [mm]	Výška nárazníku [mm]	Šířka nárazníku [mm]
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. 3-4.

Tab. 3-4: Vyhodnocení biomechanického kritéria 3ms pro jednotlivé kombinace a rychlosti.

Rychlost tramvaje [km/h]	Kombinace 0	Kombinace 1	Kombinace 2	Kombinace 3
25	108,6/6,1	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	-	95,1/4,1	94,8/3,9	91,1/3,8

Z provedených simulací vyplývá, že všechny tři uvažované kombinace dosahují prakticky totožných 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 o 15 km/h.

Umístění deformačních prvků tramvají do výšky 400 mm nad temenem koleje, 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.

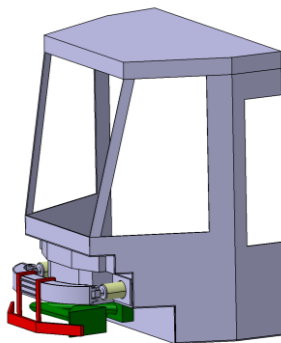
Z uvedených závěrů výzkumu na snížení následků nehod na osobní automobily popsaného v této disertační práci lze konstatovat: ***pro snížení následků nehod tramvají s auty je vhodné umístit kontaktní místo mezi tramvají a autem do výšky kolem 400 mm nad temenem koleje.***

3.6. Cíle pro další výzkum

V rámci dalšího výzkumu návrhu čela tramvaje pro snížení následků nehod tramvaj s osobními automobily bude řešeno možné konstrukční řešení navržených úprav čel tramvaj. 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. 3-5 znázorněno zelenou barvou. Toto vyšetření nebylo v rámci disertační práce řešeno.

Pro následky nehody tramvaj s auty je zásadní pozice kontaktního bodu mezi vozidly, tedy nemusí se jednat přímo o současně používané deformační prvky definované v normě ČSN EN 15227. Jako vhodné řešení se jeví umístění menšího přídavného nárazníku do dříve definované pozice, v obrázku Obr. 3-5 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.

Prostorové vyšetření čela tramvaje a návrh možného konstrukčního řešení bude řešeno v rámci dalších výzkumných prací doktoranda na fakultě strojní ČVUT v Praze.



Obr. 3-5: Návrh konstrukčního řešení.

4. ZÁVĚR

Ze společenského hlediska rostou požadavky na bezpečnost dopravních vozidel při nehodě. 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 nehod tramvají s auty a tím k úspoře času a nákladů DP na odklizení nehod a zajišťování náhradní dopravy.

Z provedeného výzkumu vyplynulo, že konstrukce čel tramvají má zásadní vliv na následky nehod tramvají s auty. Vhodným navržením parametrů deformačních prvků tramvají, jako je jejich poloha, tuhost a tvar, lze výrazně snížit závažnost následků nehod tramvají s osobními auty, aniž by došlo ke zvýšení nebezpečí pro cestující a posádky v tramvajích.

Výzkum uvedený v disertační práci je ryze teoretické povahy a měl by být ověřen s více simulačními modely aut a následně na skutečných vozidlech. 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.

Veškeré vytyčené cíle disertační práce uvedené v kapitole 2 byly splněny a jsou detailně popsány v kapitole 3.

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.

5. CITOVANÁ LITERATURA

- [1] Zákon č. 266/1994 Sb. *Zákon o drahách*. Parlament České republiky, Praha, Česká republika, 1994.
- [2] Drážní inspekce. Dostupné online: dicr.cz (přístup 17. února 2023).
- [3] DPMB. *Nehodovost s účastí vozů DPMB loni klesla*. Dostupné online: dpmb.cz (přístup 26. ledna 2022).
- [4] DPP. *Výroční zpráva 2021*. Dostupné online: dpp.cz (přístup 18. ledna 2023).
- [5] Jan Petrás. *Nejčastější případy nehod tramvají s ostatními účastníky silničního provozu*. Sborník XXVII. konference ExFoS, ISBN 978-80-214-5600-6, Ústav soudního inženýrství VUT, Brno, Česká republika, 2018.
- [6] Raphael H. Grzebieta; George Rechnitzer. *Tram interface crashworthiness*. Konference Proceedings of the International Crashworthiness Conference, ICrash 2000, Bolton, Velká Británie, 2000.
- [7] Roman Mikulec; Marek Semela. *Case study of vehicle side crashes with trams*. International conference on road and rail infrastructure, CETRA 2018, Zadar, Chorvatsko, 2018.
- [8] Jan Kovanda a kolektiv autorů. *Bezpečnostní aspekty návrhu dopravních prostředků*. ISBN 978-80-01-05893-0, ČVUT, Praha, Česká republika, 2016.
- [9] Jan Kovanda; Riccardo Riva. *Vehicle – human interaction*. ISBN 978-88-76-60104-0, Spiegel, Milano, Itálie, 1998.
- [10] Český normalizační institut. *ČSN EN 15227, Železniční aplikace – Požadavky na kolizní odolnost kolejových vozidel*. Česká technická norma, Praha, Česká republika, 2021.
- [11] Jiří Vašíček. *Kompatibilita vozidel při čelním střetu*. Diplomová práce, Ústav soudního inženýrství VUT, Brno, Česká republika, 2013.
- [12] Leonard Evans. *Traffic Safety*. ISBN 978-09-75-48710-5, Science serving society, Spojené státy americké, 2004.
- [13] Evropská komise. *EHK/OSN č.94: Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska ochrany cestujících při čelním nárazu*. Předpis, 2016.
- [14] Evropská komise. *EHK/OSN č.95: Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska ochrany cestujících při bočním nárazu*. Předpis, 2014.
- [15] Hynek Purš. *Mechanismy poranění v oblastech extrémního zatížení*. Disertační práce, Fakulta tělesné výchovy a sportu UK, Praha, Česká republika, 2012.

- [16] Michal Vašíček. *Pasivní bezpečnost motorových vozidel*. Podklady k přednáškám, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2017.
- [17] Euro NCAP. *Assessment protocol - AOP v9.1.3*. Dostupné online: cdn.euroncap.com (přístup 15. srpna 2022).
- [18] Stanislav Špirk. *Metodické problémy výzkumu pasivní bezpečnosti a deformační odolnosti konstrukcí kolejových vozidel*. Disertační práce, Fakulta strojní ZČU, Plzeň, Česká republika, 2015.
- [19] Humanetics. *Humanetics created the first crash test dummy over 70 year ago*. Dostupné online: humanetics.humaneticsgroup.com (přístup 18. září 2020).
- [20] Fadi J. Tahan; Umashankar Mahadeviaiah; Dhafer Marzouhui; Cing-Dao Kan. *LSTC WorldSID 50th Male Finite Element Model*. Výzkumná práce, LSTC, Livermore, Spojené státy americké, 2018.
- [21] CCSA. *Center for collision safety and analysis*. Dostupné online: ccsa.gmu.edu (přístup 25. května 2020).
- [22] Autosalon.tv. *Pohled do statistik nejprodávanějších aut ukazuje, že český trh je v Evropě ten nejpodivnější*. Dostupné online: autosalon.tv (přístup 25. května 2020).
- [23] 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*.
- [24] 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.
- [25] Praha.eu. *Nehodovost v Praze*. Dostupné online: praha.eu (přístup 15. dubna 2021).
- [26] 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.
- [27] Jakub Seidl. *Výzkum zvýšení partnerské ochrany tramvajových vozidel při nehodě s osobními automobily*. Sborník XXV. konference s mezinárodní účastí: Súčasný problémy v kolejových vozidlech, s. 295-302, ISBN 978-80-7560-377-7, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Česká Třebová, Česká republika, 2021.

- [28] Jakub Seidl. *Výzkum snížení následků nehod tramvají s auty*. Sborník XXVI. Mezinárodní konference: SúčasnÉ problémy v kol'ajových vozidlech, s. 235-242, ISBN 978-80-89276-61-5, VTS při ŽU, Žilina, Slovenská republika, 2023.
- [29] Nbcphiladelphia. *Deadly SEPTA Trolley crash*. Dostupné online: nbcphiladelphia.com (přístup 29. září 2021).
- [30] 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 Washington, Washington DC, Spojené státy americké, 2012.

6. PUBLIKACE AUTORA SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRACÍ

- [I.] 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.
- [II.] 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.
- [III.] 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.
- [IV.] 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*.
- [V.] Jakub Seidl. *Deformační prvky kabiny nízkopodlažní tramvaje*. Diplomová práce, Fakulta strojní ČVUT, Praha, Česká republika, 2018.
- [VI.] Vojtěch Zelený; Jakub Seidl. *Vliv statistiky nehodovosti na konstrukční prvky čel tramvajových a železničních vozidel*. XXIV. Sborník mezinárodní konference: SúčasnÉ problémy v kol'ajových vozidlech, s. 339-348, ISBN 978-80-89276-59-2, VTS při ŽU, Žilina, Slovenská republika, 2019.
- [VII.] 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.

- [VIII.] 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.
- [IX.] 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.
- [X.] 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.
- [XI.] 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.
- [XII.] 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.
- [XIII.] Jakub Seidl. *Výzkum snížení následků nehod tramvají s auty*. Sborník XXVI. Mezinárodná konferencia: Súčasný problémy v kol'ajových vozidlech, s. 235-242, ISBN 978-80-89276-61-5, VTS při ŽU, Žilina, Slovenská republika, 2023.
- [XIV.] 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.

7. OSTATNÍ PUBLIKACE AUTORA

- [XV.] 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.
- [XVI.] 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.
- [XVII.] 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.
- [XVIII.] 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.
- [XIX.] 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.
- [XX.] 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.
- [XXI.] 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.