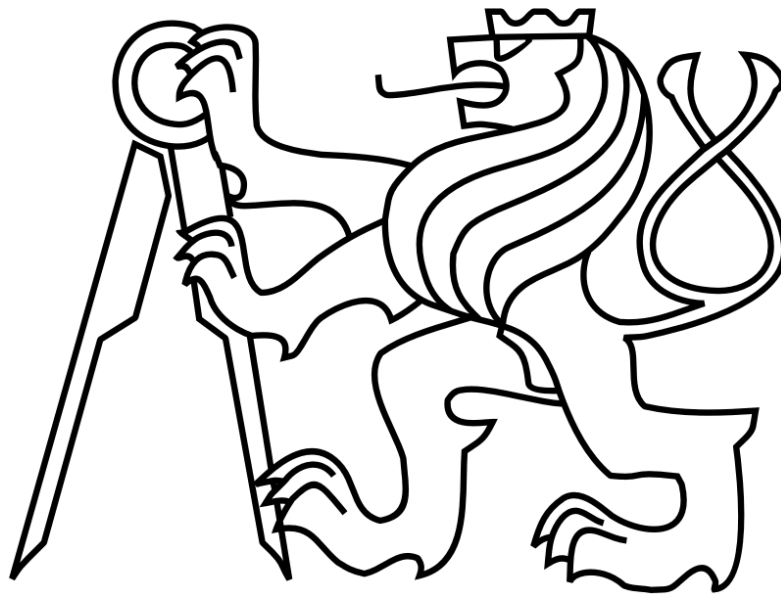


**České vysoké učení technické v Praze**  
**Fakulta strojní**

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

**U 12 120**



**Diplomová práce**

**Návrh modulární stavby čela nízkopodlažní tramvaje**

**Autor:** Bc. Vojtěch Zelený

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Josef Kolář, CSc.

**2018**

---



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zelený** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **382392**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh modulární stavby čela nízkopodlažní tramvaje**

Název diplomové práce anglicky:

**Design of a modular construction of the front face of a low-floor tram**

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte:

- 1) Rešerši na téma: Řešení konstrukce čelních článků nízkopodlažních tramvají a používané vhodné absorpční materiály.
- 2) Přehled legislativních a technických požadavků kladených na čelní plochy skříní nízkopodlažních tramvají.
- 3) Typový výkres nízkopodlažní tramvaje v měřítku 1:50 a rozbor hmotnostní bilance tramvaje, stanovte požadavky na pevnost a crashovou odolnost čel.
- 4) Simulaci jízdy tramvaje v městském provozu. Stanovte velikost deformační energie pro scénář srážky tramvaje s chodcem.
- 5) Analýzu možností koncepčního čela tramvaje s ohledem na zástavbové rozměrové možnosti jednotlivých bloků = panelů obložení čela.
- 6) Průvodní technickou zprávu a sestavný výkres čela krajního článku nízkopodlažní tramvaje s řešením upevnění absorpčních panelů.

Seznam doporučené literatury:

Odborné časopisy, firemní literatura, patentová literatura, normy.  
Skripta ČVUT: KOLÁŘ, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel  
ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II, ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II - pojezd

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


**doc. Ing. Josef Kolář, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
doc. Ing. Josef Kolář, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

24.4.2018

Datum převzetí zadání




Podpis studenta

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou 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 11. 7. 2018 .....

  
.....

podpis

## Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomohli při tvorbě mé diplomové práce. Především bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Kolářovi, CSc. za všechny připomínky, odborné vedení, a především za trpělivost, kterou se mnou měl při tvorbě mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Stanislavu Špírkovi Ph.D. za matematické simulace. Ing. Michalovi Vašíčkovi Ph.D. za úvod do problematiky.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která byla pro mne oporou během náročných chvil při tvorbě mé práce a podporovala mě po celou dobu studia.

**Anotační list**

<b>Jméno autora:</b>	<b>Bc. Vojtěch Zelený</b>
<b>Název DP:</b>	Návrh modulární stavby čela nízkopodlažní tramvaje
<b>Anglická název:</b>	Design of a modular construction of the front face of a low-floor tram
<b>Rok:</b>	2018
<b>Studijní program:</b>	Strojní inženýrství
<b>Studijní obor:</b>	Dopravní, letadlová a transportní technika
<b>Ústav:</b>	Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
<b>Vedoucí DP:</b>	doc. Ing. Josef Kolář, CSc.
<b>Bibliografické údaje:</b>	počet stran – 103 počet obrázků – 71 počet tabulek – 36 počet příloh – 8
<b>Klíčová slova:</b>	Nízkopodlažní tramvaj, srážka s chodcem, ochrana chodce, vnější obložení, požadavky na čelní článek
<b>Keywords:</b>	Low-floor tram, collision with pedestrian, pedestrian safety, exterior paneling,
<b>Anotace:</b>	Obsahem diplomové práce je zohlednění požadavků pasivní bezpečnosti při srážce tramvaje s chodcem.
<b>Abstract:</b>	The content of the diploma thesis is to take into account the requirements of passive safety in the tram accident with the pedestrian.

---

**Obsah**

1	ÚVOD.....	- 9 -
2	BEZPEČNOST.....	- 10 -
2.1	Prvky bezpečnosti .....	- 11 -
2.2	Výchozí studie pro sestavení požadavků.....	- 12 -
2.3	Problematika srážky s chodcem .....	- 13 -
2.4	Shrnutí poznatků kapitoly bezpečnost .....	- 16 -
3	PŘEHLED LEGISLATIVNÍCH POŽADAVKŮ.....	- 17 -
3.1	Železniční předpisy:.....	- 17 -
3.2	Automobilové předpisy: .....	- 23 -
3.3	Výzkumné práce.....	- 23 -
3.4	Další studie .....	- 23 -
4	PŘEHLED BIOMECHANICKÝCH POŽADAVKŮ.....	- 24 -
4.1	Hlavní kritéria biomechaniky.....	- 25 -
4.2	Zkušební modely .....	- 31 -
4.3	Současné podmínky zkoušek a testování.....	- 36 -
4.4	Souhrn parametrů a limitních hodnot.....	- 37 -
5	POŽADAVKY NA ČELNÍ ČLÁNEK .....	- 38 -
5.1	Zohlednění účastníku provozu.....	- 38 -
5.2	Obecné požadavky na tvar čela.....	- 39 -
5.3	Tvary variant čelního článku vozidla .....	- 51 -
6	POŽADAVKY NA PANE LY OBLOŽENÍ.....	- 59 -
6.1	Zohlednění účastníků dopravního provozu .....	- 59 -
6.2	Rozdělení obložení čelního článku na funkční části.....	- 60 -
6.3	Zohlednění technických požadavků na panely obložení .....	- 61 -
6.4	Mechanické vlastnosti panelů obložení.....	- 62 -
6.5	Upevnění panelů obložení .....	- 66 -
6.6	Velikost deformačních energií na čele článku.....	- 68 -
6.7	Návrh pracovního prostoru .....	- 72 -
6.8	Stanovení limitního napětí .....	- 74 -
7	POSOUZENÍ ZÁSTAVBOVÝCH PROSTORŮ.....	- 75 -
7.1	Čelo varianta 1 .....	- 75 -
7.2	Čelo varianta 2 .....	- 77 -

---

7.3	Čelo varianta 3 .....	- 79 -
7.4	Zhodnocení preferovaných řešení .....	- 80 -
8	SOUČASNÉ ŘEŠENÍ KONSTRUKCE ČELNÍCH ČLÁNKŮ NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ.....	- 81 -
8.1	KT4UA VinWay, Vinnycje, Ukrajina .....	- 81 -
8.2	CAF Urbos 3, Lucembursko, Lucembursko .....	- 82 -
8.3	Alstom Citadis 302, Angres, France .....	- 83 -
8.4	Bombardier Flexity 2, Antverpy, Belgie .....	- 84 -
8.5	Stadler Metelitsa, St Petersburg, Rusko .....	- 85 -
8.6	Škoda 30T, Bratislava, Slovensko .....	- 86 -
9	NÁVRH PODMÍNEK PRO TESTOVÁNÍ .....	- 87 -
9.1	Čelní srážka .....	- 87 -
9.2	Čelně – boční srážky .....	- 87 -
9.3	Testovací rychlost .....	- 88 -
10	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	- 89 -
11	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	- 90 -
12	SEZNAM TABULEK.....	- 93 -
13	SEZNAM GRAFŮ.....	- 95 -
14	BIBLIOGRAFIE .....	- 96 -
15	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 97 -

**Seznam použitých veličin**

Značka veličiny	Název veličiny	Jednotka veličiny
m_adult	hmotnost tělesa reprezentující hlavu dospělého člověka (85 % obyvatelstva)	[kg]
A	příslušný sklon panelu v rovině půdorysu	[°]
A_knee	maximální ohybový úhel kolene (proti přirozenému směru)	[°]
a_tibia	maximální zrychlení holení kosti	[g]
B	příslušné sklopení panelu v rovině bokorysu	[g]
F_femur	maximální suma sil působících na stehenní kost	[kN]
F_shear	maximální stříhová síla působící na vazy v koleni	[kN]
Flim imp	limitní síla působící na příslušný impaktor	[N]
HPC	maximální hodnota kritéria	[-]
m_femur	hmotnost části tělesa reprezentující stehenní kost	[kg]
M_femur	maximální ohybový moment působící na stehenní kost	[Nm]
m_child	hmotnost tělesa reprezentující hlavu dítěte (6 let)	[kg]
m_low_leg	hmotnost tělesa reprezentující stehenní a holenní kost	[kg]
M_shear	tuhost v ohybu vazů kolenního kloubu	[kN]
m_tibia	hmotnost části tělesa reprezentující holenní kost	[kg]
m_up_leg	hmotnost tělesa reprezentující horní část nohy	[kg]
s_displacement	maximální stříhový posuv vazů v koleni	[mm]
S <sub>prac pros</sub>	velikost potřebné dráhy	[mm]
V <sub>dop</sub>	dopadová složka kolizní rychlosti na panel obložení	[m/s]
V <sub>kol</sub>	kolizní rychlost	[m/s]
s <sub>LOW_LEG</sub>	plocha low_leg impaktoru	[mm <sup>2</sup> ]
s <sub>UP_LEG</sub>	plocha up_leg impaktoru	[mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{LOW\_LEG}$	maximální napětí na low_leg impaktoru	[MPa]
$\sigma_{UP\_LEG}$	maximální napětí na up_leg impaktoru	[MPa]



## 1 ÚVOD

Má diplomová práce vychází ze zadání společností Škoda Transportation a.s. Pasivní bezpečnost chodců je současné téma, jehož legislativním a praktickým řešením se výrobci začínají zabývat. Tato diplomová práce je zaměřena na koncepční návrh řešení čela tramvaje s měkčeným obložením. Návrh koncepce by měl přispět k lepší ochraně chodce při případné srážce s tramvají. V průběhu tvorby této diplomové práce došlo k pěti smrtelným dopravním nehodám tramvaje s chodcem, to dokládá, že je potřeba se touto otázkou zabývat. Na *obr. 1-1* je zobrazeno čelo vozu Škoda 15T po srážce se dvěma chodci, která se stala v 15. 5. 2018 v Praze mezi zastávkami I. P. Pavlova – Štěpánská.



*Obr. 1-1 Smrtelná dopravní nehoda tramvaje se dvěma chodci, ZDROJ: Vozovna DPP*

Referenční vozidlo bylo poskytnuto společností Škoda Transportation a.s., jedná se o tříčlankové nízkopodlažní tramvajové vozidlo se třemi podvozky, typový výkres vozidla je zobrazen v *příloha 1*

## 2 BEZPEČNOST

Bezpečnost v dopravě, jak osobní, tak hromadné je ovlivněna celou řadou faktorů, kde mezi ten nejméně předvídatelný faktor patří chování člověka. Pro tramvajová vozidla (dále jen tramvaj) je jeho cesta jasně definovaná, jelikož kolej vozidlo nese a vede. V případě, kdy jsou dodržena pravidla jízdy, jako je například dodržení rychlosti v přímé trati i oblouku, zastavení na semaforu a v zastávce, řidič vozidla nemůže ohrozit ostatní účastníky provozu. V případě vozidel a chodců je to ale problém, jelikož jsou dopravní cestou pouze nesení a mohou měnit směr dle libosti, zde se právě setkáváme s lidským faktorem.

Nejčastěji se můžeme setkat s rozdělením na tři části nehodového děje – před nehodou, při a po nehodě. Sestavení těchto skupin se nazývá podle svého autora Haddonova matice. Ta dává do souvislosti faktory, které ovlivňují daného účastníka ve fázi nehody. [1]

Tab 2-1 Haddonova matice [1]

Fáze Faktory	Před nehodová fáze	Nehodová fáze	Po nehodová fáze
Řidič	kondice, zkušenosti, informovanost	odolnost těla, zádržné systémy	dostupnost první pomoci, zdravotní status oběti
Vozidlo	technický stav, způsobilost k jízdě, funkce systémů	kolizní odolnost	únikové východy, riziko vzniku požáru
Prostředí	úprava a vedení komunikace, značení	bezpečnost objektů v okolí komunikace, přítomnost nezabezpečeného objektu ve vozidle	únikové cesty, zajištění místa nehody, rychlá a dostupná péče záchranného systému

**Před nehodová fáze** – do této skupiny patří všechny souvislosti určující pravděpodobnost výskytu nehody z pohledu účastníků provozu a okolí. Jako příklad pro největší pravděpodobnost nehody, je možné uvést řidiče, který nedodržel předepsané přestávky na odpočinek, jedoucím z kopce ve vozidle se zastaralými brzdami. V případě křížení silniční komunikace a příjezdu dalšího vozidla na stejnou cestu má řidič zkrácenou reakční dobu vzhledem k únavě a vozidlo prodlouženou zábrzdňou dráhu vzhledem ke stavu brzdového systému.

**Nehodová fáze** – sem patří pravděpodobnost výskytu zranění ať už chodce nebo pasažéra ve vozidle. Například starší osoba má větší pravděpodobnost zranění než mladší osoba vzhledem k pevnosti lidského těla. Moderní vůz se zlepšenou bezpečností pasažérů, jako jsou bezpečnostní pásy, airbagy a tuhost konstrukce vozu, má větší šanci na ochranu posádky a chodce než vozidlo staré konstrukce.

**Po nehodová fáze** – tato skupina určuje rozsah následků nehody, tedy například přítomnost únikových výstupů u větších vozidel jako jsou tramvaje a autobusy, ale i ta místa, kde se nehoda stala. V případě tunelu může být problém se zajištěním přístupu záchranným sborům, pokud nehoda způsobí zaplnění vozovky vozidly bez možnosti průjezdu.

## 2.1 Prvky bezpečnosti

Prvky bezpečnosti se dají rozdělit na dvě skupiny podle toho jakým, způsobem ke kolizi přistupují na:

### 2.1.1 Aktivní prvky bezpečnosti

Jedná se o prvky, které mají za úkol předejít nebo zabránit nehodě. Tedy prvky pracující v před nehodové fázi. Toho lze dosáhnout vhodnou dopravní infrastrukturou. Jako je oddělení nástupišť od dopravního prostředku, dokud není vozidlo úplně zastavené nebo oddělení tramvajové tratě od ostatních komunikací. [2]

Dalšími prvky jsou pak technické systémy umístěné přímo na vozidle, které mohou predikovat příznaky možné nehody a vydat řídicí signál k jejímu předejití. Mezi tyto prvky se dá zařadit například kamera rozpoznávající objekt, a to jak chodce, tak i jiná vozidla jako je tramvaj nebo osobní či nákladní vozidlo a snímací zařízení, které měří vzdálenost objektu od vozidla. Z těchto parametrů pak vyhodnotí situaci a vyšle signál řidiči. Tento signál může být upozorňující, kdy je objekt v dostatečné vzdálenosti a řidič rozhodne, jak bude situaci řešit, zda je jízda vozidla neohrožena a může pokračovat nebo musí zpomalit či zastavit. V případě, že by se jednalo o kratší vzdálenost, než by byla doporučená doba pro reakci řidiče, systém by vyslal přímo příkaz do řídicí jednotky a vozidlo by zpomalilo či zastavilo samo.

Jako aktivní prvek se dá považovat i legislativní předpis specifikující přednost dopravních prostředků hromadné dopravy oproti ostatním vozidlům nařizující zvýšené obezřetnosti pro řidiče i chodce.

### 2.1.2 Pasivní prvky bezpečnosti

Úkolem těchto prvků je minimalizování následků dopravní nehody s ohledem na její účastníky jak uvnitř vozidla, tak vně v případě, že není možné nehodu odvrátit. Jsou to prvky pracující v nehodové fázi. Patří sem tedy technická opatření na vozidlech, která mají za úkol zmírnit následky nehody za stanovených podmínek, aby prvky na vozidle pohltily celou nebo část deformační energie vzniklé při kolizi. [2]

Těchto požadavků je možné dosáhnout vhodným tvarem čelního článku a volbou materiálu obložení s kombinací jejich upevnění tak, aby se chodec při srážce nedostal k tuhým součástem hrubé stavby vozidla. Mezi tuhé části vozidla patří například sloupky a plechy hrubé stavby a jiná zařízení spojená s funkcí vozidla jako je spřáhlo, světlomety, mechanismus stěrače.

## **2.2 Výchozí studie pro sestavení požadavků**

Pro sestavení požadavků na vlastnosti těchto prvků v případě ochrany chodce je potřeba vyjít ze studií:

### 2.2.1 Statistiky:

Soupis, k jakým dopravním nehodám dochází z hlediska směrů srážek tramvaje s chodcem a z toho vyplývající kritická místa na vozidle. Dále na jakých místech dopravních cest se stávají a jejich četnost a pak také korespondenci mezi poškozením tramvajového vozidla a vzniklým poraněním chodce.

Zdrojem informací mohou být databáze dopravních podniků, záchranné služby, policie, nemocnic a nezávislých institucí jako je Evropský výbor pro zvýšení bezpečnosti vozidel – EEVC, Euro NCAP. Ty shromažďují data nehod a provádějí výzkumy a testování (rekonstrukci) nehod a vydávají doporučení na změny pro výrobce a úpravu legislativy.

### 2.2.2 Biomechaniky:

Vědní obor, který mimo jiné studuje mechanismy poranění, tedy jak přesně dochází ke vzniku poranění a jaké pohyby osoby před a při nehodě konají. Z toho pak vycházejí kritéria poranění a jejich limitní hodnoty, tedy přechod na fyzikálně definovatelné parametry způsobující poranění jako je maximální síla a zrychlení působící na končetiny

### 2.2.3 Klasické mechaniky:

Ty mají za úkol realizovat konkrétní technická řešení na základě výzkumu a vydaných doporučení. Provádějí simulaci a vyhodnocení výsledků z matematických modelů, zkoušek provedených na reálných vozidlech a ověření shodnosti s výsledky z matematického modelu. Díky tomu je pak možné snížit počet reálných zkoušek, které jsou nákladné a využívat matematické simulace s výsledky odpovídající skutečnosti.

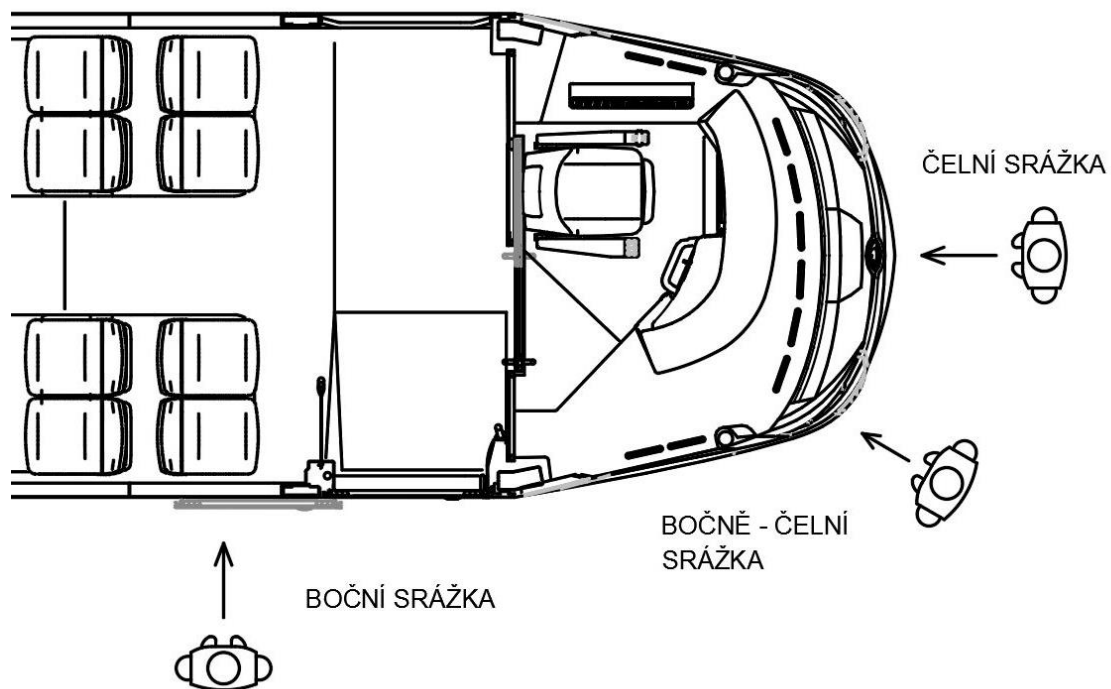
### 2.3 Problematika srážky s chodcem

Hodnotit srážku chodce s tramvajovým vozidlem je problematické. Srážka jako taková je stochastický jev a pokaždé má jiný průběh, jelikož jakékoliv natočení, poloha končetin a vstup do vozovky chodce má za následek jiný průběh kolize.

Dalším faktorem, který ovlivní následky srážky, je tvar čela vozu. Ten hraje velkou roli v průběhu srážky. Tvar čela určuje, kam bude směřovat tělo chodce při kontaktu s čelem a zda dojde k dostatečnému odhození do strany, aby nedošlo ke sražení chodce pod tramvaj.

Pro optimalizaci čela vozu je nutné vyjít ze statistik pro zjištění nejčastějších směrů nárazu, aby se dalo určit, která část čela vozidla přichází do kontaktu s chodcem v případě kolize nejčastěji. Dále pak vzniklá zranění, aby bylo možné posoudit síly působící na chodce při srážce a určení jejich limitních hodnot. Tedy určení rychlosti, kterou tramvajové vozidlo v případě srážky dosahuje a jakého zpomalení je schopno dosáhnout. Z toho je pak možné určit energie, kterých je při srážce dosaženo.

Znázornění směrů srážek tramvaje s chodcem, které jsou sepsány v následujícím odstavci, jsou zobrazeny na obr. 2-1.



Obr. 2-1 Zobrazení směru srážky chodce s tramvajovým vozidlem

Statistiky dopravních nehod byly poskytnuty Dopravním podnikem hl. m. Prahy za období roku 2014 – 2017 [3], [4], [5], [6]. Soupis statistik je v *příloha 2, příloha 3, příloha 4, příloha 5*.

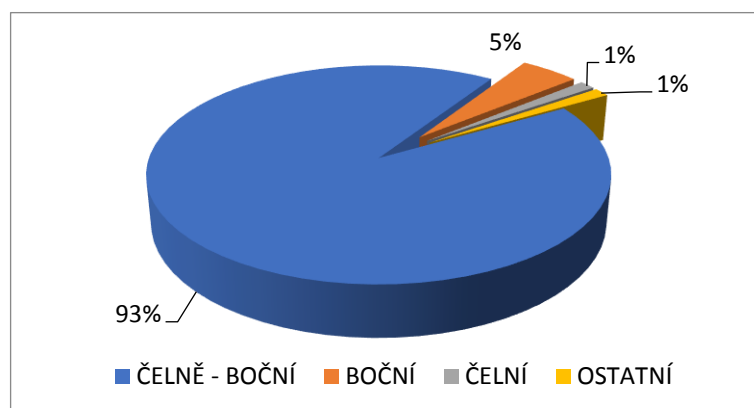
### 2.3.1 Statistika směru srážky

Směry srážek vozidla s chodcem znázorněné na *obr. 2-1* jsou sepsané v *tab. 2-1*. Zde je možné vidět, že k největšímu počtu srážek, v zastoupení 93 %, zobrazené na *graf. 2-1* z celkového počtu 311 srážek, došlo ve směru značeném jako "ČELNĚ – BOČNÍ" viz znázornění na obrázku *obr. 2-1*.

Tento směr odpovídá situaci, kdy chodec náhle vkročí do vozovky, např. když se snaží doběhnout spoj v opačném směru a nevšimne si jedoucího vozidla nebo se dostatečně nerozhledne při přecházení vozovky a v posledním okamžiku se snaží vrátit, takže nedojde až na střed vozidla.

*Tab. 2-1 Směr kolize chodce s tramvají*

BOČNĚ – ČELNÍ	BOČNÍ	ČELNÍ	OSTATNÍ	CELKEM
288	15	4	4	311



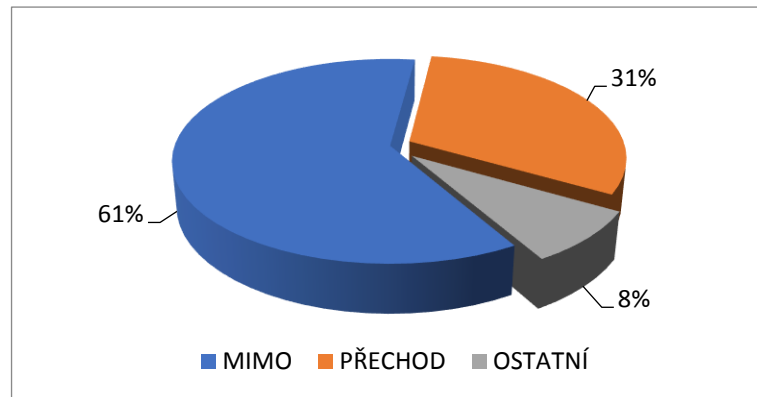
*Graf. 2-1 Směr kolize chodce s tramvajovým vozidlem*

### 2.3.2 Statistika místa srážky

Statistiky sepsané v *tab. 2-2* byly vyneseny do *graf. 2-2*, z nich je patrné, že v 61 % případů se jedná o srážku „MIMO PŘECHOD“, tedy kdy chodec k přechodu vozovky nevyužívá přechod pro chodce nebo místa k tomu určená. Je tedy možné říci, že zde zasahuje i lidský faktor chodců, kdy se rozhodnou přejít mimo místa k tomu určená. Tyto situace jsou obzvláště nebezpečné v případě, kdy chodec vyjde zpoza stojícího nebo jedoucího vozidla, jehož obrys chodce zcela zakrývá. V tomto případě má řidič ještě více zkrácenou dobu reakce, než když by chodec začal vozovku přecházet na otevřeném prostoru přechodu.

*Tab. 2-2 Statistika místa kolize chodce s tramvají*

MIMO PŘECHOD	NA PŘECHODU	OSTATNÍ	CELKEM
188	97	26	311



Graf. 2-2 Místa kolize chodce s tramvajovým vozem

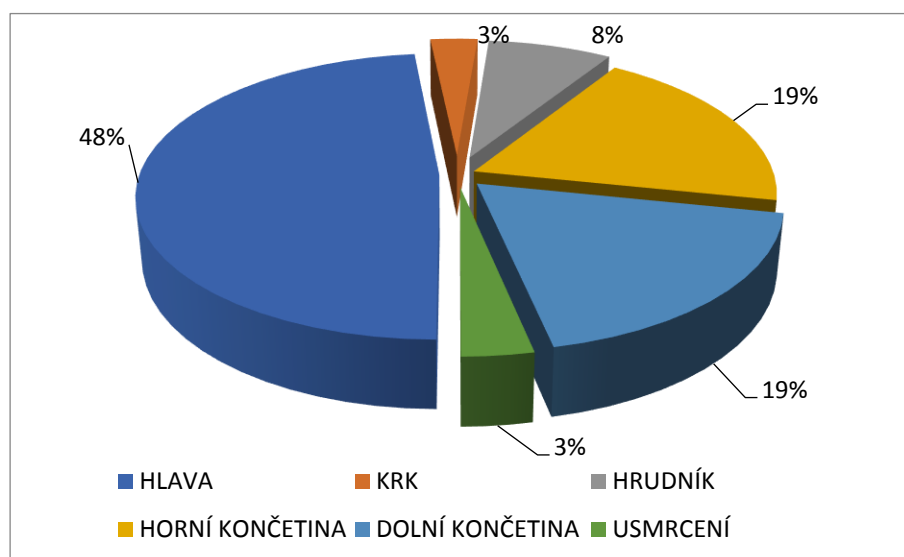
### 2.3.3 Statistika poranění

Vzhledem k tvaru čela tramvaje je při srážce největší problém v následném poranění chodce. Ze statistik sepsaných v *tab. 2-3* vynesena do *graf. 2-3* vychází, že nejvíce zranění připadá na poranění „HLAVY“ chodce, a to v zastoupení 48 % z celkových 271 zranění.

Jako položka „HLAVA“ při zpracování statistik byly uvažovány všechny druhy poranění hlavy od krvácivých zranění až po otřesy mozku a fraktury lebky. Na tomto druhu zranění má největší podíl čelní sklo vozu, které je málo poddajné z důvodu bezpečnostních požadavků na pevnost při srážce s jinými dopravními prostředky a dopadová rychlost, kterou hlava chodce dosáhne při srážce. Poranění hlavy se vyskytuje i v kombinaci s jinými druhy zranění, ale poranění hlavy je více nebezpečné, než například zlomenina končetin, pokud by se však nejednalo o tepenné krvácení.

Tab. 2-3 Poranění chodce při srážce s tramvajovým vozem

HLAVA	KRK	HRUDNÍK	HORNÍ KONČETINA	DOLNÍ KONČETINA	USMRCENÍ	CELKEM
131	8	21	52	50	9	271



Graf. 2-3 Poranění chodce při kolizi s tramvají

## **2.4 Shrnutí poznatků kapitoly bezpečnost**

Z vyhodnocení statistik je možné říci, že pro další návrhy zvýšení pasivní bezpečnosti tramvaje je potřeba dbát zvýšené pozornosti na oblast čelního skla, místa pod ním a boční linie tramvaje. Tyto prostory je potřeba konstruovat tak, aby v případě srážky měly buď vhodné tvarování, kdy nedojde ke kontaktu chodce s tuhými částmi skříně vozidla, nebo obložení schopné pohltit nárazovou energii chodce při srážce.

Největší problém z poznatku ze statistik je chování chodců jako takové, že k přechodu silničních a traťových komunikací nepoužívají místa k tomu určená. Byla by vhodná celková osvětla chodců, a to nejenom dětí ve škole, ale i dospělých. Ze zkušenosti vím, že právě dospělí nedodržují pravidla nejčastěji.



### 3 PŘEHLED LEGISLATIVNÍCH POŽADAVKŮ

V této kapitole jsem provedl rešerši legislativních požadavků na čelní článek vozidla. V současné době není, na rozdíl od automobilového průmyslu, nijak legislativně zohledněna srážka chodce s tramvajovým vozidlem. A to jak z hlediska aktivní, tak pasivní bezpečnosti. To znamená, že výrobce není nijak nabádán k povinnosti se touto problematikou zabývat.

Tramvajové vozy se pohybují v ulicích měst, kde se zároveň pohybuje spousta chodců. Ti ne vždy dávají pozor na své okolí, například z důvodu používání mobilních zařízení nebo obecné nesoustředěnosti a nepozornosti ke svému okolí, kde dalším faktorem je i věk chodce. Avšak podle zákona č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích je chodec účastníkem provozu a musí dodržovat pravidla tímto zákonem stanovená. [7]

Podle § 54 odstavec 3 je chodec povinen dát přednost tramvajovému vozidlu, tedy nesmí vstoupit na přechod pro chodce nebo na vozovku bezprostředně před blížícím se vozidlem. Dále pak podle § 41 se musí chodec chovat tak, aby řidič tramvajového vozidla nemusel náhle změnit rychlost jízdy jak na přechodu pro chodce, tak i mimo něj. [7]

Chodci často k přechodu tramvajové trati nepoužívají místa k tomu určená, jako jsou přechody pro chodce, nadchody a podchody. V některých částech města jsou tratě, kde může vozidlo dosahovat vyšších rychlostí a tramvaj pak nestihne před chodcem zastavit, vzhledem k adhezním podmínkám a maximálním zpomalením jaké může působit na přepravující osoby.

Zařazení výzkumu ochrany, bude mít za následek zvýšení bezpečnosti na komunikacích a pro výrobce snížení nákladů v případě výměny poškozených dílů vzniklých při nehodě. Díky tomu výrobce zvýší konkurenceschopnost a atraktivnost vozidel pro veřejnost při vytváření nabídek pro zákazníky.

#### 3.1 Železniční předpisy:

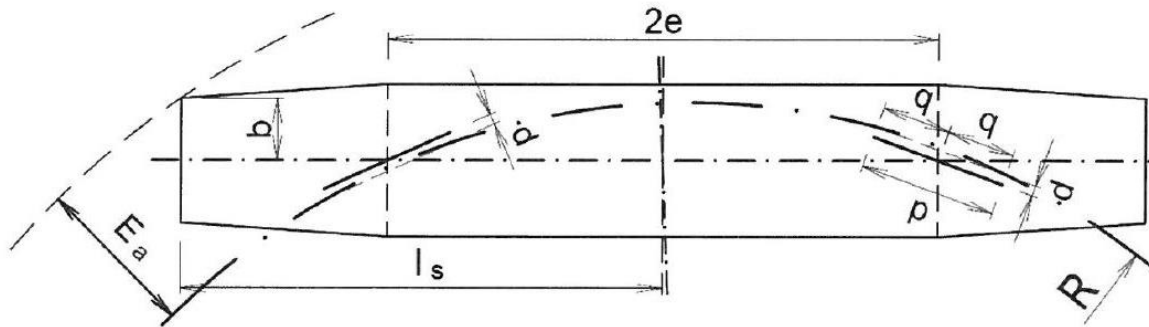
##### 3.1.1 ČSN 28 0337 – Průjezdny průřezy tramvajových tratí a obrysy pro vozidla provozována na tramvajových dráhách [8]

Norma definuje obrys kolejových vozidel, která jsou provozována na tramvajových drahách a zároveň vymezuje průjezdný průřez trati s přívodem proudu vrchním vedením o rozchodu koleje normální a úzkém 1 000 mm na území České republiky.

Při návrhu čelního článku a tramvajového vozidla jako celku je nutné brát ohled na limitní rozměry stanovené touto normou. Z nich vyplývá potřebné zúžení tak, aby při průjezdu obloukem nedošlo ke střetu s protijedoucím vozidlem a zároveň bylo dosaženo co nejvhodnějšího tvaru vozidla. Tyto specifikace jsou závislé na vzdálenosti otočných čepů, rozchodu kol a délce představku. Dalším aspektem je profil příslušné trati, na které má být vozidlo provozováno tedy podmínky mimo normu, které stanovují interní předpisy provozovatele.

Pro ČR je stanovena maximální šířka vozidla vyhláškou MD ČR č. 341/2002 Sb. na hodnotu 2650 mm. Nevyšší dovolená výška včetně sběrače v nejnižší pracovní poloze nad spojnicí temen kolejnic je 3 700 mm. [9]

U čelního článku je potřeba dodržet požadavky na zúžení půdorysného profilu, které stanovuje norma v případě průjezdu směrovým obloukem. Norma definuje výpočet pro symetrickou skříň vozidla podle středové osy v případě, že se jedná o čtyřnápravový vůz s tuhou skříní (tramvaj Tatra T3) nebo článkové vozidlo, které má Jakobsovy podvozky (tramvaj Tatra KT8D5). Schematicky je uspořádání zobrazeno na obr. 3-1.



Obr. 3-1 Vybočení vozidla na vnější stranu oblouku

Zdroj: [8]

Pro tyto vozidla se provádí kontrola množiny bodů umístěných na profilu vně otočných čepů. Zvolené body se vypočtou podle vztahu (1).

$$E_a = \sqrt{R^2 + b^2 + l_s^2 - e^2 + e^2 \cdot d_a^2 + 2 l_s d_a \sqrt{R^2 - q^2} + 2b \sqrt{R^2 - q^2 - e^2} \cdot \sqrt{1 - d_a^2}} - R \quad (1)$$

Aby byl ověřovaný bod na skříni vozidla prohlášen za vyhovující, musí splnit podmínku (2) pro body na skříni vozidla na vnější straně směrového oblouku vně otočných čepů.

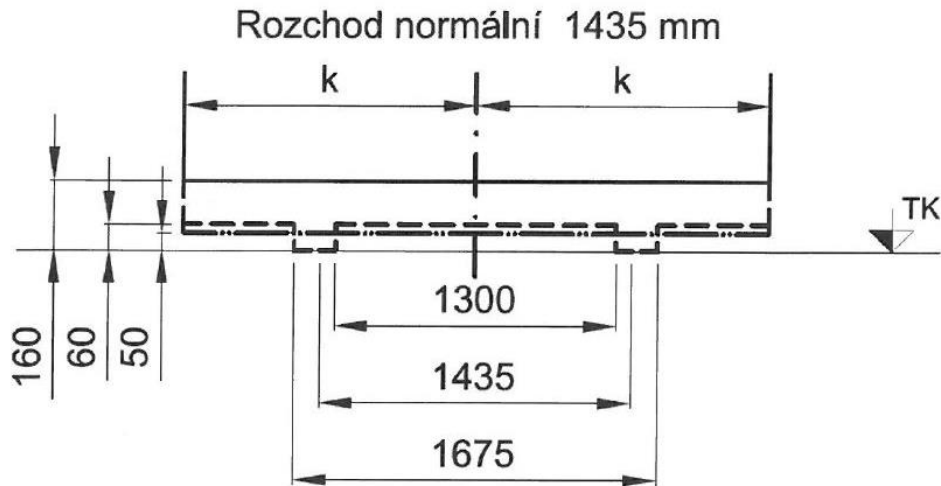
$$E_a \leq k + \delta_a \quad (2)$$

kde:

- $E_a$  je vnější vybočení bodu povrchu tramvaje
- $k$  je poloviční šířka obrysu pro vozidlo
- $\delta_a$  je rozšíření obrysu pro vozidlo na vnější stranu oblouku
- $R$  je poloměr směrového oblouku
- $b$  je vzdálenost vyšetřovaného bodu na povrchu skříně vozidla, měřená od roviny příčného řezu procházející středem vzdálenosti otočných čepů
- $q$  je poloviční rozvor podvozku
- $d$  je maximální radiální posuv otočného čepu z jeho ideální polohy při součtu všech možných příčných vůlí ve statické poloze
- $e$  je poloviční vzdálenost otočných čepů
- $d_a$  je poměrná vůle

$$d_a = \frac{d}{e} \quad (3)$$

Norma dále vymezuje spodní obrys vozidla pro neodpružené součásti vozidel, což jsou i odpružené hmoty, jako je rám podvozku, spodek skříně a součásti na ně pevně připevněné v případě dosednutí vypružení na dorazy. Tyto limity jsou zobrazeny na *obr. 3-2*.



**LEGENDA:**

OSA OBRYSU PRO VOZIDLO (2.1.7)

ZÁKLADNÍ ČÁST OBRYSU PRO VOZIDLA  
(OBRYSU PRO ODPRUŽENÉ ČÁSTI VOZIDEL)

OBRYSU PRO NEODPRUŽENÉ ČÁSTI VOZIDEL

OBRYSU PRO OCHRANNÉ ŠTÍTY A RÁMY



kde je

TK úroveň spojnice temen kolejnic;

k poloviční šířka obrysu pro vozidlo.

*Obr. 3-2 Spodní obrys vozidla pro neodpružené součásti vozidel*

*Zdroj: [8]*

### 3.1.2 ČSN EN 15 227 – Železniční aplikace – Požadavky na odolnost skříní železničních vozidel proti nárazu [10]

Cílem této normy je určení požadavků na pasivní bezpečnost tak, aby došlo ke snížení následků nehod způsobených srážkou. Tyto požadavky se ale vztahují pouze na pasivní bezpečnost při srážce tramvajového vozidla s jiným tramvajovým vozidlem, nákladním vozidlem a osobním vozidlem. Neřeší pasivní bezpečnost tramvaje při střetu s chodcem.

Jsou zde ale stanoveny požadavky na smetadlo překážek. Dle této normy spadá tramvajové vozidlo provozované v městské síti na sdílené trati do kategorie C-IV – tramvajové soupravy, předměstská tramvaj. Smetadlo musí v případě srážky s malou nebo nízkou překážkou vystát zatížení dle *tab. 3-1* požadavků na funkci smetadla překážek podle maximální provozní rychlosti.

*Tab. 3-1 Pevnostní požadavky na smetadlo překážek*

Statické zatížení v ose	60 kN
Statické zatížení v příčné vzdálenosti 750 mm	50 kN

### 3.1.3 DIN 5566 – Kolejová vozidla – Stanoviště strojvedoucího / řidiče

Tento předpis stanovuje požadavky na stanoviště řidiče vozidla.

#### 3.1.3.1 DIN 5566 - 1 – Část 1: Všeobecné požadavky [11]

Zde je popsán pracovní prostor řidiče, včetně požadavků na dosahy na ovládací kontroléry. Dále pak požadavky na rozmístění ovládacích členů, hlukové limity v prostoru pracoviště a ergonomii.

#### 3.1.3.2 DIN 5566 - 2 – Část 2: Příkladné požadavky na železniční vozidla [12]

V této části jsou popsány přídatné požadavky na stanoviště, jako jsou například vnitřní rozměry stanoviště, požadavky na umístění a vlastnosti dveří pro vstup na stanoviště a vybavení stanoviště včetně ovládacího pultu.

Tato část stanovuje i pevnostní požadavky na čelní sklo, to nesmí být proraženo předmětem, který by se mohl vymrštit anebo odpadnout z protijedoucích vozidel. Zkušební těleso má tvar polokoule, hmotnost 1 kg a je vystřeleno rychlostí danou vztahem (4)

$$v_p = v_{MAX} + 160^{1)} [km/h] \quad (4)$$

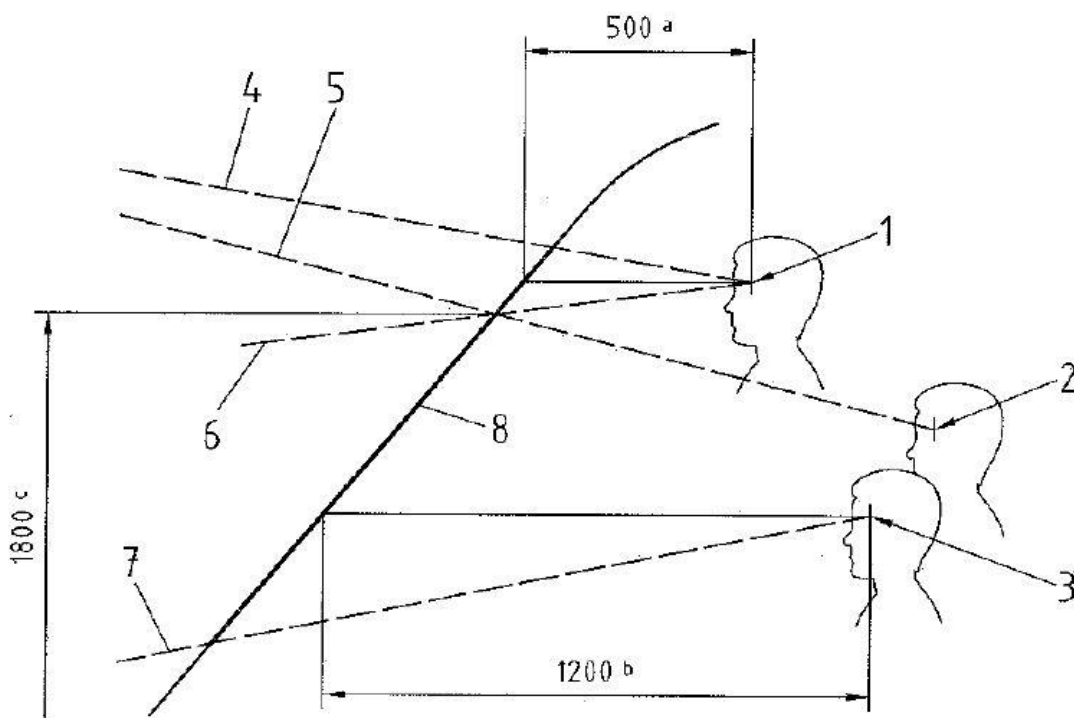
kde:

$v_p$  je rychlost zkušební tělesa při nárazu [km/h]

$v_{MAX}$  je maximální rychlost vozidla [km/h]

1) tato rychlost je potřeba korigovat podle maximální rychlosti protijedoucích vozidel, v případě tramvajového vozidla v městském provozu to bude 50 km/h, v případě rychlodrážní trati to bude 70 km/h

Dále jsou zde stanoveny výhledové poměry z vozidla v přímé koleji a kolejovém oblouku o poloměru  $R \geq 300$  m. Je nutné zajistit, aby řidič s nejmenší výškou viděl na objekt o výšce 1200 mm nad vozovkou, který je 300 mm vzdálen od spodní hrany čela vozidla a nízké signály. V případě vysokého řidiče je zase nutné zajistit výhled na vysoké signály. V předpisu se uvažuje se sedadlem řidiče, které je možné posouvat v ose X a Z. Posuv v ose X zajistí možnost kompenzace dosahu řidiče na podnožku a ovládací pult. Posuv v ose Z zajistí kompenzaci výšky řidiče pro výhled na vysoké a nízké signály.



Obr. 3-3 Příklady pro hrany omezující výhled

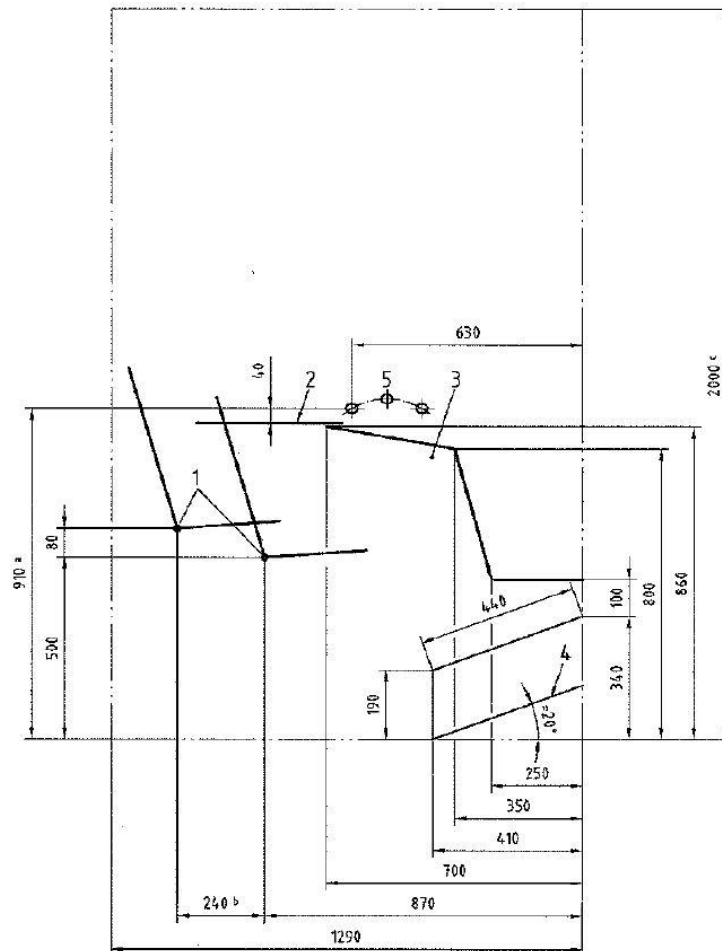
Zdroj: [12]

kde: [11]

- 1 je poloha očí stojící osoby, dle DIN 5566-1:2006-09, tabulka 1
- 2 je poloha očí středně vysoké sedící osoby, dle DIN 5566-1:2006-09, tabulka 1
- 3 je poloha očí nejmenší sedící osoby, dle DIN 5566-1:2006-09, tabulka 1
- 4 je výhled na vysoké signály (nejvyšší osoba, stojící) u horní hrany čelního skla 1 950 mm nad horní hranou podlahy
- 5 je výhled na vysoké signály (středně vysoká osoba, sedící) u horní hrany čelního skla 1 800 mm nad horní hranou podlahy
- 6 je omezený výhled na vysoké signály (nejvyšší, stojící) u horní hrany čelního skla 1 800 mm nad horní hranou podlahy
- 7 je výhled na nízké signály (nejmenší osoba, sedící)
- 8 čelní sklo
- a je vzdálenost očí k čelnímu sklu, minimální rozměr dle tabulky 1
- b je vzdálenost očí k čelnímu sklu, upřednostňovaný rozměr dle tabulky 1
- c je horní hrana čelního skla, minimální rozměr dle tabulky 1

### 3.1.3.3 DIN 5566 - 3 – Část 3: Příkladné požadavky na kolejová vozidla pro příměstskou a regionální dopravu [13]

V této části je řešeno uspořádání ovládacích prvků na řídicím pultu, sedadle a podnožce. Dále je definován prostor pro ochranu strojvedoucího. Tento prostor má za úkol ochránit strojvedoucího v případě srážky s jiným vozidlem hlavně v oblasti nohou. Příslušný prostor je zobrazen na obr. 3-4.



Obr. 3-4 Prostor pro ochranu řidiče,

Zdroj: [13]

### **3.2 Automobilové předpisy:**

Pro řešení problematiky pasivní bezpečnosti je možné se inspirovat v automobilovém průmyslu. Vzhledem ke stále rostajícímu počtu automobilů pohybujících se v městském prostředí se touto tématikou zabývají už řadu let. Z tohoto důvodu vznikly na základě statistik a výsledků nezávislých organizací pro testování vozidel nařízení evropské hospodářské komise stanovující požadavky, které musí splnit každé nově vznikající vozidlo.

#### **3.2.1 ECE r127 Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska ochrany chodce (ECE r127 Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to their pedestrian safety performance) [14]**

ECE r127 je předpis schválený evropskou hospodářskou komisí (EHK). Tento předpis stanovuje podmínky zkoušení, zkušební tělesa a limitní hodnoty, které musí být splněny, aby bylo vozidlo schváleno pro provoz. Tento předpis je upravován vzhledem k novým poznatkům na poli biomechaniky a konstrukčním možnostem.

### **3.3 Výzkumné práce**

#### **3.3.1 EEVC WG17 Zlepšené zkušební metody pro vyhodnocení ochrany chodců poskytované osobními automobily, (Improved test methods to evaluate pedestrian protection afforded by passenger cars) [15]**

Jedná se o zprávu pracovní skupiny, která má za úkol zhodnotit dosavadní bezpečnostní opatření a navrhnout další postupy nebo zlepšení zkušebních parametrů, těles a vyhodnocení zkoušek na základě vyhodnocení statistik nehod, nových objevů v biomechanice a vyhodnocení testů získaných za dobu platnosti předchozích prací. Na jejich základě se pak podává návrh na úpravu dosavadních předpisů a norem. Snahou tohoto výzkumu bylo zvýšení požadavků na testovací zkoušky a tím nabádat výrobce k zlepšení bezpečnostních prvků.

### **3.4 Další studie**

#### **3.4.1 STRMTG - Technický odpor dopravy – Design čela tramvajového vozu (STRMTG - Tramway front end design) [16]**

Tento předpis vzniká pod záštitou francouzské agentury pro vytváření norem a nese pracovní název v překladu „Konstrukce a design čela tramvaje“ (Tramway front end design) a je návrhovou studií pro pozdější normu, kterou schválí Evropská komise jako platné nařízení. V předpisu je dále uvedeno, že pokud výrobce nalezne lepší řešení tvarování splňující požadavky na čelní článek a podloží ho matematickými simulacemi nebo výsledky zkoušek než ty, které jsou uvedeny, je možné toto řešení použít a zároveň podat návrh na změnu předpisu z důvodu zlepšení bezpečnosti.

Předpis, má za úkol zohlednit konstrukci čelního článku, přesněji jeho tvarování, s ohledem na pasivní bezpečnost tramvaje při srážce s chodcem. Předpis by měl omezit a v některých případech zakázat určité tvary čela vozidla, tyto návrhy jsou zohledněny v kapitole 5 *Požadavky na čelní článek*.

## 4 PŘEHLED BIOMECHANICKÝCH POŽADAVKŮ

Tato kapitola představuje druhou část rešerše a jsou v ní sepsána kritéria biomechaniky používaná v automobilovém průmyslu pro zhodnocení pasivní bezpečnosti uvnitř vozidla, tedy posádky a vně vozu, tedy chodců.

Studium biomechaniky dává do souvislosti závažnosti poranění, které jsou dány popisem a kategorizací s hodnotou relevantní fyzikální veličiny měřitelné při srážce (fyzikální veličiny, které zranění způsobují). Tato kategorizace je zobrazená tabulkou AIS (Abbreviated Injury Scale – zkrácená stupnice zranění) viz *tab. 4-1*. Těmito kategoriemi AIS je možné popsat předpokládaná poranění při působení určité veličiny, jako je síla, moment nebo zrychlení působící na člověka při srážce., [2] [14]

*Tab. 4-1 Tabulka AIS - Stupně zranění podle závažnosti nehody [2]*

AIS	Hlava	Hrudník	Břicho	Páteř	Končetiny
1 - malé	bolest hlavy; malátnost	zlomenina jednoho žebra	povrchové poranění	natažení	zlomenina prstu
2 - střední	bezvědomí <1 h; lineární zlomenina	2 - 3 zlomená žebra; zlomená hrudní kost	poranění sleziny, ledvin, kontuze jater	malá zlomenina bez vlivu na míchu	jednoduchá zlomenina holeně, pánve, česky
3 - závažné	bezvědomí 1 - 6 h; vpáčená zlomenina	>3 zlomená žebra, 2-3 žebra + hemothorax nebo pneumotorax	velké poranění sleziny, ledvin	prasklý disk s poškozením nervu	vykloubení kolena, zlomenina stehenní kosti
4 - velmi závažné	bezvědomí 6 - 24h; otevřená zlomenina	>3 zlomená žebra + pneumotorax, kolaps hrudníku	velké zranění (roztržení) jater,	částečné poškození míchy	amputace nad kolenem, rozdrcená pánev (uzavřená)
5 - kritické	bezvědomí >24h, velký hematom (100cm <sup>3</sup> )	roztržení aorty	roztržení ledvin, jater, střeva	kvadruplegie	otevřené rozdrcení pánve
6 – zranění vylučující se se životem	-	-	-	-	-



Biomechanická kritéria neboli kritéria poranění jsou hranice mezi přípustnými a nepřípustnými hodnotami mechanického zatížení. Mezi zkoumané mechanické zatížení patří síly, momenty a zrychlení působící na člověka. Z těchto hodnot se pak sestavují kritéria ochrany (bezpečnostní limity), které je možné měřit na zkušebních figurínách a testovacích tělesech a nesmí být překročeny.

Tyto hodnoty jsou získávány z experimentů, z analýz dopravních nehod, z bariérových zkoušek (crash–test), testování na dobrovolnících a počítačových modelací. Shromážděné údaje jsou pak vyhodnoceny jako únosné tolerance lidského těla při zatížení, kterým je člověk v průběhu dopravní nehody vystaven. Mezi vyhodnocované veličiny patří například zrychlení, zpomalení, rázy, vymrštění a komprese.

#### **4.1 Hlavní kritéria biomechaniky**

Při srážce chodce s tramvají je potřeba kontrolovat hlavně kritéria poranění hlavy hrudníku a kolen tedy:

- zrychlení a doba působení zrychlení na hlavu člověka
- biomechanické kritérium hlavy (HPC),
- biomechanické kritérium hrudníku (TTI, 3MS),
- kritéria poranění končetin.

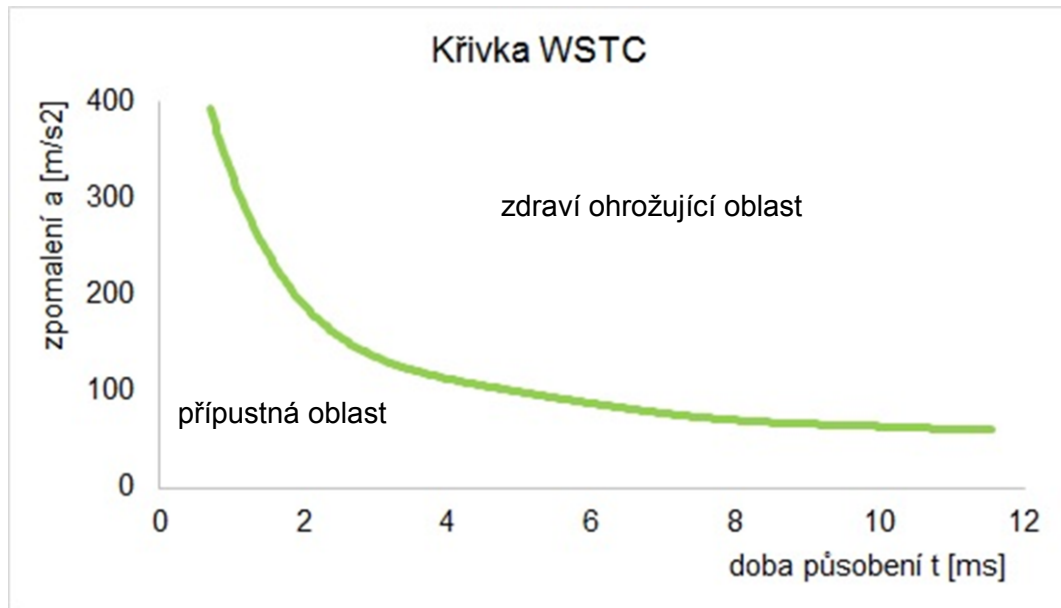
Dále je vhodně brát ohledy i na další kritéria jako jsou:

- poranění vnitrohrudních orgánů,
- biomechanické kritérium krku (NIC),

Tyto kritéria budou podrobněji popsány v dalších částech kapitoly.

#### 4.1.1 Křivka vztahu zrychlení a doby působení na hlavu člověka – WSTC (Wayne State Tolerance Curve) [2] [17]

Lidské tělo je schopné odolat působení velkého zrychlení, ale pouze po dobu řádu jednotek milisekund. Tato křivka stanovuje limitní hodnoty zrychlení hlavy člověka v závislosti na době působení tohoto zrychlení. Křivka je zobrazena na *obr. 4-1*. Hodnoty pod křivkou jsou stanoveny jako povolené a hodnoty nad křivkou jsou zakázané. Zpomalení  $a$  je udáváno v násobcích  $g$ , tedy zemského tíhového zrychlení a doba působení  $t$  v milisekundách.



*Obr. 4-1 Limitní hodnoty zpomalení působících na hlavu člověka*

#### 4.1.2 Biomechanické kritérium hlavy [2] [14] [15]

Kritérium je označeno zkratkou HPC (Head Potential Criteria). Kritérium je definováno pro pasažéry v automobilu, ale je možné ho použít i při jiných aplikacích, jako je například srážka s chodcem. Jedná se o působení dynamické síly. Při tomto kritériu se vyhodnocuje celkové zrychlení hlavy ve všech osách na konci kolize nebo v určitých časových intervalech jako je například náraz na vozidlo v průběhu kolize.

Zrychlení hlavy je měřeno akcelerometrem umístěným v těžišti hlavy testovací figuríny nebo zkušebního tělesa. Při výpočtu se používají dva časové intervaly.  $HPC_{15}$ , kde má časové okno velikost 15 ms a je vhodné pro tvrdé nárazy a  $HPC_{36}$ , kde má časové okno velikost 36 ms, které je vhodné pro menší nárazy hlavy. Hodnota kritéria se vypočítá podle vztahu (5).

$$HPC = (t_2 - t_1)^{-1,5} \cdot \left[ \int_{t_1}^{t_2} a(t) \cdot dt \right]^{2,5} \quad (5)$$

kde:

$a$  je výsledné zrychlení v násobcích tíhového zrychlení "g" ( $1g = 9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$ )

$$a = \sqrt{(a_x^2 + a_y^2 + a_z^2)} \quad (6)$$

$t_1, t_2$  jsou časové okamžiky (vyjádřené v sekundách) v průběhu nárazu, definující začátek a konec záznamu, kde je hodnota HPC maximální

Hodnoty HPC, u nichž je časový krok větší než 15ms, se pro účely výpočtu nejvyšší hodnoty neberou v úvahu.

Na základě výzkumů a statistik byla stanovena limitní hodnota kritéria na hodnotu 1000. Tedy podmínka  $HPC < 1000$ , při této hodnotě je nízká pravděpodobnost vzniku trvalého poranění.

#### 4.1.3 Kritérium poranění hrudníku [2] [14] [15]

Kritérium se označuje zkratkou TTI (Thoracic Trauma Index). Tohoto kritéria se využívá hlavně při vyhodnocení nárazu z boční strany, tedy hlavně BOČNĚ – ČELNÍ srážky, jak je zobrazeno na *obr. 2-1*. Vyhodnocuje se maximální příčné zrychlení hrudního koše a spodního hrudního obratle. Při výpočtu tohoto kritéria podle vztahu (7) je uvažován i věk chodce.

$$TTI = 1,4 \cdot AGE + \frac{1}{2} (RIB_y + T_{12y}) \cdot \frac{M}{M_{ref}} \quad (7)$$

kde:

AGE je věk osoby

$RIB_y$  je maximální zrychlení naměřené na 4. a 8. žebro

$T_{12y}$  je maximální zrychlení na 12. hrudním obratli

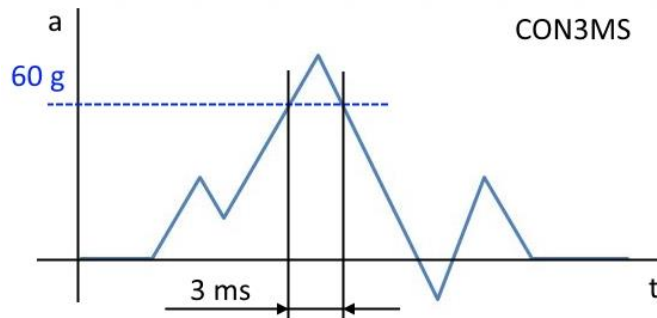
$M$  je hmotnost testované osoby

$M_{ref}$  je smluvní průměrná hmotnost cestujícího ( $M_{ref} = 75 \text{ kg}$ )

K vážným zraněním dochází v případě, kdy hodnota TTI je větší jak 85g (85ti násobek zemského zrychlení).

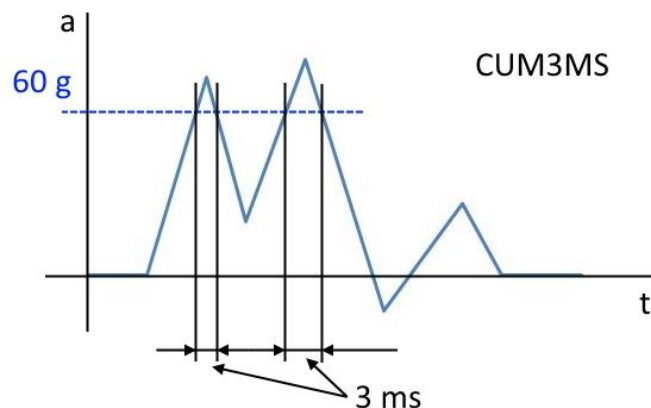
V případě poranění hrudníku se ještě využívá kritérium označené 3MS, které zohledňuje poranění vnitrohrudních orgánů. Při tomto kritériu se měří pulz zrychlení vyšší než 60g (60ti násobek zemského zrychlení), který nesmí trvat déle než 3 ms. Pulz zrychlení je vyhodnocován dvojnásobným způsobem. [2]

- Kontinuální (CON3MS) – zrychlení 60g je překročeno pouze v časovém okně o velikosti 3 ms.



Obr. 4-2 Příklad kontinuálního pulzu zrychlení,  
Zdroj: [2]

- Kumulativní (CUM3MS) – zrychlení 60g je překročeno v časových oknech, které mají dohromady 3 ms



Obr. 4-3 Příklad kumulativního pulzu zrychlení  
Zdroj: [2]

#### 4.1.4 Kritéria poranění končetin

Pro návrh tvaru a obložení čelního članku je vhodné uvažovat i limitní hodnoty sil a momentů, které mohou při srážce působit na končetiny chodce.

##### 4.1.4.1 Kritérium poranění holenní kosti (tibia) [2] [14] [15]

Toto kritérium se označuje zkratkou TI. Jedná se o kombinaci působení síly a ohybového momentu. Kritérium je možné vyjádřit vztahem (8).

$$TI = \left[ \frac{F_z}{F_c} + \frac{M_r}{M_c} \right]_{max} \quad (8)$$

kde:

- $F_z$  je maximální axiální síla  
 $M_r$  je maximální ohybový moment  
 $F_c$  je kritická axiální síla 35,9 kN  
 $M_r$  je součet působících momentů v osách x a y  $(M_x^2 + M_y^2)^{1/2}$   
TI je určováno pro horní i spodní část tibie

Maximální zrychlení holenní kosti bylo stanoveno na 150g (150ti násobek zemského zrychlení). Pro sílu kolmou na osu kosti byla stanovena limita zrychlení 170g – 270g (násobky zemského zrychlení). Toto limitní zrychlení, při kterém dochází k fraktuře je ovlivněno tvarem předmětu, na který naráží.

#### 4.1.4.2 Kritérium poranění stehenní kosti (femur) [2] [14] [15]

Kritérium se označuje zkratkou FFC. V případě srážky chodce s vozidlem je potřeba kontrolovat maximální okamžitou výslednou sílu kolmou na osu kosti a maximální moment. Síla působící na kost by neměla přesáhnout hodnotu 5 kN a moment hodnotu 300 Nm.

#### 4.1.4.3 Kritérium poranění kolene [2] [14] [15]

Limitní hodnoty byly stanoveny na základě testů na mrtvých tělech. Pro boční srážku chodce je stanoven maximální úhel mezi stehenní a holenní kostí na 15°. Maximální posuv mezi stehenní a holenní kostí na 6 mm, toto posunutí odpovídá smykové síle 3 – 4 kN. Pro čelní srážku je pak stanoveno maximální posunutí mezi stehenní a holenní kostí na 15 mm.

#### 4.1.5 Kritérium poranění břicha [2] [14] [15]

Při tomto kritériu se zjišťuje možný vznik poranění měkké tkáně uvnitř břicha člověka. Mechanismus poranění není závislý na zrychlení, ale na velikosti a rychlosti deformace. Kritérium je možné vyjádřit vztahem (9).

$$VC = \left[ \frac{dD(t)}{dt} \cdot \frac{D(t)}{SZ} \right]_{max} \quad (9)$$

Kde:

- D(t) je deformace hrudníku  
SZ je referenční hodnota (ČELNÍ srážka – tloušťka torza, ČELNĚ – BOČNÍ, BOČNÍ srážka – polovina tloušťky torza)

Na základě studií byla stanovena limitní hodnota při čelním nárazu hodnota VC = 1 m/s.

#### 4.1.6 Kritérium poranění krku (NIC) [2] [14] [15]

Kritérium se označuje zkratkou NIC (Neck Injury Criterion). Poranění krku je v automobilovém průmyslu zjišťováno hlavně u pasažérů při srážce ve spojitosti s pohybem hlavy a aktivací bezpečnostního pásu. Tedy náhlá změna záklonu hlavy v předklon. Při tomto kritériu se posuzuje zrychlení mezi těžištěm hlavy a prvním krčním obratlem. To se dá vyjádřit vztahem (10)

$$NIC = 0,2 \cdot a_{rel} + v_{rel}^2 \quad (10)$$

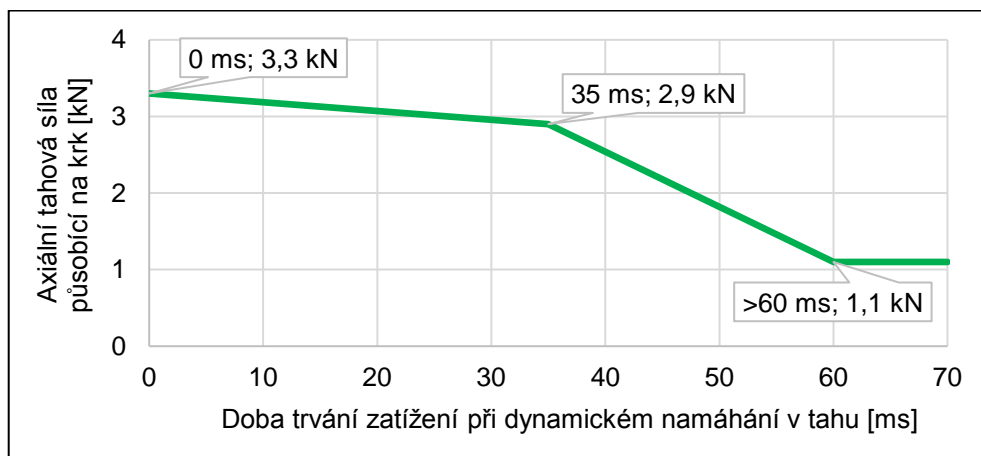
kde

$a_{rel}$  je relativní zrychlení mezi prvním krčním obratlem a hlavou

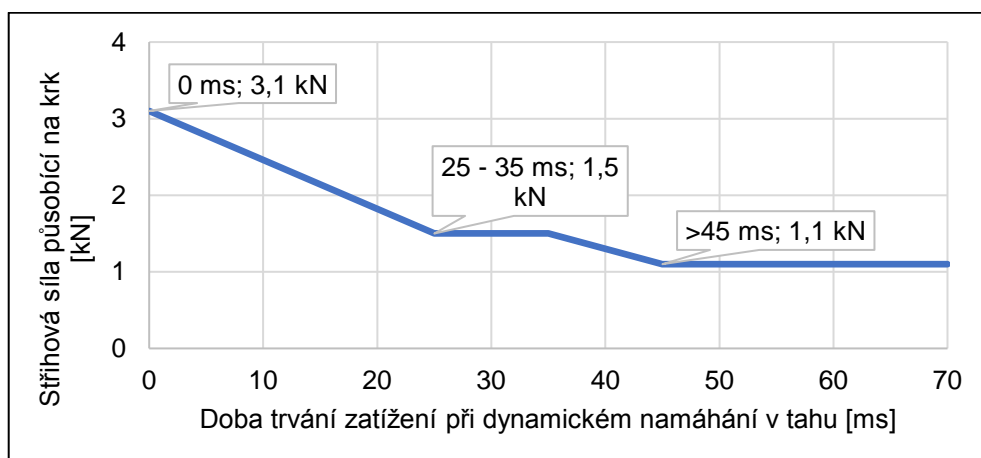
$v_{rel}$  je relativní rychlost mezi krčním obratlem a hlavou

Jako limitní hodnota je stanovena hodnota  $NIC = 15$ . Při dlouhodobém působení vyšších hodnot dochází k dlouhodobějším zdravotním obtížím.

V případě měření působení síly na krční obratle v čase jsou limitní hodnoty stanoveny křivkami pro osovou sílu na *obr. 4-4* a pro stříhovou sílu na *obr. 4-5*.



Obr. 4-5 Limitní hodnoty tahové síly v ose působící na krk, ZDROJ VAŠÍČEK



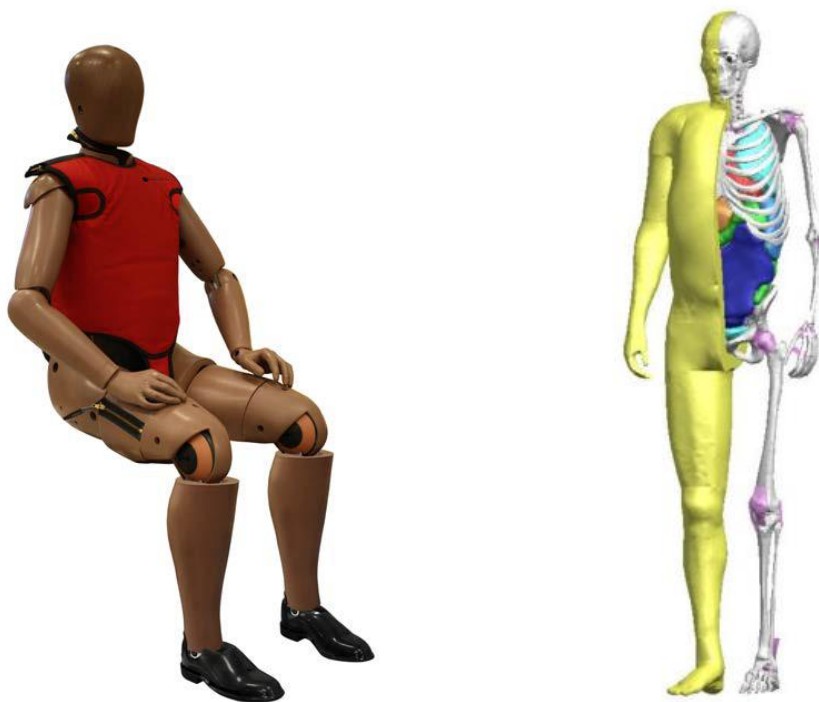
Obr. 4-4 Limitní hodnoty stříhové síly působící na krk, ZDROJ VAŠÍČEK

## 4.2 Zkušební modely

### 4.2.1 Zkušební figuríny a matematické modely

Díky přesnějšímu a detailnějšímu popisu vlastností lidských tkání, skeletu a orgánů apod. lze na základě jejich výzkumu, vytvořit zkušební figuríny a matematické modely s velmi dobrou biomechanickou odezvou odpovídající skutečnému člověku.

Tyto testovací figuríny a matematické modely, znázorněné na obr. 4-6 je pak možné vystavit různým dynamickým zatížením jak při počítačové simulaci, tak při reálných zkouškách a vytvořit tak podklady pro zlepšení bezpečnosti při konstrukci vozidla. U matematických modelů, které jsou dostatečně ověřené, je navíc výhodou možnost využít simulaci pro ověření a návrh konstrukce před tím, než se začne vozidlo vyrábět. Provedení příslušných testů na vyrobených modelech umožňuje kontrolu splnění předpisů pro bezpečnostní požadavky.



Obr. 4-6 Figuríny pro testování srážek, ZDROJ:

vpravo – testovací figurína pro reálné zkoušky s vestou pro kompenzaci váhy osoby,

<http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/frontal-impact/thor-50m>

vlevo – testovací figurína pro počítačové simulace

<https://www.torque.com.sg/news/toyota-adds-child-models-to-virtual-crash-dummy-lineup/>

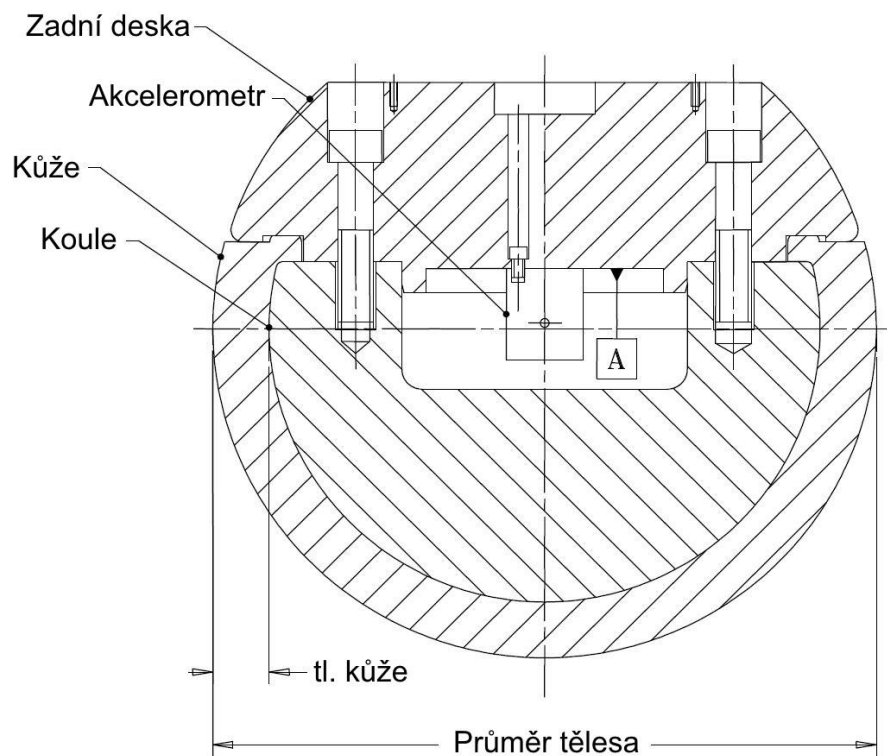
#### 4.2.2 Zkušební tělesa [14] [15]

Tato zkušební tělesa (dále jen impaktory) mají předpisy definované rozměry, hmotnost, těžiště a umístění akcelerometrů. Díky nim je možné zjednodušit reálné testování vozidel a snížit náročnost na vybavení pracoviště pro provádění testování způsobilosti vozidla.

Parametry příslušného impaktoru jsou vždy sepsány v tabulce pod obrázkem. Odlišnosti v parametrech podle předpisu ECE r127 a studiích EEVC jsou způsobeny tím, že výzkumná práce EEVC má v úmyslu zvýšit současné nároky na bezpečnost. Proto navrhuje testování při vyšších rychlostech a zároveň nižších limitních hodnotách.

#### 4.2.3 Zkušební model hlavy dospělého člověka

Zkušební těleso hlavy dospělého člověka je definováno jako tuhá koule, vyrobená z hliníku, opatřená syntetickou nebo vinylovou kůží s rozměry zobrazenými na obr. 4-7. Test probíhá tak, že je zkušební těleso vystřeleno pneumatickým zařízením na čelo vozidla stanovenou rychlostí a úhlem.



Obr. 4-7 Testovací model hlavy dospělého člověka, ZDROJ: ECE r127

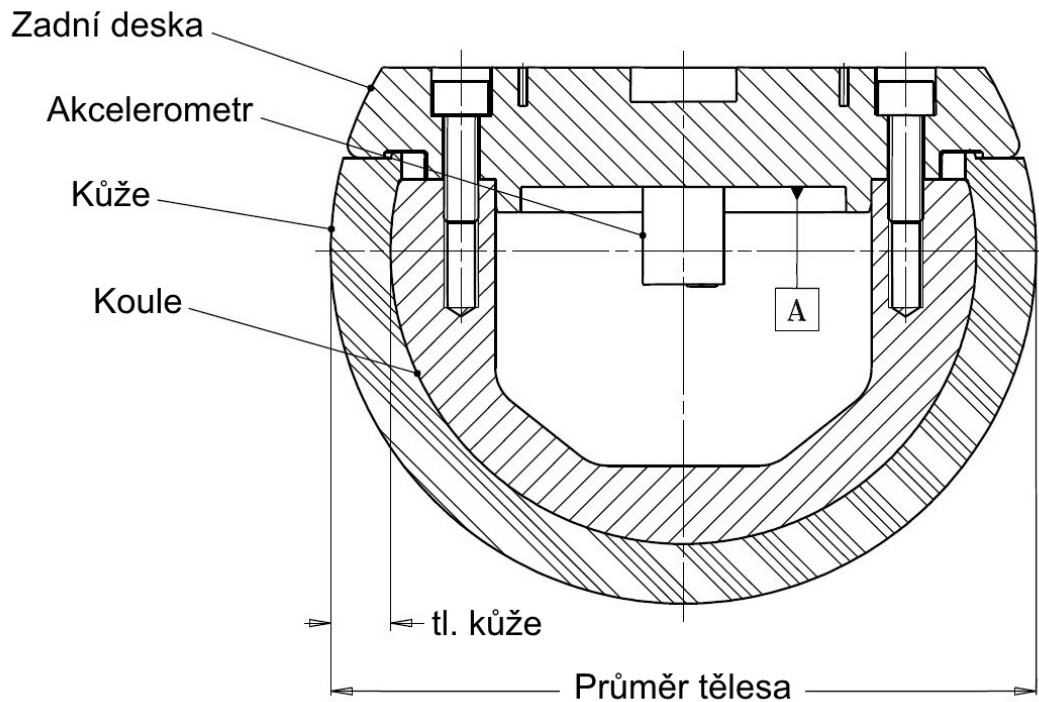
Tab. 4-2 Základní parametry testovacího tělesa hlavy dospělého člověka

	Předpis ECE r127	Práce EEVC WG17	Jednotky
Průměr	165 ± 1		[mm]
Hmotnost včetně snímačů	4,5 ± 0,1	4,8 ± 0,1	[kg]
Tloušťka umělé kůže	14,0 ± 0,5 (syntetická)	13,9 ± 0,5 (vinylová)	[mm]
Moment setrvačnosti	0,010 – 0,013	0,0125 ± 0,0010	[kgm <sup>2</sup> ]
Těžiště	± 5 od středu		[mm]
První vlastní frekvence	>5000		[Hz]



## 4.2.4 Zkušební model hlavy dítěte [14] [15]

Zkušební těleso hlavy dítěte má stejný průběh testování jako zkušební model hlavy dospělého člověka. Rozdílné jsou pouze některé parametry, viz *tab. 4-3* a konstrukce zobrazená na *obr. 4-8*.



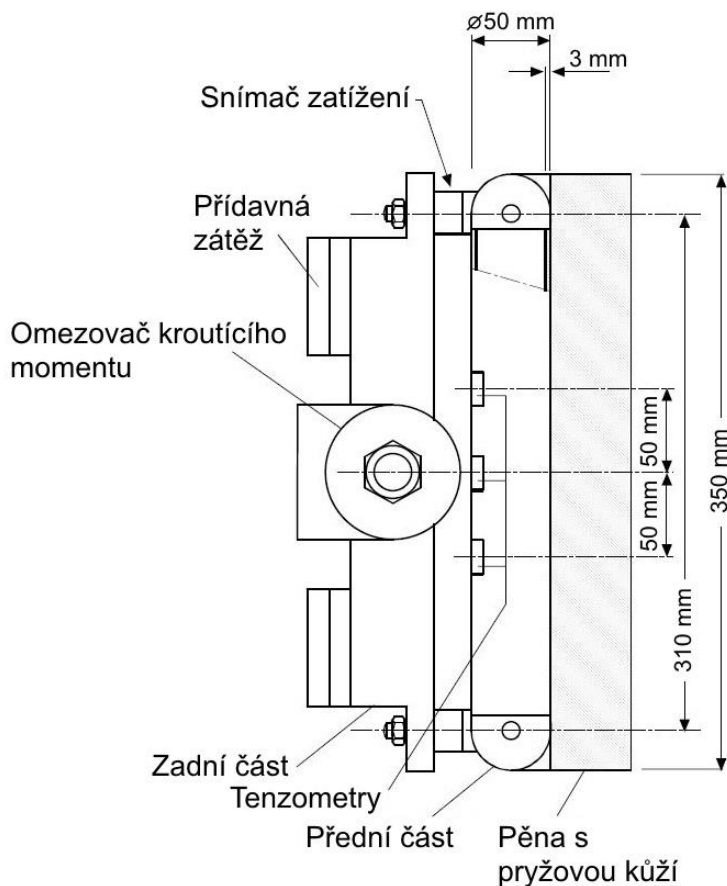
Obr. 4-8 Testovací model hlavy dospělého člověka, ZDROJ: ECE r127

Tab. 4-3 Základní parametry zkušebního tělesa hlavy dítěte

	Předpis ECE r127	Práce EEVC WG17	Jednotky
Průměr	$165 \pm 1$	$130 \pm 1$	[mm]
Hmotnost včetně snímačů	$3,5 \pm 0,07$	$2,5 \pm 0,05$	[kg]
Tloušťka syntetické kůže	$14,0 \pm 0,5$ (syntetická)	$11,0 \pm 0,5$ (vinylová)	[mm]
Moment setrvačnosti	$0,008 - 0,012$	$0,0036 \pm 0,0003$	[kgm <sup>2</sup> ]
Těžiště	$\pm 2$ od středu	$\pm 5$ od středu	[mm]
První vlastní frekvence	$>5000$		[Hz]

## 4.2.5 Zkušební model horní části nohy člověka (stehenní část), (up\_leg impaktor) [14] [15]

Zkušební těleso horní části nohy člověka znázorňuje stehenní kost a pánev člověka. Je definováno jako těleso složené ze dvou částí, kde na zadní části je umístěno uložení pro vystřelení zkušebního tělesa a možnost přidat závaží. Díky těmto závažím je možné simulovat větší zastoupení lidské populace. Na přední části jsou pak uloženy snímače a měkčená pěna s pryží představující svalovinu a kůži. Tvar a rozměry jsou zobrazeny na obr. 4-9.



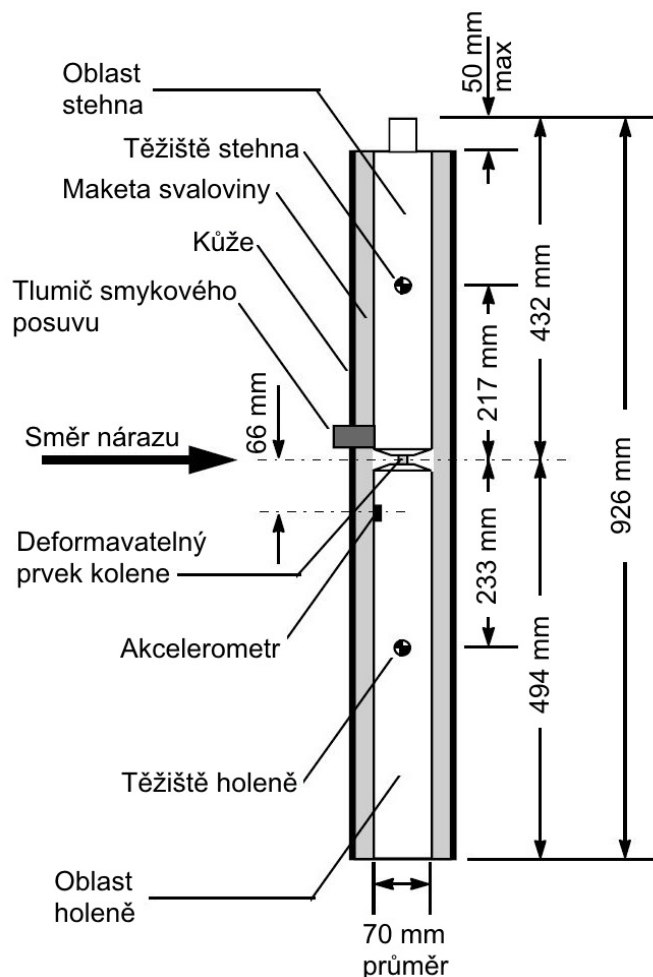
Obr. 4-9 Testovací model horní části nohy člověka, ZDROJ ECE r127

Tab. 4-4 Základní parametry zkušebního tělesa horní části nohy člověka

	Předpis ECE r127	Práce EEVC WG17	Jednotky
Hmotnost zadní části včetně snímačů	$9,5 \pm 0,1$	$9,5 \pm 0,1$	[kg]
Hmotnost přední části včetně snímačů	$1,95 \pm 0,05$	$1,95 \pm 0,1$	[kg]
Délka tělesa	$350 \pm 1$	$350 \pm 1$	[mm]
Přídavná zátěž	$\pm 1$	$\pm 1$	[kg]

#### 4.2.6 Zkušební model nohy člověka (stehenní a holení část, koleno), (low\_leg impaktor) [14] [15]

Zkušební těleso nohy člověka je definováno jako dvoudílné tuhé těleso obalené měkčenou pěnou na místech nárazu. Těleso reprezentuje stehenní a holenní kost. Ty jsou spojené deformovatelným kloubem představující kolenní kloub. Tvar a rozměry jsou uvedeny na obr. 4-10.



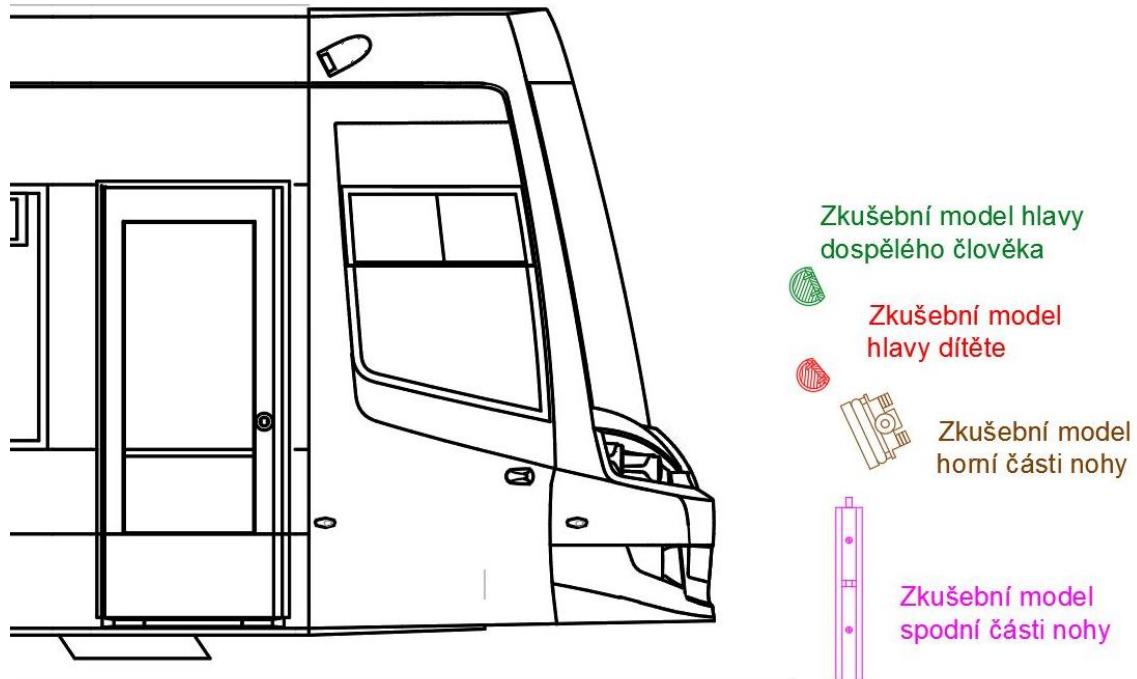
Obr. 4-10 Testovací model spodní části nohy, ZDROJ: ECE r127

Tab. 4-5 Základní parametry zkušebního tělesa spodní části nohy

	Předpis ECE r127	Práce EEVC WG17	Jednotky
Hmotnost včetně snímačů	$13,2 \pm 0,4$	$13,4 \pm 0,2$	[kg]
Moment setrvačnosti stehna	$0,0325 \pm 0,0016$	$0,127 \pm 0,010$	[kgm <sup>2</sup> ]
Moment setrvačnosti holeně	$0,0467 \pm 0,0023$	$0,120 \pm 0,010$	[kgm <sup>2</sup> ]

### 4.3 Současné podmínky zkoušek a testování

Zkouška probíhá tak, že je zkušební těleso vystřeleno na vyhodnocovaná místa vozidla nebo jeho části pod definovaným úhlem a rychlostí. Schematicky jsou směry zkoušky znázorněny na *obr. 4-11*. Vyhodnocují se pak zrychlení naměřená akcelerometry a působící síly, které se po zpracování výsledků porovnávají s příslušnými limitními hodnotami. [2] [14] [15]



Obr. 4-11 Schéma testovací zkoušky

Tab. 4-6 Parametry pro provádění zkoušek [14] [15]

	Předpis ECE r127		Práce EEVC WG17	
	Rychlost [m/s]	Úhel [°]	Rychlost [m/s]	Úhel [°]
Model hlavy dospělého člověka	$9,7 \pm 0,2$	$65 \pm 2$	$11,1 \pm 0,2$	$65 \pm 2$
Model hlavy dítěte	$9,7 \pm 0,2$	$50 \pm 2$	$11,1 \pm 0,2$	$50 \pm 2$
Model horní části nohy	$11,1 \pm 0,2$	$\pm 2^\circ$	$\pm 2\%$ (1)	$\pm 2^\circ$ (1)(2)
Model spodní části nohy	$11,1 \pm 0,2$	$\pm 2^\circ$	$11,1 \pm 0,2$	$\pm 2^\circ$ (2)

- (1) závisí na tvaru vozidla, zkouška se provádí na místech s největší pravděpodobností vzniku poranění,
- (2) dokument definuje tolerance ve vodorovné, podélné a příčné rovině a ve směru letu pro první kontakt s vozidlem.

#### 4.4 Souhrn parametrů a limitních hodnot

Závěrem této kapitoly je souhrn parametrů, které budou použity pro návrh a ověření vlastností čelního článku vzhledem k bezpečnosti při srážce s chodcem. V *tab. 4-7* jsou uvedeny hmotnostní parametry zkušebních těles. V případě parametrů těles je nutné sledovat vývoj v biomechanice a tyto hodnoty následně upravovat pro zlepšení bezpečnostních vlastností vozidla.

Tab. 4-7 Tabulka parametrů zkušebních těles

veličina	jednotka	hodnota	popis
m_adult	[kg]	4,8	hmotnost tělesa reprezentující hlavu dospělého člověka (85 % obyvatelstva)
m_child	[kg]	2,5	hmotnost tělesa reprezentující hlavu dítěte (6 let)
m_up_leg	[kg]	9,5	hmotnost tělesa reprezentující horní část nohy
m_femur	[kg]	8,6	hmotnost části tělesa reprezentující stehenní kost
m_tibia	[kg]	4,8	hmotnost části tělesa reprezentující holenní kost
m_low_leg	[kg]	13,4	hmotnost tělesa reprezentující stehenní a holenní kost

V *tab. 4-8* jsou uvedeny limitní hodnoty kritérií poranění, které budou uvažovány při návrhu požadavků na tvar a obložení čelního článku

Tab. 4-8 Tabulka limitních hodnot

veličina	jednotka	hodnota	popis
HPC	[-]	1000	maximální hodnota kritéria
F_femur	[kN]	5	maximální suma sil působících na stehenní kost
M_femur	[Nm]	300	maximální ohybový moment působící na stehenní kost
F_shear [kN]	[kg]	4	maximální stříhová síla působící na vazy v koleni
s_displacement	[mm]	6	maximální stříhový posuv vazů v koleni
a_tibia	[g]	150	maximální zrychlení holení kosti
M_shear	[Nm]	300	tuhost v ohybu vazů kolenního kloubu
A_knee	[°]	15	maximální ohybový úhel kolene (proti přirozenému směru)

Tímto jsem ukončil rešeršní část diplomové práce a v následující kapitole předložím návrhy, jak by se mělo přistupovat k tvorbě čelního článku.

## 5 POŽADAVKY NA ČELNÍ ČLÁNEK

V této kapitole jsou na základě shrnutí rešeršních částí předloženy mé vlastní návrhy pro řešení čelního článku a funkčních částí tramvajového vozidla. Detailnější řešení mého návrhu následuje v odstavci 5.3 *Tvary variant čelního článku vozidla*. [18] [19]

Tyto požadavky na čelní článek se dají zjednodušeně rozdělit do základních skupin potřebných pro správnou funkci

- tvar čela – sklon obložení a čelního skla s ohledem na srážku s chodcem,
- čelní okno – stanovené pevnostní limity pro zajištění ochrany strojvedoucího,
- podjezdová ochrana, smetadlo překážek – ochrana proti přejetí chodce, předmětu,
- prostor pro řidiče – minimální prostor pro přežití, výhledy z kabiny,
- prostor pro deformační prvky s dalšími účastníky dopravního provozu – OA/NA,
- dělení panelů – na kterých panelech dochází nejčastěji ke střetu s chodcem.

Tyto skupiny budou rozepsány v dalších částech kapitoly s možností přístupu k jejich řešení.

### 5.1 Zohlednění účastníku provozu

Tramvajové vozidlo se pohybuje v městském prostředí, kde se mimo chodců setkává i s jinými účastníky dopravního provozu. Z toho pak vznikají doplňující požadavky, které vozidlo vůči ostatním příslušníkům dopravního procesu musí splnit.

Na tramvajový vůz se v první řadě vztahují legislativní a funkční požadavky. Mezi legislativní požadavky je možno zařadit požadavky na průjezdný průřez, výhledové poměry. Mezi funkční požadavky můžeme zařadit požadavky na součásti a mechanismy potřebné pro správnou funkci vozidla jako jsou světlomety, stěrač, zpětná zrcátka.

Z hlediska chodců je na tramvajový vůz kladen požadavek, aby nevzniklo při kolizi zranění, popřípadě snížení jeho následků.

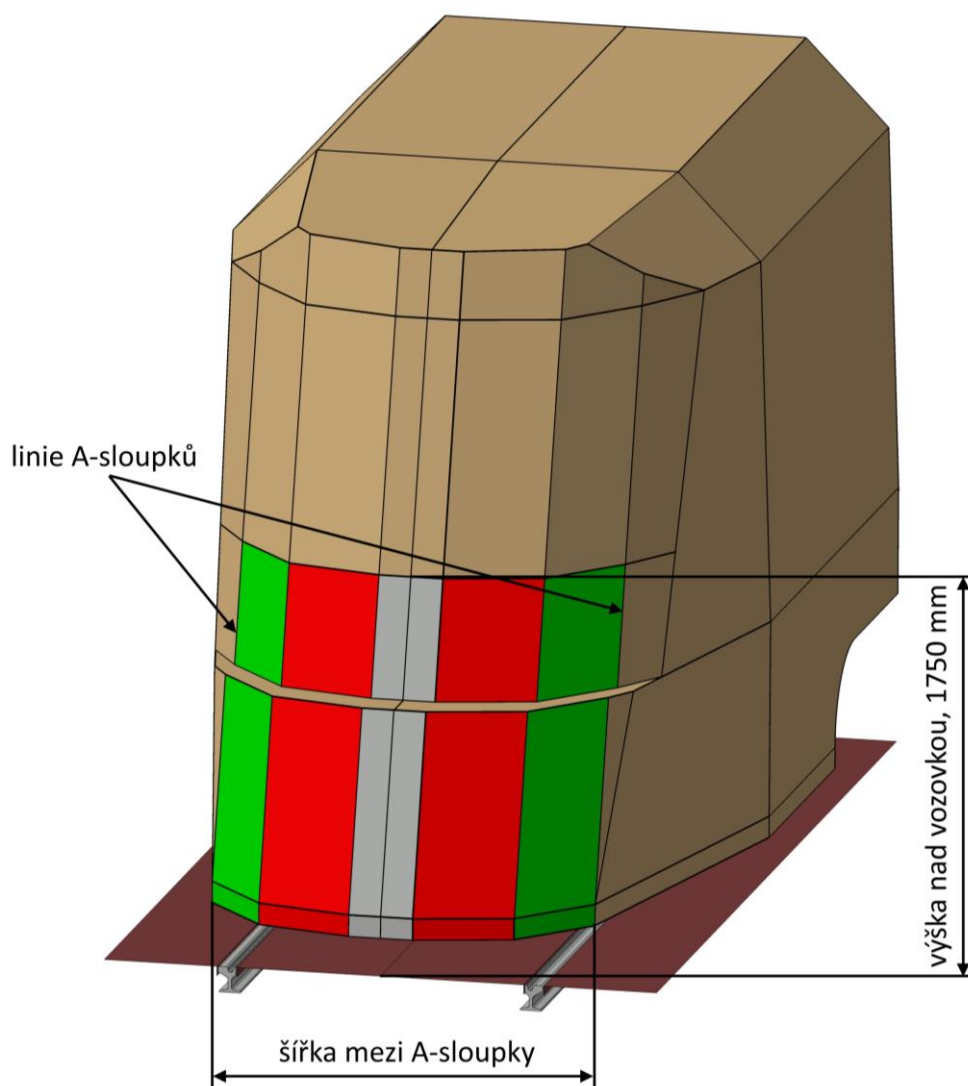
Mezi jiné účastníky dopravního procesu pak můžeme zařadit další tramvajové vozy, osobní automobily (OA) a nákladní automobily (NA). Od těchto účastníků jsou na vozidlo kladeny pevnostní (crashové) požadavky. Tyto požadavky stanovují potřebu umístění deformačních prvků, které při kolizi budou za stanovených podmínek schopny snížit následky nehody.

Není tedy možné navrhovat čelní článek bez ohledu na vytvoření potřebných zástavbových a pevnostních požadavků vzniklých z prostředí, kde se tramvajové vozidlo pohybuje a účastníků provozu, se kterými se setkává.

## 5.2 Obecné požadavky na tvar čela

Nejvíce požadavků na změnu tvaru čela vozidla klade návrh předpisu. Ten je založen na přibližně 2000 simulací srážek s chodcem. Tyto požadavky mají za následek změnu průběhu srážky ve smyslu odhození chodce do boků mimo podélnou osu vozidla, aby se zabránilo jeho přejetí a zvýšení ochrany hlavy člověka. Podmínkou pro splnění tohoto předpisu je zajistit, aby kritérium poranění hlavy HPC bylo nižší než hodnota 1000 ( $HPC < 1000$ ).

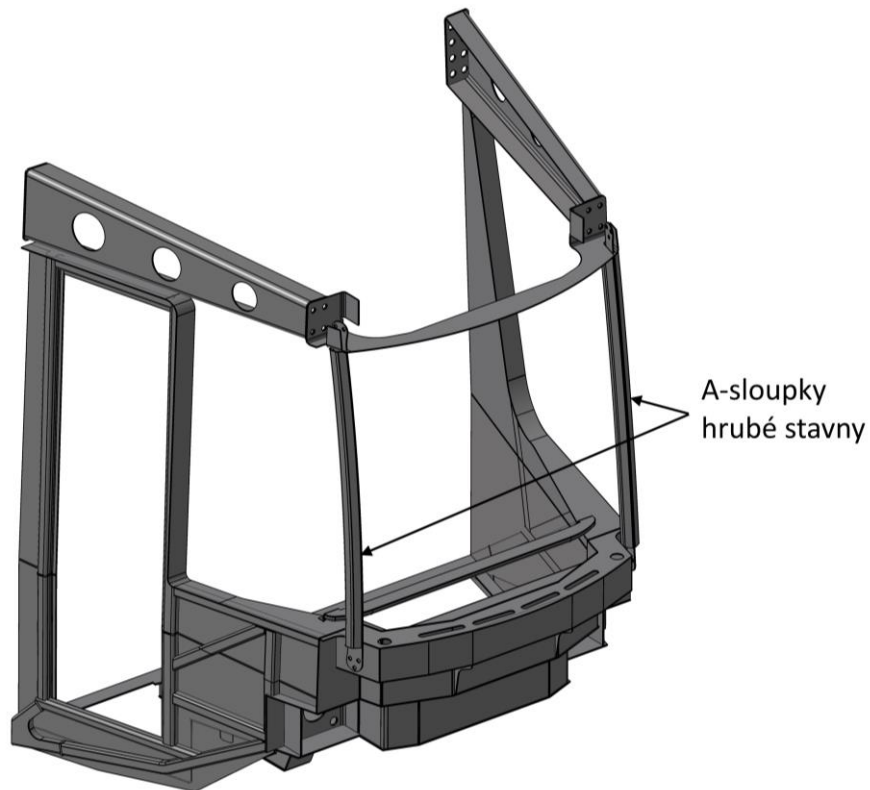
Předpis definuje kolizní plochu na čele vozidla, ta je zobrazená na *obr. 5-1*. Tato plocha znázorňuje kritickou plochu na čele vozidla při srážce s chodcem. Její výška je stanovena na 1750 mm od roviny vozovky (nad TK). Hodnota výšky 1750 mm vyplývá ze statistik a odpovídá průměrné výšce dospělé populace.



Obr. 5-1 Kolizní plocha na čele vozidla

Kolizní plocha je rozdělena na několik částí, pro které předpis doporučuje určité sklony v rovině půdorysu (XY) a bokorysu (XZ). Tyto sklony ploch budou popsány v dalších odstavcích.

Šířka kolizní plochy je určena jako průsečík A-sloupků v dané výšce 1750 mm nad vozovkou. Za A-sloupek je považován přední sloupek na čele vozidla obr. 5-2, ke kterému je zpravidla připevňováno čelní sklo.



Obr. 5-2 A-sloupky na hrubé stavbě čela vozidla, ZDROJ



Mezi jedno z hlavních bezpečnostních rizik při kolizi s chodcem patří jeho sražení přímo před jedoucí vůz. Z tohoto důvodu je vhodné vyvarovat se nebo přímo zakázat negativní sklony čela a čela, která jsou příliš rovná, jak navrhuje předpis. V případě negativního sklonu čela zobrazeném na *obr. 5-3* jsou nejen omezeny zástavbové prostory pro funkční a bezpečnostní prvky, ale chodec je sražen přímo pod vozidlo. Z toho hrozí velké zranění hlavy způsobené pádem a chodec se může dostat až k podvozku vozidla, což by mohlo mít fatální následky.



*Obr. 5-3 Příklad negativní sklon čela vozidla*

Zdroj: ATOM R1 <http://okbatom.com/projects/r1>

U čel s malým sklonem, jak je zobrazeno na *obr. 5-4*, se hlava chodce dostává do kontaktu s vozidlem hned na začátku kolize a navíc dochází ke sražení chodce přímo před vozidlo jako u negativního sklonu čela.



*Obr. 5-4 Příklad čelo s malým sklonem*

Zdroj: Alstom Citadis 402 Tours, [https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom\\_Citadis](https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom_Citadis)

### 5.2.1 Řešení světlometů

Jak již bylo řečeno, tramvajové vozidlo se pohybuje v městském prostředí a potkává další účastníky dopravního provozu. Z tohoto důvodu se na něj vztahují i předpisy určující umístění světlometů pro zajištění dostatečné viditelnosti. Je tedy potřeba, aby kryty světlometů byly dostatečně poddajné nebo světlomety vhodně zapustit do obložení čela. Příklad konstrukce zapuštění světlometů je zobrazen na obr. 5-5.



Obr. 5-5 Možnosti zapuštění světlometů

Zdroj: vlevo: Alstom Citadis 302 Angers, Francie, [https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom\\_Citadis](https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom_Citadis)  
vpravo: Bombardier Flexity 2, De Lijn, <https://nl.wikipedia.org/wiki/InnoTrans>

Pro snížení následných zranění je vhodné na čele krajního článku předcházet tvorbě ostrých hran nebo umisťování součástí s větší tuhostí, než má obložení vozidla. Tyto prvky mohou zapříčinit vážné zranění těla chodce nebo by se o ně mohl dokonce chodec zaháknout. V návrhovém předpisu se doporučuje, aby minimální poloměr zaoblení všech hran byl 10 mm. Nevhodné jsou také kryty, k jejichž otevírání se používá tlakových spínačů. Ty by se v případě kolize mohly otevřít a odkryly by nebezpečné součásti.

Další nebezpečí pro sraženého chodce je umístění prvního podvozku tramvajového vozidla. V případě vozidel, která mají na čelním článku podvozek umístěný hned pod stanovištěm řidiče, jak je zobrazeno na obr. 5-6, dochází k velkému poranění chodce vedoucích často ke ztrátě končetin nebo usmrcení.



Obr. 5-6 Umístění prvního podvozku pod stanoviště řidiče, ZDROJ: Škoda 15T, <http://www.dpp.cz/prvni-tramvaje-skoda-forcity-se-zaradi-do-bezneho-provozu-mhd/>

### 5.2.2 Umístění mechanismu stěrače

V případě ČELNÍ srážky, kdy by byl chodec sražen v ose vozidla, je potřeba zamezit vzniku zranění od výstupních hřídelí mechanismu stěrače. Možným řešením jeho zakrytí pomocí panelu s vhodnou úpravou (měkčením) zobrazené na obr. 5-7.



Obr. 5-7 Příklad zakrytí mechanismu stěrače, ZDROJ vlevo – Alstom Citadis 402 Tours, Francie, [https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom\\_Citadis](https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom_Citadis) vpravo – Bombardier Flexity 2, De Lijn <https://nl.wikipedia.org/wiki/InnoTrans>

Dalším možným provedením je umístit mechanismus stěrače nad horní příčku čelního skla, viz *obr. 5-8*. Toto řešení je vhodné v případě, že se nejedná o zasklení až ke střešní části vozidla. V tomto případě je nutné prověřit viditelnost informačního panelu, aby jeho zakrytí ramenem stěrače nebránilo přečtení zobrazovaných informací.

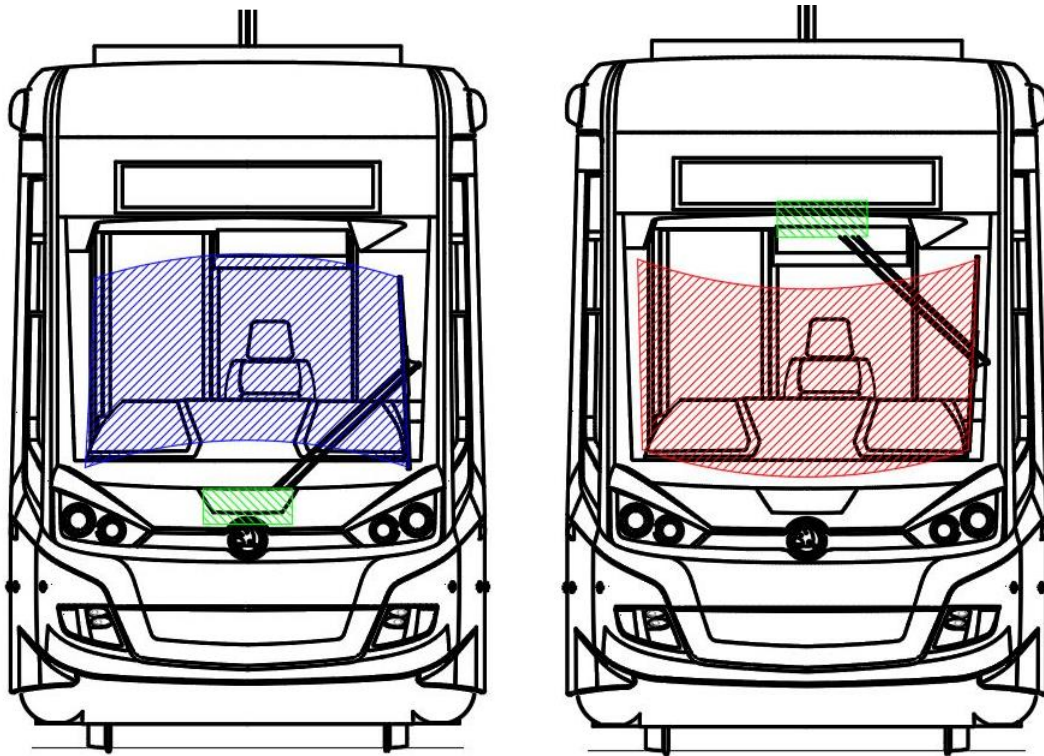


*Obr. 5-8 Umístění mechanismu stěrače nad čelní sklo, ZDROJ: Alstom Citadis 402 Tours, [https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom\\_Citadis](https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom_Citadis)*

Velkou výhodou je hladký přechod mezi maskou a čelním sklem vozidla bez výstupků, které by mohly být nebezpečné při srážce s chodcem. Jak bude dále zmíněno u varianty zvoleného provedení čela v kapitole 5.3 *Tvary variant čelního článku vozidla*.

Nevýhodou při umístění mechanismu stěrače nad horní příčku čelního skla je nutnost při opravě stěračů využít zvýšené plošiny nebo žebříku, to může být rizikové pro poškození čelního skla.

Při umístění stěrače nad horní příčku čelního skla a použití rovného ramena stěrače je pak nutné vyšetřit omezení výhledové plochy v případě zapnutého stírání. Vyšetření pro referenční vozidlo je zobrazeno na obr. 5-9.



Obr. 5-9 Stíraná výhledová plocha při různém umístění mechanismu stěrače,  
 vlevo – mechanismus stěrače umístěn pod čelním sklem  
 vpravo – mechanismus stěrače umístěn nad horní příčku čelního skla

Zeleně šrafovaný obdélník představuje prostor pro umístění mechanismu stěrače. Modře a červeně šrafovaná plocha představuje stíranou plochu. Zde je nutné vyšetřit výhledové poměry na horní a dolní signály. Rameno stěrače by mělo zakrývat pouze 5% výhledové plochy, ale u rovného ramena stěrače umístěného nad horní příčku vzniká omezení výhledu na horní signály.

Pokud by čelní sklo nebylo dělené, bylo by nutné do skla vyříznout otvor pro výstupní hřídele mechanismu stěrače. Tím by se zajistil volný výhled na informační panel. Nevýhodou tohoto otvoru je možné snížení pevnosti čelního skla a zhoršení těsnosti proti zatečení vody do kabiny řidiče.

### 5.2.3 Kryt spřáhla vozidla

Nejen vzhledem k bezpečnosti chodců, ale i např. osobních automobilů, je při srážce nutné zajistit zakrytí špřáhla. Volně přístupné spřáhlo zobrazené na obr. 5-10 by znamenalo tuhý prvek, které by chodci způsobilo vážný úraz. Navíc při srážce s osobními vozy se chová jako beranidlo, které může projít až do prostoru posádky a způsobit velká poranění v místech končetin a břicha osádky vozu.



Obr. 5-10 Vozy bez zakrytí spřáhla, ZDROJ

vlevo: Tatra T3 [https://cs.wikipedia.org/wiki/Tatra\\_T3](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tatra_T3)

vpravo: Tatra KT8D5 <https://www.dopravnispony.cz>

Výrobci tuto problematiku řeší i z designového pohledu, proto moderní vozidla jsou konturována s krytem spřáhla, jak je zobrazen na obr. 5-11.



Obr. 5-11 Obložení čela vozu se zakrytým spřáhlem, ZDROJ

Škoda 28T [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda\\_28T](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_28T)

#### 5.2.4 Smetadlo tuhých překážek

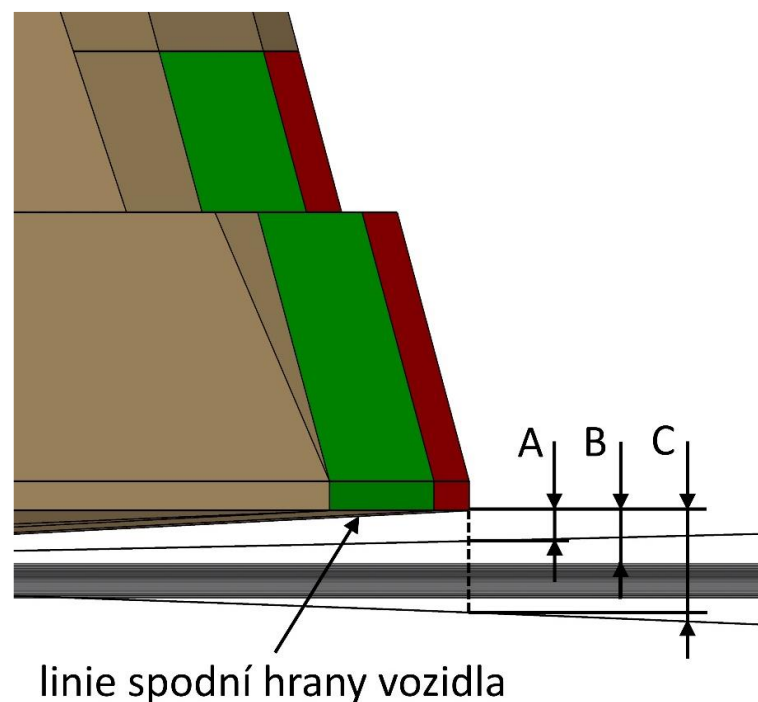
Hlavní funkcí smetadla překážek je zabránění vniku cizích předmětů pod vozidlo. Z hlediska pasivní bezpečnosti je pak zabránění přejetí chodce sraženého pod vozidlo.

Tramvajové vozidlo je převážně tvořeno jako jednotka s více články a podvozky. Vzdálenost otočných čepů a délka představku dává okrajové podmínky pro tvar spodní části článku vzhledem k průjezdnému profilu [8]. A tedy z hlediska dynamiky vozidla není možné udělat přední část příliš nízko, protože by při průjezdu vertikálního oblouku mohlo dojít ke kontaktu skříně vozidla s vozovkou.

Mezi legislativní požadavky na smetadlo patří norma pro obrys vozidla, která stanovuje pro normální a úzký rozchod minimální vzdálenost součástí vozidla od vozovky na 50 mm viz *obr. 3-2*. Dále pak norma pro odolnost při nárazu, která stanovuje pevnostní požadavky na smetadlo viz *tab. 3-1*. [8] [10]

#### 5.2.5 Podjezdová ochrana proti přejetí chodce

Podjezdová ochrana je složitá součást, kterou je potřeba řešit jako samostatný prvek k zástavbovým prostorům. Toto řešení, ale není předmětem diplomové práce, zde jsou uvedeny pouze požadavky a možnost řešení. V případě sražení chodce pod vozidlo by podjezdová ochrana měla zareagovat tak, aby co nejvíce zmenšila zbývající mezeru mezi vozidlem a vozovkou a chodce pouze tlačila před sebou. Tyto výšky vycházejí z řešení průjezdu horizontálním obloukem o poloměru R 400 m, jak je na *obr. 5-12*. [18]

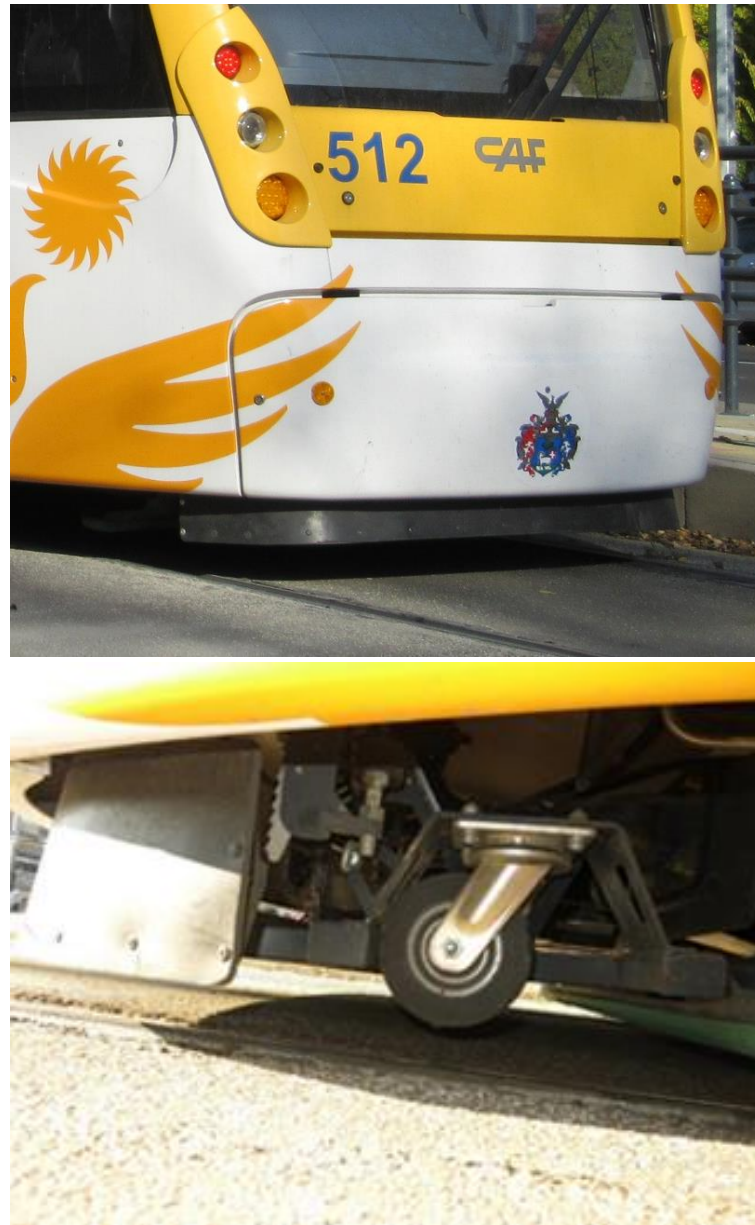


Obr. 5-12 Prostor výšek, které je nutné kompenzovat podjezdovou ochranou

- A. výška spodní linie pro průjezd vertikálním obloukem,
- B. výška spodní linie pro jízdu v přímé trati,
- C. výška, kterou je potřeba kompenzovat při výjezdu z vypuklého oblouku.

Zároveň však nesmí dojít k jejímu vzpříčení tak, aby nedošlo k vykolejení vozidla. Další zvýhodnění je pak v úpravě povrchu v části, kde dochází ke kontaktu s chodcem, tedy měkčený povrch zmenšující pravděpodobnost dalšího zranění osoby.

V případě použití jednoho členu jako smetadla tuhých překážek a podjezdové ochrany, se musí zajistit udržování konstantní vzdálenosti od vozovky při běžném provozu a při kolizi zajistit minimální mezeru mezi vozovkou a skříní. Toho lze dosáhnout například, jak je zobrazeno na obr. 5-13, kdy na smetadle je připojen pojezd, zajišťující zvedání členu při změně stoupání koleje.



Obr. 5-13 Výškově adaptivní podjezdová ochrana, ZDROJ:

CAF Urbos 3, Debrecen, [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Urbos\\_3\\_in\\_Debrecen](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Urbos_3_in_Debrecen)



Další možností je využít nafukovacího vaku, jak je zobrazeno na obr. 5-14. Díky tomu se zmenší mezera mezi vozidlem a vozovkou, navíc se jedná o poddajné těleso, které přispěje ke zmenšení následného poranění při sražení chodce pod vozidlo. Ochrana je aktivována na základě signálu ze senzoru umístěného mezi světlomety, viz obr. 5-14.



Obr. 5-14 Podjezdová ochrana formou nafukovacího vaku

Zdroj: Bombardier Flexity 2, De Lijn, <https://uk.bombardier.com/en/home.html>

Další možností je podjezdová ochrana, která se spouští až po kontaktu s chodcem. To znamená že zareaguje až když je chodec pod tramvají. Toto řešení zobrazené na XXX je možné vidět na tramvajích firmy Alstom z řady Citadis. Nevýhodou tohoto řešení, je jeho umístění. Než ochrana zareaguje je část těla pod vozidlem, v případě dětského chodce může dojít k většímu poranění.



Obr. 5-15 Podjezdová ochrana formou nafukovacího vaku

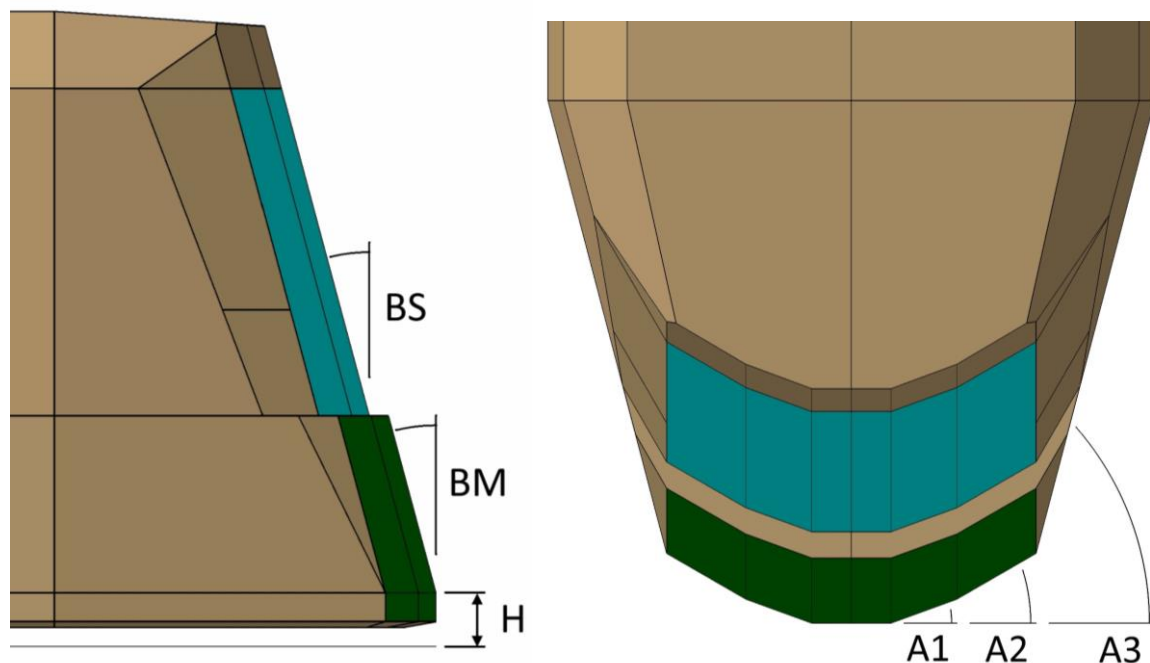
### 5.2.6 Rozměrové požadavky na tvar čela

Jak již bylo zmíněno, z předpisu vyplývají požadavky na sklony tvaru čela v rovině bokorysu (XZ) a půdorysu (XY) viz *obr. 5-16*. Tyto sklony čela vozů přispívají ke snížení poranění hlavy a odhození chodce do strany.

V rovině bokorysu (XZ) jsou definovány sklony:

- BM – sklon čelní masky vozidla, zelená plocha na *obr. 5-16*,
- BS – sklon čelního okna, modrá plocha na *obr. 5-16*.

V rovině půdorysu (XY) jsou pak definovány požadavky na zúžení čela A1, A2 a A3 viz *obr. 5-16*. Díky tomuto zúžení a sklopení se při vhodné konfiguraci dosáhne dostatečného odhození chodce do strany mimo vozovku, zamezí možnosti přejetí a sníží poranění hlavy chodce.



*Obr. 5-16 Znárodnění hlavních parametrů čelního článku,  
vlevo – bokorys (rovina XZ), vpravo – půdorys (rovina XY)*

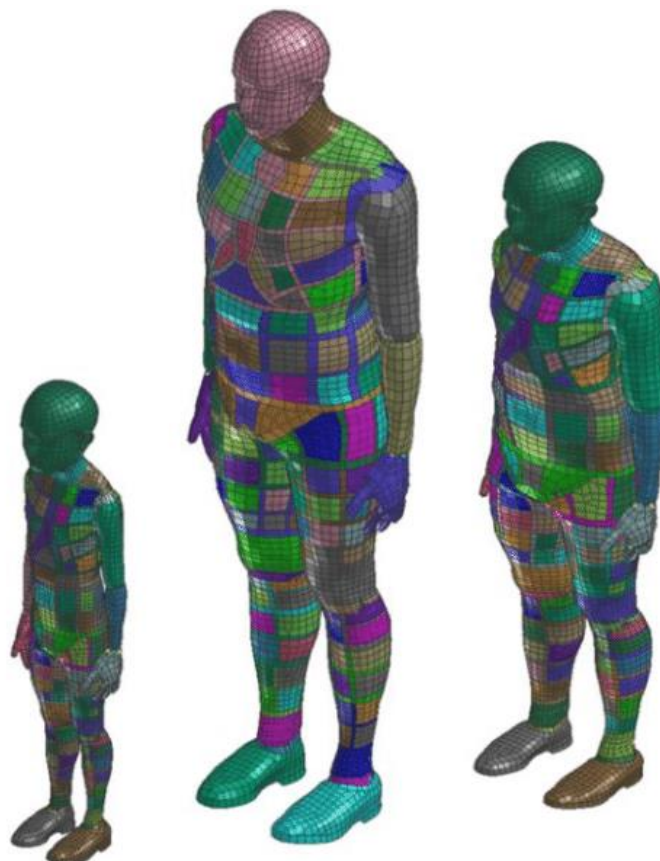
Dále je vhodné vytvořit oblast, která přijde do kontaktu s chodcem při srážce jako první. Pro tuto hranu je potřeba, aby byla ve výšce  $H \leq 350$  mm, to odpovídá výšce kolenního kloubu průměrně vysokého chodce, viz *obr. 5-16*. Pro úhel A3 se ukazuje, že hodnota  $60^\circ$  je dostatečná pro odhození chodce do strany mimo vozovku, je ale nutné brát ohled na průjezdný průřez pro různé šířky vozidla a požadavek na uspořádání čelního článku z hlediska umístění předních dveří, kdy by bylo nutné použít jiný úhel A3.

Vlastní návrh, jak splnit tyto požadavky následuje v kapitole 5.3 *Tvary variant čelního článku vozidla*.

### 5.3 Tvary variant čelního članku vozidla

Na základě požadavků sepsaných v předchozích kapitolách jsem vybral tři čela, která reprezentují základní tvary čelního članku vozidla. Pro ně bude provedeno zhodnocení zástavbových rozměrů a vliv na kolizi s chodcem. Všechna čela mají shodnou šířku vozové skříně a vzdálenost předního kolizního bodu osy čepu otáčení podvozku,  $L = 5020$  mm. Přechod masky a čelního okna je ve výšce 1200 mm nad vozovkou, tato výška je nad smluvní výškou 1100 mm, která představuje 95% zastoupení výšky 6letého dítěte. Touto konfigurací je možné dosáhnout, že dojde ke kontaktu s hlavou dítěte právě s měkčeným obložením a sníží se tak následky zranění.

Získání informací z výzkumu o mechanických vlastnostech lidského těla pro definování matematických modelů s dobrou odezvou na realitu je velice obtížné, jelikož je to "know-how" společností, zabývajících se touto problematikou. V rámci spolupráce se Škoda Transportation a.s. jsem měl možnost spolupracovat s Ing. Stanislav Špírk Ph.D., který působí na ústavu Regionální technologický institut Západočeské Univerzity, kde mají k dispozici svůj matematický model člověka VIRTHUMAN znázorněný na obr. 5-17. [20]



Obr. 5-17 Matematický model člověka VIRTHUMAN, ZDROJ:

[https://www.researchgate.net/publication/312210384\\_Numerical\\_Tests\\_of\\_the\\_Virtual\\_Human\\_Model\\_Response\\_Under\\_Dynamic\\_Load\\_Conditions\\_Defined\\_in\\_Federal\\_Aviation\\_Regulation\\_Part\\_23562\\_and\\_25562\\_-\\_Preliminary\\_Study?\\_sg=AsQGHXnDctIMvf8IFZWBnTxBaF8c7u3jUb4-o7UrD3RWctIEGEnq9EelUgozGyNcTHY2uCHtaQ](https://www.researchgate.net/publication/312210384_Numerical_Tests_of_the_Virtual_Human_Model_Response_Under_Dynamic_Load_Conditions_Defined_in_Federal_Aviation_Regulation_Part_23562_and_25562_-_Preliminary_Study?_sg=AsQGHXnDctIMvf8IFZWBnTxBaF8c7u3jUb4-o7UrD3RWctIEGEnq9EelUgozGyNcTHY2uCHtaQ)

Díky tomu mohly být zvolené varianty čelních článků podrobeny simulaci za účelem zjištění odezvy tvaru na poranění chodce při srážce.

Plošné modely byly převedeny na Multi-body systém (MBS), ten simuluje pohyby a vzájemné působení soustavy těles mezi sebou. Tělesa jsou připojena kinematickými vazbami (pružina, tlumič) k těžišti článku. Tento systém je použit pro přiblížení výsledků poranění. Pro návrh materiálových vlastností panelů obložení bude nutné využít simulaci Metodou konečných prvků (MKP), ta bude využívat reálné vlastnosti materiálů.

Při kolizi byla uvažována rychlost vozidla  $v = 20$  km/h. Parametry matematických modelů figurín jsou u vedené v *tab. 5-1*.

*Tab. 5-1 Parametry matematických figurín [20]*

osoba	věk	výška	hmotnost
dospělý muž	25 [let]	178 [cm]	76 [kg]
dítě	6 [let]	120 [cm]	23 [kg]

V případě srážky je nutné brát v potaz, že velký vliv na průběh a následky kolize má nakročení chodce do vozovky, tedy jestli vyjde nejprve pravou nebo levou nohou a na jaké noze má přenesenou váhu, a tedy i stabilitu. Dále pak v podle reakce chodce, zda se natočí k vozidlu čelem nebo zády, popřípadě jestli se začne vracet zpět na chodník nebo utíkat před vozidlem. Jak daleko stihl před kontaktem s vozidlem dojít, tedy v jaké části ho vozidlo sráží, jestli je přímo v ose tramvaje, kde musí všechnu energii pohltit obložení nebo je strážena boční částí kde sklon obložení má přínos na jeho odhození mimo osu vozidla.

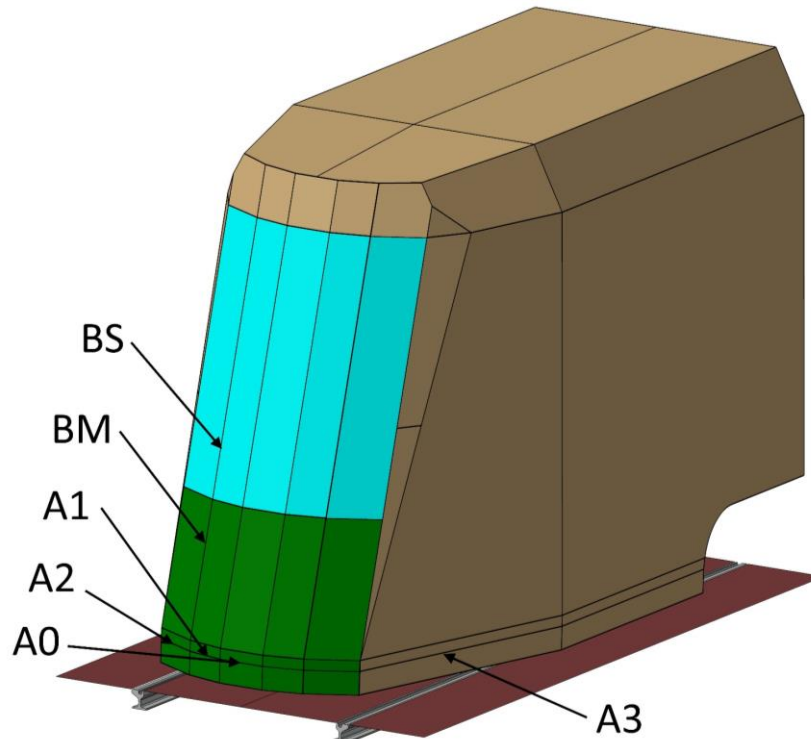
Nejvíce nepříznivá situace je pro chodce, který stojí v podélné ose vozidla. U něj dochází k minimálnímu odhození mimo osu. Z tohoto důvodu byly sklony čel testovány při srážce kdy chodec stojí bokem a zády k vozidlu.

Na základě výsledků simulací byla čela dále modifikována pro zlepšení tvaru s ohledem na zástavbové prostory funkčních částí. Mezi uvažované funkční části patří i deformační prvky pro srážku s jinými dopravními účastníky (OA, NA, tramvaj).

Umístěním deformačních prvků se ve své diplomové práci zabývá Bc. Jakub Seidl. Na základě konzultace s ním jsem vytvořil plochy v požadovaných výškách, které reprezentují základní zástavbové prostory těchto prvků.

### 5.3.1 Varianta provedení čela 1

Výchozí návrh plošného modelu pro simulaci je na *obr. 5-18*, parametry sklonů jsou uvedeny v *tab. 5-2*. Obrázky z průběhu simulace srážky je v *Příloha 6*.



*Obr. 5-18* Výchozí varianta čela 1

*Tab. 5-2* Parametry výchozí varianty čela 1

veličina	H	BM	BS	A1	A2	A3
hodnota	350 mm	15°	15°	15°	30°	60°

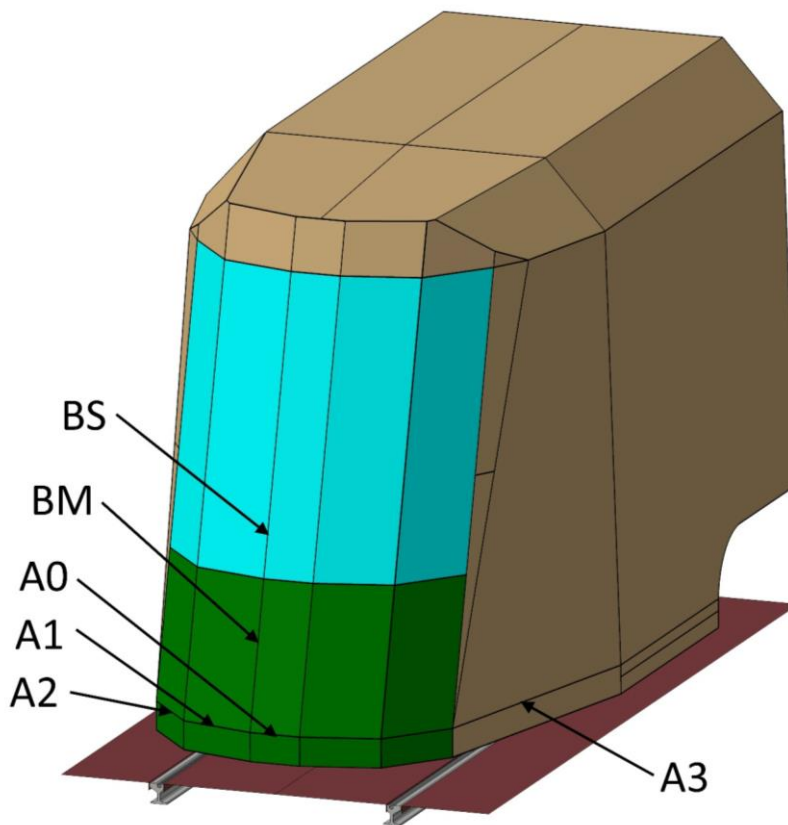
U této varianty je sklon masky shodný se sklonem čelního skla bez předsazení. V konfiguraci je vhodné umístit mechanismu stěrače nad horní příčku čelního skla viz kapitola *5.2.2 Umístění mechanismu stěrače*, aby nedošlo ke zranění chodce.

Při srážce chodce stojícího bokem k vozů hlava nepřišla do velkého kontaktu s čelním sklem, díky tomu bylo dosaženo hodnoty HPC = 54. Při srážce chodce stojícího zády k vozidlu bylo dosaženo hodnoty HPC = 571. To znamená, že pro tuto variantu byla splněna podmínka  $HPC < 1000$ .

Dalším poznatkem je, že sklon masky BM a čelního skla BS, nesmí být větší než 30° jinak dochází ke zvýšení poranění hlavy.

### 5.3.2 Optimalizovaná varianta čela 1

Na základě poznatků vznikl optimalizovaný návrh zobrazený na *obr. 5-19* s parametry v *tab. 5-3*. Úprava spočívala hlavně ve změně sklonů A2 a A3 vzhledem ke sklonům hrubé stavby čela vozu.



*Obr. 5-19 Optimalizovaná varianta čela 1*

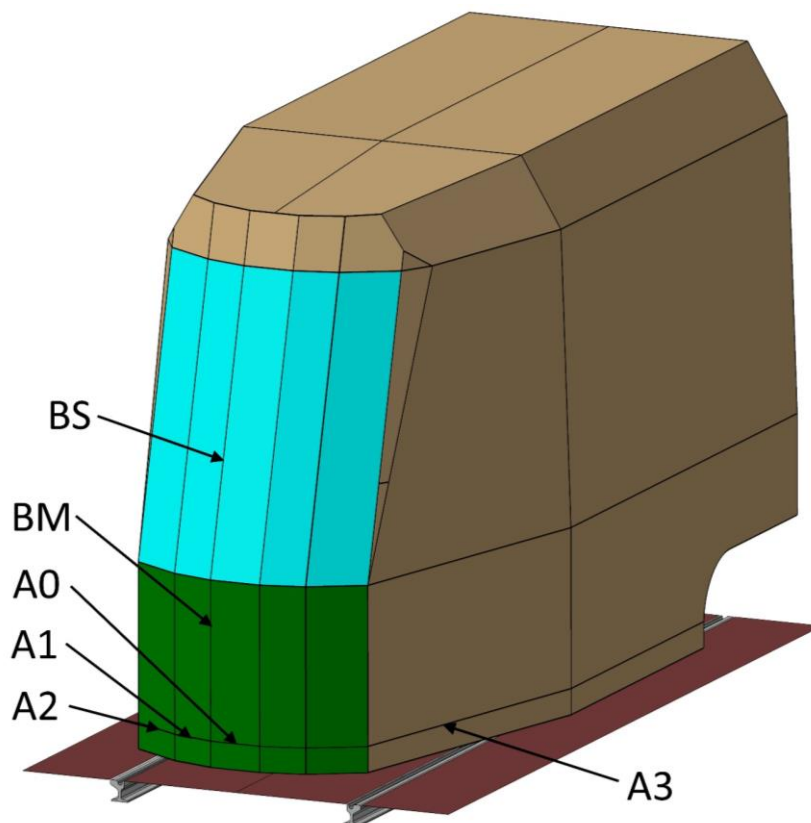
*Tab. 5-3 Parametry optimalizované varianty čela 1*

veličina	H	BM	BS	A1	A2	A3
hodnota	350 mm	15°	15°	15°	50°	77°

Tento tvar bude sloužit pro návrh obložení této varianty čela v kapitole 7.1 *Čelo varianta 1*.

### 5.3.3 Varianta provedení čela 2

Výchozí návrh plošného modelu pro simulaci je na *obr. 5-20*, parametry sklonů jsou uvedeny v *tab. 5-4*. Obrázky z průběhu simulace srážky je v *Příloha 7*.



*Obr. 5-20* Výchozí varianta čela 2

*Tab. 5-4* Parametry výchozí varianty čela 2

veličina	H	BM	BS	A1	A2	A3
hodnota	1 200 mm	0°	15°	15°	30°	60°

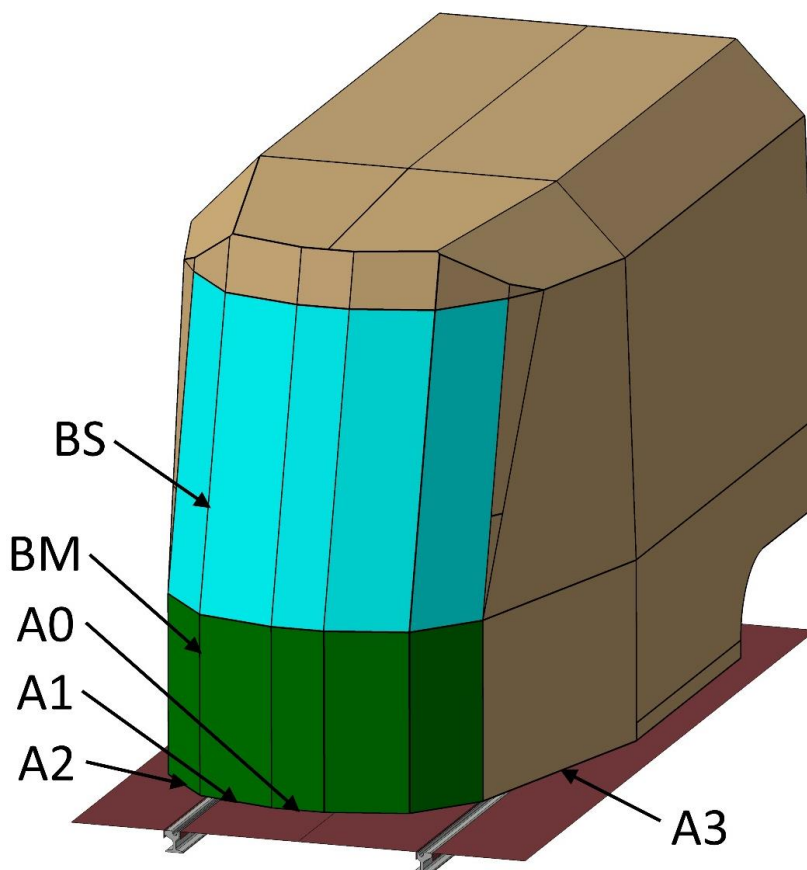
U této varianty není maska čela sklopená, sklopené je až čelní sklo. Mezi maskou a čelním oknem není žádné posunutí.

Toto čelo se ukazuje jako vhodné pro srážku s dospělým chodcem, kdy je sunut vozidlem před sebou a do strany mimo osu vozidla. Při srážce chodce stojícího bokem k vozu hlava nepřišla do velkého kontaktu s čelním sklem, díky tomu bylo dosaženo hodnoty HPC = 12. Při srážce chodce stojícího zády k vozidlu bylo dosaženo hodnoty HPC = 476. To znamená, že pro tuto variantu byla splněna podmínka  $HPC < 1000$ .

Nevýhoda je ale při srážce s dítětem. Dítě je pouze sraženo před vozidlo, jelikož maska nemá žádný sklon.

### 5.3.4 Optimalizovaná varianta čela 2

Optimalizovaný návrh je zobrazený na *obr. 5-21* s parametry v *tab. 5-5*. Úprava spočívala hlavně ve změně sklonů A2 a A3 vzhledem ke sklonům hrubé stavby čela vozu.



*Obr. 5-21 Optimalizovaná varianta čela 2*

*Tab. 5-5 Parametry optimalizované varianty čela 2*

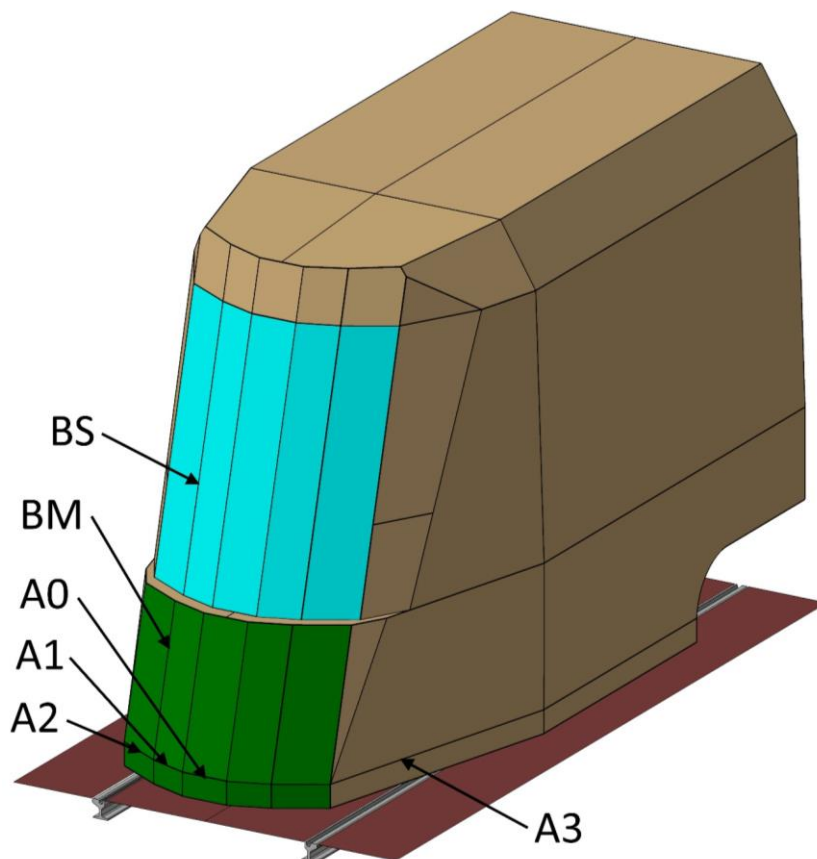
veličina	H	BM	BS	A1	A2	A3
hodnota	1 200 mm	0°	15°	15°	50°	77°

Tento tvar bude sloužit pro návrh obložení této varianty čela v kapitole 7.2 *Čelo varianta 2*.



### 5.3.5 Varianta provedení čela 3

Výchozí návrh plošného modelu pro simulaci je na *obr. 5-22*, parametry sklonů jsou uvedeny v *tab. 5-6*. Obrázky z průběhu simulace srážky je v *Příloha 8*.



Obr. 5-22 Výchozí varianta čela 3

Tab. 5-6 Parametry výchozí varianty čela 3

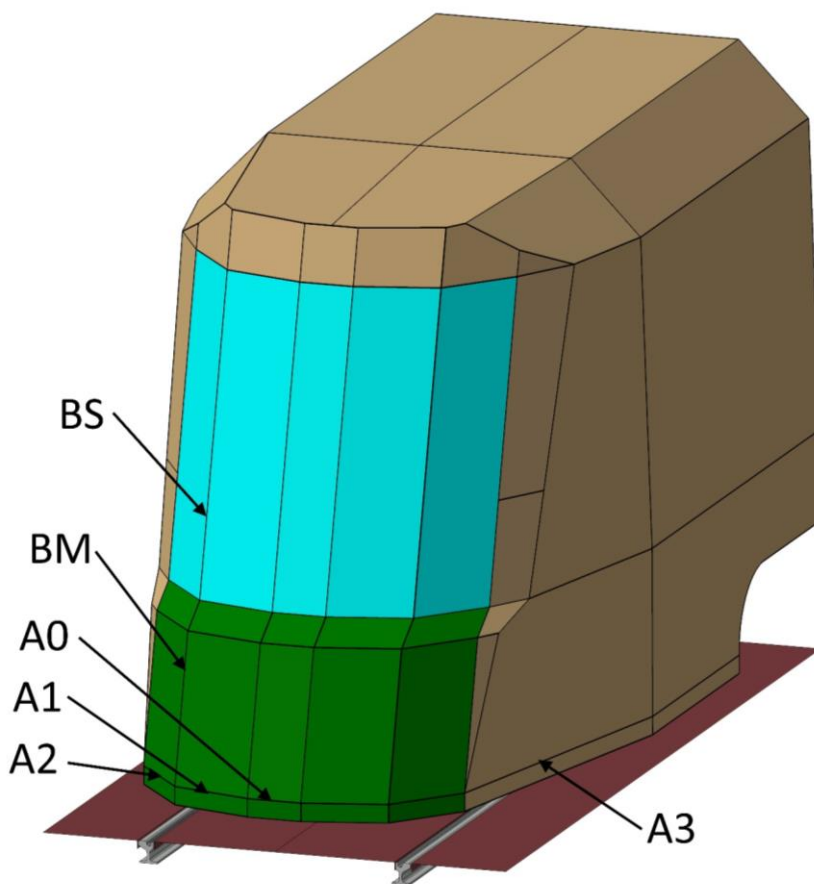
veličina	H	BM	BS	A1	A2	A3
hodnota	350 mm	15°	15°	15°	30°	60°

V případě tohoto čela má maska i čelní sklo stejný úhel sklopení, ale na rozdíl od varianty 1 je zde odsazení čelního skla a masky. Toto odsazení se dá využít například na prostor pro mechanismus stěrače, kde bude zachována podmínka dostatečného zakrytí výstupních hřídelů mechanismu.

Při srážce chodce stojícího bokem k vozu, ale dochází ke kontaktu s čelním sklem. Z toho vychází hodnota HPC = 552. Při srážce chodce stojícího zády k vozidlu bylo dosaženo hodnoty HPC = 1 038. Tyto hodnoty má za následek tvar odsazení čelního skla a masky vozidla. Zlepšení se dosáhne sklopením tohoto představení a dále pak jeho délkou do 100 mm.

### 5.3.6 Optimalizovaná varianta čela 3

Optimalizovaný návrh je zobrazený na *obr. 5-23* s parametry v *tab. 5-7*. Úprava spočívala hlavně ve změně sklonů A2 a A3 vzhledem ke sklonům hrubé stavby čela vozu a úpravě tvaru odsazení mezi čelním sklem a maskou tramvaje pro umístění mechanismu stěrače.



*Obr. 5-23 Optimalizovaná varianta čela 3*

*Tab. 5-7 Parametry optimalizované varianty čela 3*

veličina	H	BM	BS	A1	A2	A3
hodnota	350 mm	15°	15°	15°	50°	77°

Tento tvar bude sloužit pro návrh obložení této varianty čela v kapitole 7.3 *Čelo varianta 3*.

Řešení tvaru čela tramvaje je možné měnit směr dopadu chodce při srážce. Hlavním problémem je dopad hlavy chodce na tuhé čelní sklo. Pomocí vhodného materiálu obložení čela tramvaje, ale můžeme snížit dopadovou rychlost chodce a následné poranění hlavy a jiných končetin chodce. Proto se v další kapitole budu věnovat návrhem možnosti obložení čela tramvaje pro srážku s chodcem.

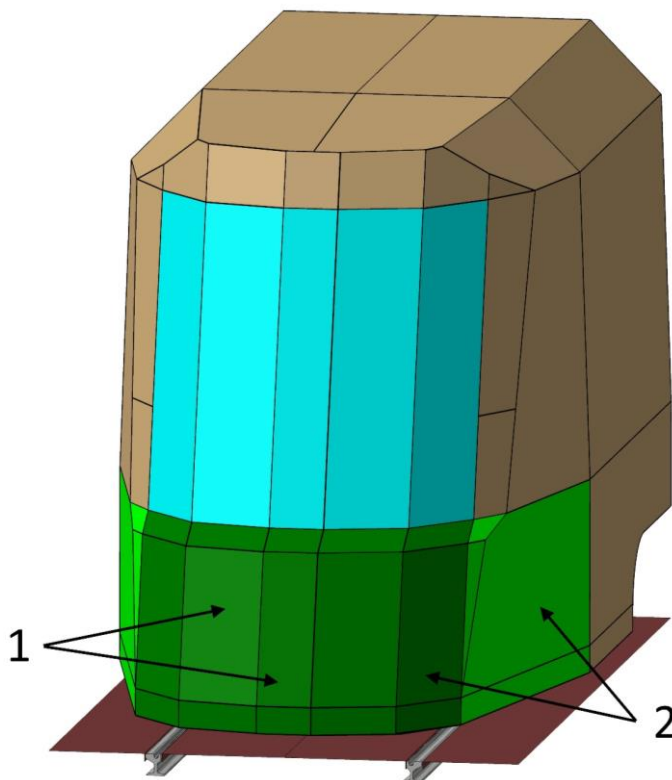
## 6 POŽADAVKY NA PANEĽY OBĽOŽENÍ

Hlavní funkce obložení z hlediska bezpečnosti je ochránit chodce před kontaktem s tuhými částmi vozidla, jako je hrubá stavba vozidla, změnit směr odhození chodce při srážce tak, aby nespadl pod vozidlo. Dalším požadavkem je pak pohltit celou nebo část deformační energie vzniklé při srážce, aby došlo ke snížení následných poranění chodce. Mezi další požadavky je možné zařadit například možnost odklápění panelů pro zpřístupnění spřáhla nebo doplnění servisních kapalin. [19]

### 6.1 Zohlednění účastníků dopravního provozu

V případě volby materiálu obložení je potřeba brát v potaz kromě srážky s chodcem také srážky s ostatními účastníky provozu jako jsou osobní, nákladní a jiná tramvajová vozidla. Je tedy potřeba zohlednit, co se stane s materiálem při kolizi v nízkých rychlostech, které by měly za následek u současných panelů vyráběných z laminátu roztržení nebo pouze oděrky. Požadavkem na materiál se tedy stává zachování vlastností i v případě těchto kolizí v nízkých rychlostech.

Pro ČELNÍ srážku tramvaje s chodcem viz *obr. 2-1*, je vhodné použít měkčeného materiálu. Použití měkčeného materiálu má zde velký přínos, jelikož je potřeba pohltit více energie než u ostatních typů srážek. U srážky s jiným vozidlem dochází v tomto směru k porušení nebo zničení a panel musí být stejně vyměněn. Tato plocha je zobrazena na *obr. 6-1 – 1*. V případě ČELNĚ-BOČNÍ srážky viz *obr. 2-1* je možné použít kombinaci měkčeného materiálu a laminátu, jelikož jsou zde plochy s dostatečným sklonem pro odhození chodce a není zde potřeba pohltit tolik energie. Tyto plochy jsou zobrazeny na *obr. 6-1 – 2*.



Obr. 6-1 Rozdělení panelů obložení podle účastníků dopravního provozu

1 – pro ČELNÍ srážku, 2 – pro ČELNĚ – BOČNÍ srážku

## 6.2 Rozdělení obložení čelního článku na funkční části

U panelů obložení je potřeba brát ohled na jejich dělení a upevnění. Tyto požadavky vznikají podle toho, jaké součásti má obložení zakrývat, popřípadě jaké další funkce od obložení očekáváme a jestli se připevňují na hrubou stavbu nebo přes dodatečné montážní prvky.

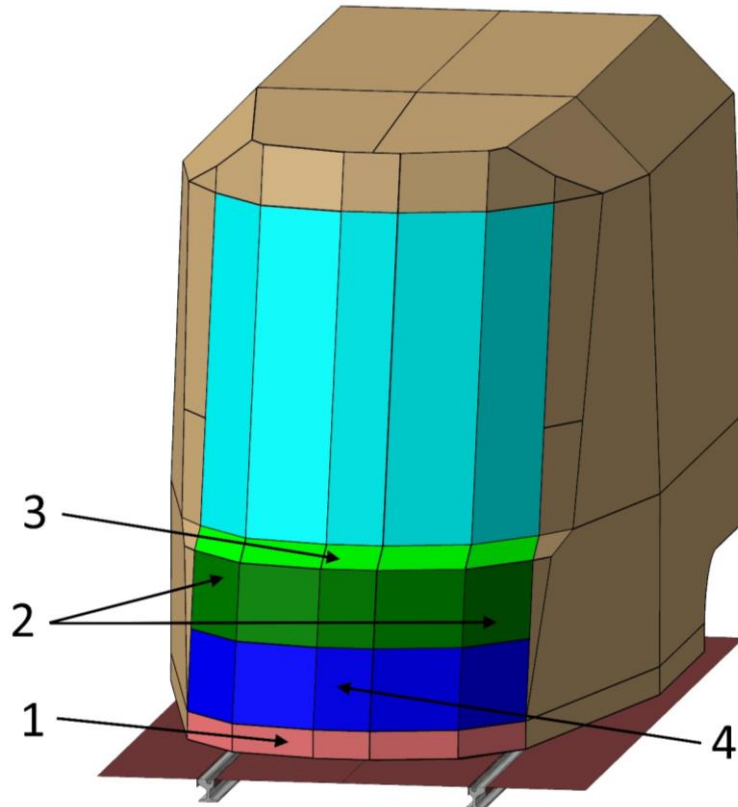
Spodní panely *obr. 6-2 – (1)* – tyto panely mají za úkol zakrýt mechanismus podjezdové ochrany a zároveň zajistit svou tuhostí, aby v případě srážky došlo k podkosení chodce pod jeho kolenem. To zajistí správný průběh nabalení chodce na kapotu tramvaje v případě srážky.

Panely obložení pro zakrytí světlometu *obr. 6-2 – (2)* – tyto panely umožňují zapuštění světlometů tak, aby nezpůsobily zranění a zároveň zachovaly dostatečně velký světelný kužel pro osvětlení při provozu za snížené viditelnosti. Středová část panelu dále slouží k zakrytí pohonu stíracího mechanismu a nádoby na vodu do ostřikovačů.

Panely obložení pro zakrytí mechanismu stěrače *obr. 6-2 – (3)* – středová část těchto panelů musí zajistit dostatečné zakrytí stíracího mechanismu, zvláště výstupních hřídelů motoru stěrače a zajistit přístup pro doplnění servisních kapalin, pokud je požadováno.

Panely obložení pro zakrytí mechanismu spřáhla *obr. 6-2 – (4)* – v případě těchto panelů je potřeba zajistit možnost odklopení za účelem zpřístupnění prostoru spřáhla.

Mechanismus odklápění a napojení panelů nesmí v případě srážky dovolit proniknutí chodce k tuhým součástem.



Obr. 6-2 Rozdělení obložení podle funkce

### 6.3 Zohlednění technických požadavků na panely obložení

Mezi základní materiálové požadavky na obložení patří splnění nehořlavosti podle normy ČSN EN 45 545 [21]. Dále pak možnost být povrchově upravitelné, jako je nanesení laku, aplikace barevné či ochranné fólie kvůli UV záření, strojové mytí a dostatečná životnost. Dalším požadavkem může být ochrana proti vandalům.

Panel obložení, popřípadě jeho povrchová úprava musí své vlastnosti zachovat při stanovených klimatických podmínkách pro provoz. Rozsah teplot jsem převzal z prospektu společnosti ŠT a.s., ten je  $-30^{\circ}\text{C}$  až  $+40^{\circ}\text{C}$ . Dále pak zajistit odolnost vůči vlhkosti, solným roztokům a dlouhodobou stabilitu.

Je vhodné, aby byla zajištěna dostatečná tvarovatelnost, díky tomu bude možné dosáhnout požadovaných tvarů pro splnění požadavků bezpečnosti a zároveň designu. Pro případ poškození je příhodné, aby dělení panelů bylo realizováno tak, že bude potřeba po srážce tramvaje s chodcem nebo jiným účastníkem dopravního provozu vyměnit co nejméně dílů obložení. To znamená, při porušení dílu na pravé straně nebude nutné vyměnit i prvky na levé straně. Příklad rozdělení je zobrazen na obr. 6-3.



Obr. 6-3 Příklad dělení panelů obložení čela tramvaje,

Zdroj: vlevo – KT4UA VinWay, <http://www.cs-dopravak.cz/zpravy/2018/1/6/>

vpravo – Alstom Citadis 302, [https://en.wikipedia.org/wiki/Le\\_Havre](https://en.wikipedia.org/wiki/Le_Havre)

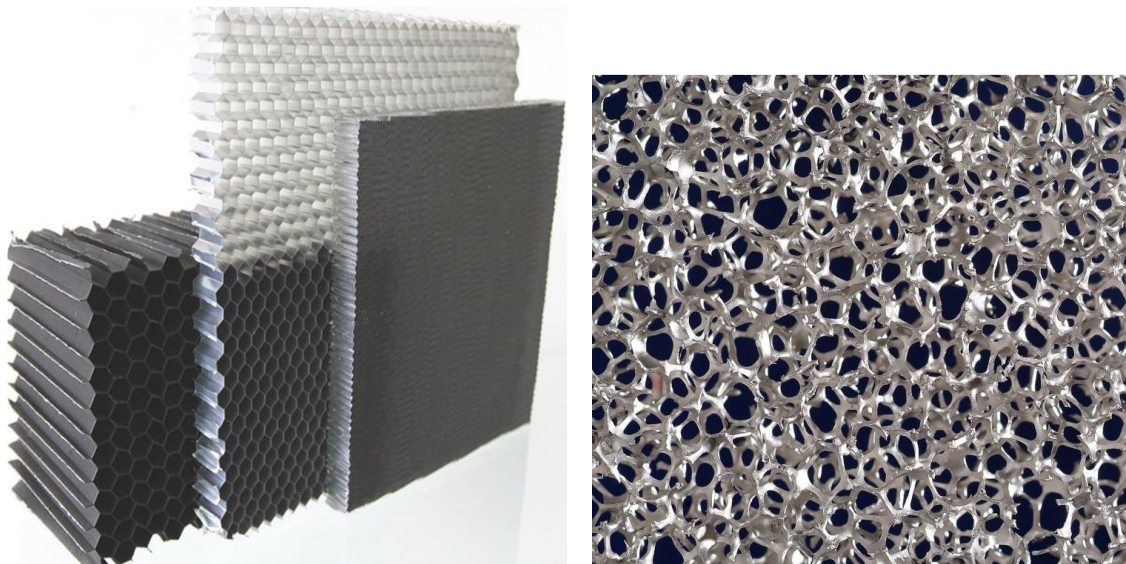
## 6.4 Mechanické vlastnosti panelů obložení

Mezi hlavní mechanické vlastnosti panelů obložení z hlediska bezpečnosti patří schopnost absorbovat energii, která vznikne při kolizi tramvaje s chodcem. Tato energie může být pohlcena dvojnásobným způsobem:

- plastická deformace,
- elastická deformace.

### 6.4.1 Plastická deformace

Deformační energie vzniklá při kolizi je zmařena pomocí deformace materiálu obložení. Mezi tyto materiály je možné zařadit plástve vyrobené z hliníku nebo z plastu, hliníkové pěny viz *obr. 6-4* nebo materiály vzniklé polymerací styrenu, jako je například polystyren (PS).



Obr. 6-4 Příklad materiálu obložení pro plastickou deformaci

Zdroj: vlevo – hliníková a plastová plástve, <http://cz.t-composites.net/>

vpravo – detail hliníkové pěny,

<http://www.bine.info/en/publications/publikation/metallschaum-ein-werkstoff-fuer-die-waermetchnik/>

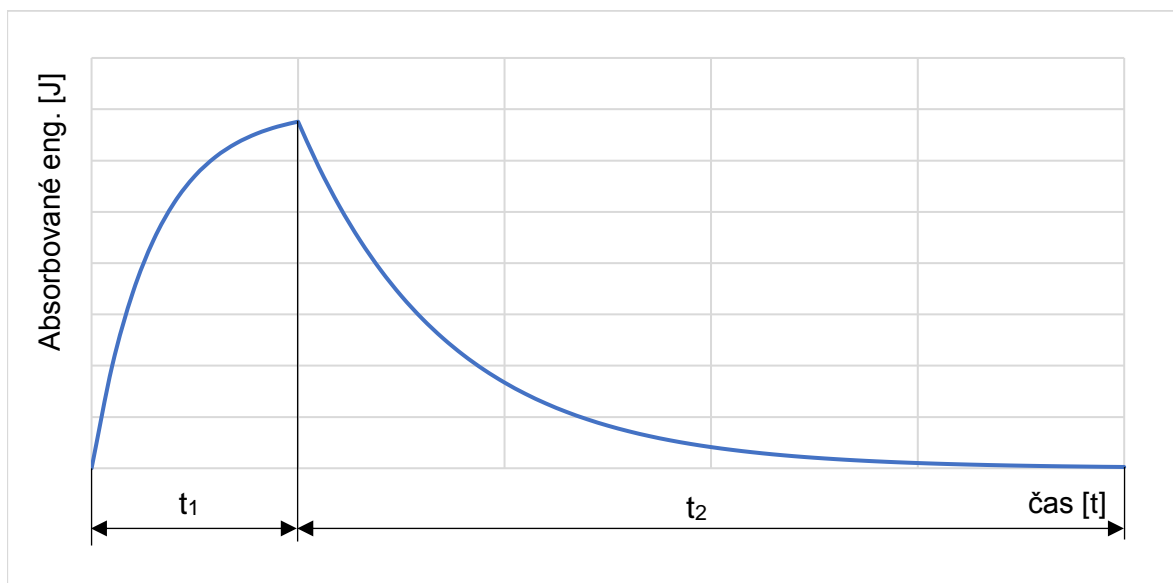
U pláství a pěn je velkou výhodou možnost navrhnout jejich deformační křivky volbou tloušťky stěn šestiúhelníku v případě plástve nebo vzduchovými bublinami v případě pěny. Nevýhodou je, že v případě kolize dojde k jejich porušení a vozidlo musí odjet do příslušné vozovny, kde dojde k výměně porušených dílů. To by znamenalo, že na určitou část provozní doby je vozidlo odstavené a dopravní podnik musí zařídit náhradní spoj. Řešením zkrácení doby odstávky tramvaje může být v podobě způsobu upevnění panelů na vozidlo, tedy použití montování místo lepení.

I když je záměrem předcházet kolizím s chodci, musíme počítat, že se vozidlo s takovou situací setká za svou životnost vícekrát. Z tohoto důvodu je vhodné se zaměřit na druhý způsob pohlcení deformační energie.

### 6.4.2 Elastická deformace

V tomto případě je deformační energie při srážce absorbována panelem obložení do meze elasticity a pak se panel vrátí do původního stavu, tento jev se dá nazvat jako vratný zdvih. Díky tomu může panel za svou životnost absolvovat tyto kolize vícekrát.

V případě panelu s vratným zdvihem je potřeba dát pozor na dobu, kdy se panel bude vracet zpět do své původní polohy. Pokud bude tato doba příliš krátká, panel by se choval jako pružina a došlo by k odražení chodce. Toto odražení by mohlo mít za následek zvýšení zrychlení působícího na chodce. Panel by se tedy měl do své původní podoby vracet pomalu, tento požadavek je vyjádřen na *graf. 6-1*.



*Graf. 6-1 Závislost absorpce energie a návrat do původního stavu na čase*

kde:

- $t_1$  je doba, za kterou panel obložení a jeho upevnění musí absorbovat celou nebo část energie vzniklé při nárazu
- $t_2$  je doba, za kterou se panel obložení a jeho upevnění musí vrátit do původního stavu

Mezi možné poranění z náhlého navrácení do původní polohy se dá zařadit tzv. opěrkový syndrom (whiplash). Toto zranění se dá často najít u připoutaných pasažérů ve vozidlech při nárazu do opěrky hlavy, ale i např. při pádu z kola nebo při jiných sportovních aktivitách. Jedná se o náhlé zpomalení pohybu hlavy směrem vpřed, zastavení a návratu zpět. To vyvolá velký moment působící na krční obratel.

Mezi materiály, použitelné pro panely obložení vozidla, můžeme zařadit například panely z polyuretanu (PUR). Ty nabízí například společnost Hübner Group a jsou opatřené vrstvou barvy a laku kvůli ochraně proti povětrnostním podmínkám. Obložení vozidla vzniklé za této spolupráce je možné vidět na vozidle Bombardier Flexity 2 zobrazené na obr. 6-5.



Obr. 6-5 Tramvaj Bombardier Flexity 2 s měkčenou maskou z PUR materiálu

Zdroj: nahoře – Bombardier Flexity 2, Antverpy, Belgie, <https://www.bombardier.com/en/home.html>

dole – přední panel z PUR materiálu, [https://www.hubner-group.com/en/hubner\\_group.html](https://www.hubner-group.com/en/hubner_group.html)



Další možností by bylo využití viskoelastické pěny známé jako paměťové pěny, jejich základem je polyuretan a přídavné prvky zvyšující viskozitu a hustotu. Tyto materiály se používají převážně na výrobu matrací a polštářů. Výhodou těchto materiálů je jejich pomalý návrat do původního tvaru, což splňuje stanovenou podmínku. Příklad chování je zobrazen na obr. 6-6.



Obr. 6-6 Chování viskoelastické pěny

Zdroj: nahoře – zatížená, <https://www.thesleepjudge.com/what-is-memory-foam/>

dole – uvolnění, <http://www.colchoneriamontserrat.com/problemas-con-colchones-viscoelasticos/>

V případě panelů obložení z viskoelastické pěny je potřeba zajistit povrchovou úpravu, aby panel byl schopen odolávat vlivům vnějšího okolí. Za vnější vlivy považuji například nenasávat vodu, nekřehnout v nižších provozních teplotách ( $-30^{\circ}\text{C}$ ) a netavit se při vyšších provozních teplotách ( $+40^{\circ}\text{C}$ ). Další otázkou je pak stárnutí materiálu jako takového. Je vhodné, aby panely obložení měly dostatečnou životnost, i když je pravděpodobné, že budou nahrazeny dříve vzhledem k nehodám s ostatními vozidly.

Mezi výhody těchto materiálů patří ta vlastnost, že v případě porušení nevytváří třísky a ostré hrany, jako se může stát u většího poškození laminátových panelů zobrazených na obr. 6-7, které by mohly zapříčinit dodatečné poranění chodce.



Obr. 6-7 Možnost porušení laminátového obložení při větší kolizi s vozidlem

Zdroj: Hasičská záchranná služba Praha – <http://www.hzscr.cz/hzs-hlavniho-mesta-prahy.aspx>

## 6.5 Upevnění panelů obložení

Pro pohlcení energie je možné využít kromě vlastností panelu obložení i jeho prohnutí, které mu dovolí jeho připevnění. Nesmí však dojít k takovému prohnutí, aby se chodec dostal až k tuhým součástem tramvaje (hrubá stavba, spřáhlo).

Z tohoto důvodu je potřeba vytvořit dostatečný prostor pod panelem.

Upevnění panelů obložení je možné realizovat dvojím způsobem:

- lepením,
- montáží.

### 6.5.1 Upevnění pomocí lepení

Výhodou je jednoduchá montáž, kterou je možné kompenzovat nepřesnosti hrubé stavby. Dále pak, že vrstva lepidla může svou pružností dovolit prohnutí panelu a přispět s pohlcením energie při srážce. Nevýhodou může být rychlost návratu panelu do původní polohy vzhledem k dodatečnému zranění. Dále pak dlouhá doba oprav v případě vyměňování poškozených panelů kvůli technologii lepení, kde je potřeba dodržet vytvrzovací doby na vytvrzení lepidla.

### 6.5.2 Upevnění pomocí montáže

V případě montáže panelů obložení se výrazně zkrátí jejich doba výměny. Vzniká však požadavek na přesnou výrobu hrubé stavby nebo míst jejich upevnění, aby po montáži panelu nevznikaly velké spáry mezi panely. Dále je potřeba zajistit, aby se chodec při srážce nedostal k tuhým částem určeným k připevnění panelu. To by mohlo způsobit zranění chodce.

Z těchto požadavků vychází, že je nutné, aby byla montáž panelu provedena z vnitřní části obložení, aby na povrchu nebyly tuhé součásti jako například hlava šroubu. To klade požadavek na dostatek prostoru pod obložím pro přístup k montážním prvkům.

V případě použití desek vyrobených z PUR pěny nebo sendviče z viskoelastické pěny je potřeba na vnitřní část připevnit tuhý základ v podobě pásoviny například lepením. Na tuto pásovinu se pak připevní dřívky šroubů, které se pak vloží do příslušných míst určených pro montáž obložení. Tato pásovina navíc zajistí pevnou oporu obložení.



Obr. 6-8 Montáž panelu obložení na hrubou stavbu

Znamená to tedy, že tyto místa jsou nejvíce kritické při srážce s chodcem a je potřeba obložení dimenzovat tak, aby v těchto místech měli dostatečné vlastnosti pro pohlcení energie.

Mimo místa upevnění má pak panel možnost prohnutí a tam je potřeba kontrolovat, aby nedošlo k jeho roztržení a aby se neprohнул až k tuhým částem.

## 6.6 Velikost deformačních energií na čele článku

Pro určení pracovního prostoru panelů obložení vyjdu z požadavků na tloušťku panelů obložení z potřebné energie, kterou musí panel při srážce pohltit, tak aby nedošlo k poranění chodce.

Pro výpočet energie, které se při srážce tramvaje s chodcem dosáhne vyjdu z hmotností zkušebních těles z *tab. 4-7* a rychlosti při které ke srážce dojde. Pro základní návrh budu předpokládat nárazovou rychlost z předpisu [16], který stanovuje rychlost srážky na  $v = 20$  km/h.

Energie je vypočítána podle vztahu pro výpočet kinetické energie (11).

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_{zkustel} \cdot v_{dop}^2 \quad (11)$$

kde:

$m_{zkustel}$  je hmotnost příslušného zkušebního tělesa

$v_{dop}$  je dopadová složka kolizní rychlosti na panel obložení

Normálová složka dopadové rychlosti se vypočte podle příslušných sklonů panelů uvedených v tabulkách variant čel podle vztahu (12).

$$v_{dop} = \cos(A) \cdot \cos(B) \cdot v_{kol} \quad (12)$$

kde:

A je příslušný sklon panelu v rovině půdorysu

B je příslušné sklopení panelu v rovině bokorysu

$v_{kol}$  je kolizní rychlost

Hodnoty energií připadající na panel obložení se liší podle jejich sklonu, jelikož panel musí pohltit pouze normálovou složku působící síly. Tečná složka přispívá k odhození chodce.

Dále je potřeba rozdělit panely masky na panely pod a nad hranou  $H = 350$  mm. Z toho vychází určení části chodce, a tedy zkušebního tělesa, který na příslušný panel dopadá.

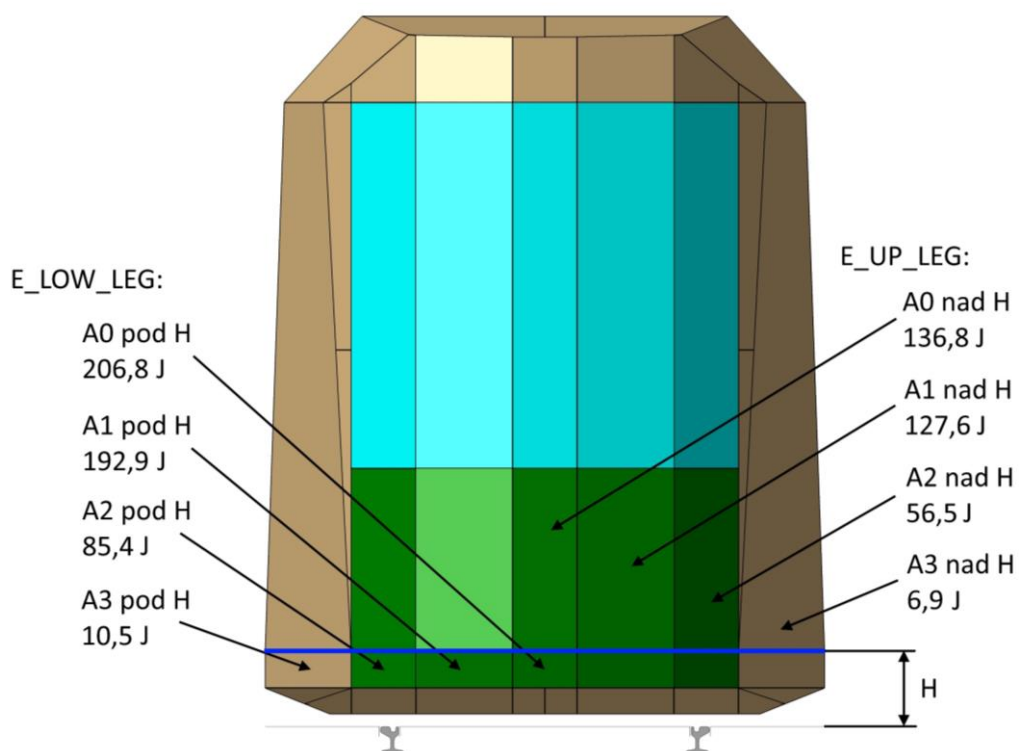
Pro panely, které jsou pod hranou H ( $H < 350$  mm nad vozovkou) uvažují zkušební těleso spodní části nohy viz 4.2.6 *Zkušební model nohy člověka (stehenní a holení část, koleno)*. Pro panely nad touto hranou uvažují zkušební těleso horní části nohy viz 4.2.5 *Zkušební model horní části nohy člověka (stehenní část)*.

## 6.6.1 Energie panelů na optimalizované variantě čela 1

Sklony panelů varianty čela jsou uvedené v *tab. 5-3*. Příslušné energie impaktorů jsou sepsány v *tab. 6-1*. Ty jsou pro názornost zobrazeny přímo na čele příslušné varianty na *obr. 6-9*.

Tab. 6-1 Energie impaktorů na čele varianty 1

	A0	A1	A2	A3
sklon masky nad H [°]	15	15	15	15
sklon masky pod H [°]	0	0	0	0
$E_{UP\_LEG}$ impaktor [kJ]	136,78	127,62	56,52	6,92
$E_{LOW\_LEG}$ impaktor [kJ]	206,79	192,94	85,44	10,46



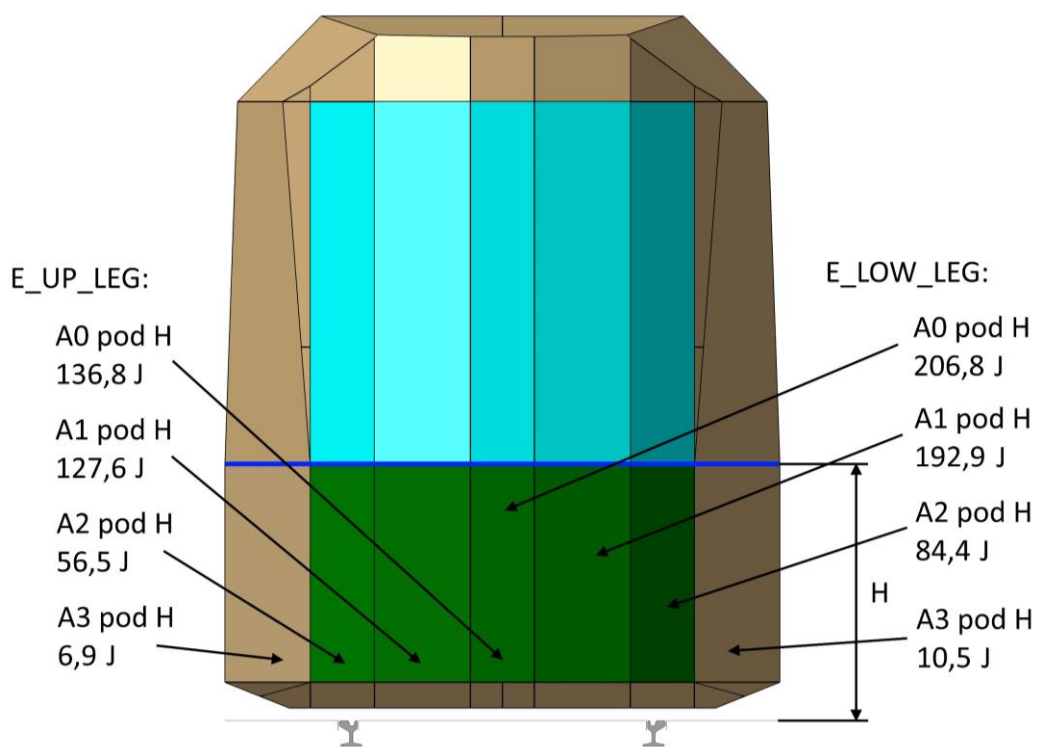
Obr. 6-9 Mapa energií na čele varianty 1

## 6.6.2 Energie panelů na optimalizované variantě čela 2

U této varianty je hrana H ve výšce 1 200 mm ( $H = 1200$  mm) na rozdíl od ostatních variant. Sklony panelů varianty čela jsou uvedené v *tab. 5-5*. Příslušné energie impaktorů jsou sepsány v *tab. 6-2*. Ty jsou pro názornost zobrazeny přímo na čele příslušné varianty na *obr. 6-10*

Tab. 6-2 Energie impaktorů na čele varianty 2

	A0	A1	A2	A3
sklon masky pod H [°]	0	0	0	0
$E_{UP\_LEG}$ impaktor [kJ]	136,78	127,62	56,52	6,92
$E_{LOW\_LEG}$ impaktor	206,79	192,94	85,44	10,46



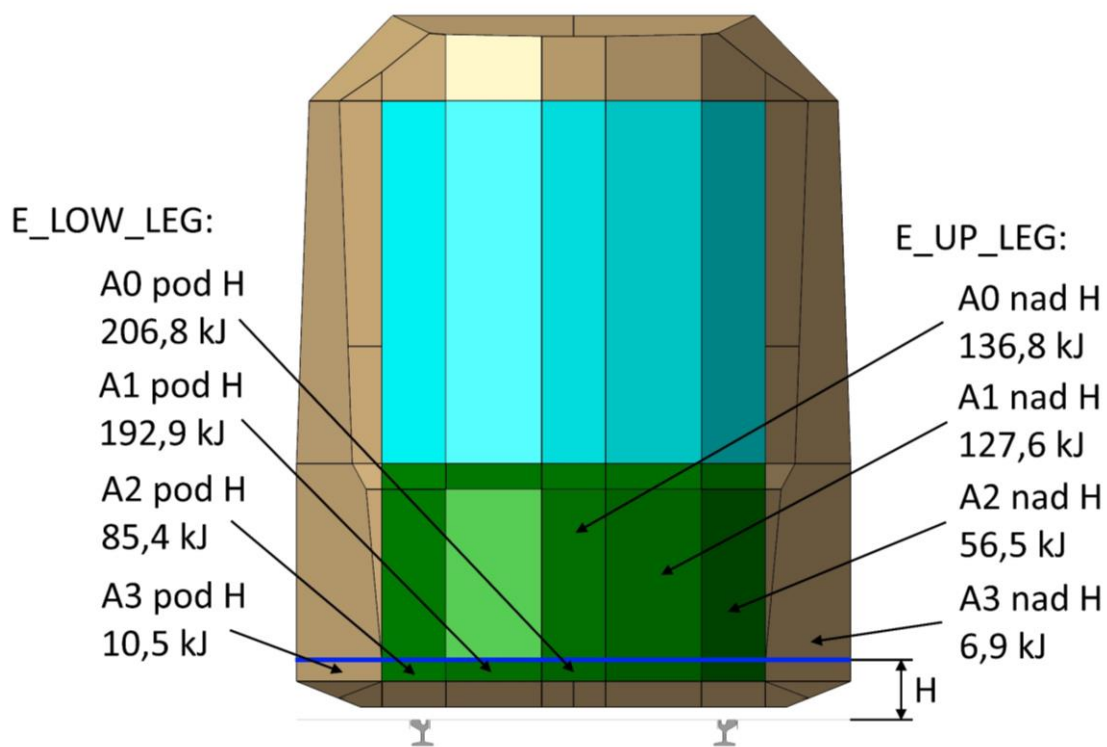
Obr. 6-10 Mapa energií na čele varianty 2

## 6.6.3 Energie panelů na optimalizované variantě čela 3

Sklohy panelů varianty čela jsou uvedené v *tab. 5-7*. Příslušné energie impaktorů jsou sepsány v *tab. 6-3*. Ty jsou pro názornost zobrazeny přímo na čele příslušné varianty na *obr. 6-11*.

*Tab. 6-3 Energie impaktorů na čele varianty 3*

	A0	A1	A2	A3
sklon masky nad H [°]	15	15	15	15
sklon masky pod H [°]	0	0	0	0
UP_LEG impaktor [kJ]	136,78	127,62	56,52	6,92
LOW_LEG impaktor [kJ]	206,79	192,94	85,44	10,46



*Obr. 6-11 Mapa energií na čele varianty 3*

Pro tuto variantu je nutné zkontrolovat obložení v místě výstupů z mechanismu stěrače podle finálního tvaru obložení které bude splňovat možnost pohybu ramen stěrače.

## 6.7 Návrh pracovního prostoru

Pro výpočet potřebného prostoru pro panel obložení vyjdu ze vztahu pro ideální výpočet práce. Za práci dosadím hodnotu kinetické energie impaktoru a vypočtu dráhu, na které je potřeba zmařit energii. Za sílu dosadím limitní hodnotu, která může na příslušný impaktor působit. Výpočet je zobrazen ve vztahu (13)

$$E_k = F_{lim\ imp} \cdot s_{prac\ pros} \Rightarrow s_{prac\ pros} = \frac{E_k}{F_{lim\ imp}} \quad (13)$$

kde:

$F_{lim\ imp}$  je limitní síla působící na příslušný impaktor

$s_{prac\ pros}$  je velikost potřebné dráhy

Pro určení potřebného prostoru vyjdu z charakteristiky síly na dráze, kterou by panely obložení v ideálním případě měly. Vzhledem k nedostatku informací ohledně vhodného materiálu předpokládám, že dojde k 60 % využití ideální charakteristiky. V případě že se materiál objeví, je možné předpoklad zpřesnit.

### 6.7.1 Pracovní prostor pro variantu 1

Pro výpočet posuvu vycházím ze vztahu (13), kde za energie dosazuji příslušné hodnoty podle rozložení panelu a limitní sílu příslušného impaktoru.

Tab. 6-4 Hodnoty posuvu pro 100 % využití ideální charakteristiky

	A0	A1	A2	A3
s_UP_LEG [mm]	29,32	27,36	12,11	1,48
s_LOW_LEG [mm]	51,70	48,23	21,36	2,62

Tab. 6-5 Hodnoty posuvu pro 60 % využití ideální charakteristiky

	A0	A1	A2	A3
s_UP_LEG [mm]	45,59	42,54	18,84	2,31
s_LOW_LEG [mm]	86,16	80,39	35,60	4,36

Pro určení odsazení limitních ploch pro prostor panelů obložení vyjdu ze zaokrouhlených hodnot posuvu pro 60 % využití ideální charakteristiky viz tab. 6-6.

Tab. 6-6 Výsledné hodnoty posuvu limitních ploch varianty 1

	A0	A1	A2	A3
s_UP_LEG [mm]	46	43	19	3
s_LOW_LEG [mm]	87	81	36	5



### 6.7.2 Pracovní prostor pro variantu 2

Pro výpočet posuvu vycházím ze vztahu (13), kde za energie dosazují příslušné hodnoty podle rozložení panelu a limitní sílu příslušného impaktoru.

Tab. 6-7 Hodnoty posuvu pro 100 % využití ideální charakteristiky

	A0	A1	A2	A3
s_UP_LEG [mm]	29,32	27,36	12,11	1,48
s_LOW_LEG [mm]	51,70	48,23	21,36	2,62

Tab. 6-8 Hodnoty posuvu pro 60 % využití ideální charakteristiky

	A0	A1	A2	A3
s_UP_LEG [mm]	48,87	45,59	20,19	2,47
s_LOW_LEG [mm]	86,16	80,39	35,60	4,36

Pro určení odsazení limitních ploch pro prostor panelů obložení vyjdu ze zaokrouhlených hodnot posuvu pro 60 % využití ideální charakteristiky viz tab. 6-6.

Tab. 6-9 Výsledné hodnoty posuvu limitních ploch varianty 2

	A0	A1	A2	A3
s_UP_LEG [mm]	49	46	31	3
s_LOW_LEG [mm]	87	81	36	5

### 6.7.3 Pracovní prostor pro variantu 3

Pro výpočet posuvu vycházím ze vztahu (13), kde za energie dosazují příslušné hodnoty podle rozložení panelu a limitní sílu příslušného impaktoru.

Tab. 6-10 Hodnoty posuvu pro 100 % využití ideální charakteristiky

	A0	A1	A2	A3
s_UP_LEG [mm]	27,36	25,52	11,30	1,38
s_LOW_LEG [mm]	51,70	48,23	21,36	2,62

Tab. 6-11 Hodnoty posuvu pro 60 % využití ideální charakteristiky

	A0	A1	A2	A3
s_UP_LEG [mm]	45,59	42,54	18,84	2,31
s_LOW_LEG [mm]	86,16	80,39	35,60	4,36

Pro určení odsazení limitních ploch pro prostor panelů obložení vyjdu ze zaokrouhlených hodnot posuvu pro 60 % využití ideální charakteristiky viz tab. 6-6.

Tab. 6-12 Výsledné hodnoty posuvu limitních ploch varianty 3

	A0	A1	A2	A3
s_UP_LEG [mm]	46	43	19	3
s_LOW_LEG [mm]	87	81	36	5

Z příslušných tabulek pro posunutí limitních ploch je vidět, že při zaokrouhlení na stranu bezpečnosti, vzhledem k podobnosti sklonů čel, je možné stanovit pro všechny varianty čel stejné posunutí.

Tab. 6-13 Hodnoty posuvu limitních ploch od obálky čela tramvaje

	A0	A1	A2	A3
s_UP_LEG [mm]	50	50	40	10
s_LOW_LEG [mm]	90	90	40	10

Výsledné posunutí limitních ploch bude bráno v potaz pro řešení zástavbových prostorů pro jednotlivé varianty čel tramvaje.

## 6.8 Stanovení limitního napětí

Pro lepší stanovení vlastností materiálu je možné vyjít z napětí, kterým bude působit končetina chodce na panel obložení. K určení tohoto napětí vyjdu z limitní hodnoty síly působící na impaktor a jeho plochu, která přijde s panelem obložení do kontaktu.

Pro impaktor spodní části nohy chodce viz kapitola 4.2.6 *Zkušební model nohy člověka (stehenní a holení část, koleno)*, (*low\_leg impaktor*) stanovím zjednodušeně jeho plochu jako polovinu válce o průměru  $d = 100$  mm.

$$S_{LOW\_LEG} = 0,5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{2} \cdot v = 0,5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{100}{2} \cdot 494 = 77\,598 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (14)$$

Napětí pak vypočtu podle vztahu (15).

$$\sigma_{LOW\_LEG} = \frac{F_{UP\_LEGLim}}{S_{UP\_LEG}} = \frac{5000}{77\,598} = 0,064 \text{ [MPa]} \quad (15)$$

Pro impaktor horní části nohy chodce viz kapitola 4.2.5 *Zkušební model horní části nohy člověka (stehenní část)*, (*up\_leg impaktor*) stanovím zjednodušeně jeho plochu jako jeho výšku a šířku.

$$S_{UP\_LEG} = v \cdot h = 350 \cdot 300 = 105\,000 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (16)$$

Napětí pak vypočtu podle vztahu (15).

$$\sigma_{UP\_LEG} = \frac{F_{LOW\_LEGLim}}{S_{LOW\_LEG}} = \frac{4000}{105\,000} = 0,038 \text{ [MPa]} \quad (17)$$

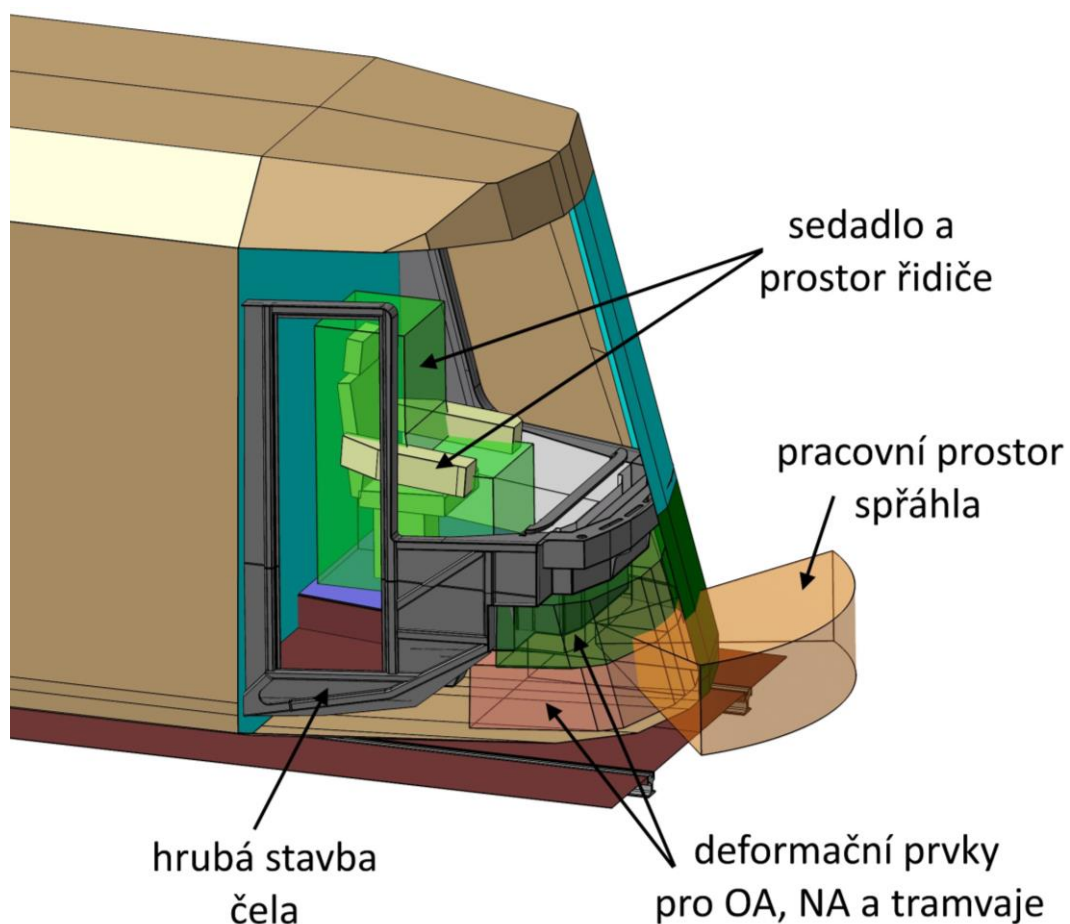
Díky těmto hodnotám napětí a posuvů je možné se lépe orientovat v křivkách napětí – deformace, které se nejčastěji udávají jako vlastnosti materiálu.

## 7 POSOUZENÍ ZÁSTAVBOVÝCH PROSTORŮ

Zástavbové prostory na čelním článku tramvaje byly sestavovány za předpokladu co nejkratší kabiny s jednoduchými dveřmi pro vstup na stanoviště řidiče. V případě změny konfigurace kabin je nutno ověřit případnou změnu sklonů panelů. Pro další optimalizace je nutné na hrubou stavu umístit další dílčí součásti a posoudit zástavbové prostory s ohledem na posunutí limitních plochy viz *tab. 6-13*.

### 7.1 Čelo varianty 1

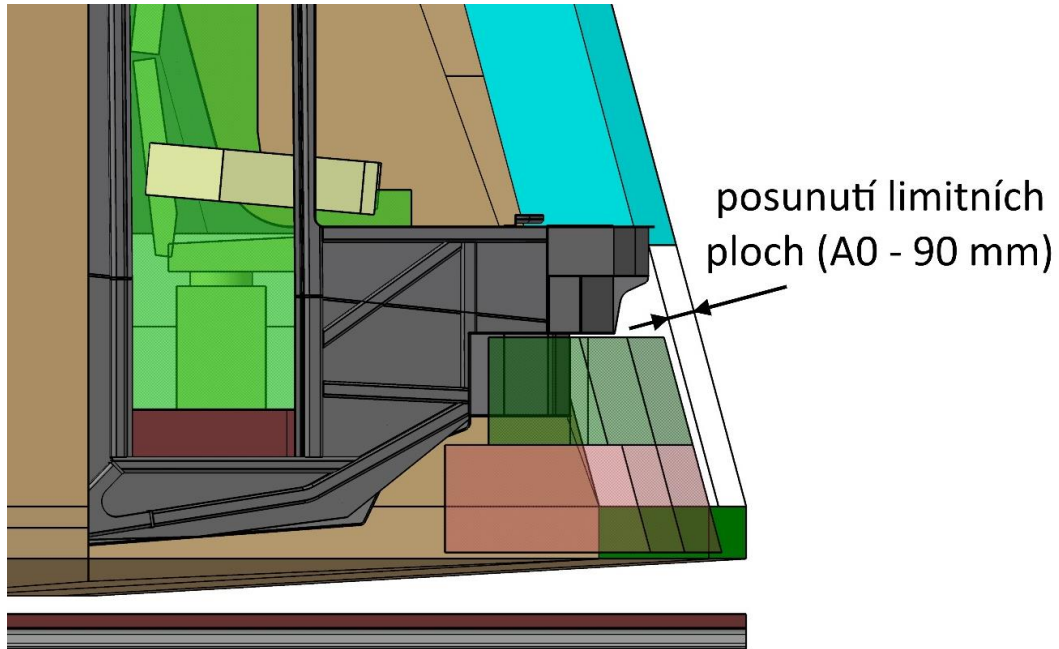
Pro optimalizovaný návrh čela tramvaje viz *obr. 5-19* jsem provedl studii možností umístění dílčích prvků za podmínky splnění minimálního prostoru pro pracovní zdvih panelů obložení definovaný v *tab. 6-13*.



*Obr. 7-1 Zástavbový prostor dílčích součástí varianty 1*

Z řešení na *obr. 7-1*, je vidět, že pracovní prostor spřáhla (oranžový prostor) klade omezující požadavky na prostor deformačních prvků (červený a zelený prostor). Dále pak podle druhu spřáhla například automatické skládací spřáhlo zvýší požadavky na zástavbový prostor.

Na obr. 7-2 je znázorněno posunutí limitních ploch. Tento prostor je minimálním prostorem pro správnou funkci panelů obložení z hlediska pasivní bezpečnosti při srážce s chodcem. Je vhodné, aby dílčí součásti byly umístěny ve větší vzdálenosti, než je minimální stanovená, tím se zajistí lepší ochrana chodce pře tuhými součásti.



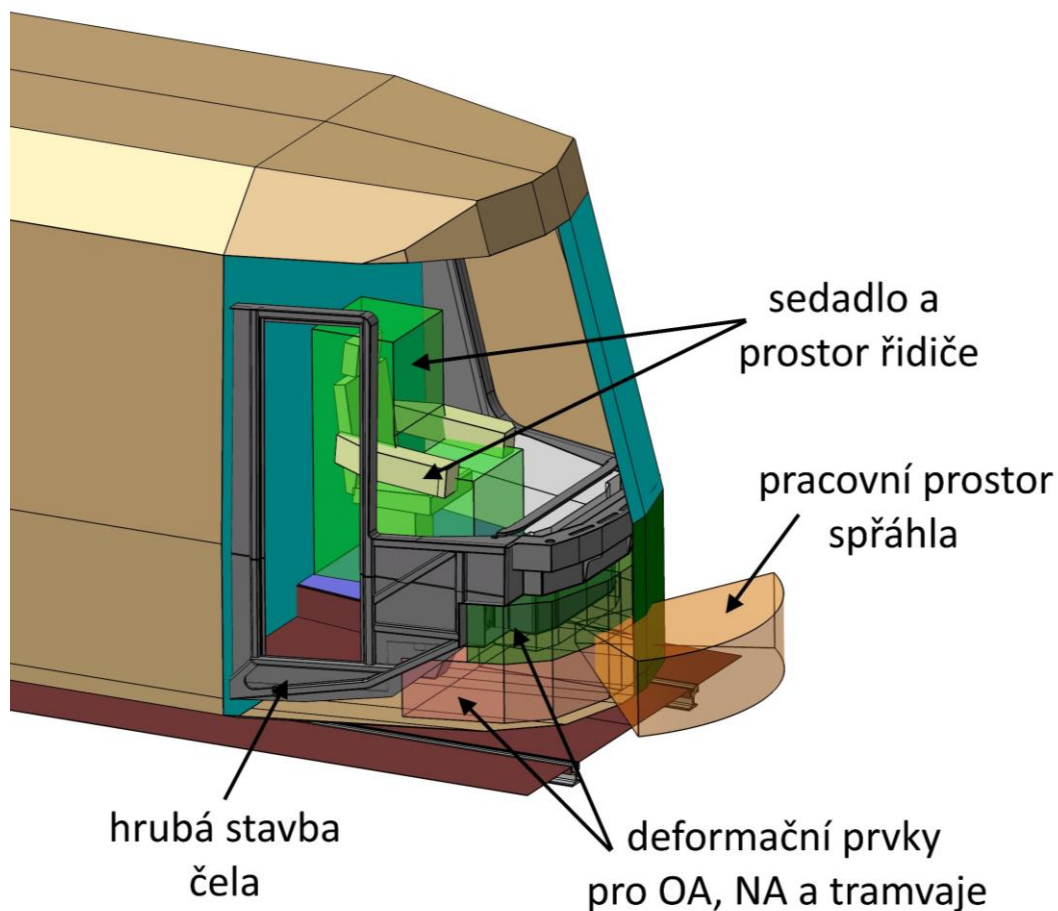
Obr. 7-2 Posunutí limitních ploch na variante 1

V této konfiguraci je zajištěn prostor pro umístění deformačních prvků pro srážku s ostatními účastníky silničního provozu s ohledem na jejich rozdílné deformační délky podle typu sráženého vozidla.

Další omezení je na prostor pro umístění podjezdové ochrany. Ta by v ideálním případě měla být umístěná v prostoru blízko deformačních prvků pro OA (červený prostor) nebo před nimi.

## 7.2 Čelo varianta 2

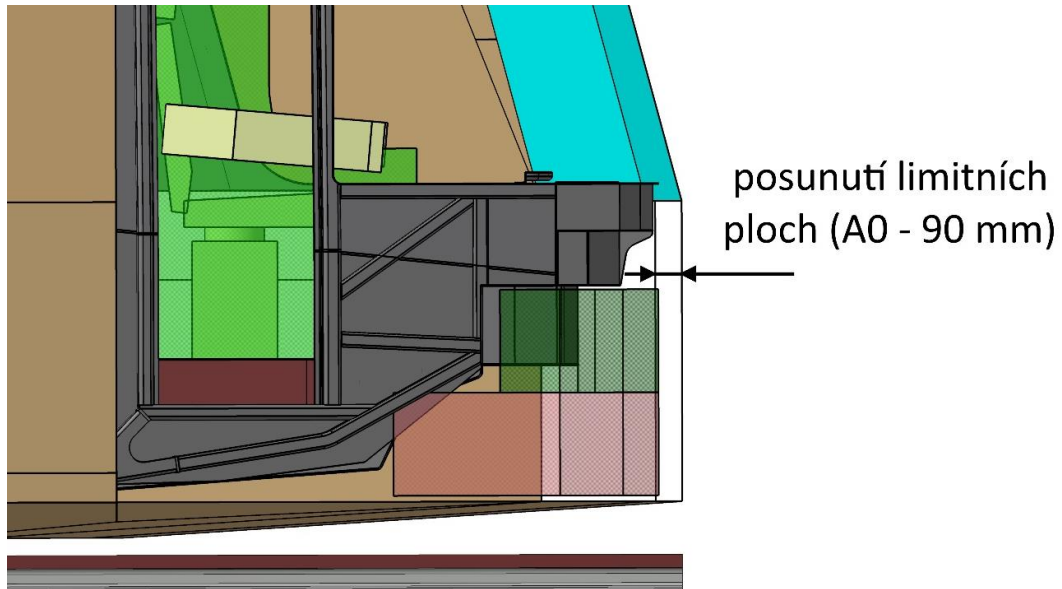
Pro optimalizovaný návrh čela tramvaje viz *obr. 5-21* jsem provedl studii možností umístění dílčích prvků za podmínky splnění minimálního prostoru pro pracovní zdvih panelů obložení definovaný v *tab. 6-13*.



Obr. 7-3 Zástavbové prostoro dílčích součástí varianty 2

Z řešení na Obr. 7-3 je vidět, že pracovní prostor spřáhla (oranžový prostor) klade omezující požadavky na prostor deformačních prvků (červený a zelený prostor). Dále pak podle druhu spřáhla například automatické skládací spřáhlo zvýší požadavky na zástavbový prostor.

Na obrázku *obr. 7-4* je znázorněno posunutí limitních ploch. Tento prostor je minimálním prostorem pro správnou funkci panelů obložení z hlediska pasivní bezpečnosti při srážce s chodcem. U této varianty při zachování dostatečného prostoru pro uložení panelů obložení se zmenší prostor pro deformační prvky s NA a tramvajemi (zelený prostor).

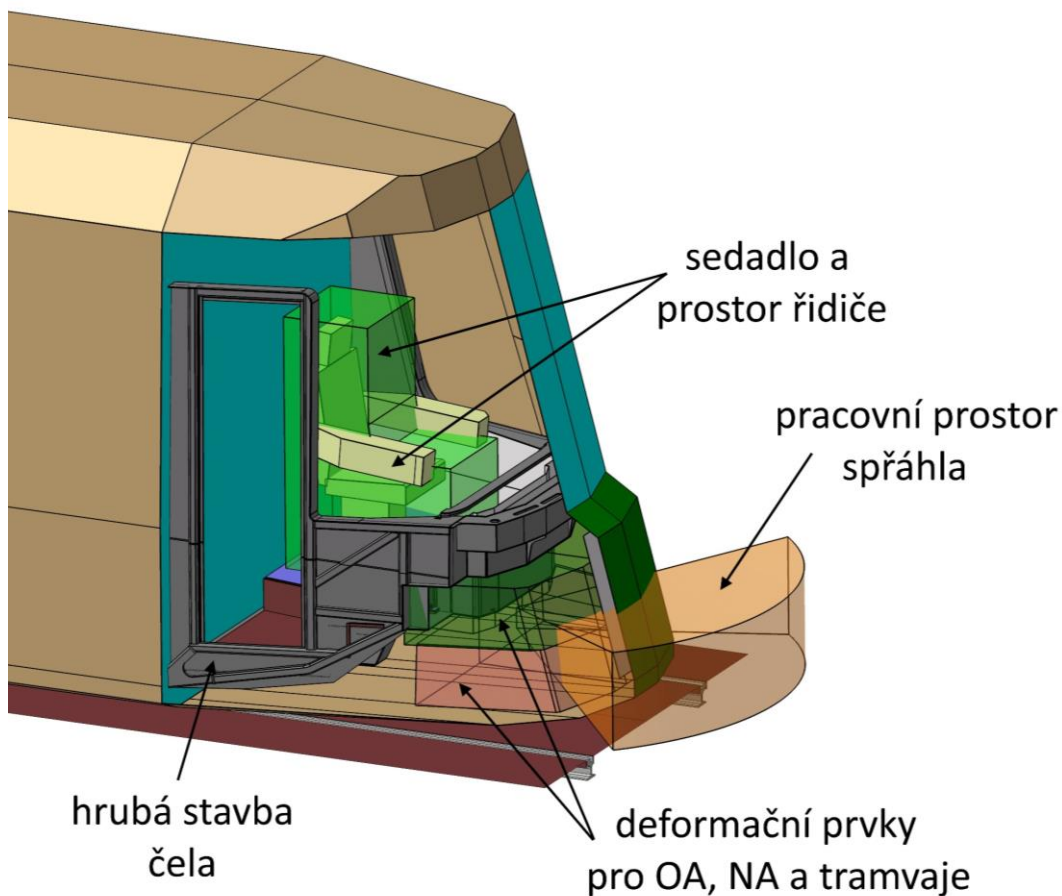


*Obr. 7-4 Posunutí limitních ploch na variante 2*

Další omezení vzniká v případě deformačních prvků pro ostatní účastníky provozu (červený a zelený prostor) a mechanismus podjezdové ochrany. Tyto prvky není možné dostatečně vhodně poskládat pod masku vozidla, jelikož je zde zmenšený zástavbový prostor.

### 7.3 Čelo varianta 3

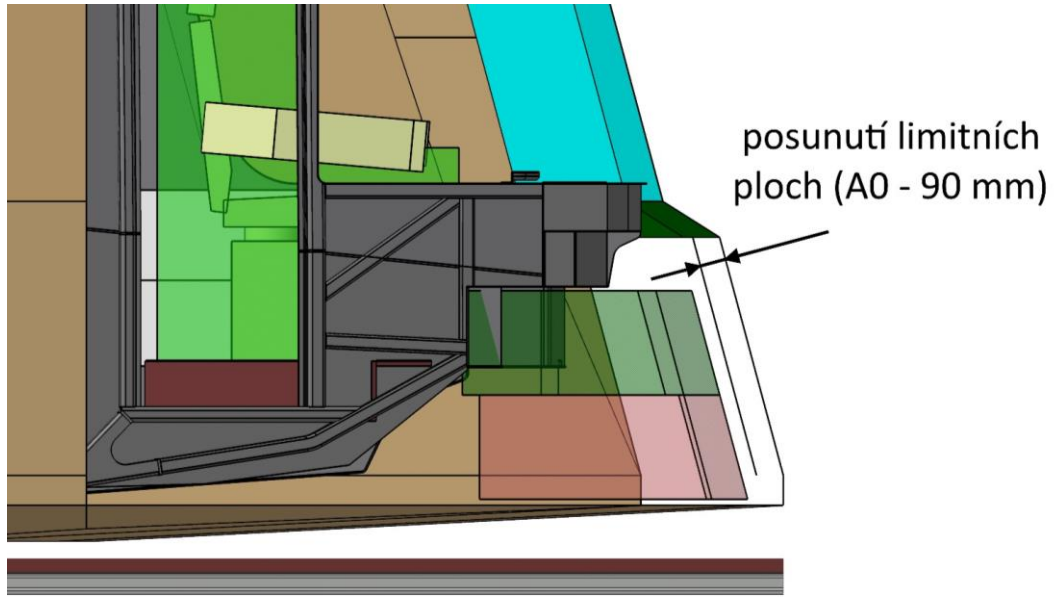
Pro optimalizovaný návrh čela tramvaje viz *obr. 5-21* jsem provedl studii možností umístění dílčích prvků za podmínky splnění minimálního prostoru pro pracovní zdvih panelů obložení definovaný v *tab. 6-13*.



*Obr. 7-5 Zástavbové prostoro dílčích součástí varianty 3*

Z řešení na *obr. 7-5* je vidět, že pracovní prostor spřáhla (oranžový prostor) klade omezující požadavky na prostor deformačních prvků (červený a zelený prostor). Dále pak podle druhu spřáhla například automatické skládací spřáhlo zvýší požadavky na zástavbový prostor.

Na obr. 7-6 je znázorněno posunutí limitních ploch. Tento prostor je minimálním prostorem pro správnou funkci panelů obložení z hlediska pasivní bezpečnosti při srážce s chodcem. Je vhodné, aby dílčí součásti byly umístěny ve větší vzdálenosti, než je minimální stanovená, tím se zajistí lepší ochrana chodce pře tuhými součástmi.



Obr. 7-6 Posunutí limitních ploch na variante 3

Oproti variantě 1 (7.1) zde vzniká více prostoru pro umístění podjezdové ochrany.

#### 7.4 Zhodnocení preferovaných řešení

Na základě vyšetření tvarů čel, jsem zvolil jako vhodnou variantu tvaru čela variantu 1 (7.1) a varianta 3 (7.3). varianta 2 (7.2) má zhoršené vlastnosti při srážce s dítětem a zmenšené zástavbové prostory na deformační prvky pro NA a tramvaje. V případě posunutí ploch Varianty 2 by dále vznikalo více slepých uhlů pro výhled před vozidlo.

V případě varianty 3 (7.3), předsunutí masky čela tramvaje zvyšuje možný zástavbový prostor pro dílčí součásti. Nevýhodou této varianty je nutnost ochránit chodce při kolizi před mechanismem stěrače.



## 8 SOUČASNÉ ŘEŠENÍ KONSTRUKCE ČELNÍCH ČLÁNKŮ NÍZKOPODLAŽNÍCH TRAMVAJÍ

V následující části se pokusím zhodnotit, jak se s tímto problémem vypořádali přední výrobci tramvajových vozidel s ohledem na požadavky sepsané v předcházejících kapitolách, tedy vhodnost tvarování s ohledem na srážku s chodcem, dělení panelů podle možnosti přístupu k provozním součástem a výměny panelů v případě porušení nejenom při srážce s chodcem, ale i s jiným vozidlem. Mechanické vlastnosti panelů nemohou být plně zhodnoceny, pokud výrobce neudal informace o použitém materiálu nebo informace ohledně zlepšení vlastností při srážce s chodcem.

### 8.1 KT4UA VinWay, Vinnycje, Ukrajina

Toto vozidlo je modernizací vozidla Tatra KT4SU vyráběného v roce 1990, do provozu bylo uvedeno v říjnu 2016. Vozidlo je zobrazené na obr. 8-1. Jedná se o čtyřnápravovou tramvaj s tuhou skříní.



Obr. 8-1 KT4UA VinWay,

Zdroj: <http://depo.vn.ua/news/soqodni-vidbuvsya-pershyy-testovyy-vyvizd-tramvayu-vinway-t4-no109>

Obložení čela vozu je z pěti panelů tvořících masku. Jeden panel pod čelním sklem a dva "A" sloupky, které jsou obloženy až k části tvořící střechu vozidla. Boky čela vozu jsou obloženy vždy dvěma panely, které navazují na čelní panely. Zasklení vozidla je dělené, jedno čelní sklo a dvě boční skla, z tohoto důvodu jsou panely obložení na sloupcích.

Podle funkce jsou zde dva panely v oblasti spřáhla dělené ve svislé ose uprostřed, které je možné odklopit pro zpřístupnění spřáhla. Dva na stranách, v oblasti světel s dostatečným zapuštěním, aby nedošlo k dalšímu poranění chodce a jeden panel pod čelním sklem, který zakrývá mechanismu stěrače.

Tvar čela a obložení je vhodně zaoblen a sklopen. Chodec je při srážce odhozen mimo osu vozidla.

Nevýhoda je v případě ČELNĚ – BOČNÍ srážky, kdy hlava chodce dopadá přímo na obložení předních sloupků, na ty je potřeba zvolit obložení z měkčeného materiálu. Další riziko může vzniknout u panelu pro zakrytí mechanismu stěrače pokud není použito měkčení.

## 8.2 **CAF Urbos 3, Lucembursko, Lucembursko**

Jedná se o vozidlo z platformy Urbos 3 společnosti CAF. Vozidlo je provozováno od prosince 2017 ve městě Lucemburk. Vozidlo je zobrazeno na Obr. 8-2.



Obr. 8-2 CAF Urbos 3

Zdroj: <https://hiveminer.com/Tags/caf%2Ckirchberg>

Obložení čela je tvořeno dvěma panely, jeden pod čelním sklem a jeden v oblasti spráhla, ten je možné odklopit směrem nahoru. Na boku je jeden panel a obložení sloupků. Nevýhodou bočního obložení je použití tvarově náročnějších panelů vzhledem ke splnění požadavků designu, to může vést k vyšším nákladům v případě výměny po nehodě. Zasklení článku je rozděleno na pět částí jedno čelní sklo a čtyři boční skla.

Výhodou platformy Urbos je podjezdová ochrana, která se výškově přizpůsobuje vozovce tak, že zajišťuje konstantní mezeru mezi vozovkou a skříní, jak bylo zmíněno v kapitole 5.2.5 *Podjezdová ochrana proti přejetí chodce*.

Nevýhodou je relativně ostrá hrana přechodu mezi čelním a bočním obložением a sloupky mezi čelním a bočním sklem, dále pak nezakryté výstupní hřídele mechanismu stěrače. Tyto prvky by mohli vést k dodatečnému poranění chodce.

V případě ČELNĚ – BOČNÍ srážky, kdy by chodec nedošel až k přechodové hraně s čelním obložением, mají boční panely vhodný úhel, který zajistí odhození chodce do strany mimo vozidlo. V případě ČELNÍ srážky má vozidlo dostatečný sklon, ale nevýhodou jsou zmíněné hřídele mechanismu stěrače.

### 8.3 Alstom Citadis 302, Angres, France

Vozidlo společnosti Alstom platformy Citadis řady 302. V provozu od června 2011 ve francouzském městě Angers. Vozidlo je na zobrazené na obr. 8-3.



Obr. 8-3 Astom Citadis 302

Zdroj: [https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom\\_Citadis](https://en.wikipedia.org/wiki/Alstom_Citadis)

Obložení čela je tvořeno trojicí panelů a obložením předních sloupků. Spodní panel, je možné odklopit pro zpřístupnění spřáhla. Panel pod čelním sklem zakrývá mechanismus stěrače a střední panel, ve kterém jsou zapuštěné světlomety. Boční obložení tvoří jeden panel na každé straně.

Vozidlo využívá podjezdové ochrany, která se spouští až v případě zaznamenání překážky viz 5.2.5 *Podjezdová ochrana proti přejetí chodce*. Nevýhodou může být vzdálenost mezi podjezdovou ochranou a čelní hranou spodní části vozidla, kdy se pod vozidlo dostane velká část sraženého chodce. V případě srážky dítěte se může pod vozidlo dostat celé.

Sklon čela vozidla a jeho zúžení splní v případě ČELNĚ – BOČNÍ srážky požadovanou funkci na odhození člověka. Pro případ ČELNÍ může dojít k poranění na panelu zakrývající mechanismus stěrače, pokud není vyroben z měkčeného materiálu.

Zasklení vozidla je rozděleno na tři části. Jedno čelní sklo a boční skla, z toho vzniká požadavek na měkčené obložení sloupků oddělující okna. Na těchto sloupkách by v případě ČELNĚ – BOČNÍ srážky mohlo vzniknout dodatečné poranění chodce.

#### 8.4 **Bombardier Flexity 2, Antverpy, Belgie**

Vozidlo společnosti Bombardier platformy Flexity řady 2. V provozu od května 2016 v belgickém městě Antverpy. Vozidlo je na zobrazené na *obr. 8-4*.



*Obr. 8-4 Bombardier Flexity 2*

Zdroj: <https://www.bombardier.com/en/home.html>

Obložení čela tvoří dvojice panelů. V horním panelu pod čelním sklem jsou zapuštěné světlomety a senzor zmíněný v kapitole 5.2.4 *Smetadlo tuhých překážek*, dále je pod ním umístěn mechanismu stěrače. Spodní panel pak zakrývá spřáhlo a je možné ho odklopit. Tyto panely jsou navíc vyrobené z měkčeného materiálu, jak bylo popsáno v kapitole 6.4.2 *Elastická deformace*, to má za následek snížení následného poranění chodce v případě kolize.

Zasklení vozidla je tvořeno trojicí okenních tabulí, které na sebe plynule navazují. Toho je dosaženo přes umístění předních sloupků pod okna místo mezi ně, jak je to řešeno u jiných tramvajů.

Sklon a zaoblení čela svým tvarem přispívá k odhození chodce v případě ČELNĚ – BOČNÍ srážky. V případě ČELNÍ srážky je pak využito měkčeného obložení pro snížení poranění chodce. Rizikem může být tloušťka materiálu před hřídelem mechanismu stěrače, pokud není dostatečná, může dojít v případě kolize ke zranění chodce.

Tento typ vozidla využívá podjezdovou ochranu v podobě nafukovacího vaku, který v případě potřeby minimalizuje mezeru mezi vozidlem a vozovkou, tento mechanismus byl popsán v kapitole 5.2.5 *Podjezdová ochrana proti přejetí chodce*.

Dále je potřeba zhodnotit, zda spodní panel v případě srážky podrazí chodce v požadované výšce pod kolenem, aby došlo k nabalení chodce na čelo vozidla.

## 8.5 Stadler Metelitsa, St Petersburg, Rusko

Vozidlo společnosti Stadler platformy Metelitsa. V provozu od srpna 2017 v ruském městě St. Petersburg. Vozidlo je na obrázku zobrazené na *obr. 8-5*.



*Obr. 8-5 Stadler Metelitsa*

*Zdroj: <http://www.metro-report.com/news/single-view/view/stadler-rolls-out-first-vehicles-for-st-petersburg-fast-tram-route.html>*

Obložení čela vozu tvoří pětice panelů a přední sloupky, které jsou obloženy až k části tvořící střechu vozidla. Dva panely ve spodní části, oblasti spřáhla. Spodní panel je otevíratelný pro zpřístupnění spřáhla. Dva v oblasti světel a jeden panel pod čelním sklem.

Boky čela vozu jsou obloženy vždy dvěma panely, které se navazují na čelní panely. Zúžení čela splní v případě ČELNĚ – BOČNÍ srážky požadovanou funkci na odhození člověka.

Pro případ ČELNÍ srážky má vozidlo kompilované tvary a ostré hrany v oblasti světlometů a panelu zakrývající mechanismus stěrače. Těmito prvky může dojít k poranění na chodce, pokud nejsou vyrobeny z měkčeného materiálu.

Zasklení vozidla je rozděleno na tři části. Jedno čelní sklo a boční skla, z toho vzniká požadavek na měkčené obložení sloupků oddělující okna. Na těchto sloupkách by v případě ČELNĚ – BOČNÍ srážky mohlo vzniknout dodatečné poranění chodce.

## 8.6 Škoda 30T, Bratislava, Slovensko

Vozidlo společnosti Škoda Transportation a.s. platformy For City plus. V provozu od listopadu 2014 ve slovenském městě Bratislava. Vozidlo je na zobrazené na obr. 8-6.



Obr. 8-6 Škoda 30T

Zdroj: <http://www.bahnbilder.de/bild/slowakei~stadtverkehr~bratislava-presburg/876093/skoda-30t-7505-ueberquert-die-kreuzung.html>

Obložení čela vozu tvoří pět panelů a přední sloupky, které jsou obloženy až k části tvořící střechu vozidla. Dva panely ve spodní části, oblasti spřáhla, které jsou otevíratelné pro zpřístupnění spřáhla. Jeden panel pod čelním sklem a dvojice panelů zajišťující obložení světel.

Obložení boku čela vozu tvoří dva panely na každé straně. Spodní zasahují až do čelní části. Vrchní boční panel napojený na boční okno a jeden panel na ně navazující.

Pro případ ČELNĚ-BOČNÍ srážky nemá vozidlo dostatečné zúžení, který by odhodilo chodce mimo osu vozidla.

Pro případ ČELNÍ srážky může dojít k poranění chodce na panelu zakrývajícím mechanismus stěrače a světlometech.

Zasklení vozidla je dělené, tedy jedno čelní sklo a dvě boční skla, z tohoto důvodu jsou panely obložení na sloupcích.

V současné době společnost ŠT neřešila čelní článek s ohledem na bezpečnost chodců. Tato diplomová práce je součástí návrhu řešení pro zohlednění pasivní bezpečnosti při návrhu nových vozidel.

## 9 NÁVRH PODMÍNEK PRO TESTOVÁNÍ

Osobní automobily mají oblasti pro testování definovány legislativou zmíněnou v kapitole 3.2 *Automobilové předpisy*. V těchto předpisech jsou stanoveny parametry zkušebních těles, jejich hmotnost a umístění akcelerometrů. Dále jsou předepsány směry a rychlost nárazu zkušebních těles do zkušebního vozu a limitní hodnoty pro splnění zkoušky. [14] [15]

Tramvajové vozy na rozdíl od osobních automobilů mají zatím převážně rovná čela stejně jako nákladní automobily, není tedy možné použít všechny předpisy a doporučení doslovně a je nutné je přizpůsobit tak, aby je bylo možné využít v co nejlepší míře.

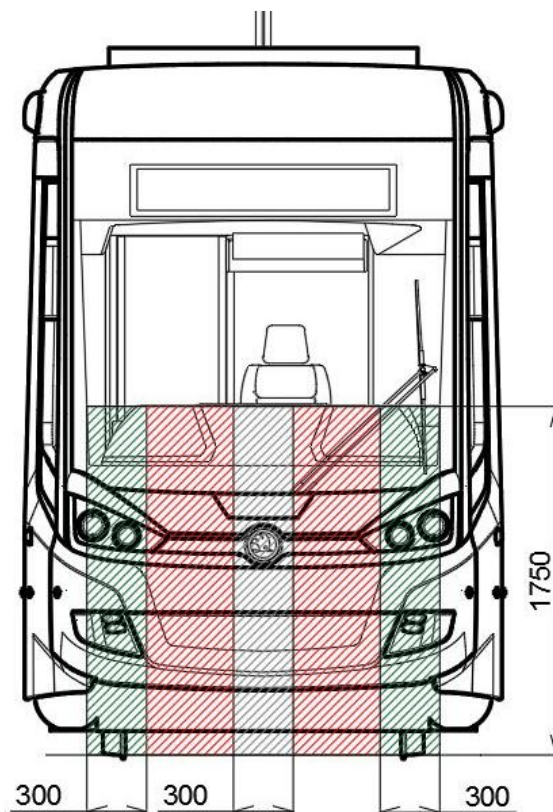
Tyto testované oblasti jsou znázorněny na referenčním vozidle.

### 9.1 Čelní srážka

Vzhledem ke tvaru tramvaje je střed vozidla pro chodce nejvíce nebezpečný, jelikož tato část nevykazuje zúžení v půdorysném pohledu. Z tohoto důvodu by se měla zkouška tvaru čela na splnění podmínek kritéria HPC viz 4.1.2 *Biomechanické kritérium hlavy* provádět v podélné ose vozidla.

### 9.2 Čelně – boční srážky

Pro vyhodnocení je možné použít oblast definovanou předpisem [16]. Ta je zobrazena na obr. 9-1.



Obr. 9-1 Návrh testovací oblasti

### **9.3 Testovací rychlost**

U automobilového průmyslu jsou definovány testovací rychlosti podle rychlosti, kterou se vozidla běžně pohybují po komunikacích, kde se vyskytují chodci. Pro pasivní bezpečnost je definována rychlost do 40 km/h to odpovídá statistice 80 % případů. U vyšší rychlosti se výrazně zvyšuje riziko smrtelných poranění.

V mé práci jsem uvažoval rychlost kolize při 20 km/h jako návrh [16]. Při vyšších rychlostech je nutné zhodnotit maximální možné zábrzdné zpomalení vozidla a adhezní podmínky. Při těchto zpomalení je nutné brát ohled na cestující uvnitř vozidla.

V současné době není řešen interiér vozidla s ohledem na prudké zastavení, při kterém by se cestující už nemohl udržet. To by mělo za následek jejich ohrožení vzhledem k ostrým hranám v interiéru.

Není možné tedy ochránit jednoho chodce jsoucího před vozidlem a při tom ohrožit několik cestujících uvnitř vozidla.



## 10 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Hlavním cílem mé práce byl soupis všech požadavků na čelní článek tramvajového vozu s ohledem na zlepšení pasivní bezpečnosti při srážce s chodcem a současně splnění konstrukčních a technických požadavků na umístění všech potřebných součástí. Touto problematikou se zabývám v kapitole 5 *Požadavky na čelní článek*, kde jsem hledal vhodný tvar čela tramvaje.

Z požadavků na tvar čel a pojezdovou ochranu vyplývá, nutnost použít konfigurace kde není podvozek umístěn hned pod stanoviště řidiče.

Vzhledem k tvaru čela je možné určit jeden tvar, který má nejlepší vlastnosti pro srážku s chodcem, ale nemuselo by odpovídat požadavkům umístění dílčích součástí na vozidle a požadavků zákazníka.

Dalším zlepšením je použití panelů obložení, které zajistí pohlcení energie vzniklé při kolizi tramvaje s chodcem buď částečné nebo celé. Touto problematikou se zabývám v kapitole 6 *Požadavky na panely obložení*. Zde se ukazuje problém v dostupnosti vhodného materiálu tak, aby odolal on sám nebo jeho povrchová úprava povětrnostním podmínkám místa, kde bude vozidlo provozováno.

Z tvarů čel je vhodné využívat čela 7.1 *Čelo varianta 1* a 7.3 *Čelo varianta 3*, které zajišťují hladký povrch při srážce s chodcem. Je však nutné se zaměřit na způsob umístění mechanismu stěrače viz 5.2.2 *Umístění mechanismu stěrače*.

V případě změny konfigurace dílčích součástí umístěných na hrubé stavbě čelního článku je potřeba posunout plochy obložení s tím že je nutné dodržet limitní hodnoty posuvů stanovených v Tab. 6-13 *Hodnoty posuvu limitních ploch od obálky čela tramvaje*.

Pro další zlepšení pasivní bezpečnosti je nutné začít řešit i možnosti podjezdové ochrany. Podjezdová ochrana musí zajistit, aby nedošlo k přejetí sraženého chodce a zároveň projetí oblouku ve vertikální rovině viz 5.2.5 *Podjezdová ochrana proti přejetí chodce*

Závěrem je možné říct, že v současné době není možné udělat naprosto bezpečný systém, který by pracoval za podmínek reálného světa zohledňující všechny převážně lidské faktory, je ale možné přispět zvýšení bezpečnosti použitím vhodných úprav na vozidle v nejvíce kritických místech a rychlostech ve kterých, jsou schopné nejvíce přispět svou funkcí. Proto bych se chtěl na dalším studium věnovat optimalizaci tvaru čela tramvaje s ohledem na bezpečnost a všechny dílčí součásti, které musí na čelním článku být umístěny

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Smrtelná dopravní nehoda tramvaje se dvěma chodci, ZDROJ: Vozovna DPP ...	- 9 -
Obr. 2-1 Zobrazení směru srážky chodce s tramvajovým vozidlem.....	- 13 -
Obr. 3-1 Vybočení vozidla na vnější stranu oblouku .....	- 18 -
Obr. 3-2 Spodní obrys vozidla pro neodpružené součásti vozidel .....	- 19 -
Obr. 3-3 Příklady pro hrany omezující výhled .....	- 21 -
Obr. 3-4 Prostor pro ochranu řidiče,.....	- 22 -
Obr. 4-1 Limitní hodnoty zpomalení působících na hlavu člověka .....	- 26 -
Obr. 4-2 Příklad kontinuálního pulzu zrychlení, .....	- 28 -
Obr. 4-3 Příklad kumulativního pulzu zrychlení .....	- 28 -
Obr. 4-4 Limitní hodnoty stříhové síly působící na krk, ZDROJ VAŠÍČEK .....	- 30 -
Obr. 4-5 Limitní hodnoty tahové síly v ose působící na krk, ZDROJ VAŠÍČEK .....	- 30 -
Obr. 4-6 Figuríny pro testování srážek, ZDROJ: .....	- 31 -
Obr. 4-7 Testovací model hlavy dospělého člověka, ZDROJ: ECE r127 .....	- 32 -
Obr. 4-8 Testovací model hlavy dospělého člověka, ZDROJ: ECE r127 .....	- 33 -
Obr. 4-9 Testovací model horní části nohy člověka, ZDROJ ECE r127 .....	- 34 -
Obr. 4-10 Testovací model spodní části nohy, ZDROJ: ECE r127 .....	- 35 -
Obr. 4-11 Schéma testovací zkoušky.....	- 36 -
Obr. 5-1 Kolizní plocha na čele vozidla .....	- 39 -
Obr. 5-2 A-sloupky na hrubé stavbě čela vozidla, ZDROJ .....	- 40 -
Obr. 5-3 Příklad negativní sklon čela vozidla .....	- 41 -
Obr. 5-4 Příklad čelo s malým sklonem.....	- 41 -
Obr. 5-5 Možnosti zapuštění světlometů .....	- 42 -
Obr. 5-6 Umístění prvního podvozku pod stanoviště řidiče, ZDROJ:.....	- 43 -
Obr. 5-7 Příklad zakrytování mechanismu stěrače, ZDROJ .....	- 43 -
Obr. 5-8 Umístění mechanismu stěrače nad čelní sklo, ZDROJ:.....	- 44 -
Obr. 5-9 Stíraná výhledová plocha při různém umístění mechanismu stěrače, .....	- 45 -
Obr. 5-10 Vozy bez zakrytí spřáhla, ZDROJ .....	- 46 -
Obr. 5-11 Obložení čela vozu se zakrytým spřáhlem, ZDROJ .....	- 46 -
Obr. 5-12 Prostor výšek, které je nutné kompenzovat podjezdovou ochranou .....	- 47 -
Obr. 5-13 Výškově adaptivní podjezdová ochrana, ZDROJ: .....	- 48 -
Obr. 5-14 Podjezdová ochrana formou nafukovacího vaku .....	- 49 -
Obr. 5-15 Podjezdová ochrana formou nafukovacího vaku .....	- 49 -

---

Obr. 5-16 Znázornění hlavních parametrů čelního článku,.....	- 50 -
Obr. 5-17 Matematický model člověka VIRTHUMAN, ZDROJ: .....	- 51 -
Obr. 5-18 Výchozí varianta čela 1 .....	- 53 -
Obr. 5-19 Optimalizovaná varianta čela 1 .....	- 54 -
Obr. 5-20 Výchozí varianta čela 2.....	- 55 -
Obr. 5-21 Optimalizovaná varianta čela 2 .....	- 56 -
Obr. 5-22 Výchozí varianta čela 3.....	- 57 -
Obr. 5-23 Optimalizovaná varianta čela 3 .....	- 58 -
Obr. 6-1 Rozdělení panelů obložení podle účastníků dopravního provozu.....	- 59 -
Obr. 6-2 Rozdělení obložení podle funkce .....	- 60 -
Obr. 6-3 Příklad dělení panelů obložení čela tramvaje, .....	- 61 -
Obr. 6-4 Příklad materiálu obložení pro plastickou deformaci .....	- 62 -
Obr. 6-5 Tramvaj Bombardier Flexity 2 s měkčenou maskou z PUR materiálu .....	- 64 -
Obr. 6-6 Chování viskoelastické pěny.....	- 65 -
Obr. 6-7 Možnost porušení laminátového obložení při větší kolizi s vozidlem .....	- 66 -
Obr. 6-8 Montáž panelu obložení na hrubou stavbu.....	- 67 -
Obr. 6-9 Mapa energií na čele varianty 1 .....	- 69 -
Obr. 6-10 Mapa energií na čele varianty 2 .....	- 70 -
Obr. 6-11 Mapa energií na čele varianty 3 .....	- 71 -
Obr. 7-1 Zástavbový prostor dílčích součástí varianty 1 .....	- 75 -
Obr. 7-2 Posunutí limitních ploch na variante 1 .....	- 76 -
Obr. 7-3 Zástavbové prostoro dílčích součástí varianty 2.....	- 77 -
Obr. 7-4 Posunutí limitních ploch na variante 2.....	- 78 -
Obr. 7-5 Zástavbové prostoro dílčích součástí varianty 3.....	- 79 -
Obr. 7-6 Posunutí limitních ploch na variante 3.....	- 80 -
Obr. 8-1 KT4UA VinWay,.....	- 81 -
Obr. 8-2 CAF Urbos 3.....	- 82 -
Obr. 8-3 Astom Citadis 302.....	- 83 -
Obr. 8-4 Bombardier Flexity 2 .....	- 84 -
Obr. 8-5 Stadler Metelitsa .....	- 85 -
Obr. 8-6 Škoda 30T .....	- 86 -
Obr. 9-1 Návrh testovací oblasti.....	- 87 -
Obr. 15-1 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2014 .....	- 99 -

---

Obr. 15-2 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2015 .....	- 99 -
Obr. 15-3 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2016 .....	- 100 -
Obr. 15-4 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2017 .....	- 100 -
Obr. 15-5 Průběh simulace čela výchozí varianta 1 .....	- 101 -
Obr. 15-6 Průběh simulace čela výchozí varianta 2 .....	- 102 -
Obr. 15-7 Průběh simulace čela výchozí varianta 3 .....	- 103 -

## 12 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Směr kolize chodce s tramvají .....	- 14 -
Tab. 2-2 Statistika místa kolize chodce s tramvají.....	- 14 -
Tab. 2-3 Poranění chodce při srážce s tramvajovým vozem .....	- 15 -
Tab. 3-1 Pevnostní požadavky na smetadlo překážek .....	- 19 -
Tab. 4-1 Tabulka AIS - Stupně zranění podle závažnosti nehody [2] .....	- 24 -
Tab. 4-2 Základní parametry testovacího tělesa hlavy dospělého člověka .....	- 32 -
Tab. 4-3 Základní parametry zkušebního tělesa hlavy dítěte .....	- 33 -
Tab. 4-4 Základní parametry zkušebního tělesa horní části nohy člověka.....	- 34 -
Tab. 4-5 Základní parametry zkušebního tělesa spodní části nohy .....	- 35 -
Tab. 4-6 Parametry pro provádění zkoušek [14] [15].....	- 36 -
Tab. 4-7 Tabulka parametrů zkušebních těles .....	- 37 -
Tab. 4-8 Tabulka limitních hodnot.....	- 37 -
Tab. 5-1 Parametry matematických figurín [20].....	- 52 -
Tab. 5-2 Parametry výchozí varianty čela 1 .....	- 53 -
Tab. 5-3 Parametry optimalizované varianty čela 1.....	- 54 -
Tab. 5-4 Parametry výchozí varianty čela 2 .....	- 55 -
Tab. 5-5 Parametry optimalizované varianty čela 2.....	- 56 -
Tab. 5-6 Parametry výchozí varianty čela 3 .....	- 57 -
Tab. 5-7 Parametry optimalizované varianty čela 3.....	- 58 -
Tab. 6-1 Energie impaktorů na čele varianty 1 .....	- 69 -
Tab. 6-2 Energie impaktorů na čele varianty 2 .....	- 70 -
Tab. 6-3 Energie impaktorů na čele varianty 3 .....	- 71 -
Tab. 6-4 Hodnoty posuvu pro 100 % využití ideální charakteristiky.....	- 72 -
Tab. 6-5 Hodnoty posuvu pro 60 % využití ideální charakteristiky .....	- 72 -
Tab. 6-6 Výsledné hodnoty posuvu limitních ploch varianty 1 .....	- 72 -
Tab. 6-7 Hodnoty posuvu pro 100 % využití ideální charakteristiky.....	- 73 -
Tab. 6-8 Hodnoty posuvu pro 60 % využití ideální charakteristiky.....	- 73 -
Tab. 6-9 Výsledné hodnoty posuvu limitních ploch varianty 2 .....	- 73 -
Tab. 6-10 Hodnoty posuvu pro 100 % využití ideální charakteristiky.....	- 73 -
Tab. 6-11 Hodnoty posuvu pro 60 % využití ideální charakteristiky.....	- 73 -
Tab. 6-12 Výsledné hodnoty posuvu limitních ploch varianty 3 .....	- 73 -
Tab. 6-13 Hodnoty posuvu limitních ploch od obálky čela tramvaje .....	- 74 -

Tab. 15-1 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2014 .....	- 99 -
Tab. 15-2 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2015 .....	- 99 -
Tab. 15-3 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2016 .....	- 100 -
Tab. 15-4 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2017 .....	- 100 -

### 13 SEZNAM GRAFŮ

Graf. 2-1 Směr kolize chodce s tramvajovým vozidlem .....	- 14 -
Graf. 2-2 Místa kolize chodce s tramvajovým vozem .....	- 15 -
Graf. 2-3 Poranění chodce při kolizi s tramvají.....	- 15 -
Graf. 6-1 Závislost absorpce energie a návrat do původního stavu na čase .....	- 63 -

## 14 BIBLIOGRAFIE

1. [https://issuu.com/michdor/docs/m8\\_text\\_cdv](https://issuu.com/michdor/docs/m8_text_cdv). [Online] 2013.
2. Ing. Michal Vašíček, Ph.D. Pasivní bezp - přednášky. 2017.
3. Dopravní podnik hl. m. Prahy, a.s. Rozbor nehodovosti tramvaje s chodcem. Praha : autor neznámý, 2014.
4. —. Rozbor nehodovosti tramvaje s chodcem. Praha : autor neznámý, 2015.
5. —. Rozbor nehodovosti tramvaje s chodcem. Praha : autor neznámý, 2016.
6. —. Rozbor nehodovosti tramvaje s chodcem. Praha : autor neznámý, 2017.
7. Zákon č.361/2000 S.b Zákon o provozu na pozemních komunikacích. Praha : autor neznámý, 2000.
8. ČSN 28 0337 - *Průjezdny průřezy tramvajových tratí a orysy pro vozidla provozována na tramvajových dráhách*. Praha : autor neznámý, 2015.
9. Vyhláška č. 341/2014 Sb. - Vyhláška o schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích. Praha : autor neznámý, 2016.
10. ČSN EN 15 227 - *Železniční aplikace - Požadavky na odolnost skříní železničních vozidel proti nárazu*. Praha : autor neznámý, 2008.
11. DIN 5566 - 1 - Část 1: Všeobecné požadavky. 2006.
12. DIN 5566 - 2 - Část 2: Příkladné požadavky na železniční vozidla. 2006.
13. DIN 5566 - 3 - Část 3: Příkladné požadavky na kolejová vozidla pro příměstskou a regionální dopravu. 2006.
14. ECE r127 Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to their pedestrian safety performance. 2015.
15. EEVC WG 17 Improved test methods to evaluate pedestrian protection afforded by passenger cars. 2002.
16. STRMTG - Tramway front end design).
17. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2790598/>. [Online] 2008.
18. doc. Ing. Josef Kolář, CSc. Teoretický základ konstrukce kolejových vozidel. 2009.
19. —. Teorie vozidel - část přednášky kolejová vozidla. 2013 - 2014.
20. [https://www.researchgate.net/publication/312210384\\_Numerical\\_Tests\\_of\\_the\\_Virtual\\_Human\\_Model\\_Response\\_Under\\_Dynamic\\_Load\\_Conditions\\_Defined\\_in\\_Federal\\_Aviation\\_Regulation\\_Part\\_23562\\_and\\_25562\\_-\\_Preliminary\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/312210384_Numerical_Tests_of_the_Virtual_Human_Model_Response_Under_Dynamic_Load_Conditions_Defined_in_Federal_Aviation_Regulation_Part_23562_and_25562_-_Preliminary_Study).
21. ČSN EN 45 545-2 *Drážní aplikace - Protipožární ochrana drážních vozidel - Část 2: Požadavky na požární vlastnosti materiálů a součástí*. Praha : autor neznámý, 2016.



## 15 SEZNAM PŘÍLOH

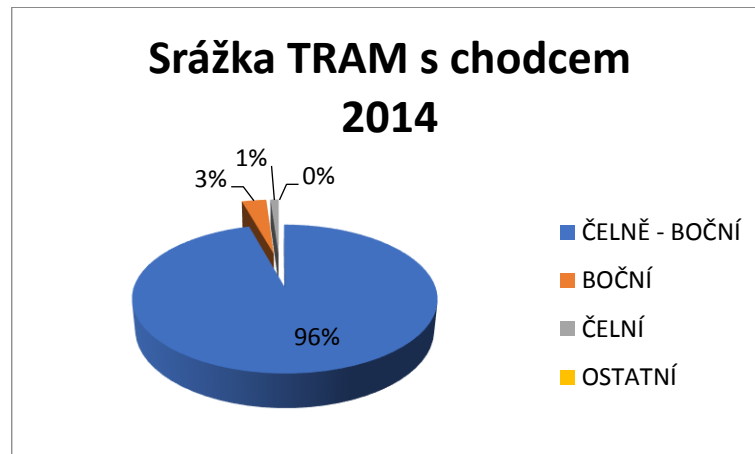
<b>Příloha 1</b> Typový výkres referenčního vozidla.....	- 98 -
<b>Příloha 2</b> Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2014.....	- 99 -
<b>Příloha 3</b> Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2015.....	- 99 -
<b>Příloha 4</b> Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2016.....	- 100 -
<b>Příloha 5</b> Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2017.....	- 100 -
<b>Příloha 6</b> Průběh simulace čela výchozí varianty 1.....	- 101 -
<b>Příloha 7</b> Průběh simulace čela výchozí varianty 2.....	- 102 -
<b>Příloha 8</b> Průběh simulace čela výchozí varianty 3.....	- 103 -

## Příloha 1 Typový výkres referenčního vozidla

## Příloha 2 Souhrn nehod tramvají s chodcem za rok 2014

Tab. 15-1 Souhrn nehod tramvají s chodcem za rok 2014

ČELNĚ - BOČNÍ	BOČNÍ	ČELNÍ	OSTATNÍ	CELKEM
89	3	1	0	93

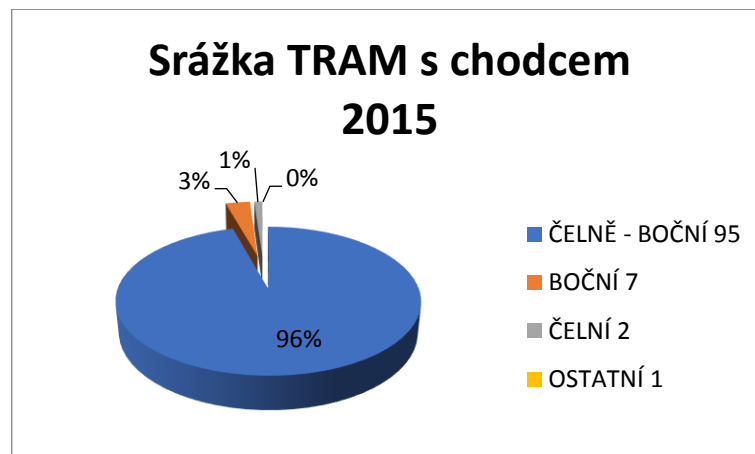


Obr. 15-1 Souhrn nehod tramvají s chodcem za rok 2014

## Příloha 3 Souhrn nehod tramvají s chodcem za rok 2015

Tab. 15-2 Souhrn nehod tramvají s chodcem za rok 2015

ČELNĚ - BOČNÍ	BOČNÍ	ČELNÍ	OSTATNÍ	CELKEM
95	7	2	1	105

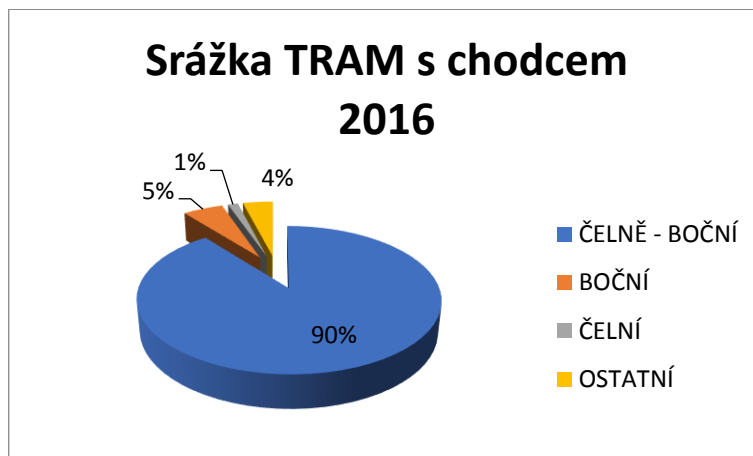


Obr. 15-2 Souhrn nehod tramvají s chodcem za rok 2015

### Příloha 4 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2016

Tab. 15-3 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2016

ČELNĚ - BOČNÍ	BOČNÍ	ČELNÍ	OSTATNÍ	CELKEM
68	4	1	3	76

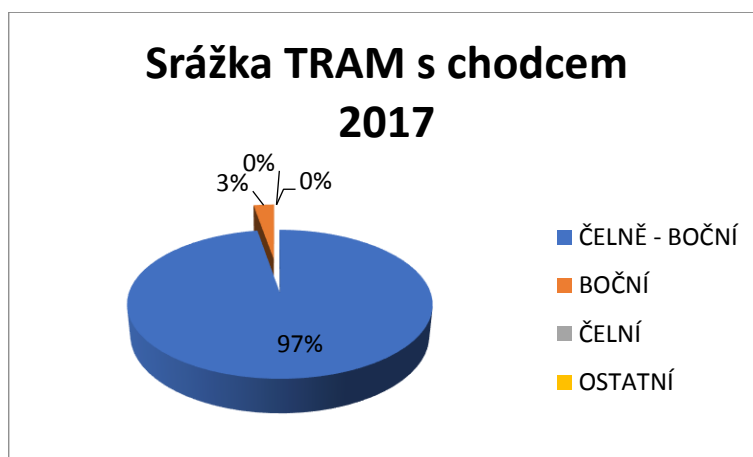


Obr. 15-3 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2016

### Příloha 5 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2017

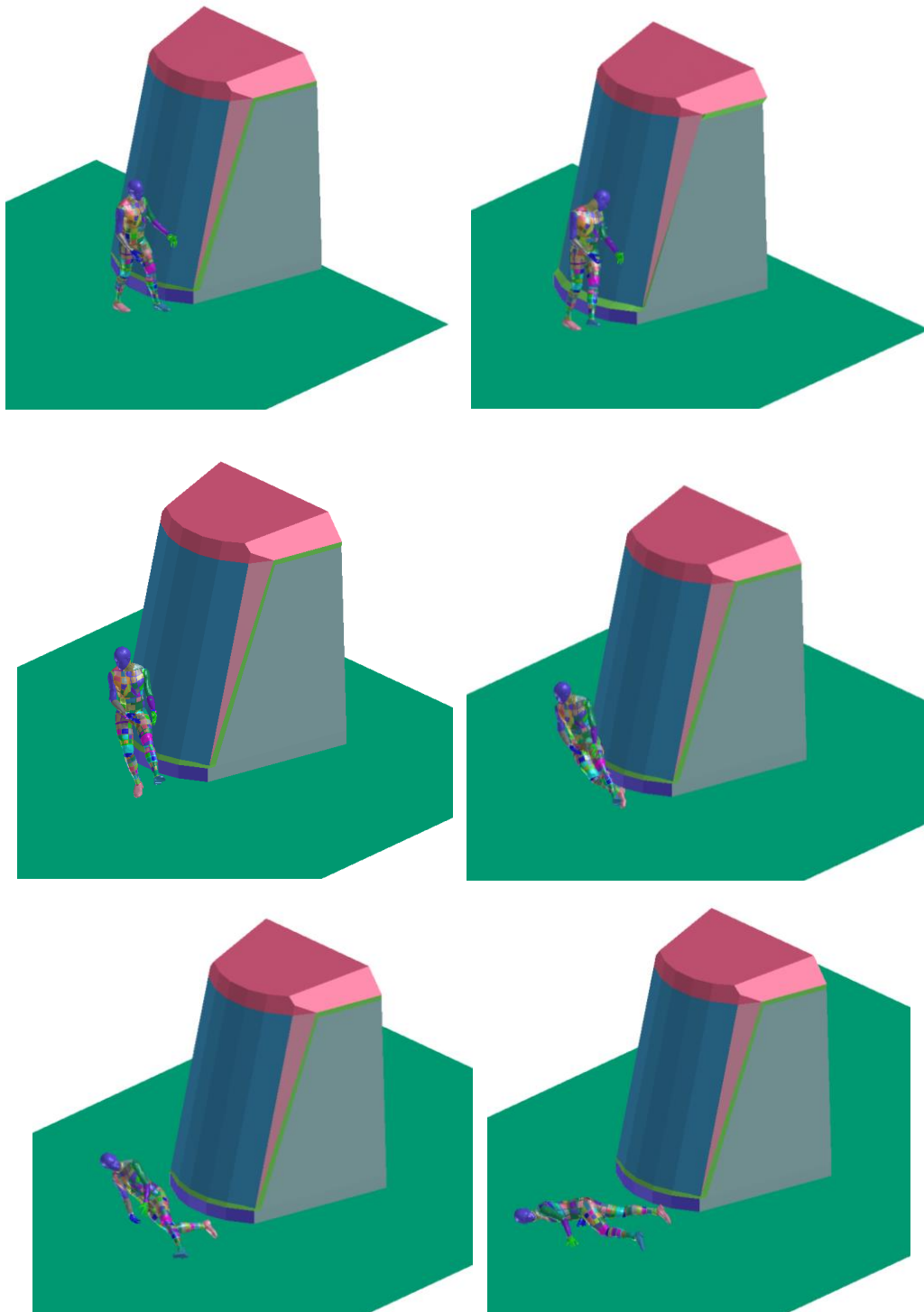
Tab. 15-4 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2017

ČELNĚ - BOČNÍ	BOČNÍ	ČELNÍ	OSTATNÍ	CELKEM
95	7	2	1	105



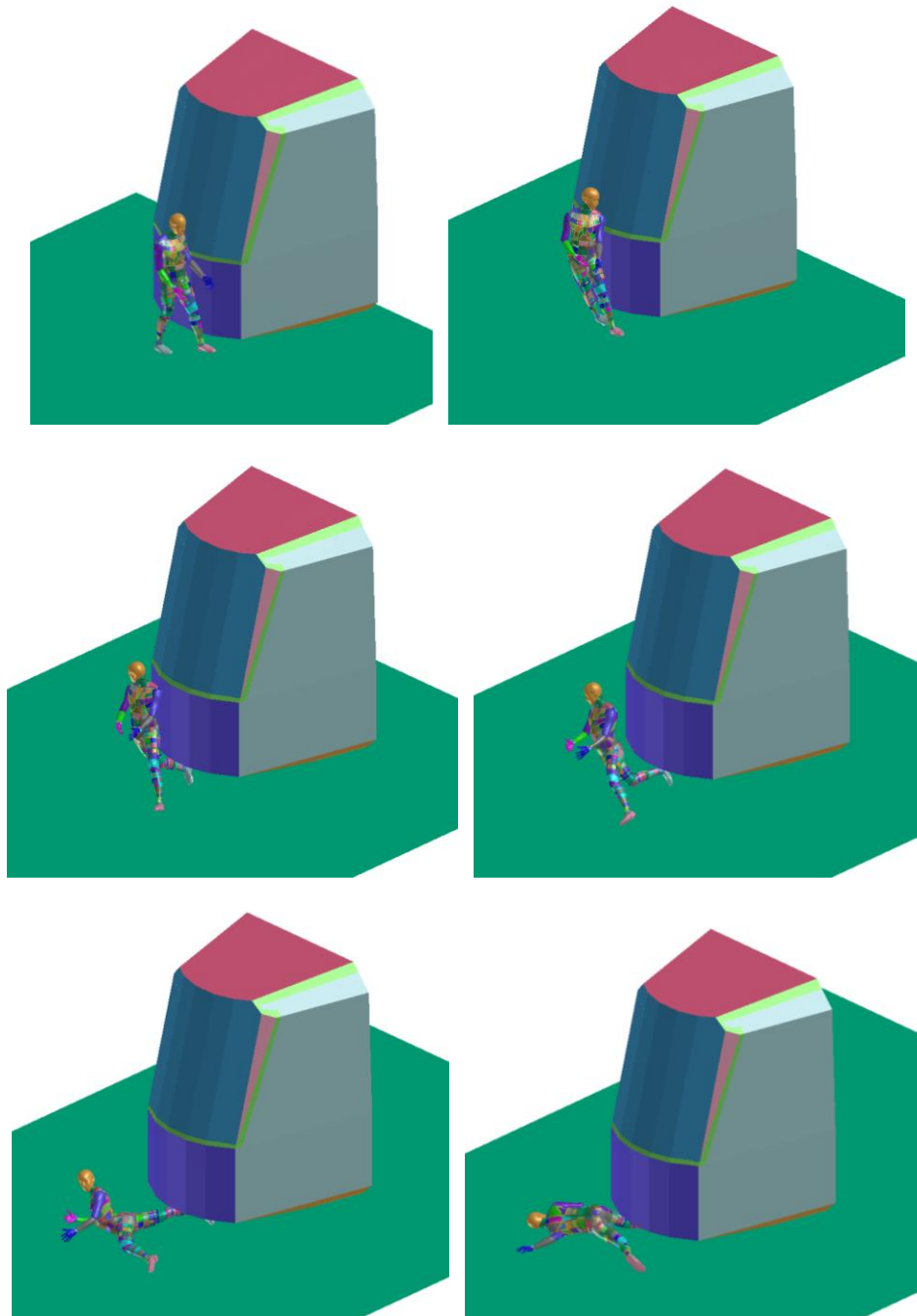
Obr. 15-4 Souhrn nehod tramvají s chodcem za tok 2017

**Příloha 6 Průběh simulace čela výchozí varianty 1**



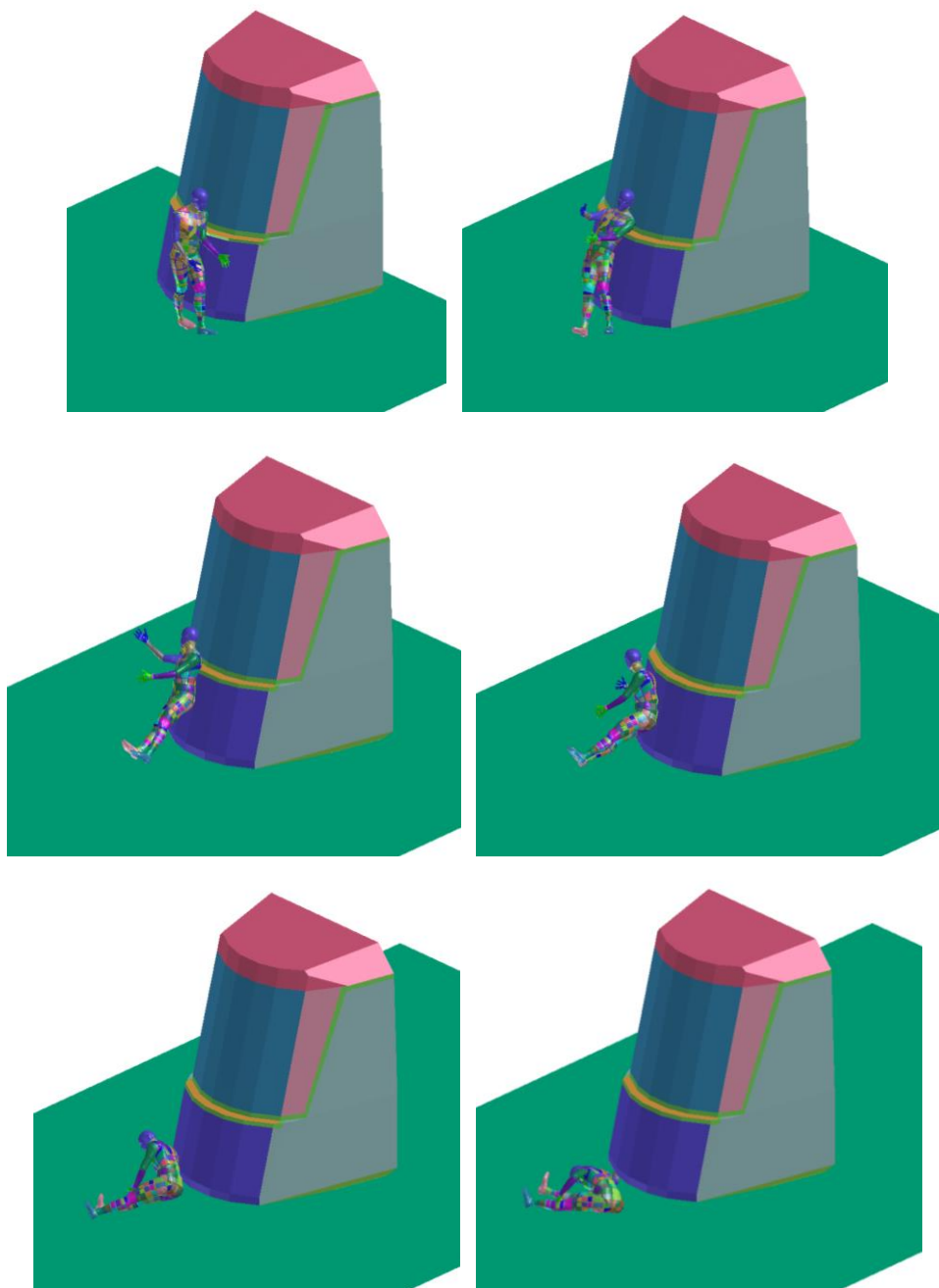
*Obr. 15-5 Průběh simulace čela výchozí varianta 1*

**Příloha 7 Průběh simulace čela výchozí varianty 2**



*Obr. 15-6 Průběh simulace čela výchozí varianta 2*

**Příloha 8 Průběh simulace čela výchozí varianty 3**



Obr. 15-7 Průběh simulace čela výchozí varianta 3