



ZÁPADOČESKÁ  
UNIVERZITA  
V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ - KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ

---

## DISERTAČNÍ PRÁCE

Metodické problémy výzkumu pasivní bezpečnosti a  
deformační odolnosti konstrukcí kolejových vozidel

Autor: Ing. Stanislav Špirk

Školitel: doc. Ing. Miloslav Kepka, CSc.

---

PLZEŇ, PROSINEC 2015

## **Prohlášení**

Předkládám k posouzení disertační práci, jejíž téma je Metodické problémy výzkumu pasivní bezpečnosti a deformační odolnosti konstrukcí kolejových vozidel.

Tato práce je koncipována dle požadavků Studijního a zkušebního řádu ZČU Plzeň, tj. obsahuje zejména vlastní výsledky výzkumu v rámci tvorby disertační práce, včetně původních a uveřejněných výsledků.

Prohlašuji, že jsem tuto písemnou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

podpis

## **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat všem, kteří mě podporovali a u kterých jsem našel cenné rady a informace přínosné pro zpracování této práce. Největší dík patří především mému školiteli doc. Ing. Miloslavu Kepkovi, CSc., dále pak Ing. Vladislavu Kemkovi, Ph.D., Ing. Jiřímu Jelénkovi, prof. Ing. Stanislavu Hosnedlovi, CSc. a všem ostatním.

## **Upozornění**

Podle zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR), § 17, zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků, nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora, autorů citovaných prací a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## ANOTACE

Pasivní bezpečnost kolejových vozidel je poměrně novou oblastí. Tato oblast částečně souvisí s některými předpisy v železniční dopravě. Nejvíce je však ovlivněna normou EN 15227 týkající se odolnosti skříní kolejových vozidel. Práce je zaměřena na pasivní bezpečnost interiérů. Cílem je vytvořit jednoduché posouzení bezpečnosti interiérů konkrétních kolejových vozidel. Pro tento účel je vytvořen virtuální model interiérů železničního a tramvajového vozidla. Potřebná data byla získána od výrobců a jedná se o nově navržená a aktuálně provozovaná vozidla. Vyhodnocení možných následků nehody je provedeno MKP simulací v kombinaci s MBS modely lidského těla. Použitým softwarem je Pam-Crash. Modely jednotlivých interiérů vozidel jsou vytvořeny vhodnou kombinací tuhých a deformovatelných sítí. Je zřejmé, že nejvýznamnějším prvkem interiéru je sedadlo, na které je v modelu kladen největší důraz. Při simulacích je uvažován nejběžnější zrychlující puls známý z literatury. Pro posouzení bezpečnosti byly zvoleny kolizní scénáře s největší četností výskytu. V simulacích je rovněž využit nově vyvinutý model lidského těla k posouzení pravděpodobnosti poranění. Model lidského těla je založen na Multibody přístupu s velmi detailní strukturou. Díky pokročilé biofidelitě tohoto modelu je možné dosáhnout poměrně přesných výsledků v krátkém výpočtovém čase.

## ANOTATION

Passive safety has become a new area of rail vehicles design. Passive safety is marginally related to various regulations and standards. Recently, however, the standard EN 15227 has been introduced. This thesis is focused on passive safety of railway vehicles interiors. The aim is to prepare a basic assessment of real rail vehicles interiors safety. A virtual model of railway vehicle and tram interior is created for this purpose. The data of vehicles constructions was obtained from local developers. Considered vehicles are newly developed and currently operated. Virtual safety assessment is carried by FEM and Multibody simulations. Simulations are performed in software PAM-CRASH. A combination of rigid and deformable parts is used for interiors models. The most significant feature of the interior is the seat. Because the solved problem is not provided by standards, it is commonly defined by using the acceleration pulse. Individual variations of collisions are selected with regard to efforts to assess the most common interior collisions of rail vehicle in terms of passive safety. A newly developed model of the human body is used for the simulations of occupant collisions. The human body model architecture is based on Multi Body structure. Thanks to this approach it has good biofidelity and short computational time.

## Obsah

1	Úvod.....	4
2	Cíle disertační práce .....	5
3	Vymezení nehody.....	7
4	Základní popis železničních nehod .....	7
5	Předpisy týkající se pasivní bezpečnosti kolejových vozidel.....	8
6	Dostupné databáze nehod.....	10
7	Statistiky nehod kolejových vozidel v ČR .....	10
8	Statistika poranění v interiérech kolejových vozidel .....	12
9	Poranění v interiérech kolejových vozidel .....	14
9.1	Rychlost nárazu .....	15
9.2	Pozice cestujícího .....	16
9.3	Interiérové prvky .....	18
10	Možnost úniku cestujících.....	19
11	Mechanismy poranění v interiérech kolejových vozidel.....	20
11.1	Hlava .....	21
11.2	Krk .....	23
11.3	Hrudník .....	25
11.4	Břicho.....	26
11.5	Pánev.....	26
11.6	Končetiny.....	28
12	Biomechanická kritéria poranění .....	29
12.1	Popis kritérií poranění hlavy .....	29
12.2	Popis kritérií poranění krku .....	30
12.3	Popis kritérií poranění hrudníku .....	31
12.4	Popis kritérií poranění pánve .....	32
12.5	Popis kritérií poranění břicha.....	32
12.6	Popis kritérií poranění končetin .....	32
13	Simulace kolize ve fiktivním interiéru kolejového vozidla .....	33
13.1	MKP model sedadla .....	33
13.2	Scénář kolize .....	33
13.3	Návrh variant kolizí .....	34
13.4	Popis MKP modelu .....	36
13.5	Zhodnocení výsledků .....	37
14	Figuríny využívané pro hodnocení bezpečnosti posádky .....	38
15	Výpočtové modely figurín .....	40
16	Model lidského těla „VIRTHUMAN“ .....	42
17	Posouzení možnosti využití modelu VIRTHUMAN .....	43
18	Účinek nárazu hlavy na zaoblený prvek interiéru .....	44
18.1	Možnosti vyhodnocování.....	44
18.2	Parametry ovlivňující závažnost poranění .....	45
18.3	Simulace nárazu hlavy na zaoblený prvek interiéru .....	45
18.4	Vliv velikosti poloměru zaoblení na pravděpodobnost poranění .....	46
18.5	Vliv tuhosti materiálu interiérového prvku.....	48
18.6	Vyhodnocení výsledků pro rozdílné rádiusy .....	49
18.7	Zhodnocení vlivu zaoblení.....	50
19	Analýza interiéru s využitím poznatků DTM/TTS (EDS) .....	51
19.1	Využití poznatků DTM/TTS (EDS).....	51
19.2	Analýza provozních situací.....	51

19.3	Návrh variant řešení .....	53
19.4	Hodnocení řešených variant.....	53
20	Kolize cestujícího v tramvajovém vozidle .....	55
20.1	Kolizní scénáře.....	55
20.2	Popis modelu interiéru tramvajového vozidla .....	56
20.2.1	Sedadlo .....	56
20.2.2	Madlo sedadla .....	58
20.2.3	Uchycení sedadel.....	58
20.2.4	Model dvojsedadla .....	60
20.2.5	Kompletní model.....	60
20.3	Simulace kolize cestujících v tramvajovém vozidle .....	62
20.4	Kolize při zpomalení ve směru jízdy v tramvajovém vozidle .....	63
20.5	Kolize při zpomalení v protisměru jízdy v tramvajovém vozidle.....	65
20.6	Návrh úpravy prvku sedadla .....	67
20.7	Závěrečné vyhodnocení kolize cestujícího v tramvajovém vozidle .....	67
21	Kolize v železničním vozidle .....	68
21.1	Kolizní scénáře.....	68
21.2	Popis modelu interiéru železničního vozidla .....	69
21.2.1	Ocelová konstrukce sedadla .....	69
21.2.2	Pěnové a čalouněné části .....	70
21.2.3	Kompletní model.....	71
21.3	Experimentální ověření mechanických vlastností polyuretanové pěny .....	71
21.3.1	Návrh a popis experimentu .....	73
21.3.2	Průběh experimentu.....	76
21.3.3	Výsledky experimentu.....	76
21.3.4	Validace pěnového materiálu .....	79
21.4	Simulace kolize cestujících v interiéru železničního vozidla .....	81
21.5	Kolize při zpomalení ve směru jízdy v železničním vozidle .....	82
21.6	Kolize při zpomalení v protisměru jízdy v železničním vozidle .....	85
21.7	Kolize stojícího cestujícího v železničním vozidle.....	86
22	Porovnání bezpečnosti kolejových vozidel s jinými druhy vozidel .....	90
23	Splnění cílů disertační práce .....	91
24	Závěr.....	92
25	Literatura .....	94

## 1 Úvod

Obor konstrukce kolejových vozidel je postupně rozšiřován o novou oblast, která je věnována pasivní bezpečnosti. Cílem požadavků kladených na konstrukci kolejových vozidel je snížit následky nehod. Největší průlom v této oblasti je neodmyslitelně spojen s příchodem normy ČSN EN 15227. Cílem požadavků pasivní bezpečnosti, jak jsou rozvedeny v této evropské normě, je snížit následky nehod způsobených srážkou. Opatření uvažovaná v této evropské normě stanoví poslední prostředky ochrany, které se použijí, když všechny ostatní možnosti, jak zabránit nehodě, selžou.

Nově řešenou problematikou je pasivní bezpečnost interiérů kolejových vozidel. Zde je v současnosti patrný výrazný vliv výzkumu a vývoje. V porovnání s automobilovým průmyslem, kde výrobu každého nového modelu předchází obrovské množství simulací a experimentů ve spojení s bezpečností interiéru, u železničních vozidel zatím neexistuje globálnější legislativa, která by stanovila jednotné požadavky. Při řešení této problematiky lze předpokládat využití rozsáhlých poznatků z automobilového odvětví, nicméně interiér kolejového vozidla má určité odlišnosti. Lze tedy očekávat i nutnost zvážení mnoha nových přístupů a řešení.

Prvotním úkolem je vymezení nehody, její zevrubná analýza a dohledání předpisů, které se bezpečnosti interiéru týkají, nebo s ní alespoň okrajově souvisí. Dále je vhodné analyzovat statistické přehledy o nehodách. Nejvýznamnějším úkolem je získání databáze poranění cestujících. Pro další práci je velmi užitečné znát nejčtenější druhy poranění, jejich závažnost a mechanismy vzniku. Rovněž je nutné zvážit postupy při vyhodnocování poranění cestujících. To úzce souvisí i s anatomii lidského těla a základy biomechaniky.

Ideálním způsobem vyhodnocení nehody z pohledu interiéru je v tomto případě počítačová simulace, a to zejména vzhledem k jejím nákladům. Před zahájením řešení úlohy je vhodné rozebrat možnosti a postupy využívané při simulaci kolize cestujících. V praxi již existuje určité množství využitelných nástrojů a určitě bude účelné zhodnotit jejich klady a zápory pro posouzení možnosti využití. Před zahájením podrobných simulací v konkrétním interiéru je vhodné realizovat jednoduché simulace, které ověří základní vlastnosti hlavních variant provedení interiéru.

Nezanedbatelnou část práce tvoří získání podkladů pro vytvoření modelu skutečného interiéru vozidla. Zvolen byl novější typ vozidla, který je v současnosti provozován. Získání technické dokumentace zde určitě není dostatečné, neboť důležitou roli hrají i materiálová data. Pro konstrukci prvku interiéru zpravidla dostačuje základní popis chování materiálu. Pro řešení jeho chování při kolizi je však nutné získat detailnější materiálová data. Z toho důvodu se nelze ubránit provedení jednoduchých experimentů, které zaručí relevantní výsledky.

Hlavním výstupem práce je posouzení bezpečnosti konkrétního interiéru kolejového vozidla při nehodě. Navzdory tomu, že se jedná o poměrně náročnou úlohu, lze díky moderním nástrojům v mnoha případech vyhodnotit pravděpodobnost poranění. Díky tomu lze označit kritická místa interiéru a navrhnout postupy pro zlepšení jejich bezpečnosti. Zároveň lze také porovnat stávající bezpečnost interiéru kolejových vozidel se stavem u jiných dopravních prostředků.

## 2 Cíle disertační práce

Hlavním cílem této práce je provést simulaci kolize zaměřenou na pasivní bezpečnost interiéru. Tato oblast je zatím spíše předmětem intenzivního výzkumu a není dostatečně ošetřena předpisy. Nicméně i to může být v blízké budoucnosti změněno, obdobně jako u pasivní bezpečnosti skříní kolejových vozidel. Zde byla zavedena norma ČSN EN 15227 týkající se požadavků na struktury skříní kolejových vozidel a všichni výrobci nových kolejových vozidel se těmto požadavkům museli přizpůsobit.

K provedení výpočtů simulujících chování posádky při sekundárním nárazu bylo třeba vytvořit MKP model interiéru kolejového vozidla. Je účelné provést tuto simulaci na příkladu nějakého již existujícího interiéru kolejového vozidla. Z tohoto pohledu je nutné získat alespoň typový výkres interiéru, ze kterého je patrné rozmístění sedadel a prvků vyskytujících se v bezprostřední blízkosti cestujících. Po vytipování krizových míst interiéru pak v dalším kroku bylo zapotřebí získat bližší data týkající se jednotlivých částí interiéru. Především se jedná o prvky v bezprostředním kontaktu s posádkou, jako jsou sedadla, stolky madla, podlaha a podobně. U těchto částí interiéru je nutné znát minimálně rozměry, rozmístění a materiál. Za tímto účelem byla navázána spolupráce s podnikem ŠKODA VAGONKA a.s. a VÚKV a.s. Díky těmto předpokladům bylo možné započít v další práci, která se týká samotného výzkumu.

Prvotní fází je získání hrubých dat od výrobce konkrétního kolejového vozidla. Jedná se především o typové výkresy interiéru kolejového vozidla.

S pomocí těchto podkladů pak je provedena předběžná analýza interiéru, kde budou vytipována krizová místa. S těmito výsledky a s použitím teoretických informací získaných v rámci předchozího studia mohou být sestaveny jednotlivé kolizní scénáře, které se stanou předmětem dalšího zájmu.

V následujícím kroku jsou získána podrobnější data z technické dokumentace, která poslouží k vypracování MKP modelu. Zde se jedná především o co nejpřesnější popis všech detailů sedadel, madel, stolků, jejich rozmístění a použitých materiálů.

V této fázi je provedeno ověření materiálových vlastností pomocí standardních statických a dynamických materiálových zkoušek, popřípadě i s využitím padostroje.

Tato data jsou podkladem pro sestavení MKP modelu vytipovaných částí interiéru, na kterých pak jsou provedeny počítačové simulace. Přitom mohou být využity výpočetní modely testovacích figurín (integrováné do výpočetního systému Pam-Crash) anebo může být využit MBS model člověka, který se vyvíjí v rámci výzkumného projektu TA01031628 – Škálovatelné modely člověka pro zvýšení bezpečnosti v dopravě (TAČR – program ALFA - řešitel MECAS ESI s.r.o., další účastník projektu ZČU v Plzni) za spoluúčasti autora této práce. Tento model bude vytvořen pro všeobecné použití ve všech odvětvích dopravy, tedy i v dopravě železniční.

Finálním úkolem celé práce je zhodnocení výsledků z jednotlivých kolizních scénářů. Je provedeno vyhodnocení kritických prvků interiéru železničního vozidla a navržena obecná doporučení a opatření pro zvýšení bezpečnosti cestujících ve vozidlech dalších generací.

Také je vhodné provedení porovnání pasivní bezpečnosti interiéru tohoto konkrétního vozidla s bezpečností v interiérech jiných dopravních prostředků, případně i automobilových.



### 3 Vymezení nehody

Počet nehod kolejových vozidel je velmi malý v kontrastu s množstvím nehod silničních vozidel. Při hodnocení nehod lze lepších výsledků dosáhnout s větším množstvím naměřených dat. Při hodnocení bezpečnosti interiéru kolejového vozidla je třeba uvažovat samostatný kolizní scénář pro jednotlivá vozidla. Ačkoliv je určité důležité vyhodnotit nehodu celého vlaku, z pohledu interiéru lze jednoznačně říci, že cestující jsou zranění následkem toho, co se stane s jejich vozidlem, nikoliv následkem pohybu celého vlaku. Na Obr. 1 je jasně vidět, že každé vozidlo se při nehodě pohybuje zcela odlišně. Některé vagóny s cestujícími jsou zde převráceny, některé jsou otočeny napříč tratí a některé zůstávají podél.



Obr. 1 Ukázka železniční nehody, zdroj: [THE TELEGRAPH]

Dále je nutné uvážit rozsah nehod, které budou řešeny. Pod pojmem nehoda nebo mimořádná událost se často rozumí vznik požáru nebo vykolejení vlaku bez následné kolize. Při těchto typech nehod ani většinou nedochází ke zranění cestujících. Naopak někdy dochází ke zranění cestujících, aniž by příčinou byla kolize. Jako příklad lze uvést nouzové brzdění při vyšších rychlostech. Jak je uvedeno ve zprávě [INRETS+MIRA]: “Navrhuje se, aby termín nehoda zahrnoval všechny mimořádné události drážního vozidla, které mají za následek zranění cestujících“.

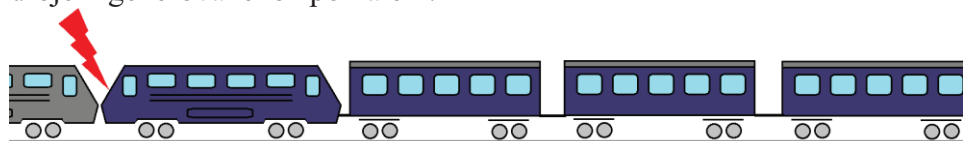
Z pohledu průběhu nehodové události je pak třeba říci, že ke zraněním může často docházet před samotnou kolizí, například v důsledku nouzového brzdění. Nebo může docházet ke zraněním po kolizi, například když dojde následkem požáru k usmrcení cestujícího, který není schopen opustit železniční vozidlo. Tak se může stát, že původně lehká zranění, jako je otřes mozku, se změni ve smrtelná. Proto je třeba hodnocení železničních nehod zohlednit v následujícím průběhu.

1. Zranění způsobená nouzovým brzděním před počátečním nárazem.
2. Počáteční primární kolize vozidla, která vede k poranění sekundárními nárazy cestujících do interiéru. Navíc v důsledku vypadnutí cestujícího z vozidla může dojít ke střetu s prvky vyskytujícími se vně vozidla.
3. Zranění způsobená ve snaze uniknout z vozidla.
4. Zranění v důsledku uvěznění uvnitř vozidla.

### 4 Základní popis železničních nehod

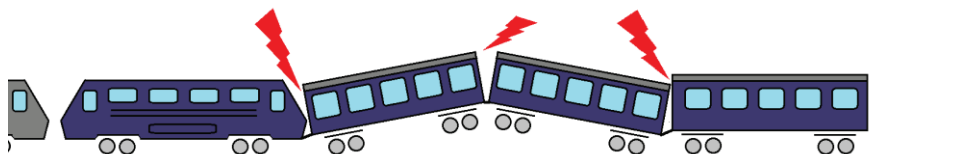
Při nehodě železniční vozidlo podléhá velkému zrychlení, které je způsobeno změnou jeho rychlosti. Nepřipoutaní cestující v železničním vozidle pokračují v pohybu konstantní rychlostí, dokud nedojde ke střetu s interiérovými prvky. "Velikost a směr výsledného

zrychlení, které bude při kolizi působit, závisí na typu nehody a na dalších nárazech, které souprava utrpí." [ŠPIRK 2010] Existují dva hlavní typy nárazů. Primární náraz (Obr. 2) nastane, když vlaková souprava narazí do velkého stacionárního nebo pohyblivého objektu, který je zdrojem generovaného zpomalení.



Obr. 2 Primární náraz

Sekundární náraz (Obr. 3) nastane ve chvíli, kdy dojde k vykolejení soupravy a převrácení některých vozidel, nebo k jejich nárazu do příčných prvků trati. Při tomto typu nárazu jsou pak generovány různé kombinace vertikálních, příčných i podélných zpomalení.



Obr. 3 Sekundární náraz

Primární náraz je často následován množstvím sekundárních nárazů (viz Obr. 1). Někdy však může dojít pouze k řadě sekundárních nárazů, stejně jako tomu bylo při železniční nehodě v Hatfieldu. Zde došlo k vykolejení následkem zlomené kolejnice, při kterém první tři vozy zůstaly na trati nehodou téměř nepoznamenány. Vzhledem ke složitosti výsledných pohybů a zrychlení při sekundárních nárazech je ve většině studií, týkajících se bezpečnosti interiéru, uvažován pouze primární náraz. Velikost celkového zpomalení při primárním nárazu je závislá především na následujících parametrech:

- relativní rychlost mezi nárazějícími vozidly,
- relativní hmotnost mezi nárazějícími vozidly,
- mechanismus nárazu a crashové chování konstrukce vlaku,
- podélná deformace nebo tuhost nárazějících objektů.

V dnešní době již byla věnována značná výzkumná práce snaze zlepšit strukturální chování konstrukcí železničních vozidel při nárazu. Požadavky na konstrukci vozidel se zabývá poměrně nová norma ČSN EN 15227 [ČSN EN 15227]. Stručně lze říci, že je zde především snaha o zabránění nebezpečí šplhání vozidel, pohlcení kolizních energií, zachování prostoru pro přežití, snížení zpomalení a snížení nebezpečí vykolejení. Tato norma se snaží omezit zrychlení působící na posádku při většině kolizních scénářů na 5g. Nicméně konkrétní zatěžovací pulsy pro vyhodnocování chování interiérů vozidel při nárazu nejsou zatím ošetřeny žádnou normou.

## 5 Předpisy týkající se pasivní bezpečnosti kolejových vozidel

Pasivní bezpečnosti se okrajově týkají různé předpisy a normy. Z pohledu interiéru stojí za zmínku normy DIN 5510-2, UICN564-2 a ČSN EN 13501-1:2007, týkající se nehořlavosti interiérových materiálů. Dále jsou předepsány požadavky na sedadla z pohledu dynamických zatížení prostřednictvím UIC 566 a z pohledu ergonomického prostřednictvím UIC 567. Zvláštní nároky jsou kladeny na pasivní bezpečnost kabiny strojvedoucího. Je zde požadavek na pevnost čelního skla dle UIC 651 a na další bezpečnostní prvky, jako jsou například únikové cesty dle UIC 617. Co se týče pasivní bezpečnosti struktur, ta byla dříve

částečně zahrnuta v normě ČSN 12663, týkající se především statických výpočtů skříní kolejových vozidel. V nedávné době však byla zavedena nová norma ČSN EN 15227. Opatření uvedená v tomto dokumentu představují poslední prostředek ochrany, když všechny možnosti prevence havárie selhaly. Je zde uveden rámeček pro určení podmínek havárie, které musí být při návrhu respektovány, aby vozidlo odolalo havárii, a příslušná rizika. Tyto podmínky respektují nejběžnější typy nehod. Jsou zde dále definovány hlavní body pasivní bezpečnosti, aby byly splněny příslušné požadavky.

Kolejová vozidla jsou rozdělena do čtyř konstrukčních kategorií. Zjednodušeně lze říci, že do první kategorie spadají vlakové jednotky a vozy, do druhé vozidla metra a poslední dvě jsou věnovány vozidlům tramvajovým. Pro tyto kategorie jsou dále rozlišovány čtyři základní konstrukční scénáře srážky:

1. Čelní srážka dvou totožných vlakových jednotek.
2. Čelní srážka s odlišným typem železničního vozidla.
3. Náraz čela vlakové jednotky do velkého silničního vozidla na úrovňovém přejezdu.
4. Náraz vlakové jednotky do nízké překážky.

Průnikem těchto dvou rozdělení jsou definovány podmínky simulace jednotlivých kolizních scénářů pro dané kolejové vozidlo. V podstatě lze pak citovat šest stěžejních zásad, podle kterých by mělo být vozidlo navrženo:

- Odolnost proti šplhání.
- Pohlcení kolizní energie.
- Ochrana prostoru pro přežití.
- Omezení maximální decelerace.
- Odolnost proti vniknutí do prostoru pro přežití.
- Minimalizace následků nárazu do překážky na trati.

Cíle pasivní bezpečnosti jsou dány pro kompletní vlakovou soupravu. Protože testování chování celého vlaku je neproveditelné, je splnění cílů ověřeno dynamickou simulací odpovídající referenčním kolizním situacím. Užití samotné numerické simulace je dostatečné pro přesnou predikci chování konstrukce v oblastech s limitovanou deformací. Avšak pro oblasti s velkými deformacemi musí být proveden test konce vozidla v plném měřítku, aby se ověřil odpovídající numerický model. V případě nového návrhu konstrukce musí být proveden alespoň jeden test konce vozidla v plném měřítku. Schvalovací program je proto kombinací testu (experimentu) a numerické simulace (kombinovaná metoda). Program je koncipován pro zajištění shody testů a ověření numerickými simulacemi. Tento program zahrnuje technickou zprávu, obsahující všechna stadia schvalovacího procesu od materiálových vlastností, přes testy komponent, až po finální simulace celého vozidla. Plně ověřené a reprezentativní chování konstrukce je hodnoceno podle splnění kritérií posouzením konečných výkresů, požadavků a zpráv zahrnujících hodnocení. Ověřování odolnosti proti nárazům se tedy děje ve třech krocích:

1. Zkouška zařízení na pohlcování energie a deformačních zón.
2. Kalibrace numerického modelu konstrukce.
3. Numerická simulace konstrukčních scénářů srážky.

Numerické simulace jsou prováděny s využitím softwaru navrženého pro modelování dynamiky vysokorychlostních nárazů. Měla by být zavedena metoda postupných kontrol

numerických modelů odpovídajících cejchování podsestavy vlakové soupravy. Tato metoda zaručuje typické modelování mezních stavů konstrukce vozidla. Kritéria pro přijetí jsou normou jednoznačně stanovena:

- hodnota energie disponované modelem by měla být v rámci 10% hodnoty energie změřené testem,
- celkový posuv modelu při nárazu by měl být v rámci 10% posuvu změřeného testem,
- numerická simulace by měla vést k získání křivky celkové síly (s maximálními a minimálními hodnotami), která odpovídá naměřeným hodnotám v testu.

Numerická simulace referenčních situací musí být provedena pomocí numerického modelu, který věrně kopíruje geometrii konstrukce, aby bylo dosaženo ověření platnosti souhrnných požadavků popsanych v technickém dokumentu.

Z pohledu pasivní bezpečnosti interiéru je velmi zajímavá anglická norma GM/RT2100 [GM / RT2100]. Tento dokument stanovuje požadavky na konstrukci a integritu konstrukcí kolejových vozidel, včetně pasivní bezpečnosti interiéru. Jsou zde například jednoznačně předepsány podmínky pro zkoušení sedadel, kterými musí být prokázána dostatečná ochrana cestujících.

## 6 Dostupné databáze nehod

Obecně lze říci, že v evropských státech se shromažďovaná data týkají především příčin nehod a jejich možného odstranění. V souvislosti se zraněním posádky jsou často rozlišovány jen dva základní stavy, a to vážné zranění a zranění smrtelné. Údaje o železničních nehodách v Anglii [COKAYNE 2003] momentálně shrnují současnou situaci ve světě a většina zdrojů týkajících se pasivní bezpečnosti kolejových vozidel se na tyto údaje přímo odkazuje. Iniciativa pro vytvoření odpovídající databáze vychází z projektu safeinteriors [INRETS+MIRA] a [RSSB], nicméně zatím nejsou dostupná žádná nová data. Spíše je zde vytvořen základ pro pravidelné hodnocení s ohledem na následné události, mění se provozní vzory nebo technologický vývoj.

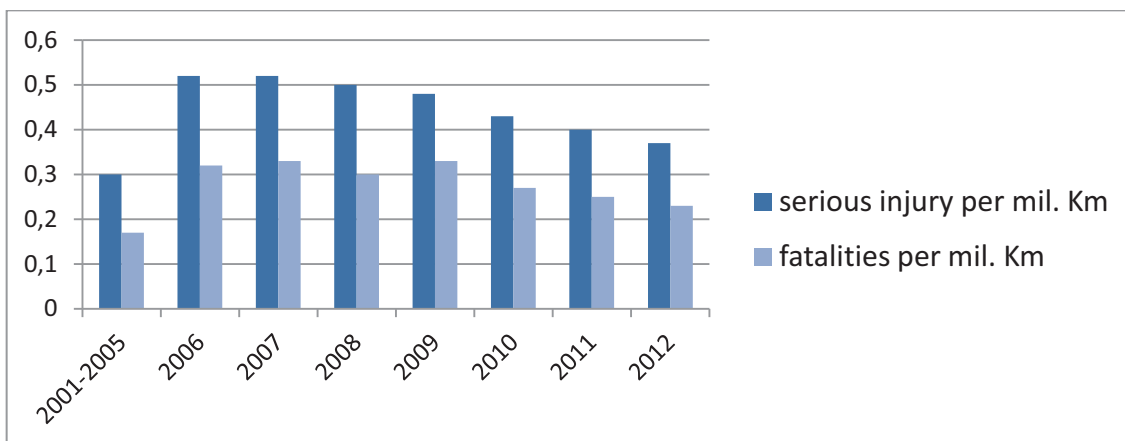
Ačkoliv je možné poučit se z jiných forem dopravy, je důležité si uvědomit, že přesto zde existují velké rozdíly. Opatření přijatá k prevenci nebo minimalizaci újmy budou záviset na rizicích spojených s formou dopravy. V železniční dopravě je směr pohybu omezen kolejnicí, signalizačním zařízením, a je udržována bezpečná vzdálenost mezi vlaky. Riziko vzniku požáru v důsledku kolize je extrémně nízké, protože palivo je zde výrazně méně vznětlivé než u letecké nebo silniční dopravy a je ho výrazně méně. I v případě, že druhy poranění a jejich následky budou podobné, je nepravděpodobné, že opatření k jejich zmírnění budou stejná.

## 7 Statistiky nehod kolejových vozidel v ČR

Pro hodnocení pasivní bezpečnosti interiérů kolejových vozidel je nezbytné zjistit, k jakým poraněním dochází při železničních nehodách. Nejběžnějším přístupem při hodnocení nehod je určení počtu poraněných a jejich rozřídění do tří kategorií:

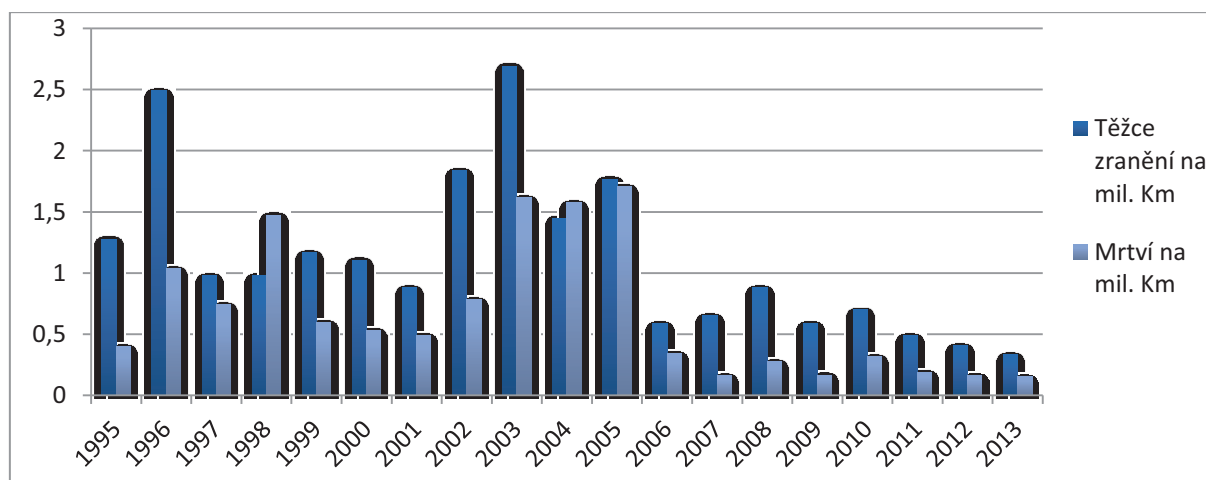
- lehká poranění,
- vážná poranění,
- smrtelná poranění.

Statistika UIC [UIC 2013] uvádí ve své zprávě pouze počet vážně poraněných a počet usmrcených osob (Obr. 4). Tato statistika byla v letech 2001-2005 zpracovávána pro jedenáct členů UIC a od roku 2006 pro dvacet členů UIC. Vzhledem k velmi rozdílným podmínkám provozu původních a nových členů UIC lze tato data jen těžko porovnat, i při použití jakýchkoliv poměrných veličin (například počet usmrcených na 1 milion kilometrů trati). Protože není účelem práce porovnávat stav jednotlivých členů UIC, výsledky z období v letech 2001-2005 jsou zprůměrovány, neboť jejich hodnota je pouze informační. Nejvýznamnější výsledky statistiky jsou zpracovány v následujícím grafu (Obr. 4).



Obr. 4 Výsledky statistiky UIC

Dále je možné shrnout výsledky statistiky nehod v České republice. Stěžejní statistiku spravuje Ministerstvo dopravy a její výsledky jsou uváděny v ročenkách dopravy [MINISTERSTVO DOPRAVY 2001] [MINISTERSTVO DOPRAVY 2007] [MINISTERSTVO DOPRAVY 2013]. Z několika těchto ročenek je možné získat kompletní přehled o nehodách v ČR. Bohužel i tyto statistiky se týkají výhradně zraněných a usmrcených osob v železničním provozu. Navíc teprve roku 2006 byly z této statistiky vyňaty sebevražedné pokusy, což způsobilo skokovou změnu v počtu obětí v tomto období. Počty usmrcených osob v rámci ČR a UIC lze tedy porovnávat od roku 2006. Náhled výsledků těchto statistik je na následujícím obrázku (Obr. 5).



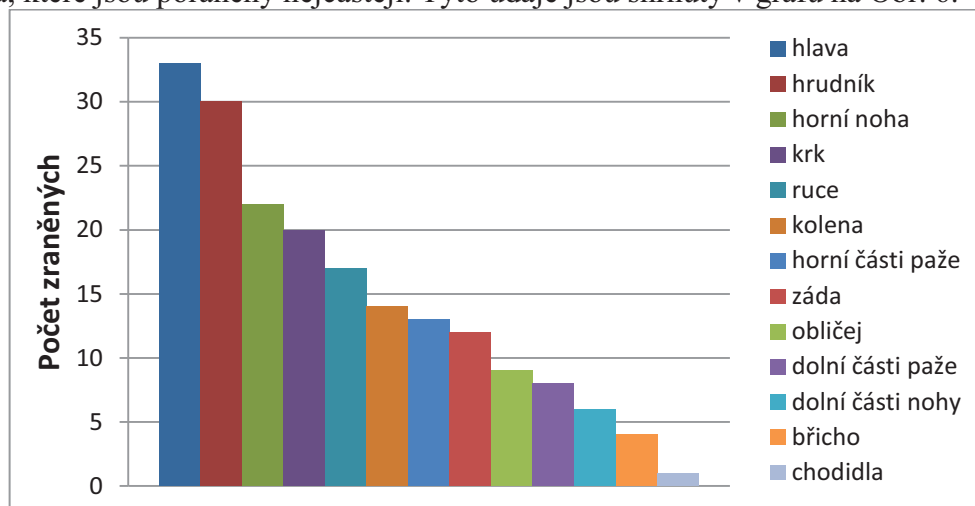
Obr. 5 Výsledky statistiky MDČR

Za účelem zvýšení pasivní bezpečnosti interiérů kolejových vozidel je třeba znát druhy a mechanismy poranění. Bohužel v tomto směru je drtivá většina všech vedených

statistik nedostatečná. Pro zmírnění důsledků železniční nehody je nutné vědět, která část těla byla poraněna, druh zranění, jeho závažnost, jak se zranění stalo a která část interiéru ho způsobila.

## 8 Statistika poranění v interiérech kolejových vozidel

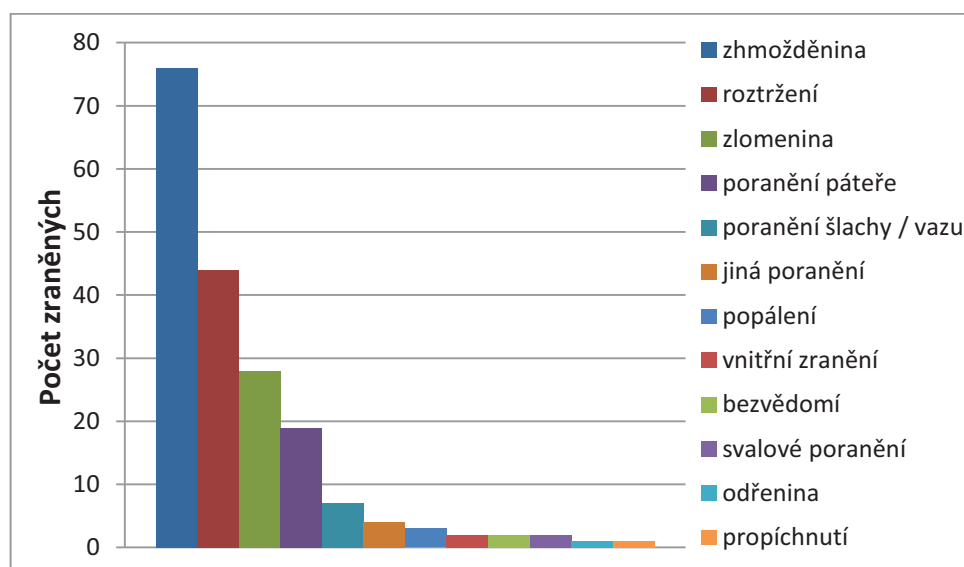
Aby bylo možné pochopit nejčastější druhy a mechanismy poranění, je nutné určit ty části těla, které jsou poraněny nejčastěji. Tyto údaje jsou shrnuty v grafu na Obr. 6.



Obr. 6 Poranění podle části těla v interiérech kolejových vozidel, zdroj: [LUPTON]

Pro konkrétní nehody, se kterými tato data souvisí, je patrné, že mezi nejčastěji poraněné části těla patří: hlava, hrudník, stehna a krk. To je však jen jeden pohled na význam grafu. Kdyby totiž třicet tři případů poranění hlavy bylo lehčího charakteru, a naproti tomu čtyři případy poranění břicha byly smrtelné, pak by určitě poranění břicha mělo mnohem větší váhu. Tudíž lze říci, že ačkoliv se jedná o cenné informace, jejich doplnění o další údaje je vhodné.

Aby bylo možné lépe pochopit poranění, je třeba znát i druh poranění a ne jen část těla, která je poraněna. Tato data jsou shrnuta v následujícím grafu (Obr. 7).



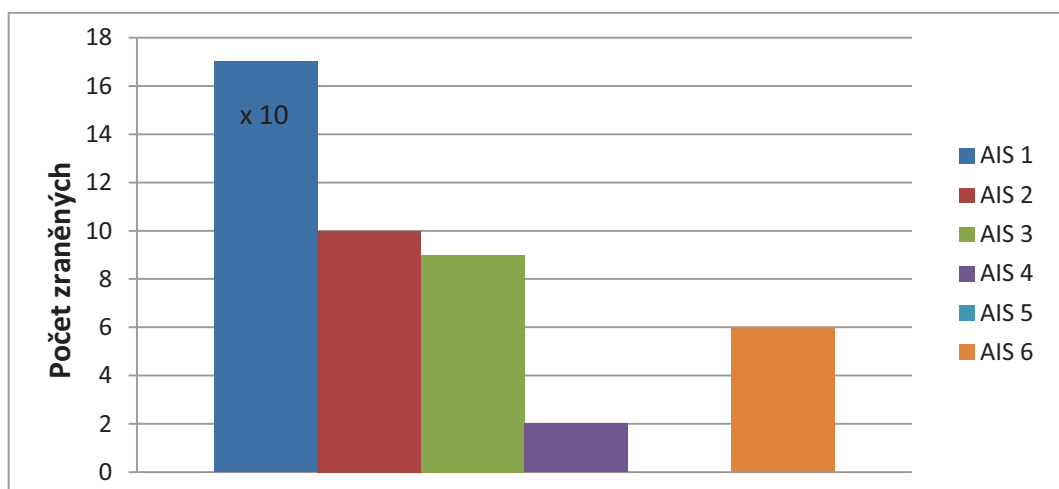
Obr. 7 Druhy poranění v interiérech kolejových vozidel, zdroj: [LUPTON]

Z grafu je zřejmé, že nejčastějšími zraněními, která se vyskytují při železniční nehodě, jsou zhmožděniny. Další poměrně častá zranění jsou roztržení a zlomeniny. Za zmínku pak ještě stojí sloupec pojmenovaný „jiná poranění“. Zde jsou zahrnuta poranění natolik specifická, že je nelze nijak kategorizovat. I zde platí to, co bylo uvedeno v předchozím odstavci, že by bylo velmi přínosné vědět, jaké druhy poranění mají za vinu nejvážnější následky.

Co se závažnosti zranění týče, historicky nejběžnější způsob hodnocení nehody zahrnoval počty lehce, vážně a smrtelně poraněných osob. Takové hodnocení sice vypovídá o vážnosti dopravní nehody, žádným způsobem však nenapomáhá k určení opatření zvyšujících bezpečnost interiérů. K tomuto účelu je totiž užitečnější znát příčinu nebo typ poranění. Je možné uvažovat o závažnosti poranění mnoha různými způsoby, ale všechny se týkají vlivu na zraněné osoby. Při pohledu z různých úhlů je pak nepravděpodobné, že by jednotlivá hodnocení mohla být objektivně rovnocenná. O závažnosti poranění je možné uvažovat z následujících hledisek:

- Schopnost osoby přežít nehodu. Zvážení krátkodobého nebo okamžitého ohrožení života.
- Dlouhodobý vliv na průměrnou délku života poraněné osoby. Poškození orgánů může mít za následek zkrácení života, i když osoba nehodu přežila.
- Schopnost osoby uniknout ze situace ohrožující život (např. požár).
- Dlouhodobé účinky a trvalé následky, které omezují individuální nezávislost nebo způsobují trvalou závislost na zdravotní péči.

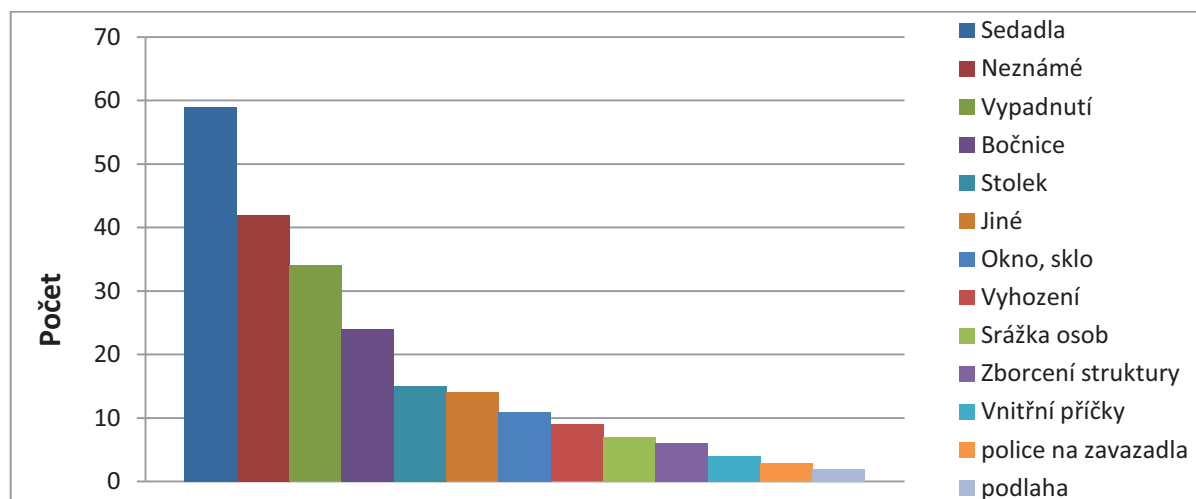
Všechny předchozí úvahy by bylo možné použít, nicméně některé by byly vhodnější spíše pro určení finančního vyrovnání, a nikoliv pro hodnocení pasivní bezpečnosti interiérů. Pro účely vyhodnocení závažnosti poranění na evropských železnicích by byla vhodnější nějaká jednoduchá a snadněji přístupná metoda. V jiných dopravních odvětvích je stále častěji využívána zkrácená stupnice poranění AIS (Abbreviated Injury Scale) (Obr. 8). Toto hodnocení je často užitečné pro záchranné složky, které musí při ošetřování určit osoby, jimž bude věnována prioritní pozornost. Stupnice má rozsah AIS 1 až 6 s tím, že obecně platí, že čím vyšší číslo, tím větší je ohrožení na životě. Hodnota šest zde znamená neléčitelné zranění, které již nelze přežít. Stupnice AIS tedy uvažuje pouze okamžitý stav a neuvádí dlouhodobé vyhlídky na přežití či trvalé následky.



Obr. 8 Poranění rozdělená dle závažnosti, zdroj: [LUPTON]

Z tohoto grafu je patrné, že největší byl výskyt poranění na stupni jedna, a zároveň je zde poměrně velký počet smrtelných zranění. Tyto hodnoty by bylo zapotřebí propojit s předchozími daty a stanovit, jaké druhy poranění kterých částí těla mají nejzávažnější následky.

Aby bylo možné navrhnout konstrukční úpravy interiérů, pomáhající předejít možným zraněním, je třeba znát části interiéru, které tato zranění nejčastěji způsobují. Údaje musí poskytnout data utříděná dle jednotlivých prvků interiéru. Toto shrnutí je uvedeno níže (Obr. 9).



Obr. 9 Příčina poranění, zdroj: [LUPTON]

Zranění cestujících budou bezprostředně ovlivněna tím, co daná osoba dělá ve chvíli nárazu nebo bezprostředně před ním. Kolizní scénář bude velmi odlišný pro sedícího a stojícího cestujícího. Různá rizika poranění budou rovněž pro cestujícího stojícího na konci uličky nebo stojícího ve volném prostoru. Nicméně u hodnocených nehod byla nejčastější příčinou poranění od sedadla.

## 9 Poranění v interiérech kolejových vozidel

S informacemi uvedenými výše je možné vytvořit si přehled o zraněních s ohledem na každého cestujícího ve vozidle. Lze například říci, že při kolizi vlaku může dojít ke zlomenině dolní končetiny sedícího cestujícího, pokud je vržen proti nesprávně navrženému sedadlu. Takové poranění je vždy stejné, ale způsoby, jak mu předcházet, se mohou lišit dle samotného mechanismu poranění. Jak již bylo zmíněno, poranění cestujících je vždy výsledkem toho, co se stalo s jejich vozidlem. Proto je vhodné rozlišovat následující kolizní scénáře:

1. Vozidlo ve vzpřímené poloze ve směru trati.
2. Vozidlo otočeno až o 45° ve směru trati.
3. Vozidlo převráceno na stranu ve směru trati.
4. Vozidlo podélně natočeno o 45°.
5. Vozidlo podélně natočeno od 45° do 90°.
6. Vozidlo podélně natočeno o více než 90°.
7. Převrácení (rolled) o úhel do 90°.
8. Převrácení (rolled) o více než 90°.
9. Zhroucení struktury.

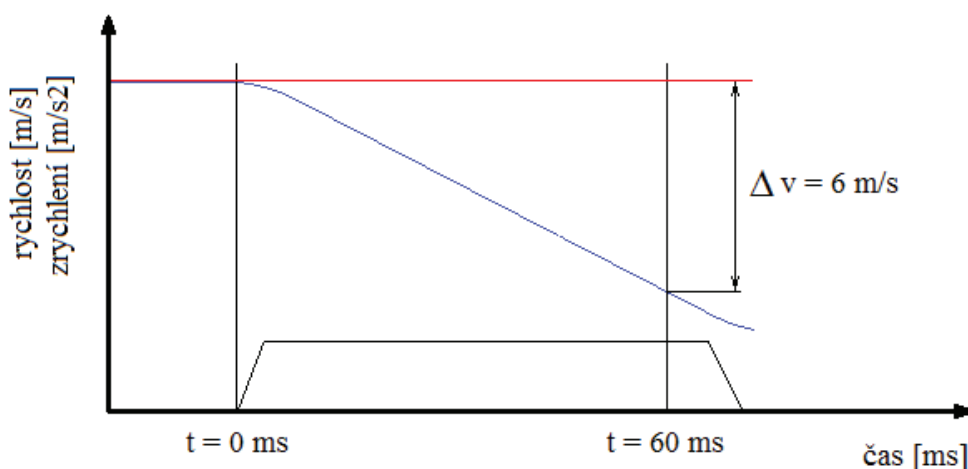


V současné době jsou cestující v kolejových vozidlech nepřipoutaní. V případě nehody, při které drážní vozidlo rychle zpomaluje, se cestující stále pohybují stejnou rychlostí, dokud nenarazí na nejbližší protější prvek interiéru. Obvykle po několika nárazech na různé části těla pak cestující dosáhnou stejné rychlosti jako vozidlo. Série srážek těla s prvky interiéru pak způsobí zranění. Zpravidla jsou rozeznávány dva hlavní typy poranění. Poranění přímé (nárazem) nastává u částí těla, které jsou v přímém kontaktu s prvky interiéru. Poranění nepřímé (zatížením) se naopak vyskytuje u částí těla, které nejsou v přímém kontaktu s prvky interiéru. Zásadní vliv na typy a závažnosti poranění mají tři faktory:

- rychlost nárazu,
- postoj cestujícího a zraněné části těla,
- interiérové prvky podílející se na kolizi.

## 9.1 Rychlost nárazu

Jako rychlost nárazu je uvažována relativní rychlost mezi narážející částí těla pasažéra a prvku interiéru. Na rychlost nárazu má významný vliv vzdálenost těla cestujícího od nejbližšího prvku interiéru. Pokud cestující sedí v jednosměrném uspořádání sedadel, je vzdálenost kolen od protějšího sedadla 0,25 m. Pokud budeme uvažovat rychlost vozidla 10 m/s a teoretický zpomalovací puls pro železniční vozidla, pak k nárazu kolen na protější sedadlo dojde v čase 60 ms (Obr. 10). V tomto čase je rychlost vozidla 4 m/s z původních 10 m/s. To znamená, že rychlost nárazu pasažéra se bude pohybovat okolo 6 m/s. Tato situace je znázorněna na následujícím grafu. Při zachování těchto vstupních parametrů pak výsledná rychlost kolize může být stanovena také jednodušeji pouze v závislosti na vzdálenosti, kterou cestující urazí.



Obr. 10 Rychlost nárazu cestujícího

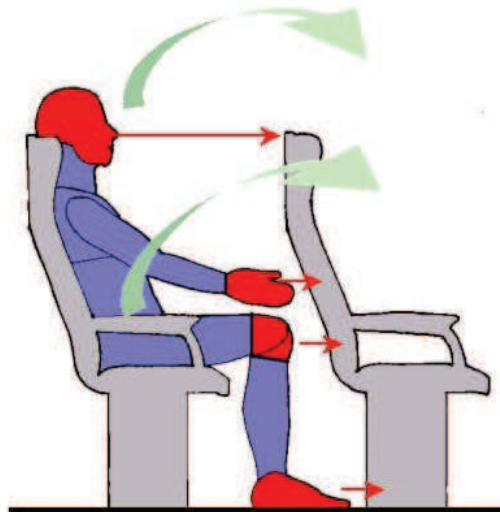
Při řešení kolizí v interiérech kolejových vozidel jsou často používány různé zpomalovací pulsy. Skutečné zpomalovací pulsy při železniční nehodě však nikdy nebyly zaznamenány. Navíc by bylo vhodné zaznamenat tyto pulsy u nových vozidel, kde je eliminováno šplhání dle požadavků ČSN EN 15227. Nejčastěji používané zpomalovací pulsy tedy vycházejí buď z počítačových simulací nárazů kolejových vozidel, nebo z výše zmíněné normy. Také lze říci, že tyto pulsy se budou lišit u jednotlivých vozů vlakové soupravy a jednoznačně největší budou v přední části vlaku. [WOLTER 2008]

## 9.2 Pozice cestujícího

První části těla, u kterých dojde ke zranění, se dají zpravidla dobře odhadnout, za předpokladu podélného pohybu cestujícího. Vyhodnocení mechanismu poranění je velice citlivé na směr nárazu. Nicméně tyto simulace mohou být prováděny na konkrétním typu interiéru železničního vozidla a jejich výsledky jsou dobře zhodnotitelné prostřednictvím kritérií poranění. Na pozici cestujícího má rovněž významný vliv rozvržení sedadel. Toto rozvržení může zásadním způsobem ovlivnit část těla náchylnou k poranění, druh poranění a jeho závažnost. Při pohledu na toto rozdělení jsou rozdíly v poranění naprosto zřejmé. Například u příčného sezení jsou pasažéři nárazem vymrštěni dopředu, zatímco u podélného sezení jsou vymrštěni bokem. Sedadla ve vozidle jsou také často montována na společnou nosnou podporu, takže může záležet na tom, zda jsou všechna sedadla obsazena či nikoliv. V zásadě jsou v kolejových vozidlech pro dopravu osob rozlišovány tyto typy rozvržení sedadel, popřípadě je uvažován stojící cestující:

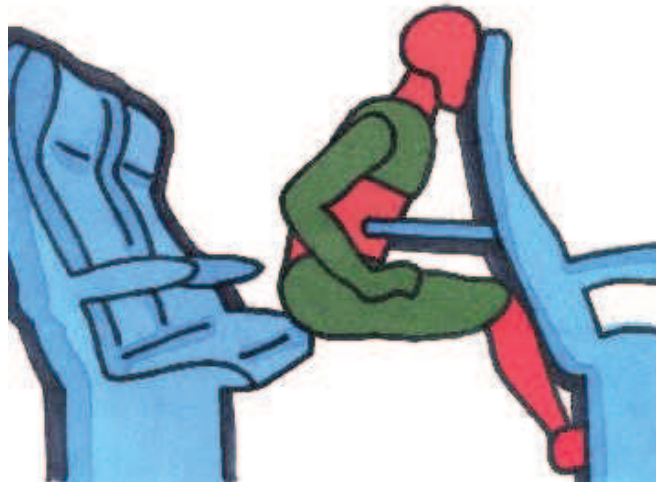
1. Příčné jednosměrné.
2. Čelní s otevřeným prostorem.
3. Čelní se stolkem.
4. Příčné jednosměrné se stolkem.
5. Podélné.

Níže uvedený schématický diagram (Obr. 11) ukazuje části těla, u kterých dojde s největší pravděpodobností k poranění u jednosměrného sezení. Cestující se zde pohybuje nejprve lineárně, a po dopadu první části těla se trajektorie ostatních částí těla změní. V tomto případě nejprve náraz kolen způsobí natočení těla kolem bodu styku kolen a sedadla. Následně pak dojde ke zpomalení rotace pánve. Hlava pak s největší pravděpodobností narazí na opěradlo, ale přesné umístění nárazu nelze odhadovat.



Obr. 11 První části těla, u kterých dojde k poranění, zdroj: [EURAILS SAFE]

Významné rozdíly v samotném průběhu sekundárního nárazu může způsobit pouze sklopený stolec. Počáteční posuv celého těla je zde shodný jako u předchozího případu, následně zde ale v důsledku nárazu na stolec nedochází k natočení těla kolem bodu styku kolen a předního sedadla (Obr. 12). Významné množství nárazové energie bude totiž pohlceno v oblasti styku těla a stolku a je zde značně ohrožena oblast břicha, popřípadě hrudníku cestujícího.



Obr. 12 Poranění při sklopeném stolku, zdroj: [EURAILS SAFE]

V některých případech však může být vhodně navržený stolec naopak užitečný. Například u čelního sezení s otevřeným prostorem může stolec významně zkrátit dráhu, kterou tělo urazí před sekundárním nárazem. Jak již bylo uvedeno dříve, díky zkrácení dráhy bude nárazová rychlost nižší. Tím pádem mohou být očekávány příznivější následky (Obr. 13).



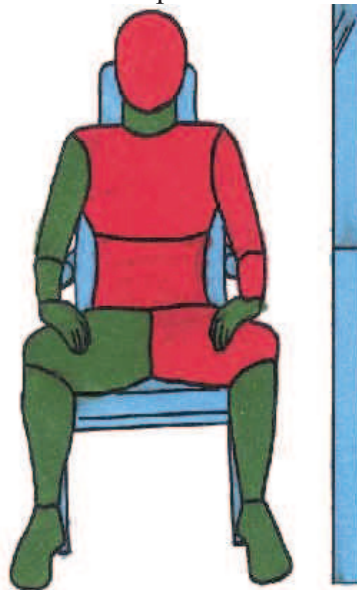
Obr. 13 Čelní sezení se stolcem, zdroj: [EURAILS SAFE]

Naprostě specifickým případem kolize, který se vyskytuje především u kolejových vozidel, je náraz stojícího cestujícího. Průběh tohoto nárazu je ovlivněn velkým množstvím různých podmínek. Celkový průběh kolize bude záležet na tom, zda cestující stojí čelem nebo bokem ke směru nárazu, zda se drží interiérových zařízení nebo k tomu určených madel a v jaké výšce se jich drží. Rovněž zde bude rozhodovat to, kde cestující stojí a v jaké vzdálenosti od něj jsou všechny překážky, popřípadě ostatní spolucestující. Příklad takové kolize je uveden na Obr. 14.



Obr. 14 Kolize stojícího cestujícího, zdroj: [EURAILS SAFE]

Příčné sezení cestujícího se svým charakterem podobá řešení kolize cestujícího v automobilu při bočním nárazu (Obr. 15). Na rozdíl od automobilu je však cestující v kolejovém vozidle nepřipoutaný a překážka, na kterou naráží, je značně vzdálena. Extrémním případem tohoto typu sezení je pak sezení několika pasažérů vedle sebe. Zde je zároveň rozhodující, zda jsou všechna místa plně obsazena či nikoliv.



Obr. 15 Příčné sezení cestujícího, zdroj: [EURAILS SAFE]

### 9.3 Interiérové prvky

Když část těla cestujícího dopadne na interiérový prvek, je tvar a tuhost narážejícího objektu tím, co rozhoduje o koncentraci a velikosti přenášeného zatížení. Náraz na objekt plochého tvaru způsobuje méně závažná poranění než náraz na tupý nebo ostrý předmět. Například poměrně jednoduchá lineární fraktura lebky je často způsobena nárazem na plochý předmět. Při nárazu hlavy na tupý předmět však často dochází k mnohočetným zlomeninám s vážnými následky. Obvykle pak má velikost a tvar objektu větší vliv na větší části těla jako

je hlava hrudník a pánev. V kolejových vozidlech jsou používány tři klasifikace tvaru objektu, uvedené v následující tabulce (Tab. 1).

Tab. 1 Klasifikace tvarů předmětů

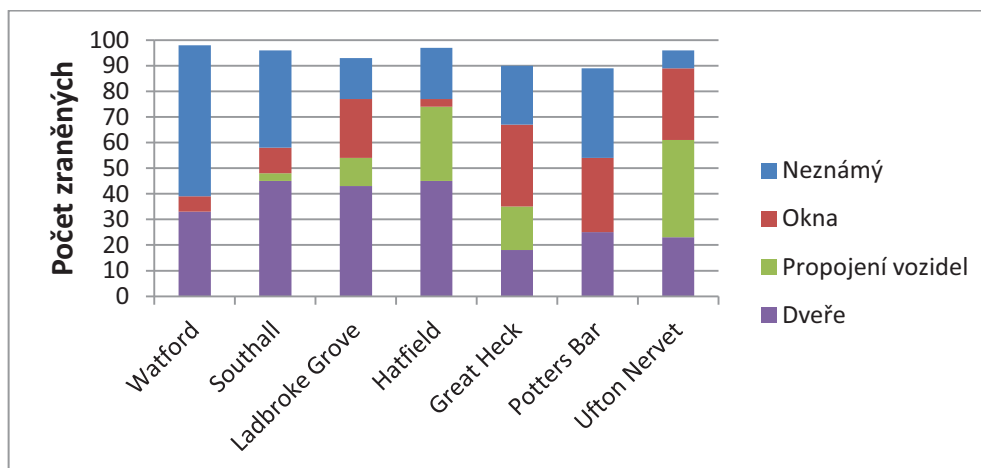
Klasifikace	Poloměr zakřivení	Zvýšení závažnosti poranění	Druhy zranění
Plochý předmět	> 40mm	-	Pohmožděny, lineární zlomeniny lebky, zlomeniny žeber, páneve.
Tupý předmět	40 mm - 5mm	Hlava, hrudník, břicho, pánev.	Mnohočetné fraktury lebky. Zlomeniny končetin.
Ostrý předmět	< 5 mm	Různé mechanismy s penetrací.	Tržné rány a penetrace, pronikající více než 25 mm do hloubky.

Tuhost nebo poddajnost objektu kolize udává velikost výsledné síly. Takový objekt buď elasticky (plněním) nebo plasticky (deformací) zpomaluje narážející část těla. Účinky zpomalení pak budou tím příznivější, čím delší bude dráha při zpomalování. U těchto součástí je třeba vyhodnocovat dynamickou tuhost ve spojení se všemi souvisejícími součástmi. Dynamická tuhost se vyhodnocuje velmi obtížně a zpravidla se k těmto účelům používají pádová nebo kyvadlová zařízení. U těchto zkoušek předmět o známé hmotnosti naráží definovanou rychlostí do testované součásti. Tuhost objektu lze definovat ve čtyřech stupních:

1. Vysoká tuhost (ocelové části).
2. Nízká tuhost (plastové části).
3. Mírná tuhost (polstrované části).
4. Velmi mírná tuhost (polstrované části na deformovatelné struktuře).

## 10 Možnost úniku cestujících

Zásadní vliv na možnost úniku má množství i druh únikových cest. Prostředkem úniku se mohou stát servisní dveře, dveře propojující jednotlivá vozidla nebo nouzové okno. Bezprostřední reakce cestujících po nehodě je snaha opustit prostor nehody dříve, než může následovat další nebezpečná situace. Proto je často důležité zvažovat možnost opuštění vozidla i v případech, kdy setrvání cestujících není přímo nebezpečné. Asi nejdůležitější zde bude stanovit únikové cesty, které pasažéři využívají nejčastěji. To by mohlo pomoci stanovit příčiny, které často vedou pasažéry k využívání méně dostupných a méně bezpečných cest, než jaké mají přímo k dispozici. Takovéto srovnání je provedeno na Obr. 16. Zde jsou rozebrány četnosti využití únikových cest u sedmi železničních nehod.



Obr. 16 Četnost využití různých únikových cest

Pro účel pasivní bezpečnosti není důležité zvažovat, zda jsou většímu riziku vystaveni pasažéři setrvávající ve voze, nebo ti, kteří bezprostředně opustí vozidlo. Při úniku cestujících je často hodnocen stupeň imobility. Avšak příčiny, proč cestující nemohou opustit vozidlo, mohou být různé a lze je rozdělit do následujících kategorií:

- Nelze uniknout z důvodu úrazu.
- Nelze uniknout kvůli zaseknutým dveřím.
- Nelze uniknout kvůli zhroucení struktury vozidla.
- Nelze uniknout kvůli nedostupnosti jiných únikových cest (např. okna).

Zjednodušeně lze tedy říci, že znemožnění úniku posádky může být způsobeno buď indispozicí cestujících, nebo indispozicí vozidla. Ochrana před úrazem pak může vyžadovat zaměření pozornosti k oběma otázkám.

## 11 Mechanismy poranění v interiérech kolejových vozidel

Poranění cestujícího v železničním vozidle je nejčastěji způsobeno nárazem cestujícího na interiérové prvky, jako jsou sedačky, stolky, stěny a madla. Způsobené újmy a jejich závažnosti jsou velmi závislé na tom, jaká část těla je poraněna. Zde je na místě popsat mechanismy a kritéria poranění [KENNERLY 1998] z pohledu pěti hlavních bodů.

- Definice a hlavní anatomie dané části těla.
- Hlavní typ nárazu a zatížení dané části těla.
- Nejčastější úrazy a mechanismy poranění způsobené těmito nárazy.
- Kritéria poranění, která nejlépe vypovídají o závažnosti pro každý typ poranění.
- Úroveň kritérií poranění v klasifikačním systému závažnosti poranění.

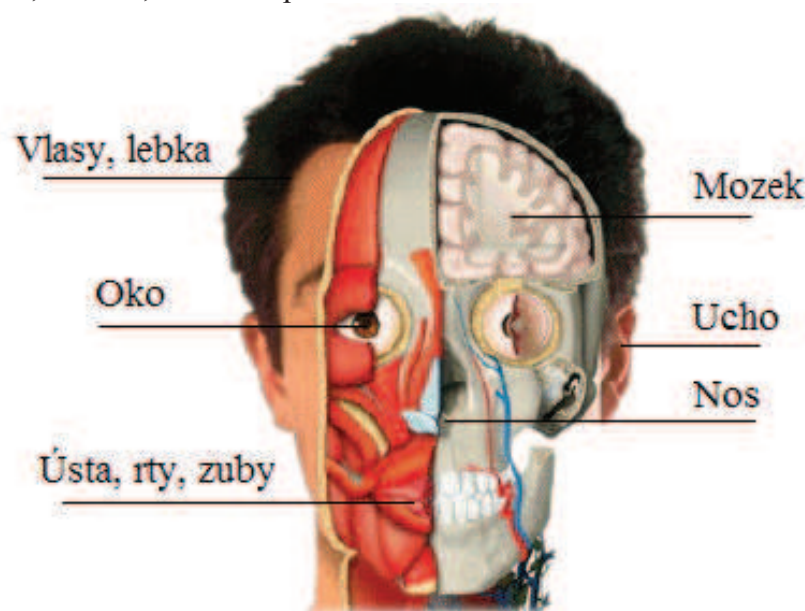
Lidské tělo lze rozdělit do šesti hlavních oblastí v závislosti na typu nárazu, funkci a inženýrských vlastnostech. Pro každou část těla jsou stanoveny hlavní mechanismy poranění a kritéria poranění.

- Hlava včetně obličeje
- Krk
- Hrudník
- Břicho
- Pánev
- Končetiny

K vyhodnocení závažnosti poranění se užívají kritéria poranění. Kritérium poranění je matematický vztah, stanovený na základě empirických pozorování, který formálně popisuje vztah mezi některými měřitelnými fyzikálními veličinami souvisejícími s testovaným subjektem a poraněním, které vzniká při této interakci. Limit poranění může být definován jako hodnota některého známého kritéria poranění, při které nedojde ke zranění. Nebo lze limit definovat jako mezní hodnotu spojenou s určitou pravděpodobností vzniku poranění určité závažnosti. Kritéria poranění pro hodnocení následků přímých a nepřímých nárazů byla zavedena v automobilovém průmyslu. Proto vznikl požadavek na zařízení umožňující opakované měření těchto veličin. To vedlo k vývoji antropomorfního testovacího zařízení ATD (Anthropomorphic Test Device), nebo také crash test dummies. Tyto figuríny byly vyvinuty pro konkrétní scénáře, dle konkrétních legislativních požadavků. Přičemž crash test dummies a kritéria poranění byly vyvinuty pro části těla, typy poranění a mechanismy poranění které se nejčastěji vyskytují v automobilové dopravě. Z těchto důvodů nemusí být tyto vyvinuté prostředky vždy beze změny použitelné v oblasti kolejových vozidel. Proto je pro cestující kolejových vozidel každá část těla, každý mechanismus poranění posuzován individuálně. A pokud je to možné, pak je zde použito obdobné hodnocení jako v automobilovém průmyslu.

## 11.1 Hlava

Hlava je ta část, připojená ke zbytku těla krkem (Obr. 17). Co se týče poranění, může být rozdělena do dvou částí. První částí je lebka, která obsahuje kulovou část kosti připojenou ke krku a chrání mozek. Druhou částí je obličej, který obsahuje oči, nos a ústa a je tvořen konglomerací propojených kostí krytých kůží. Mozek je jedním z životně důležitých orgánů, řídí všechny vědomé i nevědomé pohyby a je centrem vědomí. Tvář obsahuje smyslové orgány, jakož i orgány pro dýchání a příjem potravy. Těžké zranění obličeje může být životu nebezpečné, pokud zabraňuje možnosti dýchat, nebo pokud znemožňuje cestujícímu únik z vozidla. Hlava je obzvláště zranitelná část těla, jak díky své exponované poloze, tak díky citlivosti mozku a obličeje k nárazu. Přímý dopad síly a zrychlení způsobí většinou zranění hlavy. V kolejovém vozidle jsou tato zranění nejčastěji způsobena tuhým plochým objektem, jako jsou madla, sedadla, stůl nebo podlaha.



Obr. 17 Anatomie hlavy, zdroj: [EURAILS SAFE]

Existují tři různé typy poranění hlavy, způsobené buď přímým působením síly, nebo zrychlením:

- Poranění mozku působením přímé síly nebo přímého zrychlení.
- Poranění lebky přímým nárazem.
- Poranění obličeje, tržné rány, pohmožděniny, zlomeniny obličejových kostí nárazem.

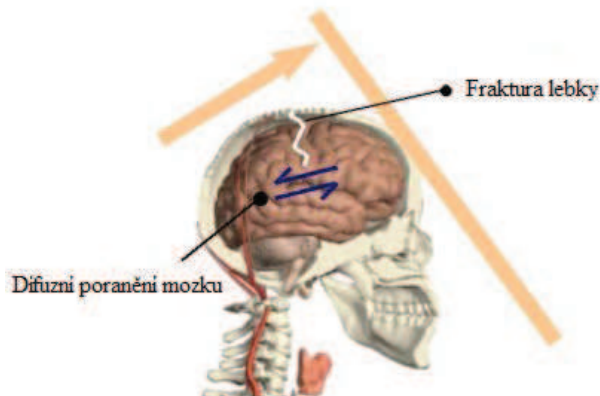
Tyto tři zranění se vzájemně vylučují, pouze v případě velmi vážných nehod se mohou vyskytnout pohromadě. Drcení lebky při kvazi-statickém zatížení je jev velmi vzácný, neboť vyžaduje deformaci struktury a interiérového zařízení během sekundárního nárazu. Navíc by bylo velmi obtížné předcházet tomuto druhu poranění v kolejových vozidlech. Proto tento stav není zvažován.

Poranění mozku jsou velmi složitá, přesto je lze rozdělit do dvou skupin. Difuzní poranění jsou způsobena vysokým zrychlením na celý mozek a často jsou spojena s nárazem hlavy na plochý předmět. Fokální poranění způsobená přímými dopady na konkrétní části mozku se pohybují od drobných pohmožděnin až po přímá vniknutí. Často jsou způsobena tupým nebo ostrým předmětem. Trvalé poškození mozku nebo smrt je způsobena buď přerušením průtoku krve do mozku a následným odumíráním mozkové tkáně, nebo přímým poškozením mozkové tkáně penetrací či roztržením. Poškození mozku je nezvratné, ačkoliv některé druhy duševních funkcí mohou být obnoveny.

Zlomeniny lebky nejsou přímo fatální a nezpůsobují postižení, s výjimkou fatálních případů. Nicméně jsou často indikátory nebo příčinami poranění mozku. Zlomeniny lebky mohou být způsobeny dvěma různými způsoby. Dopadem na plochý předmět vznikají lineární zlomeniny, zatímco ostrý předmět způsobuje zlomeniny lokalizované.

Poranění obličeje, ačkoliv většinou nezpůsobují přímé ohrožení života, jsou často příčinou vážných zdravotních následků. Kostra i měkké tkáně v oblasti obličeje jsou velmi složité. Obličejové kosti mají velmi složitou strukturu a často jsou spojeny jen slabými švy. Obličejové zlomeniny jsou způsobeny jak plochými, tak tupými předměty a často se vyskytují v různých místech podél obličejových švů.

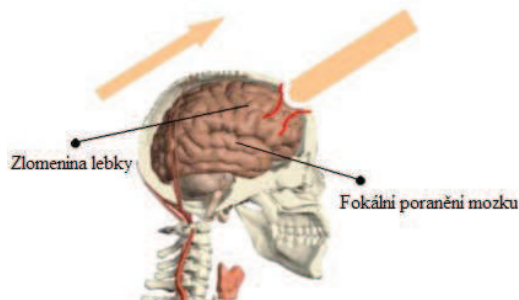
Při nárazu na plochý předmět dochází nejčastěji k difuznímu poranění mozku. To je způsobeno vysokými translačními nebo rotačními nárazovými rychlostmi. Dochází zde k trhání nebo stříhání mozkové tkáně. V důsledku roztržení cév následným únikem krve dochází ke zvýšení tlaku v lebeční dutině, a zároveň k poškození krví špatně zásobených částí mozku. Zpravidla k tomu dochází v místě nárazu, nebo na opačné straně lebky. Při rovné dopadové ploše nebo při správně rozmístěném zatížení lebka selhává jako celek a dochází k lineárním zlomeninám. V místě nárazu je lebka silně prohnutá dovnitř, ale na opačné straně zůstává téměř bez deformace. To generuje velké tahové síly, způsobující trhliny, které se šíří k místu dopadu jako lineární zlomeniny (Obr. 18).



Obr. 18 Náraz na plochý předmět, zdroj: [EURAILS SAFE]

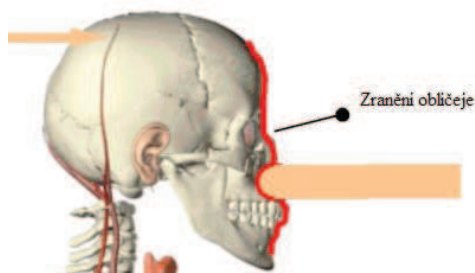


Náraz na tupý předmět způsobuje fokální zranění mozku, která nemusí být vždy spojena se zlomeninou lebky. Tato zranění se pohybují od drobných hematomů a krvácení v oblasti blány obklopující mozek, až po úplné penetrace do mozku. Nejčastěji jsou spojovány s lokalizovanými zlomeninami a průniky ostrých předmětů do mozku. Při tom jsou nejčastěji způsobeny dva typy lokalizovaných zlomenin. Stlačením (cave in) způsobené objekty o velikosti 5-13 cm<sup>2</sup> a penetrací (punch through) způsobené objekty menší než 5 cm<sup>2</sup>. Každá z těchto zlomenin pak přímo ohrožuje život cestujícího (Obr. 19).



Obr. 19 Náraz na tupý předmět, zdroj: [EURAILS SAFE]

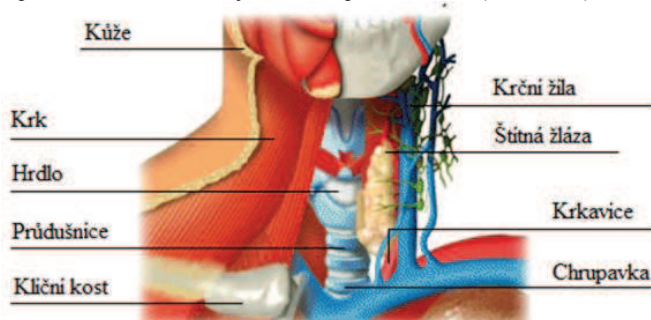
Při nárazu tupého předmětu do obličejové části se stávají nejtěžší poranění. Při zlomení obličejových kostí jsou jejich penetracemi měkkými tkáněmi potenciálně ohroženy oči. I drobná poranění zde mohou způsobit vážné následky. Úder tupého předmětu do obličejové části snižuje celkové zrychlení hlavy, což ovlivňuje ohrožení mozku (Obr. 20).



Obr. 20 Náraz na tupý předmět do obličejové části, zdroj: [EURAILS SAFE]

## 11.2 Krk

Krk tvoří pružné spojení mezi hlavou a tělem a jako takový poskytuje strukturální oporu hlavy. Svoji stavbou je krk tuhý a přesto flexibilní, umožňující vertikální i laterální natáčení hlavy. Krk je rovněž oporou pro míchu, vedou jím důležité cévy do mozku, a zároveň je důležitým spojením dýchacího a trávicího ústrojí. Z pohledu poranění se krk rozděluje na dvě části, z nichž každá má svůj vlastní specifický mechanismus poranění. Krční páteř poskytuje oporu pro hlavu a chrání míchu a měkké tkáně na přední straně krku, obsahující průdušnici, jícen a velké cévy zásobující hlavu (Obr. 21).



Obr. 21 Anatomie krku, zdroj: [EURAILS SAFE]

Krční páteř se skládá ze sedmi obratlů (C1-C7), které podpírají hlavu a jsou rozděleny do dvou skupin. V první skupině jsou obratle C1 Atlas a C2 Axis a v druhé skupině jsou ostatní obratle C3-C7. Atlas a Axis jsou výrazně odlišné od ostatních obratlů. Atlas nemá žádný nosný válcový povrch ani boční podpory, zatímco Axis má alespoň malé přední nosné prvky a postranní i zadní podpory. Jako takové jsou tyto dvě kosti výrazně slabší v tlaku, smyku a ohybu než zbytek kostry. Tyto kosti umožňují otáčení hlavy. Pevnost krku zajišťují silné vazy, spojující obratle přes páteř.

Existují tři hlavní typy poranění krční páteře:

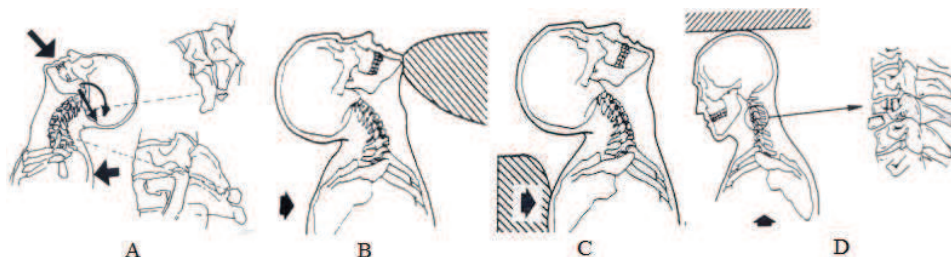
- Zlomenina krční páteře, poškození vazů spojujících obratle.
- Přerušení míchy střihem, nebo ohýbáním krčních obratlů.
- Poškození měkkých tkání obsahujících průdušnici, hrtan, jícen a hlavní tepny.

První dva typy jsou spolu neoddělitelně spojeny, neboť obě jsou způsobeny nadměrným ohybem, střihem nebo axiálním posunutím z nepřímého zatížení díky relativnímu pohybu hlavy vůči trupu. Tyto typy poranění mají svá specifická rizika:

- Jakékoliv poškození míchy může vést k smrti nebo trvalému ochrnutí.
- Zatížení vznikající v krku jsou složitou kombinací ohybu, smyku a axiální síly.
- Obratle mají mnoho různých mechanismů vzniku poškození.

Nepřímé zatížení hlavy je generováno relativním posunem hlavy vůči torzu těla, který je způsoben dvěma hlavními mechanismy. V prvním případě je hlava prudce zpomalena nárazem na interiérový prvek kolejového vozidla, zatímco torzo pokračuje v pohybu a veškeré síly mezi těmito částmi přenáší krk. Typickým případem je náraz hlavy do protějšího sedadla u jednosměrného sezení. V druhém případě je kolejové vozidlo prudce urychleno a při vychýlení hlavy dozadu dochází bez použití opěrky ke generování velkého tlaku mezi obratli nebo k poranění typu "whiplash".

Mechanismus čelního nárazu hlavy způsobuje nejvíce vážných úrazů následkem potenciálně vyššího nepřímého zatížení s nejpestřejším spektrem směrů zatížení. Druhý nejvážnější případ je náraz zezadu. U prvního mechanismu poranění, při silném ohýbání, se jakákoliv fraktura páteře přímo dotýká míchy. Při menším zatížení může být vyvolána vratná či nevratná ztráta motorické nebo senzorické kontroly nad specifickými částmi těla. V nejhorším případě pak může dojít k nevratným poškozením, při kterých osoba ztrácí kontrolu nad celým svým tělem. Nejhorší následky mají pak zlomeniny a porušení v oblasti C1 a C2, při kterých jsou následky často fatální (AIS 6). Závažnost poranění je tím nižší, čím nižší obratel je poškozen. Takže pokud dojde k porušení pod C5, je kontrola břicha a hrudníku zachována, ale senzorické a motorické ovládání všech končetin je ztraceno (AIS 5). Různá zatížení krční páteře, ke kterým dochází v interiérech kolejových vozidel, jsou vyobrazena na následujícím obrázku (Obr. 22). V železničním prostředí budou nárazy hlavy do sedadla produkovat složitou kombinaci ohybu a osově síly. Tyto síly jsou určeny dle poměrné trajektorie hlavy a torza těla, úhlu, pod jakým hlava naráží do překážky, a zda je místem nárazu hlava nebo obličej.



Obr. 22 Mechanismy poranění krční páteře A) tenze- flexe B) osový náraz hlavy C) hyperflexe D) poranění přední části, zdroj: [EURAILS SAFE]

Hlava a trup obvykle dostatečně chrání krk před přímým nárazem, takže zranění tohoto typu jsou poměrně vzácná. Nicméně v železničním vozidle s nízkými sedadly k tomuto typu poranění může dojít. Existuje však jen velmi málo literatury na toto téma.

### 11.3 Hrudník

Lidský trup je rozdělen do dvou hlavních oblastí, oddělených membránou. Hrudní koš, který obsahuje srdce a plíce, má membránu jako spodní hranici. Horní hranicí je membrána pro dutinu břišní, ve které jsou játra, slezina, ledviny, žaludek, ženské reprodukční orgány, močový měchýř a střeva. V biomechanice však toto rozdělení není zcela definitivní, neboť orgány v horní části dutiny břišní jsou částečně chráněny spodní částí hrudního koše. Samotné orgány lze rozdělit do dvou kategorií. Pevné orgány naplněné tekutinou, jako jsou játra, slezina a ledviny, a duté orgány, jakými je žaludek, děloha a střeva, obsahující velké množství vzduchu. Efekt hrudního koše a kategorie poraněných orgánů ovlivňují odezvu na náraz, typ a mechanismus poranění. Z tohoto pohledu má smysl rozdělit trup na tři hlavní části s různou biomechanickou odezvou a s různými kritérii poranění:

- Hrudník, obsahující srdce a plíce obklopený hrudním košem.
- Horní břišní dutina, obsahující pevné orgány, částečně chráněné hrudním košem.
- Dolní břišní dutina, obsahující duté orgány, jako jsou žaludek, střeva, děloha.

Většina biomechanického výzkumu je obecně soustředěna na poranění hrudi nebo torza těla jako celku, což představuje druhou nejčastější příčinu úmrtí v kolejových vozidlech. V interiérech kolejových vozidel jsou dva hlavní mechanismy poranění. Prvním mechanismem poranění je zlomenina žeber, způsobená nárazem tupého předmětu s možným průnikem do hrudníku, způsobující poškození vnitřních orgánů. U druhého mechanismu poranění dochází k pohmoždění vnitřních orgánů vlivem vysokého zrychlení na celou oblast hrudníku. Vzhledem k relativně menšímu zrychlení v kolejových vozidlech je zřejmé, že se častěji vyskytuje první mechanismus poranění při nárazu na madla, hrany sedadel a další interiérové prvky.

Pokud jde o zlomeniny žeber, mechanismus poranění přímo souvisí se stlačením hrudníku. Žebra jsou poškozena vlivem nadměrného ohybu poruchou vyskytující se na tahové straně žeber. Počet zlomených žeber významně ovlivňuje rychlost deformace, neboť tuhost přední části hrudního koše závisí na vlastnostech mnoha měkkých tkání, jejichž tuhost s rostoucí rychlostí deformace klesá. Testy na mrtvolách prokázaly, že při stlačení hrudníku o 20% dochází k počátečním poraněním žeber, a při stlačení o 40% již dochází k vážným mnohočetným zlomeninám. Při bočním nárazu je opět poranění přímo závislé na stlačení hrudníku. Protože je však hrudní koš bočně tužší a klade větší odpor při reakci na stlačení, dochází k vícenásobným zlomeninám žeber již při stlačení o 17%.

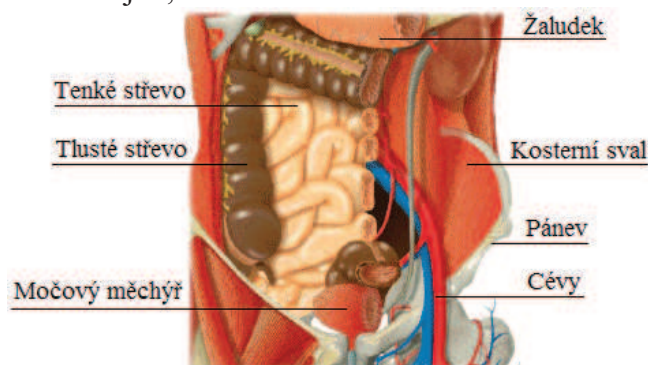
I když zborcení hrudního koše představuje vážné zranění, ve skutečnosti je nejčastější příčinou úmrtí poranění měkkých tkání, vnitřních orgánů a cév. K tomu dochází buď prostřednictvím vnitřního krvácení, nebo rozpuštěm v důsledku zvýšení vnitřního tlaku

tekutiny. Tato poranění vznikají méně často z pouhého stlačení hrudníku, protože všechny vnitřní orgány se mohou volně pohybovat v horní i dolní dutině břišní. Tyto úrazy jsou závislé na rychlosti a délce trvání stlačení, nicméně nelze stanovit vztah mezi počtem zlomených žebér a závažností vnitřních poranění.

Poranění vnitřních orgánů ostrým předmětem jsou zpravidla méně závažná než při stlačení. Výjimkou jsou případy, kdy bodné poranění způsobuje silné krvácení nebo přímé selhání orgánů. Tento typ poranění svou charakteristikou odpovídá bodným a střelným ranám s hloubkou penetrace větší než 5 cm. Lze předpokládat, že v interiéru kolejového vozidla nebude velké množství takto ostrých a dlouhých předmětů, navíc je tento druh poranění hodnocen závažností AIS 1-2.

## 11.4 Břicho

Břicho může být definováno jako spodní dutina břišní, obsahující střeva, dělohu, močový měchýř, která není chráněna hrudním košem (Obr. 23). V oblasti podbřišku může být dosaženo značného stlačení, než dojde ke zranění. Nejčastějším typem zranění je natržení nebo pohmoždění, způsobující únik krve nebo obsahu střev do dutiny břišní. Tento typ zranění často není život ohrožující, ale může mít za následek závažné zdravotní problémy.



Obr. 23 Anatomie břicha, zdroj: [EURAILS SAFE]

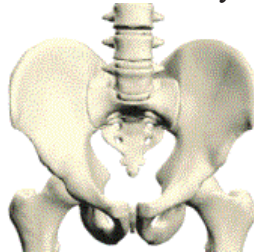
Vnitřní orgány břicha jsou chráněny silnými svaly a kůží břišní stěny. Vzhledem k tomu, že zde jsou obsaženy duté orgány částečně naplněné vzduchem, které se mohou volně pohybovat v dutině břišní, jsou poranění této části těla velmi různorodá. Nejčastěji zde dochází k perforaci tupým předmětem, následkem čehož může dojít i k poranění cév. Lokální dopady na izolované části střeva mohou mít za následek vnitřní poranění, jsou obtížně zjištěitelné a jejich účinek může být opožděn. Proto je také obtížné správně identifikovat mechanismy poranění. Navíc jsou poranění břicha často spojená s dalšími zraněními, jako jsou například zlomeniny pánve. Močový měchýř je v pánvi dobře chráněn, takže nebezpečí poranění ostrým předmětem je jen malé. Může však dojít k jeho protržení důsledkem nadměrného tlaku v břišní dutině. Vzhledem ke své poloze v pánvi je také dobře chráněná děloha, pokud se nejedná o těhotnou ženu. K poranění břišní dutiny může dojít buď předmětem, který je součástí interiéru vozidla, nebo zlomeným žebrem. Jakýkoliv úraz břišní dutiny je vážný vzhledem k nebezpečí infekce a může dosahovat závažnosti až AIS 5.

## 11.5 Pánev

Pánev se skládá z řady deskovitých kostí, které tvoří kruh k podpoře trupu v horní části dolních končetin. Zajišťuje tak spojení mezi bederní páteří a horní částí stehna a stehenní kosti. Oblast uvnitř pánve tvoří spodní část dutiny břišní a obsahuje střeva, močový měchýř a ženské reprodukční orgány. Pánev je systematicky celistvá a skládá se z řady propojených kostí:

- Křížová kost je série srostlých obratlů a spojuje dolní páteř s kyčelními kostmi.
- Kyčelní kost je tvořena centrální částí přivrácené ke kyčelnímu kloubu.
- Sedací kost a pubická kost tvoří dolní okraj pánevní kosti a kyčelní jamky.

Křížové a sedací kosti jsou velké a strukturálně odlišné než další dvě (Obr. 24). Tyto kosti přenáší svislé a podélné zatížení z pánve do páteře. Naopak nejslabší kostí je kost pubická. V prostředí kolejových vozidel je pánev málokdy vystavena přímému nárazu. Při čelním nárazu je pánev nejčastěji nepřímou zatížena osovou silou přes stehenní kost z kolen a dolních končetin. Náraz do protějšího sedadla tak zpravidla způsobuje silné smykové zatížení v oblasti kyčelního kloubu. Při bočním nárazu do stěny nebo opěradla je pak veškeré zatížení přenášeno přes kyčelní kloub přímo do pánve. Výjimečným případem je pak stojící cestující, u kterého může dojít k přímému nárazu tupého předmětu na pánev. Tímto mechanismem mohou vznikat komplexní zlomeniny v místě nárazu a další zlomeniny od nepřímého zatížení, podobně jako tomu je u kolizí chodců v automobilovém odvětví. Poranění pánve zpravidla nejsou život ohrožující, ale kvůli komplikované charakteristice zlomenin zpravidla způsobují vážné zdravotní následky.

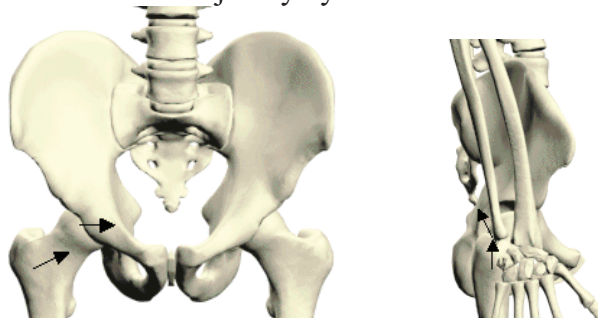


Obr. 24 Anatomie pánve, zdroj: [EURAILS SAFE]

Existují tři hlavní druhy poranění způsobené přímým zatížením pánve:

- Izolované zlomeniny pánevního kruhu, které nezpůsobují žádné postižení.
- Mnohočetné zlomeniny pánevního kruhu, které vedou k nestabilitě pánve a mohou způsobit poranění močových cest.
- Poranění sedací kosti nebo kostrče nejsou vážná, ale jsou velmi bolestivá.

Nepřímá poranění pánve jsou způsobena axiálním nebo bočním zatížením stehenní kosti (Obr. 25). Tato zatížení se zpravidla přenášejí kyčelními klouby do kosti a mohou způsobit traumatické vymknutí nebo zlomeniny v oblasti kyčlí. Typ poranění bude záviset na směru zatížení z stehenní kosti. Při vysokém bočním zatížení pak může hlava kyčelního kloubu prorazit tenkou stěnu jamky a způsobit tak trvalá postižení. Vysoké axiální zatížení pak může způsobit nalomení kloubní jamky kyčelního kloubu.



Postranní náraz

Náraz v ose stehenní kosti

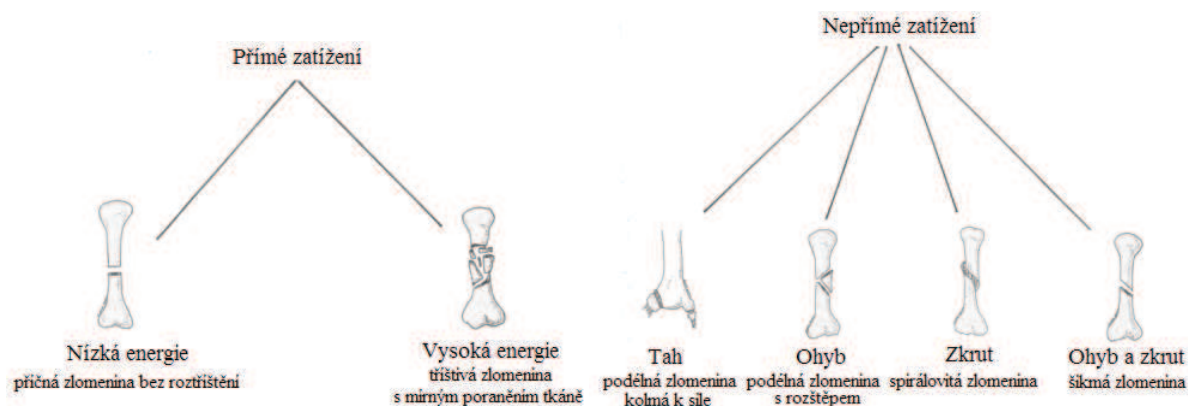
Obr. 25 Poranění pánve, zdroj: [EURAILS SAFE]

## 11.6 Končetiny

Končetiny zahrnují horní a dolní končetiny a všechny jejich části, jako jsou kosti, klouby a měkké tkáně včetně kůže. U horních končetin jsou zahrnuty i ramenní klouby a klíční kosti, zatímco u dolních končetin jsou kyčelní klouby zvažovány spíše jako součást pánve. Kosti horních a dolních končetin se skládají ze dvou hlavních typů. Prvním typem jsou dlouhé kosti. Jsou to hlavní nosné kosti, jako například kost stehenní, lýtková, holenní u dolních končetin a kost klíční, pažní, vřetenní a loketní u horních končetin. Tyto kosti jsou na svých koncích spojeny pomocí svalů, vazů a šlach, které umožňují pohyb horních končetin. Druhým typem jsou drobné kosti, které tvoří dlaně a kotníky. Jedná se o složité komplexy malých kostí, které umožňují přenos velkého zatížení na ruku a nohu do dlouhých kostí. Ke zlomeninám dlouhých kostí dochází častěji v důsledku přímých vlivů, zatímco poranění kloubů je častěji způsobeno vlivy nepřímými. Klouby jsou pak poškozeny buď nadměrným tlakem, nebo přetočením spojovaných kostí do extrémní polohy. Měkké tkáně, jako jsou svaly a kůže, pak bývají nejčastěji poškozeny působením ostrého nebo tupého předmětu, kterým může být také zlomená kost. Poranění končetin mohou být rozdělena do tří skupin:

- Zlomeniny kostí.
- Poškození kloubů s poraněním šlach a vazů.
- Roztržení kůže a svalů.

Tato zranění se mohou objevit samostatně nebo v různých kombinacích. Zlomeniny kostí se mohou vyskytnout jako důsledek přímý či nepřímých zatížení. Ke zranění dochází, pokud v lokální části kosti překročí zatížení v tlaku, tahu nebo ve smyku maximální únosné napětí kosti. Následující obrázek (Obr. 26) ukazuje různé klasifikace zlomenin.



Obr. 26 Zlomeniny kostí, zdroj: [EURAILS SAFE]

Závažnost zlomenin je hodnocena dle typu a počtu lomových ploch. Při nízké nárazové energii často vznikají zlomeniny s jednodušším lomem a s velkou pravděpodobností rychlého zotavení. Naopak tříštivé a komplikované zlomeniny jsou spojeny častěji s větší energií nárazu. Obecně lze rozdělit typy zlomenin dle mechanismů poranění do čtyř základních skupin:

- Přímý náraz - poranění plochým nebo tupým předmětem.
- Přímá penetrace - poranění ostrým předmětem.
- Nepřímé zatížení - poranění setrvačnými silami a drcením.
- Opakované zatížení – únava.

## 12 Biomechanická kritéria poranění

Kritérium poranění je matematický výraz, stanovený na základě empirických pozorování, který formálně popisuje vztah mezi některými měřitelnými fyzikálními veličinami souvisejícími s testovaným subjektem a poraněním, které vzniká při této interakci. Kritéria poranění se neustále vyvíjejí a jejich počet je dnes značný. Dále jsou shrnuta hlavní kritéria, u nichž je předpokládáno možné využití v oblasti kolejových vozidel. Tato kritéria jsou rozdělena dle jednotlivých částí těla.

### 12.1 Popis kritérií poranění hlavy

Významným kritériem využívaným pro hodnocení vážnosti poranění hlavy je kritérium 3MS. Jedná se o kritérium špičkového zpoždění hlavy. Toto kritérium pouze říká, že největší špička zrychlení, trvající 3 milisekundy a déle, musí ležet pod limitní hodnotou. Tato limitní hodnota je stanovena na 80g. Toto kritérium vychází z křivky WSU (Wayne State University), která udává posuvné zpomalení hlavy v závislosti na délce trvání účinku.

V souvislosti s WSU křivkou bylo rovněž vytvořeno kritérium SI (Severity Index). Hraniční hodnotou pro přežití je  $SI=1000$ . Hodnotu tohoto kritéria lze vypočítat dle následující rovnice. V tomto vztahu je  $a_r$  výslednou hodnotou zrychlení a  $t$  značí čas konce nárazu.

$$SI = \int_0^t a_r^2 dt \quad (12.1.1)$$

Jedním z nejvyužívanějších kritérií poranění hlavy je kritérium HIC (Head Injury Criterion). Toto kritérium je v podstatě integrálem křivky největšího výsledného zrychlení v čase. Může být stanoveno na neomezeném intervalu, nebo v čase 36 ms a 15 ms jako HIC36 a HIC15. Toto kritérium je vypočteno dle následujícího vztahu, kde veličina  $a$  je výsledné zrychlení v  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$  a v čase omezeném intervalem  $t_1, t_2$ . Limitní hodnotou pro přežití je  $HIC=1000$ .

$$HIC = \sup_{t_1, t_2} \left\{ \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right\} \quad (12.1.2)$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (12.1.3)$$

Kritérium HPC (Head Performance Criterion) je vhodné pro dynamickou nebo kontaktní zátěž. Uvažuje se zde časový interval největší zátěže. Hodnota HPC je obdobná hodnotě HIC. Skutečnou hodnotu tohoto kritéria lze stanovit dle následujícího vztahu, kde  $a$  je celkové zrychlení,  $t_1$  je čas počátku hodnocení a  $t_2$  je čas konce hodnocení.

$$HPC = \sup_{t_1, t_2} \left\{ \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right\} \quad (12.1.4)$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (12.1.5)$$

## 12.2 Popis kritérií poranění krku

Prvním kritériem je MOC (Moment about Occipital Condyle), který počítá celkový moment k měřicímu bodu. Tento bod leží ve spojení hlavy a krku v oblasti spojení C1 a týlní kosti. Výpočet je prováděn ve dvou směrech dle následujících vzorců. Symbolem  $F$  je značena síla působící na hlavu. Písmenem  $D$  je značena vzdálenost mezi působící silou a senzorem a písmeno  $M$  značí moment působící na krk.

$$M_{OCy} = M_y - (D \cdot F_x) \quad (12.2.1)$$

$$M_{OCx} = M_x + (D \cdot F_x) \quad (12.2.2)$$

NIC (Neck Injury Criterion) je vztah pro souvislost poranění a změny tlakového gradientu, jakožto náhlé změny v proudění kapaliny uvnitř krční páteře. Kritická hodnota tohoto kritéria je stanovena na  $15 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ . Výpočet je uveden následovně. Hodnota  $a_{relative}$  je zde zrychlení hlavy a hodnota  $v_{relative}$  je rychlost těžiště hlavy.

$$NIC = a_{relative} \cdot 0.2 + v_{relative}^2 \quad (12.2.3)$$

$$a_{relative} = a_x^{T1} - a_x^{Head} \quad (12.2.4)$$

$$v_{relative} = \int a_{relative} \quad (12.2.5)$$

Jedním z nejčastěji používaných kritérií u hodnocení poranění krku je kritérium NIJ (Normalized Neck Injury Criterion). Toto kritérium využívá tažnou či tlačnou osovou sílu a ohybový moment. Kritérium NIJ je předepsáno následujícím vztahem, kde  $F_z$  je osová síla,  $M_{OCy}$  je ohybový moment a veličiny  $F_{zc}$  a  $M_{yc}$  představují kritické hodnoty.

$$Nij = \frac{F_z}{F_{zc}} + \frac{M_{OCy}}{M_{yc}} \quad (12.2.6)$$

Obdobným způsobem jako v předchozím případě je definováno kritérium Nkm. Toto kritérium je však používáno pro zadní náraz a místo osových sil bere v úvahu síly smykové. Vtah pro jeho výpočet se podobá předchozímu případu, ale hodnota  $F_x$  je smyková síla, hodnota  $M_y$  ohybový moment a veličiny  $F_{int}$  a  $M_{int}$  opět značí kritické hodnoty.

$$N_{km} = \frac{F_x}{F_{int}} + \frac{M_y}{M_{int}} \quad (12.2.7)$$

Riziko poranění dolní části krční páteře pak zahrnuje kritérium LNL, definované následujícím vztahem, kde hodnoty  $M_{y_{lower}}$  a  $M_{x_{lower}}$  značí momenty,  $F_{x_{lower}}$ ,  $F_{y_{lower}}$  a  $F_{z_{lower}}$  značí síly a hodnoty C jejich kritické veličiny.

$$LNL - index(t) = \frac{\sqrt{M_{y_{lower}}(t)^2 + M_{x_{lower}}(t)^2}}{C_{moment}} + \frac{\sqrt{F_{x_{lower}}(t)^2 + F_{y_{lower}}(t)^2}}{C_{shear}} + \left| \frac{F_{z_{lower}}(t)}{C_{tension}} \right| \quad (12.2.8)$$

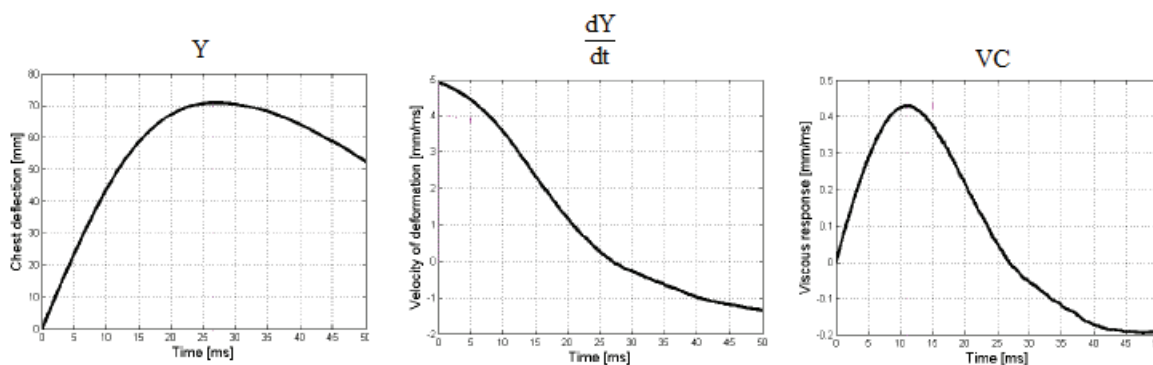


### 12.3 Popis kritérií poranění hrudníku

Jedním z nejpoužívanějších kritérií pro hodnocení poranění hrudníku je kritérium VC (Viscous elasticity), které zahrnuje stlačení hrudníku a rychlost tohoto stlačení. Obě hodnoty lze získat buď ze stlačení žebér v případě bočního nárazu, nebo ze stlačení hrudníku v případě nárazu čelního. Kritérium je stanoveno dle následujícího vztahu.

$$VC = \frac{Y}{Defkonst} \cdot \frac{dY}{dt} \quad (12.3.1)$$

V tomto vztahu veličina  $Y$  označuje stlačení a hodnota  $Defkonst$  je pouze konstantou měřící figuríny. V následujícím grafu (Obr. 27) je pak vyobrazen typický průběh jak stlačení a rychlosti stlačení, tak i výsledného kritéria VC.



Obr. 27 Typický průběh kritéria VC a jeho parametrů  $Y$  a  $dY/dt$

Jednodušším kritériem poranění je kritérium stlačení C. Deflektce hrudníku je udávána v milimetrech a zpravidla je chápána jako posun přední hrudní stěny vůči zadní. Limitním kritériem, po jehož překročení hrozí nebezpečí poranění, je maximální hodnota stlačení hrudníku. U tohoto kritéria je velkou výhodou existence přímé úměrnosti mezi stlačením a hodnotou na stupnici AIS, díky které je možné přímo vyhodnotit závažnost poranění.

Kritérium TTI (Thorax Trauma Index) je používáno pro boční náraz. Toto kritérium kombinuje maximální boční zrychlení spodní části s větší hodnotou ze dvou zrychlení buď dolního, nebo horního žebra. Výpočet je proveden dle následujícího vztahu. Hodnota  $A_{max.rib}$  znamená větší hodnotu zrychlení ze dvou hodnot zrychlení horního a dolního žebra a  $A_{lwr.spine}$  maximální zrychlení dolní části. Hodnota  $A_{(upr.rib)}$  představuje zrychlení horního žebra a hodnota  $A_{(lwr.rib)}$  znamená zrychlení dolního žebra.

$$TTI(d) = \frac{A(max.rib) + A(lwr.spine)}{2} \quad (12.3.2)$$

$$A(max.rib) = \max\{A(upr.rib), A(lwr.rib)\} \quad (12.3.3)$$

Kombinovaný hrudní index CTI (Combined Thoracic Index) reprezentuje kritérium poranění hrudníku pro případ čelního nárazu. Toto kritérium zahrnuje vliv stlačení a zrychlení. Výpočet se provádí dle následujícího vztahu. Veličina  $A_{max}$  je hodnota určená kritériem 3MS pro páteř,  $A_{int}$  je mezní hodnota této veličiny,  $D_{max}$  je stlačení hrudníku a  $D_{int}$  je kritická hodnota stlačení.

$$CTI = \left( \frac{A_{max}}{A_{int}} \right) + \left( \frac{D_{max}}{D_{int}} \right) \quad (12.3.4)$$

## 12.4 Popis kritérií poranění pánve

Kritérium PSPF (Pubic Symphysis Peak Force) je vytvořeno pro hodnocení poranění při bočním nárazu. Je zde hodnocena síla generovaná v pubické oblasti při bočním zatížení pánve. Limitem pro toto kritérium je hodnota 6 kN.

Dalším kritériem je mezní zrychlení pánve, které nesmí být překročeno. Tuto hodnotu lze snadno změřit na figuríně nebo získat výpočtovou simulací kolize. Mezní limit je udáván některými zdroji jako 130 g [DIGGES].

Při čelním nárazu pak hrozí nebezpečí vykloubení v oblasti kyčelního kloubu. Kritériem poranění je zde opět maximální síla, kterou je schopen kloub přenést při zatížení silou působící v ose stehenní kosti. Limitní kritérium se v různých zdrojích liší, nicméně je udáváno v rozmezí 6,2 kN - 25,6 kN.

## 12.5 Popis kritérií poranění břicha

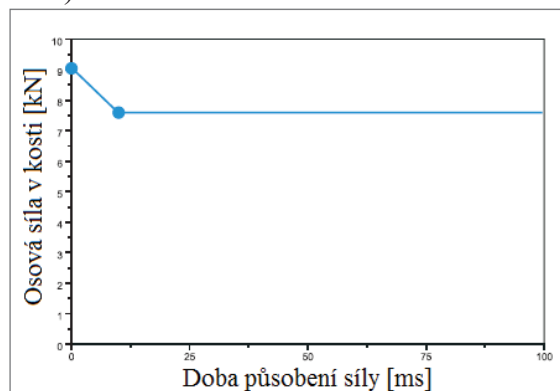
Pro nárazy při nízké rychlosti je vhodné kompresní kritérium. U tohoto kritéria poranění je zvažována pouze deflektce břišní dutiny. Toto kritérium lze využít jak pro čelní, tak i pro boční náraz, kde je uvažována pouze jedna polovina stlačení.

Dále je využíváno viskózní kritérium, původně navržené pro hodnocení hrudníku. Obdobně jako u hrudníku se jedná o kombinaci stlačení a rychlosti stlačení břišní dutiny. Vztah pro výpočet je analogický jako u kritéria poranění hrudníku.

$$VC = V(t) \times C(t) = \frac{D(t)}{dt} \times \frac{D(t)}{b} \quad (12.5.1)$$

## 12.6 Popis kritérií poranění končetin

Kritérium poranění FFC (Femur Force Criterion) je vhodné pro hodnocení horní poloviny dolních končetin. Je zde hodnocena síla působící v ose stehenní kosti a čas jejího působení. Limitní hodnoty, které by neměly být překročeny, jsou ohraničeny křivkou v následujícím grafu (Obr. 28).



Obr. 28 Limitní křivka poranění stehenní kosti, zdroj: [CHICOS 2006]

Pro vyhodnocení poranění holenní kosti je vhodné kritérium TI (Tibia Index), které zahrnuje jak působení osová síly, tak i ohybový moment. Jeho výpočet se provádí dle následujícího vztahu. Zde  $M_R$  značí moment,  $F_Z$  osovou sílu. Hodnoty  $M_C$  a  $F_C$  jsou kritické.

$$TI = \left| \frac{M_R}{(M_C)_R} \right| + \left| \frac{F_Z}{(F_C)_Z} \right| \quad (12.6.1)$$

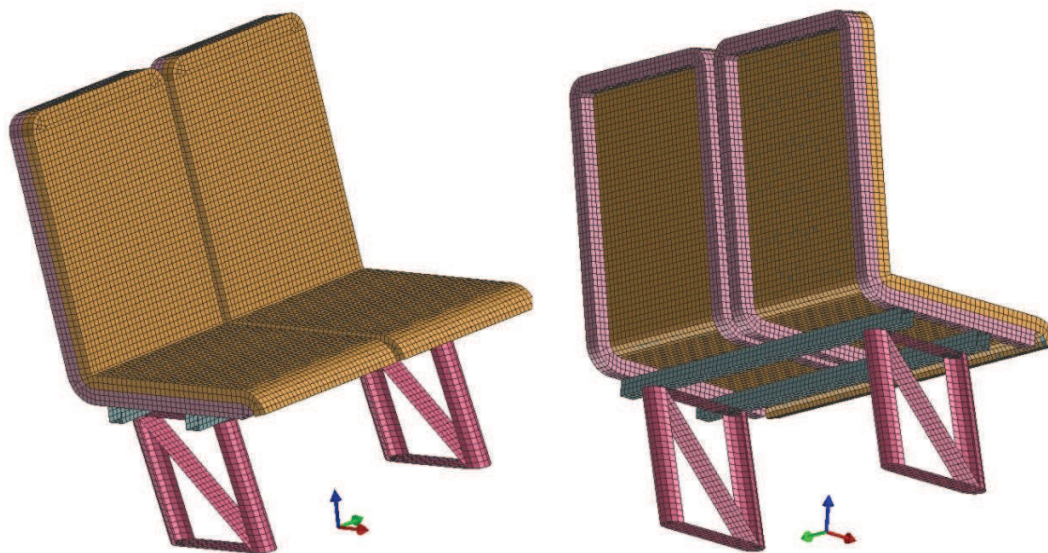
$$M_R = \sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2} \quad (12.6.2)$$

## 13 Simulace kolize ve fiktivním interiéru kolejového vozidla

Pro ověření některých základních postupů byla provedena simulace kolize ve fiktivním interiéru kolejového vozidla. Je zde zvažována nejběžnější konfigurace sedadel s jednosměrným a s čelním sezením. MKP výpočet byl proveden v softwaru Pam-Crash. Byl zde využit základní typ figuríny ARB, založený na Multibody struktuře.

### 13.1 MKP model sedadla

Pro simulaci jednotlivých kolizních scénářů je využit jediný MKP model sedadla. Jedná se o nejběžnější typ dvojsedadla (Obr. 29), který svými parametry odpovídá průměrnému sedadlu kolejového vozidla. Sedadlo je k podlaze připevněno pomocí nosníků s diagonální výztuhou. Na nosnících jsou umístěny dva příčníky, které nesou obě sedadla. Každé sedadlo se skládá z nosného profilu, který tvoří jakési ohraničení. V běžné praxi je tento profil umístěn pod krycím plechem, jenž je montován ze zadní části sedadla. Jelikož je vliv tohoto plechu v místech profilu zcela zanedbatelný, plech je uvažován pouze ve střední části sedadla. Všechny tyto ocelové části jsou navrženy z běžné konstrukční oceli třídy 11373. Pro definici materiálu je použit materiálový model typu 103 v SW. Pamcrash. Materiál je po částech lineární, bez uvažování zpevnění při rychlejší deformaci. Je zde použita základní hourglass kontrola, vhodná pro prvky s podintegrovanými elementy. Síť jednotlivých částí sedadla jsou spojeny pomocí P-linků, čímž je zahrnut vliv svarů na celkové chování konstrukce. Celé dvojsedadlo je modelováno prostřednictvím skořepin z důvodu velkých výpočtových časů potřebných pro řešení dynamického chování objemových prvků. Jedinou částí tvořenou s použitím objemových prvků je polstrování sedací plochy. Zde je definován pěnový materiál s uvažováním tření, pohlcení energie a nelineární charakteristikou. Jedná se o materiál typ 45 v SW. Pamcrash.

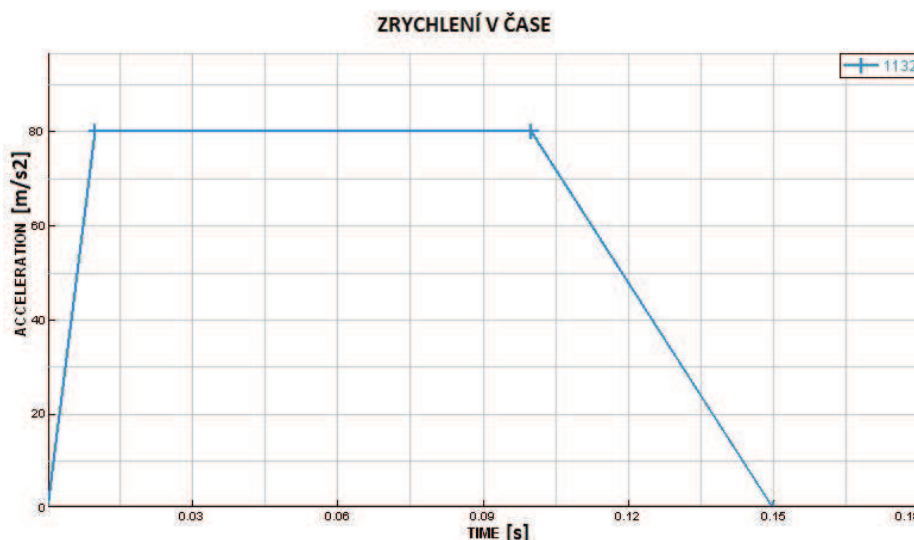


Obr. 29 MKP model sedadla

### 13.2 Scénář kolize

Před započítáním simulací je třeba stanovit scénář kolize. Protože tato oblast není nijak ošetřena normami, je třeba vycházet ze zkušeností a z vědomostí shrnutých ve sbornících. V normě ČSN 15227 je zmíněno, že při jakékoliv kolizi nesmí dojít k překročení zrychlení 7,5g (u většiny kolizí 5g). Proto se lze přiklonit k zatěžovacímu pulsu, definovanému v článku "Assessments of Passenger Safety in future rail vehicles" [HARDY 2003]. Zde jsou stanoveny mezní křivky působícího zrychlení. V našem případě se bude zrychlení držet horní

mezní křivky, s náběhem v počátku grafu. Použitý zatěžovací puls je vyobrazen na následujícím obrázku (Obr. 30).



Obr. 30 Definovaný zatěžovací puls

Scénář sekundárního nárazu v interiéru kolejového vozidla je pak následující. Modely figurín jsou umístěny ve výchozí poloze představující nejpravděpodobnější polohu posádky. Figurína je mírně zakloněna tak, aby poloha trupu kopírovala opěrku sedadla. Ruce jsou předsunuty a v loktech jsou natočeny do pravého úhlu. Tato poloha není zcela přirozená, nicméně při simulaci nejlépe odpovídá poloze s rukama na stehnech. Následně jsou figuríny vystaveny výše popsanému pulsu zrychlení, které vyvodí jejich pohyb. Zde dojde k prvnímu zatížení posádky, které by nemělo vést k výrazným zraněním. Pro pasažéra sedícího zády ke směru zrychlení zde má významný vliv například použití opěrky hlavy a podobně. Následně je figurína reprezentující posádku vržena proti nejbližší překážce, kde její náraz rozhodne o závažnosti možných zranění.

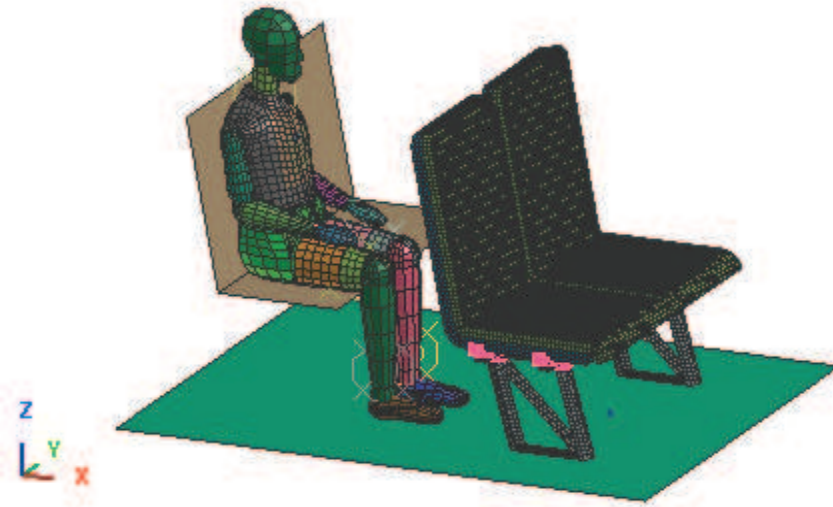
### 13.3 Návrh variant kolizí

Jednotlivé varianty kolizí byly v práci voleny s ohledem na snahu posoudit nejběžnější dispoziční řešení interiérů kolejových vozidel z pohledu pasivní bezpečnosti. Jsou zde zvoleny tři základní varianty, u kterých je pak provedena simulace sekundárního nárazu. Pro každou variantu je provedena simulace kolize s nepřipoutanou posádkou a s použitím dvoubodového pásu. Lze tak porovnat nejen bezpečnost jednotlivých variant, ale také možnost zlepšení použitím bezpečnostních pásů. Pro lepší rozlišení jsou varianty simulovaných kolizí značené. První dvě písmena říkají, jaká konfigurace sedadel je zde použita. Další dvě písmena udávají počet osazených figurín (tzv. Dummy). Písmeno P, uvedené na konci označení, pak říká, že jsou v simulaci použity dvoubodové bezpečnostní pásy. V následující tabulce (Tab. 2) je tak shrnuto všech šest provedených simulací. Horní řádek zde zahrnuje varianty s nepřipoutanou posádkou.

Tab. 2 Simulované varianty kolizí

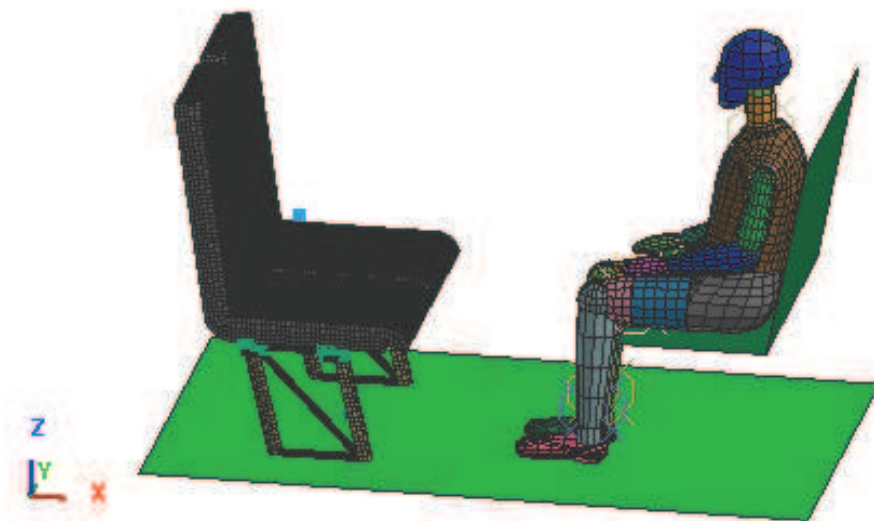
Jednosměrné sezení Jeden nepřipoutaný cestující	Čelní sezení Jeden nepřipoutaný cestující	Čelní sezení Dva nepřipoutaní cestující
Jednosměrné sezení Jeden připoutaný cestující	Čelní sezení Jeden připoutaný cestující	Čelní sezení Dva připoutaní cestující

První varianta představuje nejběžnější případ kolize, která nastává u mnoha dopravních prostředků. Je zde použita konfigurace jednosměrného sezení. Zadní sedadlo je osazeno modelem figuríny, který je generovaným zrychlením vržen proti protější dvojici sedadel. Náhled varianty je vyobrazen následovně (Obr. 31).



Obr. 31 Varianta kolize při jednosměrném sezení s jedním cestujícím

V druhé variantě je použita koncepce sedadel s čelním sezením. Tato koncepce je relativně běžná u železničních kolejových vozidel. Figurínou je osazeno pravé sedadlo a je zde zkoumán vliv nárazu na neosazené sedadlo (Obr. 32).



Obr. 32 Varianta kolize při čelním sezení s jedním cestujícím

Poslední varianta opět vychází z předchozí koncepce sedadel. Na rozdíl od předchozí je však osazena dvěma figurínami. Záměrem zde určitě není pouze porovnávat bezpečnost obsazených a neobsazených sedadel, ale snaha zjistit skutečně nejhorší možná poranění, která mohou vzniknout při kolizi kolejového vozidla (Obr. 33).



Obr. 33 Varianta kolize při čelním sezení s dvěma cestujícími

### 13.4 Popis MKP modelu

Úloha je řešena v základních jednotkách. Časový krok explicitního řešiče je stanoven automaticky dle velikosti nejmenšího elementu na  $10^{-6}$  s. Tento časový krok v podstatě odpovídá náročnosti úlohy.

Při simulaci byl využit model figuríny H350\_ARB\_v2005 zapůjčený firmou ESI group. Jedná se o jednoduchý model padesátipercetní figuríny typu Hybrid III. Jednotlivé části lidského těla jsou zde idealizovány tuhými součástmi, které jsou spojeny vazbami s tuhostmi odpovídajícími parametrům lidského těla. Hmotnost figuríny je 74,5 kg. Veličiny potřebné pro vyhodnocení poranění jsou pak získávány jednak jako zrychlení tuhých částí, a zároveň jako síly v kontaktech mezi tuhými částmi.

Interiér je modelován s použitím vytvořeného dvojsedadla, jehož popis je uveden výše. Ostatní části interiéru, kterými jsou podlaha a druhé sedadlo, jsou modelovány jako absolutně tuhé, neboť jejich vliv na výsledky výpočtů jsou zanedbatelné. Materiál těchto součástí je definován materiálovým modelem NULL, a následně jsou zahrnuty do vlastností „rigid-body“. Jednoznačného polohování je pak dosaženo vetknutím COG. Protože není zapotřebí získávat z těchto částí žádné konkrétní výsledky, jsou tyto části interiéru tvořeny pouze několika elementy.

Pro definici standardních kontaktů mezi poddajnými tělesy, nebo mezi poddajným a tuhým tělesem, je použit kontakt typu 33. Tento kontakt typu „Master-Slave“, funguje na principu segment to segment s využitím penaltového algoritmu. Pro kontakty mezi tuhými tělesy je využito kontaktu typu 21. Tento kontakt funguje na principu uživatelem definovaného poměru síly a penetrace. Zjednodušeně lze říci, že síla, která odtlačuje dvě tělesa v kontaktu, je tím větší, čím větší je jejich vzájemná penetrace.

Bezpečnostní pásy byly vytvořeny s využitím výhod modulu „Auto Seat Belt“. Všechny použité dvoubodové bezpečnostní pásy se skládají ze dvou hlavních částí. Část, která je v kontaktu s figurínou, je tvořena plošnými prvky a část, která není v kontaktu, je idealizovaná jako 1D prvek. Pro definici plošné části pásu je použit materiál typu 150 „LAYERED\_MEMBRANE“. Pro definici 1Dprvkové části je využito materiál typu 205 „NONLINEAR\_TENSION\_ONLY\_BAR“. Materiálová data využitá v definici pásu byla získána z ukázkového příkladu jako nejběžnější materiálové konstanty automobilových pásů. Kontakt mezi tuhým páneví figuríny a pásem byl řešen pomocí kontaktu „typu 33“.

### 13.5 Zhodnocení výsledků

Ke zhodnocení výsledků byl vytvořen jednotný „template“ v programu „Pam-viewer“. Protože kompletní soupis výsledků je značně obsáhlý, je pouze přiložen v závěru práce. K zevrubnému hodnocení bezpečnosti jednotlivých dispozičních řešení interiéru kolejového vozidla postačí tabulka č. 3. Zde jsou do sloupců rozdělena jednotlivá kritéria poranění a do řádků jsou zaneseny jednotlivé varianty interiérů. Zkrácené označení LL znamená podélné sezení, LJ značí sezení čelní. Označení 1D znamená, že byla použita jedna Dummy pro simulaci nepřipoutaného cestujícího, nebo byla provedena simulace s jedním připoutaným cestujícím (1DP). U interiéru s dvěma figurínami jsou pak uvedeny dvě hodnoty, označeny písmeny RD (Right Dummy) a LD (Left Dummy). V řádku limit jsou pak zaznamenány limitní hodnoty pro přežití. Pokud byla v konkrétním případě tato limitní hodnota překročena, je hodnota podtržena.

Tab. 3 Výsledné hodnoty kritérií poranění

	HIC36	3MS	VC	MOCx	MOCy	pelvis	Femur
jednotky	-	m/s <sup>2</sup>	m.s <sup>-1</sup>	N.m	N.m	m/s <sup>2</sup>	N
limit	1000	784	1	190	190	1275	10000
LL1D	<u>1517</u>	102	0,0006	120	160	800	<u>11000</u>
LL1DP	129	37	0,0028	25	68	478	7325
LJ1D	263	44	0,0017	18	80	650	<u>11000</u>
LJ1DP	123	31	0,0003	70	70	480	7526
LJ2D_RD	<u>23917</u>	330	0,0017	<u>260</u>	<u>780</u>	<u>3900</u>	<u>55000</u>
LJ2D_LD	172	77	0,37	1,7	105	<u>2400</u>	<u>33000</u>
LJ2DP_RD	84	28	0,09	14	50	400	4900
LJ2DP_LD	86	31	0,0005	2	75	230	2300

Z této tabulky (Tab. 3) je pak možné jednoznačně říci, že nejhorší možná varianta řešení interiéru je koncepce s čelním sezením. Ačkoliv při obsazení pouze jedním pasažérem dochází jen ke zranění nohou, při pohledu na obsazení dvěma proti sobě sedícími pasažéry je situace mnohem vážnější. Při vzájemném nárazu těchto pasažérů dochází u prvního k výrazným zraněním hlavy a krku a u druhého k vážným poraněním hrudníku. Za zmínku také stojí dosti vážná zranění nohou. Méně vážné zranění nohou se vyskytuje u jednosměrné konfigurace sedadel. Nicméně i zde jsou hodnoty lehce nad povoleným limitem. Mnohem větší problém zde představuje nadlimitní hodnota HIC36. Při pohledu na průběh samotné kolize je však patrné, že k nárazu dochází ve spodní části hlavy, a tak vážnost skutečného zranění posádky by mohla být lehce odlišná. Za zmínku také jistě stojí skutečnost, že všem těmto zraněním lze poměrně dobře předcházet použitím dvoubodových bezpečnostních pásů. Ačkoliv je z těchto výsledků dobře patrná relativní bezpečnost jedné varianty vůči druhé, nelze z těchto výpočtů usuzovat na celkovou bezpečnost interiéru reálného kolejového vozidla, neboť všechna data použitá pro tvorbu MKP modelu interiéru jsou odhadnuta.

## 14 Figuríny využívané pro hodnocení bezpečnosti posádky

Pro komplexní hodnocení bezpečnosti interiérů vozidel jsou využívány figuríny. Figuríny jsou antropomorfní testovací zařízení (ATD) reprezentující lidské tělo ve skutečné velikosti. Parametry figuríny jsou navrženy tak, aby dynamická odezva dobře odpovídala odezvě skutečného lidského těla. Obvykle jsou figuríny vybaveny snímači pro vyhodnocování dynamického chování během simulace kolize posádky s prvky interiéru. Snímaná data, jako jsou například rychlost, zrychlení, síly nebo momenty, jsou pak využita ke stanovení pravděpodobnosti poranění. Z důvodů jednoznačnějšího popisu problematiky a lepšího dorozumění byly navrženy speciální referenční body figuríny, jako například H-bod. V dnešní době je pro hodnocení pasivní bezpečnosti využíváno mnoha druhů figurín v závislosti na testovaném případě kolize či dopravním prostředku. Základní druhy figurín lze rozdělit dle několika hlavních skupin:

- figuríny pro čelní náraz,
- figuríny pro boční náraz,
- figuríny pro zadní náraz,
- chodci,
- děti,
- figuríny pro letectví a armádu,
- speciální figuríny (např. těhotná žena).

Figuríny jsou rovněž rozděleny podle zastoupení určité části populace. Střední rozměry reprezentuje padesátý percentilní muž. Tato figurína, představující průměrné rozměry lidského těla, váží 77,5 kg a měří 175 cm. Pro potřeby zahrnutí většiny obyvatelstva jsou využívány i figuríny uvažující horní a dolní rozměry populace. Horní mez představuje devadesátipětiprocentilní figurína (muž), přičemž větší rozměry má pouze 5% populace. Dolní mez představuje pětiprocentilní figurína (žena), pro kterou platí, že menší rozměry má pouze 5% populace. Další figuríny představují děti, u kterých hmotnostní i výškové parametry odpovídají určitému věku.

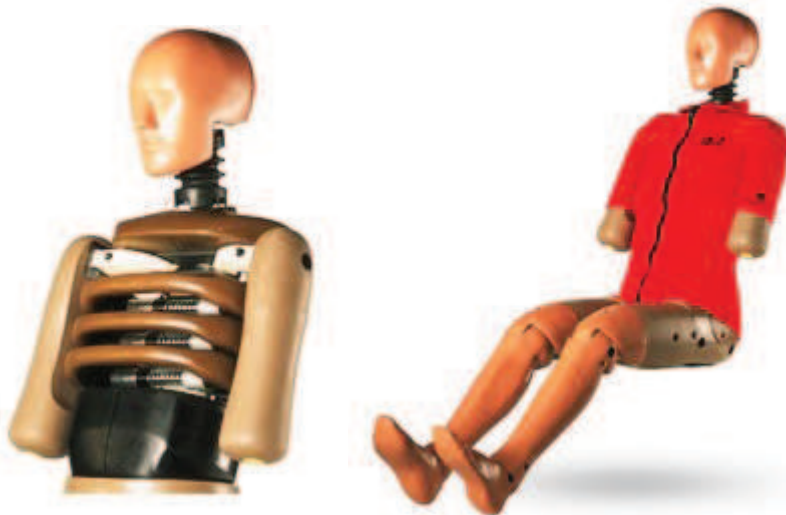
Testy čelního nárazu a figuríny pro jejich provádění jsou v současnosti základními prvky v bezpečnosti vozidel. Figuríny pro čelní náraz byly jedny z prvních, které byly při testech interiérů používány. Hlavním účelem figurín používaných pro testování čelního nárazu je ověření účinnosti zádržného systému v zabránění poranění hlavy nárazem, poranění hrudníku stlačením nebo zrychlením a zlomeninám nebo vykloubením stehenních kostí. První figurínu VIP vytvořil Samuel W. Alderson na základě zkušeností s vývojem figurín pro letecký průmysl a zdravotnictví. Tato figurína byla následně vylepšena dle požadavků výrobců automobilů. Zachováním některých původních částí a doplněním inovací dalších výrobců vznikla padesátiprocentní figurína Hybrid II. Tato figurína se stala nejpoužívanějším antropomorfním testovacím zařízením pro řešení pasivní bezpečnosti v mnoha dopravních odvětvích, přičemž například v letectví je používána dodnes. Později byla vyvinuta figurína Hybrid III s dalším zlepšením biofidelity a mechanických vlastností. V současné době je tato figurína považována za standard pro homologaci vozidel. Figurína je vyráběna v provedení 50% muž, 95% muž, 5% žena, pro zastoupení většiny populace (Obr. 34).





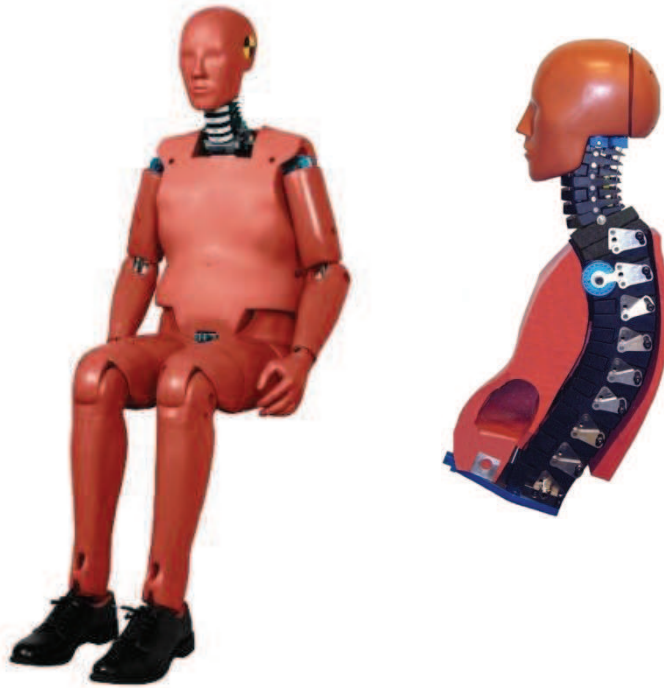
Obr. 34 Figurína Hybrid III v 50, 5, a 95 percentilní, zdroj: [EMERALDINSIGHT]

Figuríny pro boční náraz rozšiřují možnosti hodnocení bezpečnosti interiéru především v automobilové dopravě. Problematika bočního nárazu je značně odlišná, protože konstrukce vozidel je v tomto směru obvykle méně robustní než v čelním směru. První figurína byla vyvinuta úpravami figuríny Hybrid II, a následně vznikl v Evropě EuroSID-1. Figurína byla upgradována na verzi ES-2 a nejvíce je nyní využívána v testech EuroNCAP (Obr. 35).



Obr. 35 Figurína EuroSID-1, zdroj: [BLOGDERAULITO]

Figuríny pro testování účinků zadního nárazu byly vyvinuty za účelem provádění testů kolizí při nízkých rychlostech. Při tomto druhu nárazu nejčastěji dochází k poraněním typu whiplash, jejichž závažnost je těžko vyhodnotitelná, ačkoliv jejich léčba je poměrně náročná. Tento typ figurín může být použit pro posouzení správné funkce opěrky hlavy v předcházení poranění krku. Pro vyhodnocení tohoto typu nehody je používána například figurína BioRID (Obr. 36).



Obr. 36 Figurína BioRID, zdroj: [E-AUTONAPRAWA]

Je možné, že v budoucnu bude vyvíjena jediná figurína, sloužící například k hodnocení čelního i bočního nárazu. Jedná se zde o snahu vyvinout univerzální figurínu pro vyhodnocení různých druhů nárazů, nebo pro použití při šikmých nárazech, kombinujících účinky nárazu čelního i bočního. Tato otázka však zatím nebyla řešena kvůli velké náročnosti výroby takovéto figuríny, která zároveň musí plnit vysoké nároky na životnost a spolehlivost.

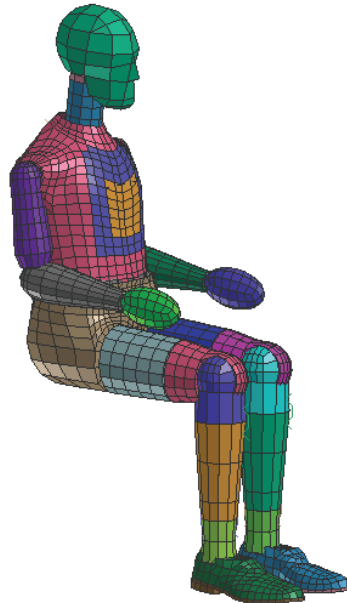
## 15 Výpočtové modely figurín

Pro hodnocení bezpečnosti interiérů vozidel prostřednictvím počítačových simulací jsou používány různé výpočtové modely reprezentující biomechanickou odezvu lidského těla. Běžným postupem je vývoj matematických modelů antropomorfních testovacích zařízení používaných při testech. Protože pro simulaci konkrétního testu je využíván výpočtový model vhodné figuríny, má zpravidla každá figurína jeden nebo více počítačových modelů použitelných pro simulaci nárazu. Využívané výpočtové modely figurín lze rozdělit do tří základních kategorií v závislosti na použitých přístupech:

- Model tvořený soustavou tuhých těles.
- Model tvořený poddajnými tělesy.
- Model tvořený kombinací tuhých a poddajných prvků.

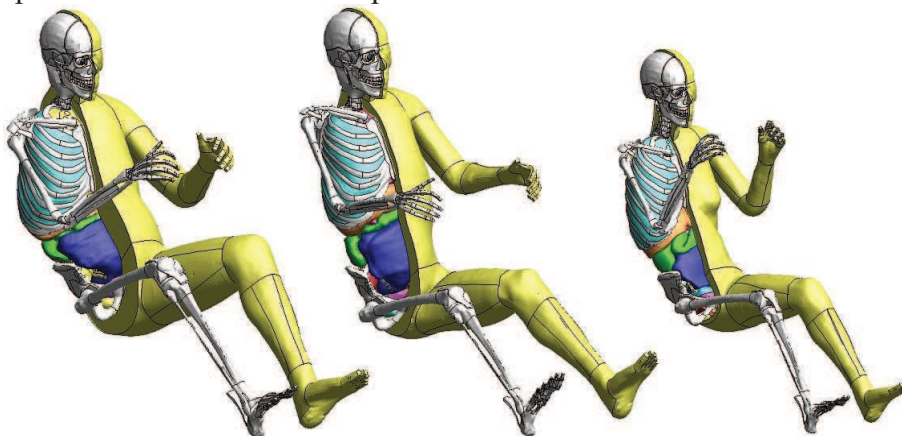
Výpočtový model figuríny vytvořený na principu soustavy tuhých těles je nejméně náročný na výpočetní prostředky. Zpravidla jsou tímto přístupem vytvářeny jednodušší modely nebo je zde využíváno struktury MBS (Multibody system). Tyto základní modely figurín dávají dobrou představu o pohybu lidského těla v reakci na působící zrychlení, rychlost a kolize s prvky interiéru. Umožňují rovněž vyhodnocení zrychlení působícího na různé části těla. Díky 1D prvkům s definovanou tuhostí umožňují tyto modely vyhodnocení stlačení důležitých částí těla (např. hrudník). Při použití více tuhých částí lze rovněž na jejich rozhraní vyhodnotit vnitřní síly (např. stehenní kost). Tyto možnosti závisí na provedení

a podrobnosti konkrétního modelu. S tuhým modelem figuríny je však nemožné řešit lokální poranění způsobená místním zatížením dané části těla a velmi komplikované je zde posouzení pravděpodobnosti poranění některých měkkých tkání (Obr. 37).



Obr. 37 ARB model figuríny Hybrid III tvořený soustavou tuhých těles

FE model (Obr. 38) tvořený poddajnými tělesy je často využíván pro modelování skutečného lidského těla. Tímto postupem mohou být vytvořeny deformovatelné modely všech orgánů, které spojeny dohromady reprezentují dokonalou biomechanickou odezvu. Dle přístupu je možné vyhodnocovat napětí v kostech a tkáních, nebo přímo pravděpodobnost jejich porušení. U velmi podrobných modelů vytvořených na tomto přístupu je možné řešit lokální poranění i zranění konkrétních vnitřních orgánů. Největší nevýhodou u modelů tohoto typu je velká výpočtová náročnost, která významně zvyšuje potřebné náklady. Zároveň použití tohoto typu modelu není tak obvyklé jako u předchozího případu, a proto otázkou zůstává komplexní metodika hodnocení poranění.



Obr. 38 FE model lidského těla vyvinutý firmou Toyota, zdroj: [FASTERMAG]

Kombinací dvou předchozích přístupů je tvořen model sestavený částečně z tuhých částí a částečně z poddajných prvků (Obr. 39). Tento způsob spojuje výhody obou předchozích variant. Nejčastěji jsou tak vytvářeny tuhé modely figurín, doplněné o některé deformovatelné prvky. Tyto modely figurín umožňují získat velmi přesná data, sloužící

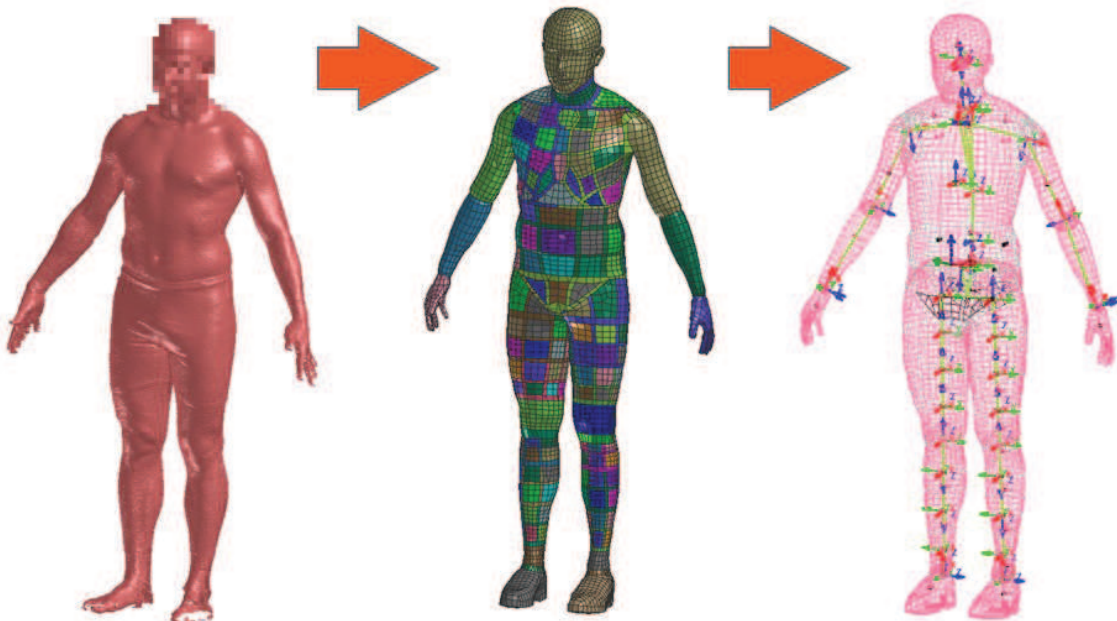
k vyhodnocení pravděpodobnosti poranění, aniž by došlo k nadměrnému navýšení výpočtových nároků. Biomechanická odezva se zde často blíží odezvě skutečné figuríny.



Obr. 39 „Rigid-FE“ model figuríny Hybrid III, zdroj: [LSTC]

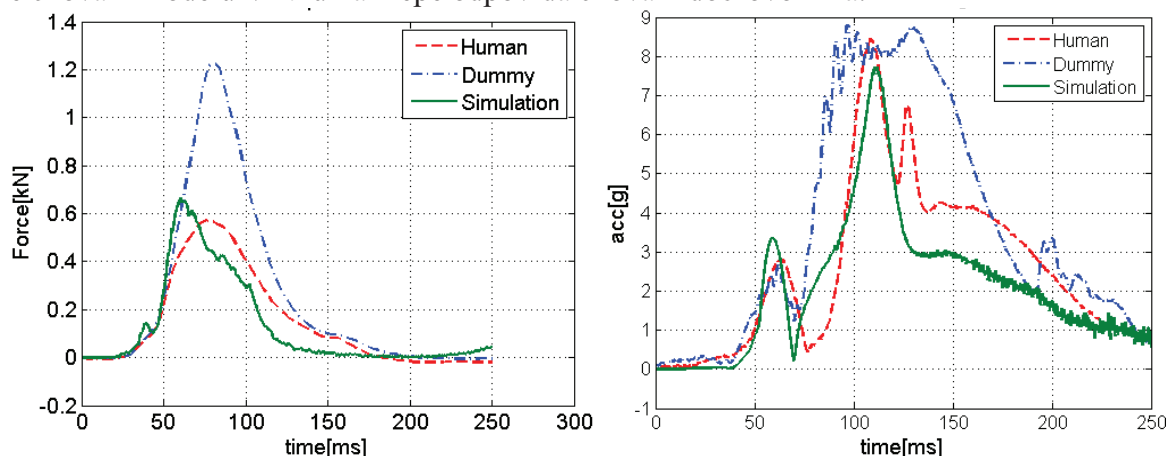
## 16 Model lidského těla „VIRTHUMAN“

V rámci projektu TAČR je vyvíjen model lidského těla vhodný pro hodnocení pasivní bezpečnosti vozidel (Obr. 40). Jedná se o projekt TA01031628 – Škálovatelné modely člověka pro zvýšení bezpečnosti v dopravě (TAČR – program ALFA - řešitel MECAS ESI s.r.o., další účastník projektu ZČU v Plzni), který probíhal za spoluúčasti autora této práce. Tvar sítě modelu vychází z naskenovaných dat skutečného lidského těla s parametry 50. percentilu. Na tomto základě byl vytvořen FE model skeletonu. Je zde použita MBS struktura soustavy tuhých těles navzájem spojených poddajnými jointy. Díky MBS přístupu je model lidského těla nenáročný na výpočetní výkon. Všechny části lidského těla jsou zde poměrně detailně segmentovány, což umožňuje simulovat chování měkkých tkání.



Obr. 40 Proces vývoje Multibody struktury modelu „VIRTHUMAN“

Pro validaci modelu byla vytvořena databáze testů prováděných na tělech dobrovolníků post mortem. Chování modelu, díky tomu, více odpovídá odezvě skutečného lidského těla, než jak je tomu u figurín. Zatímco figuríny nebo z nich vycházející matematické modely jsou určeny spíše pro konkrétní kolizní scénář (čelní náraz, boční náraz), popisovaný model lidského těla je určen pro všeobecné použití. Jsou zde validovány jednotlivé části lidského těla, a zároveň je validováno chování modelu jako celku. Díky tomu je dosaženo dobré biofidelity. Specifickým přístupem k ověření chování modelu je využití testu s nízkými hodnotami zrychlení. Tyto testy lze provádět s využitím posuvného simulátoru nárazu „Bumbac“, vyvinutého a provozovaného sdružením ÚAMK [UAMK]. Simulátor nárazu slouží k propagaci bezpečnosti tím, že umožňuje každému zájemci vyzkoušet si náraz v rychlosti 30 km/h. Simulátor je navržen jako vozík o hmotnosti 300 kg se dvěma sedadly vybavenými bezpečnostními pásy. Vozík se sedadly se pohybuje po nakloněné rovině, čímž získá nárazovou rychlost. Jeho prudkým zpomalením je pak dosaženo efektu nárazu automobilu. Vozík je navržen tak aby nárazová rychlost nemohla překročit 12 km/h, nicméně při testech se nárazová rychlost pohybuje kolem 8 km/h. Testy jsou prováděny ve zkušební laboratoři TUV SÚD Czech s.r.o. Test je prováděn s dobrovolníkem s hmotnostními a rozměrovými parametry přibližně odpovídajícími 50. percentilu a s plně osazenou figurínou Hybrid III 50%. Mezi hlavní vyhodnocované parametry patří především síly v pásech a zrychlení hlavy. Na Obr. 41 jsou porovnány výsledky testů a výpočtu s použitím modelu „VIRTHUMAN“. Porovnána je síla v břišním pásu a zrychlení hlavy. Z těchto grafů je patrné, že chování modelu Virthuman lépe odpovídá chování dobrovolníka.



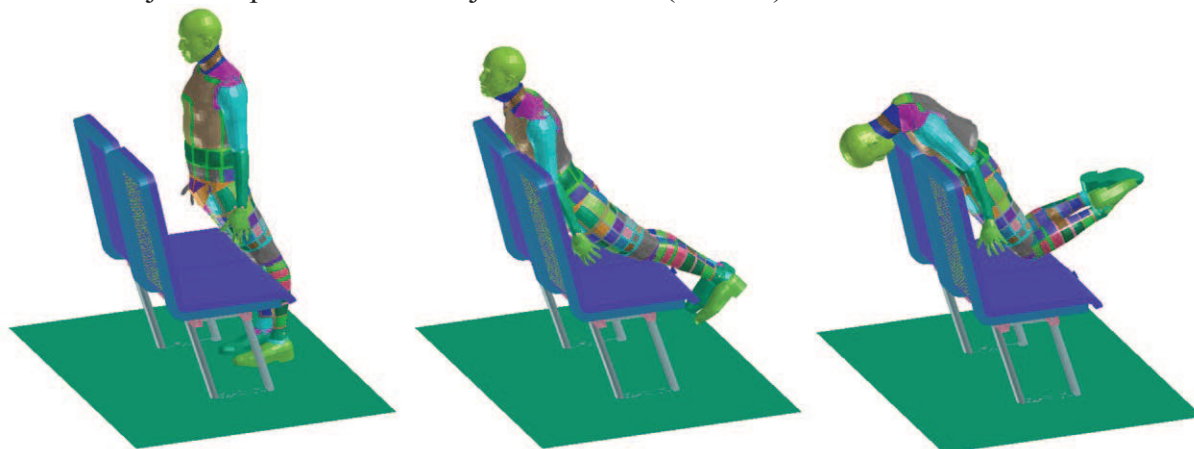
Obr. 41 Porovnání odezvy modelu „VIRTHUMAN“, figuríny Hybrid III a dobrovolníka (vlevo: síla v břišním pásu; vpravo: celkové zrychlení hlavy)

Model je škálovatelný, takže ho lze využít pro ověření následků kolize cestujícího s libovolnými parametry a zastoupením v populaci. Pro model je rovněž zpracovávána metodika vyhodnocování poranění, díky níž je možné zhodnotit pravděpodobnost přežití nebo vzniku poranění.

## 17 Posouzení možnosti využití modelu VIRTHUMAN

Pro posouzení vhodnosti modelu lidského těla k simulování různých druhů kolizí cestujících v interiéru kolejového vozidla byl použit model fiktivního interiéru kolejového vozidla. Model sedadel nevychází z žádného skutečného interiéru, nicméně jeho parametry odpovídají běžně používaným sedadlům kolejových vozidel pro městský provoz. Materiálem konstrukce je běžná konstrukční ocel a materiálem polstrovaných částí je pěna. Model lidského těla „VIRTHUMAN“ vykazoval dobré chování jak při simulacích ve stoje, tak při

simulacích kolize sedícího cestujícího. Výpočet byl stabilní i v delších výpočetních časech. Pouze u kolize cestujícího stojícího ve volném prostoru, s výpočetními časy přesahujícími 500 ms, se objevilo nestabilní chování systému. Je však nutno zmínit, že model člověka je stále vyvíjen a lze předpokládat, že ještě dojde ke zlepšení těchto parametrů. Náhled simulace kolize cestujícího s prvkem interiéru je uveden níže (Obr. 42).



Obr. 42 Simulace kolize cestujícího ve fiktivním interiéru kolejového vozidla

## 18 Účinek nárazu hlavy na zaoblený prvek interiéru

Při nárazu hlavy cestujícího na hranu v interiéru vozidla dochází k poranění. Zásadní vliv na závažnost poranění má velikost zaoblení interiérového prvku. Při nárazu na ostrou hranu hrozí nebezpečí vzniku lokálních poranění lebeční kosti. Pro vyhodnocování takovýchto druhů poranění však nejsou běžně dostupné žádné nástroje. Figuríny pro testování konkrétních kolizních scénářů jsou navrženy s ohledem na běžně se vyskytující poranění. Stejně je tomu u výpočtových modelů lidského těla k provádění simulací kolizí cestujících. Kritéria poranění zde umožňují vyhodnocení závažnosti poranění hlavy pouze na základě zrychlení působícího v těžišti hlavy.

Při nárazu na ostrou hranu dochází k lokálním poraněním. Tato poranění mohou mít fatální následky i při malých rychlostech nárazu. Výrobci dopravních prostředků se snaží dodržovat obecné zvyklosti s uvažováním minimálních rádiusů zaoblení (3,5 mm). V automobilovém průmyslu jsou podrobně ověřovány všechny prvky interiéru. Je zde ověřována jejich spojitost, nevyčnívání ostrých částí a tyto atributy jsou důležité pro jejich schválení. Proto se nepředpokládá, že v interiéru může dojít k nárazu hlavy na ostrou hranu. S tímto předpokladem byla navržena metodika hodnocení bezpečnosti interiéru silničních vozidel. Běžně využívané nástroje, kterými jsou figuríny a virtuální modely lidského těla, proto nedokážou vyhodnotit možnosti poranění hlavy o ostrou hranu interiéru. Výjimkou mohou být speciální antropomorfní testovací zařízení nebo komplexní výpočtové modely, které jsou vyvíjeny, ale zatím v dopravě využívány nejsou [VERLEYSENA].

### 18.1 Možnosti vyhodnocování

Poranění cestujícího je hodnoceno prostřednictvím kritérií poranění. Tato kritéria byla vyvinuta díky provedení mnoha testů (na mrtvolách ap.) a jejich platnost se často vztahuje ke konkrétnímu antropomorfnímu zařízení. Nejpoužívanější zařízení pro vyhodnocení jsou figuríny. Běžně využívané figuríny (např. Hybrid III) mají tuhou hlavu a není zde předpokládáno její porušení. Konstrukce hlavy je navržena pro vyhodnocování zrychlení působících uvnitř hlavy. Proto zde skutečné lidské hlavě odpovídají pouze potřebné parametry, jako je hmotnost hlavy, těžiště hmotnosti, povrchová tuhost. Používané konstrukční materiály (např. hliníkové slitiny) zde však nemají žádnou vypovídací hodnotu

o možnosti vzniku fraktur lebečních kostí. Jiná možnost pro vyhodnocení účinků nárazu hlavy je využití běžně dostupného virtuálního modelu lidského těla nebo figuríny. Je tedy nutné použít některé z kritérií poranění vhodných pro tento model. Jako použitelné kritérium poranění pro vyhodnocení závažnosti poranění hlavy se jeví kritérium HIC (Head Injury Criterion). Toto kritérium je vhodné pro hodnocení kontaktní i bezkontaktní dynamické zátěže hlavy. Pro kontaktní případ je používáno konkrétní kritérium HIC15, kde je velikost časového okna 15 ms. Dalším vhodným kritériem je kritérium 3MS. Toto kritérium je zajímavé především menší velikostí hodnoceného intervalu (3MS), kde vyhodnocení poranění vychází zpravidla jen z první špičky zrychlení.

## 18.2 Parametry ovlivňující závažnost poranění

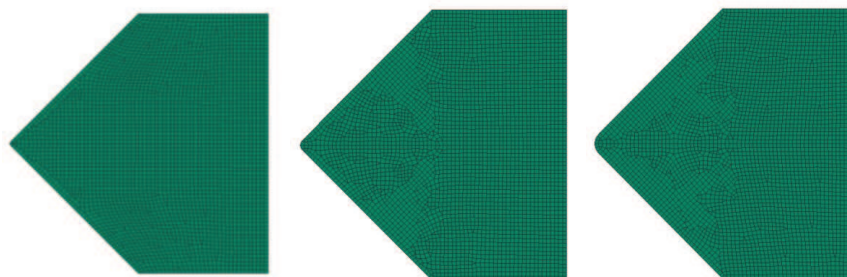
Kolizní scénář je v případě nárazu hlavy na překážku stanoven jednoznačně. Lze tedy říci, že závažnost výsledného poranění ovlivní především následující tři parametry:

- rychlost nárazu,
- poloměr zaoblení hran interiérového prvku,
- tuhost materiálu.

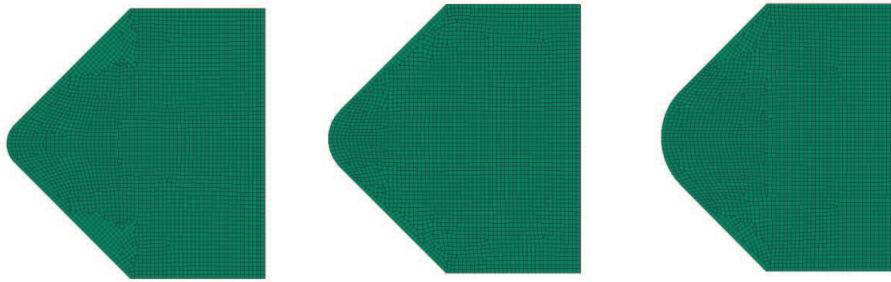
Zde rychlost nárazu může být zvolena téměř libovolně, ale nutnou podmínkou je, aby byla pro všechny rychlosti stejná. Pro zvýšení vypovídací hodnoty je rychlost nárazu hlavy stanovena na 4,4 m/s. Tato hodnota odpovídá rychlosti nárazu cestujícího vzdáleného 0,5 m od překážky při působení zrychlení 2g. Ostatní parametry jsou parametricky měněny a simulacemi je vyhodnocován jejich vliv na velikost výsledného poranění.

## 18.3 Simulace nárazu hlavy na zaoblený prvek interiéru

Pro vyhodnocení účinku nárazu hlavy je využit model člověka „VIRTHUMAN“. Simulace je provedena v SW. Pam-Crash. Pro účel simulace je vytvořena součást, do které naráží hlavou model člověka. Tato součást obsahuje hranu a je vypracována ve více variantách s různě velkým zaoblením. Velikost rádiusu zaoblení byla volena 2, 5, 10, 20, 30, 50 milimetrů. U všech variant byla zvolena velikost prvku 3 mm. Tato velikost je limitní z pohledu výpočetních nároků, díky ní je však možné modelovat malé rádiusy. Při vytváření konečněprvkové sítě byla u všech variant použita rovnoměrná síť bez zahuštění. Rozdílnost výsledného síťování u různých rádiusů ovlivňuje výsledky. Impaktovaná součást byla prodloužena ve směru nárazu až do místa, kde se již neprojevují žádné významné deformace materiálu. Díky tomu nemá vliv na výsledky zmenšující se tloušťka součástí s větším rádiusem (viz Obr. 43, Obr. 44).

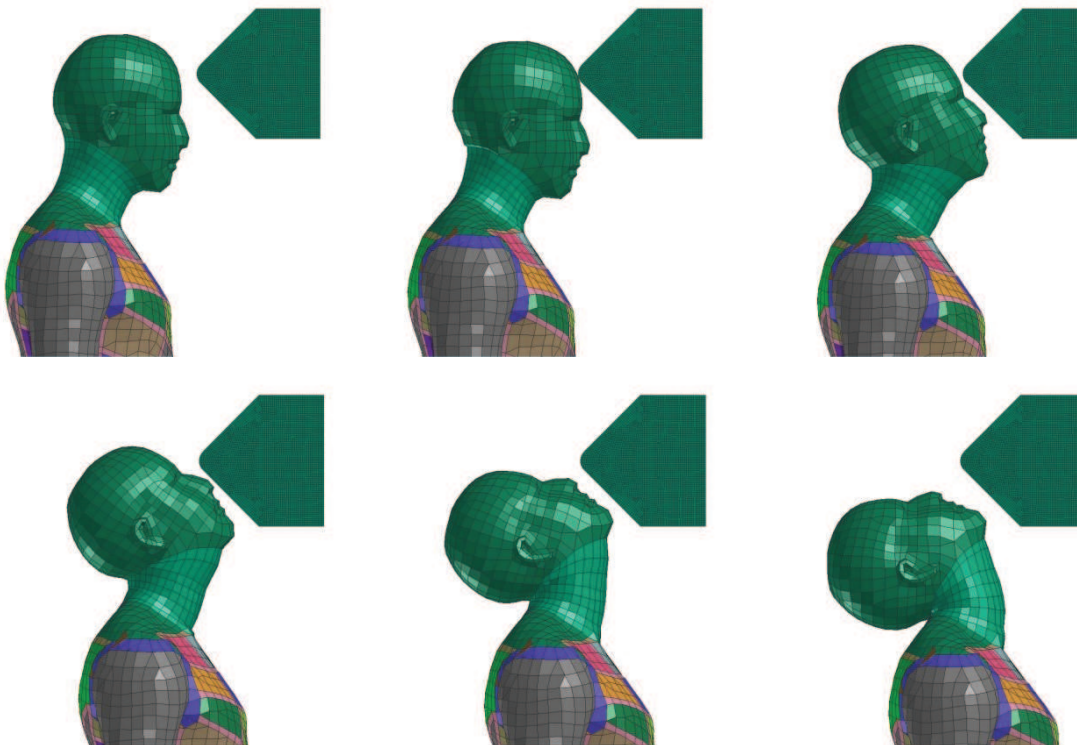


Obr. 43 Porovnání zaoblení impaktorů; zleva: rádius 2mm, 5mm, 10mm



Obr. 44 Porovnání zaoblení impaktorů; zleva: rádius 20mm, 30mm, 50mm

Pro všechny součásti je použit jediný materiálový model. Jedná se o elasto-plastický materiál typu 1, který je vhodný pro objemová tělesa. Mez kluzu je nastavena dostatečně velká (90 GPa), takže lze všechny definované materiály uvažovat jako lineární. Byly zvoleny tři druhy materiálu (Guma, dřevo, ocel) s rozdílnou tuhostí. Chování těchto materiálů je idealizováno jako lineární. Pro účely posouzení nárazu hlavy je to však dostačující. Pro materiál je použita tuhostní metoda prevence hourglassingu a jsou kontrolovány celkové energie u všech provedených výpočtů. Všechny uzly impaktované součásti, které náležejí ploše protilehlé k místu nárazu, mají 0 stupňů volnosti. Mezi hlavou a impaktovanou součástí je definován kontakt pro poddajná tělesa typu 33. Výsledné zrychlení je snímáno z těžiště hlavy modelu člověka definované uzlem ID 90004683. Rozfázovaný průběh simulace nárazu hlavy na součást se zaoblením 20 mm s uvažováním dřevěného materiálu je na Obr. 45.



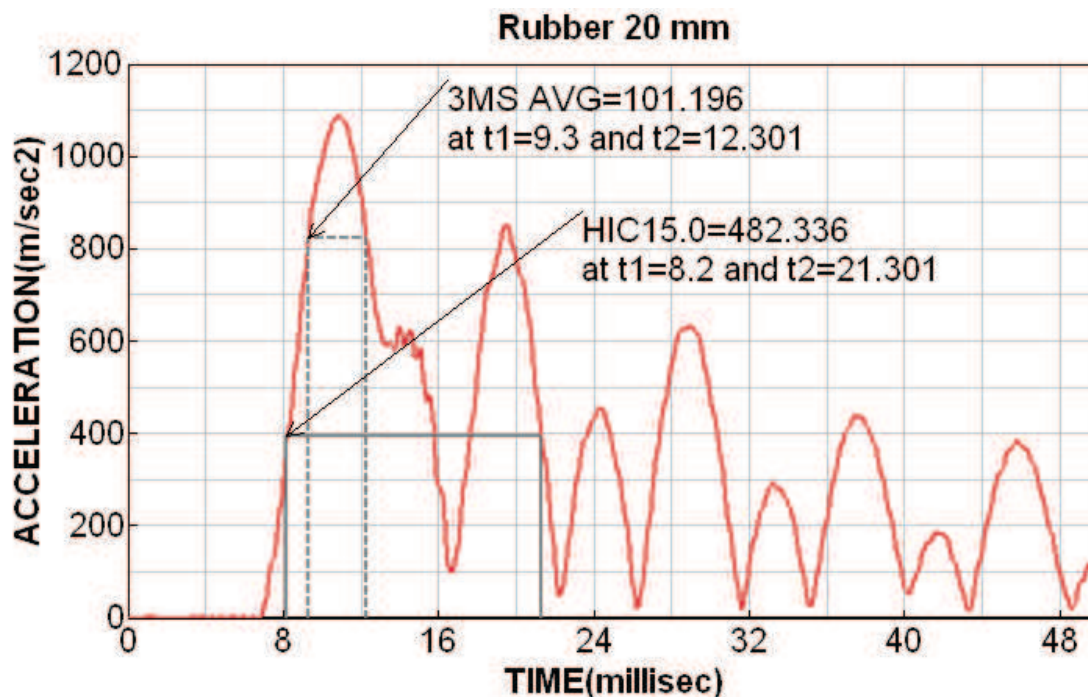
Obr. 45 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy

#### 18.4 Vliv velikosti poloměru zaoblení na pravděpodobnost poranění

Pro vyhodnocení je použit SW. „Visual-Viewer“, správnost vyhodnocení je ověřena jednoduchým skriptem (viz příloha 4). Díky tomu je možné stanovit kritéria poranění přímo v tomto software (viz Obr. 46). Možnost samočinného vyhodnocení významně ulehčí práci. Zde je průběh celkového zrychlení těžiště hlavy filtrován filtrem CFC 1000. Jedná se

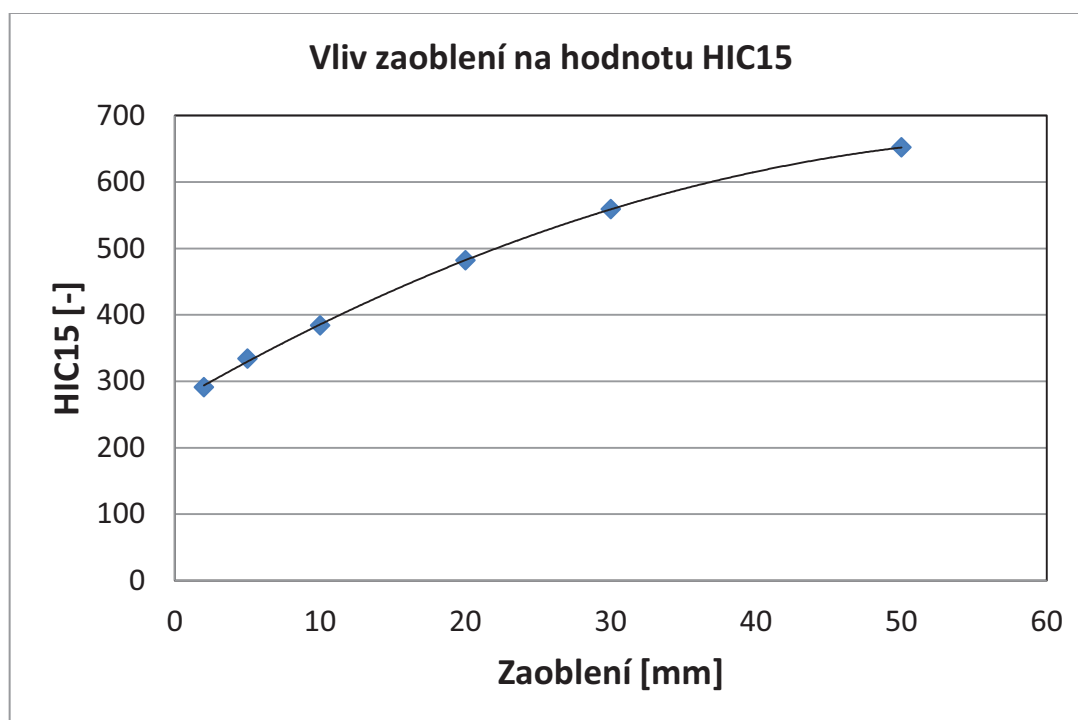


o výsledek nárazu hlavy na gumovou součást se zaoblením 20 mm. Průběhy zrychlení pro všechny simulace s různými materiály a rádiusy jsou přiloženy na konci zprávy.



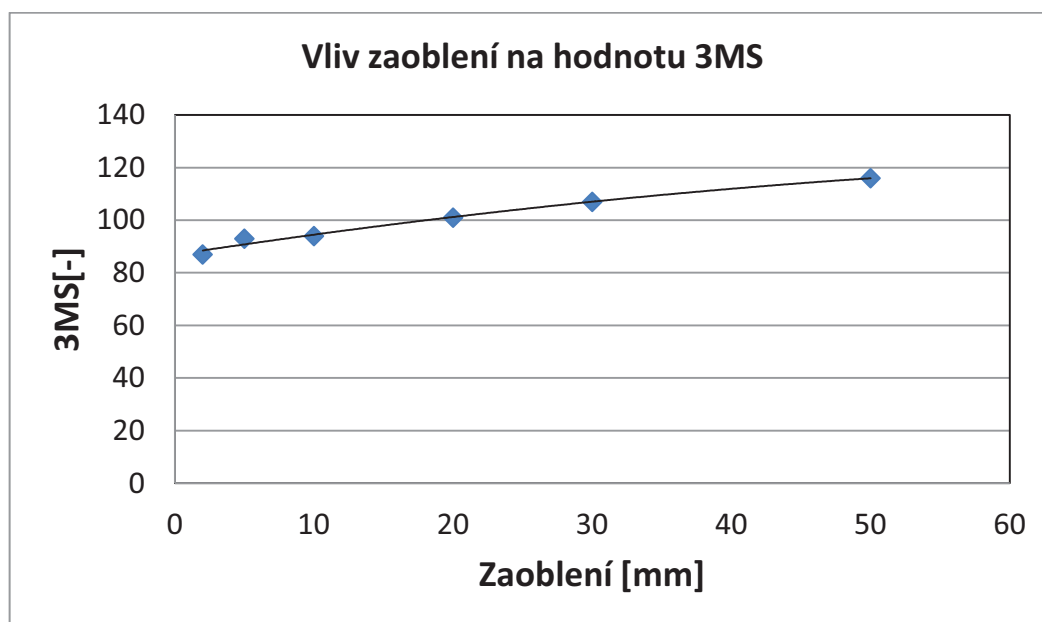
Obr. 46 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy

Z výsledků všech simulací nárazů hlavy na součást s gumovým materiálem jsou sestaveny následující grafy. Je zde naznačena spojnice trendu jednotlivých výsledků simulací s různým rádiusem. Nejprve je vyhodnocena závislost kritéria HIC15 na velikosti zaoblení. Vliv zaoblení na velikost kritéria HIC je uveden na Obr. 47.



Obr. 47 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy

Dále je vyhodnocena závislost kritéria 3MS na velikosti Zaoblení. Vliv zaoblení na velikost kritéria 3MS je uveden na Obr. 48.



Obr. 48 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy 3MS

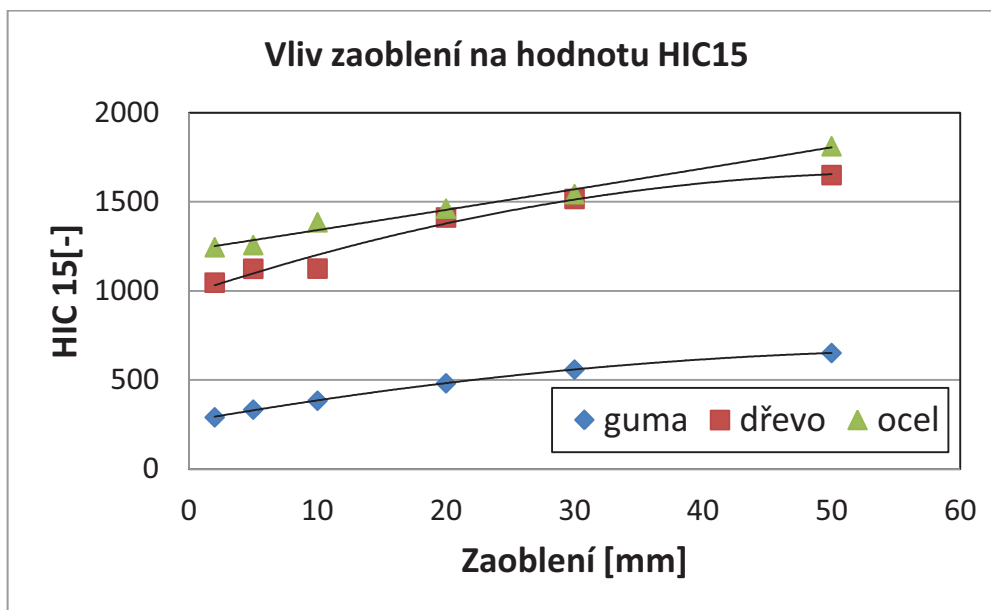
### 18.5 Vliv tuhosti materiálu interiérového prvku

V této části jsou vyhodnocovány tři druhy materiálů s různou tuhostí a hustotou. Vlastnosti těchto materiálů jsou uvedeny v Tab. 4. Na Obr. 49 je vyhodnocen vliv velikosti rádiusu na velikost poranění s použitím kritéria HIC u různých materiálů. Obdobně na Obr. 50 je provedeno vyhodnocení pro kritérium 3MS.

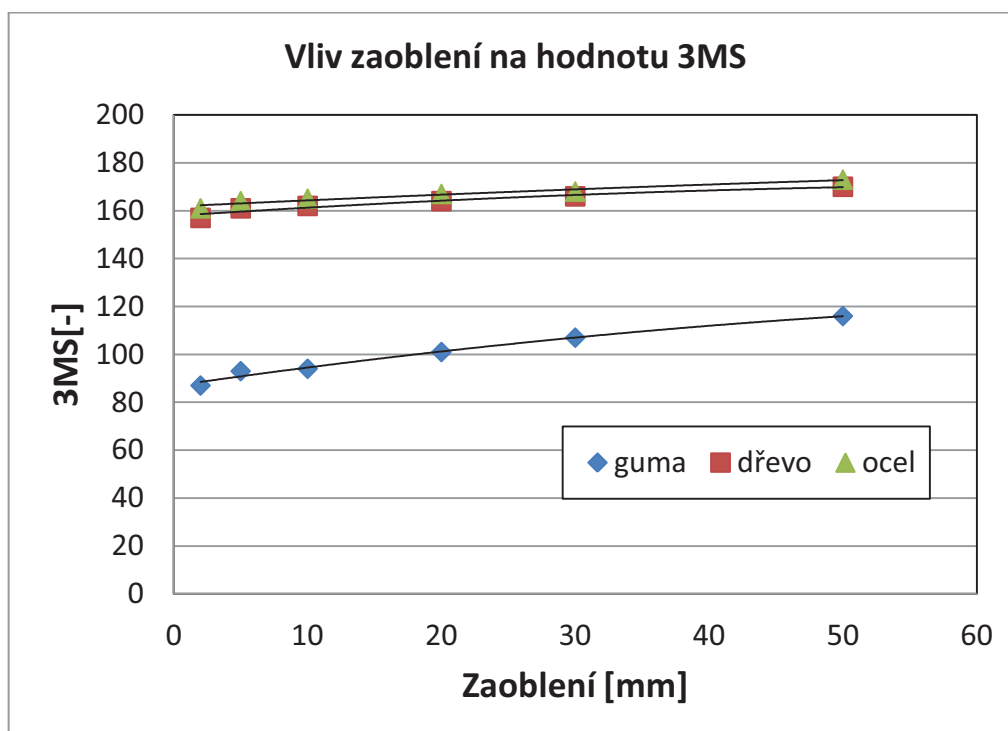
Tab. 4 Vlastnosti uvažovaných materiálů

	E [GPa]	$\nu$ [-]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
guma	0,05	0,4	1200
dřevo	10	0,3	500
ocel	200	0,3	7850

Použité materiály jsou modelovány jako lineární, bez uvažování plastického chování, nebo odlišného chování specifického pouze pro určitý materiál. Pro porovnání účinků je taková idealizace přípustná. Teoreticky by bylo možné zabývat se pouze fiktivními materiály pro popsání účinku poddajnosti. Zvolené materiály však mají velmi vhodný odstup poddajnosti pro toto posouzení. U zvolených materiálů je dobře patrný výrazný rozdíl ve výsledných vyhodnocených kritériích poranění. Největší odstup má gumový materiál, jehož modul pružnosti je významně nižší. Je zřejmé, že poddajnost gumy hraje významnou roli při nárazu hlavy cestujícího.



Obr. 49 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy HIC15



Obr. 50 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy 3MS

## 18.6 Vyhodnocení výsledků pro rozdílné rádiusy

Je účelné vytvořit alespoň základní přehled rozdílů ve výsledcích. Pro tento účel jsou vytvořeny dvě tabulky. Nejprve jsou zde shrnuty výsledky kritéria HIC (Tab. 5) pro simulace s různými velikostmi rádiusů a různými materiály. Ve sloupcích označených „rozdíl [%]“ je vždy uvedeno, o kolik procent se liší konkrétní výsledek od výsledku při použití rádiusu 50 mm.

Tab. 5 Vyhodnocení kritéria HIC

radius [mm]	HIC Guma [-]	rozdíl [%]	HIC Dřevo [-]	rozdíl [%]	HIC Ocel [-]	rozdíl [%]
2	291	55	1047	37	1246	31
5	334	49	1125	32	1258	31
10	384	41	1126	32	1386	24
20	482	26	1413	14	1463	19
30	559	14	1517	8	1544	15
50	652	0	1651	0	1813	0

Stejně vyhodnocení je zpracováno pro výsledky kritéria 3MS (Tab. 6). Obdobně jako v předchozím případě, i zde je zapsán procentní rozdíl výsledků pro různé rádiusy a různé materiály.

Tab. 6 Vyhodnocení kritéria 3MS

radius [mm]	3MS Guma [-]	rozdíl [%]	3MS Dřevo [-]	rozdíl [%]	3MS Ocel [-]	rozdíl [%]
2	87	25	157	8	161	7
5	93	20	161	5	164	5
10	94	19	162	5	165	5
20	101	13	164	4	167	3
30	107	8	166	2	168	3
50	116	0	170	0	173	0

## 18.7 Zhodnocení vlivu zaoblení

Vliv zaoblení interiérových prvků na vznik možných lokálních poranění je jen obtížně vyhodnotitelný. Možností posouzení pravděpodobnosti vzniku poranění je použití standardních kritérií poranění. Tato kritéria však mají určitá omezení. Je zřejmé, že významný vliv na výsledné hodnoty kritérií poranění má právě zaoblení hrany, která je v kontaktu s hlavou člověka. Tato zpráva si klade za cíl poskytnout alespoň jednoduchý přehled o tom, jak velikost rádiusu zaoblení tyto hodnoty ovlivní.

Jak je patrné z předchozích grafů a tabulek (Tab. 5, 6 Obr. 49, 50), hodnoty kritérií poranění (HIC a 3MS) se zvyšují s rostoucím rádiusem hrany, na kterou hlava naráží. Tato skutečnost neodpovídá realitě a je způsobena zanedbáním možnosti vzniku lokálních poranění. Prostřednictvím kritérií poranění je hodnoceno pouze zrychlení těžiště hlavy. Velikost tohoto zrychlení je pak tím nižší, čím je rádius interiérového prvku menší. To je způsobeno lokální deformací materiálu interiérového prvku v oblasti hrany.

Z grafů výše rovněž vyplývá, že přímá úměrnost mezi velikostí rádiusu a kritérii poranění je tím významnější, čím je tuhost materiálu interiérového prvku nižší. Obecně známým faktem je, že pro vyhodnocení kontaktní zátěže hlavy je vhodnější kritérium s menším časovým oknem. Tuto skutečnost provedené simulace potvrzují.

Kritérium HIC jako standardní, nejčastěji využívané kritérium je vhodné pro posuzování možných poranění v interiérech vozidel za předpokladu, že půjde o rovinnou kontaktní plochu, případně plochy s velkými poloměry zaoblení, kdy v těchto případech má význam porovnání výsledků pro různé mechanické vlastnosti povrchů při stejné geometrii.

## 19 Analýza interiéru s využitím poznatků DTM/TTS (EDS)

### 19.1 Využití poznatků DTM/TTS (EDS)

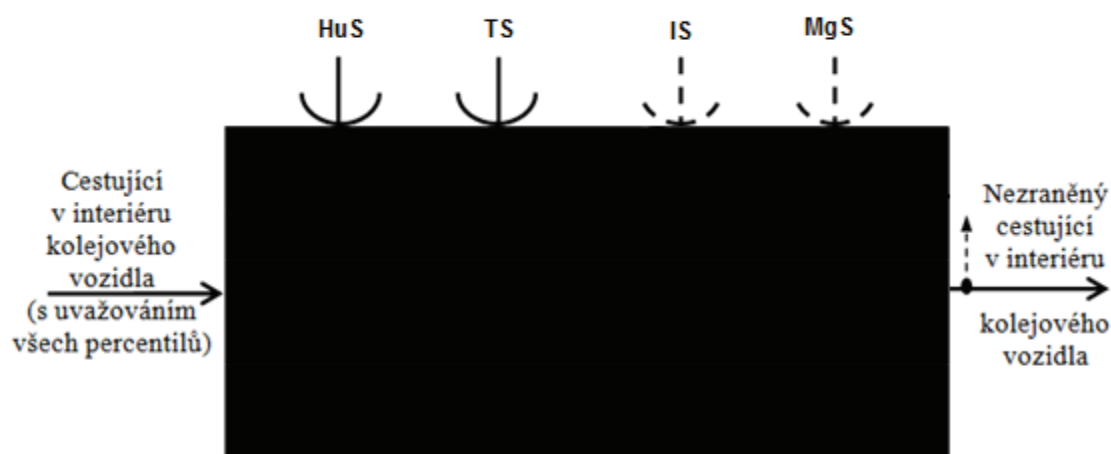
Pro podchycení rizik spojených s bezpečností interiérů kolejových vozidel je vhodné využít systémový přístup. Jako výhodné se jeví využití poznatků na bázi DTM/TTS EDS [HOSNEDL2008]. Vyvinutý a ověřený přístup, založený na teorii technických systémů (TTS), přináší výrazné výhody především v kreativních oblastech, při respektování všech souvislostí [HOSNEDL2010].

Běžné přístupy směřují k tradičním metodám konstruování s využitím intuitivních poznatků, které byly získány z teorie a (stále více v průběhu času) z praxe. Praxe ukazuje, že konstruktéři jsou běžně přesvědčeni, že systémový přístup brání jejich kreativitě. Tato metodika však předčí obvyklé rutinní postupy a více se podobá souhrnu užitečných algoritmů, bázi znalostí a nástrojů pro tvůrčí práci konstruktéra.

Cílem této kapitoly je využít univerzálnost a aplikovatelnost těchto poznatků i mimo konstrukční proces. Ačkoliv každý prvek interiéru může být považován za samostatný orgán a interiér obecně za konstrukci umožňující bezpečnou přepravu cestujících, je nutno si uvědomit, že stejně jako je konstrukce předvýrobní fází, je výzkum pasivní bezpečnosti fází předcházející konstrukci. Inovativní přístup je tak použit pro predikci a vyhodnocení kolizních scénářů, které budou dále odborně řešeny a jejichž sestavení by jinak pravděpodobně proběhlo nějakým intuitivním postupem, kde může dojít k přehlédnutí zásadních rizik.



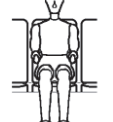









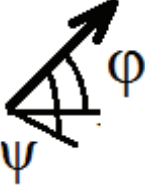





### 19.2 Analýza provozních situací

Jestliže lze obecný interiér kolejového vozidla uvažovat jako technický systém, pak je možné zabývat se jeho funkční strukturou. Na Obr. 51 je provozní transformační/technický proces (TrfP/TP) - černá skříňka s cestujícím jako vstupem a nezraněným cestujícím jako výstupem. Podrobnější rozpracování je reprezentováno v následujících částech prostřednictvím Tab. 7 a Obr. 51.



Obr. 51 Černá skříňka – Naznačený provozní transformační/technický proces (TrfP)

Tab. 7 Morfologická matice se záznamem situačních prvků provozního transformačního procesu a jejich konkretizace

Situační		Situační provozního TrfP a jejich uvažované alternativy				
		1	2	3	4	5
1	Rozvržení interiéru	jednosměrné sezení 	sezení čelem k sobě 	bokem do směru jízdy 	volný prostor 	specifický prvek interiéru 
2	poloha cestujícího				obecná poloha	
3	Cestující	95% větší muž	5% žena	50% průměrný muž	dítě	obecný percentil
4	Počet cestujících	0	1	2	3	4 a více
5	Prvek způsobující poranění	zavazadla a pohybující se předměty	spolucestující	interiér vozidla nebo jeho část		
6	Vozidlo	osobní vůz, lokomotiva	pevná vlaková jednotka	metro	předměstská tramvaj	tramvajové vozidlo
7	Směr zrychlení	podélně ve směru jízdy 	podélně proti směru jízdy 	příčně 	svisle 	obecný směr 
8	Velikost zrychlení	2 m/s <sup>2</sup>	2g	6,25g	7,5g	20g
9	průběh zrychlení					

### 19.3 Návrh variant řešení

Tab. 8 Morfologická matice se záznamem navržených variant ke stanoveným situacím s návrhem jejich kombinací

Díleční funkce	Číslo varianty: (volba 1-5 nositele funkcí)																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	1	2	3	4	5	1	1	4	5	4	3	3	1	2	4	2	2	1	4	5	1	2	3	4	1
2	1	1	2	1	3	1	1	2	3	2	1	1	2	1	4	1	1	2	2	4	1	2	2	1	4
3	1	3	2	3	3	1	2	3	4	3	1	2	3	4	5	3	3	2	4	1	3	1	2	3	4
4	2	2	3	2	3	2	2	3	2	2	2	2	3	5	2	2	5	2	2	2	2	2	3	2	2
5	3	3	2	3	2	3	3	2	1	3	3	3	3	2	1	3	2	1	3	3	3	1	1	3	3
6	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5
7	1	1	2	1	3	1	1	4	5	2	1	1	2	2	5	1	1	2	3	4	1	1	1	2	3
8	3	3	4	3	5	3	3	4	5	3	3	3	4	3	5	3	4	3	3	5	2	2	1	2	5
9	3	3	3	3	2	3	3	2	2	3	2	2	5	4	2	3	1	2	2	4	3	1	1	3	5

### 19.4 Hodnocení řešených variant

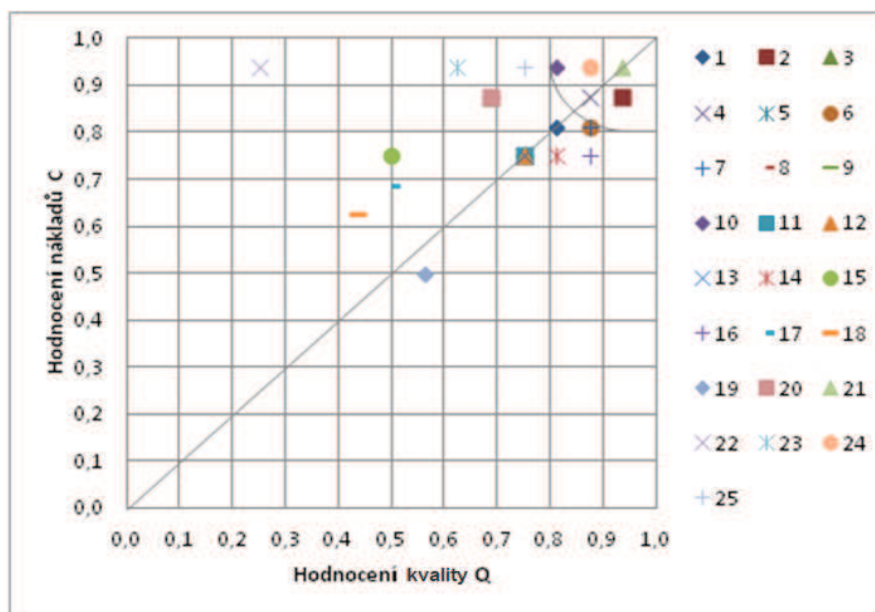
Hodnocení řešených variant dle kvality je uvedeno v Tab. 9 a 10 z důvodu velké objemnosti. Jednotlivé varianty jsou zaznamenány. Přiměřený přehled o vhodnosti jednotlivých variant pak dává Obr. č. 52.

Tab. 9 Výčet hodnotících kritérií, jejich vah a variant ke stanoveným situacím s návrhem jejich hodnocení

VARIANTA/ALTERNATIVA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
KRITÉRIA KVALITY Q	Četnost výskytu kolizního scénáře	2	4	3	4	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2
	Závažnost způsobených poranění	3	3	4	2	3	3	3	4	3	4	3	3	3	3
	Determinismus děje	4	4	1	4	4	4	4	2	4	3	3	3	3	4
	Vyhodnotitelnost poranění	4	4	3	4	3	4	4	3	3	3	4	4	4	4
	<b>Celk. souč. hodnocení</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
	<b>Celk. norm. hodnocení</b>	<b>3,3</b>	<b>3,8</b>	<b>2,8</b>	<b>3,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,5</b>	<b>3,5</b>	<b>2,8</b>	<b>3,0</b>	<b>3,3</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,3</b>
KRIT. NÁKL. C	Náklady na SW.	3	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4
	Náklady na zpracování modelu	3	3	4	3	3	3	3	4	3	4	3	3	3	3
	Výpočtová náročnost	3	3	3	3	3	3	3	4	3	4	3	3	3	3
	Dostupnost dokumentaci a dat	4	4	3	4	2	3	3	3	2	3	2	2	2	2
	<b>Celk. souč. hodnocení</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>
	<b>Celk. norm. hodnocení</b>	<b>3,3</b>	<b>3,5</b>	<b>3,5</b>	<b>3,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,3</b>	<b>3,3</b>	<b>3,5</b>	<b>3,0</b>	<b>3,8</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>
<b>Celkové pořadí</b>		<b>9</b>	<b>2</b>	<b>12</b>	<b>4</b>	<b>17</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>18</b>	<b>5</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>19</b>	<b>11</b>

Tab. 10 Výčet hodnotících kritérií, jejich vah a variant ke stanoveným situacím s návrhem jejich hodnocení

VARIANTA/ALTERNATIVA		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	IDEÁL
KRITÉRIA KVALITY Q	Četnost výskytu kolizního scénáře	1	4	2	2	2	3	4	1	2	4	1	4
	Závažnost způsobených poranění	2	2	2	1	4	2	4	1	3	2	4	4
	Determinismus děje	1	4	1	1	2	3	3	1	2	4	3	4
	Vyhodnotitelnost poranění	4	4	3	3	1	3	4	1	3	4	4	4
	<b>Celk. souč. hodnocení</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>16</b>
	<b>Celk. norm. hodnocení</b>	<b>2,0</b>	<b>3,5</b>	<b>2,0</b>	<b>1,8</b>	<b>2,3</b>	<b>2,8</b>	<b>3,8</b>	<b>1,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,5</b>	<b>3,0</b>	<b>4</b>
KRIT. NÁKL. C	Náklady na SW.	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4	3	4
	Náklady na zpracování modelu	3	3	3	2	4	4	3	3	4	3	4	4
	Výpočtová náročnost	3	3	2	2	1	4	4	4	3	4	4	4
	Dostupnost dokumentaci a dat	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4
	<b>Celk. souč. hodnocení</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
	<b>Celk. norm. hodnocení</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,8</b>	<b>2,5</b>	<b>2,0</b>	<b>3,5</b>	<b>3,8</b>	<b>3,8</b>	<b>3,8</b>	<b>3,8</b>	<b>3,8</b>	<b>4</b>
<b>Celkové pořadí</b>		21	10	22	24	25	14	1	23	15	3	8	



Obr. 52 Diagram relativní vhodnosti hodnocených situací

Kolizní situace (dále v práci uvedeno jako scénáře), jimž bude dále věnována pozornost, jsou sestaveny na základě prvních pěti variant s nejlepším hodnocením nákladů na zpracování C a nejlepším hodnocením kvality Q. Sestupné pořadí pěti vítězných scénářů (viz Obr. 52) variant je následující: varianta č. 21, varianta č. 2, varianta č. 24, varianta č. 4, varianta č. 10.



## 20 Kolize cestujícího v tramvajovém vozidle

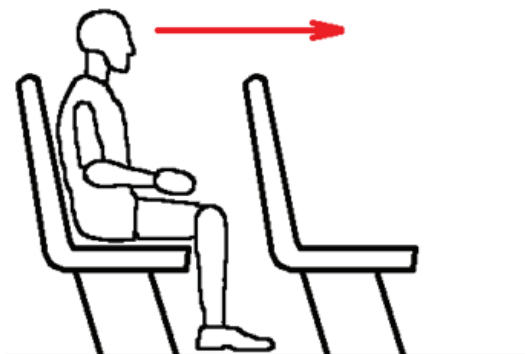
Práce se zabývá analýzou poranění hlavy při nárazu na interiérový prvek v tramvaji. Jsou zde popsány nejpravděpodobnější kolizní scénáře s uvažováním cestujících v prostředním článku tramvaje. Pro tyto kolize jsou provedeny simulace, ze kterých je možné vyhodnotit pravděpodobnost poranění cestujících. Je zde rozebráno poranění krku typu whiplash. V závěru práce je uveden návrh úpravy sedadla pro zvýšení bezpečnosti.

### 20.1 Kolizní scénáře

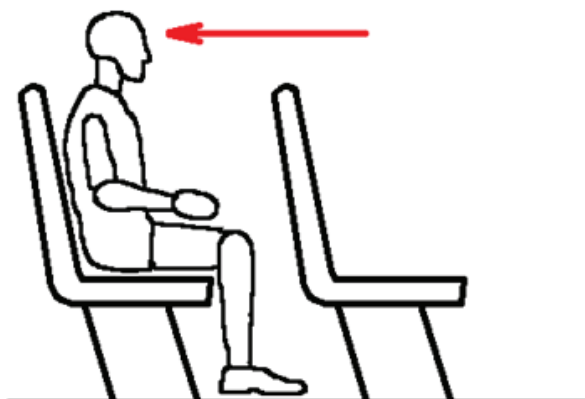
Simulace kolize v tramvajovém vozidle vychází z předpokladu maximálního zpomalení při nouzovém brzdění, případně ze zpomalení při mírném nárazu poměrně hmotné tramvaje. Je zde uvažován puls zrychlení o velikosti 2g. Puls má v počátku pozvolný náběh a na maximální hodnotu zrychlení naroste v čase 20 ms. Zrychlení 2g pak působí po celou dobu výpočtu.

Prostřední článek tramvaje obsahuje, až na několik výjimek, jednotné rozvržení sedadel. Geometrie se zde periodicky opakuje a je zřejmé, že v případě působení zrychlení bude průběh kolize cestujících na všech těchto místech stejný. Z tohoto důvodu je vhodné simulovat kolizi s rozmístěním sedadel, které reprezentuje velkou část vozidla. Pro tento účel jsou zvolena sedadla, na kterých cestující sedí ve směru jízdy.

Na zvoleném sedadle dochází ke dvěma možným kolizním scénářům. Prvním případem je výše zmíněné nouzové brzdění, či náraz ve směru jízdy tramvaje. Zde dochází k posunutí cestujícího vlivem setrvačných sil, zatímco na všechny prvky interiéru působí zpomalení (Obr. 53). V případě zpětného nárazu pak zrychlení samozřejmě působí v opačném směru (viz Obr. 54).



Obr. 53 Kolizní scénář s cestujícím sedícím ve směru zrychlení v tramvajovém vozidle



Obr. 54 Kolizní scénář s cestujícím sedícím v protisměru zrychlení v tramvajovém vozidle

## 20.2 Popis modelu interiéru tramvajového vozidla

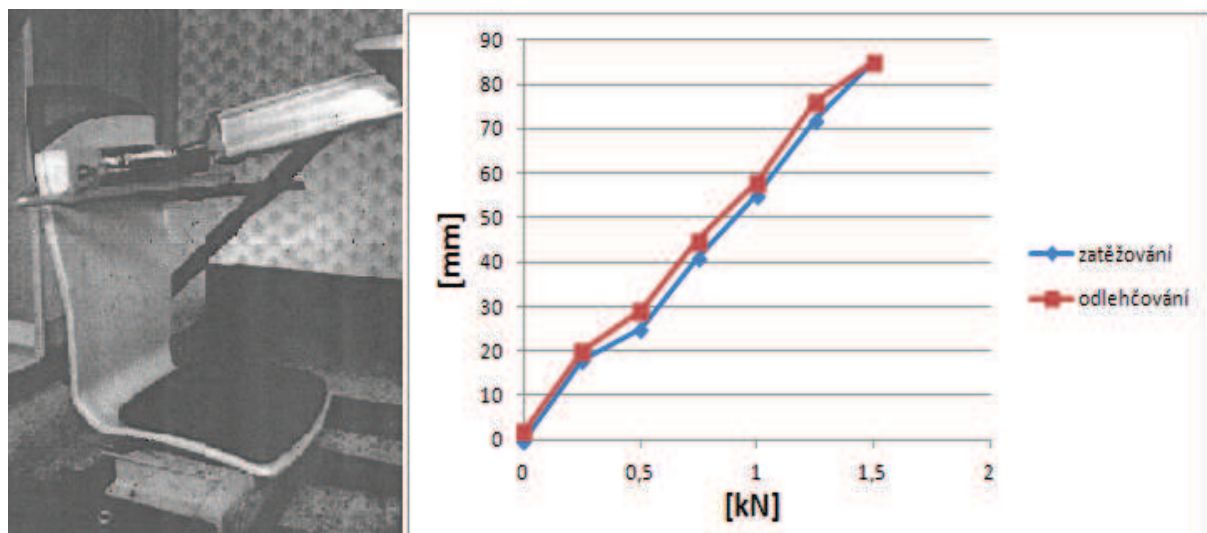
### 20.2.1 Sedadlo

Jedná se o model dřevěné části jednoho sedadla. Implicitní velikost prvků sedadla je zvolena 10mm. Tvar sedadla vychází z dostupných dat v podobě 3D modelu. Síť je tvořena objemovými prvky s osmi uzly typu „quad“ (Obr. 55).



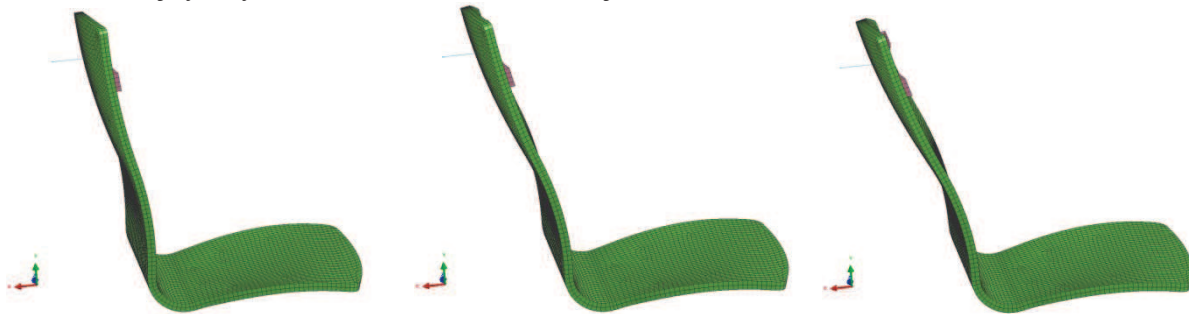
Obr. 55 Model dřevěného sedadla

Materiálem sedadla je překližka. Tento materiál je pro zjednodušení uvažován jako homogenní a izotropní. Základní mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou dohledatelné v literatuře. Nejprve je odhadem voleno  $E=10$  GPa a  $\nu=0,3$ . Pro zpřesnění mechanických vlastností lze následně využít výsledek experimentu, při kterém bylo sedadlo zatěžováno pozvolně rostoucí silou (Obr. 56).



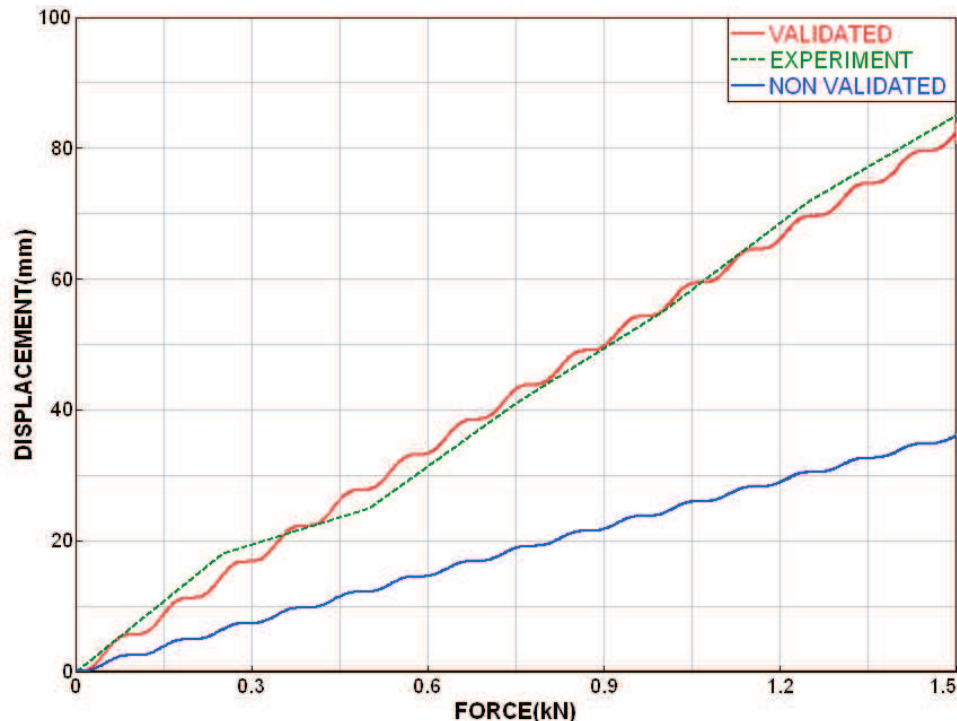
Obr. 56 Experimentální ověření nosnosti sedadla

Díky znalosti výsledků testu statického zatěžování sedadla je možné provést validační test. Zde je simulován průběh experimentu s odpovídajícími počátečními a okrajovými podmínkami. Sedadlo je namáháno postupně rostoucí silou působící ve stejném směru jako při experimentu. Sedadlo je upevněno ve spodní části, stejně jako při experimentu, a lze tedy očekávat stejný ohyb sedáku. Průběh simulace je znázorněn na Obr. 57.



Obr. 57 Průběh simulace při validaci sedadla

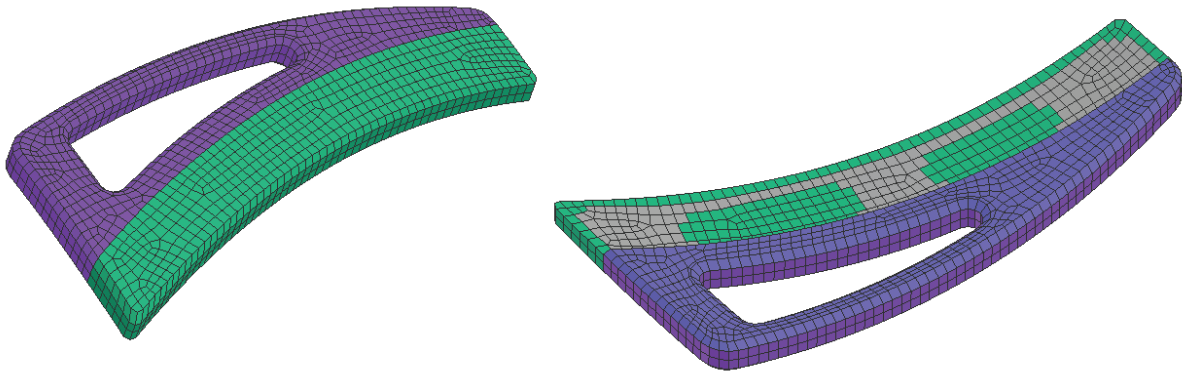
Výsledek validace je uveden v grafu na Obr. 58. Zde je výsledná charakteristika výrazně nižší než u experimentu. Z toho důvodu jsou předběžně zvolené charakteristiky upraveny ( $E=9,8$  GPa a  $\nu=0,3$ ), tak aby bylo dosaženo lepší shody. Na obrázku jsou tyto výsledky reprezentovány strmější lineární charakteristikou, která se blíží výsledkům získaným z experimentu. Drobná nelinearita experimentálních dat není uvažována, neboť její vliv na výsledné chování sedadla je zanedbatelný a její uvažování by značně zkomplikovalo materiálový model. Zajímavou otázkou zůstává skutečné chování dřevěného sedadla při dynamickém zatížení, především z pohledu porušení. Při simulaci je předpokládáno, že silové účinky nebudou tak velké jako při experimentu a nedojde k porušení sedadla.



Obr. 58 Výsledky simulace pro validaci tramvajového sedadla, výsledky experimentu (zeleně), nevalidované sedadlo (modře), validované sedadlo (červeně)

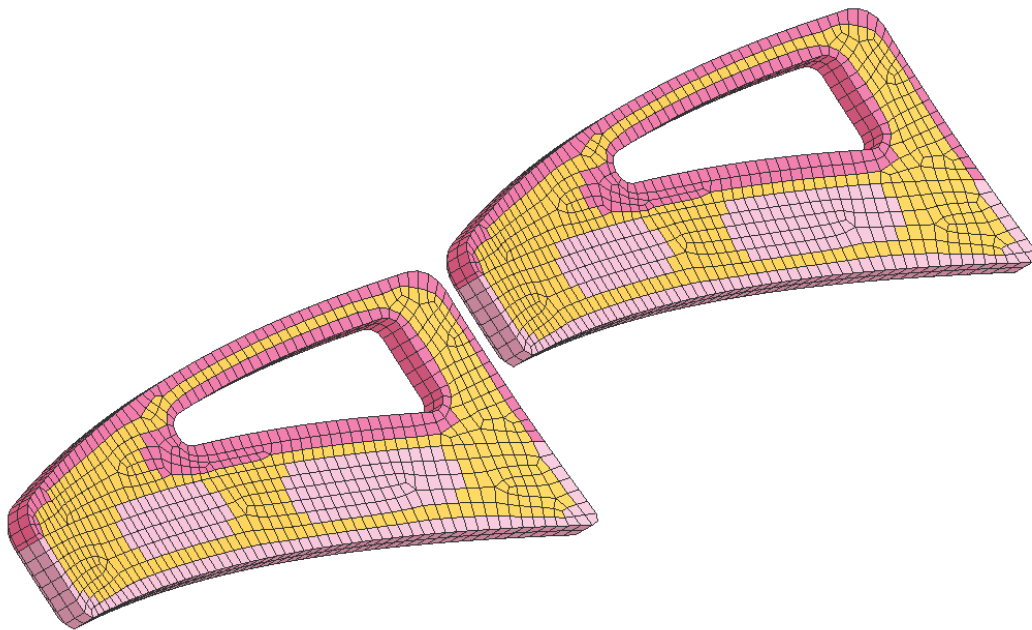
### 20.2.2 Madlo sedadla

Tvar sedadla vychází z dostupných dat v podobě 3D modelu. Síť je tvořena prvky typu „quad“. Implicitní velikost prvků sedadla je zvolena 8mm, vzhledem ke složitosti součásti je obtížné dodržet rovnoměrnost sítě. Celé madlo je rozděleno na více částí viz Obr. 59. Jednotlivé části jsou spojeny prostřednictvím společných krajních uzlů.



Obr. 59 Model madla

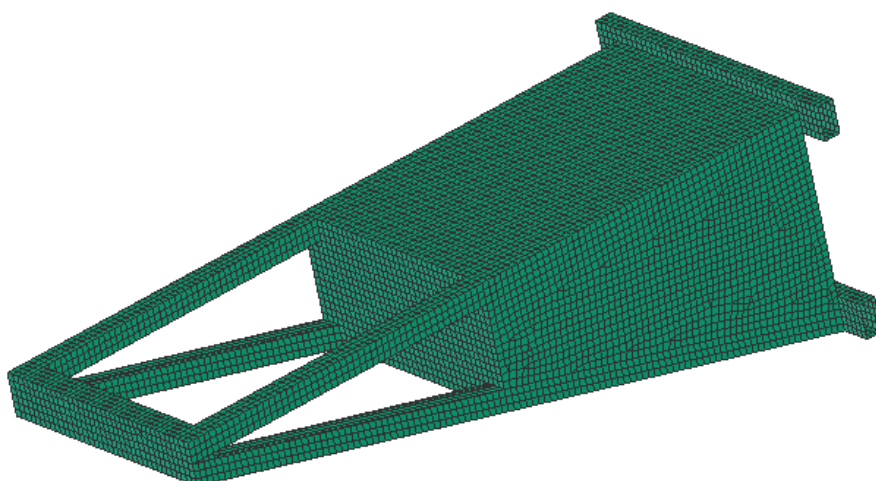
Madlo je tvořeno ocelovou konstrukcí, která je pokryta gumou (Obr. 60). Guma je idealizována jako lineární materiál s parametry  $E=0,05$  GPa a  $\nu=0,4$ . Lze předpokládat, že pro účely ověření nárazu člověka je tato idealizace přípustná. Pro vnitřní ocelovou část je uvažován materiál S 235 s parametry  $E=200$  GPa a  $\nu=0,26$ . Jedná se o stejný materiál, který je definován v odstavci uchycení sedadel.



Obr. 60 Vnitřní struktura madla

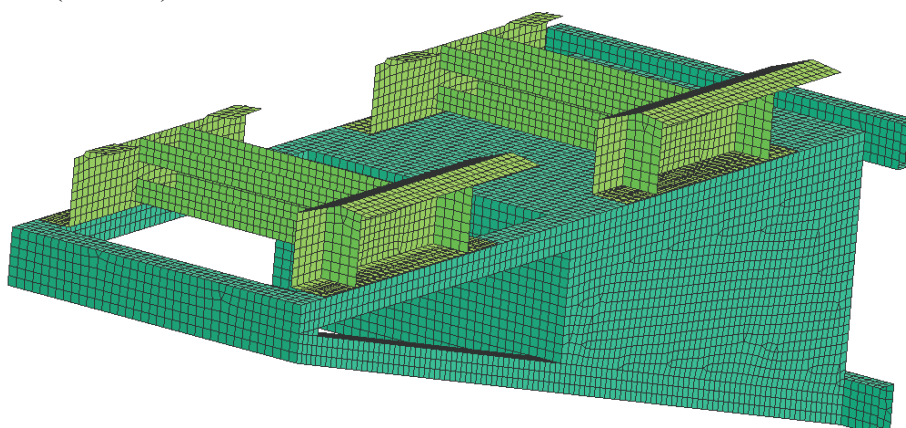
### 20.2.3 Uchycení sedadel

Sedadla jsou uchycena pomocí nosné konzoly do bočnice vozidla. Je zřejmé, že deformace této konzoly bude minimální, nicméně je vhodné prověřit možné ovlivnění průběhu kolize uvažováním poddajnosti tohoto prvku (Obr. 61).



Obr. 61 Model konzoly

Mezi nosnou konzolou a sedadlem je samostatná distanční konstrukce. Tato konstrukce spojuje sedadlo s konzolou. Veškeré tyto spoje jsou realizovány prostřednictvím tuhých těles v místech, spojení skutečných součástí. Pro veškeré ocelové části je uvažován materiál S 235 (Obr. 62).



Obr. 62 Model konzoly s nástavci pod sedadlem

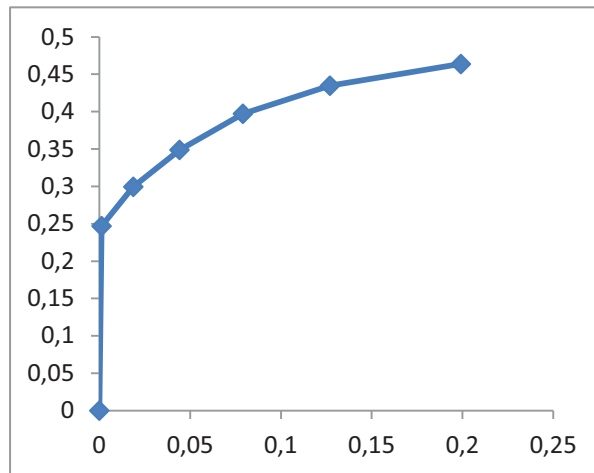
Pro definování všech materiálů byl využit jediný materiálový model (ocel S235). Je zde uvažováno plastické chování i porušení materiálu. Díky tomu bude možné vyhodnotit chování všech ocelových částí i z pohledu zbytkových deformací. Při řešení kolize cestujících zpravidla dostačuje idealizace okolních materiálů jakožto lineárních. V tomto případě je použito komplexnější definice materiálu, která umožňuje tento přístup ověřit.

Materiál je uvažován jako elastoplastický (typ 103) pro plošné prvky a jako elastoplastický (typ 1) pro objemové prvky. Materiál objemových prvků je definován prostřednictvím koeficientů  $G$  a  $K$ , přepočítaných z níže uvedených parametrů  $E$  a  $\nu$ . Ostatní parametry jsou definovány shodně dle následující tabulky (Tab. 11). Porušení materiálu je definováno u plošných prvků po překročení meze pevnosti maximální plastickou deformací ( $EPS_{Imax}$ ).

Tab. 11 Vlastnosti uvažovaných materiálů

$E$ [GPa]	$\nu$ [-]	$\rho$ [ $\text{kg}/\text{mm}^3$ ]	$EPS_{Imax}$ [-]
200	0,26	$7,85 \cdot 10^{-6}$	0,3

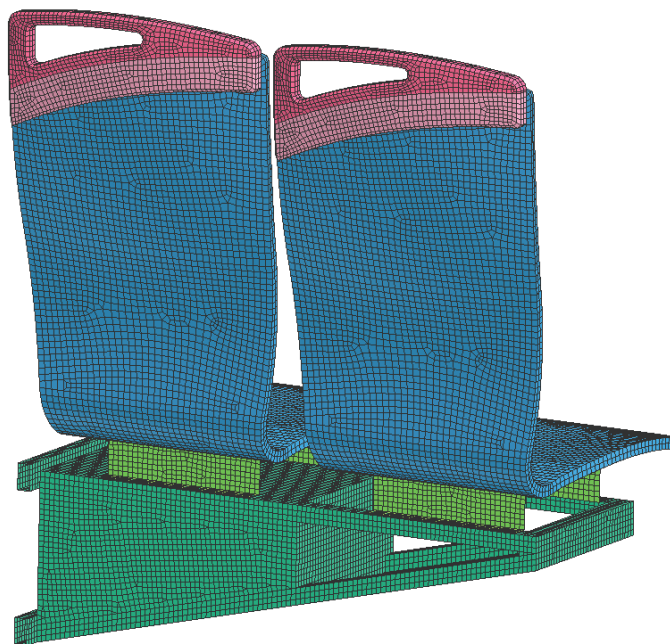
Plastické chování materiálu je definováno (Obr. 63) dle hodnot dohledaných v literatuře [VERLEYSENA].



Obr. 63 Graf ze zkoušky tahem, materiál ocel S235 (x-true strain [-], y-true stress[GPa])

#### 20.2.4 Model dvojsedadla

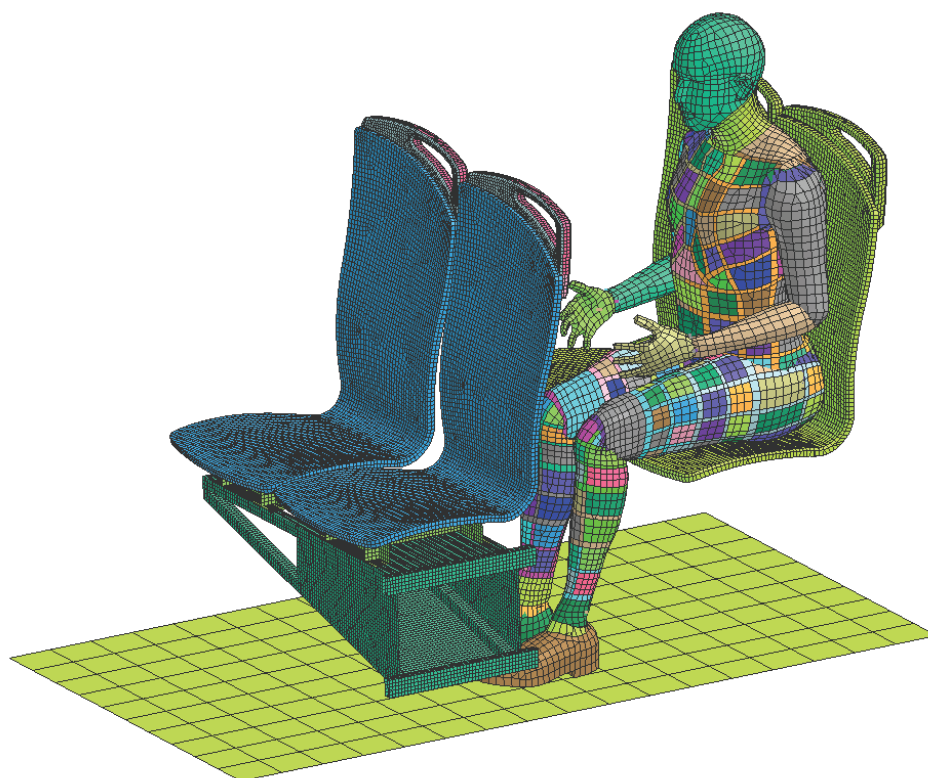
Pro simulaci kolize cestujících je vytvořen model dvojsedadla. Obě sedadla jsou upevněna na společné konzole prostřednictvím konstrukcí pod sedadly. Upevnění konzoly je provedeno prostřednictvím připojení krajních uzlů (místo upevnění reálného sedadla k bočnici) k tuhému tělesu podlahy (Obr. 64).



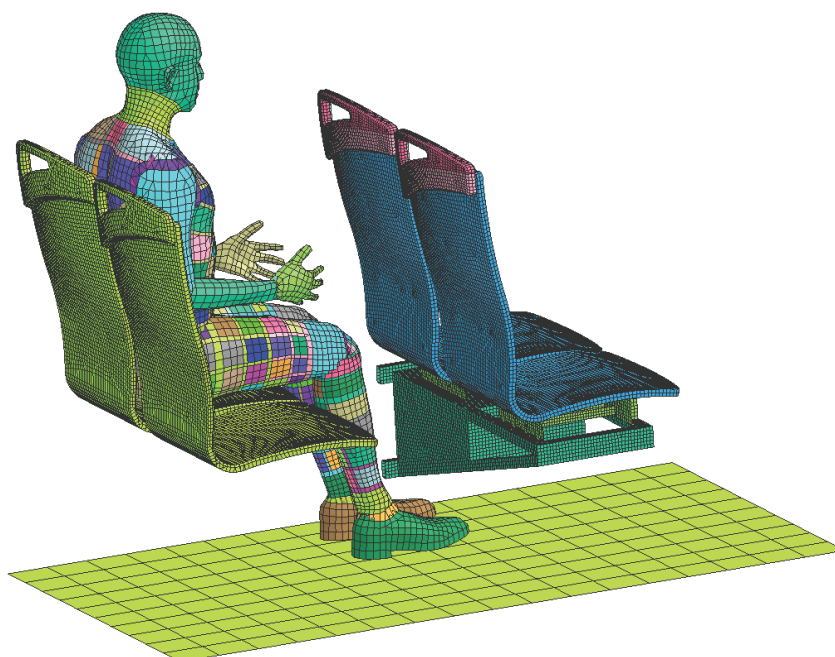
Obr. 64 Model celého dvojsedadla

#### 20.2.5 Kompletní model

Kompletní model (Obr. 65 a 66), vytvořený pro simulaci kolize cestujících, se skládá z modelu dvojsedadla, modelu člověka a z modelu okolí. Poranění cestujících je vždy způsobeno kontaktem s modelem dvojsedadla. Model okolí má pouze pomocnou funkci a proto je uvažováno jako tuhé. Tuhá podlaha a tuhé zadní sedadlo zde slouží pouze jako podpora modelu člověka před samotnou kolizí.

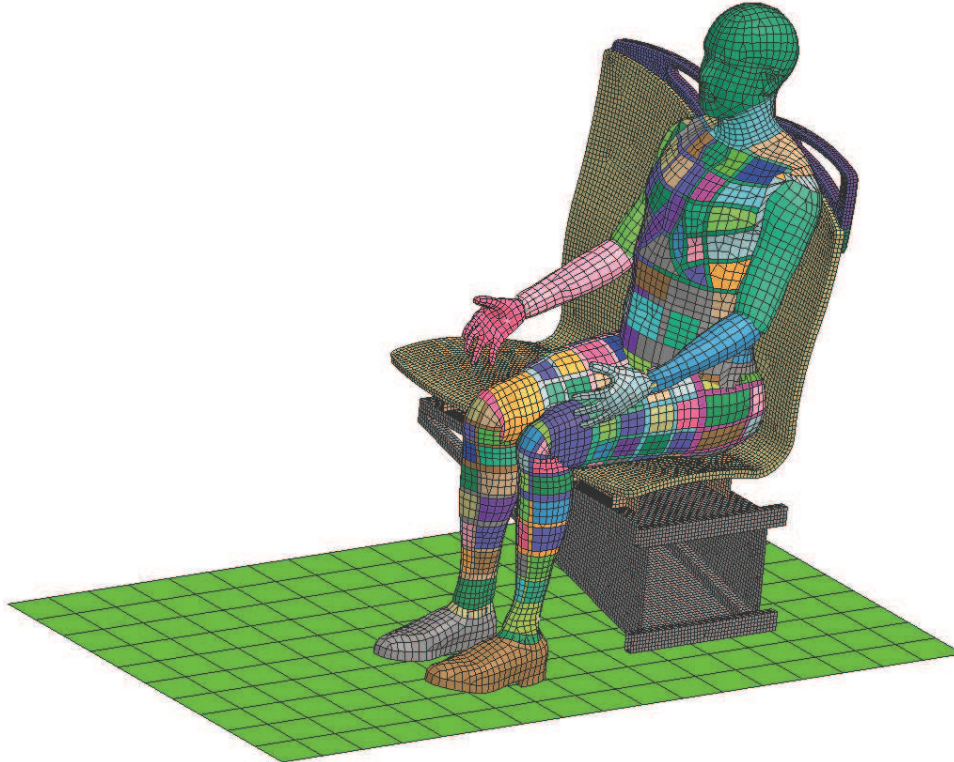


Obr. 65 Kompletní model – první kolizní scénář (pohled zepředu)



Obr. 66 Kompletní model – první kolizní scénář (pohled zezadu)

Pro vyhodnocení možného poranění krku je připravena simulace, kde cestující sedí zády ke směru zrychlení (viz odst. 20.5). Na rozdíl od předchozího případu je model člověka polohován na poddajném sedadle s definovanými materiálovými parametry (Obr. 67). Tím je zjištěno, že průběh kolize bude odpovídat realitě i z pohledu odezvy sedadla. Lze předpokládat, že díky průhybu sedadla dojde ke zmírnění následků zpětného nárazu.



Obr. 67 Kompletní model – druhý kolizní scénář (pohled zepředu)

### 20.3 Simulace kolize cestujících v tramvajovém vozidle

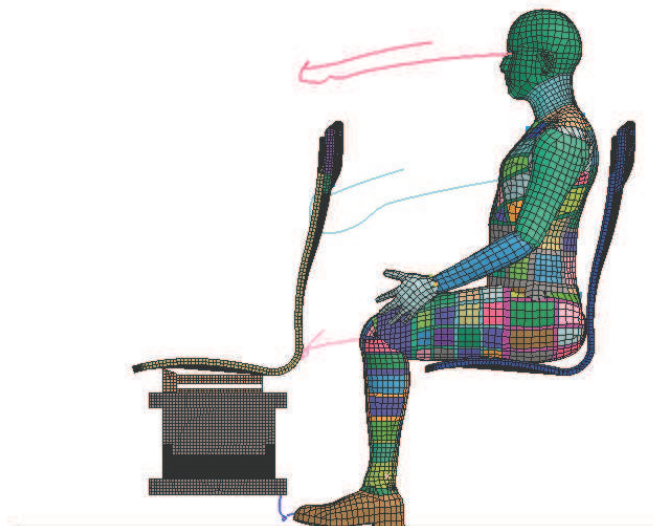
V modelu jsou definovány kontakty nohou modelu člověka s podlahou, kontakt modelu člověka se sedadlem, na kterém je usazen, a kontakt modelu člověka s protějším sedadlem. Samotný model člověka obsahuje některé základní kontakty mezi jednotlivými částmi těla, jako například kontakt brady a hrudníku. Tření v kontaktech je nastaveno dle vlastností uvažovaných materiálů dohledatelných v literatuře. Koeficient smykového tření mezi oděvem a sedadlem je stanoven na 0,3 [APURBA]. Koeficient smykového tření mezi podrážkou bot a podlahou je stanoven na 0,7 [LINVEBER]. Ostatní koeficienty tření jsou nastaveny na hodnotu 0,1. Jejich vlastnosti příliš neovlivní průběh simulace. Všechny spoje sedadel jsou idealizovány jako tuhá tělesa a není zde tedy uvažována možnost jejich porušení, ani nelze vyhodnotit jejich namáhání. Podlaha a zadní sedadlo pro usazení modelu člověka jsou řešeny jako jediné tuhé těleso. Tato idealizace je přípustná pro všechna tělesa, která nesouvisí s nárazem modelu člověka.

Úloha je řešena s využitím výhod explicitního řešiče. Výpočty jsou prováděny v software PAM-CRASH v režimu s běžnou přesností (single precision). Celkový čas děje je 300 ms. Časový krok úlohy je stanoven na  $5 \cdot 10^{-4}$  ms. Je využito paralelizace k rozdělení úlohy na 8 procesorů. S využitím metody přidání nestrukturální hmoty (mass-scaling) s koeficientem je možné výpočtový čas snížit na cca 30 minut.



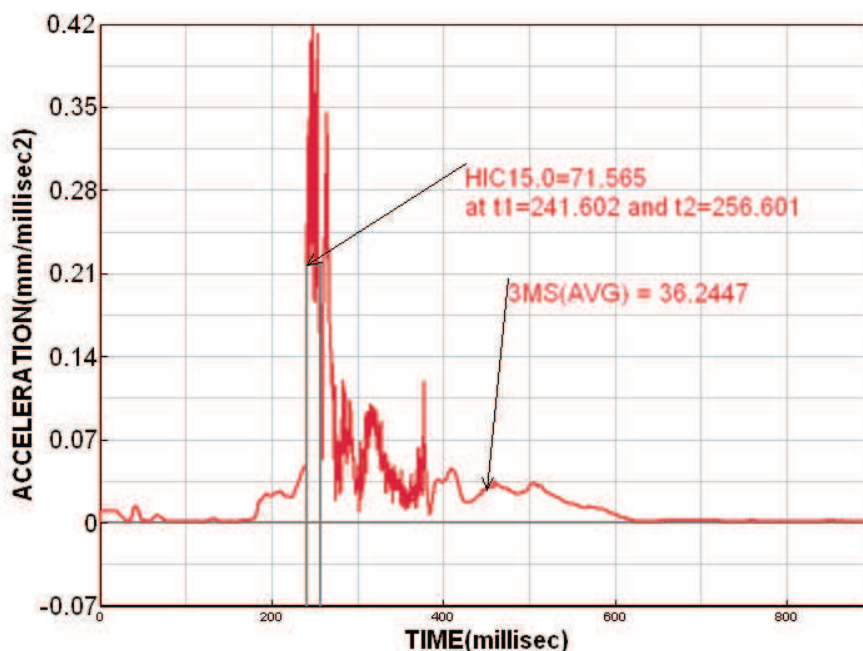
## 20.4 Kolize při zpomalení ve směru jízdy v tramvajovém vozidle

Při simulaci nárazu na protilehlé sedadlo je nejvíce ohroženou částí lidského těla hlava (Obr. 68). Z trajektorií pohybu je patrné, že člověk se při zpomalení okolních interiérových prvků pohybuje směrem dopředu a narazí na protější sedadlo koleno a hlavou. Zjištěné síly ve stehenních kostech jsou poměrně malé a nelze zde očekávat poranění. Model člověka je mimo jiné vybaven systémem signalizace poranění stehenní kosti, který neindikoval žádné poranění v průběhu celého výpočtu.



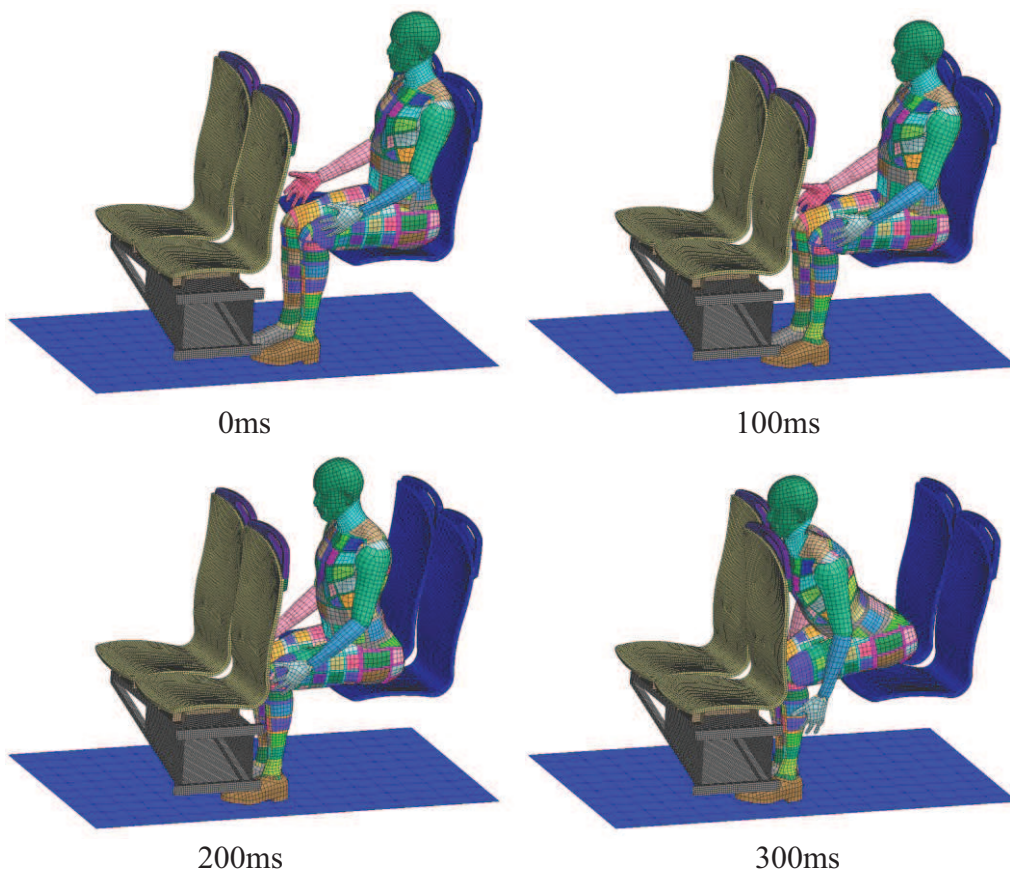
Obr. 68 Účinek čelního nárazu na protilehlé sedadlo

Vyhodnocení nárazu hlavy na prvek interiéru je zmíněno pouze stručně. Pro vyhodnocení poranění hlavy je účelné zvážit kritéria poranění. Na Obr. 69 je průběh zrychlení hlavy (magnitude), ze kterého jsou vyhodnocena kritéria poranění hlavy HIC15 a 3MS. Obě hodnoty ( $HIC_{15}=71,57$ ,  $3MS=36,25$ ) leží hluboko pod hodnotami limitními ( $HIC=1000$ ,  $3MS=80$ ), proto lze říci, že vznik vážného poranění tímto mechanismem je nepravděpodobný.



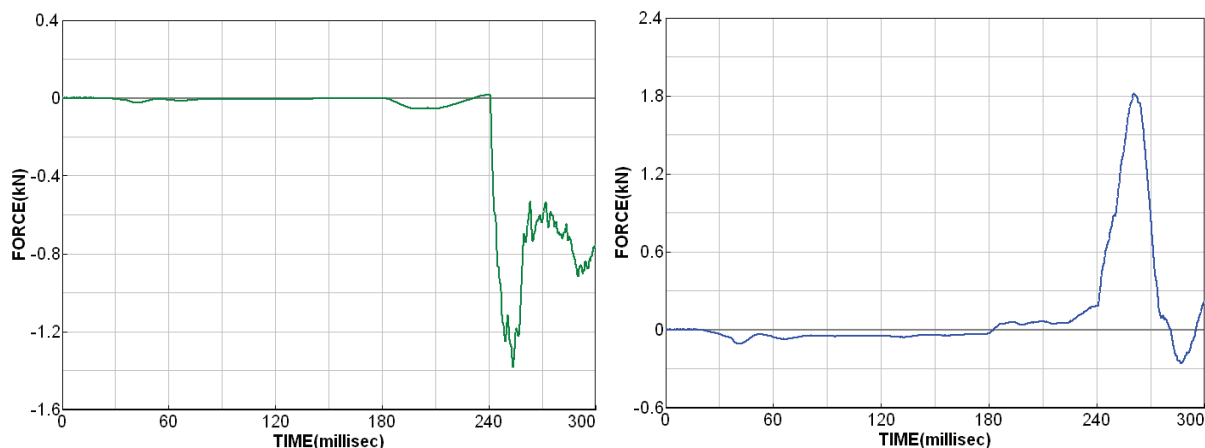
Obr. 69 Vyhodnocení zrychlení hlavy (magnitude) a kritéria poranění hlavy HIC, 3MS

Pro upřesnění kinematiky pohybu cestujícího v případě nárazu je na Obr. 70 rozfázovaný průběh kolize scénáře. Zde je patrné, že cestující naráží bradou, případně obličejovou částí hlavy. Vliv zaoblení interiérových prvků na vznik možných lokálních poranění je jen obtížně vyhodnotitelný. Lze však jednoznačně říci, že v případě kolize budou tato poranění rozhodující, vzhledem k nízkým hodnotám předchozích kritérií.



Obr. 70 Rozfázovaný průběh kolize cestujícího v čase 300 ms

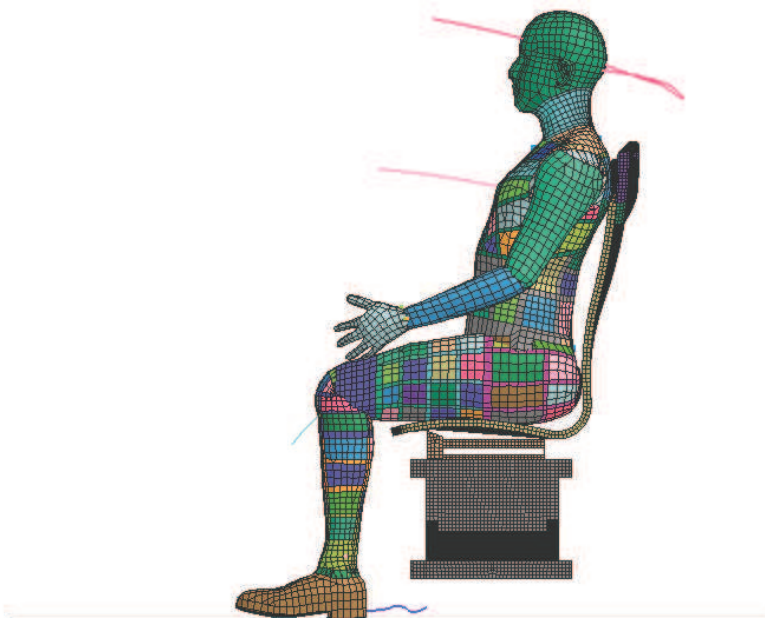
Z kinematiky pohybu je zřejmé, že cestujícímu hrozí poranění krku v důsledku nárazu čelistí do madla protějšího sedadla. Je účelné zhodnotit síly působící v krku viz Obr. 71. Limitní křivky kritéria NIC nejsou překročeny. Je však nutno zmínit, že síla ve smyku se limitní křivce velmi blíží, což značí nezanedbatelné nebezpečí poranění krku.



Obr. 71 Síly v krku v oblasti C1, vlevo: tahová síla, vpravo: smyková síla

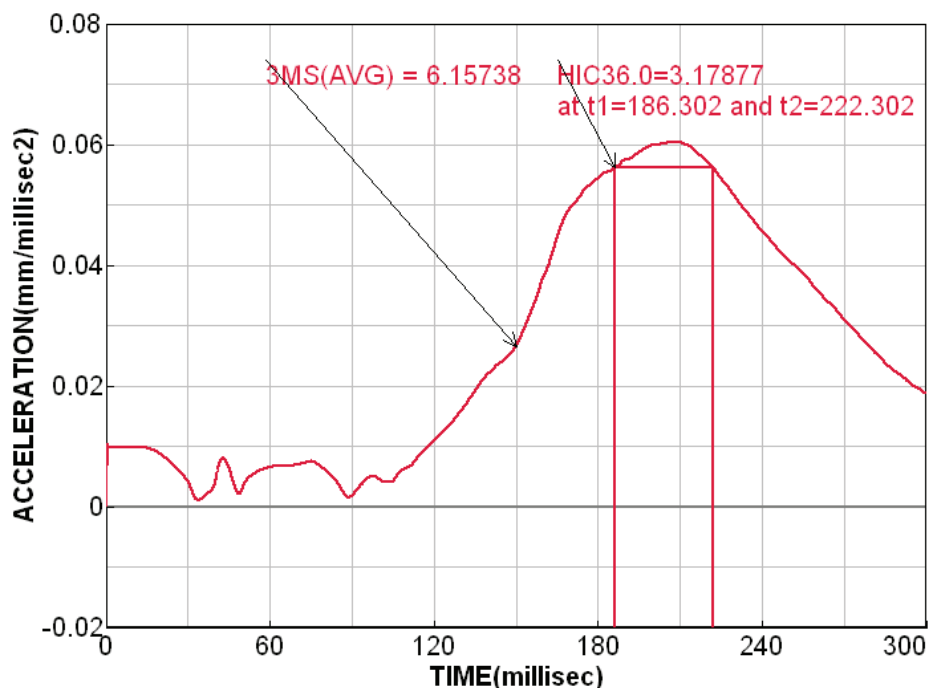
## 20.5 Kolize při zpomalení v protisměru jízdy v tramvajovém vozidle

Při zatížení zpomalením v protisměru jízdy nebo u sedadla otočeného do protisměru jízdy vzniká nebezpečí poranění krku. Typickým případem je poranění typu whiplash (viz odst. 7), které bývá nejčastěji způsobeno nevhodnou konstrukcí opěrky hlavy u silničních vozidel. Na obrázku č. 72 jsou znázorněny trajektorie pohybu hlavy při zpomalení vozidla působícím v protisměru jeho pohybu.



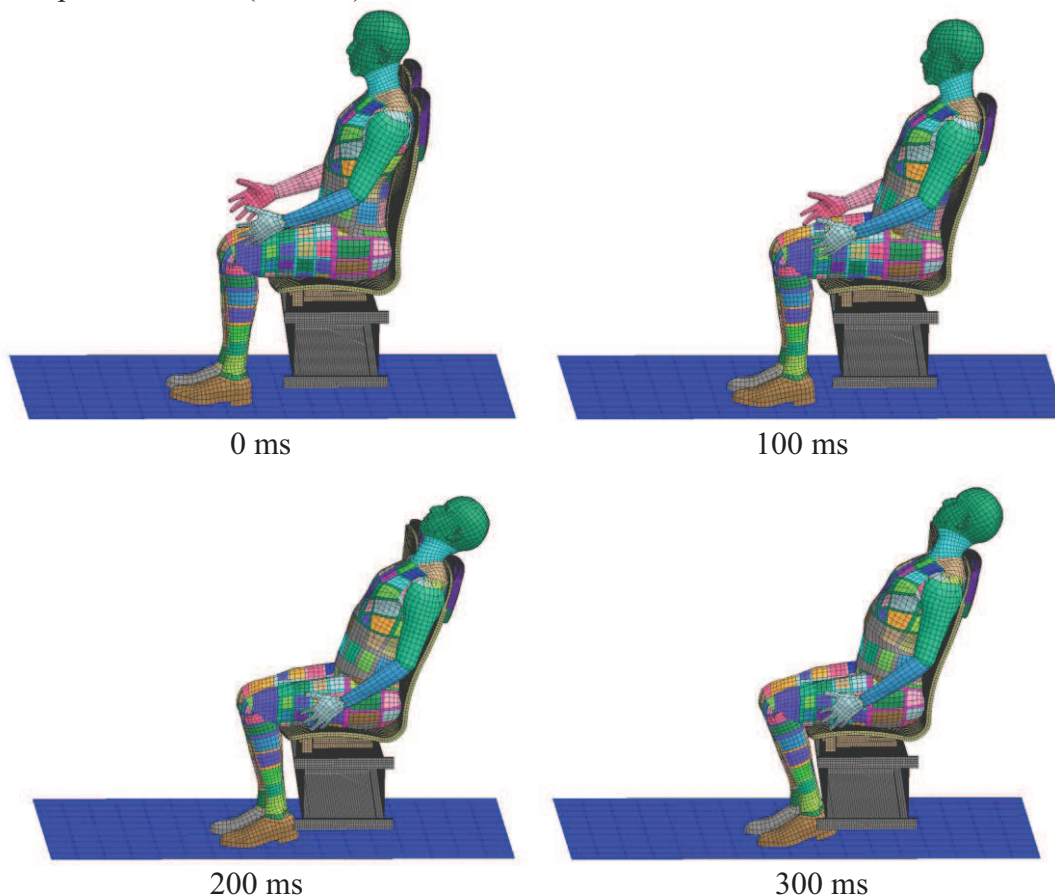
Obr. 72 Účinek zadního nárazu

Vyhodnocení kritérií poranění hlavy dokazuje, že tento kolizní scénář nepředstavuje nebezpečí poranění hlavy. Kritéria poranění hlavy ( $HIC=3,18$ ;  $3MS=6,16$ ) leží hluboko pod limitem poranění. Pro bezkontaktní případ zatížení bylo zvoleno kritérium  $HIC36$  (Obr. 73).



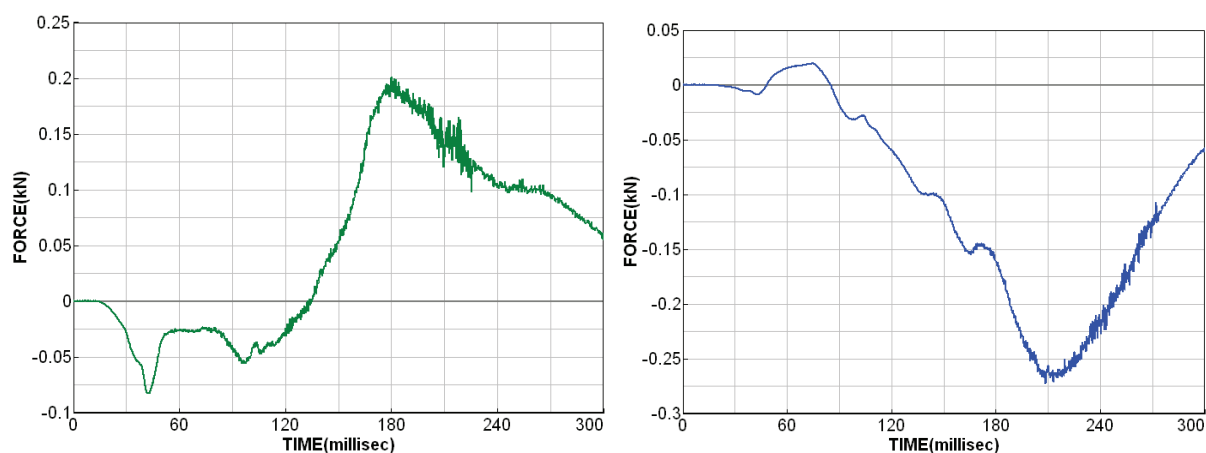
Obr. 73 Vyhodnocení zrychlení hlavy a kritéria poranění hlavy HIC – zadní náraz

Kinematika kolize cestujícího je dobře patrná z rozfázovaného pohybu. Zde je vidět namáhání krku i průhyb sedadla. Lze předpokládat, že průhyb sedadla sníží nebezpečí whiplash poranění krku (Obr. 74).



Obr. 74 Rozfázovaný průběh kolize cestujícího v čase do 300 ms

Klíčovým úkolem je vyhodnocení možnosti poranění krku. Z Obr. 75 je zřejmé, že síly v krku nepřekročí hodnoty kritéria NIC. Lze tedy předpokládat, že v tomto případě zatížení je malá pravděpodobnost poranění krku na rozdíl od předchozího případu (odst. 20.4).



Obr. 75 Síly v krku v oblasti C1, vlevo: tahová síla, vpravo: smykková síla

## 20.6 Návrh úpravy prvku sedadla

Úprava sedadla pro zvýšení bezpečnosti a zabránění závažným poraněním v tramvaji by měla vycházet z nejvážnějších poranění. Lze jednoznačně říci, že nejvážnějším poraněním je poranění krku při nárazu hlavy na protější sedadlo v důsledku zpomalení. Toto poranění krku je způsobeno nárazem dolní části hlavy. Zmírnění zrychlení hlavy prostřednictvím změkčení imputované části (opěradla) zde není možné. Požadavek na nižší tuhost opěradla koliduje s požadavkem na odolnost proti vandalským silám. Polstrování, které by dostatečně změkčilo opěradlo při nárazu brady, by bylo příliš objemné. Nejlepším řešením je tedy upravit prvek interiéru tak, aby nedocházelo ke kontaktu spodní části hlavy s opěradlem. Zde přichází v úvahu zvýšení nebo snížení sedadla (Obr. 76).

Snížení sedadla o cca 170 mm by zajistilo kontakt s hrudníkem, čímž by byla ochráněna celá hlava, a tedy by nedošlo ani k nárazu brady. Náraz hrudníku do poměrně poddajného sedadla by mohl být poměrně elegantním řešením. Tato varianta však může způsobit zhoršení poranění typu whiplash při pohybu hlavy směrem dozadu.

Zvýšení sedadla by bylo z pohledu bezpečnosti vhodnější. Při nárazu horní částí hlavy by došlo k eliminaci poranění obličejové části a v souvislosti s tím ke zmírnění pravděpodobnosti poranění krku. Zároveň by zvýšená opěrka působila jako opora zad i hlavy při zpětném pohybu hlavy. Tím by bylo zmírněno i nebezpečí poranění typu whiplash. Je však třeba poznamenat, že tato varianta je konstrukčně náročnější, protože zvýšení sedadla sebou nese zvýšené nároky na jeho pevnost. Při stávajícím uspořádání dosahuje napětí v sedadle hodnoty 0,02 GPa.



Obr. 76 Možné úpravy sedadla

## 20.7 Závěrečné vyhodnocení kolize cestujícího v tramvajovém vozidle

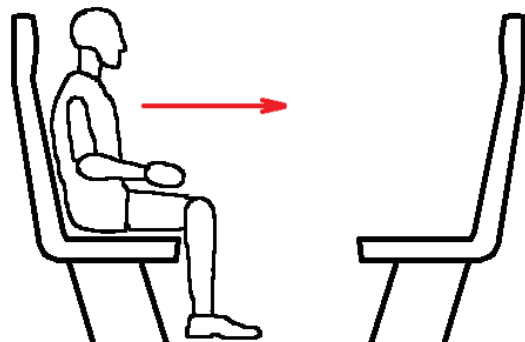
Vyhodnocení shrnuje účinky nárazu hlavy na prvek interiéru tramvajového vozidla. Protože významnou roli při vyhodnocování poranění při nárazu na interiérový prvek hraje kinematika pohybu celého těla i poddajnost sedadla, je vytvořen model části interiéru. Z provedených simulací je patrné, že pravděpodobnost vzniku závažných poranění je poměrně nižší. Nejhorším možným následkem nárazu je nebezpečí poranění obličejové části, které je však zároveň velmi obtížně vyhodnotitelné. Pro zvýšení bezpečnosti cestujících v tramvaji by bylo vhodné provést zvýšení opěradla, tak aby při případné nehodě nedošlo ke kontaktu s dolní částí hlavy cestujícího.

## 21 Kolize v železničním vozidle

### 21.1 Kolizní scénáře

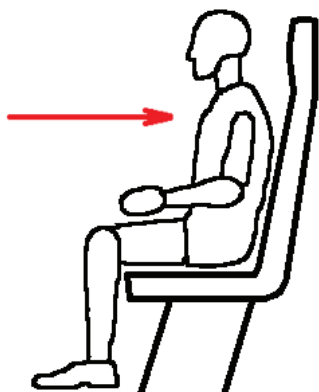
Při simulaci kolize v železničním vozidle se vychází z předpokladu zrychlení působícího v protisměru pohybu vozidla. Lze předpokládat, že konstrukce vozidel budou nadále navrhovány v souladu s ČSN EN 15227 [ČSN EN 15227]. Tato norma zvažuje nejčastější typy kolizí. Jsou zde předepsány požadavky na omezení zrychlení v interiéru a zachování prostoru pro přežití cestujících při těchto kolizích. Zároveň norma zahrnuje snahu zabránit šplhání vozidel a vykolejení. Je tedy zřejmé, že nejčastější průběh kolize je podélné působení zrychlení v protisměru jízdy, případně ve směru jízdy při nárazu jiného vozidla zezadu. Urychlující puls prvních dvou kolizních scénářů se drží doporučených koridorů (viz [HARDY 2003]) a je předepsán dle Obr. 30.

V prvním kolizním scénáři sedí cestující ve směru jízdy a je působícím zrychlením vržen proti neobsazenému sedadlu. Kolize probíhá v interiéru motorového vozu, kde je použito výhradně sezení cestujících čelem k sobě (Obr. 77).



Obr. 77 Kolizní scénář s cestujícím sedícím ve směru zrychlení v železničním vozidle

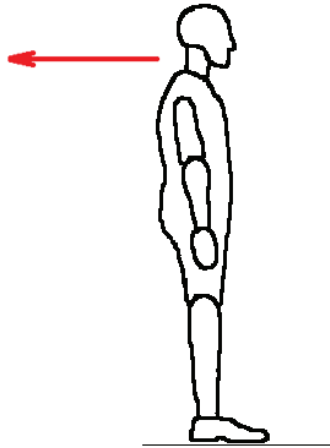
Dalším kolizním scénářem, který je simulován, je cestující sedící zády do směru zrychlení (Obr. 78). Je uvažován stejný typ železničního vozidla jako v předchozím případě, tudíž lze říci, že zády do směru zrychlení sedí vždy polovina cestujících (při plném obsazení vozidla).



Obr. 78 Kolizní scénář s cestujícím sedícím v protisměru zrychlení v železničním vozidle

Poslední kolize se týká stojícího cestujícího. Na rozdíl od silničních vozidel nebo letadel je v kolejovém vozidle výskyt stojícího cestujícího poměrně běžný. Následky nehody v případě dopravní nehody jsou pro stojícího cestujícího zpravidla fatální. Při kolizním zrychlení tělo cestujícího urazí poměrně velkou dráhu (jednoduchým výpočtem lze

odhadnout, že v čase 1 s při zrychlení 5g je to cca 25 m). Tento děj je tedy obtížně determinovatelný. Navíc poranění bude přímo úměrné délce volného prostoru ve směru zrychlení, která může být různá. Proto je vhodnější simulace stojícího cestujícího při nouzovém brzdění železničního vozidla. Navíc samotný nekontrolovaný pád je spojen s rizikem poranění hlavy. Zrychlení uvažované v tomto kolizním scénáři je  $2 \text{ m/s}^2$ . Zrychlení působí v opačném směru vzhledem k pozici cestujícího (Obr. 79), neboť je zřejmé, že právě takový druh pádu lze nejhůře kontrolovat.

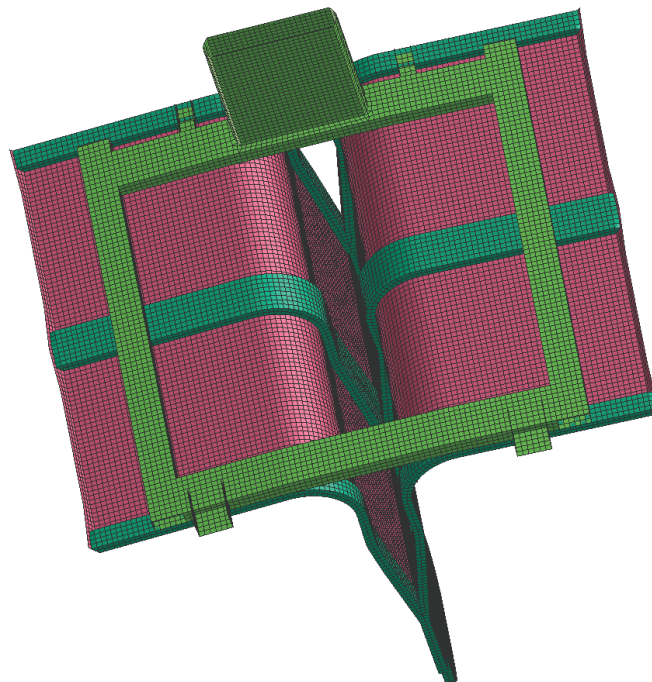


Obr. 79 Kolizní scénář se stojícím cestujícím v železničním vozidle

## 21.2 Popis modelu interiéru železničního vozidla

### 21.2.1 Ocelová konstrukce sedadla

Ocelová konstrukce sedadla se skládá ze spodního rámu (přípevněného k podlaze), z tvarovaných profilů a z plechu, který podpírá pěnové části. Na obrázku 80 je vidět celá konstrukce sedadla s barevným odlišením jednotlivých částí.



Obr. 80 Ocelová konstrukce sedadla

Výhradním materiálem všech ocelových částí je moderní vysokopevnostní ocel DOCOL 1200. Materiál je uvažován jako elastoplastický (typ 103) pro 2D plošné prvky. Materiál je definován prostřednictvím koeficientů E a  $\nu$  viz Tab. 12. Ostatní parametry jsou definovány shodně dle této tabulky. Porušení materiálu je definováno u plošných prvků po překročení meze pevnosti maximální plastickou deformací (EPSImax).

Tab. 12 Vlastnosti uvažovaných materiálů

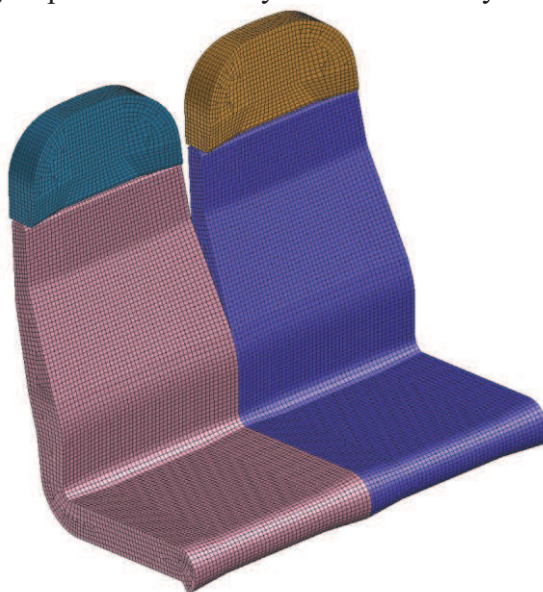
E [GPa]	$\nu$ [-]	$\rho$ [kg/mm <sup>3</sup> ]	EPSImax[-]
200	0,26	7,85e-6	0,03

Plastické chování materiálu je definováno dle hodnot dohledaných v literatuře [RYDLO]. Zpevnění materiálu je řešeno prostřednictvím zjednodušeného modelu Johnson-Cook (21.2.1.1) kde  $\sigma_n$  je skutečné napětí zahrnující chování materiálu při vyšší rychlosti zatěžování,  $\sigma_y$  je skutečné napětí nezahrnující chování materiálu při vyšší rychlosti zatěžování,  $\dot{\epsilon}$  je rychlost poměrné deformace, p a D jsou koeficienty, jejichž význam lze odvodit z komplexního popisu materiálového modelu Johnson-Cook. Tento způsob definice zpevnění materiálu je implementován v použitém materiálovém modelu. Hodnota konstant byla stanovena tak, aby chování materiálu odpovídalo výsledkům materiálových zkoušek v literatuře [RYDLO].

$$\sigma_n = \sigma_y \left[ 1 + \frac{1}{p} \ln \left( \max \left( \frac{\dot{\epsilon}}{D}, 1 \right) \right) \right] \quad (21.2.1.1)$$

### 21.2.2 Pěnové a čalouněné části

Čalouněné části sedadla jsou vyrobené z materiálu Elastoflex W 5662 a potahové látky Holdsworth BHLH 31634. Chování reálného materiálu je věnována kapitola 21.3 „Experimentální ověření mechanických vlastností polyuretanové pěny“. Síť je vytvořena prostřednictvím objemových prvků s osmi uzly a velikostí hrany 10 mm (Obr. 81).

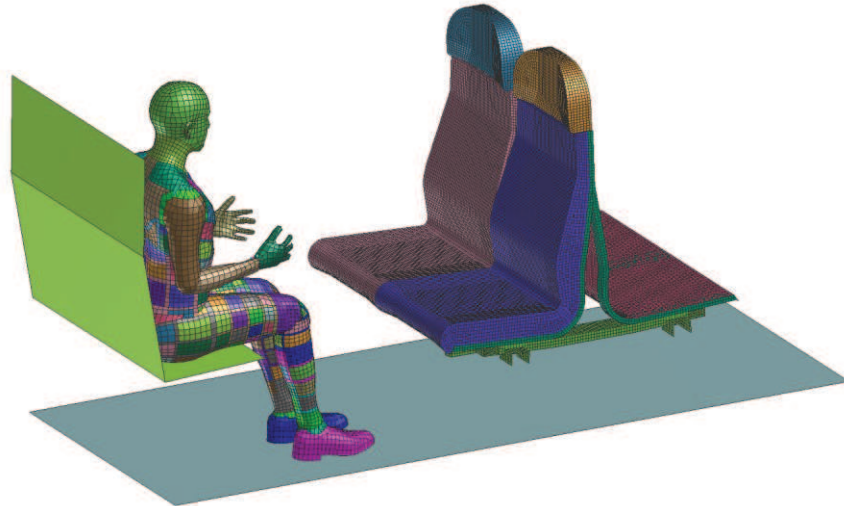


Obr. 81 Kolizní scénář se stojícím cestujícím v železničním vozidle

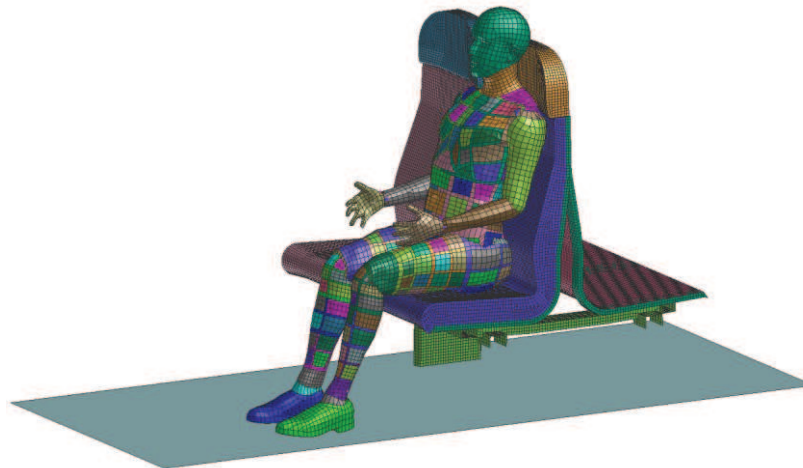


### 21.2.3 Kompletní model

Vytvořený model sedadla slouží pro simulaci kolizního scénáře s cestujícím sedícím ve směru zrychlení (Obr. 82). Podlaha a protější sedadla jsou vytvořeny jako tuhá tělesa. Samotné sedadlo s tuhou podlahou je použito pro simulaci kolizního scénáře s cestujícím sedícím v protisměru zrychlení (Obr. 83).



Obr. 82 Kolizní scénář v interiéru železničního vozidla s cestujícím sedícím ve směru zrychlení



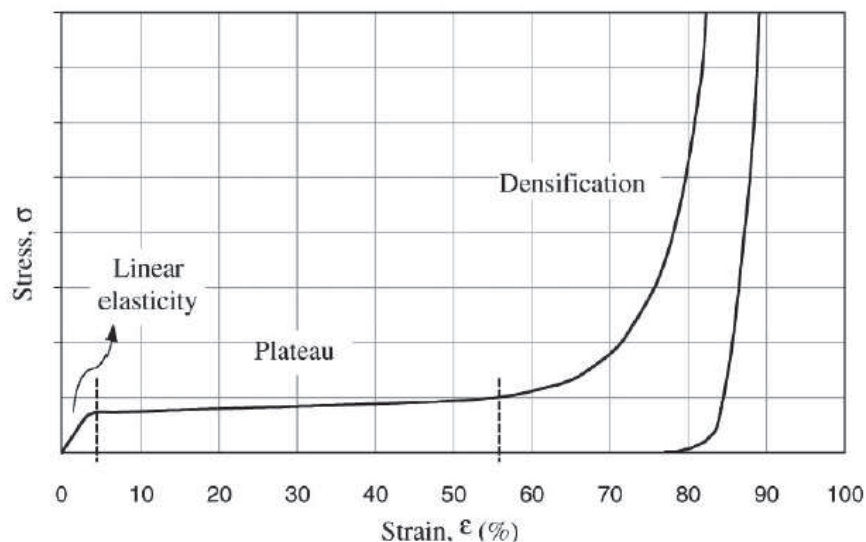
Obr. 83 Kolizní scénář v interiéru železničního vozidla s cestujícím sedícím v protisměru zrychlení

## 21.3 Experimentální ověření mechanických vlastností polyuretanové pěny

Ve výpočtovém modelu sedadel je u čalouněné části sedadel uvažován pěnový materiál typu 45. Při kolizi železničního vozidla, kdy cestující narazí hlavou do protějšího sedadla, hrají mechanické vlastnosti tohoto materiálu významnou roli. Tyto vlastnosti jsou však pro konkrétní materiál obtížně zjistitelné. Polstrování sedadel je vyrobeno s použitím polyuretanových výplní z materiálu Elastoflex W 5662 a potahové látky Holdsworth BHLH 31634.

Mechanické vlastnosti polymerových pěn při pokojových teplotách byly experimentálně hodnoceny při statickém zatížení i při nárazu. Výsledky experimentů jsou dostupné v literatuře [AVALLE] a [PAULINO]. Pěna je zde považována za významný prvek interiéru, který může ochránit cestující před agresivními zpomaleními absorbováním energie postupným a kontrolovaným způsobem. Veškeré výzkumy v této oblasti se zaměřují především na možnosti kontrolovaného pohlcování energie. Optimální materiál schopný

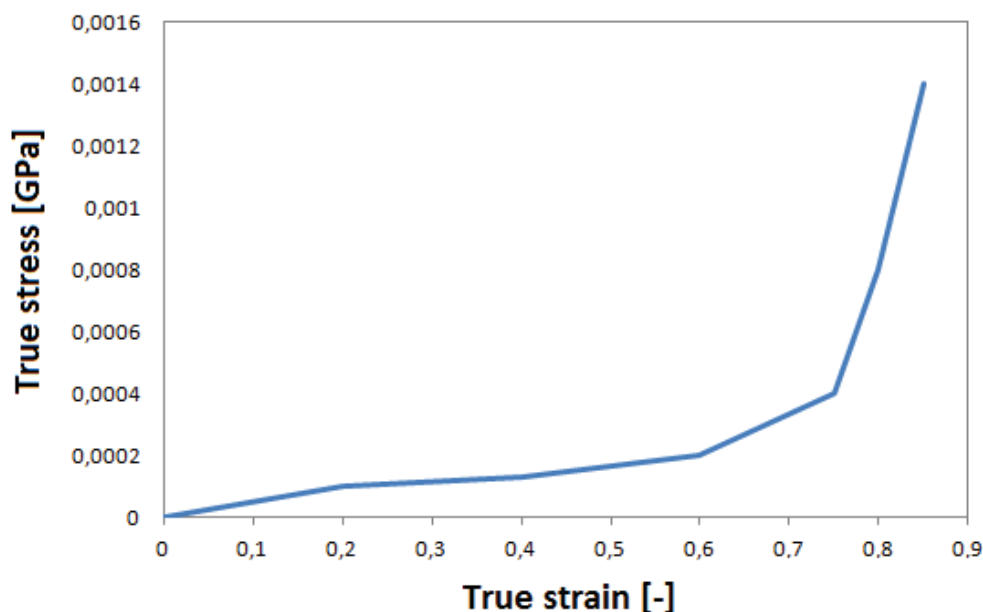
absorbovat energii musí pohltit kinetickou energii nárazu, a zároveň udržet sílu pod určitým limitem. Energie je absorbována prostřednictvím buněčného ohýbání, vzpěru nebo prasknutí. Křivka závislosti napětí na deformaci se obecně omezuje na dlouhou horizontální část s následným prudkým růstem (Obr. 84). Toto chování vysvětluje vysokou energetickou účinnost, které lze dosáhnout pomocí pěnových materiálů. Pěnový vzorek navíc za stejného množství absorbované energie vždy poskytuje nižší zpomalení při maximální kompresní síle, než odpovídající vzorek z pevného materiálu se stejným objemem, vyrobený z materiálu, ze kterého je vyrobena pěna.



Obr. 84 Typická závislost napětí a poměrné deformace pěny (PUR, kvazistatika)

Pěnové materiály se chovají lineárně na poměrně krátkém úseku do cca 5% poměrné deformace. Zde sklon křivky odpovídá modulu pružnosti pro daný materiál. Jak se zvyšuje zatížení pěny, buňky se začínají hroutit elastickým vzpěrem, plastickou poddajností nebo křehkým drcením v závislosti na mechanických vlastnostech daného vzorku. Kolaps pokračuje za přibližně konstantního napětí, dokud hranice jednotlivých buněk nejsou stlačeny k sobě. Pak dochází k prudkému nárůstu napětí vlivem zhuštění materiálu. Později ve fázi odlehčení napětí klesá nelineárně. Pohlcená energie je zde jako obvykle reprezentována plochou pod křivkou grafu.

Při simulaci nárazu cestujícího do polstrované části sedadla je vždy rozhodující první náraz. Zde se rozhodne o možných poraněních, zatímco další nárazy mají nižší intenzitu a nezpůsobují tak závažná poranění. Vlivem nárazu působí na části těla zpomalení, jehož velikost závisí na tuhosti materiálu sedadla. Proto je nejdůležitější definovat pro pěnový materiál modul pružnosti a závislost skutečného napětí při stlačení na skutečné poměrné deformaci. Tato křivka je obvykle definována jako rostoucí funkce s tím, že odlehčení je zadáno zvlášť prostřednictvím parametru zohledňujícího disipaci energie. Pro simulace byl využit materiálový model typu 45 (General nonlinear strainrate dependent foam with optional energy absorption)[ESI-VPS]. Potřebné materiálové parametry pro PUR pěnu jsou dohledatelné v literatuře [ESI-LS]. Na obrázku 85 je použita závislost skutečného napětí na skutečné deformaci.

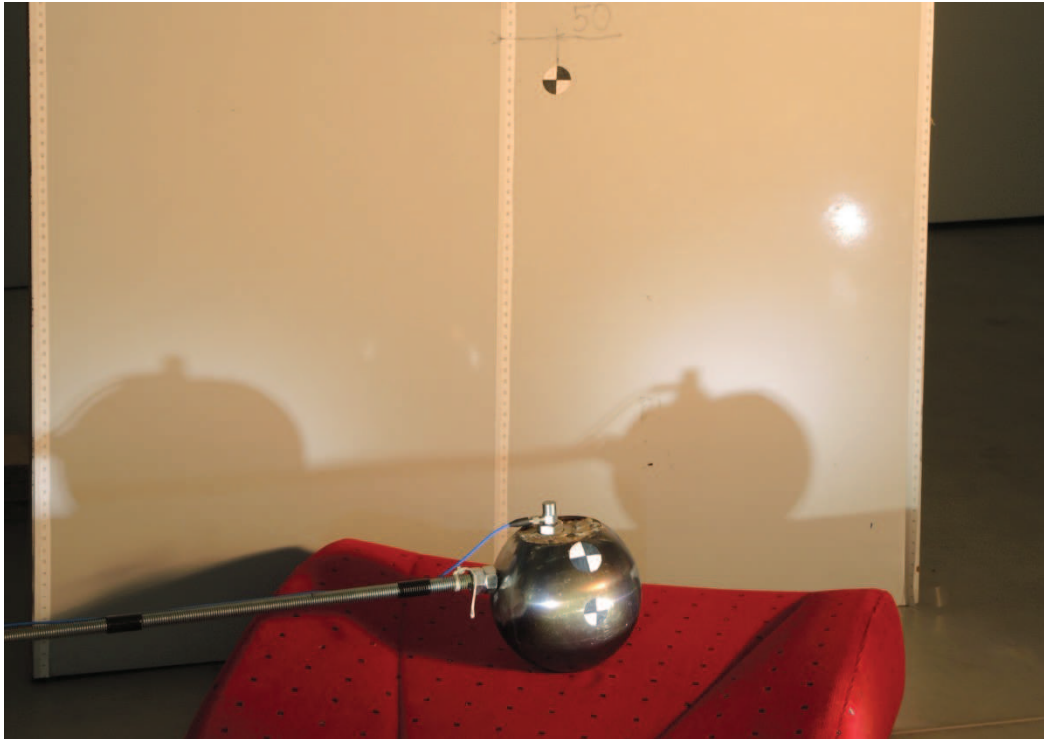


Obr. 85 Použitá závislost napětí a poměrné deformace pěny (PUR)

Zásadní otázkou je, zda materiál z literatury odpovídá chování konkrétního materiálu sedadla. U reálného sedadla se navíc mohou promítnout další vlivy, jako například vliv předeprnutí pěny. Ačkoliv lze předpokládat, že tloušťka vrstvy potahové látky je zanedbatelná, je zřejmé, že potahová látka způsobí jisté předeprnutí výplně. Díky tomu mechanické vlastnosti sedáku nikdy neodpovídají zcela přesně vlastnostem samotné výplně. Je zřejmé, že provedení zkoušky tahem zde není možné. Pěnové materiály jsou obvykle zkoušeny při zatížení tlakem, nicméně takový test molitanového sedadla standardním zkušebním strojem je velmi komplikovaný a obtížně proveditelný pro vyšší rychlosti zatěžování. Vzhledem ke skutečnosti, že přibližná materiálová data jsou již známá, jeví se jako nejvhodnější provedení jednoduchého experimentu pro ověření správné definice materiálu.

### 21.3.1 Návrh a popis experimentu

Jednoduchý experiment má za úkol ověřit chování skutečného materiálu při podmínkách (zatěžovacím modu, rychlosti zatěžování, atd.), které se budou co nejvíce blížit konkrétní simulované situaci. Obecně platí, že nejvhodnější je vždy ověřit výsledky výpočtu experimentem. Při různých kolizních scénářích jsou v kontaktu se sedadlem různé části těla, za nejvýznamnější je bezesporu považován náraz hlavy. Experiment sloužící k ověření chování materiálu by měl tedy vycházet z tohoto scénáře. Ideálním experimentem z pohledu ověření výpočtu by byl náraz hlavy do sedadla. Pokud výsledky mají sloužit i pro validaci pěnového materiálu, bez ohledu na náklady je zde však problém s velkým množstvím neznámých a obtížně ověřitelných parametrů. Výsledky by byly ovlivněny tuhostí sedadla, vlastnostmi materiálu tělesa hlavy, jejími geometrickými, hmotnostními a tuhostními parametry. Pro získání relevantních dat pro validaci pěnového materiálu je tedy vhodné upravit provedení experimentu jako náraz tuhé koule do pěnového materiálu, umístěného na tuhé podložce. Nejjednodušším způsobem provedení by byl pád samotné koule na čalouněnou část sedadla. Je zde však neúnosně velké riziko pádu koule mimo sedák (např. po odrazu), což by mohlo mít za následek poranění nebo poškození měřicí aparatury. Nejjednodušší způsob vedení je použití otočného ramene. Jedná se tak o kyvadlo, kdy kulový impaktor dopadá na stále stejné místo. Díky tomu je možné velmi jednoduše posoudit energetické ztráty při nárazu. Navíc díky rameni lze zajistit snadný přenos dat z impaktoru do záznamového zařízení. Náhled navrženého experimentu je uveden na Obr. 86.



Obr. 86 Navržené provedení experimentu

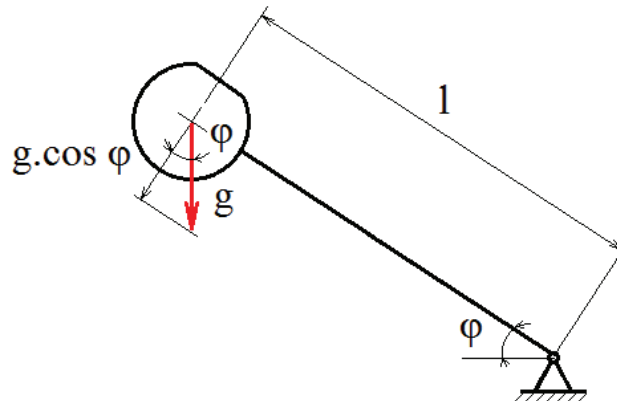
Pro experiment je použito ocelové koule s pláštěm o tloušťce 3 mm, která je vyplněna betonem pro získání vyšší hmotnosti. Koule obsahuje uvnitř dutinu se závitem, do kterého je zašroubovaná závitová tyč tvořící otočné rameno. Na opačném konci je závitová tyč připevněna pomocí rotační vazby k pevné podložce. Výška podložky je právě taková, aby se koule při vodorovné poloze ramene začínala dotýkat validovaného materiálu. Lze předpokládat, že do této polohy je možné řešit pád analyticky a od této polohy pak MKP výpočtem.

Zrychlení koule je měřeno akcelerometrem model PCB 352C33 S/N 120471. Akcelerometr je připevněn pomocí magnetu. Jedná se o dynamický akcelerometr, který je vhodný pro měření zrychlení rychle se měnících v čase. Akcelerometr je připojen k počítači prostřednictvím měřicího modulu „Highspeed USB carrier NI9234“. A pro záznam naměřených dat je použit program „Signal expres 2011“. Pro snímání zpomaleného videa je použita vysokorychlostní kamera. Měření je provedeno pomocí vysokorychlostní kamery „Olympus ispeed2“ [ATG]. Záznam je proveden rychlostí 500 fps při rozlišení 800x600. Pro osvětlení byl použit 2x halogen 1500W. Záběry z vysokorychlostní kamery jsou vyhodnocovány programem „Ispeed2 Advanced PC“. Pro účely validace materiálu je nejdůležitější ověření rychlosti v čase nárazu impaktoru. Tím je možné prokázat, že se skutečně jedná o volný pád s možností zanedbání tření v otočné vazbě, odporu vzduchu atd. Nicméně vysokorychlostní kamera dokáže zaznamenat změnu polohy sledovaného bodu v čase. Lze tedy vyhodnotit polohu, resp. rychlost impaktoru po celou dobu děje.

Zrychlení koule je odměřováno pomocí akcelerometru, umístěného ve středu kulové plochy. Důležité je zde pevné spojení akcelerometru s hmotou impaktoru, které je realizováno prostřednictvím ocelového oka zalitého do betonu. Okamžitá poloha koule je odměřována vysokorychlostní kamerou. Pro tento účel je koule vybavena dvěma odměřovacími body a na bílém pozadí je statický bod se známou polohou.

Pokud se předpokládá působení pouze gravitačního zrychlení na impaktor, je možné stanovit rychlost nárazu impaktoru analyticky. V podstatě se zde jedná o zvláštní případ

kyvadla. Na rameni o délce  $l = 910$  mm a hmotnosti  $0,6$  kg je umístěn impaktor s hmotností  $m = 2,4$  kg. Poloměr kulového impaktoru je  $60$  mm a rameno je vždy vychýleno o úhel  $\varphi$  od vodorovné polohy, viz. Obr. 87.



Obr. 87 Navržené provedení experimentu

Při řešení matematického kyvadla jsou vždy zavedena některá zjednodušení. Nejproblémovější se jeví uvažování malé výchylky kyvadla, pro kterou platí vztah 21.3.1.1 kde  $\varphi$  je výchylka kyvadla.

$$\sin \varphi \cong \varphi \quad (21.3.1.1)$$

Je tedy nutné uvažovat pohybovou rovnici reálného kyvadla 21.3.1.2, neboť uvažovaná výchylka je značná. Pro řešení této pohybové rovnice je třeba využít eliptického integrálu prvního druhu. Rovnice 21.3.1.2, kde  $g$  je gravitační zrychlení,  $l$  je délka ramene kyvadla a  $\varphi$  je výchylka ramene.

$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \sin \varphi = 0 \quad (21.3.1.2)$$

Je důležité si uvědomit, že cílem analytického výpočtu je pouze získání rychlosti. Proto není nutné hledat celé řešení obecné rovnice kyvadla ve tvaru vhodném i pro uvažování velkých výchylek 21.3.1.2. Místo toho lze velmi jednoduše sestavit diferenciální rovnici pro konkrétní případ z definice tečného zrychlení  $a_T$  úhlového zrychlení  $\ddot{\varphi}$  a pohybové rovnice rotačního pohybu s vyloučením času 21.3.1.3.

$$a_T = g \cdot \cos \varphi \quad \ddot{\varphi} = \frac{a_T}{l} \quad \ddot{\varphi} = \frac{d\omega^2}{2d\varphi} \quad (21.3.1.3)$$

Sestavení vztahů a naznačení řešení jednoduché diferenciální rovnice je 21.3.1.4.

$$\int_0^\varphi \frac{g}{l} \cos \varphi \cdot 2d\varphi = \int_0^{\omega^2} d\omega^2 \quad (21.3.1.4)$$

Pokud bude řešena výsledná rychlost  $v$  v čase, kdy  $\varphi = 0$ , je možné uvažovat zjednodušení, kdy svíslá rychlost odpovídá tečné rychlosti, neboť  $\cos \varphi = 1$ , a tedy platí jednoduše 21.3.1.5.

$$v = \omega \cdot l \quad (21.3.1.5)$$

Výsledná rychlost  $v$  při nárazu impaktoru je dána vztahem 21.3.1.6.

$$v = \sqrt{2glsin\varphi} \quad (21.3.1.6)$$

### 21.3.2 Průběh experimentu

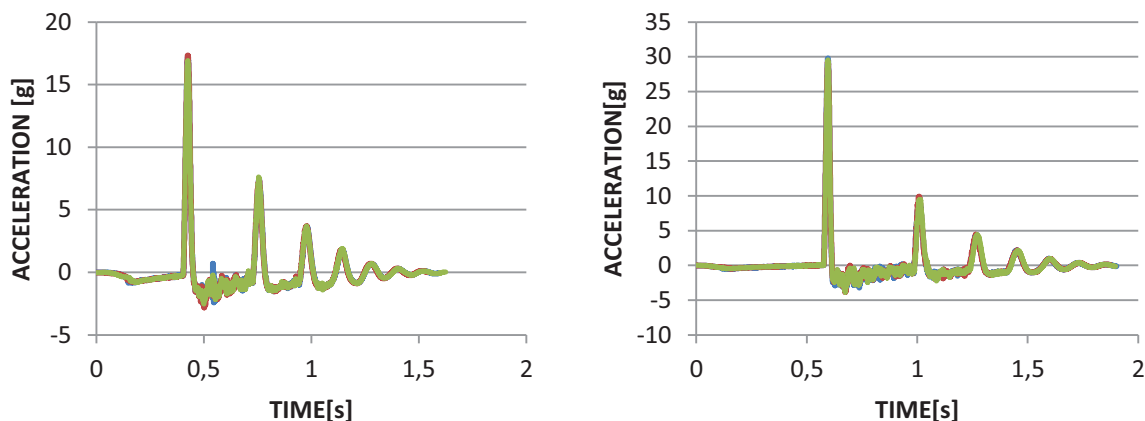
Při experimentu je vždy kulový impaktor vyzvednut do předem stanovené výšky. K naprosto přesnému určení této výšky pro všechna opakování experimentu je použit laserový dálkoměr. Na bílém pozadí, vhodném pro snímání vysokorychlostní kamery jsou připevněny metry ve vertikální i horizontální poloze. Metr ve vertikální poloze udává vzdálenost od podlahy a po odečtení výšky testovaného dílu je získána výška volného pádu impaktoru. Testovaný díl z pěnového materiálu s výškou 90 mm v místě nárazu impaktoru je odmontován od sedadla a ustaven na tuhé betonové podlaze. Pomocí laserového dálkoměru je vytvořen bod ve stanovené výšce připravené stupnice. Koule je vždy vyzvednuta tak, aby laserový bod osvětloval střed značky umístěné v těžišti impaktoru.

Protože čas záznamu vysokorychlostní kamery je omezený, je nutné dosáhnout alespoň malé synchronizace, kdy osoba, která uvolňuje impaktor dává ostatním pokyn pro započítání měření odpočítáním. Při rychlosti děje, která je relativně malá, tak není nutné použít automatických snímačů, což by významně zvýšilo náročnost experimentu. Určitý vliv na průběh volného pádu má vždy provedení uvolnění. U profesionálně synchronizovaných experimentů je nejčastěji používán elektromagnetický spoj. Dříve používaná metoda spočívá v přestřižení provázku, které může být provedeno nůžkami, pokud nezáleží na přesném čase přestřižení. Častěji se však jedná o elektricky ovládané stříhací zařízení. Při prováděném experimentu bylo upuštěno od jednoduchého přestřižení provázku nůžkami, neboť je poměrně náročné spolehlivě a rychle přestříhnout provázek, který musí být dostatečně pevný, aby unesl impaktor. Nicméně rameno kyvadla je vždy drženo za provázek tak, aby upuštění bylo provedeno vždy stejně. Je nutné poznamenat, že ačkoliv tato metoda neměla vliv na výsledný celkový pohyb, je možné v záznamu akcelerometru i vysokorychlostní kamery zaznamenat přechod ze stavu statické rovnováhy, který je neostrý. Určitě si lze představit, že při náročnějším experimentu by již konstrukce jednoduchého stříhacího mechanismu byla velmi žádoucí.

Každé měření bylo vždy třikrát opakováno při stejné výšce, aby mohla být vyloučena chyba měření. Impaktor byl spouštěn nejprve z menší výšky 500 mm, a pak z výšky 880 mm. Bohužel další zvětšení počáteční výšky impaktoru nebylo možné, neboť se měřené hodnoty blížily k měřitelnému limitu akcelerometru (50g). Při použití vysokorychlostní kamery by rovněž bylo možné udělit impaktoru počáteční rychlost silou obsluhy, a výrazně tak navýšit dopadovou rychlost. Vzhledem k limitu akcelerometru to však nebylo možné.

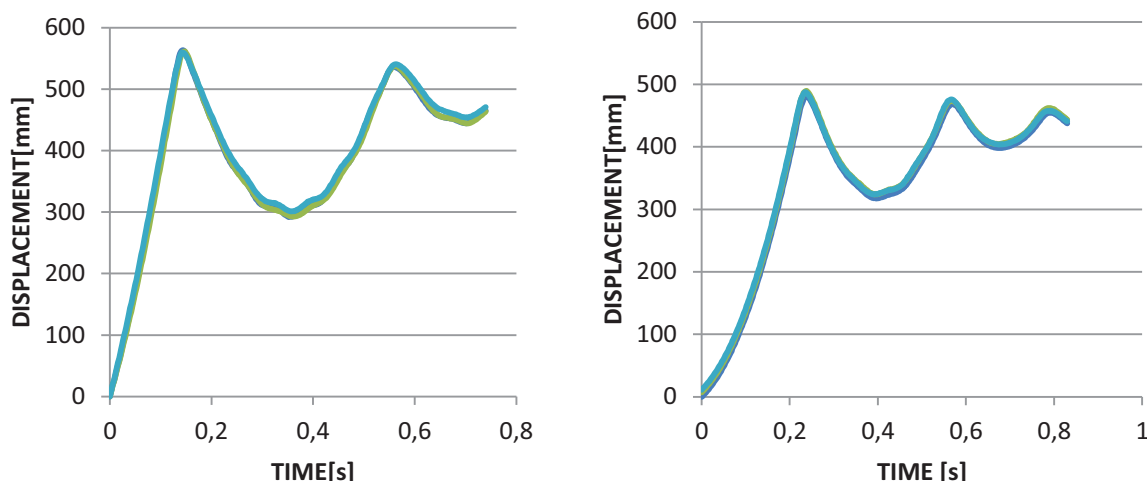
### 21.3.3 Výsledky experimentu

Porovnáním tří výsledků získaných při stejné počáteční výšce impaktoru lze posoudit přesnost měření a vyloučit náhodné vlivy, které by mohly výsledky znehodnotit. Porovnání výsledných zrychlení z akcelerometru je na Obr. 88.



Obr. 88 Porovnání tří měřených zrychlení z akcelerometru, vlevo: počáteční výška 500 mm  
vpravo: počáteční výška 880 mm

Z grafů je patrné, že opakovaná měření vykazovala vždy dobrou shodu pro obě počáteční výšky impaktoru. Stejným způsobem lze vyhodnotit výsledky z vysokorychlostní kamery (Obr. 89). I zde je dosaženo dostatečné shody opakovaných měření.



Obr. 89 Porovnání tří měřených posunutí impaktoru ve svislém směru měřených vysokorychlostní kamerou vlevo: počáteční výška 500 mm, vpravo: počáteční výška 880 mm

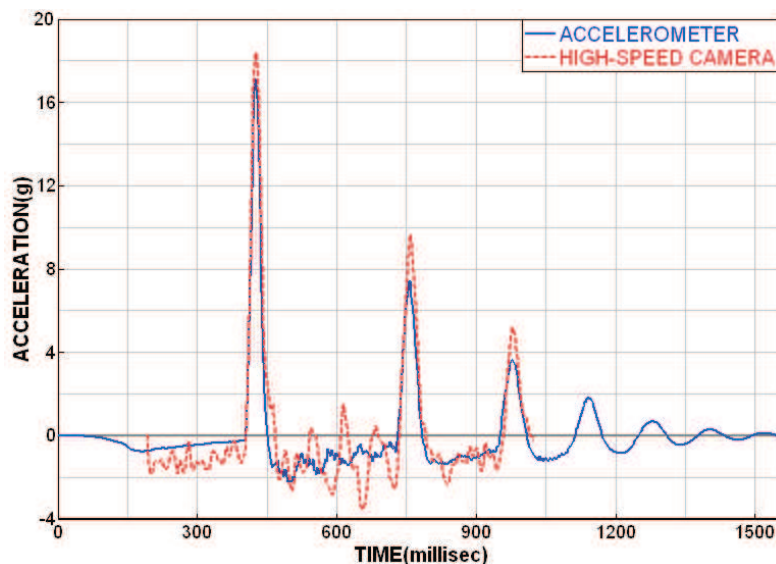
Z grafů na Obr. 88 a Obr. 89 je zřejmé, že naměřená data vykazovala velmi dobrou shodu při všech třech opakováních. Proto není nutné používat statisticky složitý postup pro získání vstupních dat k validaci pěnového materiálu. Pro validaci materiálu byla vždy použita křivka vytvořená zprůměrováním tří měření.

Pro prvotní výpočty derivací funkcí je využit SW. Excel. Zde se vychází z definice derivace, což je nejjednodušší postup numerické derivace [KOPECKÝ], který je popsán vzorcem (21.3.3.1). S výhodou je také použit SW. „Visual Viewer“, který umožňuje rovněž filtraci dat a další úpravy.

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \approx \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (21.3.3.1)$$

Je zajímavé porovnat výsledky z měření akcelerometrem a vysokorychlostní kamerou, ačkoliv to s validací materiálu nesouvisí. Protože z akcelerometru známe zrychlení

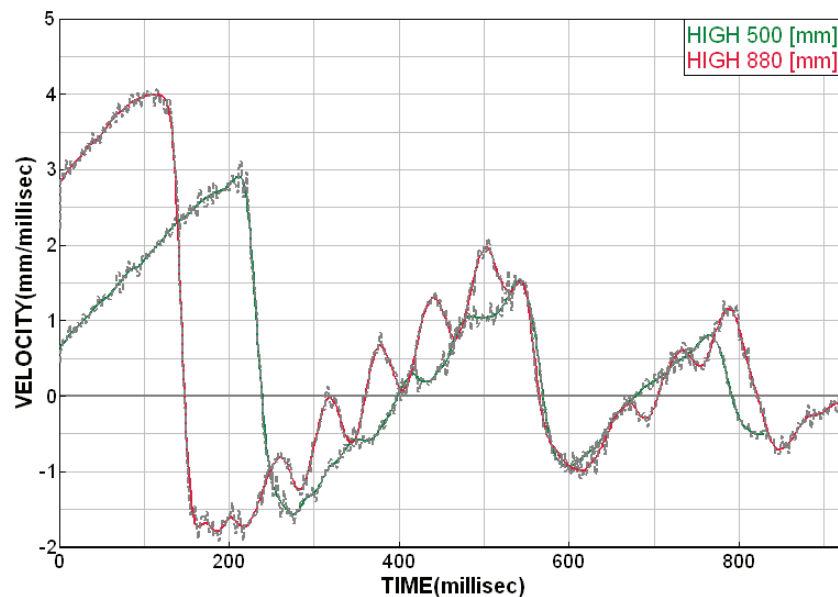
a z vysokorychlostní kamery okamžitou polohu impaktoru v čase, bude nutné výsledky upravit do porovnatelné formy. Jako nejjednodušší varianta se jeví derivace posunutí z vysokorychlostní kamery a integrování zrychlení z akcelerometru. Pokud bude uvažováno posunutí jako výslednice horizontálního a vertikálního posunutí, měl by průběh rychlosti vypočítaný ze zrychlení akcelerometru odpovídat průběhu rychlosti vypočítanému z posunutí vysokorychlostní kamery. Tento postup je však neproveditelný, neboť zrychlení měřené dynamickým akcelerometrem je mimo špičky ovlivněno postupným snižováním statického (gravitačního) zrychlení. To znamená, že rychlost volného pádu koule je zcela znehodnocena a její průběh neodpovídá průběhu rychlosti získané z vysokorychlostní kamery, ani předpokládané rychlosti volného pádu. Jedinou možností porovnání je tedy výpočet zrychlení impaktoru z měření vysokorychlostní kamery. Zrychlení lze snadno určit jako druhou derivaci posunutí impaktoru. Zde se však významně projevuje šum měřeného signálu. Vysokorychlostní kamera snímá v každém snímku polohu s určitou přesností, která souvisí se správným určením polohy sledovaného bodu. U každého snímku se dopustí malé chyby, která se významně neprojevují v celkovém trendu, ale obecně může být v jednom bodě kladná a v následujícím bodě záporná. Pokud je numericky řešena druhá derivace této funkce, dochází ke generování šumu, způsobenému těmito drobnými odchylkami. Ačkoliv tedy funkce posunutí působí velmi plynule, její druhá derivace ztrácí jakoukoliv vypovídací hodnotu kvůli šumu. Efektivním řešením je filtrování výsledků. Pro určení zrychlení však výsledky rychlokamery byly natolik nekvalitní, že bylo nutné použít nejsilnější dostupný filtr BW30 (Bandwidth). Je třeba podotknout, že běžně užívaným filtrem při vyhodnocování zrychlení je CFC1000 (Channel Frequency Class). Protože výsledné zrychlení může být ovlivněno filtrací, není možné definitivně rozhodnout o shodě obou druhů měření. Nicméně graf na Obr. 90 s filtrovanými výsledky z rychlokamery naznačuje určitou shodu obou druhů měření.



Obr. 90 Porovnání naměřených výsledků z akcelerometru (modře plnou čarou) s výsledky měření z rychlokamery (červeně přerušovanou čarou) počáteční výška 500 mm

Největším přínosem dat získaných rychlokamerou je možnost určit rychlost impaktoru v čase dopadu na pěnový materiál. Tuto rychlost je možné jednoduše odečíst z průběhu rychlosti impaktoru, který je získán první derivací průběhu posunutí (Obr. 91.) Pro vyhlazení průběhu rychlosti byla vstupní data filtrována filtrem BW30, nicméně i bez jakékoliv filtrace má derivace naměřených posunutí významný trend, a proto lze výsledek považovat za relevantní.





Obr. 91 Průběh rychlosti impaktoru při volném pádu z výšky 500 mm (zeleně) a z výšky 880 mm (červeně), šedou čárkovanou čarou jsou naznačeny průběhy bez filtrace

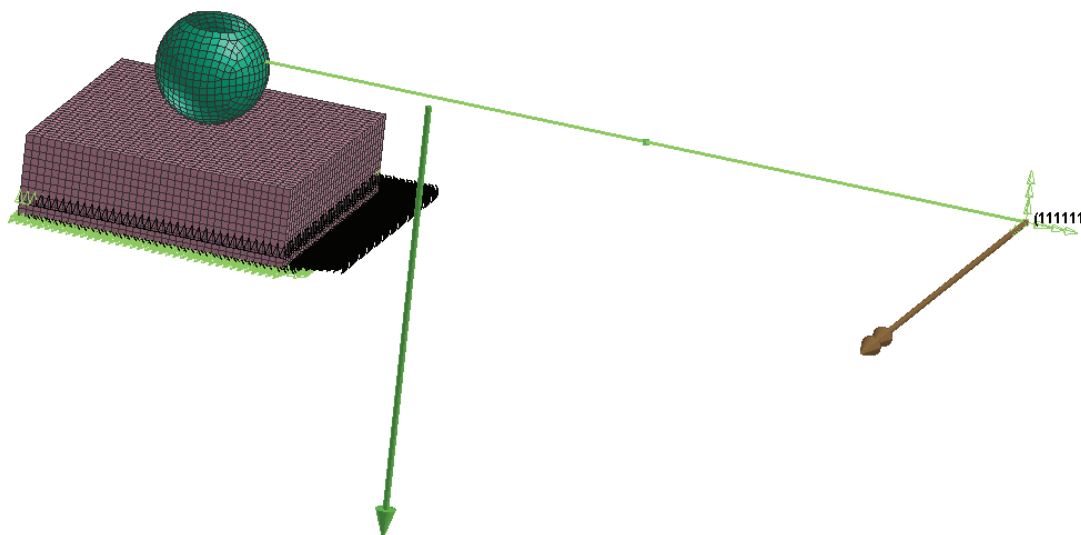
Rychlosti nárazu impaktoru odečtené z rychlokamery odpovídají rychlostem vypočteným analyticky (viz 21.3.1). Porovnání je provedeno v Tab. 13. Lze říci, že měření splňuje teoretické předpoklady a děj není významně ovlivněn jakýmkoliv nepředpokládaným vlivem. V tabulce č. 13 je rovněž uvedena rychlost nárazu určená MKP výpočtem. Použití takto náročné metody pro výpočet volného pádu se může zdát jako přehnané, jde ale o jednoduché ověření vytvořeného MKP modelu.

Tab. 13 Porovnání rychlostí nárazu získaných z měření a výpočtů

počáteční výška impaktoru [mm]	rychlost určená z měření vysokorychlostní kamerou[m/s]	rychlost určená analyticky[m/s]	rychlost určená MKP výpočtem[m/s]
500	2,9	2,83	2,8
880	4	3,93	3,9

### 21.3.4 Validace pěnového materiálu

Díky provedenému experimentu je možné posoudit, zda chování materiálového modelu odpovídá skutečnosti. Navíc je možné upravit parametry materiálového modelu tak, aby jeho chování při simulaci kolize lépe odpovídalo skutečnosti. Pro validaci pěnového materiálu byl proveden MKP výpočet, který v podstatě simuluje průběh experimentu. Je zde vytvořen model impaktoru jako tuhé těleso, které je připojeno tuhým 1D prvkem ke kinematické vazbě s jedním stupněm volnosti. Tato tuhá tělesa s hmotnostními parametry odpovídajícími experimentu reprezentují kyvadlo. Impaktor naráží do kvádru tvořeného objemovými prvky s osmi uzly. Tento jednoduchý kvádr představuje model testované součásti sedadla z pěnového materiálu. Jeho výška je jednoznačně určena (výškou modelované součásti). Horizontální velikost kvádru je zvyšována až na mez, kdy již další zvyšování rozměrů nemá vliv na výpočet. Pokud již další zvyšování těchto rozměrů nemá vliv na výpočet, není nutné modelovat celou součást. Náhled modelu použitého pro validaci je uveden na Obr. 92. Je vhodné (za účelem urychlení výpočtu) ustavit kyvadlo tak, že impaktor je těsně před počátkem nárazu, a aplikovat počáteční rychlost, kterou lze dopočítat analyticky.

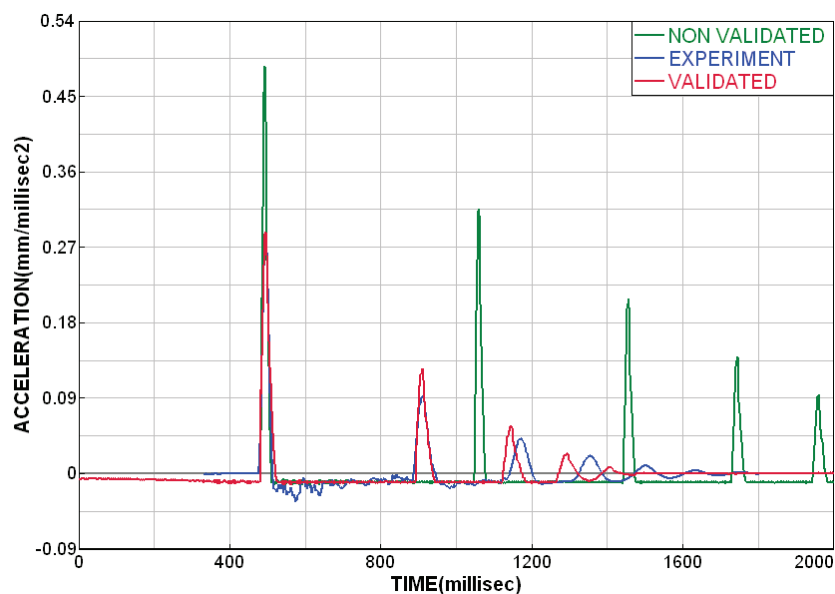


Obr. 92 Náhled simulace vytvořené pro validaci pěnového materiálu

Materiál je nejprve validován pro vyšší rychlost. Na Obr. 93 jsou výsledky validačního výpočtu. Je zde zřejmé, že nevalidovaný materiál se svým chováním blíží experimentu. Rychlost deformace v místě nárazu lze přibližně odhadnout z počáteční rychlosti impaktoru a počáteční výšky součásti (21.3.4.1), kde  $\epsilon$  je poměrná deformace,  $L_0$  je počáteční šířka pěny,  $L$  je okamžitá šířka pěny a  $v(t)$  je okamžitá rychlost stlačování pěny v čase  $t$ .

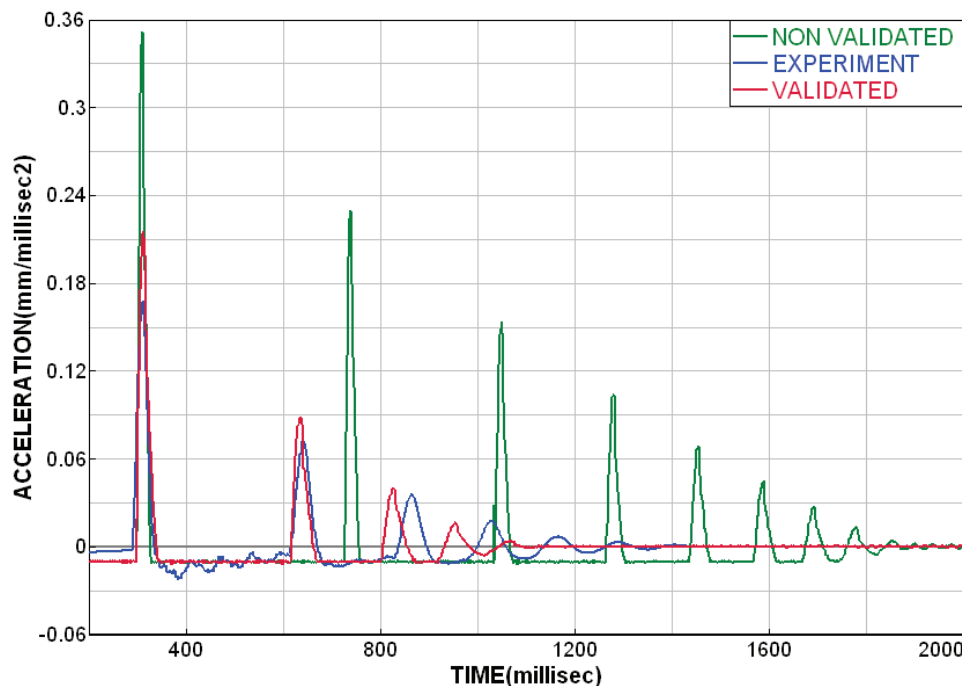
$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{L-L_0}{L_0} \right) = \frac{v(t)}{L_0} \quad (21.3.4.1)$$

Na Obr. 93 jsou výsledky výpočtu při uvažování počáteční rychlosti 3,9 m/s. Chování modelu se zde blíží výsledkům experimentu. Úpravou materiálových parametrů lze dosáhnout mnohem lepší shody. To je dobře patrné na Obr. 93 z porovnání nevalidovaného průběhu (zeleně) a validovaného průběhu (červeně), který místy překrývá výsledky experimentu (modře).



Obr. 93 Zrychlení impaktoru při počáteční výšce 880 mm; zeleně – nevalidovaný materiál; modře - výsledek experimentu; červeně – validovaný materiál

Na Obr. 94 jsou výsledky výpočtu při uvažování počáteční rychlosti 2,8 m/s. Je zřejmé, že při nižší rychlosti se výsledky simulace blíží výsledkům experimentu o něco méně než při vyšší rychlosti. Nicméně prioritou je validace materiálového modelu pro vyšší rychlost, která se více blíží podmínkám experimentu.



Obr. 94 Zrychlení impaktoru při počáteční výšce 500 mm; zeleně – nevalidovaný materiál; modře - výsledek experimentu; červeně – validovaný materiál

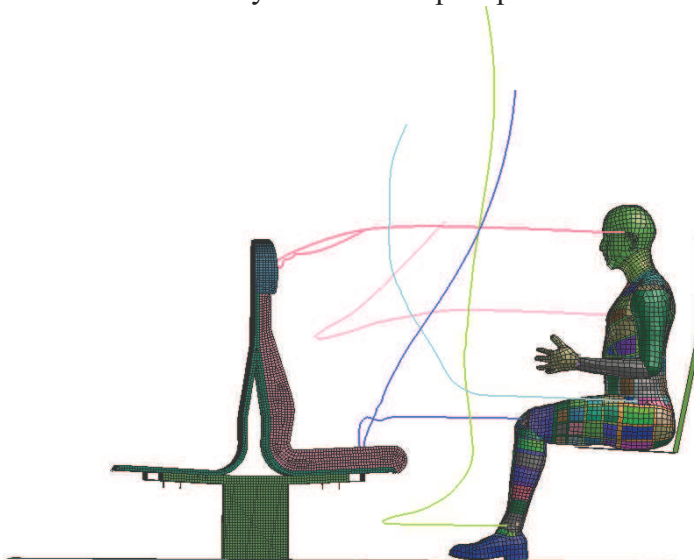
## 21.4 Simulace kolize cestujících v interiéru železničního vozidla

V modelu je definováno velké množství kontaktů. Je zde kontakt nohou modelu člověka s podlahou, kontakt modelu člověka se sedadlem, na kterém je usazen, a kontakt modelu člověka s protějším sedadlem. Samotný model člověka obsahuje některé základní kontakty mezi jednotlivými částmi těla, jako například kontakt brady a hrudníku. Tření v kontaktech je nastaveno dle vlastností uvažovaných materiálů dohledatelných v literatuře. Koeficient smykového tření mezi modelem člověka a sedadlem je stanoven na 0,4 [APURBA]. Koeficient smykového tření mezi podrážkou bot a podlahou je stanoven na 0,7 [LINVEBER]. Ostatní koeficienty tření jsou nastaveny na hodnotu 0,1, neboť jejich vlastnosti příliš neovlivní průběh simulace. Podlaha a zadní sedadlo pro usazení modelu člověka jsou řešeny jako jediné tuhé těleso. Součástí tohoto tuhého tělesa jsou i krajní uzly konstrukce sedadla, které jsou u skutečného sedadla vetknuty do bočnice. Tato idealizace je přípustná pro všechna tělesa, která přímo nesouvisí s nárazem modelu člověka. Jednotlivé části sedadla jsou spojeny v místech skutečných spojů prostřednictvím spojení příslušných uzlů sítě.

Úloha je řešena s využitím výhod explicitního řešiče. Výpočty jsou prováděny v softwaru PAM-CRASH v režimu s běžnou přesností (single precision). Čas děje je 500 ms pro kolizi sedícího cestujícího a 3000 ms pro kolizní scénář stojícího cestujícího. Časový krok úlohy je stanoven na  $10^{-3}$  ms. Je využito paralelizace k rozdělení úlohy na 32 procesorů. S využitím metody přidání nestrukturální hmoty (mass scaling) je možné výpočtový čas snížit při minimálním ovlivnění výsledků. Celkový čas výpočtu je cca 3 hodiny.

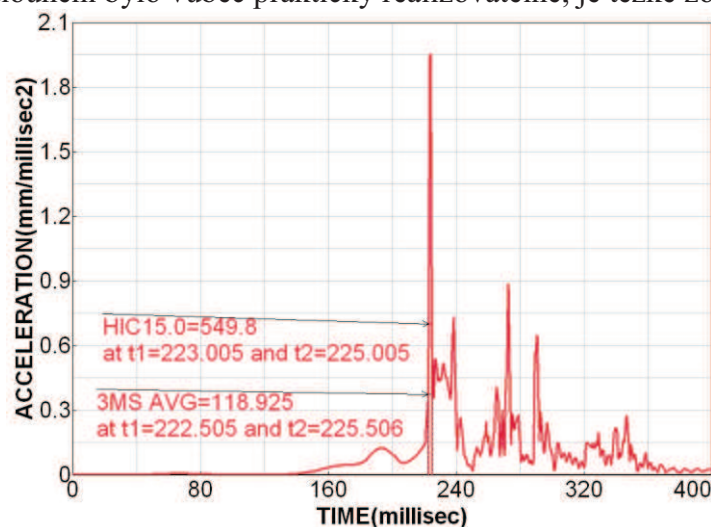
## 21.5 Kolize při zpomalení ve směru jízdy v železničním vozidle

Při simulaci kolize cestujícího pohybujícího se ve směru jízdy je srážka s protějším sedadlem nevyhnutelná. Z trajektorií pohybu (Obr. 95) je patrné, že člověk se při zpomalení okolních interiérových prvků pohybuje směrem dopředu a naráží na protější sedadlo kolena, a následně hlavou. Největším rizikem je samozřejmě nebezpečí poranění hlavy. Zároveň vzhledem k velké dráze, kterou urazí při tomto uspořádání sedadel kolena, lze předpokládat vyšší rychlost nárazu kolen. Je zde tedy reálné nebezpečí poranění dolních končetin.



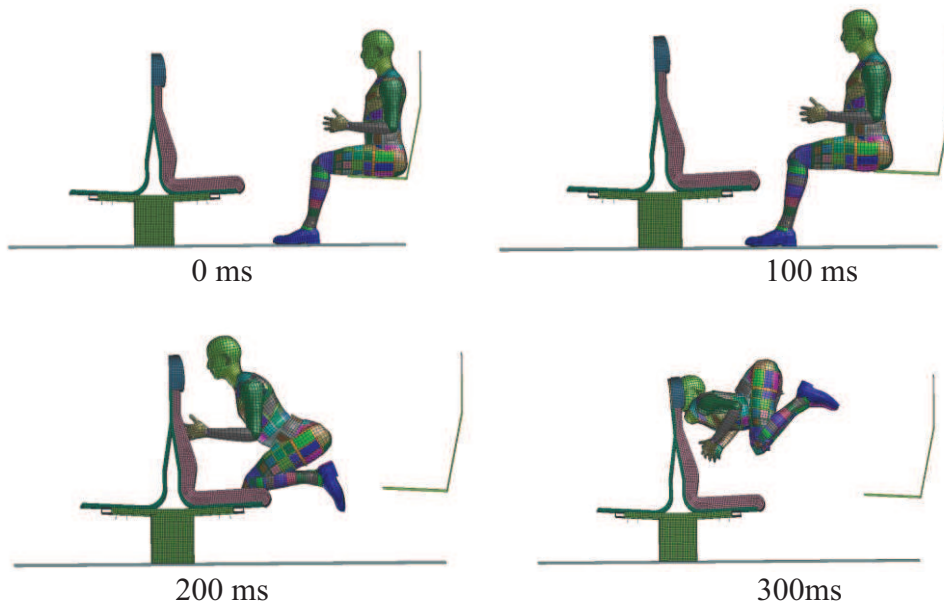
Obr. 95 Trajektorie pohybu cestujícího při působení zrychlení ve směru jízdy

Průběh zrychlení těžiště hlavy je patrný z grafu na Obr. 96. Je zde provedeno vyhodnocení kritéria  $HIC_{15}=550$  a  $3MS=118g$ . Ačkoliv kritérium  $HIC$  sotva přesahuje polovinu limitní hodnoty, kritérium  $3MS$  značně přesahuje limit  $80g$ . To je způsobeno průběhem funkce zrychlení, kde dochází k výskytu značné špičky zrychlení ve velmi krátkém čase. Z grafu je patrný pozvolný náběh v nízkých hodnotách zrychlení, který špičku předchází. Vzhledem ke zkušenostem získaným při experimentálním ověřování chování pěnových materiálů (viz kap. 21.3) lze říci, že dochází k takovému stlačení čalouněné části, kdy vliv pěnového materiálu je již velmi malý. Lze tedy očekávat vážné poranění hlavy, které lze teoreticky zmírnit významným zesílením tloušťky čalounění. Otázku, zda by takové robustní zesílení čalounění bylo vůbec prakticky realizovatelné, je těžké zodpovědět.



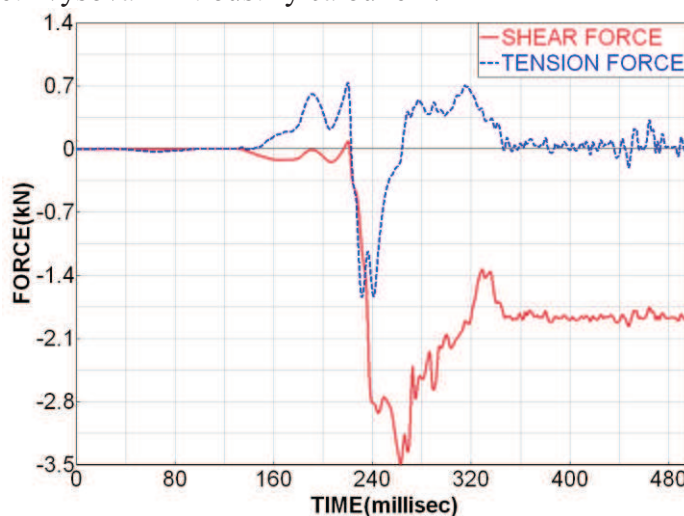
Obr. 96 Vyhodnocení zrychlení hlavy (magnitude) a kritéria poranění hlavy  $HIC$ ,  $3MS$

Z rozfázovaného průběhu kolize je dobře patrný její průběh v čase. Po nárazu vozidla se cestující nejprve posouvá směrem k protějšímu sedadlu. Zde nejprve dochází k nárazu kolen. Následně tělo cestujícího pokračuje hlavou proti sedadlu. Z fázi kolize na obrázku číslo 97 je patrné, že kromě poranění hlavy je zde velké nebezpečí poranění krku.



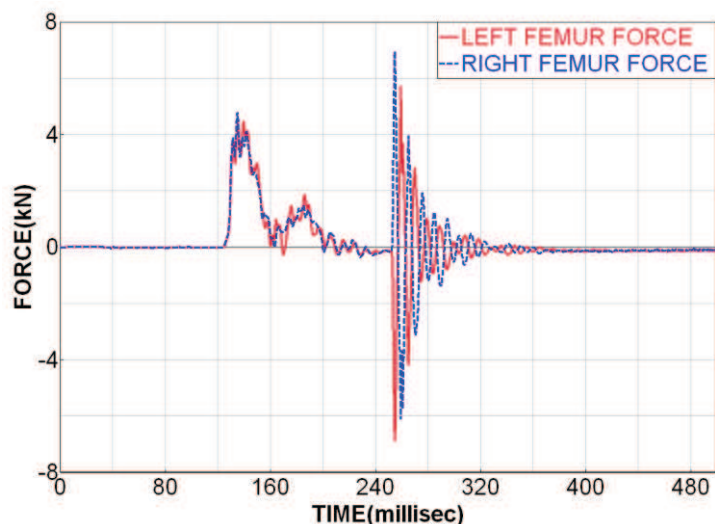
Obr. 97 Rozfázovaný průběh kolize cestujícího v čase 300 ms

Síly v oblasti krčního obratle C1 Atlas jsou na obrázku č. 98. Je zde vyhodnocována síla působící kolmo na transversální rovinu krku (distalis) jako tahová a síla působící kolmo na frontální rovinu (anterior) jako smyková síla. Tahová síla se zde blíží hranici vzniku závažného poranění. Její maximální hodnota je 1,7 kN, nicméně ani v předepsaných časech 60 ms a 35 ms [DIGGES] nepřesahuje stanovenou mez. Naproti tomu smyková síla přesahuje jednoznačně mezní hranici 3,1 kN. V čase 80ms pak přesahuje limit 1,5 kN, který je mezní hodnotou poranění již při době působení pouhých 25 ms. Lze tedy předpokládat vysokou pravděpodobnost fatálního poranění krku. Na rozdíl od poranění hlavy nelze poranění krku dost dobře předcházet zvyšováním tloušťky čalounění.



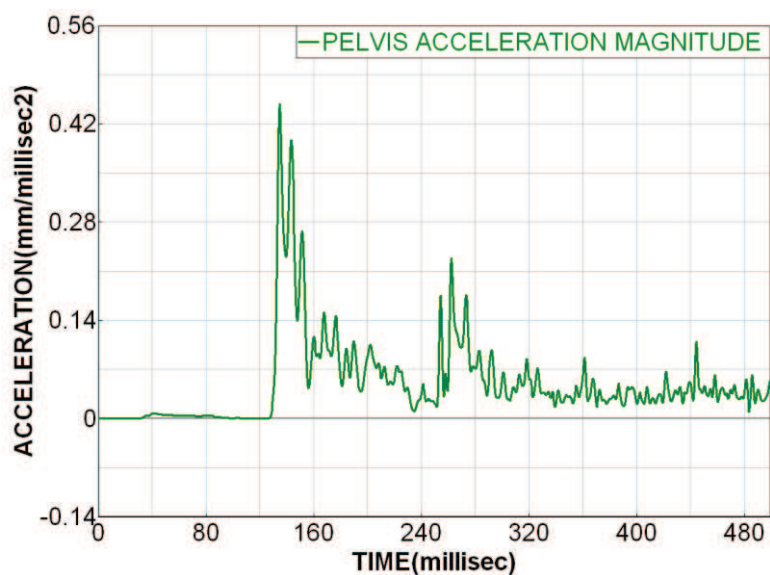
Obr. 98 Síly v krku v oblasti C1, modře: tahová síla, červeně: smyková síla

Dále je provedeno vyhodnocení některých dalších parametrů. Na obrázku č. 99 jsou síly v levé a pravé stehenní kosti. Je zřejmé, že při tomto kolizním scénáři musí být jejich průběh velmi podobný. Velikost síly zde leží přibližně v polovině limitu 7,5 kN. Tato hodnota je však pouze informační, neboť model je koncipován tak, že při překročení bezpečných limitů dojde k rozpojení příslušných kloubů. Zakmitání způsobené uvolněním kloubů není významné. Z celistvosti struktury dolních končetin je tedy možné usuzovat, že k závažným poraněním zde nedojde.



Obr. 99 Síly ve stehenních kostech

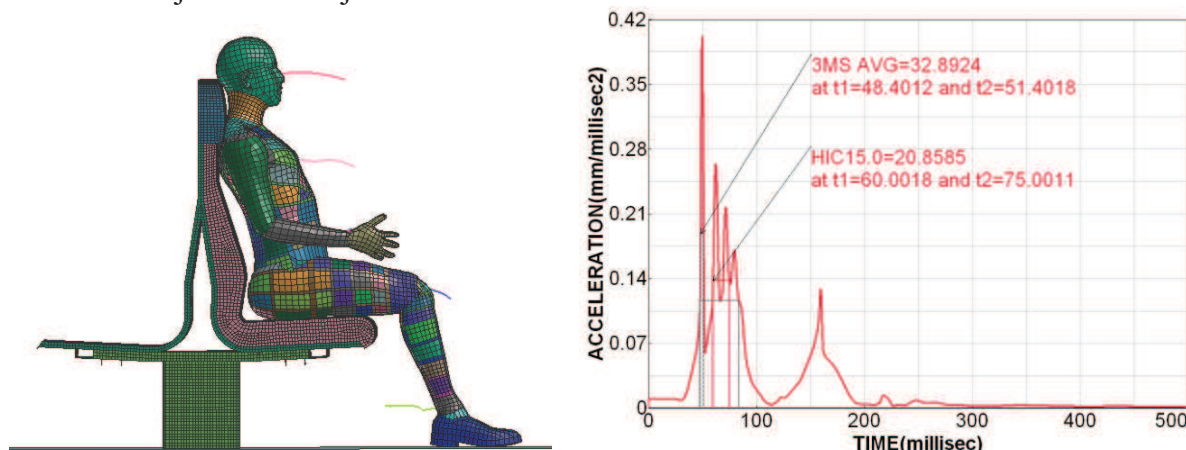
Protože ke stlačení hrudníku při této kolizi vůbec nedochází, není poranění hrudníku řešeno. O jeho nulovém kontaktu s interiérem svědčí rovněž hodnota stlačení sternu 0,1 mm. Poranění pánve zde taktéž není příliš pravděpodobné. Pánev není přímo v kontaktu s žádným prvkem interiéru, ale je zatížena zrychlením prostřednictvím dolních končetin. Zrychlení pánve dosahuje maximální hodnoty 44 g (Obr. 100). Limitující zrychlení pro pánev je 130g [DIGGES]. Z toho lze usuzovat, že ani prostřednictvím dolních končetin není pánev zatížena tak, aby hrozilo nebezpečí poranění.



Obr. 100 Výslednice zrychlení pánve

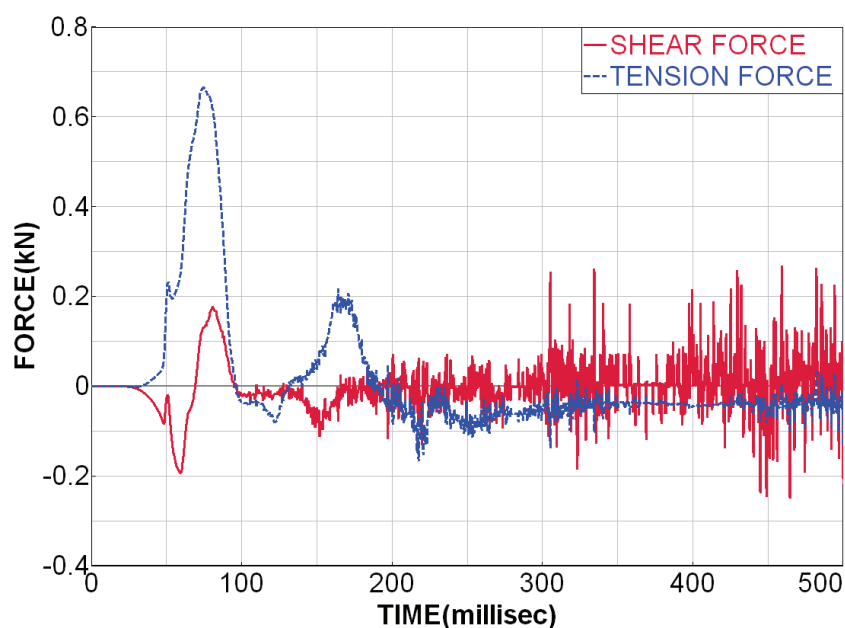
## 21.6 Kolize při zpomalení v protisměru jízdy v železničním vozidle

Člověk sedící zády do směru zrychlení nejlépe vzdoruje jeho účinkům. Při poloze zády do směru zrychlení však hrozí nebezpečí poranění krku (např. whiplash, známý ze silniční dopravy). Proto je vhodné ověřit nebezpečí vzniku poranění i při této poloze. Trajektorie pohybu jsou zřejmé z obrázku č. 101. Díky minimální vzdálenosti hlavy od čalouněné opěrky hlavy lze předpokládat minimální hodnoty kritérií poranění hlavy, což graf na obr. č. 101 jasně dokazuje.



Obr. 101 Trajektorie pohybu cestujícího při působení zrychlení ve směru jízdy (vlevo), vyhodnocení zrychlení hlavy (magnitude) a kritéria poranění hlavy HIC15, 3MS (vpravo)

Dále je vhodné přesvědčit se o velikosti sil v krku (obr 102). Souřadný systém je zde uvažován stejným způsobem, jak je popsáno v kapitole 21.5. Smyková síla je zde minimální, a tudíž od ní nehrozí bezprostřední poranění. Tahová síla rovněž leží pod předepsaným minimem, její hodnota však již není zcela zanedbatelná. Při pohledu na polohu cestujícího (obr. 101) je patrné, že jeho hlava přesahuje okraj sedadla. Při pohybu vzad je tedy právě díky tomu generována tahová síla v krku. Ačkoliv hodnota tahové síly ještě leží pod limitem, nelze zaručit, že ke zranění v některých specifických případech (robustnější cestující 95%, nepředpokládaná poloha těla atd.) nedojde. Tato skutečnost je zmiňována především proto, že tomuto poranění lze jednoduše zabránit prostým zvýšením sedáku.



Obr. 102 Síly v krku v oblasti C1, modře: tahová síla, červeně: smyková síla

## 21.7 Kolize stojícího cestujícího v železničním vozidle

Pád stojícího člověka je obvykle příčinou poranění hlavy. Pád stojícího cestujícího při kolizi železničního vozidla má zpravidla fatální následky. Tento děj je velmi obtížně řešitelný vzhledem k vysokým zrychlením, která při nehodě působí. Stojící cestující při těchto zrychleních může urazit dráhu desítek metrů ve volném prostoru. Simulace kolize stojícího cestujícího by tak byla nereálná, protože určitě dojde ke srážce s jiným prvkem interiéru dříve než s podlahou. Pozornost si však zaslouží možnost vzniku poranění při nouzovém brzdění.

Po zadání rychlobrzdy za jízdy železničního vozidla narůstá zpomalení až do hodnoty 2,4 m/s<sup>2</sup>, což je při rychlosti jízdy cca 35-40 km/h. Potom je tento režim zrušen a dobrzdění probíhá už jen provozní brzdou. Pro tento režim platí jednoduché pravidlo 21.7.1 kde  $a$  je zrychlení,  $t$  je čas a  $v$  je rychlost.

$$\int a dt = v \quad (21.7.1)$$

Pro stanovení času, po který bude vozidlo brzdit rychlobrzdou, lze zavést zjednodušení vycházející z předpokladu konstantního zrychlení. Skutečná doba, po kterou bude rychlobrzda aktivní, pak bude o něco delší z důvodu pozvolného nárůstu zpomalení. Díky této idealizaci lze však za jedinou neznámou považovat počáteční rychlost vozidla. Čas působení zpomalení lze pak stanovit ze vztahu 21.7.2, kde  $t$  je čas brzdění,  $v_{pocatecni}$  je počáteční rychlost před zadáním rychlobrzdy,  $v_{koncova}$  je rychlost při ukončení brzdění rychlobrzdou,  $a$  je zpomalení způsobené rychlobrzdou.

$$t = \frac{v_{pocatecni} - v_{koncova}}{a} \quad (21.7.2)$$

Při uvažování nejnižší možné rychlosti 60 km/h by brzdění podle výše uvedených parametrů trvalo 2,31s. Pro úplnost je uvedena tabulka (Tab. 14), v níž je stanovena doba působení zpomalení pro více počátečních rychlostí.

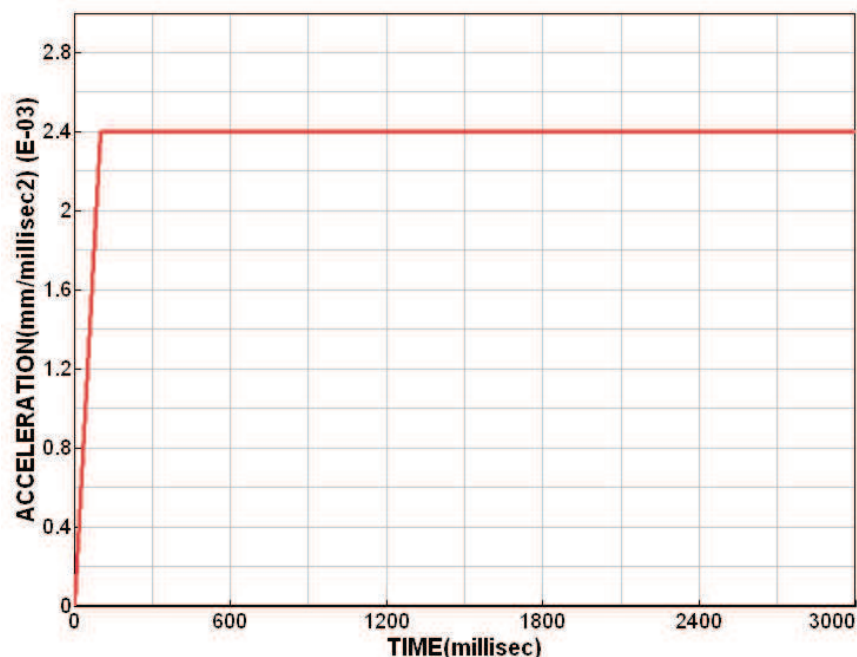
Tab. 14 Stanovení teoretické doby brzdění při různých počátečních rychlostech

a[m/s <sup>2</sup> ]	vpoc[km/h]	vpoc[m/s]	vkonc[km/h]	vkonc[m/s]	t[s]
2,40	60	16,67	40	11,11	2,31
2,40	80	22,22	40	11,11	4,63
2,40	100	27,78	40	11,11	6,94
2,40	120	33,33	40	11,11	9,26

Z tabulky číslo 14 je naprosto zřejmé, že zpomalení bude působit v řádu několika sekund. V tomto čase určitě dojde ke kolizi cestujícího s podlahou a není tedy třeba řešit dobu působení urychlujícího pulzu.

Samotný průběh zrychlení po zadání rychlobrzdy se může lišit dle typu železničního vozidla, jeho momentální rychlosti a dalších podmínek. Není proto jednoduché stanovit jeden pulz pro simulaci, který by odpovídal více podmínkám. Lze předpokládat, že zrychlení bude mít pozvolný nárůst, než dosáhne hodnoty 2,4 m/s<sup>2</sup>, která bude přibližně konstantní. Proto je uvažován průběh zrychlení viz Obr. 103.



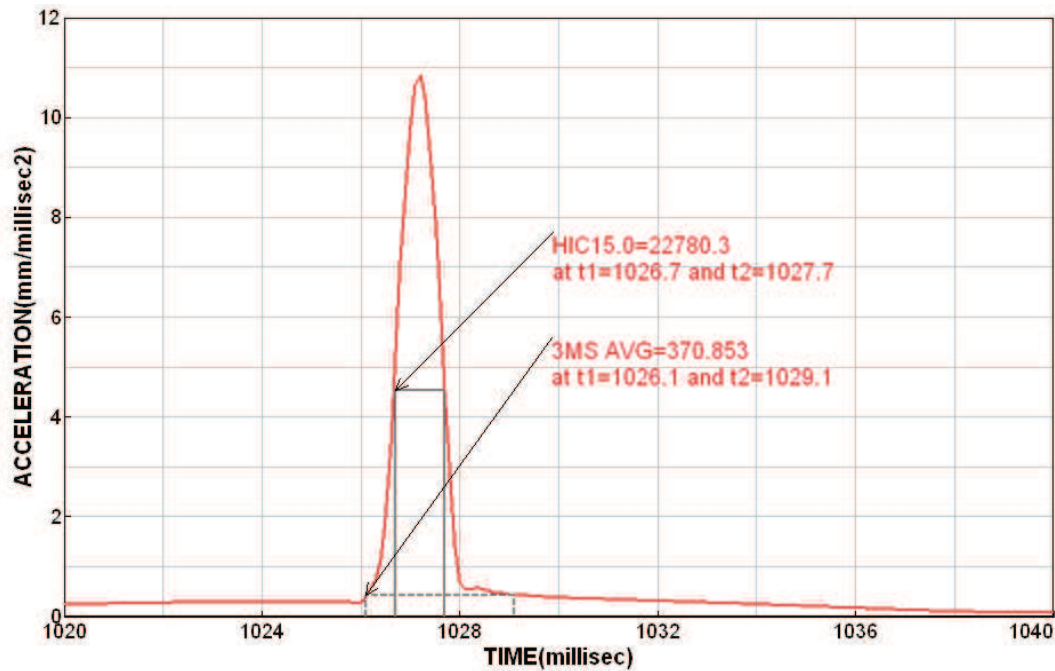


Obr. 103 Zpomalení vozidla při krizovém brzdění použité pro simulaci

Pozice cestujícího zády do směru zrychlení je méně obvyklá. Lze předpokládat nižší pravděpodobnost jejího výskytu při krizovém brzdění. Tato poloha je však přesto vhodná pro simulaci. Při pádu člověka dozadu je možnost jeho reakcí výrazně nižší. Záklon zad člověka je značně omezen v porovnání s možnostmi předklonu. Typickou reakcí člověka na pád je předkročení, které v případě pádu vzad nepřichází v úvahu. Krok vzad je značně komplikovanější vzhledem k anatomii nohou a stupňům volnosti jejich kloubů. Obdobným způsobem předpažení rukou není jednoduše použitelné a celková schopnost těla k vyrovnávání pádu je zde nižší. Z rozfázovaného pohybu (Obr. 104) je zřejmá, poměrně velká rychlost hlavy v čase 1030 ms. Vysoká rychlost nárazu (4 m/s) na tuhou podlahu vede k poměrně extrémním hodnotám zrychlení hlavy a kritérií poranění (Obr. 105).



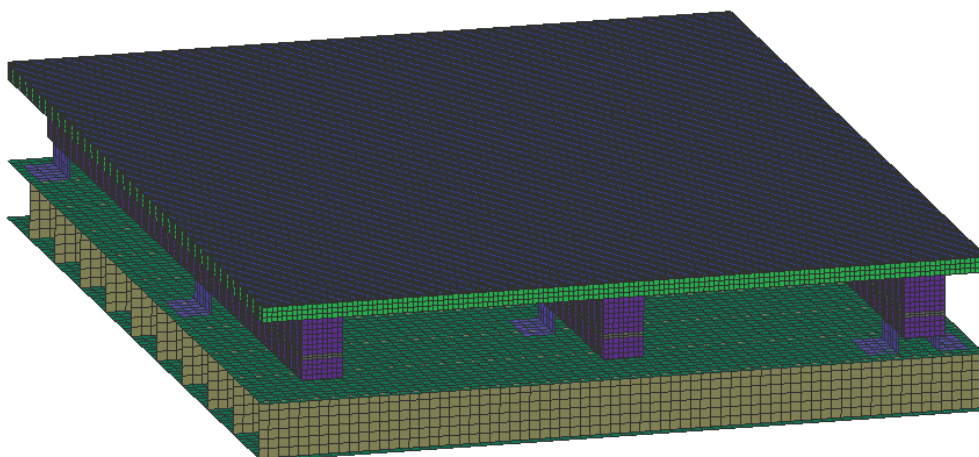
Obr. 104 Rozfázovaný pohyb cestujícího v časech 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1030 ms



Obr. 105 Zrychlení těžiště hlavy při simulaci kolize cestujícího v pozici zády do směru jízdy

Pro přesnější určení účinku nárazu hlavy je vytvořen detailnější model podlahy železničního vozidla. Geometrie podlahy je vytvořena na základě dat aktuálně provozovaného železničního vozidla s integrální hliníkovou stavbou. Modelován je výřez podlahy s podélným rozměrem 720 mm a příčným rozměrem 900 mm. Velikost výřezu byla zvolena s ohledem na vnitřní strukturu podlahy. Ve výřezu se vyskytují všechny hlavní konstrukční prvky.

Podlaha je tvořena překližkovou deskou upevněnou na dřevěných nosnících. Dřevěné nosníky jsou prokládány gumovou tlumící vrstvou. Dále jsou dřevěné nosníky připevněny ke konstrukci vozidla pomocí profilů z hliníkových slitin. Celkový náhled modelu je patrný z následujícího obrázku (Obr. 106). Velikost použitých prvků je zvolena 10 mm pro hliníkové části, které jsou nejvzdálenější místu nárazu, a nebude zde zapotřebí získání přesných výsledků. Dřevěné a gumové části jsou modelovány s velikostí prvku 5 mm. Model vrchní krycí vrstvy Altro je vytvořen prvky s charakteristickou velikostí 1 mm.



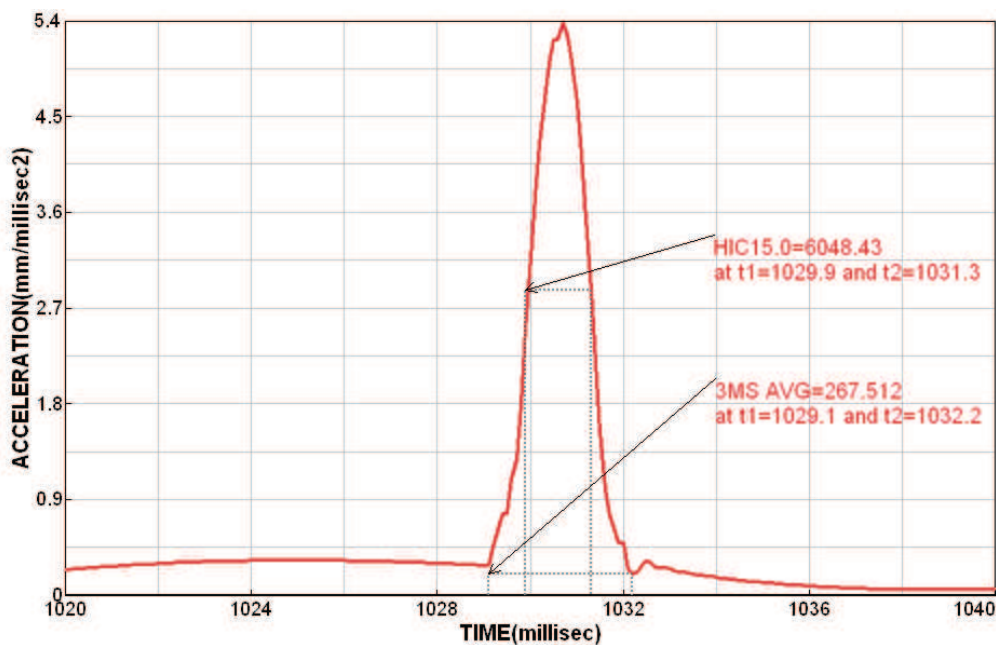
Obr. 106 Náhled modelovaného výřezu podlahy

Detailní kinematika pohybu cestujícího při nárazu hlavy do podlahy je dobře patrná z Obr. 107. Jedná se zde pouze o část celého pohybu cestujícího v čase okolo 1000 ms. Je zde dobře patrný náraz zad s následným nárazem hlavy za poměrně velké rychlosti.



Obr. 107 Simulace nárazu hlavy s poddajným modelem podlahy

Vliv poddajnosti podlahy je poměrně malý při malých rychlostech nárazu. Z porovnání grafů na Obr.105 a Obr. 108 je však jasné, že u kolize cestujícího stojícího je poddajnost podlahy nezanedbatelná. Hodnota zrychlení hlavy přesahující 500g je extrémní. Kritérium poranění hlavy vychází  $HIC_{15}=6048$  kritériumu 3MS vychází  $3MS=268$ . Tyto hodnoty značně přesahují limity pro přežití a naznačují závažné bezpečnostní riziko. Rychlost hlavy před nárazem je 4 m/s. Deformace podlahy v místě nárazu dosahuje 1,2 mm. Pokud hlava cestujícího musí zpomalit z tak velké rychlosti na tak krátké dráze, musí být zrychlení značné.



Obr. 108 Kompletní model sloužící pro řešení

## 22 Porovnání bezpečnosti kolejových vozidel s jinými druhy vozidel

Bezpečnost kolejových vozidel je vhodné porovnat zejména s bezpečností silničních vozidel, a případně s bezpečností v letecké dopravě. Při hodnocení dopravní nehody v interiéru kolejového vozidla je využíváno významným způsobem poznatků z oblasti silniční dopravy. Je nutno poznamenat, že právě v automobilovém odvětví je pasivní bezpečnost cestujících nejvíce rozvinuta. Samotná kolize cestujících v interiéru kolejového vozidla a její průběh je však zcela odlišný.

Kolize v železničním vozidle je zcela odlišná působícími zrychleními, která jsou významně nižší než v silniční dopravě. To je, zapříčiněno podstatně vyšší hmotností vlaku, přičemž jsou uvažovány statisticky významné druhy nehod v železniční dopravě. Z důvodu vyšší robustnosti železničních vozidel rovněž nejsou uvažovány deformace skříně vozidla, na rozdíl od silničního vozidla. Nová železniční vozidla jsou navrhována s vhodným rozmístěním deformačních zón, mimo častý výskyt cestujících. Z tohoto pohledu se podmínky kolize cestujících v interiéru kolejového vozidla jeví jako příznivější. Samozřejmě zde nejsou uvažovány extrémně závažné nehody, kdy dojde k čelnímu nárazu kolejových vozidel v plné rychlosti. Vzhledem k charakteru těchto dopravních prostředků se takovým nehodám předchází prvky systému aktivní bezpečnosti.

Významný vliv na následky nehody má interiér vozidla. Porovnání interiéru silničního a kolejového vozidla je nasnadě. Interiér silničního vozidla je detailně navržen v souladu s předpisy EHK [FIRST]. Především je zde detailně řešeno zaoblení jednotlivých částí. Jak je patrné z odstavce 18.7, je náraz na ostrou hranu nezanedbatelným (a obtížně vyhodnotitelným) nebezpečím. Zásadním rozdílem v interiéru silničního vozidla je použití bezpečnostních pásů a airbagů. Protože je charakter železničních vozidel odlišný (velký prostor spojený s volným pohybem), nelze předpokládat v budoucnu použití bezpečnostních pásů. Z kapitoly 13.5 jasně vyplývá, že použití bezpečnostních pásů by významně snížilo rizika vážných poranění. Bezpečnostní pásy jsou však spojeny s jistým omezením pohybu cestujících a rovněž se značnými náklady na straně výrobce. První krok (a lze říci, že tento trend začíná být patrný) je zaměření se na dostatečnou pevnost sedadel. Bez správně navržených sedadel je jakákoliv úvaha o bezpečnostních pásech, nebo dokonce airbagách, naprosto scestná.

Při stručném náhledu na pasivní bezpečnost v letecké dopravě nelze přehlédnout diametrální odlišnosti. Na rozdíl od železničního vozidla, konstrukce letadla je významně lehčí s důrazem na použití lehkých materiálů. K nehodám dochází především ve vysokých rychlostech a působení zrychlení v mnoha směrech je vždy očekáváno. Rovněž je zde problematika dekomprese a mnoho dalších odlišností naprosto neslučitelných s železniční dopravou. Navzdory tomu i zde lze hledat analogie. Ačkoliv nebezpečí požáru je výrazně nižší v železniční dopravě, způsob úniku cestujících je obdobný. Zde je vhodné poznamenat, že možnost úniku cestujících je lépe zpracována v oblasti letecké dopravy a lze se zde inspirovat (viz kapitola 10).

Naprosto zbytečné je snažit se o porovnání s lodní dopravou. U těchto hmotných a tuhých objektů nepředstavuje zrychlení při nárazu takovou hrozbu. Stejně tak i způsob opuštění plavidla, spojený s nebezpečím utonutí, vůbec neodpovídá bezpečnostním rizikům v železniční dopravě.

## 23 Splnění cílů disertační práce

Hlavním cílem této práce je vyhodnocení kolize kolejového vozidla z pohledu pasivní bezpečnosti interiéru prostřednictvím počítačových simulací. K provedení simulací byl nejprve vytvořen MKP model interiéru železničního a následně i tramvajového vozidla. Za tímto účelem byly získány všechny potřebné podklady. Byla navázána spolupráce s podnikem ŠKODA VAGONKA a.s. a spolupráce se společností VÚKV a.s. Podklady nejsou k práci přiloženy, nelze totiž zaručit, že nejsou předmětem obchodního tajemství.

Samotné práci předcházela rešerše v oblasti pasivní bezpečnosti kolejových vozidel, pasivní bezpečnosti interiérů silničních vozidel i základní rešerše z oblasti biomechaniky. Metodickým postupem byly odhadnuty obecné kolizní scénáře nejvhodnější k simulaci. Jedná se o kolize cestujících s nejčtetnějším výskytem a nejvyšší závažností.

Prvotní fází bylo získání potřebných podkladů. Jedná se především o typové výkresy vozidel, ze kterých byla odhadnuta jejich hrubá stavba. Po předběžné analýze interiéru byla vytipována krizová místa. Je rovněž vhodné řešit kolize cestujících s ohledem na četnost výskytu těchto kolizí ve vozidle. Proto byl zvolen v případě železničního i v případě tramvajového vozidla prvek, který se v interiéru vyskytuje nejčastěji. V obou případech se jedná o sedadla, jejichž konstrukce je shodná téměř pro celé vozidlo nebo která výrazně převládá. Na základě těchto prvků interiéru byly vytvořeny podrobné kolizní scénáře, určené k další analýze.

Dále pak byla získána data ve formě dostačující pro vytvoření MKP modelů interiérů uvažovaných vozidel. Jednalo se především o výkresovou dokumentaci pro vytvoření MKP sítě a stručný popis materiálů všech potřebných součástí.

Na základě znalosti materiálů bylo možné dohledat materiálová data některých součástí v literatuře. Jedná se především o ocelové díly konstrukcí. Pro ověření materiálových vlastností některých materiálů byly provedeny příslušné zkoušky. Jedná především o materiály ne zcela běžně řešené, jakými je dřevo nebo polyuretanová pěna.

Pro první odhady průběhu simulovaných dějů byly použity modely figurín (integrováné do výpočetního systému Pam-Crash), pomocí nichž byly řešeny kolize ve fiktivním interiéru kolejového vozidla. Při podrobnějším rozpracování vytipovaných kolizí byl použit MBS model člověka, který byl vyvinut v rámci výzkumného projektu TA01031628 – Škálovatelné modely člověka pro zvýšení bezpečnosti v dopravě (TAČR – program ALFA - řešitel MECAS ESI s.r.o., další účastník projektu ZČU v Plzni) za spoluúčasti autora této práce.

Hlavním výsledkem práce bylo zhodnocení výsledků zvolených kolizních scénářů. Prostřednictvím biomechanických kritérií poranění bylo hodnoceno nebezpečí vzniku poranění u jednotlivých kolizních scénářů. V případě tramvajového vozidla bylo navrženo jednoduché opatření pro zmírnění následků nehody. V případě železničního vozidla lze samotné rozvržení interiéru považovat za značně rizikové a nelze tedy doporučit pouhou úpravu prvku interiéru.

Pro porovnání pasivní bezpečnosti interiéru konkrétního kolejového vozidla s bezpečností interiérů jiných vozidel nejlépe poslouží hodnoty výsledných kritérií poranění. Samotné porovnání je provedeno v závěru práce.

## 24 Závěr

Tato práce se zabývá oblastí pasivní bezpečnosti interiérů kolejových vozidel. V počátku práce shrnuje dosavadní poznatky z oboru pasivní bezpečnosti interiérů kolejových vozidel. Hlavním zdrojem zde zmiňovaných informací jsou sborníky z konferencí týkající se této problematiky a zprávy některých výzkumných projektů provedených v rámci Evropské Unie.

V práci je uvedena statistika dopravních nehod v železniční dopravě. Databáze Ministerstva dopravy ČR a UIC se bohužel omezují na prostý soupis vážně zraněných a usmrcených osob při železničních nehodách. Bylo by velmi vhodné vytvořit databázi podstatně detailnější. Nejcennější poznatky jsou čerpány ze záznamů železničních nehod v Anglii. Díky těmto datům je možné vyhodnotit nejběžnější druhy poranění a jejich závažnost. S těmito podklady jsou metodickým postupem zvoleny kolizní scénáře vhodné pro detailnější posouzení prostřednictvím simulací.

Samotné poranění cestujících, ke kterému může dojít v interiéru kolejového vozidla, je rozebráno poměrně detailně. Zvláštní pozornost je věnována třem nejvýznamnějším činitelům. Rychlost nárazu cestujícího, pozice cestujícího a prvky interiéru. Samostatnou otázkou je řešení úniku cestujících. Při následném požáru vozidla je schopnost jeho opuštění klíčová.

Dále jsou shrnuty nejběžnější mechanismy poranění cestujících. Je zde uveden soupis jednotlivých částí lidského těla se stručným nastíněním jejich anatomie a biomechanických kritérií poranění. Díky nim je možné určit pravděpodobnost poranění cestujících. Je však nutno mít vždy na paměti, pro jaký účel dané kritérium slouží, a zvážit jeho vhodnost pro vyhodnocení konkrétní kolize. Příkladem jsou kritéria poranění hlavy HIC a 3MS, která jsou vyvinuta pro potřeby automobilového průmyslu a jejichž využití je omezené. Tomuto posouzení je věnována pozornost v části „Účinek nárazu hlavy na různě zaoblený prvek interiéru“. Zde je prokázáno, že ačkoliv kritéria dávají dobrou představu o poranění hlavy vlivem zrychlení působícího v jejím těžišti, nelze tato kritéria využít pro vyhodnocení nárazu hlavy na ostrý prvek interiéru. Velkým množstvím jednoduchých simulací je jednoznačně prokázáno, že takto vypočtená pravděpodobnost poranění je tím nižší, čím je hrana ostřejší. Tento paradox je patrnější u poddajnějších materiálů, jako je např. guma.

Simulace kolize cestujících ve fiktivním interiéru kolejového vozidla je využita k ověření některých předpokládaných důsledků kolize. Základním prvkem je model figuríny (ARB 50%). Je zřejmé, že pokud cestující sedí čelem proti sobě, jsou následky nehody vždy vážnější, než sedí-li cestující v jednom směru. Také je prokázáno významné zlepšení bezpečnosti cestujících při použití bezpečnostních pásů. Použití bezpečnostních pásů v kolejovém vozidle je však velmi složitou otázkou. Navíc je nutné v první řadě zajistit dostatečnou pevnost samotných sedadel.

Díky datům získaným od výrobců kolejových vozidel, materiálovým parametrům dostupným z literatury a v neposlední řadě díky výsledkům experimentů je možné sestavit model interiéru tramvajového a železničního vozidla. Pro simulace je využit puls zrychlení dostupný z literatury. Všechny úlohy jsou řešeny v SW Pam-Crash. Jedná se o výpočet metodou konečných prvků, přičemž je použit explicitní řešič. Práce stručně zmiňuje možnosti využitelných prostředků pro simulaci kolizí cestujících. Těžištěm úlohy je především

antropomorfní zařízení, respektive jeho model. Výhodou je možnost použití modelu lidského těla vyvinutého v rámci projektu TAČR s názvem „VIRTHUMAN“.

Krátká kapitola se věnuje posouzení možností využití modelu člověka „VIRTHUMAN“. Tento model je vhodný pro hodnocení pasivní bezpečnosti vozidel a je použit při posouzení bezpečnosti interiéru tramvaje i železničního vozidla. Model má parametry průměrného muže (padesátipercentilní muž). Tvar sítě modelu vychází z naskenovaných dat skutečného lidského těla. Chování modelu je díky dobré biofidelitě bližší odezvě skutečného lidského těla než odezvě figuríny. Je zde použita MBS struktura s poměrně detailním FE skeletonem. Jednotlivé části lidského těla jsou reprezentovány tzv. „superelementy“, což umožňuje simulovat chování měkkých tkání. Díky takovému přístupu je model lidského těla nenáročný na výpočetní výkon s možností získání relativně přesných výsledků.

Pro simulaci kolize cestujícího v tramvajovém vozidle je vytvořen model interiéru tramvaje 15T. Dominantním prvkem interiéru je překližkové sedadlo s madlem. Madlo je tvořeno ocelovou kostrou, pokrytou vulkanizovanou pryží, což je v modelu zohledněno. Vlastnosti překližkového sedadla jsou experimentálně ověřeny kvazistatickou ohybovou zkouškou. Tento experiment je původně navržen pro ověření životnosti sedadla, což ale nebrání jeho využití pro validaci modelu. Jako nejběžnější kolizní scénář je zde simulován náraz sedícího cestujícího. Puls zrychlení (2g), odpovídající nehodě tramvaje, je aplikován ve směru sezení cestujících, i v protisměru. Důvodem je různá poloha sedadel, i možnost zadního nárazu do tramvajového vozidla. Z výsledků simulace vyplývá, že vznik závažných poranění není pravděpodobný. Nicméně poměrně závažným rizikem je obtížně vyhodnotitelný náraz bradou na protější sedadlo. Fatálním by mohl být náraz krku při lehce odlišné poloze nebo velikosti cestujícího. Menším rizikem je nebezpečí poranění krku při zpětném nárazu. Doporučeným řešením může být zvýšení výšky sedáku. To však zvyšuje nebezpečí jeho porušení, které je již při současné výšce nezanedbatelné.

Pro simulaci kolize cestujícího v železničním vozidle je vytvořen model motorového vozu na základě dat od výrobce, který si nepřeje být jmenován. V celém vozidle sedí na sedadlech cestující čelem k sobě. Z toho vychází simulované kolizní scénáře, kde zrychlující puls (7,5g) působí ve směru pohledu cestujícího i proti němu. Jednoduchým experimentem je ověřeno chování čalouněných částí sedadla tvořených pěnovými materiály. Při experimentu je naráženo tuhým kulovým impaktorem do čalouněné části sedadla. Cestující sedící zády do směru není vystaven významnému bezpečnostnímu riziku. Díky opěrce hlavy zde nehrozí ani závažnější poranění krku, ačkoliv zvýšení opěrky hlavy by bylo určitě prospěšné pro případ nadprůměrně vysokého cestujícího. Pro cestujícího sedícího čelem do směru zrychlení jsou však bezpečnostní rizika značná. Jedná se zde především o fatální poranění krku, kterému lze jen těžko zabránit nějakým konstrukčním opatřením. Závěrem lze pouze konstatovat, že takovéto uspořádání sedadel není příliš vhodné z pohledu pasivní bezpečnosti a představuje závažné bezpečnostní riziko. V další části je řešen pád stojícího cestujícího. Při kolizi železničního vozidla je tato situace obtížně řešitelná s fatálními následky. V této části práce je proto řešen pád stojícího cestujícího při nouzovém brzdění. Tento druh kolize je zároveň pravděpodobnější. Výsledkem je, že i při uvažování detailního poddajného modelu podlahy představuje tato kolize poměrně závažné bezpečnostní riziko. Výsledky z kritérií poranění hlavy leží nad stanoveným limitem. Bezpečnost interiéru železničního vozidla je vhodné porovnat zejména s bezpečností interiéru silničního vozidla. Jednoznačně je však nutné konstatovat, že navzdory nižším působícím zrychlením je interiér kolejového vozidla poměrně méně bezpečný.

## 25 Literatura

- [COKAYNE 2003] Cokayne, S. P.; “*Data to be Collected for Investigations of Railway Accidents*”; August 2003; T122 report for RSSB
- [INRETS+MIRA] autoři: tým pracovníků společností INRETS+MIRA, *zpráva v rámci projektu SAFEINTERIORS*, contract number FP6-031260, contact details [www.ifsstar.fr](http://www.ifsstar.fr) , [www.mira.co.uk](http://www.mira.co.uk), Project funded by the European Community zpráva poskytnuta prostřednictvím účastníka projektu VÚKV a.s. Praha
- [RSSB] autoři: tým pracovníků společnosti RSSB, *zpráva v rámci projektu SAFEINTERIORS*, contract number FP6-031260, , contact details [www.rssb.co.uk](http://www.rssb.co.uk), Project funded by the European Community zpráva poskytnuta prostřednictvím účastníka projektu VÚKV a.s. Praha
- [UIC 2010] Kolektiv autorů UIC: *Safety Database Activity Report, Significant Accidents 2009, Benchmarking and Appendix (Public version)*. Paris, November 2010
- [MINISTERSTVO DOPRAVY 2001] Ministerstvo dopravy: *Ročenka dopravy 2001*. Praha Centrum dopravního výzkumu 2002
- [MINISTERSTVO DOPRAVY 2007] Ministerstvo dopravy: *Ročenka dopravy 2007*. Praha Centrum dopravního výzkumu 2008
- [MINISTERSTVO DOPRAVY 2013] Ministerstvo dopravy: *Ročenka dopravy 2013*. Praha Centrum dopravního výzkumu 2014
- [EURAILS SAFE] *EURailSafe* [online]. 2011 [cit. 2011-05-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.eurailsafe.net/>>.
- [THE TELEGRAPH] *The Telegraph* [online]. 2011 [cit. 2011-06-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.telegraph.co.uk/news/uknews/1497795/Rail-chiefs-cleared-over-Hatfield-disaster.html>>.
- [ČSN EN 15227] ČSN EN 15227:2008, *Železniční aplikace - Požadavky na odolnost skříní železničních vozidel*. Červenec 2008
- [HARDY 2003] Hardy, R. N.; Randell, N. K.: *Assessments of Passenger Safety in future rail vehicles*. Passive safety of rail vehicles, Berlin 2003.
- [DIGGES] Digges, K.H.: *Injury Measurements and Criteria*. The National Crash Analysis Center, The George Washington University
- [CHICOS 2006] Chicos, D.; de Vogel, D.; Otto, M.; Schaar, O.; a kol.: *Crash Analysis Criteria Description*. Bundesanstalt, Říjen 2006.
- [KENNERLY 1998] Kennerly Digges, H: *Injury Measurements and Criteria*. The National Crash Analysis Center, The George Washington University 1998
- [WOLTER 2008] Wolter, W. a kol.: *Anforderungen an die passive Sicherheit von Schienenfahrzeug- Inneneinrichtungen*. Rad 2008 Dresden
- [VERSCHUEREN] Verschueren, P. a Kol.: “A new test set-up for skull fracture characterisation,” *Journal of Biomechanics*, Volume 40, Issue 15, 2007, Pages 3389-3396 (dostupné z URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021929007002126>)



- [FORT] R. L. Fort: “Etude experimentale sur les fractures de la machoire superieure,” *Rev Chir de Paris*, vol. 23, pp. 208–227, 1901.
- [SCHNEIDER] D. C. Schneider: “Biomechanics of facial bone injury: experimental aspects.” in *The biomechanics of trauma*, Norwalk, CT, 1985, p. 281.
- [NAHUM] A. M. Nahum, J. D. Gatts, C. W. Gadd, and J. P. Danforth: “Impact tolerance of the skull and face.” in *2th STAPP Car Crash Conference Proceedings*, no. 680785. SAE, 1968, pp. 302–316.
- [SCHNEIDER] D. C. Schneider and A. M. Nahum: “Impact studies of facial bones and skull.” in *16th STAPP Car Crash Conference Proceedings*. SAE Society of Automotive Engineers, 1972, p. 186.
- [VILÍMEK] V. Veselý, M. Vilímek: Head Injury Biomechanics I – Head and Neck Injury“ in *Bulletin of Applied Mechanics* 8(32), 65-76, 2012
- [VERLEYSENA] P. Verleysena, J. Peirsa, J. V. Slyckena, K. Faesb, L. Duchenec: *Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals*, *Journal of Materials Processing Technology*, 2011
- [APURBA] D. Apurba, V. K. Kothari, N. Vandana: *A STUDY ON FRICTIONAL CHARACTERISTICS OF WOVEN FABRICS*, *AUTEX Research Journal*, Vol. 5, No3, September 2005
- [LINVEBER] J. LINVEBER, J. ŘASA, P. Vávra: *STROJNICKÉ TABULKY*, Praha 1999
- [EMERALDINSIGHT] *Emeraldinsight* [online]. 2012 [cit. 2012-11-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1600892&show=html>>
- [BLOGDERAULITO] *Blogderaulito* [online]. 2012 [cit. 2012-11-29]. Dostupný z WWW: <<http://blogderaulito.wordpress.com/2008/06/06/los-test-euroncap/>>
- [E-AUTONAPRAWA] *E-autonaprawa* [online]. 2012 [cit. 2012-12-3]. Dostupný z WWW: <<http://www.e-autonaprawa.pl/encyklopedia/biorid-ang-ibiofidelic-rear-impact-dummy-i/1971/>>
- [FASTERMAG] *Fastermag* [online]. 2012 [cit. 2012-12-4]. Dostupný z WWW: <<http://www.fastermag.cz/toyota-rozsiruje-nabidku-testovacich-figurin-pro-virtualni-narazove-zkousky.html>>
- [LSTC] *Lstc* [online]. 2012 [cit. 2012-12-4]. Dostupný z WWW: [http://www.lstc.com/products/models/dummies/H3\\_50th\\_Standing](http://www.lstc.com/products/models/dummies/H3_50th_Standing)
- [UAMK] *ÚSTŘEDNÍ AUTOMOTOKLUB ČESKÉ REPUBLIKY* [online]. 2012 [cit. 2012-11-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.uamk.cz/>>

- [LUPTON] Lupton J.: *RSSB Passive Safety Research. PASSIVE SAFETY OF RAIL VEHICLES*, Berlin 2005, ISBN 978-3-9810797-1-5
- [AVALLE] Avalle, M., Belingardi, G. & Montanini, R.: *Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram*. International Journal of Impact Engineering (2001) 25: 455–472.
- [PAULINO] Paulino, M., Teixeira-Dias, F.: *On the Use of Polyurethane Foam Paddings to Improve Passive Safety in Crashworthiness Applications*, Polyurethane, Dr. Fahmina Zafar (Ed.), ISBN: 978-953-51-0726-2, InTech (2012)
- [ESI-VPS] kolektiv autorů ESI Group: *Virtual Performance Solution 2010*, ESI Group ,Paris 2010
- [ESI-LS] kolektiv autorů ESI Group: *Lerning Solutions PAM-CRASH TRAINING* , ESI Group ,Paris 2010
- [KOPECKY] Kopecky K.: *Numerical Differentiation*, LECTURE NOTES FALL 2007
- [ATG] ATG - Advanced Technology Group: *iSPEED 2* [online]. 2013 [cit. 2013-09-6]. Dostupný z WWW: <<http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/VT/ispeed.pdf>>
- [RYDLO] Rydlo T.: *NÁVRH DEFORMAČNÍHO ČLENU PRO SIMULACI POJIŠŤOVACÍHO NÁRAZU VOZIDLA*, Diplomová práce, BRNO 2011
- [FIRST] First, J.: *Zkoušení automobilů a motocyklů*. SnT a FD ČVUT Praha, 2008
- [GM / RT2100] *Railway Group Standard GM/RT2100, Issue 3* [online]. 2013 [cit. 2013-02-13]. Dostupný z WWW: <[http://www.rgsonline.co.uk/Railway\\_Group\\_Standards/Rolling%20Stock/Railway%20Group%20Standards/GMRT2100%20Iss%204.pdf](http://www.rgsonline.co.uk/Railway_Group_Standards/Rolling%20Stock/Railway%20Group%20Standards/GMRT2100%20Iss%204.pdf)>
- [HOSNEDL2008] Eder, W. E.; Hosnedl, S.: *Design Engineering – A Manual for Enhanced Creativity*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida USA, 2008
- [HOSNEDL2010] Eder, W. E.; Hosnedl, S.: *Introduction to Design Engineering: Systematic Creativity and Management*. CRC Press / Balkema, Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands, 2010

## Seznam prací autora

Špirk, S.; Kepka, M.: *Advanced Passive Safety Research Focused on Rail Vehicles Interiors*. RAILWAYS2014, The Second International Conference on Railway Technology, 8-11 April 2014 Ajaccio - Corsica - France, ISSN 2049-5358

Kepka, M.; Heller, P.; Kemka, V.; Spirks, S.: *Examples of Public Research on Railway Vehicles in Czech Republic: Crashworthiness, Aerodynamics and Fatigue Life*. RAILWAYS2014, The Second International Conference on Railway Technology, 8-11 April 2014 Ajaccio - Corsica - France, ISSN 2049-5358

Čechová, H., Mañas, J., Špirk, S., Vychytil, J., Hynčík, L., Kovář, L., Kepka, M., Petřík, J., Kleisner, V., Špička, J.: *VIRTHUMAN - Universal Human Model for Transport Safety Applications*. Špičák, 2013.

Kovář, L., Mañas, J., Hynčík, L., Čechová, H., Špirk, S.: *VIRTHUMAN Scalable Virtual Human Model for Safety Applications*. Aschaffenburg, Německo, 2013.

Špirk, S., Čechová, H., Mañas, J., Hynčík, L.: *Virtual human model in low-g impact*. In Computational Mechanics 2013. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 1-2. ISBN: 978-80-261-0282-3

Špirk, S., Kemka, V., Kepka, M., Malkovský, Z.: *Design of a large Deformable Obstacle for Railway Crash Simulations According to the Applicable Standard*. Applied and Computational Mechanics, 2012, roč. 6, č. 1, s. 83-92. ISSN: 1802-680X

Špirk, S., Mañas, J., Kos, L., Kepka, M.: *Hybrid model of human body and its application in rail transport*. In Computational Mechanics 2012. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 1-2. ISBN: 978-80-261-0157-4

Kos, L., Mañas, J., Špirk, S., Čechová, H.: *VIRTHUMAN*. In Applied Mechanics 2012. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 97-100. ISBN: 978-80-261-0097-3

Mañas, J., Kovář, L., Petřík, J., Čechová, H., Špirk, S.: *Validation of Human Body Model VIRTHUMAN and its implementation in Crash Scenarios*. In Advances in Mechanisms Design. Dordrecht: Springer, 2012. s. 351-356. ISBN: 978-94-007-5124-8, ISSN: 2211-0984

Špirk, S., Mañas, J.: *Collision of standing occupant in railway vehicle*. In Computational Mechanics 2011 Extended abstracts. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 1-2. ISBN: 978-80-261-0027-0 Detail

Špirk, S., Kemka, V.: *Design of the large deformable obstacle*. In Computational mechanics 2010. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. ISBN: 978-80-7043-919-7 Detail

Špirk, S.; Barták, J.; Kemka, V.: *Experimental equipment for testing crashworthiness*. In CADAM 2008. Rijeka : Zigo Rijeka, 2008. s. 61-62. ISBN 978-953-7142-36-0.

Špirk, S.; Barták, J.; Kemka, V.: *Experimental equipment for testing crashworthiness*. In Advanced Engineering. 2008, roč.2, č.2, s.295-302, ISSN 1846-5900.

Špirk, S.; Barták, J.; Kemka, V.: *Concept design of experimental equipment for crashworthiness testing of rail and road vehicle components*. In GEP. 2008, roč.59, č.10-11, s.130-133, ISSN 0016-8572.

## Použité zkratky

3MS	3ms criterion (the Generalised Acceleration Model for Brain Injury)
ARB	Articulated Rigid Body
BW30	bandwidth Filtering
CFC	cross-frequency coupling filter
ČR	Česká republika
č.	číslo
DTM	Design Theory and Methodology
EDS	Engineering Design Science
EPSImax	maximální plastická deformace
fps	frames per second
HIC	Head Injury Criterion
HPC	Head Performance Criterion
kap.	kapitola
MBS	Multibody system
TTS	Theory of Technical Systems
UIC	International Union of Railways

## Seznam obrázků

Obr. 1 Ukázka železniční nehody, zdroj: [THE TELEGRAPH] .....	7
Obr. 2 Primární náraz .....	8
Obr. 3 Sekundární náraz .....	8
Obr. 4 Výsledky statistiky UIC .....	11
Obr. 5 Výsledky statistiky MDČR .....	11
Obr. 6 Poranění podle části těla v interiérech kolejových vozidel, zdroj: [LUPTON] .....	12
Obr. 7 Druhy poranění v interiérech kolejových vozidel, zdroj: [LUPTON] .....	12
Obr. 8 Poranění rozdělená dle závažnosti, zdroj: [LUPTON] .....	13
Obr. 9 Příčina poranění, zdroj: [LUPTON].....	14
Obr. 10 Rychlost nárazu cestujícího .....	15
Obr. 11 První části těla, u kterých dojde k poranění, zdroj: [EURAILS SAFE].....	16
Obr. 12 Poranění při sklopeném stolku, zdroj: [EURAILS SAFE] .....	17
Obr. 13 Čelní sezení se stolkem, zdroj: [EURAILS SAFE].....	17
Obr. 14 Kolize stojícího cestujícího, zdroj: [EURAILS SAFE] .....	18
Obr. 15 Příčné sezení cestujícího, zdroj: [EURAILS SAFE].....	18
Obr. 16 Četnost využití různých únikových cest .....	20
Obr. 17 Anatomie hlavy, zdroj: [EURAILS SAFE].....	21
Obr. 18 Náraz na plochý předmět, zdroj: [EURAILS SAFE] .....	22
Obr. 19 Náraz na tupý předmět, zdroj: [EURAILS SAFE].....	23
Obr. 20 Náraz na tupý předmět do obličejové části, zdroj: [EURAILS SAFE].....	23
Obr. 21 Anatomie krku, zdroj: [EURAILS SAFE] .....	23
Obr. 22 Mechanismy poranění krční páteře A) tenze- flexe B) osový náraz hlavy .....	25
Obr. 23 Anatomie břicha, zdroj: [EURAILS SAFE] .....	26
Obr. 24 Anatomie pánve, zdroj: [EURAILS SAFE].....	27

Obr. 25 Poranění pánve, zdroj: [EURAILS SAFE] .....	27
Obr. 26 Zlomeniny kostí, zdroj: [EURAILS SAFE] .....	28
Obr. 27 Typický průběh kritéria VC a jeho parametrů Y a dY/dt .....	31
Obr. 28 Limitní křivka poranění stehenní kosti, zdroj: [CHICOS 2006] .....	32
Obr. 29 MKP model sedadla .....	33
Obr. 30 Definovaný zatěžovací puls .....	34
Obr. 31 Varianta kolize při jednosměrném sezení s jedním cestujícím .....	35
Obr. 32 Varianta kolize při čelním sezení s jedním cestujícím .....	35
Obr. 33 Varianta kolize při čelním sezení s dvěma cestujícími .....	36
Obr. 34 Figurína Hybrid III v 50, 5, a 95 percentilní, zdroj: [EMERALDINSIGHT] .....	39
Obr. 35 Figurína EuroSID-1, zdroj: [BLOGSDERAULITO] .....	39
Obr. 36 Figurína BioRID, zdroj: [E-AUTONAPRAWA] .....	40
Obr. 37 ARB model figuríny Hybrid III tvořený soustavou tuhých těles .....	41
Obr. 38 FE model lidského těla vyvinutý firmou Toyota, zdroj: [FASTERMAG] .....	41
Obr. 39 „Rigid-FE“ model figuríny Hybrid III, zdroj: [LSTC] .....	42
Obr. 40 Proces vývoje Multibody struktury modelu „VIRTHUMAN“ .....	42
Obr. 41 Porovnání odezvy modelu „VIRTHUMAN“, figuríny Hybrid III a dobrovolníka (vlevo: síla v břišním pásu; vpravo: celkové zrychlení hlavy) .....	43
Obr. 42 Simulace kolize cestujícího ve fiktivním interiéru kolejového vozidla .....	44
Obr. 43 Porovnání zaoblení impaktorů; zleva: rádius 2mm, 5mm, 10mm .....	45
Obr. 44 Porovnání zaoblení impaktorů; zleva: rádius 20mm, 30mm, 50mm .....	46
Obr. 45 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy .....	46
Obr. 46 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy .....	47
Obr. 47 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy .....	47
Obr. 48 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy 3MS .....	48
Obr. 49 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy .....	49
Obr. 50 Vliv velikosti zaoblení na kritérium poranění hlavy 3MS .....	49
Obr. 51 Černá skříňka – Naznačený provozní transformační/technický proces (TrfP) .....	51
Obr. 52 Diagram relativní vhodnosti hodnocených situací .....	54
Obr. 53 Kolizní scénář s cestujícím sedícím ve směru zrychlení v tramvajovém vozidle .....	55
Obr. 54 Kolizní scénář s cestujícím sedícím v protisměru zrychlení v tramvajovém vozidle .....	55
Obr. 55 Model dřevěného sedadla .....	56
Obr. 56 Experimentální ověření nosnosti sedadla .....	56
Obr. 57 Průběh simulace při validaci sedadla .....	57
Obr. 58 Výsledky simulace pro validaci tramvajového sedadla, výsledky experimentu (zeleně), nevalidované sedadlo (modře), validované sedadlo (červeně) .....	57
Obr. 59 Model madla .....	58
Obr. 60 Vnitřní struktura madla .....	58
Obr. 61 Model konzoly .....	59
Obr. 62 Model konzoly s nastavci pod sedadlem .....	59
Obr. 63 Graf ze zkoušky tahem, materiál ocel S235 (x-true strain [-], y-true stress[GPa]) .....	60
Obr. 64 Model celého dvojsedadla .....	60
Obr. 65 Kompletní model – první kolizní scénář (pohled zepředu) .....	61
Obr. 66 Kompletní model – první kolizní scénář (pohled zezadu) .....	61
Obr. 67 Kompletní model – druhý kolizní scénář (pohled zepředu) .....	62
Obr. 68 Účinek čelního nárazu na protilehlé sedadlo .....	63
Obr. 69 Vyhodnocení zrychlení hlavy (magnitude) a kritéria poranění hlavy HIC, 3MS .....	63
Obr. 70 Rozfázovaný průběh kolize cestujícího v čase 300 ms .....	64
Obr. 71 Síly v krku v oblasti C1, vlevo: tahová síla, vpravo: smyková síla .....	64
Obr. 72 Účinek zadního nárazu .....	65

Obr. 73 Vyhodnocení zrychlení hlavy a kritéria poranění hlavy HIC – zadní náraz .....	65
Obr. 74 Rozfázovaný průběh kolize cestujícího v čase do 300 ms .....	66
Obr. 75 Síly v krku v oblasti C1, vlevo: tahová síla, vpravo: smyková síla .....	66
Obr. 76 Možné úpravy sedadla .....	67
Obr. 77 Kolizní scénář s cestujícím sedícím ve směru zrychlení v železničním vozidle.....	68
Obr. 78 Kolizní scénář s cestujícím sedícím v protisměru zrychlení v železničním vozidle...	68
Obr. 79 Kolizní scénář se stojícím cestujícím v železničním vozidle.....	69
Obr. 80 Ocelová konstrukce sedadla.....	69
Obr. 81 Kolizní scénář se stojícím cestujícím v železničním vozidle.....	70
Obr. 82 Kolizní scénář v interiéru železničního vozidla s cestujícím sedícím ve směru zrychlení .....	71
Obr. 83 Kolizní scénář v interiéru železničního vozidla s cestujícím sedícím v protisměru zrychlení .....	71
Obr. 84 Typická závislost napětí a poměrné deformace pěny (PUR, kvazistatika).....	72
Obr. 85 Použitá závislost napětí a poměrné deformace pěny (PUR) .....	73
Obr. 86 Navržené provedení experimentu .....	74
Obr. 87 Navržené provedení experimentu .....	75
Obr. 88 Porovnání tří měřených zrychlení z akcelerometru, vlevo: počáteční výška 500 mm vpravo: počáteční výška 880 mm.....	77
Obr. 89 Porovnání tří měřených posunutí impaktoru ve svislém směru měřených vysokorychlostní kamerou vlevo: počáteční výška 500 mm, vpravo: počáteční výška 880 mm .....	77
Obr. 90 Porovnání naměřených výsledků z akcelerometru (modře plnou čarou) s výsledky měření z rychlokamery (červeně přerušovanou čarou) počáteční výška 500 mm .....	78
Obr. 91 Průběh rychlosti impaktoru při volném pádu z výšky 500 mm (zeleně) a z výšky 880 mm (červeně), šedou čárkovanou čarou jsou naznačeny průběhy bez filtrace .....	79
Obr. 92 Náhled simulace vytvořené pro validaci pěnového materiálu .....	80
Obr. 93 Zrychlení impaktoru při počáteční výšce 880 mm; zeleně – nevalidovaný materiál; modře - výsledek experimentu; červeně – validovaný materiál.....	80
Obr. 94 Zrychlení impaktoru při počáteční výšce 500 mm; zeleně – nevalidovaný materiál; modře - výsledek experimentu; červeně – validovaný materiál.....	81
Obr. 95 Trajektorie pohybu cestujícího při působení zrychlení ve směru jízdy .....	82
Obr. 96 Vyhodnocení zrychlení hlavy (magnitude) a kritéria poranění hlavy HIC, 3MS .....	82
Obr. 97 Rozfázovaný průběh kolize cestujícího v čase 300 ms .....	83
Obr. 98 Síly v krku v oblasti C1, modře: tahová síla, červeně: smyková síla .....	83
Obr. 99 Síly ve stehenních kostech .....	84
Obr. 100 Výslednice zrychlení pánve .....	84
Obr. 101 Trajektorie pohybu cestujícího při působení zrychlení ve směru jízdy (vlevo), vyhodnocení zrychlení hlavy (magnitude) a kritéria poranění hlavy HIC15, 3MS (vpravo) ..	85
Obr. 102 Síly v krku v oblasti C1, modře: tahová síla, červeně: smyková síla.....	85
Obr. 103 Zpomalení vozidla při krizovém brzdění použité pro simulaci .....	87
Obr. 104 Rozfázovaný pohyb cestujícího v časech 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1030 ms .....	87
Obr. 105 Zrychlení těžiště hlavy při simulaci kolize cestujícího v pozici zády do směru jízdy .....	88
Obr. 106 Náhled modelovaného výřezu podlahy .....	88
Obr. 107 Simulace nárazu hlavy s poddajným modelem podlahy .....	89
Obr. 108 Komplettní model sloužící pro řešení .....	89

## Seznam tabulek

Tab. 1 Klasifikace tvarů předmětů .....	19
Tab. 2 Simulované varianty kolizí .....	34
Tab. 3 Výsledné hodnoty kritérií poranění.....	37
Tab. 4 Vlastnosti uvažovaných materiálů .....	48
Tab. 5 Vyhodnocení kritéria HIC .....	50
Tab. 6 Vyhodnocení kritéria 3MS .....	50
Tab. 7 Morfologická matice se záznamem situačních prvků provozního transformačního procesu a jejich konkretizace .....	52
Tab. 8 Morfologická matice se záznamem navržených variant ke stanoveným situacím s návrhem jejich kombinací.....	53
Tab. 9 Výčet hodnotících kritérií, jejich vah a variant ke stanoveným situacím s návrhem jejich hodnocení .....	53
Tab. 10 Výčet hodnotících kritérií, jejich vah a variant ke stanoveným situacím s návrhem jejich hodnocení .....	54
Tab. 11 Vlastnosti uvažovaných materiálů .....	59
Tab. 12 Vlastnosti uvažovaných materiálů .....	70
Tab. 13 Porovnání rychlostí nárazu získaných z měření a výpočtů .....	79
Tab. 14 Stanovení teoretické doby brzdění při různých počátečních rychlostech .....	86

## Seznam Příloh

1. Skript pro kontrolní výpočet kritéria poranění HIC15 v SW. Matlab
2. Kompletní výsledky kolize cestujícího ve fiktivním interiéru kolejového vozidla
3. Kompletní výsledky k simulaci účinku nárazu hlavy na různě zaoblený prvek interiéru
4. Výsledky k experimentálnímu ověření mechanických vlastností polyuretanové pěny