



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Ondřej Veselý

Ověření vlastností pasivní bezpečnosti elektrického
vozidla kategorie L7

Verification of passive safety properties of L7 electric
vehicle

Diplomová práce

2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K616.....Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Ondřej Veselý

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Ověření vlastností pasivní bezpečnosti elektrického vozidla kategorie L7**

Název tématu (anglicky): Verification of Passive Safety Properties of L7 Electric Vehicle

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Nastudujte specifika a legislativní požadavky vozidel kategorie L7.
- Proveďte rešerši dosud známých metodik testování pasivní bezpečnosti u těchto typů vozidel a navrhňte vhodnou metodiku pro ověření pasivní bezpečnosti lehkého městského elektromobilu konstruovaného na Fakultě dopravní ČVUT.
- Navrhňte a proveďte experiment na základě vytvořené metodiky ověřující dílčí vlastnosti pasivní bezpečnosti zkoumaného vozidla.
- Zhodnotte výsledky experimentu a výsledky podrobte diskuzi.
- Vypracujte závěr a doporučení pro další vývoj zmíněného vozidla.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucích práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: FIRST, Jiří a kol. Zkoušení automobilů a motocyklů: příručka pro konstruktéry. Vyd. 1. Praha: S&T CZ, 2008. 348 s. ISBN 978-80-254-1805-5.
Legislativa související s PB vozidel

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Josef Mík, Ph.D.

Ing. Josef Svoboda

Datum zadání diplomové práce:

22. června 2021

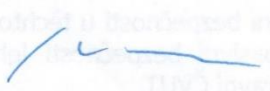
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce:

16. května 2022


- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

L. S.


.....
doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.

vedoucí

Ústavu dopravních prostředků


.....
prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.

děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


.....
Bc. Ondřej Veselý
jméno a podpis studenta

V Praze dne2. března 2022

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady či mi jiným způsobem vypomohli k vypracování této práce. Zvláště pak děkuji vedoucím mé bakalářské práce, pánům Ing. Josefu Míkovi, Ph.D. a Ing. Josefu Svobodovi, za odborné vedení a konzultování práce a za cenné rady, které mi poskytli během celého studia. Rovněž děkuji vstřícným školitelům z firmy SVS FEM s.r.o. za pomoc při práci na simulaci a všem svým kolegům, kteří se jakkoli podíleli na vývoji malého městského elektromobilu, jehož se má práce týká. Na závěr bych chtěl velice poděkovat rodičům, své přítelkyni a dalším blízkým jak za materiální, tak morální podporu po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

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

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

V Praze dne 16. 5. 2022



.....
podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Ověření vlastností pasivní bezpečnosti elektrického vozidla kategorie L7

Diplomová práce

Květen 2022

Bc. Ondřej Veselý

ABSTRAKT

Primárním cílem této práce je návrh metodiky testování pasivní bezpečnosti vozidel kategorie L7, společně s ověřením bezpečnosti na Fakultě dopravní vyvíjeného vozidla této kategorie, čehož je docíleno pomocí simulace nárazové zkoušky MKP v řešiči explicitní dynamiky LS-DYNA. Před tímto bylo však nutno zjistit jaká specifika se na tuto kategorii vozidel vztahují, zda a jaké zkoušky těchto vozidel jsou prováděny a následně prozkoumat jejich výsledky u vybraných vozidel na aktuálním trhu.

ABSTRACT

The primary goals of this thesis are to propose a methodology for testing the passive safety of L7 vehicles and safety verification of quadricycle which is currently being developed at our faculty. This is achieved by FEM crash-test simulation in an explicit dynamic solver LS-DYNA. Initially it was necessary to find out what specifications belong to this category of vehicles, whether and what tests of these vehicles are being made, and to examine results in these tests of selected vehicles on the current market afterwards.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vozidla kategorie L7, quadrimobil, pasivní bezpečnost, nárazové zkoušky, EuroNCAP, metodika, ověření bezpečnosti, simulace nárazu, explicitní dynamika, LS-DYNA, metoda konečných prvků (MKP)

KEY WORDS

L7 vehicles, quadricycle, passive safety, crash tests, EuroNCAP, methodology, safety verification, crash simulation, explicit dynamics, LS-DYNA, final element method (FEM)

OBSAH

| | |
|---|----|
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK | 8 |
| ÚVOD | 9 |
| 1 Kategorie homologace a její specifika | 10 |
| 1.1 Kategorizace konstruovaného vozidla..... | 10 |
| 1.2 Specifika a legislativní požadavky vozidel kategorie L7e-CP | 10 |
| 2 Navrhované komponenty vozidla a související legislativa..... | 12 |
| 2.1 Mechanismus řízení, bezpečnostní požadavky a související zkoušky..... | 12 |
| 2.2 Sedadla, bezpečnostní požadavky a související zkoušky | 13 |
| 3 Průzkum trhu s quadrimobily | 15 |
| 3.1 Renault Twizy | 15 |
| 3.1.1 Bezpečnostní výbava..... | 15 |
| 3.1.2 Technické údaje a rozměry..... | 16 |
| 3.2 Citroën Ami..... | 17 |
| 3.2.1 Bezpečnostní výbava..... | 17 |
| 3.2.2 Technické údaje a rozměry..... | 17 |
| 3.3 Tazzari Zero City | 18 |
| 3.3.1 Bezpečnost výbava..... | 19 |
| 3.3.2 Technické údaje a rozměry..... | 19 |
| 3.4 Aixam Crossover | 19 |
| 3.4.1 Bezpečnostní výbava..... | 20 |
| 3.4.2 Technické údaje a rozměry..... | 20 |
| 3.5 Chatenet CH40..... | 21 |
| 3.5.1 Bezpečnostní výbava..... | 21 |
| 3.5.2 Technické údaje a rozměry..... | 21 |
| 3.6 Microcar M.GO | 22 |
| 3.6.1 Bezpečnostní výbava..... | 22 |
| 3.6.2 Technické údaje a rozměry..... | 22 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.7 | Shrnutí průzkumu | 23 |
| 3.7.1 | Srovnání parametrů vozidel | 24 |
| 4 | Pasivní bezpečnost quadrimobilů na trhu | 25 |
| 4.1 | Specifika quadrimobilů z hlediska pasivní bezpečnosti | 25 |
| 4.2 | Testování v současnosti | 25 |
| 4.2.1 | Postupy zkoušek quadrimobilů dle EuroNCAP | 25 |
| 4.2.2 | Testované modely společností EuroNCAP | 26 |
| 4.2.3 | Výsledky provedených zkoušek EuroNCAP | 26 |
| 4.2.4 | Porovnání poskytnuté ochrany posádky | 30 |
| 4.2.5 | Případy reálných nehod vozu Citroën AMI | 32 |
| 5 | Návrh metodiky testování quadrimobilů | 34 |
| 5.1 | Motivace k návrhu komplexní metodiky | 34 |
| 5.2 | Předlohy navržené metodiky | 34 |
| 5.3 | Metodika testování pasivní bezpečnosti pomocí nárazových zkoušek | 34 |
| 5.3.1 | Zkouška čelním nárazem do deformovatelné bariéry | 35 |
| 5.3.2 | Zkouška čelním nárazem do tuhé bariéry | 39 |
| 5.3.3 | Zkouška bočním nárazem | 41 |
| 5.3.4 | Zkouška přesazeným čelním nárazem protijedoucích vozidel | 44 |
| 5.3.5 | Závěr návrhu metodiky a výsledné hodnocení | 48 |
| 6 | Ověření bezpečnosti vyvíjeného vozidla | 49 |
| 6.1 | Příprava modelu | 50 |
| 6.1.1 | Tvorba sítě | 50 |
| 6.1.2 | Navázání částí rámu do celku | 51 |
| 6.1.3 | Navázání ostatních dílů | 53 |
| 6.1.4 | Tvorba materiálových modelů | 55 |
| 6.1.5 | Tvorba bariéry | 57 |
| 6.1.6 | Tvorba sekcí elementů | 57 |
| 6.1.7 | Výsledek příprav | 58 |
| 6.2 | Nastavení parametrů simulace | 58 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.3 | Vyhodnocení..... | 60 |
| 6.3.1 | Vyobrazení průběhu deformací na konstrukci | 60 |
| 6.3.2 | Naměřené hodnoty | 65 |
| 6.3.3 | Vykreslení průběhu napětí | 67 |
| 6.3.4 | Ověřovací náraz se zvýšenou rychlostí..... | 69 |
| 7 | Diskuse výsledků a návrh doporučení | 71 |
| 7.1 | Diskuse výsledků..... | 71 |
| 7.2 | Diskuse přesnosti simulace | 72 |
| 7.3 | Doporučení pro další vývoj quadrimobilu | 73 |
| 7.3.1 | Přepracování sloupku řízení | 73 |
| 7.3.2 | Montáž výztuhy předního nárazníku s absorbérem energie | 74 |
| | ZÁVĚR | 75 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 77 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 81 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 84 |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| | |
|-------|--|
| EHK | Evropská hospodářská komise |
| EU | Evropská unie |
| FEM | Final Element Method |
| FMVSS | Federal Motor Vehicle Safety Standards |
| HIC | Head Injury Criterion |
| MKP | Metoda konečných prvků |
| MPDB | Mobile Progressive Deformable Barrier |
| OBD | On-Board Diagnostics |
| ODB | Offset Deformable Barrier |
| OSN | Organizace spojených národů |
| TI | Tibia Index |
| VC | Viscous Criterion |

ÚVOD

Trh s vozidly kategorie L7 zažívá v současnosti znatelný růst související se zvýšenou poptávkou po kompaktních městských vozidlech. Ta mohou nabídnout za přijatelnou pořizovací cenu komfort uzavřeného prostoru, nízkou prostorovou náročnost, dostatečnou hbitost a nízké provozní náklady. Naopak slabou stránku quadrimobilů představuje úroveň nabízené ochrany posádky v případě nehody. Pasivní bezpečnost je však velice podstatným parametrem vozidla. Mě osobně tato oblast velice zajímá, což zapříčinilo, že jsem se dané problematice podrobně věnoval již ve své bakalářské práci s názvem *Pasivní bezpečnost elektromobilů*. Na získané znalosti jsem nyní navázal v diplomové práci zabývající se ověřením pasivní bezpečnosti elektrického quadrimobilu vyvíjeného na Fakultě dopravní, který je nyní ve fázi výroby.

Hlavním cílem práce je návrh komplexní metodiky testování pasivní bezpečnosti vozidel kategorie L7 a na ni navazující tvorba scénáře vhodného experimentu. Skutečnost, že je výroba vyvíjeného quadrimobilu zamýšlena maximálně v několika kusové malosérii, kdy by bylo uskutečnění reálné nárazové zkoušky nadměrně nákladné, je důvodem, proč bylo s cílem verifikace jeho dílčích vlastností pasivní bezpečnosti přistoupeno k provedení nárazové zkoušky pomocí virtuální simulace.

V úvodu práce je provedena legislativní kategorizace vyvíjeného vozidla a jsou řešena specifika zvolené kategorie pro následnou možnost homologace vozu. Rovněž jsou v této části práce prostudovány legislativní požadavky na komponenty úzce související s pasivní bezpečností, které byly vybrány pro použití ve vyvíjeném quadrimobilu. Dále dochází k průzkumu trhu s quadrimobily a rešerši výsledků nárazových zkoušek provedených společnostmi EuroNCAP s cílem poukázat na aktuální úroveň nabízené ochrany a odhalení největších bezpečnostních slabin.

Následující kapitoly popisují návrh metodiky testování pasivní bezpečnosti pomocí sady nárazových zkoušek a scénáře vhodného k virtuálnímu provedení jedné z nich. Následuje podrobná příprava modelu konstrukce vyvíjeného vozidla, nastavení nezbytných okrajových podmínek a dalších parametrů simulace.

V závěru práce dochází k vyhodnocení simulace nárazové zkoušky a analýze navrženého konstrukčního řešení rámu vyvíjeného vozidla. Jednotlivé poznatky jsou shrnuty v diskusi výsledků, a to včetně doporučení pro následný vývoj quadrimobilu.

1 Kategorie homologace a její specifika

1.1 Kategorizace konstruovaného vozidla

Malý městský elektromobil vyvíjený na Fakultě dopravní ČVUT v Praze je navrhován s ohledem na následnou možnost homologace jako vozidlo kategorie L7, konkrétně L7e-CP. Jedná se o těžký quadrimobil určený pro přepravu osob. Pohon vozidla zajišťuje elektromotor. Elektrická energie je uchovávána ve výměnných bateriových boxech umístěných v podlaze mezi nápravami. Aktuální návrh počítá s dvojicí bateriových boxů umístěných po jednom na každé straně, s následnou možností navýšení kapacity o shodný pár. Typ pohonu však kategorizaci nijak neovlivňuje. Kategorie L7 byla zvolena z několika důvodů. Prvním z nich plynoucím z provedené rešerše bylo, že většina podobných městských vozidel je homologována právě v této kategorii. Druhým důvodem byly pro naši stavbu vyhovující parametry i legislativní požadavky na pasivní bezpečnost této kategorie.

Kategorizace vozidla byla provedena dle Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 168/2013 ze dne 15. ledna 2013 „*O schvalování dvoukolových nebo tříkolových vozidel a čtyřkolek a doзору nad trhem s těmito vozidly*“, článku 4.

Kategorie vozidel L – motocykly (zahrnuje dvoukolová, tříkolová i čtyřkolová vozidla);

- vozidla kategorie L7e – těžké čtyřkolky;
 - vozidla kategorie L7e-C – těžké quadrimobily;
 - vozidla kategorie L7e-CP – těžké quadrimobily určené pro přepravu osob. [5]

1.2 Specifika a legislativní požadavky vozidel kategorie L7e-CP

Specifické požadavky kategorie L7e-CP včetně maximálních rozměrů, parametrů pohonného ústrojí apod. jsou čerpány přímo z Nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 168/2013 a jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

Rozměry a hmotnost:

- délka ≤ 3700 mm;
- šířka ≤ 2000 mm;
- výška ≤ 2500 mm;
- provozní hmotnost ≤ 450 kg.

Pohonné ústrojí:

- výkon motoru ≤ 15 kW;
- maximální konstrukční rychlost ≤ 90 km/h.

Výbava k zajištění funkční bezpečnosti:

- zvukové výstražné zařízení;
- zasklení, stěrače a ostřikovače čelního skla, včetně odmlžovacích a odmrazovacích zařízení;
- osvětlení a zařízení světelné signalizace, včetně automatického zapnutí osvětlení;
- bezpečnostní pásy a odpovídající kotevní úchyty na ně;
- protiblokovací brzdné zařízení;
- pneumatiky.

Ostatní požadavky:

- kompaktnost konstrukce vozidla;
- nutnost poskytovat uzavřený prostor pro řidiče a cestující přístupný nejvýše ze tří stran;
- maximální počet míst pro přepravu osob čtyři, včetně místa řidiče;
- požadavky na ochranu posádky, včetně vnitřní výbavy a dveří vozidla – vyhovující výčnělky interiéru, zámky a závěsy dveří;
- zařízení zajišťující bezpečné projetí ostré zatáčky (diferenciál apod.);
- palubní diagnostický systém OBD minimálně úrovně jedna (platí pro všechna vozidla kategorie L7e-C);
- hladina akustického tlaku ≤ 80 dB;
- nájezd po dobu životnosti vozidla $\leq 20\,000$ km;
- zkouška pro zjištění a oznámení spotřeby energie. [5]

2 Navrhované komponenty vozidla a související legislativa

Tato kapitola pojednává o legislativních požadavcích na vybírané komponenty vyvíjeného quadrimobilu úzce související s pasivní bezpečností vozu, která je hlavním tématem této práce. Konkrétně se jedná o mechanismus řízení a sedadla.

2.1 Mechanismus řízení, bezpečnostní požadavky a související zkoušky

Na mechanismus řízení jsou z hlediska bezpečnosti kladeny vysoké požadavky. Při čelním nárazu dochází téměř vždy ke kontaktu těla řidiče s komponenty řízení, jenž je pro tyto případy testováno třemi nárazovými zkouškami. Legislativní požadavky jsou popsány v předpisu EHK/OSN č.12.

Zkouška nárazem do bariéry je prováděna s cílem analýzy zpětného pohybu řídicího ústrojí dle EHK č.12. Zde je stanovena metodika nárazové zkoušky, která říká, že je neobsazené vozidlo o pohotovostní hmotnosti čelně urychleno proti nedeformovatelné bariéře s cílovou rychlostí nárazu 48,3 km/h. Při nárazu je sledován vodorovný a horizontální posuv horní části sloupku řízení směrem k řidiči, který nesmí přesáhnout 127 mm, a to ani v jednom ze směrů.

Pro eliminaci ohrožení řidiče nadměrným vychýlením hřídele je využíváno třech principů:

- zkracování délky hřídele volantu – pomocí deformačního členu;
- rozpojení hřídele volantu – dělený hřídel;
- vybočení hřídele volantu – vícedílný lomený hřídel s klouby.

Druhou zkouškou prováděnou dle EHK je zkouška nárazu torza figuríny na řídicí ústrojí vlivem setrvačných účinků. Při zkoušce je maketa torza řidiče vržena proti volantu rychlostí 24,1 km/h a vyšší, celkem ve dvou polohách volantu. V první části testu je volant natočen kolmo k bodu očekávaného styku svou nejpevnější příčkou, v druhém případě svou nejpružnější částí. Zkouška je vyhodnocena jako úspěšná v případě, že síla na torze nepřesáhne 11,1 kN.

Poslední zkouškou prováděnou k ověření bezpečnosti mechanismu řízení je zkouška nárazem hlavice simulující náraz hlavy do volantu. V tomto případě je impaktor osazený dvěma akcelometry urychlen 24,1 km/h proti čtyřem specifickým lokalitám volantu. Jedná se o střed náboje volantu, bod napojení ramene s nejvyšší tuhostí, střed nejkratšího nepodepřeného oblouku a místo dle schvalovacího orgánu nejméně příznivé. Za výsledky jsou považovány průměry hodnot osazených akcelerometrů, kdy nesmí být přesažena hodnota zpomalení po dobu 3 ms 80 g a maximálního zpomalení 120 g. Současně při veškerých zkouškách nemůže dojít k výskytu ostré či drsné hrany na ovládacím prvku a rovněž zde nemůže být nevyhovující hrana lokalizována ani před započítáním testu. [1, 2, 3]

2.2 Sedadla, bezpečnostní požadavky a související zkoušky

Sedadlo je oporou naprosté většiny váhy těla při cestování automobilem a dle toho musí být konstruováno. Konkrétně se jedná o 64-72 % hmotnosti u sedáku, opěradlo přenáší 4-16 % a pouze zbylých 15-22 % je přenášeno jinak, tedy místem podepření dolních končetin podlahou vozu. Na konstrukci sedadel jsou z těchto důvodů kladeny vysoké anatomické požadavky, jakými jsou tvárnost a měrné tlaky v různých částech, dále požadavky fyziologické (především prodyšnost) a přenosové, tedy přenos vibrací a jejich tlumení.

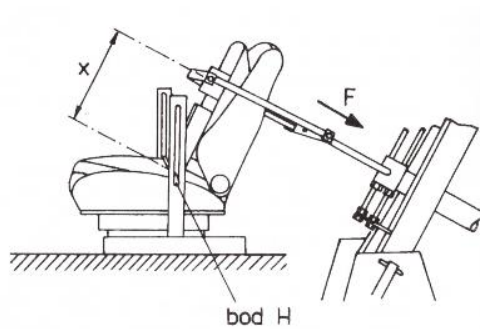
Sedadla ve voze jsou důležitým prvkem pro zajištění bezpečnosti posádky, a to jak bezpečnosti aktivní, tak i pasivní. Z hlediska aktivní bezpečnosti je důležitý zejména komfort řidiče umožňující jeho plné soustředění. Z hlediska pasivní bezpečnosti je v případě nárazu podstatná opora sedadel, kdy sedadlo a hlavová opěrka ovlivňují míru poranění pasažéra v oblasti páteře. Nejčastějším poraněním při těchto typech nárazů je poranění krční páteře nebo páteře v oblasti beder.

Jsou rozeznávány tři typy hlavových opěrek z hlediska jejich konstrukce a upevnění:

- integrální – opěrky tvořené horní částí opěradla, opěradlo sedadla i opěrka hlavy jsou jeden celek (ze zmíněných vozidel v průzkumu trhu například ve voze Citroën Ami či sedadlo řidiče vozu Renault Twizy);
- oddělitelné – opěrky snadno oddělitelné a případně nastavitelné, uchycené do opěradla sedadla (například u vozů Aixam, Tazzari apod.);
- samostatné – opěrky zcela či částečně upevněné mimo opěradlo sedadla (zadní sedadlo quadrimobilu Renault Twizy). [1, 3]

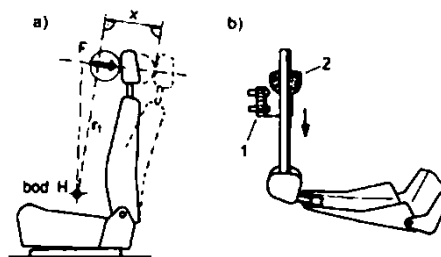
Na sedadla a opěrky hlavy se vztahují předpisy EHK/OSN č.17 – „*Jednotná ustanovení pro schvalování typu vozidel z hlediska sedadel, jejich ukotvení a opěrek hlavy*“ a č. 25 – „*Jednotná ustanovení o schvalování opěrek hlavy, bez ohledu na to, zda jsou součástí sedadla*“. Dále také směrnice EHS a normy ISO.

Předpis EHK/OSN č. 17 uvádí jaké zkoušky jsou prováděny pro ověření pevnosti konstrukce sedadel a jejich seřizovacího a blokovacího mechanismu včetně upevnění do podlahy vozu. Konkrétně je pevnost testována statickou zkouškou na testovacím stavu nebo přímo v karoserii vozidla momentem o velikosti 530 Nm vůči H-bodu (obrázek 1), kdy je opěradlo sedadla blokováno ve sklonu 25° od svislé roviny. Konstrukce sedadla i blokovací zařízení musí této síle odolat beze změn na funkci a nesmí dojít k deformacím, které by mohly způsobit zranění posádky.



Obrázek 1 - Stav statické zkoušky sedadla dle EHK/OSN č.17 [2]

EHK/OSN č.25 stanovuje podmínky pevnosti a geometrické charakteristiky opěrek sedadel, čímž úzce souvisí s výše zmíněným předpisem č. 17. Dle tohoto předpisu jsou také kontrolovány rozměry hlavových opěrek a jejich umístění vzhledem k H-bodu. Na základě těchto podmínek je prováděna statická zkouška zachycená na obrázku 2a. Při této zkoušce působí na opěrku kulová hlavice o průměru 165 mm vzhledem k H-bodu momentem 374 Nm, kdy deformace nesmí překročit hodnotu posuvu 102 mm. Dále je zatížení zvyšováno až na sílu 885 N, kdy nesmí dojít k poruše opěrky ani jejího uchycení. Dle tohoto předpisu je prováděna také další zkouška, schematicky vyobrazená na obrázku 2b. V tomto případě je kulová hlavice urychlena na 24,1 km/h vůči hlavové opěrce, přičemž je měřen průběh zrychlení a tím kontrolována pohltivost nárazové energie opěrkou. Zde nesmí hodnota překročit 80 g po dobu 3 ms, a zároveň není pro splnění zkoušky možno, aby se na sedadle či opěrce hlavy vyskytla poškození ohrožující bezpečnost posádky. [1, 2]



Obrázek 2 - Zkoušky opěrky hlavy prováděné dle EHK/OSN č.25 [2]

3 Průzkum trhu s quadrimobily

V současnosti, ač to možná ještě není na tuzemských silnicích tolik patrné, zaznamenává celosvětově trh s quadrimobily vozidly velký růst. Důvody nárůstů produkce malých městských vozidel jsou především snaha o úsporu místa ve městech při zachování ochrany před povětrnostními vlivy, kapacitního převozního prostoru a snížení nákladů na provoz. S tím úzce souvisí fakt, že je stále více vozidel této kategorie poháněno elektrickými motory. Úspora výdajů se rovněž týká i samotných výrobců, vlivem čehož dochází k vývoji těchto malých vozidel u stále více společností, včetně renomovaných evropských automobilek, a nejedná se pouze o asijské produkty. Výběr vozů do výčtu níže je zacílen na vozidla prodávaná na českém trhu a částečně výběr ovlivnily také novinky v této kategorii. Především jsou do výčtu zařazeny modely, které v minulosti prošly testováním pasivní bezpečnosti společností EuroNCAP nebo přinejmenším modely na ně navazující. Průzkum trhu je proveden s cílem následného porovnání výsledků nabízených vozidel a odhalení slabých stránek quadrimobilů.

3.1 Renault Twizy

Jedním z prvních výrobců osobních automobilů, který začal sériově prodávat těžké quadrimobily je francouzský Renault. Jeho zajímavý dvoumístný model Twizy, ve kterém sedí spolujezdec za řidičem, a ne tradičně vedle něho, vstoupil na domácí trh již v roce 2012. V České republice se však jeho prodej spustil společně s modely Zoe a Kangoo Z.E. až v roce 2018. V současnosti jej výrobce ve svém oficiálním ceníku nabízí na našem trhu v jediné výbavě nazývané „Urban 80“ za 349 tisíc korun s další volitelnou výbavou k přikoupení. [6, 7]

3.1.1 Bezpečnostní výbava

Co se týče prvků pasivní bezpečnosti, tento výbavový stupeň obsahuje airbag řidiče, 4 bodové bezpečnostní pásy vpředu a 3 bodové vzadu, což je jistě kladem, ale například boční dveře jsou překvapivě součástí příplatkové výbavy. Konstrukce sedadla je na místě řidiče vyřešena integrovanou hlavovou opěrkou do nepolohovatelného opěradla sedačky, kdy je umožněn pouze posun celého sedadla. Na místě spolujezdce je jak sedák, tak opěradlo včetně opěrky hlavy přímo součástí konstrukce vozu, a není tak možno žádného nastavení. Protože je tento model automobilky Renault jedním z testovaných quadrimobilů dle EuroNCAP, bude úroveň jeho bezpečnosti podrobněji rozebrána v kapitole 4.2.3. [6]

3.1.2 Technické údaje a rozměry

Technické parametry jsou přehledně zachyceny v tabulce 1, rozměry vozu jsou zakresleny v obrázku 3. Průměr otáčení tohoto kompaktního vozidla činí pouze 6,8 metru.

Tabulka 1 - Technické údaje Renault Twizy [6, 8]

| | | |
|-------------------|---------------------------|--------------------------|
| Motor | Typ | Asynchronní elektromotor |
| | Maximální výkon [kW] | 13 |
| | Max. točivý moment [Nm] | 57 |
| Akumulátor | Typ | Li-ion |
| | Jmenovité napětí [V] | 48-58 |
| | Kapacita [kWh] | 6,1 |
| Dynamika | Maximální rychlost [km/h] | 80 |
| | Zrychlení 0-45 km/h [s] | 6,1 |
| | Přibližný dojezd [km] | 100 |
| Jiné | Míst k sezení | 2 (za sebou) |
| | Poháněná náprava | Zadní |



Obrázek 3 - Rozměry Renault Twizy [6]

3.2 Citroën Ami

Dalším francouzským výrobcem osobních automobilů prodávajících i quadrimobily je Citroën. Citroën na rozdíl od Renaultu přichází s tradičnější koncepcí, kdy sedí posádka vedle sebe, design tohoto vozu však všední rozhodně není. Nejzajímavějším faktem je jistě snaha o úsporu nákladů pomocí identických dílů na různých stranách vozidla. Konkrétně je totožný přední a zadní panel, kde jsou osazeny pouze rozdílné světlomety, a ještě pozoruhodnější jsou zcela shodné dveře včetně jejich uchycení. To způsobuje, že jsou dveře na jedné straně otevírány klasicky s pantem vpředu, a naopak na druhé straně proti směru jízdy, tedy s pantem vzadu. Tento vůz je, společně se svým „pokrevním bratrem“ Opel Rocks-e, na českém trhu čerstvou novinkou a pořídit si ho lze už od přibližně 200 tisíc Kč. Tím se řadí mezi nejdostupnější quadrimobily na trhu, což bylo jedním z hlavních cílů výrobce už při samotném vývoji. Design popsaného vozu lze vidět na obrázku 4. [9, 10]



Obrázek 4 - Citroën Ami [11]

3.2.1 Bezpečnostní výbava

Citroën cílí v porovnávání bezpečnosti modelu Ami spíše k jednostopým vozidlům, ke kterým se blíží i cenovou politikou a úrovní požadovaného řidičského oprávnění. Vůči nim může samozřejmě nabídnout ochranu posádky v uzavřeném prostoru nejen vůči povětrnostním vlivům, ale rovněž i svobodu pohybu bez rizika pádu. Co se týče prvků zvyšujících pasivní bezpečnost, u tohoto modelu jich bohužel není příliš mnoho, základní zde ale nalezneme. Vozidlo je vybaveno klasickými 3 bodovými bezpečnostními pásy na obou sedadlech, airbagem vybaveno však není ani na místě řidiče. Sedadla jsou použita na obou místech jednodílná včetně integrované hlavové opěrky, jediné nastavení je umožněno posuvem, a to pouze u sedačky řidiče. [9, 10, 11]

3.2.2 Technické údaje a rozměry

Technické parametry a rozměry jsou přehledně zachyceny v tabulkách 2 a 3.

Tabulka 2 – Technické údaje Citroën Ami [10, 11, 12]

| | | |
|-------------------|---------------------------|------------|
| Motor | Typ | Elektrický |
| | Maximální výkon [kW] | 6 |
| Akumulátor | Typ | Li-ion |
| | Kapacita [kWh] | 5,5 |
| Dynamika | Maximální rychlost [km/h] | 45 |
| | Zrychlení 0-45 km/h [s] | ~ 7,5 |
| | Přibližný dojezd [km] | 70 |
| Jiné | Míst k sezení | 2 |
| | Poháněná náprava | Přední |

Tabulka 3 - Rozměry Citroën Ami [10, 11, 12]

| | |
|---------------------|------|
| Délka [mm] | 2410 |
| Šířka [mm] | 1390 |
| Výška [mm] | 1520 |
| Průměr otočení [mm] | 7200 |

3.3 Tazzari Zero City

Na rozdíl od zmíněných výrobců osobních automobilů, nyní rozšiřujících svoje působení směrem malých městských vozidel, je italské Tazzari značkou orientující se na malá městská vozidla již od samého začátku. Jedním z posledních modelů značky, představených roku 2017, je právě Zero City homologované rovněž ve třídě L7e navazující na předchozí úspěšné modely Zero. Tento model začíná na ceně přibližně 425 tisíc korun, avšak s menším bateriovým boxem, tedy nižším dojezdem oproti o 60 tisíc korun dražšímu modelu s příplatkovými bateriemi jehož parametry jsou použity ke srovnání. Tyto ceny byly převzaty z oficiálního konfigurátoru na stránkách výrobce. Vůz je vyobrazen na obrázku 5. [13, 14]



Obrázek 5 - Tazzari Zero City [14]

3.3.1 Bezpečnost výbava

Podobně jako výše zmíněný Citroën Ami, i Tazzari Zero City nabízí 3 bodové bezpečnostní pásy na obou místech pro posádku a rovněž shodně není vybaveno žádným airbagem. Navíc je u Tazzari možnost příplatku za osazení systému ABS, který zvyšuje aktivní bezpečnost. Dalším pozitivem jsou použité sedačky, u kterých je na rozdíl od výše zmíněných vozidel umožněno samotné nastavení jak opěradla, tak hlavové opěrky. To zvyšuje komfort jízdy i stupeň ochrany krční páteře v případě nárazu. I na tento model se díky zkouškám pasivní bezpečnosti jeho předchůdce Tazzari Zero společností EuroNCAP zaměříme důkladněji v kapitole 4 níže. [13, 14]

3.3.2 Technické údaje a rozměry

Technické parametry a rozměry jsou přehledně zaznamenány v tabulkách 4 a 5.

Tabulka 4 - Technické údaje Tazzari Zero City [13]

| | | |
|-------------------|---------------------------|--------------------------|
| Motor | Typ | Asynchronní elektromotor |
| | Maximální výkon [kW] | 15 |
| Akumulátor | Typ | LiFePO4 |
| | Kapacita [kWh] | 14 |
| Dynamika | Maximální rychlost [km/h] | 90 |
| | Zrychlení 0-45 km/h [s] | ~ 5 |
| | Přibližný dojezd [km] | 150 |
| Jiné | Míst k sezení | 2 |
| | Poháněná náprava | Zadní |

Tabulka 5 - Rozměry Tazzari Zero City [13]

| | |
|------------|------|
| Délka [mm] | 2795 |
| Šířka [mm] | 1500 |
| Výška [mm] | 1450 |

3.4 Aixam Crossover

Výrobce Aixam patří na českém trhu již několik let mezi stálice v kategorii quadrimobilů. Nabízí poměrně širokou škálu vozidel, a to jak se spalovacím, tak i elektrickým motorem. Těží zejména z možnosti řízení jeho modelů mladistvými. Z tohoto důvodu je maximální rychlost těchto vozidel legislativně omezena na 45 km/h. Oblíbenost výrobce Aixam v České republice je jednou z příčin zařazení jejich modelu do tohoto výčtu. Model Crossover byl roku 2016 rovněž jedním z testovaných. Jednalo se konkrétně o Crossover GTR. K výčtu specifik vozu však poslouží novější, nyní nabízený, Crossover Premium (jiný stupeň výbavy) zachycený na obrázku 6. Cena popisovaného modelu na českém trhu začíná na 435 000 Kč. Pro možnost

porovnání bezpečnosti vozidel s různými druhy pohonu se jedná o quadrimobil se spalovacím vznětovým motorem. Ten byl osazen i v testovaném voze při nárazových zkouškách. [15]



Obrázek 6 - Aixam Crossover Premium [15]

3.4.1 Bezpečnostní výbava

I společnost Aixam usiluje o bezpečnost svých vozů, z tohoto důvodu jsou vozy vybaveny tříbodovými bezpečnostními pásy, rámovou konstrukcí z extrudovaného hliníku, vyztuženými dveřmi a nárazníky či například automatickým spuštěním výstražných světel při náhlém brždění již ve standardní výbavě. Rovněž ve voze nalezneme sedadla s nastavitelnými opěradly i opěrkami hlavy ve standardní výbavě. Systém ABS je možno dokoupit v rámci příplatkové výbavy za 14 900 Kč. [15]

3.4.2 Technické údaje a rozměry

Technické parametry a rozměry jsou přehledně zachyceny v tabulkách 6 a 7.

Tabulka 6 - Technické údaje Aixam Crossover Premium [15]

| | | |
|-----------------|--------------------------------|----------|
| Motor | Typ | Vznětový |
| | Počet válců | 2 |
| | Obsah válců [cm ³] | 479 |
| | Maximální výkon [kW] | 6 |
| | Max. točivý moment [Nm] | 21 |
| Dynamika | Maximální rychlost [km/h] | 45 |
| | Přibližný dojezd [km] | 500 |
| Jiné | Míst k sezení | 2 |
| | Poháněná náprava | Přední |

Tabulka 7 - Rozměry Aixam Crossover Premium [15]

| | |
|---------------------|------|
| Délka [mm] | 3000 |
| Šířka [mm] | 1500 |
| Průměr otočení [mm] | 8000 |

3.5 Chatenet CH40

Francouzský výrobce Chatenet měl také ve výběru společnosti EuroNCAP své zastoupení modelem CH30, a právě z tohoto důvodu byl do výběru zařazen jeho nástupce CH40, který je aktuálně na trhu. Společnost Chatenet je obdobou společností Aixam či Ligier. Všechny je lze charakterizovat tím, že se soustředí výhradně na vozidla pro mladistvé, které lze v České republice s patřičným řídičským oprávněním řídit již od 15 let. S tím souvisí i fakt, že zde má tento výrobce oficiální zastoupení, a tak si u nás lze jeden z modelů automobilky jednoduše pořídit. Shodně jako u Aixamu, je i vůz CH40 poháněn vznětovým agregátem, a to z jasného důvodu. Na rozdíl od předešlého výrobce totiž Chatenet žádný elektrický model nenabízí. [16]

3.5.1 Bezpečnostní výbava

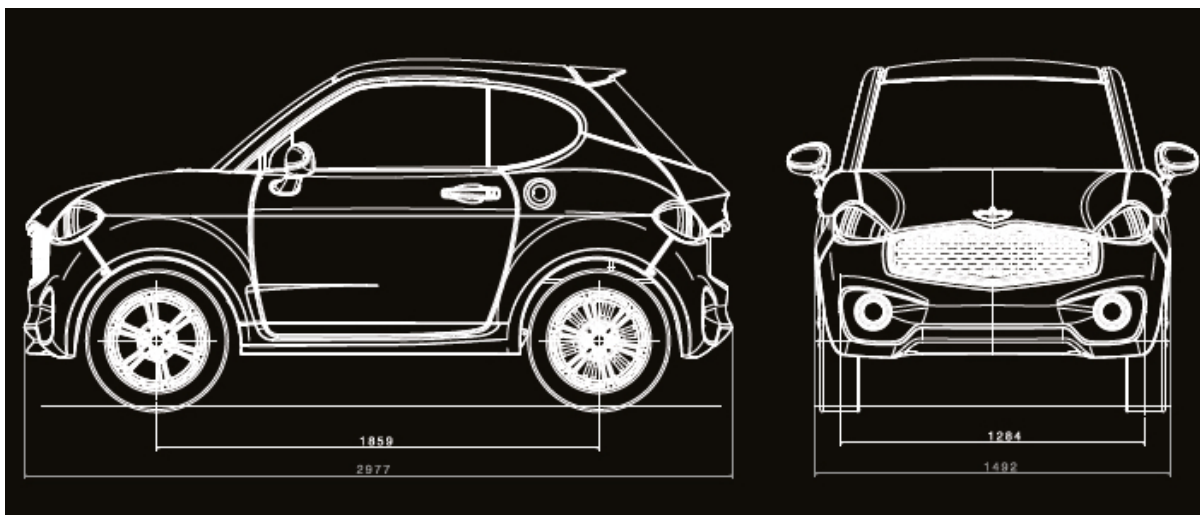
Bezpečnostní výbava vozu je takřka shodná s výbavou popsaného vozu Aixam. Chatenet také nabízí tříbodové bezpečnostní pásy i nastavitelná sedadla včetně opěrek hlavy na obou místech pro posádku. Díky extrudované hliníkové konstrukci se vozy tohoto francouzského výrobce dají zařadit mezi nejbezpečnější ve své kategorii, na to se však zaměřuji podrobně až následně při vyhodnocování nárazových zkoušek. Na rozdíl od vozů Aixam bohužel nebyla nalezena informace, zda jsou tyto vozy vybaveny ABS, nebo zda ho lze přikoupit. [16]

3.5.2 Technické údaje a rozměry

Technické parametry a rozměry jsou přehledně zachyceny v tabulkách 8 a 9 a na obrázku 7.

Tabulka 8 - Technické údaje Chatenet CH40 [16, 17]

| | | |
|-----------------|--------------------------------|----------|
| Motor | Typ | Vznětový |
| | Počet válců | 2 |
| | Obsah válců [cm ³] | 480 |
| | Maximální výkon [kW] | 6 |
| Dynamika | Maximální rychlost [km/h] | 45 |
| | Přibližný dojezd [km] | 500 |
| Jiné | Míst k sezení | 2 |
| | Poháněná náprava | Přední |



Obrázek 7 – Kótované rozměry Chatenet CH40 [16]

Tabulka 9 - Rozměry Chatenet CH40 [16, 17]

| | |
|---------------------|------|
| Délka [mm] | 2977 |
| Šířka [mm] | 1492 |
| Výška [mm] | 1457 |
| Průměr otočení [mm] | 8000 |

3.6 Microcar M.GO

Výrobce Microcar spadá pod Ligier Group, tedy možná pro mnohé známější společnost soustředící se na odvětví mikro aut. Model M.GO byl do tohoto výčtu zvolen z důvodu, že také došlo k jeho zkoušení společností EuroNCAP. Mezi zkoušenými vozy navíc zaujal tím, že je vybaven volantovým airbagem, a i přes to si v těchto testech nevedl nejlépe. Pohon je zajištěn vznětovým dvouválcovým motorem firmy Lombardini, kterým je osazena většina modelů nejen společnosti Ligier Group. Design vozu je zachycen na obrázku 8 níže. [18]

3.6.1 Bezpečnostní výbava

Duralový monolitický rám s výztuhami, zesílené přední a zadní nárazníky, nastavitelná sedadla včetně hlavových opěrek, bezpečnostní pásy. [18]

3.6.2 Technické údaje a rozměry

Technické parametry a rozměry jsou přehledně zachyceny v tabulkách 10 a 11.

Tabulka 10 - Technické údaje Microcar M.GO [18]

| | | |
|-----------------|--------------------------------|----------|
| Motor | Typ | Vznětový |
| | Počet válců | 2 |
| | Obsah válců [cm ³] | 478 |
| | Maximální výkon [kW] | 6 |
| | Max. točivý moment [Nm] | 26 |
| Dynamika | Maximální rychlost [km/h] | 45 |
| | Přibližný dojezd [km] | 475 |
| Jiné | Míst k sezení | 2 |
| | Poháněná náprava | Přední |

Tabulka 11 - Rozměry Microcar M.GO [18]

| | |
|---------------------|------|
| Délka [mm] | 2999 |
| Šířka [mm] | 1500 |
| Výška [mm] | 1560 |
| Průměr otočení [mm] | 9200 |



Obrázek 8 - Microcar M.GO [18]

3.7 Shrnutí průzkumu

K porovnání bylo vybráno celkem 6 vozidel spadajících do kategorie homologace quadrimobil. Ve dvou případech jde přímo o vozy cílené kategorie L7e-CP, ve zbylých čtyřech pak o vozy homologované v kategorii L6e-BP (za účelem možnosti je řídit od dřívějšího věku). Požadavky na pasivní bezpečnost u obou těchto homologačních skupin jsou však velmi obdobné, a tak tato skutečnost nečiní následnému srovnání jejich výsledků žádné obtíže. Jak je zmíněno výše, výběr se z důvodu následného porovnávání jejich bezpečnosti zaměřil výhradně na vozy testované společností EuroNCAP, mezi kterými dále rozhodovaly různé parametry. Těmi byly oblíbenost modelu v České republice, rok provedení nárazových zkoušek, celkové ohodnocení nebo vybavenost prvky pro zvýšení pasivní bezpečnosti. Kromě vozů testovaných došlo k zařazení do výčtu i jedné novinky automobilky Citroën, quadrimobilu Ami. Mezi šesti vybranými jsou, s cílem možnosti jejich vzájemného porovnání, tři vozy s elektromotorem a tři

vozidla se vznětovými motory s objemem do 500 ccm rovněž hojně používanými u vozidel této třídy.

3.7.1 Srovnání parametrů vozidel

Všechny tři popsané spalovací vozy i elektrický model Ami, jsou se svou maximální povolenou rychlostí 45 km/h navrženy tak, aby mohly být užívány mladistvými s řidičským oprávněním shodným s maloobjemovými skútry. Mezi vybranými šesti tak logicky vozidla s omezenou maximální rychlostí nepatří k výkonové špičce. Tam se drží s, vůči homologaci, limitními 15kW italské Tazzari. Model Twizy poskytuje řidiči o 2 kW méně, a i maximální rychlost a zrychlení jsou u modelu Tazzari Zero lepší. Dynamika však jistě není u těchto vozidel úplně na první příčce, i když při výběru u některých zájemců může rozhodnout. Více stěžejním faktorem je přibližný dojezd, který má nejvyšší uvedený opět Tazzari (až 150 km). Za ním je se 100 km Renault a se 70 km je posledním z elektrických modelů Ami. S přihlédnutím na potenciální využití v městském provozu však i tato nejnižší hodnota plně dostačuje. Shodné rozdělení jako u konstrukční rychlosti nalezneme i u poháněné nápravy. Všechny vozy vznětové, a i elektrické Ami, mají poháněnou přední nápravu, elektromobily Tazzari a Twizy naopak nápravu zadní. Ve všech případech platí, že je motor umístěn právě u poháněné nápravy.

4 Pasivní bezpečnost quadrimobilů na trhu

4.1 Specifika quadrimobilů z hlediska pasivní bezpečnosti

V této kapitole jsou řešena specifika týkající se pasivní bezpečnosti vycházející z legislativních požadavků na kategorii quadrimobilů. Vozidla nejsou povinna být vybavena airbasy. Povinnost je zde pouze u bezpečnostních pásů, jejich bezpečného ukotvení, ukotvení dveří včetně zámků či například splnění zkoušky zaoblení výčnělků interiéru a nutnost poskytovat uzavřený prostor pro řidiče a cestující viz kapitola 1 výše.

4.2 Testování v současnosti

Pasivní bezpečnost vozidel této kategorie není v současnosti legislativně ověřována nárazovými zkouškami, pro splnění požadavků k homologaci jsou dostačujícími virtuální výpočty. Crash testy tak do nedávna nebyly pro výrobce quadrimobilů žádným tématem. Roku 2014 však společnost zaměřující se na spotřebitelské nárazové testy EuroNCAP provedla první sérii zkoušek, kde byla hodnocena čtveřice vybraných quadrimobilů z aktuálního trhu. Hodnocení nedopadlo v porovnání s obvyklými výsledky u osobních automobilů vůbec dobře, což do povědomí lidí dostalo otázku, zda by tato vozidla nemohla být bezpečnější. Roku 2016 zkouškami prošla odlišná čtveřice quadrimobilů, avšak nějaký podstatný nárůst úrovně pasivní bezpečnosti vozidel zmíněné kategorie zaznamenán nebyl. [19, 20]

4.2.1 Postupy zkoušek quadrimobilů dle EuroNCAP

Společnost EuroNCAP vyvinula speciální protokoly pro testy pasivní bezpečnosti quadrimobilů s cílem vzájemného srovnání vozidel nabízených na trhu. Porovnání výsledků s hodnocením osobních automobilů není pro odlišnost testů včetně bodování validní. Pro pouhou ukázkou srovnání bezpečnosti byl dle protokolu určeného pro quadrimobily testován drobný osobní automobil, v mnoha směrech tuto kategorii připomínající, Toyota iQ. Tento osobní vůz obdržel v nárazových zkouškách s upraveným postupem maximum pěti hvězd. Kolik hvězd připadlo testovaným quadrimobilům je rozepsáno v následující kapitole 4.2.3.

EuroNCAP upravil k testování protokoly tak, že je celé hodnocení vztaženo pouze na ochranu dospělé posádky na předních sedadlech, konkrétně řidiče. Ochrana dětské posádky, zranitelných účastníků provozu či hodnocení asistenčních systémů bylo v protokolech pro tuto kategorii vynecháno a počítá se s tím až případně v budoucnu.

Hodnocení je prováděno pomocí dvou testů:

- čelní náraz do bariéry (Full Width Deformable Barrier);
 - stojící deformovatelná bariéra;
 - rychlost nárazu 50 ± 1 km/h;
 - úhel nárazu 0° ;
- boční náraz vozidla (Side Mobile Barrier);
 - urychlený zkušební vozík s deformovatelnou bariérou hmotnosti 950 ± 20 kg;
 - rychlost nárazu 50 ± 1 km/h;
 - úhel nárazu 90° .

Hodnocení u obou testů je navrženo s maximem 16 bodů. Bodování je založeno především na hodnotách naměřených na testovacích figurínách, došlo však i k penalizacím z důvodů nevyhovujících zadržných systémů či strukturálních selhání. Obdržené body z obou zkoušek jsou následně sečteny a dle výsledných procent dochází k udělení samotných hvězd. Zde je však brána 3x větší váha na výsledek u čelního nárazu nežli na výsledek nárazu bočního. Ač se tyto testy sice mohou zdát pro quadrimobily velmi přísné, jejich úroveň je v porovnání s tradičními zkouškami osobních automobilů stále nižší. [19, 20, 21, 23]

4.2.2 Testované modely společností EuroNCAP

Jedná se o vozy vybrané do průzkumu trhu v kapitole 3 výše s drobnými odchylkami. V průzkumu uvedená vozidla značky Aixam a Microcar byla v době testování prodávána pod trochu jiným názvem modelu jako čtyřmístná v cílové kategorii navrhovaného vozidla L7e-CP. Ve čtyřmístném provedení však tyto výrobci nyní své modely nenabízí a výše popsané modely jsou tak homologované jako L6e. Testy však byly provedeny právě na vozech kategorie L7e, což je pro průzkum bezpečnosti vozů této kategorie ideální. Vůz Chatenet byl v době testování i přes to, že se jednalo o dvoumístné vozidlo, kvůli vyšší hmotnosti a maximální rychlosti dle informací EuroNCAP homologován také v kategorii L7e. Popsaný model CH40 je však v současnosti prodáván s možností řízení mladistvými jako „lehký quadrimobil“ (L6e). Ostatní zmíněné vozy Renault a Tazzari byly testovány v popsáných dvoumístných provedeních s homologací „těžký quadrimobil“. Jediný netestovaný vůz je nejnovější quadrimobil na trhu Citroën Ami představený teprve roku 2020. U tohoto vozidla dojde ke krátkému popsání reálné nehody a jejich následků na pozemní komunikaci z roku 2021. [22]

4.2.3 Výsledky provedených zkoušek EuroNCAP

Výsledky nárazových zkoušek byly převzaty z oficiálních materiálů společnosti EuroNCAP. Pořadí bylo zvoleno dle obdrženého hodnocení, a to od nejhoršího k nejlepšímu.

V tabulkách 12, 13, 14, 15 a 16 je uvedeno vždy hodnocení daného vozu, včetně základních informací vztažených k pasivní bezpečnosti a rovněž informace, zda je tento model vybaven airbagem již ve standardní výbavě či zda ho nabízí alespoň jako příplatkovou výbavu. Tyto informace ještě vždy doplňuje slovní hodnocení bezpečnosti modelu se zaměřením na hlavní přednosti či naopak nedostatky.

Hodnocení vozu Aixam Crossover GTR

Tabulka 12 - Zhodnocení zkoušek EuroNCAP vozu Aixam [24]

| | | |
|----------------------------|--------------------|-----------|
| Základní informace | Pohon | Spalovací |
| | Hmotnost [kg] | 440 |
| | Maximální rychlost | 98 |
| Bezpečnostní výbava | Airbag řidiče | Ne |
| Hodnocení | Čelní náraz [bodů] | 2 |
| | Boční náraz [bodů] | 10 |
| | Celkové [%] | 25 |
| | Hvězdy | ★ |

Nejnižší hodnocení si z vybraných vozidel odnesl model Crossover GTR výrobce Aixam, který zklamal především výsledky při čelním nárazu. Z testu obdržel body pouze za ochranu spodní části těla. U hlavy, krku a hrudi byly naměřeny hodnoty zapříčiňující minimálně velmi vážná zranění. Nízké hodnocení zapříčinila především absence airbagu, výrazný pohyb volantu směrem k řidiči, a ne zcela bezpečná přístrojová deska. Hodnoty z bočního nárazu byly ve všech oblastech, krom hlavy, jejíž ochrana byla hodnocena jako dobrá, shodně hodnoceny jako mezní. To přineslo Aixamu alespoň malý počet bodů. Konstrukce vozu si naopak vysloužila lepší hodnocení v případě čelního nárazu, kde vcelku dobře odolala namáhání a prostor pro posádku zůstal zachován. Po bočním náraze bylo odhaleno mezní ohrožení proražením palivové nádrže šroubem úchyty zadního odpružení, z čehož vyplynulo doporučení pro výrobce o přepracování této části vozu. Celkem uděleno hvězd: 1. [24]

Hodnocení vozu Mircocar M.GO Family

Tabulka 13 - Zhodnocení zkoušek EuroNCAP vozu Mircocar [25]

| | | |
|----------------------------|--------------------|-----------|
| Základní informace | Pohon | Spalovací |
| | Hmotnost [kg] | 425 |
| | Maximální rychlost | 95 |
| Bezpečnostní výbava | Airbag řidiče | Volitelně |
| Hodnocení | Čelní náraz [bodů] | 4 |
| | Boční náraz [bodů] | 6 |
| | Celkové [%] | 28 |
| | Hvězdy | ★ |

Druhým vozem v pořadí provedeného výběru je model sesterské společnosti Ligier, Microcar. I přes osazení airbagu řidiče obdržel tento quadrimobil za čelní náraz velmi špatné hodnocení. Právě tato skutečnost mě přiměla model M.GO zařadit do výběru a zaměřit se podrobněji na jeho bezpečnost. V oblasti konstrukce nedopadl Microcar vůbec dobře. Při kontrolách po nárazech došlo k odhalení velice závažných problémů. U čelního nárazu došlo k selhání ukotvení bezpečnostního pásu v dolní části B-sloupku a k dalším závadám nasvědčujícím, že konstrukce vozu neodolala nárazu tak, jak by si komisaři představovali. Při zkoušce bočním nárazem došlo k ještě závažnějším selháním konstrukce, v čele s kompletním oddělením B-sloupku od prahu a selhání tří upevňovacích bodů sedadla. Z hodnocení ochrany pasažérů při bočním nárazu stojí za zmínku především nedostatečný tlak v airbagu řidiče, dovolující kontakt hlavy s volantem, přinášející penalizaci. Ta spolu s původně mezními hodnotami figuríny zapříčinila, že byla ochrana hlavy klasifikována jako špatná. Stejně tak dopadla hrud' po nárazu do volantu. Další penalizace způsobená selháním ukotvení bezpečnostního pásu zhoršila hodnocení u dolní části těla na slabé. Ochrana při bočním nárazu byla, jak je patrné z obrázku 10 níže, povětšinou mezní. Další penalizace však srazila hodnocení u hrudníku na špatné. Hvězda tedy udělena, shodně jako u Aixamu, pouze jedna. [25]

Hodnocení vozu Tazzari Zero

Tabulka 14 - Zhodnocení zkoušek EuroNCAP vozu Tazzari [26]

| | | |
|----------------------------|--------------------|------------|
| Základní informace | Pohon | Elektrický |
| | Hmotnost [kg] | 542 |
| | Maximální rychlost | 100 |
| Bezpečnostní výbava | Airbag řidiče | Ne |
| Hodnocení | Čelní náraz [bodů] | 4 |
| | Boční náraz [bodů] | 8 |
| | Celkové [%] | 31 |
| | Hvězdy | ★ |

Prvním čistě elektrickým vozem a zároveň posledním s obdrženu pouze jednou hvězdou je Tazzari Zero. Jeho konstrukce si při provedených testech nevedla nejhůře, velice pravděpodobně však dosáhla v otázce pevnosti svého maxima a například lehce silnějšímu nárazu by již odolat nemusela. Největším problémem byl posun baterií z přední části vozu do prostoru pro nohy. Při těchto testech se sice ochrana nohou od kolen dolů podrobně nevyhodnocovala, došlo zde však k jejich masivnímu poranění viditelnému i pouhým okem. Při bočním nárazu došlo navíc k otevření dveří řidiče, což velice zvýšilo riziko poranění posádky. Dalším velkým problémem bylo selhání bezpečnostního pásu přetržením v místě horního upevnění na sloupek dveří při zkoušce čelním nárazem. To způsobilo, že byl řidič takřka nepřipoután, čímž došlo k nárazu hlavy do volantu silou s vysokým rizikem smrtelného

zranění. Hodnocení ochrany během čelního nárazu je tak z velké části kategorizováno jako špatné či při nejmenším slabé. Pouze oblast krku byla ochráněna přiměřeně. Bočnímu nárazu vystaveného řidiče vůz dokázal ochránit podstatně lépe, a to na úrovních ochrany dobrá (kyčel) a mezní (hlava, hrud' a břicho). [26]

Hodnocení vozu Chatenet CH30

Tabulka 15 - Zhodnocení zkoušek EuroNCAP vozu Chatenet [27]

| | | |
|----------------------------|--------------------|-----------|
| Základní informace | Pohon | Spalovací |
| | Hmotnost [kg] | 390 |
| | Maximální rychlost | 100 |
| Bezpečnostní výbava | Airbag řidiče | Ne |
| Hodnocení | Čelní náraz [bodů] | 6 |
| | Boční náraz [bodů] | 6 |
| | Celkové [%] | 38 |
| | Hvězdy | ★★ |

Struktura karoserie francouzského vozu Chatenet zůstala při čelním testu stabilní, ukázaly se však problémy upevnění bezpečnostního pásu. Ten sice naštěstí zůstal funkční, určité protažení však zaznamenala jeho hliníková upevňovací část. Již skoro tradičně lze poznamenat, že jakmile vozidlo nemá airbag, dojde vlivem nárazu hlavy na volant ke zraněním minimálně velmi vážným, spíše se blížíícím ke smrtelným. Zde narazila hlava na spodní část věnce volantu, který byl vlivem posunu motoru a převodovky vytlačen blíže k řidiči. Ochrana hlavy při čelním střetu byla tedy hodnocena jako špatná, ostatní části těla jako mezní. U bočního nárazu byla ochrana klasifikována jako mezní u všech částí až na hrud', kde jako špatná. Celkové hodnocení však přineslo tomuto vozu, v porovnání s konkurencí, velice slušné dvě hvězdy. To především vlivem nulových penalizací. [27]

Hodnocení vozu Renault Twizy

Tabulka 16 - Zhodnocení zkoušek EuroNCAP vozu Renault [28]

| | | |
|----------------------------|--------------------|------------|
| Základní informace | Pohon | Elektrický |
| | Hmotnost [kg] | 474 |
| | Maximální rychlost | 80 |
| Bezpečnostní výbava | Airbag řidiče | Ano |
| Hodnocení | Čelní náraz [bodů] | 6 |
| | Boční náraz [bodů] | 7 |
| | Celkové [%] | 39 |
| | Hvězdy | ★★ |

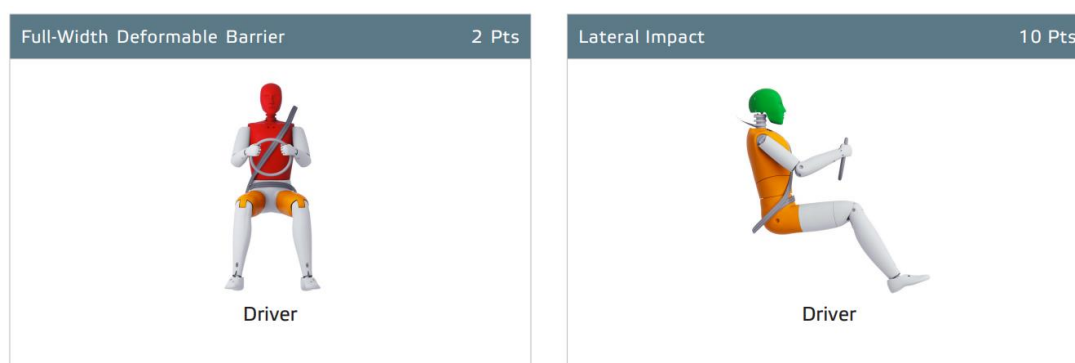
Renault jako jediný přináší svému řidiči ochranu airbagem, již v základní v současnosti prodávané výbavě, který je zde (narozdíl od vozu Microcar) podstatným přínosem pro bezpečnost tohoto modelu. Kromě přesně nastaveného airbagu skloubeného se čtyřbodovým bezpečnostním pásem je u tohoto vozu dobře řízen pohyb jeho řídicího ústrojí vlivem nárazu směrem k řidiči. Samotná konstrukce vozu také vykazuje známky vysoké pevnosti vedoucí komisaře k názoru, že i silnějšímu nárazu by Twizy mohl bezpečně odolat. Tuhá konstrukce má však i svá negativa, jedním ze zjištěných při čelním nárazu je velké namáhání krční páteře. Rovněž došlo k nárazu kolen a stehenních kostí do tvrdých struktur, což přineslo, stejně jako pro oblast krku, špatné hodnocení ochrany. K penalizaci došlo během bočního nárazu kdy, vlivem neuzavřené kabiny vozu, došlo k pohybu hlavy vně vozidlo. To by mohlo znamenat až přímý kontakt hlavy řidiče s vnějším objektem, což není žádoucí. K penalizaci došlo rovněž u oblasti hrudníku, čímž i jeho ochrana dosáhla kategorie špatná. Celkově se však dá konstatovat, že tento vůz dosáhl nejlepších hodnocení ze všech testovaných quadrimobilů, a to i přes zmíněnou ne zcela uzavřenou kabinu, tvrdé struktury v prostoru pro dolní končetiny či specifické usazení spolujezdce za řidiče. Celkové hodnocení: 2 hvězdy. [28]

4.2.4 Porovnání poskytnuté ochrany posádky

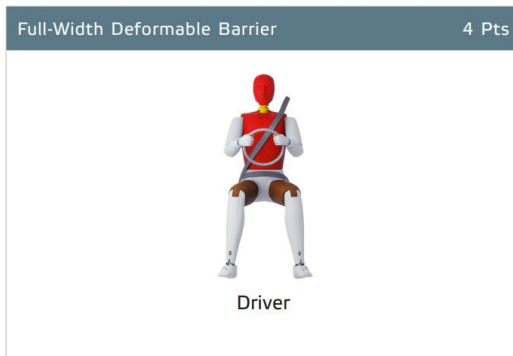
K přehlednému porovnání je na obrázcích 9, 10, 11, 12 a 13 barevně zakresleno hodnocení ochrany posádky všech zkoušených vozidel v různých oblastech při obou provedených nárazových testech dle škály viz tabulka 17.

Tabulka 17 - Škála hodnocení ochrany posádky dle EuroNCAP

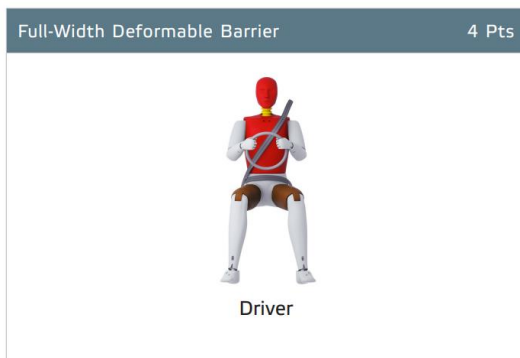
| | | | | |
|-------|-----------|-------|-------|--------|
| Dobrá | Přiměřená | Mezní | Slabá | Špatná |
|-------|-----------|-------|-------|--------|



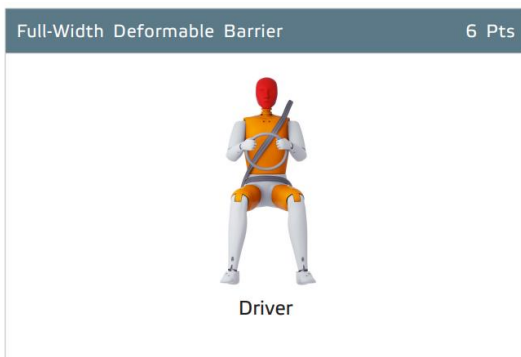
Obrázek 9 - Ochrana posádky vozu Aixam Crossover GTR [24]



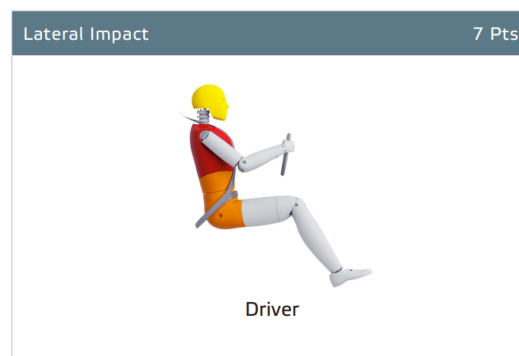
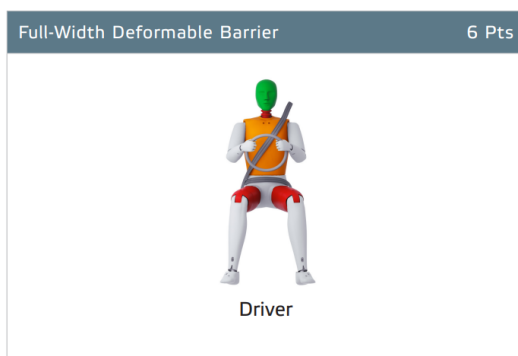
Obrázek 10 – Ochrana posádky vozu Microcar M.GO [25]



Obrázek 11 – Ochrana posádky vozu Tazzari Zero [26]



Obrázek 12 – Ochrana posádky vozu Chatenet CH30 [27]



Obrázek 13 - Ochrana posádky vozu Renault Twizy [28]

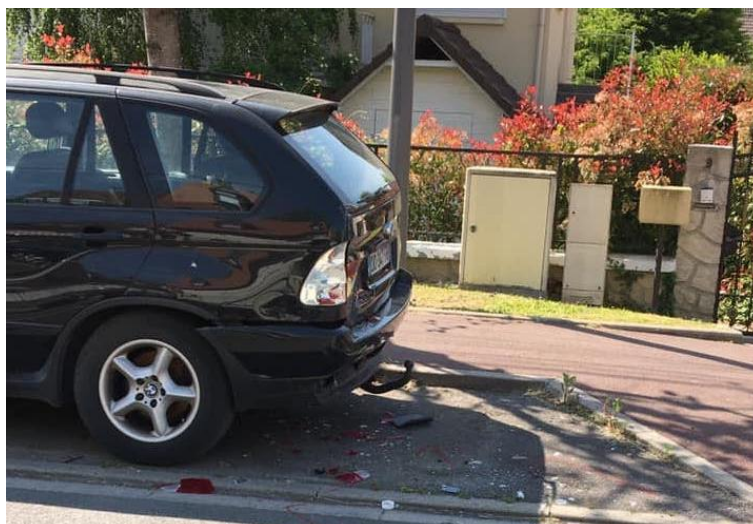
4.2.5 Případy reálných nehod vozu Citroën AMI

Z důvodů absence nárazových zkoušek společností EuroNCAP, u tohoto poměrně nového přírůstku do kategorie quadrimobilů, bude jeho bezpečnost nastíněna pomocí dohledaných reálných dopravních nehod.

První nehodou je čelní náraz vozu Ami do levé zadní části BMW X5. Z fotografií (obrázky 14 a 15) je patrna nekompatibilita konstrukcí obou vozů, čímž i množství pohlcené energie nárazu každým z účastníků. Zatímco u quadrimobilu došlo k četnému poškození čelního okna a předního panelu včetně samotné konstrukce vozu pod ním, SUV značky BMW zaznamenalo mnohem menší poškození. Zde je na první pohled vidět lehké poškození pátých dveří, nárazníku a zadního světla, velice pravděpodobně bez poškození nosných struktur. U druhé nehody došlo k zadnímu nárazu osobního automobilu do quadrimobilu Ami. Jasnější okolnosti nejsou, bohužel, známy. Ami však po tomto nárazu skončilo převráceno na levém boku s viditelně poškozenou zadní částí (viz obrázek 16). I přes tento pravděpodobně vcelku silný zadní náraz vyvázl řidič „pouze“ s bolestmi v oblasti krku a řeznými ranami způsobenými rozbitým zasklením, což ukazuje na nízkou bezpečnost použitých skel. [29, 30]



Obrázek 14 - Poškození vozu Ami čelním nárazem [29]



Obrázek 15 - Poškození vozu BMW [29]



Obrázek 16 - Poškození vozu Ami zadním nárazem [30]

Z důvodu nedostatku podrobností jsou tyto nehody brány pouze jako příklady a nelze z nich odvozovat žádné odborné závěry.

5 Návrh metodiky testování quadrimobilů

5.1 Motivace k návrhu komplexní metodiky

V současnosti neexistuje žádná komplexní metodika vhodná pro testování pasivní bezpečnosti quadrimobilů pomocí nárazových zkoušek, a právě jejím návrhem se zabývá kapitola 5. Neexistence takovýchto postupů je zapříčiněna především faktem, že tato vozidla při homologačním procesu nemusí zákonně procházet žádnými nárazovými zkouškami. Podnět k jejich vytvoření legislativními orgány standardně vychází ze statistik nehodovosti, kdy kritérium ještě nebylo naplněno. Jedním z průkopníků v této oblasti je již zmíněná společnost EuroNCAP, která upravila své dvě tradiční nárazové zkoušky osobních automobilů tak, že jimi lze testovat i pasivní bezpečnost quadrimobilů.

5.2 Předlohy navržené metodiky

Protokoly EuroNCAP těchto dvou nárazových zkoušek tak při tvorbě návrhu metodiky byly velkým vzorem. Jak je zmíněno již v kapitole 4.2.1 výše, jedná se o čelní náraz do statické bariéry plástvové konstrukce upevněné na betonovém bloku se 100% překrytím čela vozu rychlostí 50 km/h pod nulovým úhlem a boční náraz pohyblivým vozíkem na přídi osazeným typově shodnou deformovatelnou bariérou rychlostí rovněž 50 km/h. Druhou podstatnou inspirací mi při návrhu byla německo-rakouská studie „*A Mobile Deformable Barrier Test for the Front Crash Assessment of Future Urban Microcars*“, na které pracovali odborníci z RWTH Aachen University, Graz University of Technology a firmy Robert Bosch GmbH. Jako předlohy rovněž posloužily protokoly nárazových zkoušek osobních automobilů EuroNCAP a předpisy EHK. [31]

5.3 Metodika testování pasivní bezpečnosti pomocí nárazových zkoušek

Metodika zkoušení pasivní bezpečnosti vozidel kategorie L7 nárazem je navržena jako sestava čtyř zkoušek, kdy se tři z nich zabývají nárazem čelním a jedna nárazem bočním. Při návrhu bylo zacíleno na testování odolnosti samotné konstrukce vozidel, funkčnost deformačních zón a ochranu posádky. Posádkou je označován řidič a, případně, spolujezdec, vždy nahrazen figurínou reprezentující dospělou osobu. S přihlédnutím na aktuální úroveň ochrany dospělé posádky nabízenou vozidly této kategorie, kterou je potřeba minimálně po celé Evropě co nejrychleji podstatně navýšit, nejsou ani v této metodice prozatím navrženy zkoušky, které cílí na ochranu dětské posádky, zranitelných účastníků provozu či elektronické bezpečnostní systémy. Tyto kategorie byli v tuto chvíli charakterizovány jako méně podstatné a soustředění výrobců cílících na Evropské trhy by mělo zatím směřovat především na ochranu

dospělé posádky vozidla. V otázce volby rychlosti nárazu pro jednotlivé zkoušky je nutno zmínit, že zástupci kategorie, pro kterou je tato metodika navrhována, jsou výhradně městská vozidla pohybující se nejčastěji v rychlostech do 50 km/h. Pro tuto rychlost nárazu tak došlo k návrhu většiny zkoušek metodiky, pouze jedna zkouška byla z níže opodstatněných důvodů navržena s nárazovou rychlostí nižší.

5.3.1 Zkouška čelním nárazem do deformovatelné bariéry

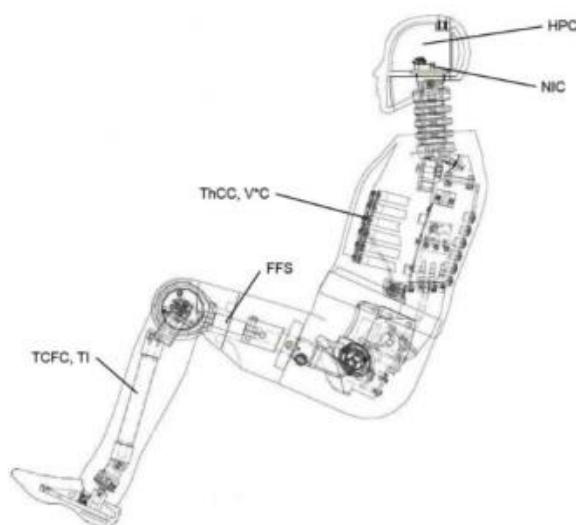
První zvolenou nárazovou zkouškou pro navrhovanou metodiku je čelní náraz vozidla do deformovatelné bariéry se 100 % překrytím přídě. Jedná se právě o jednu ze zkoušek, kterou EuroNCAP využil, k již výše zmíněnému testování bezpečnosti quadrimobilů v letech 2014 a 2016. Ke zkoušce je dostupný testovací protokol, jenž posloužil jako podrobná předloha pro následující specifikace testu.

Hlavní parametry zkoušky:

- náraz kolmo na progresivně deformovatelnou bariéru;
- cílová rychlost nárazu 50 km/h \pm 1 km/h;
- deformovatelná bariéra uchycená k betonovému bloku, spodní hrana bariéry ve výšce 80 mm \pm 5 mm od země;
- 100 % překrytí přídě vozem bariérou.

Figuríny:

Figuríny použité při tomto testu jsou shodné jak pro řidiče, tak pro spolujezdce a v obou případech se jedná o figurínu Hybrid III 50M nahrazující muže 50% vzrůstu a hmotnosti populace. Tento průměrný muž je charakterizován výškou 175 cm a hmotností 77,7 kg.



Obrázek 17 – Figurína Hybrid III [1]

Na figurínách Hybrid III jsou během zkoušky pomocí senzorů zakreslených v obrázku 17 snímány hodnoty uvedené v tabulce 18.

Tabulka 18 - Snímače používané figuríny [32]

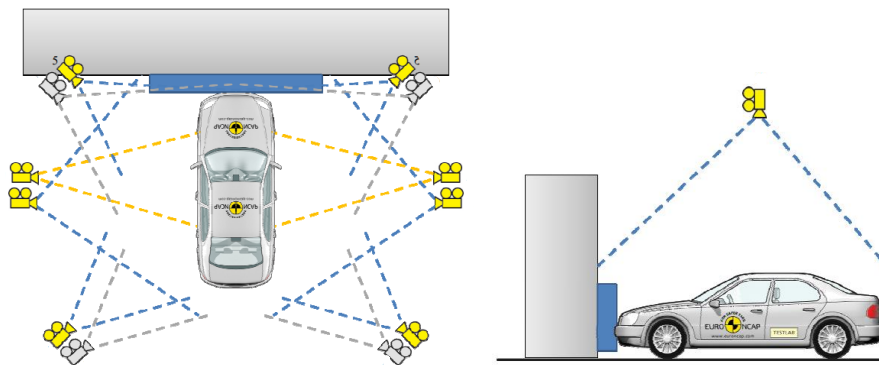
| Umístění snímače | Parametr |
|------------------|--|
| Hlava | Zrychlení A_x, A_y, A_z |
| Krční páteř | Síly F_x, F_y, F_z Momenty M_x, M_y, M_z |
| Hruď | Zrychlení A_x, A_y, A_z Stlačení D_{hrud} |
| Pánevev | Zrychlení A_x, A_y, A_z |
| Stehenní kosti | Síla F_z |
| Kolena | Posunutí D_{kolena} |

Snímače na vozidle:

Před zkouškou dochází k osazení snímačů také na testované vozidlo. Na obou B-sloupcích musí být připevněny akcelerometry a v blízkosti upevnění nad ramenem jsou na bezpečnostních pásích montovány lehké siloměry. Pro akcelerometry je hlavní výslednou hodnotou zrychlení v ose X a pro siloměry diagonální síla na pásu.

Kamery:

K vyhodnocení zkoušky je velice podstatným nástrojem i videozáznam průběhu. Pro tento test došlo k návrhu použití celkem devíti vysokorychlostních kamer s minimální hodnotou 500 fps, které budou doplněny o čtyři standartní videokamery. Rozmístění kamer je zacíleno na co nejkvalitnější záznam ze všech úhlů s dvojicí kamer blíže zabírajících pohyb posádky. Jedna vysokorychlostní kamera bude osazena i přímo nad místo nárazu pro zachycení dění shora. Pro pořízení kvalitního záznamu videokamer je dále nutnost kvalitního osvětlení místa nárazu. Konkrétní pozice záznamové techniky jsou zakresleny v obrázku 18.



Obrázek 18 - Rozmístění kamer během čelního nárazu do deformovatelné bariéry [32]

Procedury prováděné po zkoušce:

První procedurou je kontrola nezablokování dveří v průběhu testu a následný pokus jejich otevření s měřením aplikované síly na vnější kliku dveří, při němž dochází k postupnému navyšování použité síly až na hodnotu 500 N. V případě neotevření dveří zmíněnou silou je přistoupeno k pokusu otevření dveří vnitřní klikou, či nejprve otevření druhých dveří na totožné straně. V případě, že ani jedna tato metoda nevede k otevření daných dveří, musí být užito nadměrné síly či nástrojů. Druhou procedurou je vyjmutí figuríny. Nejprve je snaha o vyjmutí bez posuvu sedadla, následně dochází ke sklopení opěradla, posuvu sedadla vzad či vyjmutí figuríny i se sedadlem. Z postupu vyjmutí musí být pořízen videozáznam.

Kritéria poranění:

Hodnocení na základě biomechanických kritérií jsou pro každou část těla stanovena s maximem 4 bodů. K započtení maxima bodů za danou oblast dochází při dosažení hodnot lepších, nežli jsou hodnoty uvedené u vyššího limitu. Při naměření hodnoty mezi tímto vyšším limitem a nižším limitem uvedeným u posuzovaného parametru je u kategorie L7e uděleno po dvou bodech. Při hodnotě horší, nežli je hodnota nižšího limitu, nejsou uděleny body žádné. Maximální počet bodů za jednu zkoušku je roven 16, protože jsou obdrženy body z obou figurín na závěr sečteny a vyděleny dvěma.

Kritéria hodnocení jsou pro oblast hlavy u řidiče rozlišena zvlášť pro případy osazení a neosazení volantového airbagu ve vozidle. Pro spolujezdce jsou vždy užity hodnoty jako pro řidiče s airbagem. Konkrétní kritéria hodnocení hlavy řidiče s airbagem a spolujezdce můžeme vidět v tabulce 19.

Tabulka 19 - Kritéria hodnocení ochrany hlavy při zkoušce čelním nárazem do deformovatelné bariéry u řidiče s airbagem a spolujezdce [32]

| Kritérium | Vyšší limit | Nižší limit |
|-------------------|-------------|-------------|
| HIC ₃₆ | 650 | 1000 |
| 3ms zrychlení [g] | 72 | 88 |

Hodnocení ochrany hlavy v případě nevybavení vozidla volantovým airbagem je následující. Nejprve jsou podstatné hodnoty kritérií z nárazového testu shodné s nižším limitem v tabulce 20. Dále je pak provedena zkouška nárazu hlavy dle EHK 12. Při této zkoušce dochází k urychlení 6.8 kg těžké makety nahrazující lidskou hlavu do volantu a jsou pozorovány opět hodnoty ve dvou limitech viz tabulka 20. Pro vozidla neosazená volantovým airbagem je maximum bodů za ochranu hlavy stanoveno na poloviční 2 body.

Tabulka 20 - Kritéria hodnocení hlavy řidiče při zkoušce čelním nárazem do deformovatelné bariéry bez airbagu [32]

| Kritérium | Vyšší limit | Nižší limit |
|--------------------|-------------|-------------|
| HIC ₃₆ | - | 1000 |
| 3ms zrychlení [g] | 65 | 80 |
| Max. zrychlení [g] | 80 | 120 |

Hodnocení ochrany krku se zakládá na následných hodnotách uvedených v tabulce 21.

Tabulka 21 - Kritéria hodnocení krční páteře při zkoušce čelním nárazem do deformovatelné bariéry [32]

| Kritérium | Čas [ms] | Vyšší limit | Nižší limit |
|---------------------|----------|-------------|-------------|
| Střihová síla [F] | 0 | 1,9 | 3,1 |
| | 25-35 | 1,2 | 1,5 |
| | 45 | 1,1 | 1,1 |
| Axiální síla [F] | 0 | 2,7 | 3,3 |
| | 35 | 2,3 | 2,9 |
| | 60 | 1,1 | 1,1 |
| Ohybový moment [Nm] | - | 42 | 57 |

Kritéria hodnocení ochrany hrudi, pánve, stehen a kolen pro tuto zkoušku viz tabulky 22 a 23.

Tabulka 22 – Kritéria hodnocení hrudníku při zkoušce čelním nárazem do deformovatelné bariéry [32]

| Kritérium | Vyšší limit | Nižší limit |
|---------------|-------------|-------------|
| Stlačení [mm] | 22 | 50 |
| V*C [m/s] | 0,5 | 1,0 |

Tabulka 23 – Kritéria hodnocení pánve, stehen a kolen při zkoušce čelním nárazem do deformovatelné bariéry [32]

| Kritérium | Vyšší limit | Nižší limit |
|-----------------------------|-------------|---------------------------------------|
| Síla na stehenní kost [kN] | 3,8 | 9,07 po 0 ms a 7,56 po více než 10 ms |
| Posun kolenních kloubů [mm] | 6,0 | 15,0 |

Penalizace užívané při vyhodnocení:

Kromě výše zmíněných přidělů bodů mohou být v daných oblastech body i odebrány, a to především za fatální selhání struktury karoserie či jiné nadměrné ohrožení posádky. V oblasti hlavy jsou strhávány body především za selhání airbagu či sloupku řízení. Mezi selhání airbagu patří například jeho chybné rozbalení, opuštění hlavy plochy airbagu nebo jeho nízký vnitřní tlak, čímž je způsoben průnik hlavy až na konstrukci volantu. S tím souvisí i selhání sloupku řízení, jako je oddělení volantu či nadměrný posun sloupku směrem do kabiny. Zde je

případná penalizace závislá na hodnotě posunu, který EHK stanovuje na maximálních 100 mm horizontálně a 80 mm vertikálně. V oblasti hrudníku jsou penalizace vztaženy např. k posunu A-sloupku, kde při jeho posunu nad 200 mm dochází dokonce k odebrání 2 bodů. Při hodnotě mezi 100 a 200 mm pak k odebrání v rozmezí 1 až 2 bodů interpolací. Další stržení bodů pro tuto oblast může zapříčinit selhání konstrukce ve dveřním prostoru či silný kontakt hrudi a sloupku řízení. Nucený pokles bodů za oblast dolních končetin a pánve bývá nejčastěji zapříčiněn nadměrnou silou, či posunem, některé z těchto částí. Shodně pro všechny kategorie následně platí penalizace 1 bodem v případě selhání zádržného systému v dané oblasti, jako může být například přetržení pásu či selhání spony. [32]

5.3.2 Zkouška čelním nárazem do tuhé bariéry

Dalším navrženým testem v metodice je také čelní náraz, nyní však do absolutně tuhé překážky. Pro tuto zkoušku quadrimobilu došlo k návrhu nižší rychlosti nárazu, nežli tomu je u ostatních zkoušek metodiky, nárazu do překážky deformovatelné i u obdobného testu osobních vozidel. Důvodů snížení rychlosti právě pro náraz do tuhé nedeformovatelné překážky je několik. Náraz do tuhé překážky bez jakékoli absorpce energie je, z hlediska nastalých zatížení a deformací na vozidle, obdobný s přímou čelní srážkou s totožným vozidlem v rychlosti dvojnásobné. Vlivem prozatím poměrně nízkého procentuálního zastoupení quadrimobilů na silnicích je však shodnost vozidel nepravděpodobná. Rychlost nárazu tak nebyla zvolena přesně poloviční (z rychlosti 50 km/h), ale došlo k výběru třípětinové hodnoty zohledňující hmotnostní převahu okolních vozidel, tedy 30 km/h. U nárazu do tuhé překážky je také očekáváno podstatně delší brždění před samotným střetem, nežli tomu je například u střetu s jedoucím vozidlem, a to z důvodu jasné pozice této překážky, a tak větší pravděpodobnosti reakce. I s touto nižší rychlostí si však zkouška zachovala pro quadrimobily podstatnou obtížnost tak, aby byli výrobci nuceni úroveň ochrany posádky svých vozidel podstatně zvýšit.

Hlavní parametry zkoušky:

- náraz kolmo na bariéru;
- cílová rychlost nárazu 30 km/h \pm 1 km/h;
- tuhá bariéra z vyztuženého betonu o minimální ploše 3x1,5 m a hmotnosti 70 tun, může být dodatečně pokryta roznášecí deskou či vrstvou překližky;
- 100 % překrytí předě vozů bariérou.

Figuríny:

Na rozdíl od předchozího testu jsou pro test s tuhou bariérou zvoleny figuríny představující ženu menšího vzrůstu Hybrid III 5F. Tyto figuríny jsou pro účel nárazové zkoušky osazeny shodnými snímači jako figuríny HIII 50M. Usazení figurín bylo navrženo shodně na místo řidiče i spolujezdce vpředu.

Snímače na vozidle:

Shodně jako u první navržené zkoušky dochází k vybavení vozu akcelerometry na oba B-sloupky a snímači sil na bezpečnostní pásy. Navíc zde musí být umístěn senzor měřící napětí na všech bateriích přítomných ve vozidle.

Kamery:

Rozmístění kamer i jejich charakteristika jsou shodné se zkouškou popsanou v předchozí kapitole 5.3.1 z důvodu podobných požadavků na výsledný záznam.

Procedury prováděné po zkoušce:

Postupy u zkoušky otevření dveří i vyjmutí figuríny jsou shodné se zkouškou čelním nárazem do deformovatelné bariéry.

Kritéria poranění:

Oblasti hodnocení ochrany jsou následující: hlava, krční páteř, hrud' a pánev s dolními končetinami. Hodnocení je prováděno ve všech těchto oblastech dle kritérií zanesených v tabulce 24. V případě nevybavení vozu volantovým airbagem je u této zkoušky maximum hodnocení ochrany hlavy a krční páteře na polovičních hodnotách (2 body v každé oblasti).

Tabulka 24 - Kritéria hodnocení čelního nárazu do tuhé bariéry [34]

| Oblast | Kritérium | Vyšší limit | Nižší limit |
|------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| Hlava | HIC ₁₅ | 500 | 700 |
| | 3ms zrychlení [g] | 72 | 80 |
| Krční páteř | Střihová síla [kN] | 1,2 | 1,95 |
| | Axiální síla [kN] | 1,7 | 2,62 |
| | Ohybový moment [Nm] | 36 | 49 |
| Hrud' | Stlačení [mm] | 18 | 42 |
| | V*C [m/s] | 0,5 | 1,0 |
| Pánev, stehna a kolena | Síla na stehenní kost [kN] | 2,6 | 6,2 |

Penalizace užívané při vyhodnocení:

Případy penalizace pro tuto zkoušku jsou obdobné jako v případě čelního nárazu do deformovatelné bariéry popsaném výše. Navíc je zde navržena penalizace při nadměrných hodnotách na siloměrech bezpečnostních pásů ztrátou 2 bodů a ztráta 4 bodů (tedy všech za danou oblast) v případě, že dojde k submariningu. Submariningem je nazýván jev sklouznutí bezpečnostního pásu z oblasti kyčle do oblasti měkkých břišních tkání a dochází k němu v případě natočení kyčle vlivem nerovnoměrného zpomalování vozidla. Další odečty bodů mohou nastat v případě samovolného otevření dveří vozu během testu, čímž dochází k přímému ohrožení posádky. V takovém případě dochází k bodové penalizaci za každé dveře, které nezůstaly po celý test zavřené, včetně víka kufru.

Penalizační případy i užití hodnoty kritérii jsou převzaty z protokolu čelní nárazové zkoušky do tuhé bariéry určené pro osobní automobily s nárazovou rychlostí 50 km/h. V případě quadrimobilů byla zvolena, jak je popsáno výše, rychlost nižší. Nároky na ochranu posádky osobního automobilu jsou však v současnosti vysoké, a tak využití těchto kritérií pro zkoušku quadrimobilu v nižší rychlosti zajišťuje žádanou úroveň nároků na ochranu. [32, 33, 34, 35]

5.3.3 Zkouška bočním nárazem

Zkouška bočním nárazem vozíku, na přední osazeným deformovatelnou bariérou, je další ze zvolených pro ověření bezpečnosti quadrimobilů a druhou z provedených společností EuroNCAP. Zkouška bočním nárazem je jedním ze základních testů pasivní bezpečnosti osobních vozidel prováděný společností již od roku 1997. Poslední úprava parametrů zkoušky byla provedena v roce 2020.

Hlavní parametry zkoušky:

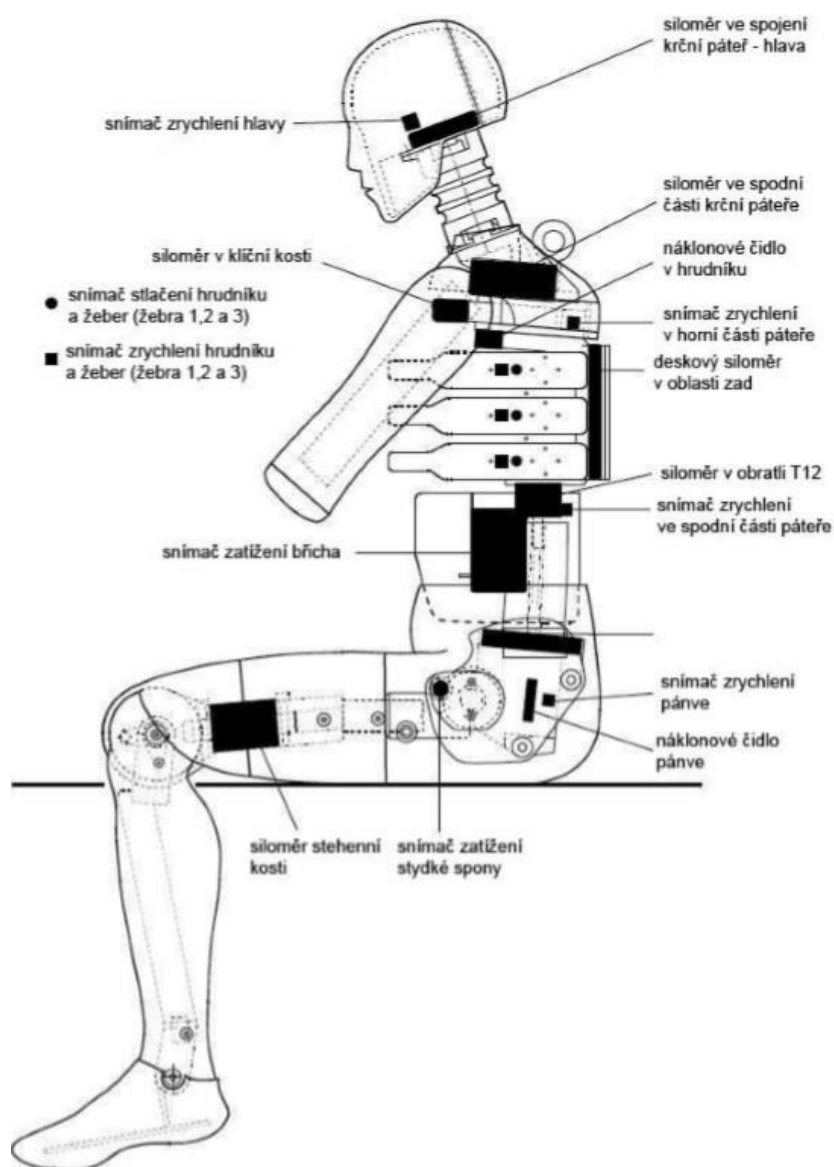
- náraz vozíkem do boku testovaného (stojícího) vozu na straně řidiče v místě R-bodu;
- vozík o rozvoru 3000 ± 10 mm a rozchodu 1500 ± 10 mm;
- na přední vozíku připevněna progresivně deformovatelná bariéra se spodní hranou 300 ± 5 mm od země;
- celková hmotnost vozíku s bariérou stanovena na 950 ± 20 kg;
- cílová rychlost nárazu 50 ± 1 km/h;
- střed bariéry vychýlen od místa plánovaného nárazu maximálně o 25 mm.

Figuríny:

Užita je speciálně navržená figurína pro tento typ nárazu EuroSid 2, nahrazující dospělého muže 50% velikosti a hmotnosti populace, vážící $72 \pm 1,2$ kg. Instrumentace této figuríny je vyobrazena na obrázku 19 níže.

Snímače na vozidle a vozíku:

Testované vozidlo má osazeno akcelerometrem B-sloupek na neklonizní straně, stejně tak musí být akcelerometrem vybaven i testovací vozík, který má snímač umístěn v těžišti. Akcelerometr na B-sloupku je nastaven do bočního směru. Stejně směřuje orientace akcelerometru na vozíku, pro který je to ale směr přímý.

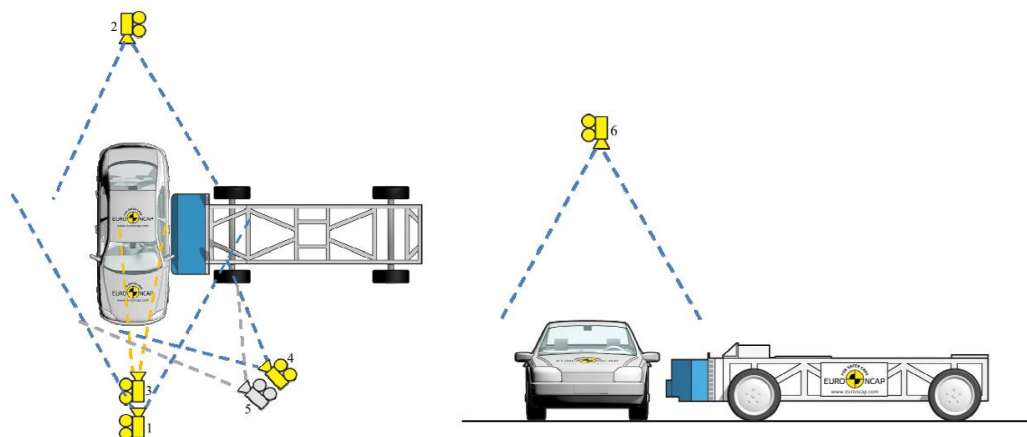


Obrázek 19 - Figurína ES-2 [1]

Kamery:

Celý průběh testu je zaznamenáván pomocí šesti vidokamer, ze kterých je pět vysokorychlostních s minimální hodnotou 500 fps.

Lokace zařízení je navržena, jak je patrné z obrázku 20, především tak, aby byl pořízen kvalitní záznam přídě a boku vozu do kterého vozík naráží. Jedna kamera je dále užita pro zád a jedna pro pohled shora.



Obrázek 20 - Rozmístění kamer během bočního nárazu [36]

Procedury prováděné po zkoušce:

Procedury otevření dveří a vyproštění figuríny jsou totožné s výše popsány nárazovými zkouškami.

Kritéria poranění:

Při zkoušce bočním nárazem dochází k volbě jiné testovací figuríny, čímž i k hodnocení odlišných částí těla. V tomto případě jde především o hodnocení ochrany horní poloviny těla po pánev, dolní končetiny se u bočního nárazu neposuzují. Konkrétní kritéria hodnocení jsou vypsána v tabulce 25.

Tabulka 25 - Kritéria hodnocení bočního nárazu [36]

| Oblast | Kritérium | Vyšší limit | Nižší limit |
|--------|----------------------------------|-------------|-------------|
| Hlava | HIC ₃₆ | 650 | 1000 |
| | 3ms zrychlení [g] | 72 | 88 |
| Hrud' | Boční stlačení [mm] | 22 | 42 |
| | V*C [m/s] | 0,32 | 1,0 |
| Břicho | Síla působící na břicho [kN] | 1,0 | 2,5 |
| Záda | Síla na deskový siloměr zad [kN] | 1,0 | 4,0 |
| | Síla na obratel T12 [kN] | 1,5 | 2,0 |
| | Moment v obratli T12 [Nm] | 150 | 200 |
| Pánev | Síla na stydkou kost [kN] | 3,0 | 6,0 |

Penalizace užívané při vyhodnocení:

Odlíšnost této zkoušky není pouze u posuzovaných oblastí, rovněž jsou používány i jiné penalizace související s ochranou těchto částí lidského těla. Penalizace odečtením jednoho

bodů je udělena v případě opuštění prostoru vozidla částí těla během testu (pro danou oblast) či, obdobně jako u výše popsaného testu, při selhání zadržného systému v oblasti. Další odečet jednoho bodu může být nařízen z důvodu špatného rozvinutí airbagu pro každou část těla, kterou toto selhání ovlivnilo. [1, 36]

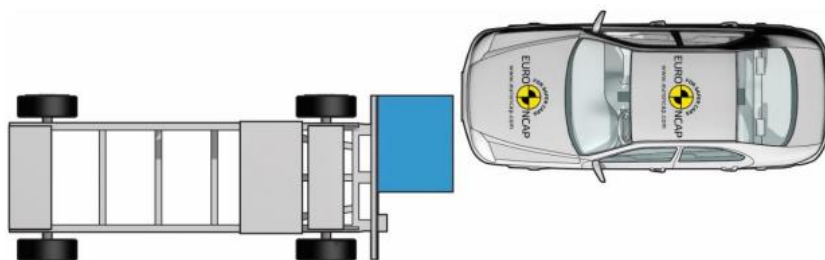
5.3.4 Zkouška přesazeným čelním nárazem protijedoucích vozidel

Novodobým trendem zkušebnictví pasivní bezpečnosti, jenž nahradil roku 2020 v paletě zkoušek EuroNCAP dlouhá léta užívaný test ODB (zkouška čelním nárazem do deformovatelné bariéry s překrytím čela vozu 40 % v rychlosti 64 km/h), je zkouška čelního střetu vzájemně protijedoucích vozidel s 50 % překrytím čelních ploch nazývaná MPDB (Mobile Progressive Deformable Barrier). I zde došlo vůči tradičním testům osobních vozů k mnohačetným úpravám pro potřeby quadrimobilů i za pomoci zmíněné odborné studie. Tato nárazová zkouška je považována ke splnění za zcela nejnáročnější ze všech zkoušek čelním nárazem navrhované metodiky. Tato skutečnost je zapříčiněna především poměrně vysokou rychlostí nárazu v kombinaci s neúplným překrytím čelních ploch vozidel.

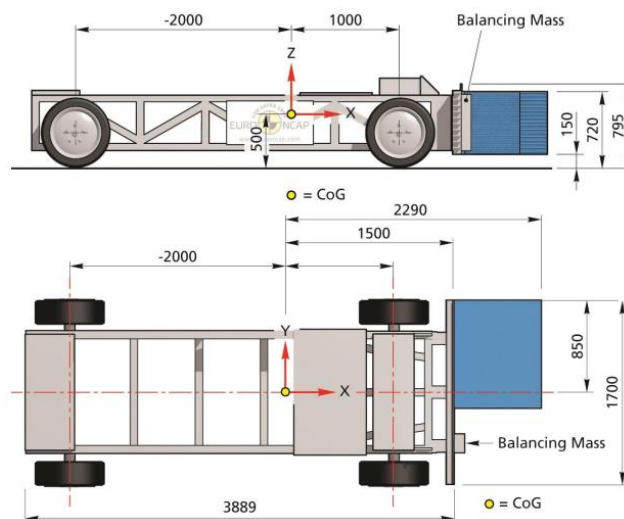
Hlavní parametry zkoušky:

- čelní srážka vozidla s protijedoucím testovacím vozíkem;
- 50 % překrytí čelních ploch na straně řidiče s maximální výchylkou 25 mm;
- celková hmotnost vozíku s bariérou stanovena na 950 ± 20 kg;
- cílová rychlost vozidla i vozíku v okamžik nárazu 50 ± 1 km/h;
- úhel nárazu $0^\circ \pm 2^\circ$.

Hmotnost zkušebního vozíku byla zvolena na základě zachování určité meze kompatibility testovaného vozidla s vozíkem při dostatečné úrovni ověření bezpečnosti. Při volbě byl také brán ohled na průměrné hmotnosti vozidel, se kterými by quadrimobil v převážně městském provozu mohl podobným způsobem kolidovat. Shodná hmotnost testovacího vozíku byla použita i při zkoušce bočním nárazem. Poloha vozíku vůči vozidlu v momentě těsně před srážkou je znázorněna na obrázku 21, podrobné rozměry testovacího vozíku a bariéry následně na obrázku 22.



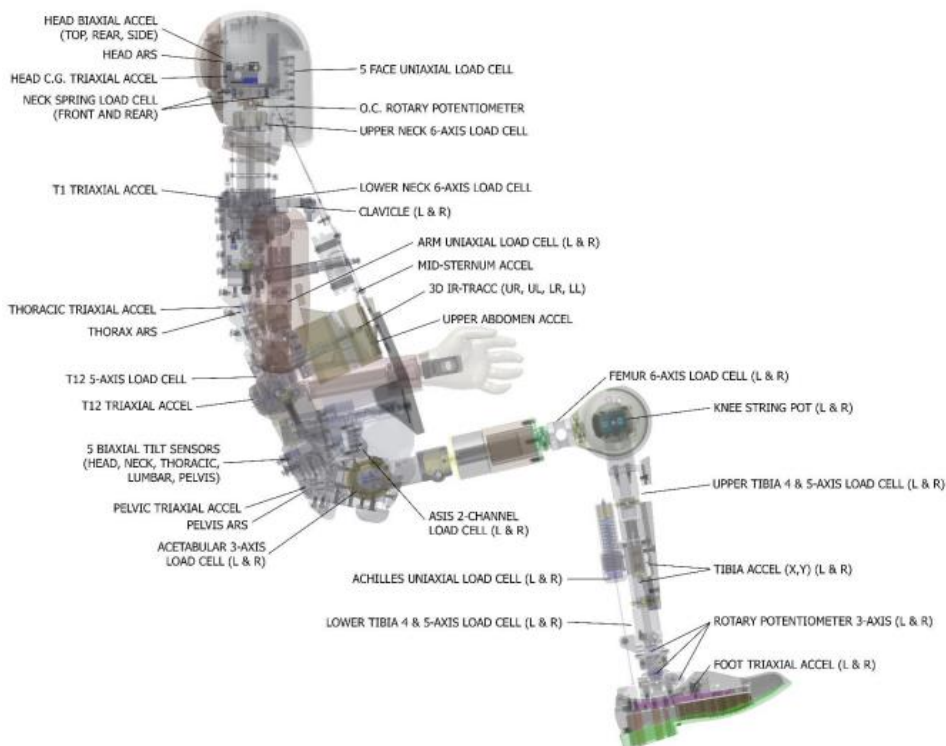
Obrázek 21 - Polohy vozíku a vozidla při zkoušce MPDB těsně před nárazem [37]



Obrázek 22 - Rozměry vozíku pro zkoušku MPDB [37]

Figuríny:

Tato nárazová zkouška je navržena tak, že na pozici řidiče bude použit jiný typ figuríny nežli na pozici spolujezdce. U spolujezdce se jedná o již výše popsanou figurínu Hybrid III 50M. Na místo řidiče bude usazena modernější figurína s vícero senzory THOR-50M ještě lépe vyhovující potřebám této nárazové zkoušky. Použitá figurína je osazena navíc například senzory tlaku na obličejovou část, klíční kosti či obdobně jako EuroSid 2 senzory na obratlích a břišní dutině. Její podrobná instrumentace uvedena na obrázku 23.



Obrázek 23 - Instrumentace figuríny THOR-50M [40]

Snímače na vozidle:

Osazení vozidla snímači je shodné se zkouškou čelním nárazem do tuhé bariéry. Použity jsou tedy akcelerometry na B-sloupcích, lehké siloměry bezpečnostních pásů a senzory napětí všech baterií ve vozidle. Navíc při zkoušce dochází k použití dvou siloměrů umístěných v těžišti zkušebního vozíku, kdy jeden slouží jako záloha pro případ výpadku druhého.

Kamery:

Rozmístění nahrávacích zařízení i požadavky na záznam jsou navrženy stejně jako u ostatních zkoušek čelním nárazem.

Procedury prováděné po zkoušce:

I u této zkoušky je shodná procedura vyjmutí figuríny z vozu. Navíc došlo k přidání procedury opatrné demontáže deformovatelné bariéry s jejím podrobným zkoumáním a vyhodnocením nastalých deformací pomocí 3D skenování. Z těchto dat je následně patrna míra pohlcení energie bariérou, hovořící o kompatibilitě vozidla a zkušebního vozíku.

Kritéria poranění:

Kritéria hodnocení poranění užitá pro tuto nárazovou zkoušku jsou pro řidiče uvedena v tabulce 26 a pro spolujezdce v tabulkách 27, 28 a 29. Pro případ nevybavení vozidla airbagy je maximální hodnocení stanoveno na 2 body, a to jak v oblasti hlavy, tak i krční páteře.

Tabulka 26 - Kritéria hodnocení ochrany řidiče při zkoušce MPDB [34]

| Oblast | Kritérium | Vyšší limit | Nižší limit |
|-------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------------------|
| Hlava | HIC ₁₅ | 500 | 700 |
| | 3ms zrychlení [g] | 72,0 | 80,0 |
| Krční páteř | Stříhová síla [kN] | 1,9 | 3,1 |
| | Axiální síla [kN] | 2,7 | 3,3 |
| | Ohybový moment [Nm] | 42,0 | 57,01 |
| Hrud' | Stlačení žeber [mm] | 35,0 | 60,0 |
| Břicho | Maximální stlačení [mm] | - | 88 |
| Pánev | Síla na pánevní misky [kN] | 3,28 | 4,10 |
| Stehenní kost | Síla na stehenní kost [kN] | 3,8 | 9,07 po 0 ms a 7,56 po více než 10 ms |
| Kolena | Posun kolenních kloubů [mm] | 6,0 | 15,0 |
| Lýtková kost | TI | 0,4 | 1,3 |
| | Síla na lýtkovou kost [kN] | 2,0 | 8,0 |
| Chodidlo a kotník | Posun pedálů [mm] | 100 | 200 |

Tabulka 27 - Kritéria hodnocení ochrany hlavy spolujezdce při zkoušce MPDB [34]

| Kritérium | Vyšší limit | Nižší limit |
|-------------------|-------------|-------------|
| HIC ₃₆ | 500 | 700 |
| 3ms zrychlení [g] | 72 | 80 |

Tabulka 28 - Kritéria hodnocení ochrany krční páteře spolujezdce při zkoušce MPDB [34]

| Kritérium | Čas [ms] | Vyšší limit | Nižší limit |
|---------------------|----------|-------------|-------------|
| Střihová síla [F] | 0 | 1,9 | 3,1 |
| | 25-35 | 1,2 | 1,5 |
| | 45 | 1,1 | 1,1 |
| Axiální síla [F] | 0 | 2,7 | 3,3 |
| | 35 | 2,3 | 2,9 |
| | 60 | 1,1 | 1,1 |
| Ohybový moment [Nm] | - | 42 | 57 |

Tabulka 29 - Kritéria hodnocení ochrany hrudníku a dolních končetin spolujezdce při zkoušce MPDB [34]

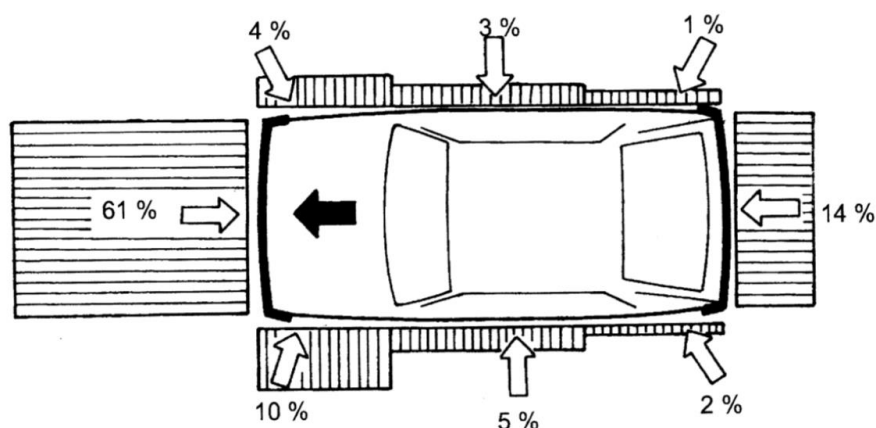
| Oblast | Kritérium | Vyšší limit | Nižší limit |
|---------------|-----------------------------|-------------|---------------------------------------|
| Hrud' | Stlačení [mm] | 22 | 50 |
| | V*C [m/s] | 0,5 | 1,0 |
| Stehenní kost | Síla na stehenní kost [kN] | 3,8 | 9,07 po 0 ms a 7,56 po více než 10 ms |
| Kolena | Posun kolenních kloubů [mm] | 6,0 | 15,0 |
| Lýtková kost | TI | 0,4 | 1,3 |
| | Síla na lýtkovou kost [kN] | 2,0 | 8,0 |

Penalizace užívané při vyhodnocení:

Případy bodové penalizace jsou obdobné jako u výše popsaných nárazových zkoušek. Jedná se především o selhání rozvinutí airbagu či nevyhovující kontakt hlavy figuríny s ním. Dále pak dochází k odečtům za nadměrný posuv řídicího ústrojí (totožně jako u zkoušky čelním nárazem do deformovatelné bariéry) či deformaci A-sloupku, narušení integrity prostoru pro posádku nebo nadměrné zatížení bezpečnostním pásem. Rovněž je zde uvažováno riziko submariningu (shodná srážka bodů jako u čelního nárazu do tuhé bariéry), nadměrný kontakt kolene či stehenní kosti s interiérem vozu nebo přílišný posun některého z pedálů. Mimo hodnoty související s biomechanikou mohou být penalizace udělovány i za samovolné otevření dveří během testu nebo naopak jejich nemožnost otevření po nárazu a znesnadnění tak vyproštění posádky. [31, 34, 36, 37, 38, 39, 40]

5.3.5 Závěr návrhu metodiky a výsledné hodnocení

V této kapitole došlo k vypracování podrobné metodiky testování pasivní bezpečnosti quadrimobilů pomocí čtyř nárazových zkoušek. Cíleně došlo k návrhu třech zkoušek nárazem čelním, který je nejčastějším druhem kolize, což potvrzuje statistika četností směru nárazu na obrázku 24, doplněných o zkoušku velmi nebezpečného (i poměrně četného) bočního střetu. Dvě ze zkoušek byly navrženy se statickou bariérou, u dvou je naopak využito nárazového vozíku s progresivně deformovatelnou bariérou upevněnou na přídi. Veškeré testy byly navrženy s cílem podstatného zvýšení bezpečnosti vozidel kategorie L7e.



Obrázek 24 - Četnost nehod dle směru nárazu [2]

Výsledné hodnocení bezpečnosti vozidla je navrženo obdobně jako u společnosti EuroNCAP. Za každou zkoušku má testovaný vůz možnost obdržet nejvíce 16 bodů s tím, že celkové maximum ze všech navržených nárazových zkoušek je rovno 64 bodům. Z podílu obdržených bodů ku maximu následně vychází konečné hodnocení vozu navržené v tabulce 30.

Tabulka 30 - Návrh hodnocení vozidel dle metodiky

| Hodnocení ochrany | Počet bodů | Návrhy / příkazy |
|-------------------|------------|--|
| Výborná | 64-54 | Není třeba úprav |
| Dobrá | 53-43 | Drobné úpravy zádržných systémů |
| Mezní | 42-32 | Úpravy zádržných systému a prvků pasivní bezpečnosti |
| Slabá | 31-21 | Úpravy konstrukce a nárůst počtu prvků zvyšujících pasivní bezpečnost |
| Nedostatečná | 20-0 | Kompletní přepracování konstrukce a aplikace prvků zvyšujících pasivní bezpečnosti |

6 Ověření bezpečnosti vyvíjeného vozidla

Na základě navržené metodiky bude provedena simulace s cílem ověření vlastností pasivní bezpečnosti vyvíjeného vozidla kategorie L7e na Fakultě dopravní, které můžeme vidět na obrázku 25. Tento quadrimobil nese komerční jméno EVgen, pramenící z českého jména Evžen s odkazem na typ zvoleného pohonu pro tuto generaci. Základní rozměrové parametry tohoto quadrimobilu jsou následně zaneseny do tabulky 31.



Obrázek 25 – Vyvíjený quadrimobil EVgen ve verzi předané do výroby

Tabulka 31 – Základní rozměrová charakteristika quadrimobilu EVgen

| Parametr | Délka | Šířka | Výška | Rozvor náprav | Rozchod |
|--------------|-------|-------|-------|---------------|---------|
| Hodnota [mm] | 2670 | 1545 | 1542 | 1880 | 1420 |

Simulace se v současnosti dostávají do popředí ve stále více odvětvích a jinak tomu není ani v automobilovém průmyslu. Tento výrok potvrzuje i skutečnost, že je stále více nárazových zkoušek automobilů, především v prototypové fázi, kdy jsou vozidla extrémně finančně nákladná, uskutečňováno pomocí numerických simulací. Virtuální prostředí dnešních dní totiž nabízí vysoce reálný obraz chování objektu v simulaci, jako je tomu ve skutečnosti, čímž simulace pozbývá velkého počtu svých nedostatků a stává se velice výhodným nástrojem.

Pro provedení simulace bylo zvoleno konečně-prvkové rozhraní explicitního řešiče LS-DYNA, v kterém došlo k provedení zjednodušené simulace dle scénáře zkoušky čelním nárazem do absolutně tuhé překážky v rychlosti 30 km/h se 100 % překrytím přídě z navržené metodiky. Veškeré kroky přípravy modelu a následně i vyhodnocení byly provedeny v prostředí programu LS-PrePost, které je součástí instalační sady LS-DYNA od firmy Ansys a slouží právě k tomuto účelu. Cílem simulace je především vyhodnocení strukturálních zatížení a odhalení případných selhání konstrukce.

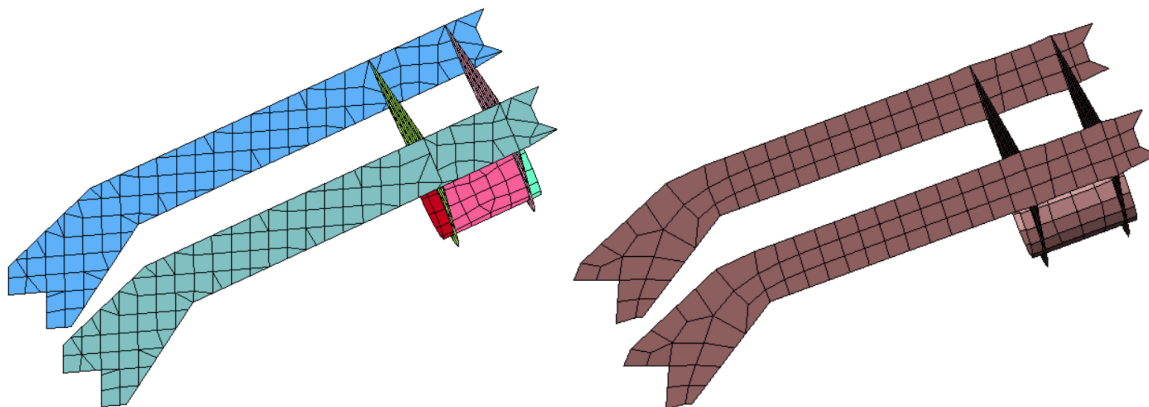
6.1 Příprava modelu

Pro možnost simulace nárazové zkoušky vyvíjeného vozidla bylo nejprve nutno vytvořit virtuální model, který ji může podstoupit. Geometrický model mi byl poskytnut od kolegy Bc. Michala Cenknery, zabývajícího se samotnou konstrukcí vozu. Z vytvořeného virtuálního modelu geometrie došlo pomocí generování středoploch k přepracování veškerých součástí na skořepiny, díky čemuž bylo umožněno je následně upravovat pro potřeby simulace v LS-DYNA. Na popsanych postupech jsme s kolegou iterativně spolupracovali a společně dovedli model vozidla do stavu vhodného k provedení dalších příprav v LS-PrePost. Zde bylo následně nutno celý model tzv. nameshovat (nasítovat), tedy rozdělit ho na konečně prvkovou síť, se kterou program pracuje.

6.1.1 Tvorba sítě

Sítování modelu, tedy meshing, je nedílnou součástí každé přípravy obdobné simulace, neboť právě chování vytvořených elementů a uzlů je poté zkoumáno. Komponenty vozu tedy dále nevystupují jako celky, spíše však jako soustavy uzlů a mezi nimi vzniklých elementů. K meshování byla ve všech případech použita karta Auto Mesher v záložce Mesh, kde je možnost výběru mezi několika síťovacími režimy. V případě tvorby sítě u vyvíjeného vozidla došlo k použití dvou režimů, a to sítování dle zadané velikosti elementu (Size) nebo případně jejího rozmezí (Deviation). Velikost elementů přímo ovlivňuje výpočetní čas simulace. Příliš jemná síť může zapříčinit dokonce až jeho časovou nemožnost provedení. Primárně vybraná velikost hran elementů 10 mm měla přinést dostatečnou podrobnost se zachováním přiměřeného výpočetního času. U dílů rámové konstrukce z profilů čtvercového průřezu však následně došlo k jejich přesítování s velikostí hrany v rozmezí 10 až 12,5 mm pro reálnější obraz skutečného tvaru objektu. V souvislosti s tím je nutno uvést, že návrhovaná konstrukce počítá s použitím kombinace ocelových profilů o čtvercovém průřezu s hranou délky 25 mm a trubek se shodným průměrem. Pro co nejkratší časový krok simulace je, kromě velikosti hrany elementu, rovněž velice podstatná jejich nízká rozměrová rozmanitost. K opravám nehomogenních elementů sloužily nejčastěji příkazy ze záložky Element Tool, konkrétně

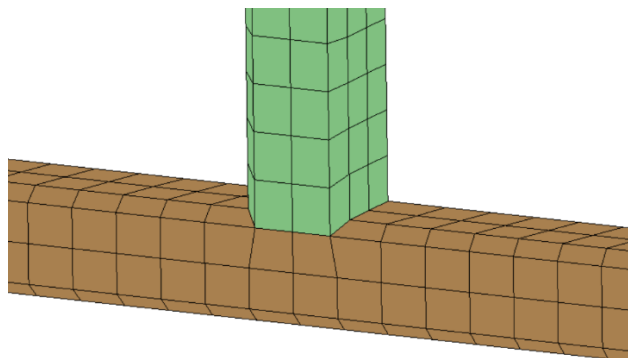
příkaz Align v kartě Element Edit, či ještě častěji karta Smooth. Pomocí nich se dalo docílit obdobně rozměrných sousedních elementů zajišťujících plynulejší simulační výpočet. Rovněž nežádoucími elementy pro provedení simulace (z důvodu jejich odlišné tuhosti při výpočtech) jsou trojúhelníky, které byla velká snaha v co největším počtu eliminovat převedením na žádoucí čtyřúhelníky, například jejich vzájemným sloučením či lehkou korekcí geometrie. Příklad sítě, na které bylo použito vyhlazení a redukce trojúhelníkových elementů i s následným výsledkem, můžeme vidět na obrázku 26. Tvar sítě u upraveného dílu uchycení volantu již lehce reflektuje i jeho napojení na okolní součástky.



Obrázek 26 - Díl uchycení volantu před a po provedení korekcí

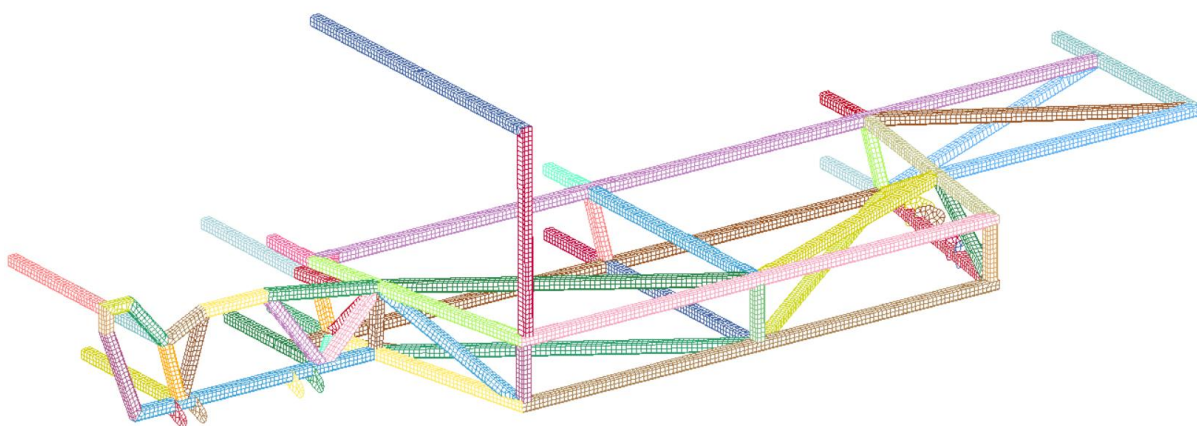
6.1.2 Navázání částí rámu do celku

Po vytvoření meshe všech dílů konstrukce bylo nutno jejich vzájemné spojení do navrženého rámu. K tomu se nabízí hned několik postupů. Základní a zároveň nejvhodnější pro potřeby napojení konstrukce složené z profilů či plechů je spoj pomocí samotných uzlů sítě. Konexe tímto způsobem se provede tak, že jsou uzly napojovaného objektu pomocí příkazu Replace v kartě Node Edit (v záložce Element Edit) sloučeny s vyhovujícími nejbližšími uzly na druhém objektu. Tím dochází k jejich sjednocení v jeden a síť se zde pevně napojí. Jak je možno vidět na obrázku 27, tento krok lze u profilů a plechů provést se zachováním původní geometrie spojených dílů.



Obrázek 27 - Detail spoje pomocí uzlů sítě

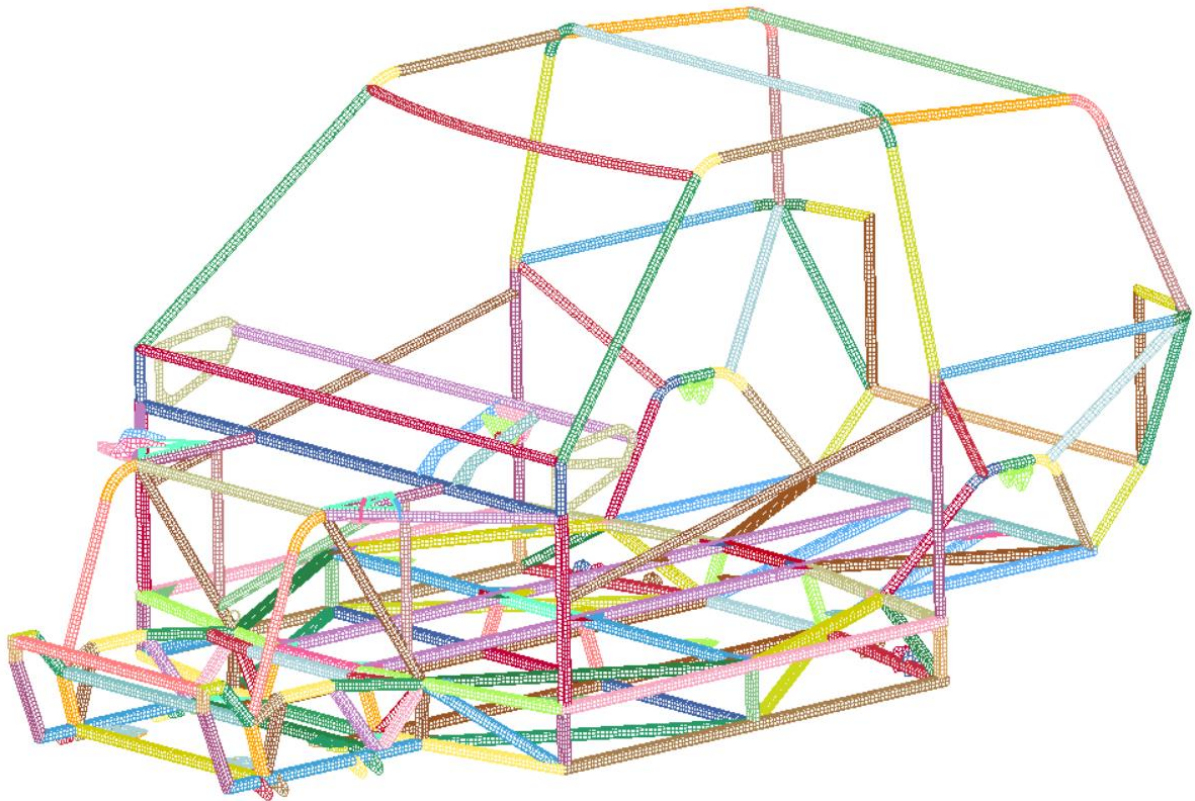
Převážná většina částí nosného podvozkového rámu tak byla propojena pomocí zde popsaného postupu. Výjimku tvořily pouze některé profily ústící do míst s velkým počtem napojení. Kompletně spojený nashemovaný rám z profilů je zachycen na obrázku 28, kde došlo pro přehlednost ke skrytí zobrazení elementů. Z obrázku je také patrné, že pro usnadnění příprav sítě bylo umožněno, díky symetricky navrženému rámu, provedení všech konstrukčních operací pouze na levé polovině vozidla, která byla v závěru síťování a propojování modelu zrcadlena. Nesymetrické prvky byly poté domodelovány samostatně.



Obrázek 28 - Spojený nasítovaný profilový rám

Při propojení trubek by pomocí zmíněného přístupu docházelo k nežádoucím deformacím jejich geometrie, a tak byly pro jejich vzájemné spojení i následné konexe s profily čtvercového průřezu použity jiné postupy. Výsledný model kompletního rámu, který vznikl pomocí dále popsaných vazeb a následného zrcadlení můžeme vidět na obrázku 29.

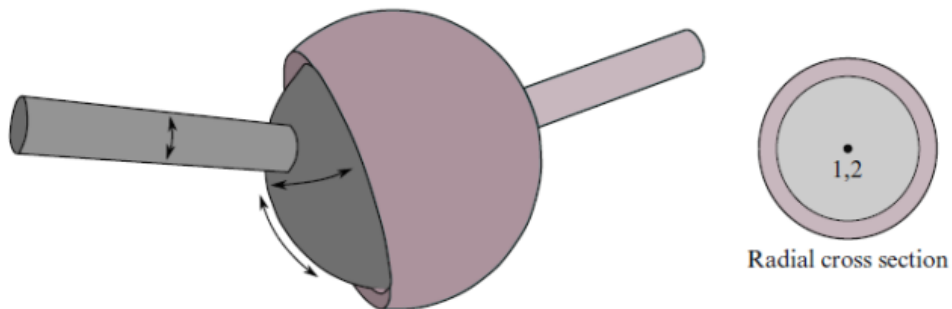
Tyto postupy nejsou vytvořeny pomocí manuální úpravy sítě, ale je užíváno specifikovaných vazeb pod kartou Keyword Manager v záložce Model. Pro první takovýto používaný typ vazby došlo v Keyword Manageru k výběru kategorie Contact, ve které byla následně specifikována každá tato vazba přes okno kontaktu Tied Shell Edge To Surface. Zde je pouze nutno vyplnit účastníky vazby pomocí ID a určení jejich typu. Druhý používaný druh spoje částí rámu tvořený přes Keyword Manager byl z kategorie Constrained, konkrétně Spotweld (bodový svár). Každý bodový svár je zde nutno vytvořit a specifikovat označením dvou uzlů, které jsou určeny ke spojení, a to ať už dle jejich ID či jednoduchým výběrem kurzoru přes tlačítko Pick. Kontakt Shell Edge To Surface ani Constrained Spotweld nejsou v modelu nijak vizuálně vyobrazeny, o jejich existenci uživatel ví pouze dle Keyword Manageru, kde je možnost kromě tvorby i následných úprav.



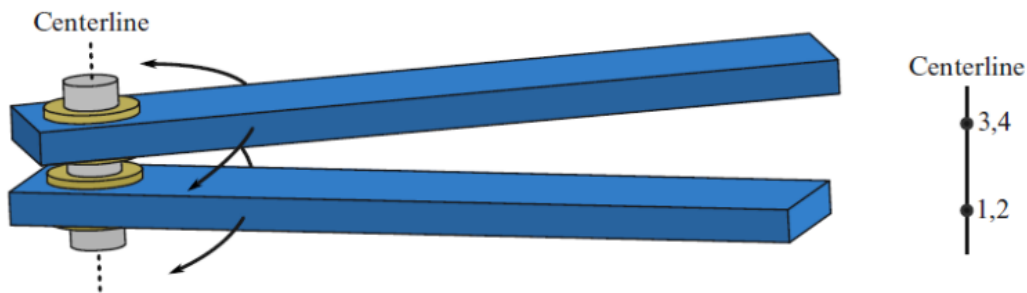
Obrázek 29 – Kompletně nameshovaný a napojený rám vozidla

6.1.3 Navázání ostatních dílů

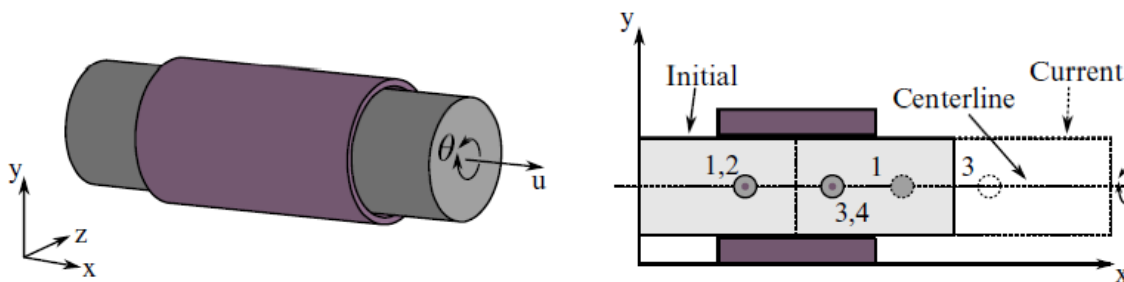
Kromě napojení při výrobě svařených prvků konstrukce bylo nutno vytvořit i několik pohyblivých spojů, mezi které patří například spojení kloubová, otočná či posuvná. Pro tvorbu všech těchto vazeb sloužil rovněž, jako u výše popsaných principů, Keyword Manager. Zde došlo vždy k volbě potřebné vazby, konkrétně Jointu, z kategorie Constrained. Pro simulaci kloubů posloužil Joint Spherical zachycený na obrázku 30. K nahrazení čepu kola umožňující jeho rotaci byl užit Joint Revolute (viz obrázek 31) a pro virtuální tvorbu pružicí a tlumicí jednotky došlo k použití spoje Joint Cylindrical vyobrazeném na obrázku 32. Z těchto obrázků je vždy i přehledně patrné umístění a počet potřebných bodů pro provedení daného spoje.



Obrázek 30 – Schéma kloubové vazby Spherical Joint [41]

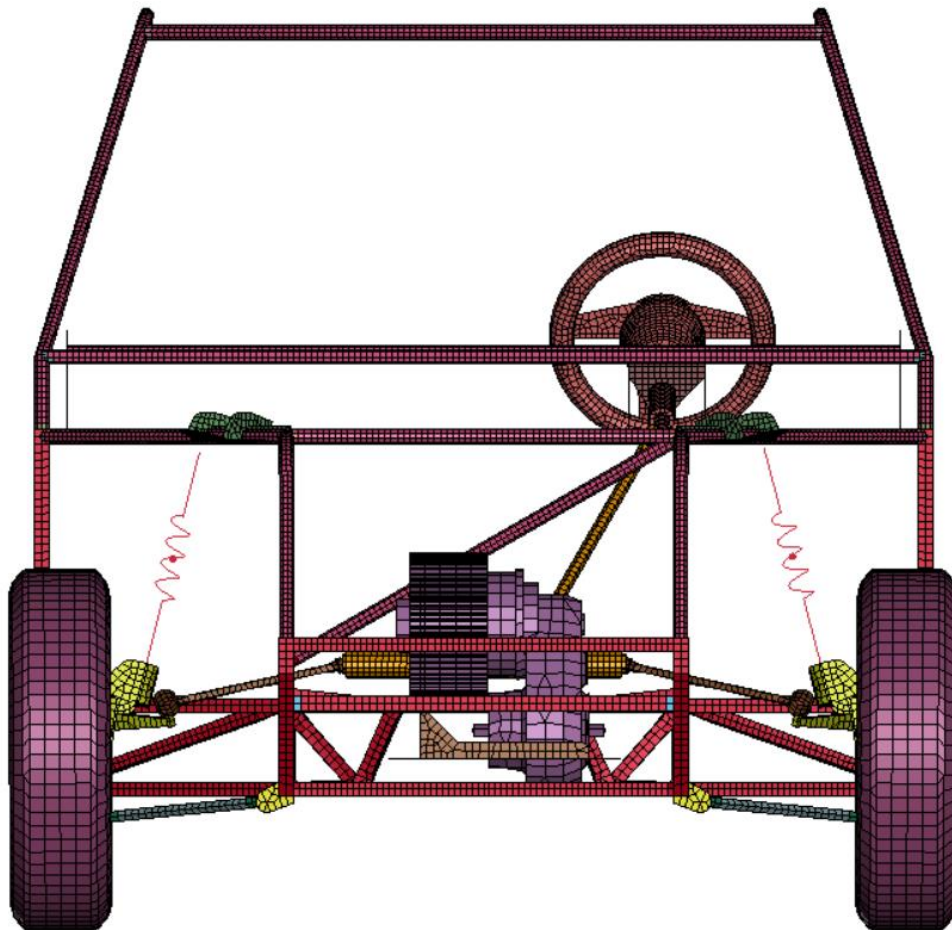


Obrázek 31 – Schéma otočné vazby Revolute Joint [41]



Obrázek 32 – Schéma translační vazby Cylindrical Joint [41]

U typu Spherical, užitého pro veškeré kloubové spoje řízení, je nutno vytvořit dvojici shodně umístěných bodů, kde je následně každý jeden z nich přiřazen, pomocí karty Create Entity v záložce Model, do skupiny uzlů (Node Set) s jedním z dílů, mezi kterými je vazba tvořena. Rovněž je každý z bodů přiřazen pomocí svého Node ID a Part ID k dílu, ke kterému náleží. Přiřazení je provedeno přes kategorii Keyword Manageru Constrained příkazem Extra Nodes. V případě typů Revolute a Cylindrical je postup obdobný s tím rozdílem, že je třeba dvou dvojic uzlů. Každá z dvojic je umístěna tak, aby tvořila osu samotného vazbou cíleného pohybu, tedy posunů po, či otáčení kolem, ní. Výsledná pozice konců osy už musí pouze umožňovat napojení dvojic bodů na oba prvky vazby. Zde bylo zapotřebí přes skupiny uzlů napojit vždy jeden bod z dvojice k bližšímu prvku zamýšleného spoje, druhý bod zůstával v tomto kroku nepřijížen a jeho úloha je zadávána v Keyword Manageru. V něm musel být pro funkčnost vazby uveden jako bod náležící k prvku vzdálenějšímu (pomocí Part ID). Stejně tak musel být přiřazen k náležícímu dílu i druhý body vazby. Shodný postup je následně použit i u dvojice bodů na opačné straně vazby. Odlišnost typu Cylindrical od Revolute ještě spočívá v nutnosti nastavení materiálu diskrétního elementu spojujícího tyto dvě dvojice bodů, kdy v tomto případě došlo k nastavení (rovněž pomocí Keyword Manageru) Material Spring Elastic s charakterizováním konkrétní tuhosti při montáži použité pružiny. Předání zadané informace bylo provedeno pomocí specifikace dílu přes kategorii Part, také v této kartě. Popsaný postup zajistil vizuálně patrné virtuální zobrazení tlumících a pružících jednotek viz obrázek 33. Shodný obrázek rovněž z čelního pohledu zachycuje model přední části vozidla po dokončení přípravných prací na něm.



Obrázek 33 - Vyobrazení modelu včetně vazeb tlumících a pružících soustav

6.1.4 Tvorba materiálových modelů

Před samotným spuštěním výpočtu simulace bylo nutno doplnit ještě několik zásadních parametrů, jedním z nich jsou použité materiály a jejich vlastnosti. Deformační charakteristiky a další informace o užitých materiálech přímo ovlivňují výpočet i samotný výsledek simulace, proto je tento krok velice podstatným a bylo dbáno na co nejpřesnější zadání všech potřebných hodnot. Tvorba materiálového modelu je v programu provedena pomocí Keyword Manageru, konkrétně volby vhodného materiálu v kategorii Mat. Zde došlo k vytvoření tří materiálových modelů. Jeden s užitím pro ocelové díly (Plastic Kinematic), druhý pro simulaci pneumatiky (Elastic) a třetí, rigidní, pro plně tuhá tělesa (Rigid). V každém z vytvořených modelů bylo následně nutno zadat specifické hodnoty pro konkrétní materiál. Ty jsou uvedeny v tabulkách 32, 33 a 34 níže. Ocel zvolená k použití pro veškeré konstrukční díly je typu 11373, normalizačně žíhaná. Nastavení materiálových parametrů do okna Keyword Manageru je ukázáno na obrázku 34. Dalším použitým materiálovým modelem byl, již výše zmíněný, pružný materiál sloužící pro nastavení reálné tuhosti pružiny.

Tabulka 32 - Materiálové vlastnosti zadané pro ocel 11373 [42, 43]

| Materiál | ρ [kg/mm] | E [GPa] | μ | σ_y [GPa] | E_t [GPa] |
|------------|----------------|---------|-------|------------------|-------------|
| Ocel 11373 | $7,85e^{-6}$ | 210 | 0,3 | 0,22 | 1,0 |

Tabulka 33 - Materiálové vlastnosti zadané pro pneumatiku [41]

| Materiál | ρ [kg/mm] | E [GPa] | μ |
|-----------------|----------------|---------|-------|
| Pryž pneumatiky | $9,88e^{-7}$ | 0,15 | 0,45 |

Tabulka 34 - Materiálové vlastnosti zadané pro rigidní prvky [42, 43]

| Materiál | ρ [kg/mm] | E [GPa] | μ |
|----------|----------------|---------|-------|
| Rigid | $7,85e^{-6}$ | 210 | 0,3 |

Kde ρ – hustota, E – Youngův modul pružnosti, μ – Poissonovo číslo, σ_y – mez kluzu a E_t – tangenciální modul pružnosti, ostatní hodnoty byly ponechány nulové (výchozí).

Keyword Input Form

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' window in Keyword Manager. At the top, there are buttons for 'NewID', 'MatDB', 'RefBy', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. Below these are checkboxes for 'Use *Parameter' and 'Comment', and a 'Setting' button. The main area displays the material name '*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_(TITLE) (003) (2)'. A text box contains 'Ocel 11373'. Below this is a table with two rows of parameters:

| 1 | MID | RO | E | PR | SIGY | ETAN | BETA |
|---|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|
| | 2 | 7.850e-06 | 210.00000 | 0.3000000 | 0.2200000 | 1.0000000 | 0.0 |
| 2 | SRC | SRP | FS | VP | | | |
| | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | | |

Obrázek 34 – Materiálové okno v Keyword Manageru

Další vlastností modelu zadanou přes kategorii Mat v Keyword Manageru je úbytek elementů v případě překročení meze pevnosti v tahu, tzv. eroze. Tato vlastnost simuluje přetržení dílu a byla nastavena pomocí okna Add Erosion. Zde došlo ke specifikaci hodnot viz tabulka 35.

Tabulka 35 – Hodnoty zadané pro simulaci přetržení dílu [41, 43]

| ϵ_{eff} [Gpa] | σ_{p1} [Gpa] | NCS |
|------------------------|---------------------|-----|
| -0,3 | 0,35 | 2 |

Kde ϵ_{eff} – efektivní plastická deformace, uvedení této hodnoty se znaménkem mínus pouze programu udává, že se jedná o hodnotu plastické deformace, σ_{p1} – mez pevnosti v tahu, NCS – počet podmínek které musí být naplněny pro úbytek elementu, právě tyto dvě hodnoty

tak zavádějí podmínky, kdy dojde k přetržení součásti samovolným úbytkem elementů. Ostatní hodnoty zůstali při specifikaci na výchozí hodnotě.

Veškeré k nastavení užití hodnoty byly převzaty z normových tabulek pro dané materiály, nebo se zakládají na názoru specialisty v oboru.

6.1.5 Tvorba bariéry

K provedení simulace nárazové zkoušky dle nastíněného scénáře v navržené metodice bylo dále nutno namodelovat plně tuhoun bariérou nepohlující žádnou energii nárazu. Pro tyto potřeby byla vytvořena prostá soustava skořepinových elementů tvořící desku, které byl přiřazen materiál Rigid, čímž došlo k vyhovění právě podmínce její absolutní tuhosti. Dalšími podmínkami jsou dostatečná velikost desky, tedy nastavení rozměru většího, než je čelní plocha vozidla a její korektní postavení kolmo na směr jízdy nedaleko předě vozidla, přinášející co nejkratší výpočetní čas simulace. Rozměr bariéry nastavený na 2000x1000 mm byl po první provedené simulaci shledán pro zkoušené vozidlo jako plně vyhovující, a tak byl využíván i nadále. Posledním faktorem bylo nastavení kontaktu mezi bariérou a vozidlem, který způsobí žádoucí kolizi těchto dvou objektů. Tento kontakt byl charakterizován pomocí okna Automatic Surface To Surface v kategorii Keyword Manageru Contact, kde bylo nutno zadat ID skupiny částí vozidla a ID bariéry.

6.1.6 Tvorba sekcí elementů

Sekce elementů jsou důležité pro možnost jejich hromadného zatřídění včetně společného nastavení parametrů v každé takové sekci. Vytvořené sekce jsou poté pomocí ID přiřazeny k jednotlivým dílům. Specifikace charakteristik elementů byla provedena s využitím kategorie Section (v Keyword Manageru), kde došlo k použití sekce skořepin, tedy Shell. V okně je nutno přednastavit formulaci elementů (ELFORM), smykový součinitel (SHRF), počet integračních bodů na elementu (NIP) a samotnou tloušťku v krajních uzlech (T). Nastavení smykového součinitele bylo v modelu vozidla ve všech případech shodné, a to doporučenou hodnotou 0,8333. Počet integračních bodů na elementech byl zvolen ve většině případů hodnotou tři (minimum doporučené pro nelineární materiál), pouze u pneumatik došlo k nastavení vyšší hodnoty pět. Typ elementů, tedy jejich formulace, byl rovněž nastaven ve dvou hodnotách. Pro veškeré ocelové díly byla v modelu zvolena hodnotou 16 (plně integrovaná skořepina s vysokou rychlostí výpočtu) a pro rigidní prvky došlo k ponechání výchozí hodnoty 2 (Belytscho-Tsay). V modelu nastavená tloušťka elementů se pohybuje, dle reálně užitých mocností plechů, stěn trubek a čtvercových profilů, mezi 2 a 4 mm.

6.1.7 Výsledek příprav

S cílem zkrácení výpočetního času došlo, i přes prvotní tvorbu kompletní konstrukce vozidla, k provedení simulace nárazu pouze s přední polovinou vozidla, ve které se předpokládají veškeré konstrukční deformace. Příklad byla dále v zadní části doplněna hmotným bodem s vazbami nahrazující chybějící části vozu. Finální statistika uzavírající přípravu modelu přídě je uvedena v tabulce 36.

Tabulka 36 – Statistika vypracovaného modelu

| Typ | Uzly | Elementy | Díly | Sestavy | Sekce | Tuhé vazby | Kontakty |
|-------|-------|----------|------|---------|-------|------------|----------|
| Počet | 40218 | 39355 | 36 | 34 | 13 | 113 | 18 |

6.2 Nastavení parametrů simulace

Simulace nárazové zkoušky v programu LS-DYNA je provedena, dle scénáře zkoušky, čelním nárazem do rigidní překážky rychlostí 30 km/h, při němž je hlavním cílem ověření základních strukturálních vazeb vozidla a z toho plynoucí úrovně jeho pasivní bezpečnosti. Podmínky zkoušky byly vypracovány dle tohoto scénáře a cíle. Nastavení rychlosti vozidla, vlivem zanedbatelné vzdálenosti čela vozu od překážky, současně i nárazové rychlosti, hmotností a dalších parametrů modelu bylo provedeno v tomto kroku.

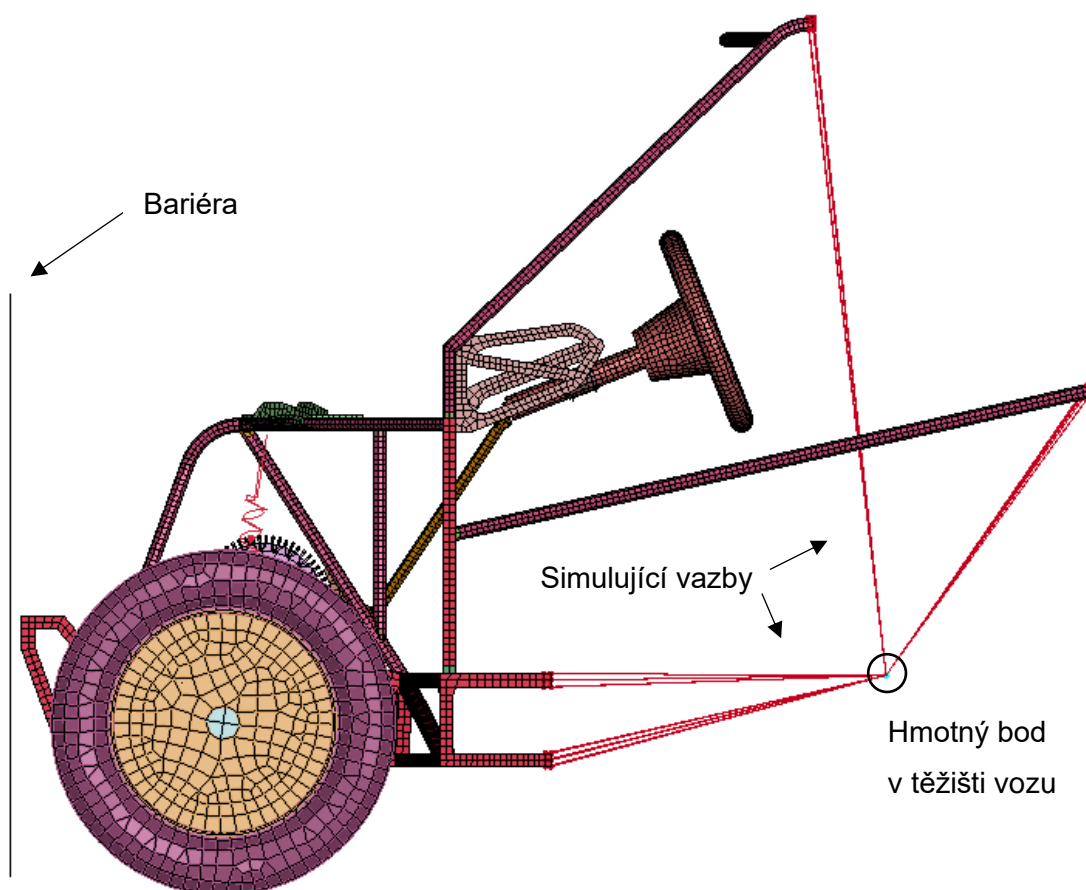
Rychlost

Rychlost konstrukce byla definována následujícím postupem. Nejprve bylo nutno dané díly určené k urychlení zařadit pomocí karty Create Entity v záložce Model do sestavy Set Part (obdobně jako při tvorbě Set Nodes pro pohyblivá spojení), kterou bylo dle ID následně možno uvést do karty Velocity Generation založené pomocí Keyword Manageru pod skupinou Initial. Zde bylo dále nutno uvést ještě typ tohoto ID (v tomto případě tedy part set ID) a požadovaná rychlost v dané ose souřadného systému. Pro nárazovou rychlost 30 km/h byla s cílem dodržení jednotek zadána hodnota 8,333 m/s. Stejná rychlost byla podobným postupem specifikována i pro urychlení hmotného bodu navázaného na volné konce konstrukce nahrazujícího nemodelované díly v zadní části vozu (zde bylo užito ID tohoto bodu a typ Node ID). Obdobně došlo i k zadání obvodové rychlosti disku s pneumatikou pro simulaci odvalování, což však při výsledné animaci, bohužel, není vlivem krátkého času příliš patrné.

Hmotnost

Druhou podstatnou veličinou nastavenou v tomto kroku je hmotnost. Ta byla prostřednictvím hmotných bodů rozdělena do dvou částí. Působíště váhy motory a převodovky bylo definováno přímo v bodě jejich spojení (35 kg) a zbývající hmotnost celé konstrukce (365 kg) byla

vztažena k hmotnému bodu simulujícímu nemodelované části zajišťující reálnou kinetickou energii celku. Tento hmotný bod byl umístěn do pomyslného těžiště kompletního vozidla. Poloha hmotného bodu včetně zmíněných vazeb je znázorněna na obrázku 35, který zároveň z bočního pohledu ukazuje vymodelovanou přední část quadrimobilu použitou pro simulaci popsané nárazové zkoušky včetně tuhé bariéry nahrazené rigidní deskou.



Obrázek 35 - Boční pohled na model přední části vozu a užití bariéry

Vzájemný kontakt částí karoserie

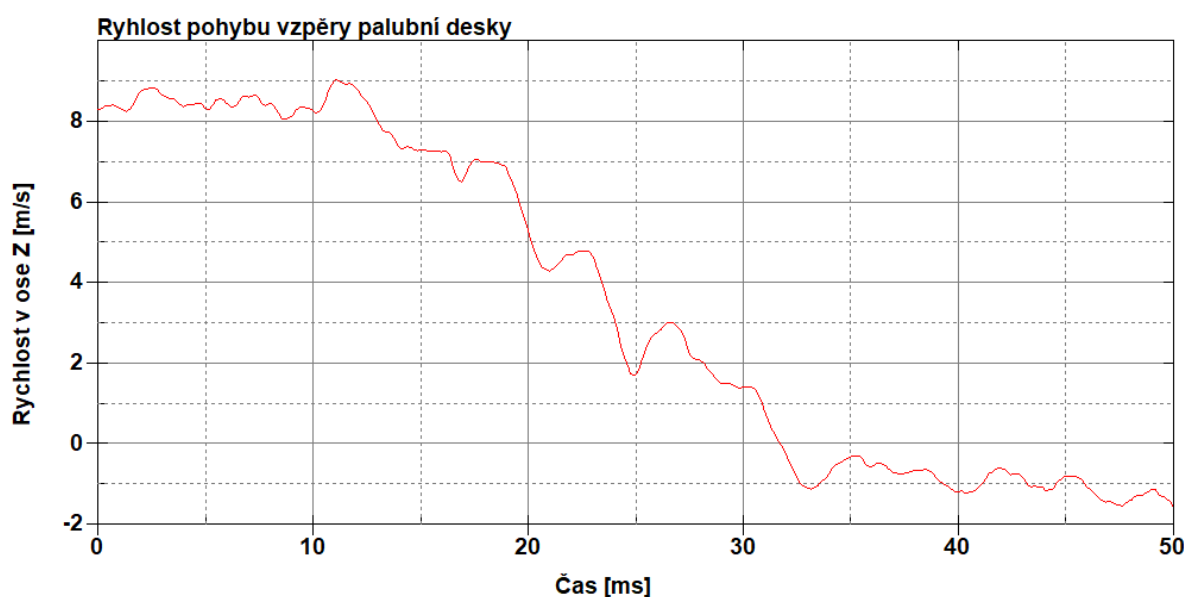
Kontakt částí konstrukce s jejich následnou vzájemnou deformací byl dalším potřebným nastavením. Docíleno bylo této funkce modelu přes okno Automatic Single Surface pod kategorií Contact, kde došlo k zadání ID vytvořené sestavy dílů, která se jím má řídit, a požadovaného koeficientu tření mezi těmito díly s hodnotou 0,3.

Gravitace

Realita provedené simulace byla podpořena i namodelováním gravitační síly se stálou hodnotou $9,81 \text{ m/s}^2$ do modelu zadanou v příslušných jednotkách příkazem Load Body ve směru osy y. Gravitace byla zadána s takřka nekonečnou působností pomocí příkazu Define Curve.

Čas simulace

Délka simulace byla nastavena pomocí příkazu Termination v kategorii Control (Keyword Manager). Postupnými iteracemi byla zjištěna pro nárazovou rychlost 30 km/h dostatečná doba simulace 50 ms. Před tímto okamžikem byla s rezervou zaznamenána záporná rychlost u všech částí zkoušené konstrukce. Tuto skutečnost potvrzuje i graf na obrázku 36, kde je zachycena rychlost pohybu uzlu vzpěry palubní desky v čase. Zde je patrné, že přibližně ve 32 ms dochází k jejímu zastavení a následnému pohybu zpět vlivem odrazu. V obrázku viditelné náhlé poklesy a růsty rychlosti byly způsobeny především samovolným kmitáním tohoto uzlu, postupnou ztrátou stability částí konstrukce, deformací pneumatiky či postupně erodujících elementů konstrukce.



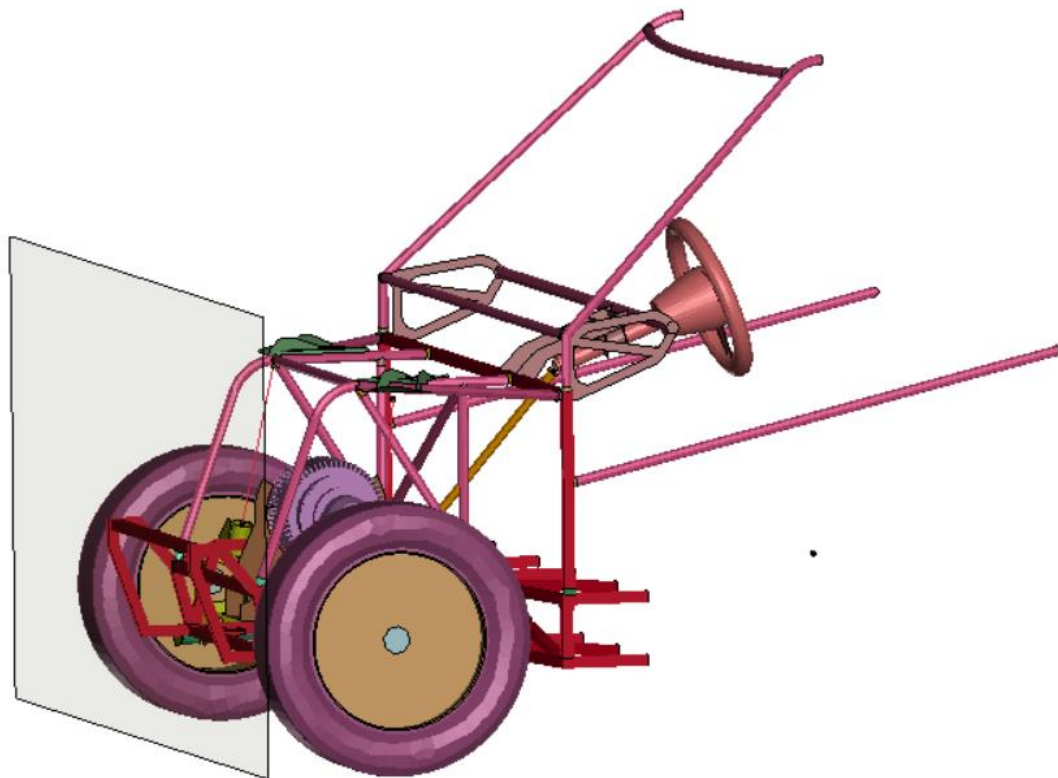
Obrázek 36 - Graf rychlosti pohybu vzpěry palubní desky

6.3 Vyhodnocení

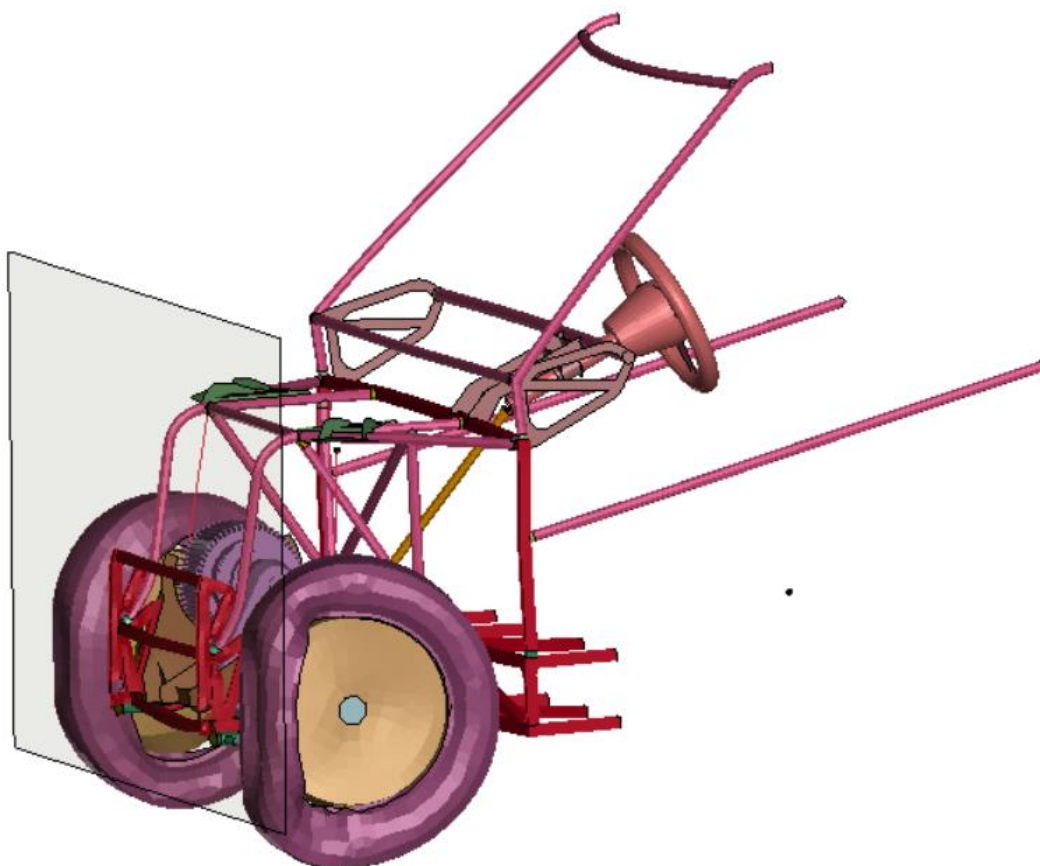
6.3.1 Vyobrazení průběhu deformací na konstrukci

Před samotnou analýzou dat je vhodné uvést vyobrazení stavu konstrukce vozu před a po nárazu. Vyobrazení je provedeno z několika směrů pro zachycení zjevných následků kontaktu příďe vozu a plně tuhé bariéry v rychlosti 30 km/h. Nejprve je vždy zachycen stav před kontaktem vozidla s bariérou a následně stav konstrukce po nárazu.

Na obrázcích 37 a 38 můžeme vidět kompletní model příďe vozidla (včetně částečně průhledněné bariéry) v časech 0 ms a 32 ms.

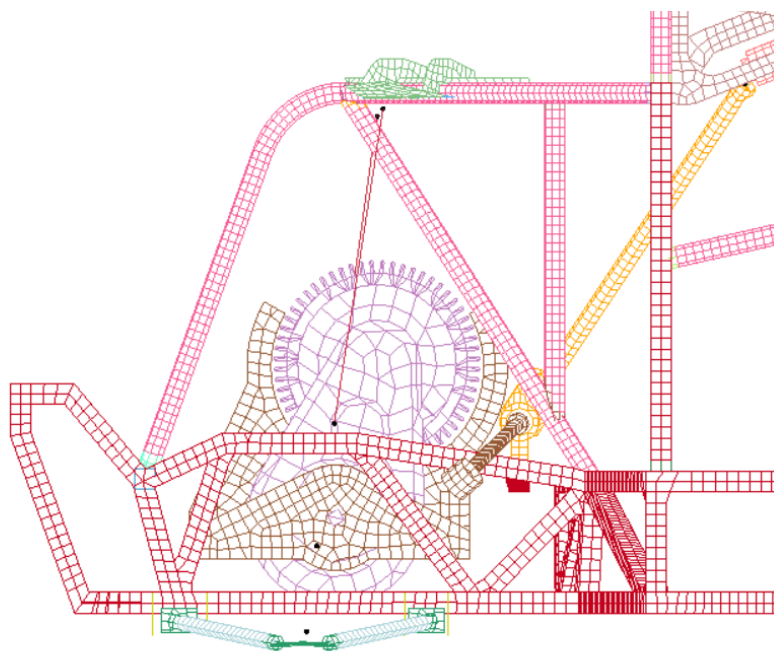


Obrázek 37 – Boční pohled na vozidlo v čase $t=0$ ms

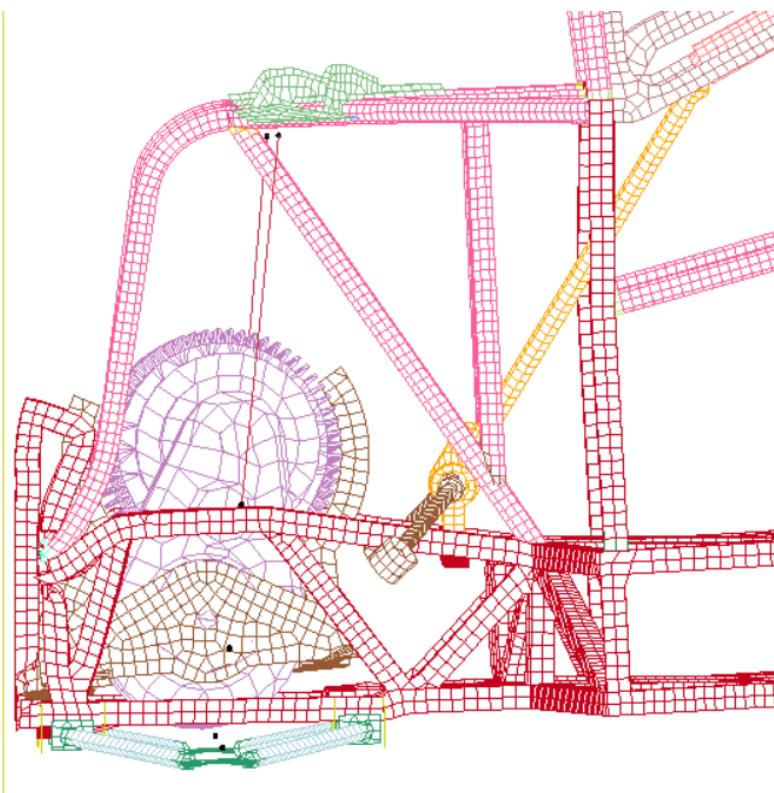


Obrázek 38 - Boční pohled na vozidlo v čase $t=32$ ms

Pro lepší názornost vzniklých deformací došlo v modelu u dalšího vyobrazení ke skrytí dílu pneumatiky, disku a těhlice. Na obrázcích 39 a 40 je zachycen detailní boční pohled na přední deformační část vozidla (při skrytí zobrazení elementů) v časech 0 ms a 37 ms.

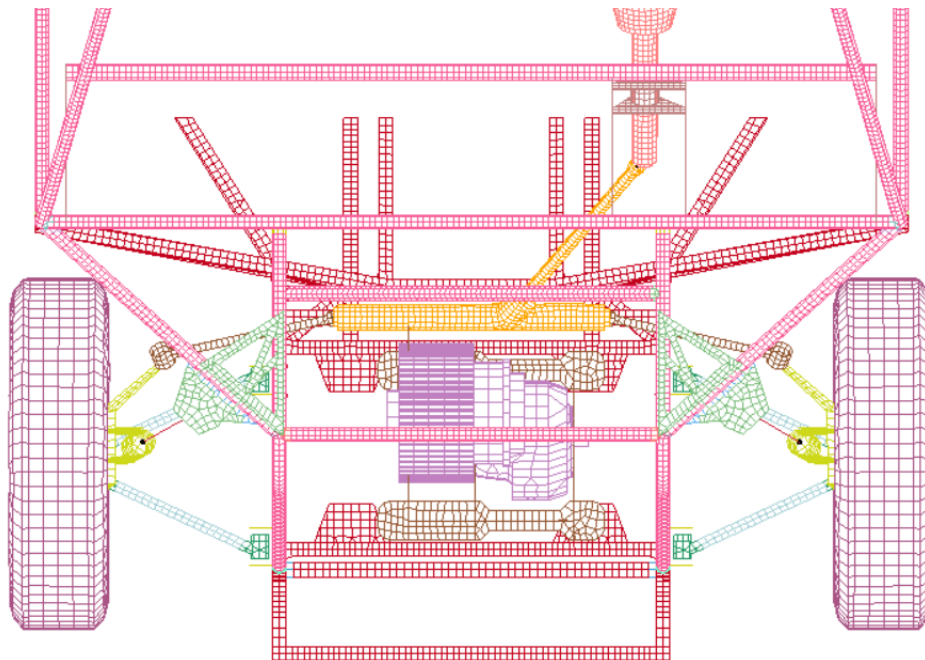


Obrázek 39 – Vykreslení detailu stavu přední části vozidla pomocí sítě v čase 0 ms

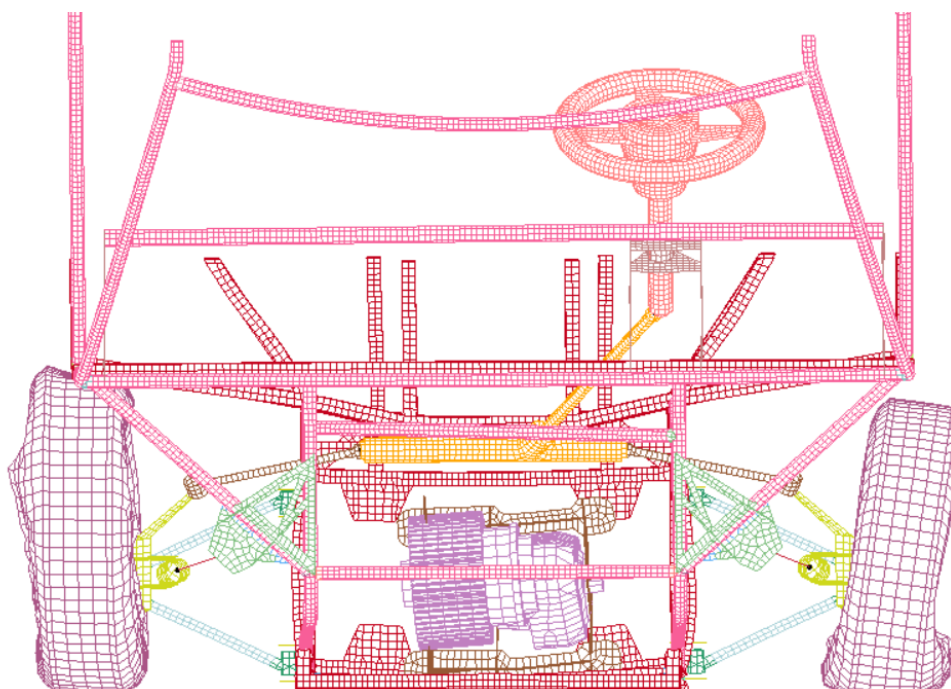


Obrázek 40 – Vykreslení detailu stavu přední části vozidla pomocí sítě v čase 37 ms

Obrázky 41 a 42 zachycují vozidlo při pohledu shora, kde opět došlo skrytím elementů k vykreslení deformací pouze na síti modelu. Časová stopa těchto snímků je 0 ms a 37 ms a je z nich dobře patrný nastalý posun motoru a převodovky směrem vpřed, který je v otázce pasivní bezpečnosti na rozdíl od posuvu směrem do prostoru pro posádku žádoucí.

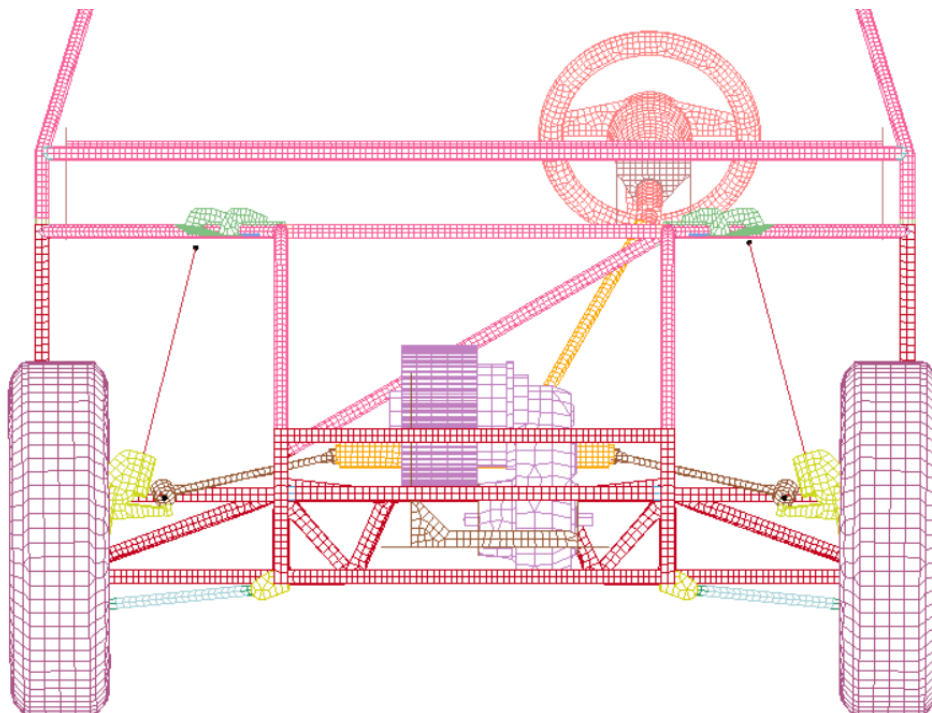


Obrázek 41 – Pohled na síť vozidla v čase 0 ms shora

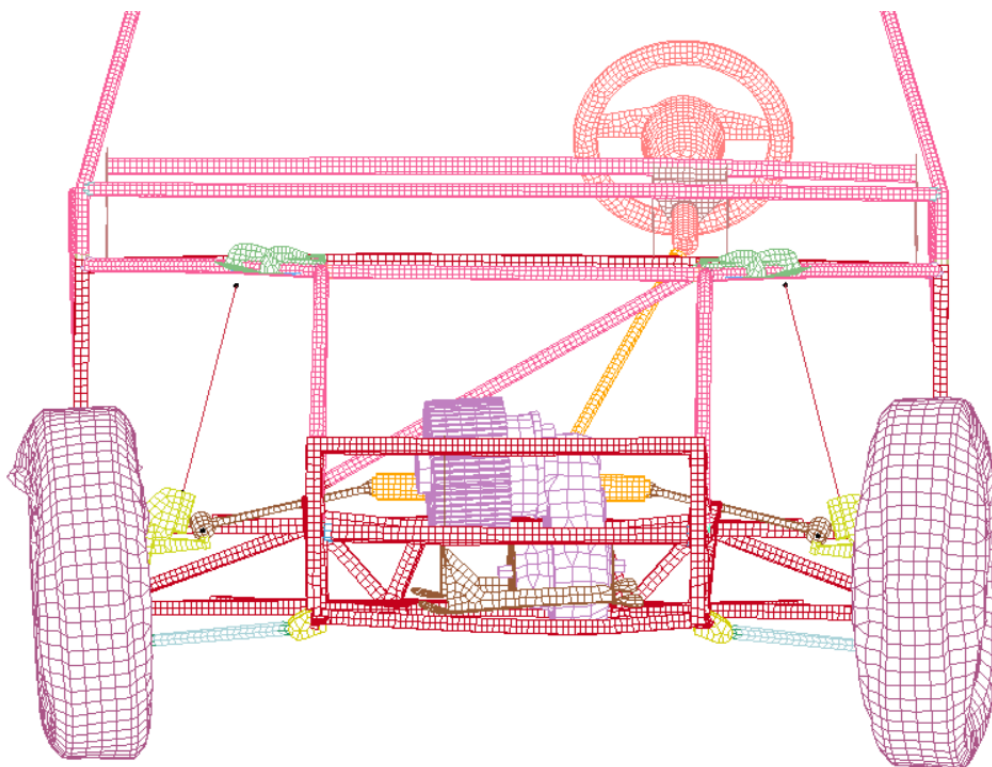


Obrázek 42 – Pohled na síť vozidla v čase 37 ms shora

Poslední dvojicí snímků je čelní pohled na vozidlo při plném zprůhlednění bariéry v časech 0 ms a 37 ms zachycený na obrázcích 43 a 44.



Obrázek 43 – Čelní pohled na síť vozu v čase 0 ms

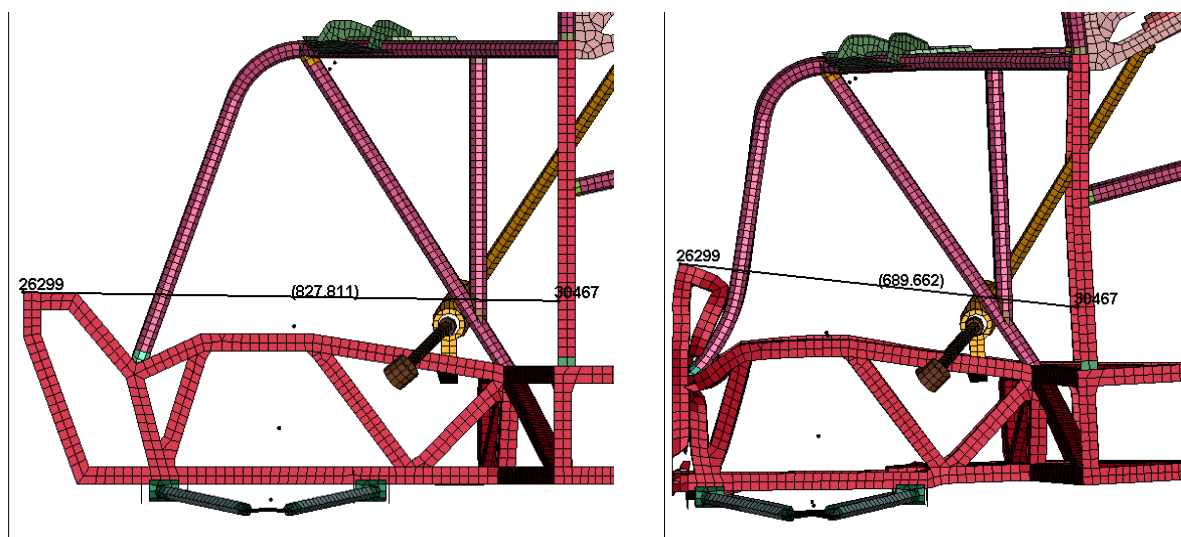


Obrázek 44 – Čelní pohled na síť vozu v čase 37 ms

6.3.2 Naměřené hodnoty

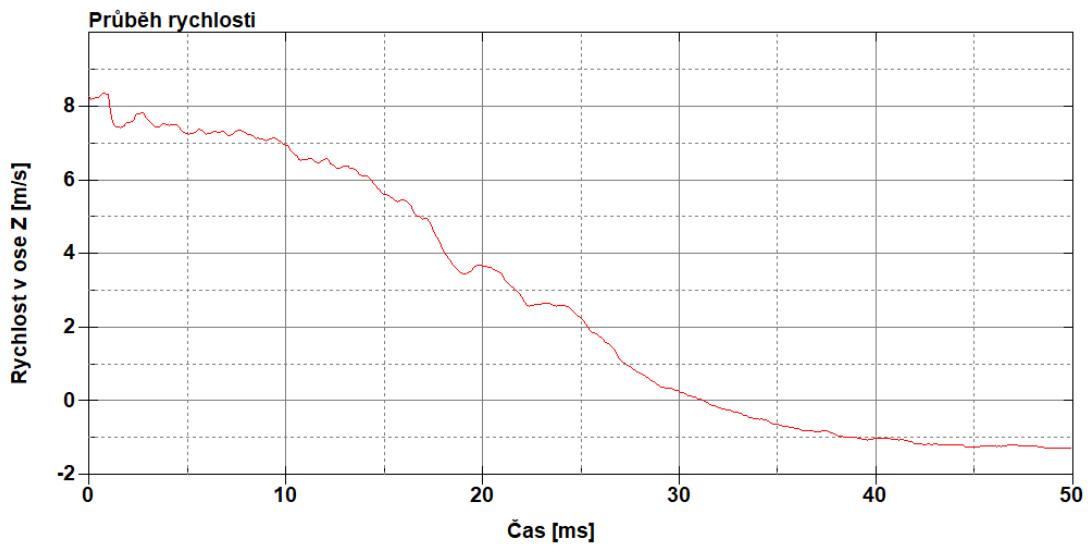
Výstupem provedené simulace jsou, kromě vizuálně patrného chování konstrukce, především naměřená data jako např. posuny uzlů, zrychlení a další. Tyto získané hodnoty jsou následně nástrojem k vyhodnocení strukturálního chování konstrukce.

Primárním výstupem měření posunu uzlů je nastalá deformace přídě získaná vzájemným posuvem dvou stanovených bodů. Tato hodnota vypovídá o skutečnosti, kolik prostoru zabralo pohlcení veškeré kinetické energie konstrukcí vozidla k jeho úplnému zastavení z rychlosti 30 km/h. Jak můžeme vidět v obrázku 50, původní vzdálenost mezi bodem na čelním příčniku a místem, kde deformovatelná zóna přídě přechází do prostoru pro posádku, byla naměřena 827,81 mm. Nejkratší během testu naměřená vzdálenost stejných bodů byla 689,66 mm (včetně nastalých deformací konstrukce také viditelná na obrázku 45). Z těchto hodnot vyplývá, že pohlcení energie vynutilo deformaci konstrukce o 138,15 mm, což lze rozhodně prohlásit za hodnotu nízkou a konstrukce tak obstála velice dobře.

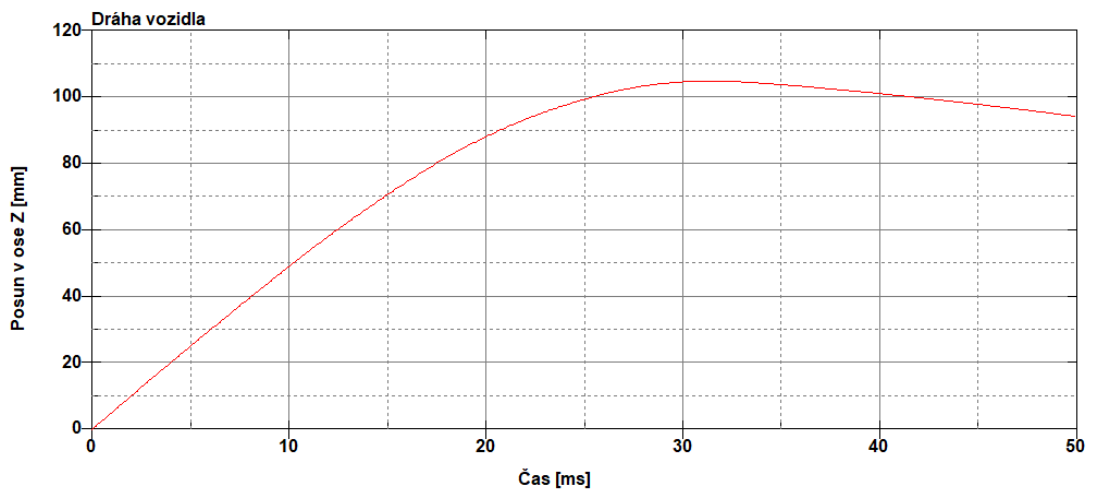


Obrázek 45 – Naměřené deformace na konstrukci přídě

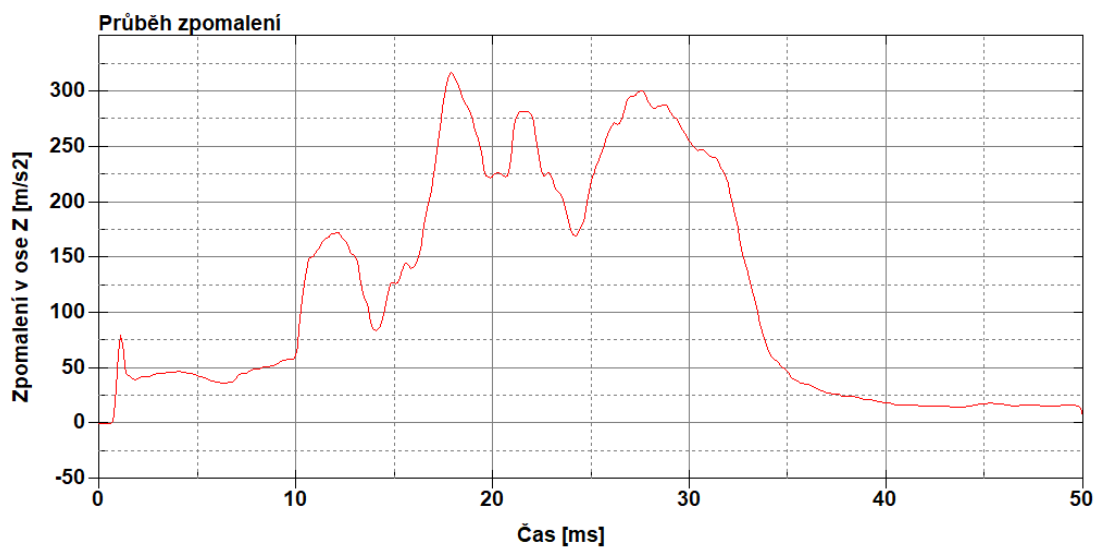
Dalšími naměřenými hodnotami na konstrukci quadrimobilu jsou globální hodnoty rychlosti, zrychlení (zpomalení) a dráhy. Ty byly přehledně zaneseny do grafů na obrázcích 46, 47 a 48. Jednotky daných os jsou zde vždy popsány, u většiny případů se jedná o shodné jednotky s těmi používanými v modelu. Pouze při zpracování hodnot zrychlení došlo, pro lepší přehlednost a představitelnost, k přepočtu z původních mm/ms^2 na m/s^2 a převrácení hodnoty na zpomalení. Pro ještě lepší představu došlo k následnému přepočtu zpomalení i na jednotky g, které bylo vykresleno do grafu na obrázku 49.



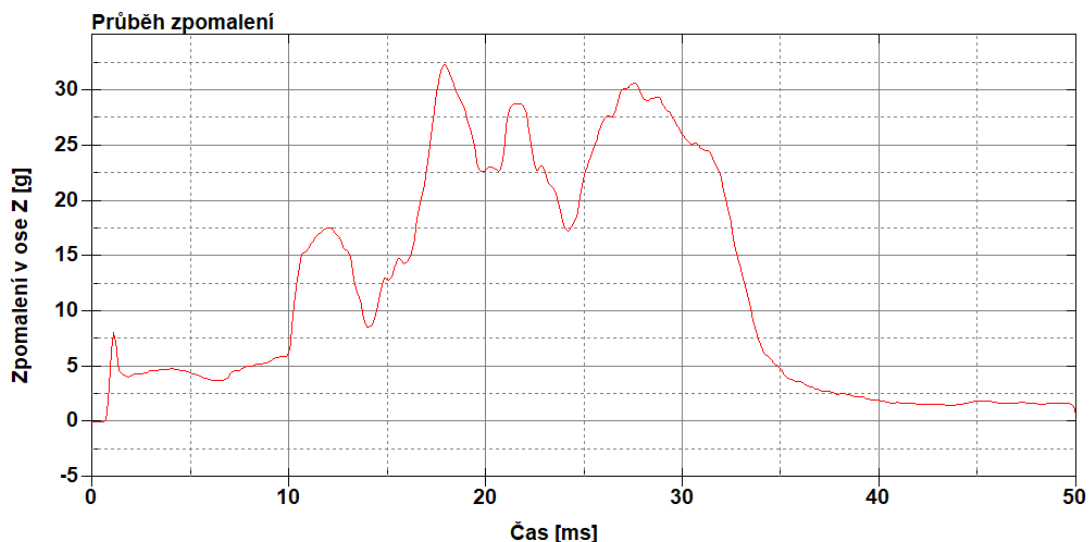
Obrázek 46 – Vykreslení průběhu rychlosti



Obrázek 47 – Vykreslení dráhy konstrukce



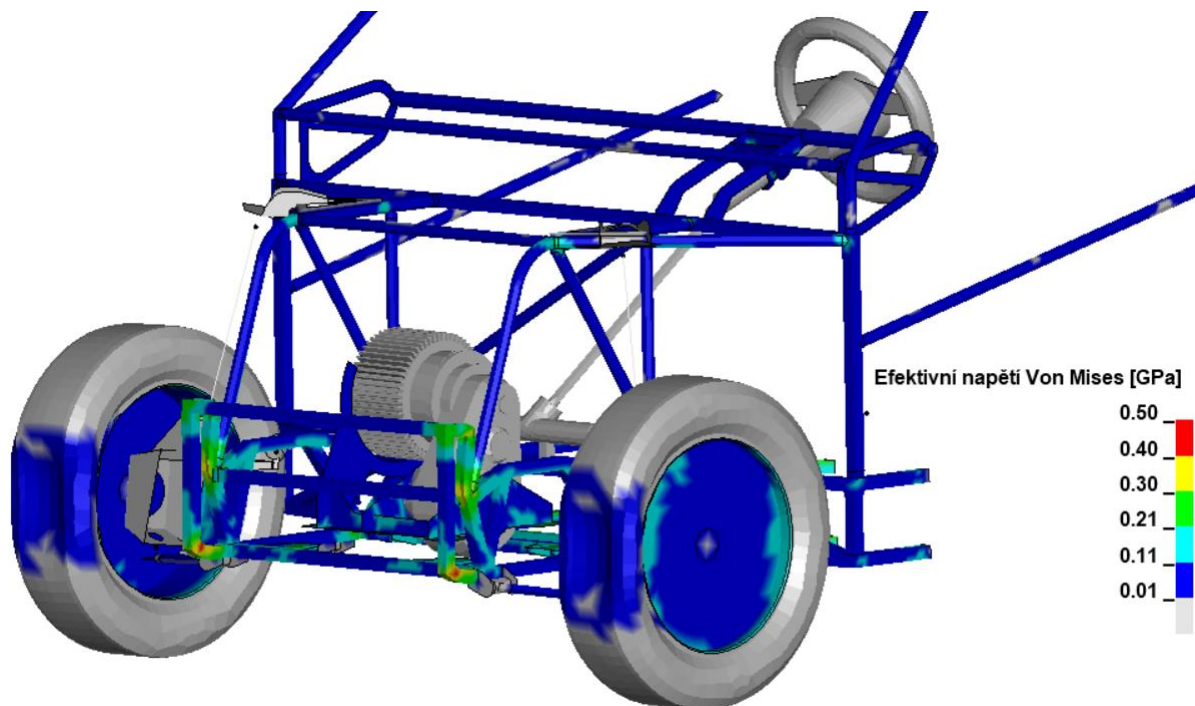
Obrázek 48 – Vykreslení průběhu zpomalení konstrukce v m/s^2



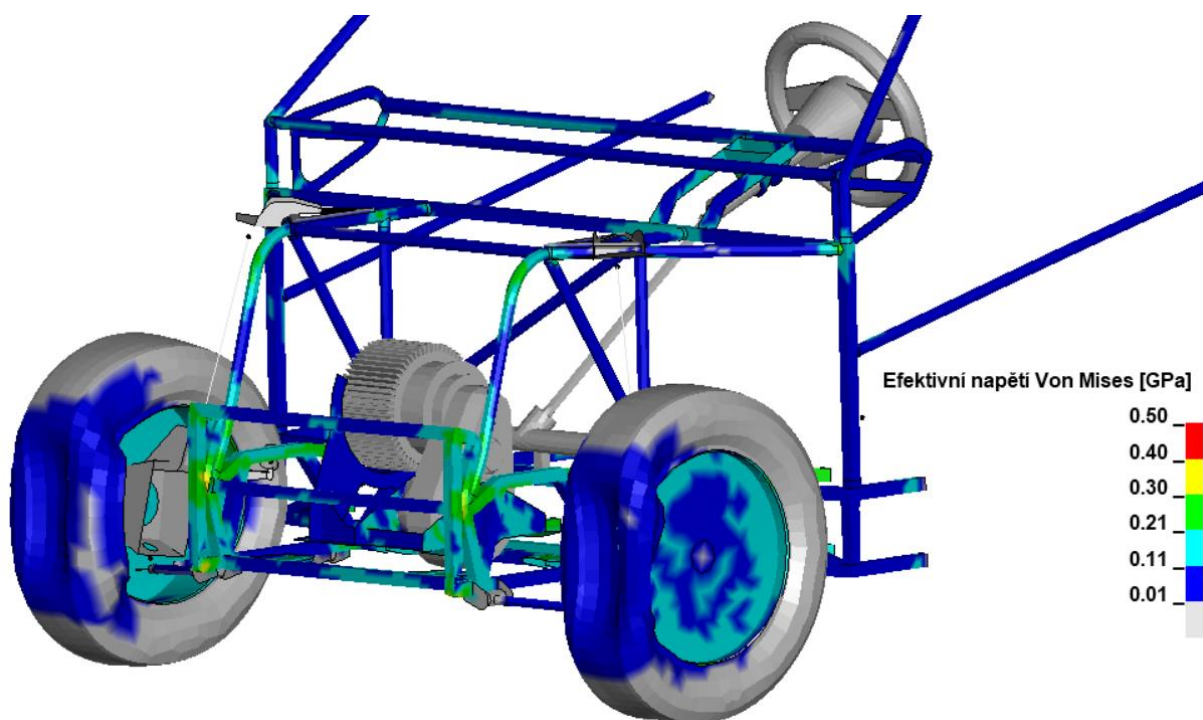
Obrázek 49 – Vykreslení průběhu zpomalení konstrukce v jednotkách g

6.3.3 Vykreslení průběhu napětí

Pro ukázkou lokalit s vysokými koncentracemi napětí došlo k vykreslení napětí Von Mises v průběhu nárazu. Škála je cíleně, pro co nejvyšší přehlednost rozdílů napětí na konstrukci, rozdělena pouze do pěti barevných tříd, navíc jsou šedě zachyceny lokality bez napětí. Nejprve je v obrázku 50 vykresleno napětí v čase $t=12$ ms, který je posledním okamžikem před úbytkem elementů vlivem překročení limitního namáhání daného materiálu a následně pak v čase $t=17$ s, kdy je poměrně vysoké napětí dobře patrné ve vícero oblastech (obrázek 51).

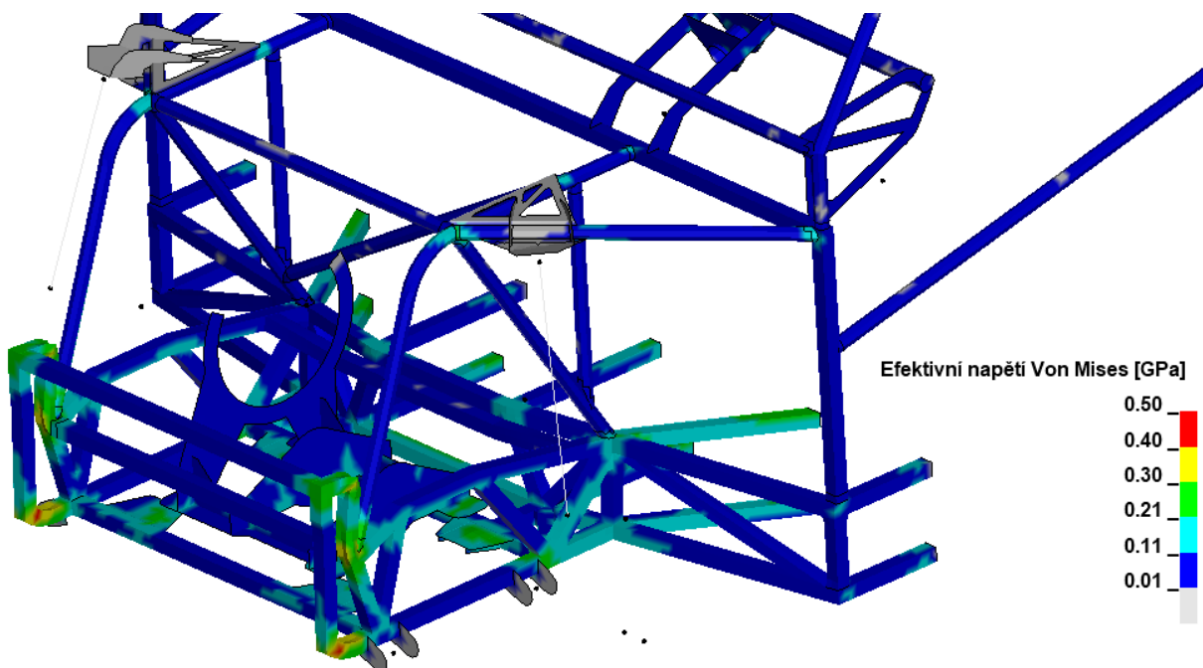


Obrázek 50 – Vykreslení napětí Von Mises na konstrukci v čase $t=12$ ms

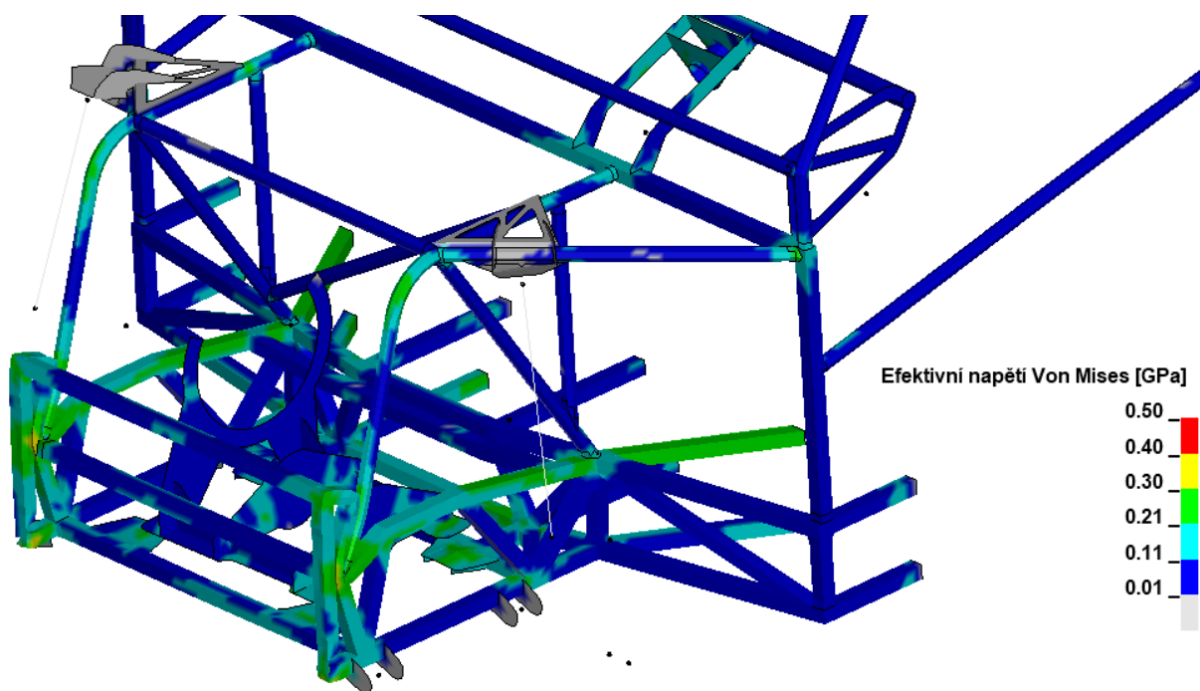


Obrázek 51 – Vykreslení napětí Von Mises na konstrukci v čase $t=17$ ms

Pro ještě větší přehlednost bylo totéž vykresleno v detailech (se skrytím některých v tento moment nepotřebných částí) do obrázků 52 a 53.



Obrázek 52 – Detailní vykreslení napětí Von Mises na konstrukci v čase $t=12$ ms



Obrázek 53 – Detailní vykreslení napětí Von Mises na konstrukci v čase $t=17$ ms

V obrázcích jsou patrna nejvyšší napětí v místech očekávaných největších deformací a reálnost modelu dokazují i zbarvení na koncích dále nedomodelovaných nosníků vykazující vysoké napětí, čímž je potvrzen přenos zatížení od hmotného bodu navázaného v těchto místech. Dobře viditelná jsou i napětí s lehkou deformací v místech uchycení držáku motoru s převodovkou. Tímto vykreslením došlo také k potvrzení funkčnosti vytvořených napojení, jako například v případě vícenásobného styku trubkové konstrukce u horního uložení tlumičů či veškerých míst vzájemných propojení profilového rámu.

6.3.4 Ověřovací náraz se zvýšenou rychlostí

Nárazová zkouška sloužící pro ověření chování konstrukce vozu byla provedena s výrazně navýšenou nárazovou rychlostí na 50 km/h a přinesla několik zajímavých poznatků. Hlavním cílem této kontrolní simulace bylo prověření chování konstrukce předělu vozidla při větším zatížení a s tím související potencionálně nebezpečný posun motoru s převodovkou do prostoru pro posádku. Chování konstrukce a pohonné jednotky je patrné z obrázku 54, kde je zachycen okamžik s nejvyšší mírou deformace.



Obrázek 54 - Boční detailní pohled na konstrukci předě po nárazu v 50 km/h

7 Diskuse výsledků a návrh doporučení

Diskuse nad výsledky provedené simulace nárazové zkoušky byla vedena především s ohledem na nastalé deformace na konstrukci quadrimobilu včetně rozboru potenciálně problémových míst. Rovněž byly prodiskutovány nedostatky modelu konstrukce a s tím související přesnost výpočtu provedené nárazové zkoušky. Po diskusi následně došlo ke stanovení doporučení v postupu při dalším vývoji quadrimobilu.

7.1 Diskuse výsledků

Vyhodnocení provedené simulace konstrukce vyvíjeného vozidla bylo zaměřeno výhradně na strukturální chování konstrukce. Z vyobrazení průběhů zkoušky nejsou ani v jednom z pohledů patrné žádné nežádoucí deformace v prostoru pro posádku. Tento fakt je velkým pozitivem a zároveň prvním výstupem provedené simulace. Dalším pozitivní výstupem je minimální či případně dopředný posuv hnací jednotky patrný rovněž z výsledků simulace. Posuv směrem do prostoru pro přežití byl očekáván nejdříve až v případě tak vysokých deformací přídě, že by došlo tlakem bariéry k posunu všech zde vyskytujících se dílů, tedy právě i motoru a převodovky tímto směrem. Závěr ověřovací nárazové zkoušky provedené ve vyšší rychlosti je však takový, že i při podstatně vyšších deformacích způsobených nárůstem nárazové rychlosti na 50 km/h tyto prvky zůstaly v prostoru deformovatelné přídě quadrimobilu a do prostoru pro posádku nepronikly. Veškeré uvedené výstupy nárazové zkoušky, ať už vykreslení průběhu deformací, lokalizace vysokých napětí či hodnoty naměřených veličin, vypovídají o poměrně vysoké pevnosti a tuhosti konstrukce přídě vozidla, která dokázala pohltit veškerou energii nárazu bez přechodu výrazných deformací do prostoru pro posádku. Rovněž nedošlo při nárazu rychlostí 30 km/h k žádnému nežádoucímu průniku konstrukčních částí či jiných dílů do tohoto prostoru, a i posun volantu vyhověl hodnotícím kritériím. Otázka ohledně této pevnosti je tedy především zda nedochází k přenosu nadměrného zatížení na posádku. K ověření tohoto faktoru je však v budoucnu nutno provedení nárazové zkoušky s osazením figurínami a následné vyhodnocení biomechanických kritérií na těchto figurínách naměřených. V metodice je vše podrobně navrženo, čímž je nabízen vysoký potenciál pro další simulace, které mohou na tuto, ověřující pevnost a soudržnost konstrukce, navázat.

Problémem zjištěným provedeným ověřovacím nárazem je nadměrný pohyb volantu způsobený tuhým jednoduchým sloupkem řízení. Posun hodnocený ve středu volantu je limitně stanoven hodnotami 100 mm horizontálně a 80 mm vertikálně. Naměřeny byly však vysoce nebezpečné hodnoty, tyto limity převyšující více než dvojnásobně, což vynutilo návrh radikálního řešení podstatně zvyšující bezpečnost sloupku řízení. I přes převzetí tohoto dílu ze sériově vyráběného, čímž i homologovaného, vozidla byla úroveň jeho bezpečnosti při

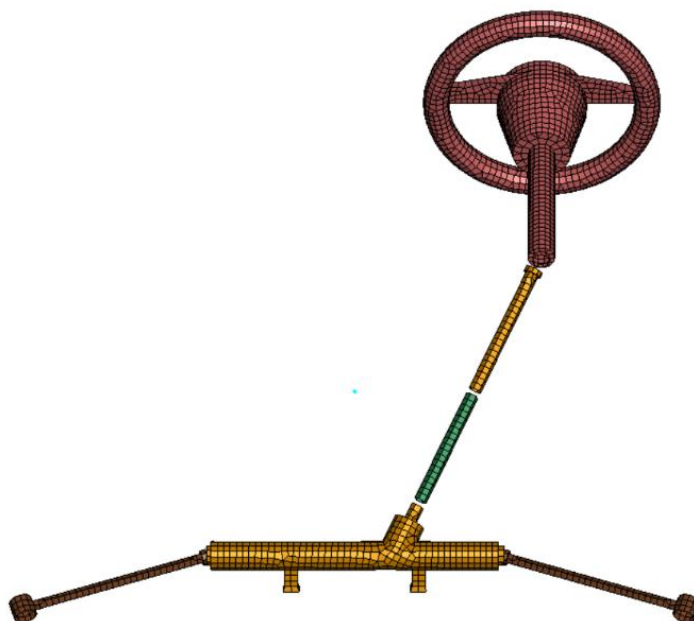
snahu o co nejlepší model konstrukce jistě došlo při tvorbě k drobným nepřesnostem, které mohly provedený výpočet také ovlivnit. Posledním faktorem ovlivňujícím provedenou simulaci bylo klasifikováno užití rigidního materiálu pro některé části vozidla kvůli nutnosti tohoto materiálu pro možnost typu vazeb Constrained. Kloubové a další vazby typu Joint totiž lze namodelovat pouze mezi tuhými tělesy. Z tohoto důvodu musela být vždy minimálně část úchytu definována tímto materiálem. Výsledná chyba, ke které při tvorbě numerického modelu došlo, byla však v celkovém měřítku charakterizována jako přípustná a simulaci lze považovat za přesnou.

7.3 Doporučení pro další vývoj quadrimobilu

Výsledkem zhodnocení a diskuse o provedené simulaci nárazové zkoušky jsou konkrétní návrhy, které je nutno, či minimálně doporučeno, provést před uvedením vozidla do provozu. Popsaná doporučení jsou stanovena především z důvodů jejich přímého ovlivnění pasivní bezpečnosti vozidla nebo potenciální úspory nákladů.

7.3.1 Přepřacování sloupku řízení

Posuv volantu u ověřovací zkoušky rychlostí 50 km/h dosáhl, jak již bylo uvedeno v diskusi, podstatně nadlimitních hodnot, což vedlo k návrhu následujícího řešení. Zmírnění pohybu sloupku řízení vůči řidiči je plánováno úpravou jeho samotné konstrukce. Ta je navržena, dle obrázku 55, jeho rozdělením na dvě části a doplněním o hřídelový kloub v bodě spojení. Shodný kloub je navržen k osazení do místa přechodu sloupku do převodky řízení.



Obrázek 55 - Návrh úpravy sloupku řízení

Dvojice takto umístěných kloubů by měla po vzniku napětí zapříčinit vychýlení sloupku přinášející výrazný pokles výsledných hodnot posuvů. Tuto funkci je ještě doporučeno podpořit aplikací teleskopického dílu namísto střední části nyní prosté tuhé tyče. Tento prvek v případě nárazu pohltí podstatné množství energie, jinak sloužící k právě nežádoucímu posuvu sloupku proti řidiči. Doporučeno je také následné ověření popsaného chování provedením další simulace čelního nárazu.

7.3.2 Montáž výztuhy předního nárazníku s absorbérem energie

Montáž výztuhy předního nárazníku s absorbéry energie na námi vyvíjený městský elektromobil je navržena především s cílem absorpce nízké nárazové energie defolementy a vyšší ochrany zranitelných účastníků provozu. Jak je ze simulace patrné, v současnosti dochází při nárazu ihned k poškození hlavní nosné konstrukce. Tyto prvky jsou však schopny vstřebat náraz do přibližně 15 km/h, a to bez trvalého poškození navazujících částí karoserie, které není možno takto snadno nahradit, čímž jsou podstatně sníženy náklady na opravu po takovémto incidentu. Konkrétně se jedná o sílu v rozmezí přibližně 100 až 150 kN v závislosti na pevnosti ostatních použitých prvků konstrukce vozidla. Materiálem doporučeným k použití u tohoto dílu je vysokopevnostní ocel dvou typů, doplněná o pěnovou výplň z polystyrenu. Pro příčnou výztuhu je konkrétně navrženo použití DP (dvoufázové) oceli, pro defolementy je doporučena, na tyto komponenty nejčastěji používaná, HSLA ocel (vysokopevnostní nízkolegovaná ocel). [4, 44]

Stejně jako byly převzaty některé díly při samotné stavbě, i tento doporučovaný prvek by mohl být pro jeho složitost a ověřenou funkčnost převzat ze sériově vyráběného vozu. Jako ideální se po krátkém průzkumu jeví výztuha předního nárazníku z vozů Škoda Citigo, VW Up! či Seat Mii, které jsou svými rozměry podobné vyvíjenému quadrimobilu, dostupnost těchto dílů je také velice dobrá a náklady nejsou vysoké. Výztuha nárazníku zmíněných vozů i s nasazenou pěnovou výplní je zobrazena na obrázku 56.



Obrázek 56 - Výztuha předního nárazníku s pěnovou výplní [45]

ZÁVĚR

Hlavním cílem práce byl návrh metodiky testování pasivní bezpečnosti quadrimobilů společně s ověřením dílčích vlastností pasivní bezpečnosti malého městského vozidla vyvíjeného na Fakultě dopravní ČVUT.

V úvodu práce jsem nejprve kategorizoval konstruovaný městský elektromobil jako těžký quadrimobil určený pro přepravu osob a následně dohledal veškeré homologační požadavky této kategorie L7e-CP. Legislativní požadavky, na které jsem se v této fázi rovněž zaměřil, souviseli s vybranými komponenty vozidla přímo ovlivňujícími jeho pasivní bezpečnost, jako jsou sedadla a mechanismus řízení. V dalším postupu byl proveden průzkum současného trhu s quadrimobily, kde jsem k porovnání vybral šest nyní prodávaných vozidel a podrobně popsal nejen jejich základní parametry, ale především pro další kapitolu zajímavou bezpečnostní výbavu. U shodných vozidel došlo následně k zaměření se na jejich výsledky při nárazových zkouškách provedených společností EuroNCAP. Zde bylo u všech vozidel důkladně prostudováno jak bodové, tak slovní hodnocení z každé provedené zkoušky s cílem vzájemného porovnání nabízené úrovně ochrany posádky u těchto vozidel a zároveň odhalení bezpečnostních nedostatků kategorie quadrimobil. Nejbezpečnějším testovaným quadrimobilem byl, na základě provedených nárazových zkoušek, určen Renault Twizy. Označení bezpečný si však ani ten nevysloužil, a to i přes fakt, že obstál z vybraných quadrimobilů nejlépe, je úroveň jeho ochrany oproti úrovni pasivní bezpečnosti osobních automobilů nesrovnatelně nižší. Největší slabinou quadrimobilů byla vyhodnocena rozšířená absence airbagů (kterým ale Twizy vybaven byl) následovaná poměrně častým selháním konstrukce vozidla nebo některého z úchytů bezpečnostního pásu či sedadla.

V hlavní části práce došlo k návrhu komplexní metodiky testování bezpečnosti quadrimobilů prostřednictvím sady čtyř nárazových zkoušek. První zkouškou je čelní náraz do progresivně deformovatelné bariéry se 100 % překrytím přídě vozidla v rychlosti 50 km/h. Dále došlo k návrhu zkoušky čelním nárazem do tuhé bariéry se sníženou nárazovou rychlostí. Snížení rychlosti na 30 km/h bylo opodstatněno užitím bariéry bez absorpce energie a očekávanou reakcí brzděním před kolizí s pevnou překážkou. Třetí navrženou zkouškou je velice nebezpečný boční náraz zkušebního vozíku rychlostí 50 km/h do stojícího testovaného subjektu. Neméně náročnou zkouškou je poslední do metodiky zvolená zkouška čelním nárazem protijedoucích vozidel MPDB, rovněž s navrženou rychlostí obou účastníků střetu 50 km/h. V rámci navržené metodiky je také detailně popsáno vše, co je pro její provedení třeba, a to včetně potřebného vybavení záznamovou technikou, figurínami či postupu vyhodnocení biomechanických kritérií. V závěru návrhu metodiky je uvedena tabulka sloužící k vyhodnocení úrovně ochrany testovaného vozidla včetně stručných doporučení z ní

plynoucích. Na základě vytvořené metodiky byl stanoven scénář pro ověření pasivní bezpečnosti vyvíjeného quadrimobilu pomocí virtuální konečně-prvkové simulace čelní nárazové zkoušky do tuhé bariéry provedené v programu LS-DYNA.

V další části práce bylo na základě konstrukčního návrhu rámu vyvíjeného elektromobilu přistoupeno k tvorbě výpočtového modelu, v němž dále došlo k nastavení materiálových modelů odpovídajícím skutečně použitým materiálům, vymodelování absolutně tuhé bariéry a nastavení počátečních podmínek. Po provedení simulačního výpočtu došlo k vyhodnocení, ve kterém jsem se zaměřil zejména na analýzu vzniklých deformací přídě a nenarušení prostoru pro posádku.

Na závěr práce je provedena diskuse nad výsledky a přesností uskutečněné simulace ovlivněné přijatými zjednodušeními výpočtového modelu. Primárním výstupem diskuse je vyhovění konstrukce bez nežádoucích deformací prostoru pro posádku a setrvání pohonné jednotky v oblasti deformovatelné přídě. V úplném závěru jsou nastíněna doporučení pro další vývoj quadrimobilu plynoucí z výsledků jak provedené nárazové zkoušky v rychlosti 30 km/h dle navržené metodiky, tak i zkoušky ověřovací, při které byly objeveny nedostatky v oblasti mechanismu řízení.

Pevně věřím, že veškeré znalosti získané při psaní této diplomové práce využiji v nadcházejících letech profesního života přímo v automobilovém zkušebnictví, jenž je oborem, kterým se plánuji nadále zabývat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] FIRST, Jiří. Zkoušení automobilů a motocyklů. Příručka pro konstruktéry. Praha: S&T CZ s.r.o., 2008. 348 s. ISBN 9788025418055.
- [2] VLK, František. Karosérie motorových vozidel: Ergonomika. Biomechanika. Pasivní bezpečnost. Kolize. Struktura. Materiály. Brno: VLK, 2000. 243 s. ISBN 8023852779.
- [3] VLK, František. Stavba motorových vozidel. Brno: VLK, 2003. 499 s. ISBN 8023887572.
- [4] KOVANDA, J. a kol. Bezpečnostní aspekty návrhu dopravních prostředků. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav bezpečnostních technologií a inženýrství. 2015. 242 s. ISBN 9788001058930
- [5] „Nařízení evropského parlamentu a rady (EU) č. 168/2013,“ únor 2022. [Online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0168&from=SV>
- [6] „Ceník, Renault Twizy“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: <https://cdn.group.renault.com/ren/cz/pdf/pricelists/twizy-price.pdf>
- [7] „Renault uvedl na český trh modely Zoe, Kangoo Z.E. a Twizy. Očekávání nejsou velká.“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/renault-uedl-cesky-trh-modely-zoe-kangoo-e-twizy-ocakavani-nejsou-velka/>
- [8] „Renault – Elektrický Renault pro distribuci“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/presunuto-na-trucker-cz-truck-bus/predstavujeme/renault-elektricky-renault-pro-distribuci_46535.html
- [9] „Citroën Ami – malý dvoumístný elektromobil s cenou pod 150 000 Kč“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/citroen-ami-maly-dvoumistryny-elektromobil-s-cenou-pod-150-000-kc/>
- [10] „Nový Citroën Ami jako slibovaný nástupce C1? K řízení ani nepotřebujete řidičák“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/novy-citroen-ami-jako-slibovany-nastupce-c1-k-rizeni-ani-nepotrebujete-ridicak-133482>
- [11] „Citroen Ami 5.5 kWh specifications“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.electricvehiclespecs.com/citroen-ami-5-5-kwh-specifications/>

- [12] „2020 Citroen AMI electric 5.5 kWh (8 Hp)“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.auto-data.net/en/citroen-ami-electric-5.5-kwh-8hp-39251>
- [13] „Car configurator – Zero City“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://configurator.tazzari-zero.com/en/car-configurator/configure/11419/>
- [14] „Range – citycar“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.tazzari-zero.com/en/range-citycar/>
- [15] „Aixam crossover premium“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.aixam.cz/cs/crossover/premium>
- [16] „CH40 Spring“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.automobiles-chatenet.com/ch40-spring.html>
- [17] „Dimensions; Specifications – Chatenet CH40 Instructions For Use Manual“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/manual/1359615/Chatenet-Ch40.html?page=5#manual>
- [18] „Microcar M-GO“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.ligier.cz/cz/menu/x36-Microcar-M:GO.htm>
- [19] „2014 Safety of Quadricycles“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/safety-campaigns/2014-quadricycles-tests/>
- [20] „2016 Quadricycles' Tests“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/safety-campaigns/2016-quadricycles-tests/>
- [21] „Quadricycle Ratings Explained“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/quadricycle-ratings-explained/>
- [22] „Quadricycles & MICROCARS“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/quadricycle-ratings/>
- [23] „Heavy Quadricycles – Assessment Protocol – Overall Rating“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/22309/euro-ncap-heavy-quadricycles-assessment-protocol-overall-rating-v10.pdf>
- [24] „Aixam Crossover GTR Test Results“, březem 2022. [Online]. Dostupné z: https://cdn.euroncap.com/media/22126/aixam_crossover_gtr_2016_datasheet.pdf

- [25] „Mircocar M.GO Family Test Results“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: https://cdn.euroncap.com/media/22203/microcar_mgo_family_2016_datasheet.pdf
- [26] „Tazzari Zero Test Results“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: https://cdn.euroncap.com/media/22128/tazzari_zero_2014_datasheet.pdf
- [27] „Chatenet CH30 Test Results“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: https://cdn.euroncap.com/media/22123/chatenet_ch30_2016_datasheet.pdf
- [28] „Renault Twizy 80 Test Results“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: https://cdn.euroncap.com/media/22129/renault_twizy_80_2014_datasheet.pdf
- [29] „CITROËN AMI: EST-ELLE SUFFISAMMENT SOLIDE?“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: <https://lesvoitures.fr/citroen-ami-accident-voiture-sans-permis/>
- [30] „Citroën Ami: it's really solid“, březen 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.archyde.com/citroen-ami-its-really-solid/>
- [31] „A Mobile Deformable Barrier Test for the Front Crash Assessment of Future Urban Microcars“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/proceedings/24/files/24ESV-000343.PDF>
- [32] „L7e Full Width Frontal Testing Protocol“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/1562/heavy-quadricycles-frontal-test-assessment-protocol-v-11.pdf>
- [33] „Full Width Frontal Impact Testing Protocol“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/67284/euro-ncap-frontal-fw-test-protocol-v121.pdf>
- [34] „Assessment Protocol – Adult Occupant Protection“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/58227/euro-ncap-assessment-protocol-aop-v912.pdf>
- [35] „Procedures To Assess Submarining In Frontal Impact“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/53820/procedure-to-assess-submarining-in-frontal-impact-couturier.pdf>
- [36] „L7e Side Impact Testing Protocol“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/1563/heavy-quadricycles-side-test-and-assessment-v-11.pdf>
- [37] „MPDB Frontal Impact Testing Protocol“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <https://cdn.euroncap.com/media/67282/euro-ncap-mpdb-testing-protocol-v112.pdf>

- [38] „Euro NCAP-New Frontal Impact Test with Mobile Progressive Deformable Barrier (MPDB)“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/337224180_Euro_NCAP_-New_Frontal_Impact_Test_with_Mobile_Progressive_Deformable_Barrier_MPDB
- [39] „MPDB-Mobile offset progressive deformable barrier“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/proceedings/24/files/24ESV-000389.PDF>
- [40] „THOR-50th Percentile Male Dummy User Manual“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: https://humanetics.humaneticsgroup.com/sites/default/files/2020-11/um_thor_50m_revf.pdf
- [41] LS-DYNA, Základní školení. Materiál poskytnutý společností SVS FEM k absolvovanému školení v programu LS-DYNA.
- [42] MACHÁČEK, Josef. „Struktura a vlastnosti oceli, druhy ocelí“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNNK/NNK-2.pdf>
- [43] „ČSN 11373 – nelegovaná ocel obvyklých jakostí pro konstrukce“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11373.pdf>
- [44] „Mercedes-Benz slaví 50 let deformačních zón ve svých vozech“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/mercedes-benz-slavi-50-let-deformacnich-zon-ve-svych-vozech-4341>
- [45] „Výztuha předního nárazníku Škoda Citigo/VW Up!“, duben 2022. [Online]. Dostupné z: https://pouzitedily.cz/domu/15639-v%C3%BDztuha-p%C5%99edn%C3%ADho-n%C3%A1razn%C3%ADku-%C5%A1koda-citigo-vw-up.html?gclid=Cj0KCQjwl7qSBhD-ARIsACvV1X1sA2wfXs3Ho9OcdoMoHWNGpBYPUlgsVTdjiuWX5hLJzc2dLkybQwaAj1NEALw_wcB

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 - Stav statické zkoušky sedadla dle EKH/OSN č.17 [2]..... | 14 |
| Obrázek 2 - Zkoušky opěrky hlavy prováděné dle EHK/OSN č.25 [2] | 14 |
| Obrázek 3 - Rozměry Renault Twizy [6]..... | 16 |
| Obrázek 4 - Citroën Ami [11]..... | 17 |
| Obrázek 5 - Tazzati Zero City [14] | 18 |
| Obrázek 6 - Aixam Crossover Premium [15] | 20 |
| Obrázek 7 – Kótované rozměry Chatenet CH40 [16] | 22 |
| Obrázek 8 - Microcar M.GO [18] | 23 |
| Obrázek 9 - Ochrana posádky vozu Aixam Crossover GTR [24]..... | 30 |
| Obrázek 10 – Ochrana posádky vozu Microcar M.GO [25] | 31 |
| Obrázek 11 – Ochrana posádky vozu Tazzari Zero [26] | 31 |
| Obrázek 12 – Ochrana posádky vozu Chatenet CH30 [27]..... | 31 |
| Obrázek 13 - Ochrana posádky vozu Renault Twizy [28]..... | 31 |
| Obrázek 14 - Poškození vozu Ami čelním nárazem [29] | 32 |
| Obrázek 15 - Poškození vozu BMW [29]..... | 33 |
| Obrázek 16 - Poškození vozu Ami zadním nárazem [30]..... | 33 |
| Obrázek 17 – Figurína Hybrid III [1] | 35 |
| Obrázek 18 - Rozmístění kamer během čelního nárazu do deformovatelné bariéry [32]..... | 36 |
| Obrázek 19 - Figurína ES-2 [1] | 42 |
| Obrázek 20 - Rozmístění kamer během bočního nárazu [36] | 43 |
| Obrázek 21 - Polohy vozíku a vozidla při zkoušce MPDB těsně před nárazem [37]..... | 44 |
| Obrázek 22 - Rozměry vozíku pro zkoušku MPDB [37]..... | 45 |
| Obrázek 23 - Instrumentace figuríny THOR-50M [40] | 45 |
| Obrázek 24 - Četnost nehod dle směru nárazu [2]..... | 48 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 25 – Vyvíjený quadrimobil EVgen ve verzi předané do výroby | 49 |
| Obrázek 26 - Díl uchycení volantu před a po provedení korekcí | 51 |
| Obrázek 27 - Detail spoje pomocí uzlů sítě | 51 |
| Obrázek 28 - Spojený nasíťovaný profilový rám..... | 52 |
| Obrázek 29 – Kompletně nameshovaný a napojený rám vozidla | 53 |
| Obrázek 30 – Schéma kloubové vazby Spherical Joint [41] | 53 |
| Obrázek 31 – Schéma otočné vazby Revolute Joint [41] | 54 |
| Obrázek 32 – Schéma translační vazby Cylindrical Joint [41] | 54 |
| Obrázek 33 - Vyobrazení modelu včetně vazeb tlumících a pružících soustav | 55 |
| Obrázek 34 – Materiálové okno v Keyword Manageru..... | 56 |
| Obrázek 35 - Boční pohled na model přední části vozu a užité bariéry | 59 |
| Obrázek 36 - Graf rychlosti pohybu vzpěry palubní desky | 60 |
| Obrázek 37 – Boční pohled na vozidlo v čase $t=0$ ms..... | 61 |
| Obrázek 38 - Boční pohled na vozidlo v čase $t=32$ ms..... | 61 |
| Obrázek 39 – Vykreslení detailu stavu přední části vozidla pomocí sítě v čase 0 ms..... | 62 |
| Obrázek 40 – Vykreslení detailu stavu přední části vozidla pomocí sítě v čase 37 ms..... | 62 |
| Obrázek 41 – Pohled na síť vozidla v čase 0 ms shora..... | 63 |
| Obrázek 42 – Pohled na síť vozidla v čase 37 ms shora..... | 63 |
| Obrázek 43 – Čelní pohled na síť vozu v čase 0 ms | 64 |
| Obrázek 44 – Čelní pohled na síť vozu v čase 37 ms | 64 |
| Obrázek 45 – Naměřené deformace na konstrukci přídě | 65 |
| Obrázek 46 – Vykreslení průběhu rychlosti..... | 66 |
| Obrázek 47 – Vykreslení dráhy konstrukce..... | 66 |
| Obrázek 48 – Vykreslení průběhu zpomalení konstrukce v m/s^2 | 66 |
| Obrázek 49 – Vykreslení průběhu zpomalení konstrukce v jednotkách g..... | 67 |
| Obrázek 50 – Vykreslení napětí Von Mises na konstrukci v čase $t=12$ ms..... | 67 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 51 – Vykreslení napětí Von Mises na konstrukci v čase $t=17$ ms..... | 68 |
| Obrázek 52 – Detailní vykreslení napětí Von Mises na konstrukci v čase $t=12$ ms..... | 68 |
| Obrázek 53 – Detailní vykreslení napětí Von Mises na konstrukci v čase $t=17$ ms..... | 69 |
| Obrázek 54 - Boční detailní pohled na konstrukci přídě po nárazu v 50 km/h | 70 |
| Obrázek 55 - Návrh úpravy sloupku řízení | 73 |
| Obrázek 56 - Výztuha předního nárazníku s pěnovou výplní [45] | 74 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 - Technické údaje Renault Twizy [6, 8] | 16 |
| Tabulka 2 – Technické údaje Citroën Ami [10, 11, 12] | 18 |
| Tabulka 3 - Rozměry Citroën Ami [10, 11, 12]..... | 18 |
| Tabulka 4 - Technické údaje Tazzari Zero City [13] | 19 |
| Tabulka 5 - Rozměry Tazzari Zero City [13]..... | 19 |
| Tabulka 6 - Technické údaje Aixam Crossover Premium [15] | 20 |
| Tabulka 7 - Rozměry Aixam Crossover Premium [15]..... | 21 |
| Tabulka 8 - Technické údaje Chatenet CH40 [16, 17]..... | 21 |
| Tabulka 9 - Rozměry Chatenet CH40 [16, 17]..... | 22 |
| Tabulka 10 - Technické údaje Microcar M.GO [18] | 23 |
| Tabulka 11 - Rozměry Microcar M.GO [18]..... | 23 |
| Tabulka 12 - Zhodnocení zkoušek EuroNCAP vozu Aixam [24]..... | 27 |
| Tabulka 13 - Zhodnocení zkoušek EuroNCAP vozu Mircocar [25] | 27 |
| Tabulka 14 - Zhodnocení zkoušek EuroNCAP vozu Tazzari [26] | 28 |
| Tabulka 15 - Zhodnocení zkoušek EuroNCAP vozu Chatenet [27] | 29 |
| Tabulka 16 - Zhodnocení zkoušek EuroNCAP vozu Renault [28] | 29 |
| Tabulka 17 - Škála hodnocení ochrany posádky dle EuroNCAP | 30 |
| Tabulka 18 - Snímače používané figuríny [32] | 36 |
| Tabulka 19 - Kritéria hodnocení ochrany hlavy při zkoušce čelním nárazem do deformovatelné bariéry u řidiče s airbagem a spolujezdce [32] | 37 |
| Tabulka 20 - Kritéria hodnocení hlavy řidiče při zkoušce čelním nárazem do deformovatelné bariéry bez airbagu [32] | 38 |
| Tabulka 21 - Kritéria hodnocení krční páteře při zkoušce čelním nárazem do deformovatelné bariéry [32]..... | 38 |
| Tabulka 22 – Kritéria hodnocení hrudníku při zkoušce čelním nárazem do deformovatelné bariéry [32]..... | 38 |

| | |
|---|----|
| Tabulka 23 – Kritéria hodnocení pánve, stehen a kolen při zkoušce čelním nárazem do deformovatelné bariéry [32] | 38 |
| Tabulka 24 - Kritéria hodnocení čelního nárazu do tuhé bariéry [34]..... | 40 |
| Tabulka 25 - Kritéria hodnocení bočního nárazu [36]..... | 43 |
| Tabulka 26 - Kritéria hodnocení ochrany řidiče při zkoušce MPDB [34] | 46 |
| Tabulka 27 - Kritéria hodnocení ochrany hlavy spolujezdce při zkoušce MPDB [34] | 47 |
| Tabulka 28 - Kritéria hodnocení ochrany krční páteře spolujezdce při zkoušce MPDB [34] . | 47 |
| Tabulka 29 - Kritéria hodnocení ochrany hrudníku a dolních končetin spolujezdce při zkoušce MPDB [34] | 47 |
| Tabulka 30 - Návrh hodnocení vozidel dle metodiky | 48 |
| Tabulka 31 – Základní rozměrová charakteristika quadrimobilu EVgen | 49 |
| Tabulka 32 - Materiálové vlastnosti zadané pro ocel 11373 [42, 43] | 56 |
| Tabulka 33 - Materiálové vlastnosti zadané pro pneumatiku [41] | 56 |
| Tabulka 34 - Materiálové vlastnosti zadané pro rigidní prvky [42, 43] | 56 |
| Tabulka 35 – Hodnoty zadané pro simulaci přetržení dílu [41, 43] | 56 |
| Tabulka 36 – Statistika vypracovaného modelu | 58 |