**Univerzita Hradec Králové**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra fyziky**

# Metodika provedení a hodnocení srážek s chodci ve virtuálním prostředí

## Diplomová práce

Autor : Bc. Tomáš Khom

Studijní program : N1701 Fyzika

Studijní obor : Fyzikální měření a modelování

Vedoucí práce : doc. RNDr. Jan Kříž, Ph.D.

Odborný konzultant : Ing. Tomáš Hájek

IDIADA CZ a.s.

Hradec Králové srpen 2015

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

# Metodika provedení a hodnocení srážek s chodci ve virtuálním prostředí

**Autor:** **Bc. Tomáš Khom**

**Studijní program:** **B 1701 Fyzika**

**Studijní obor:** Fyzikální měření a modelování

**Název práce:** Metodika provedení a hodnocení srážek s chodci ve virtuálním prostředí

**Název práce v AJ:** Methodology of execution and evaluation of collisions with pedestrians in a virtual environment

Cíl a metody práce: Cílem diplomové práce je vytvořit metodiku pro testování srážek vozidel s chodci tak, aby bylo možné navrhnout vhodná opatření pro zmírnění následků těchto střetů. Srážky budou modelovány v prostředí PC Crash běžně používaném např. v soudním inženýrství. Budou vyhodnocena data s použitím realistických modelů vozidel i chodců.

**Garantující pracoviště:** **katedra fyziky Přírodovědecké fakulty UHK**

**Vedoucí práce:** doc. RNDr. Jan Kříž, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Tomáš Hájek

**Oponent:** RNDr. Jiří Lipovský, Ph.D.

**Datum zadání práce:** 15. 12. 2014

**Datum odevzdání práce:** 24. 8. 2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny, z kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové Bc. Tomáš Khom

**Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Janu Křížovi, Ph.D. za lidský přístup při spolupráci na této práci a za jeho odborné připomínky, bez nichž by nikdy nevznikla. Dále děkuji Ing. Tomáši Hájkovi z IDIADA CZ a. s., který mi poskytl cenné odborné informace o popisované problematice a také mojí přítelkyni Petře, že mi byla po celou dobu oporou a poskytla mi perfektní zázemí pro její tvorbu.

# Anotace

KHOM, T. Metodika provedení a hodnocení srážek s chodci ve virtuálním prostředí. Hradec Králové, 2015. Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí diplomové práce Jan Kříž. 56 s.

Cílem této diplomové práce je vytvořit vlastní metodiku pro testování srážek vozidel s chodci tak, abych s pomocí jejích výsledků byl schopen navrhnout vhodná opatření pro zmírnění následků těchto střetů v reálu. K tomu by mi měl posloužit program PC Crash, jakožto kvalitní nástroj pro simulace, běžně používaný např. v soudním inženýrství. Za použití reálných modelů vozidel a chodců bych chtěl získat dostatečné množství relevantních dat.

**Klíčová slova**

Ochrana chodců, airbag pro chodce, aktivní kapota, PC Crash, pasivní bezpečnost

# Annotation

KHOM, T. Methodology of execution and evaluation of collisions with pedestrians in a virtual environment. Hradec Králové, 2015. Diploma Thesis at Faculty of Science Unoversity of Hradec Králové. Thesis Supervisor Jan Kříž. 56 s.

The aim of my Diploma thesis is to develop its own methodology for testing collisions between vehicles and pedestrians and to using its results to be able to propose appropriate measures to mitigate the effects of such collisions in real life. This would have me serve the PC Crash as a quality tool for simulation, commonly used eg. In forensic engineering. Using real models of vehicles and pedestrians would like to obtain a sufficient amount of relevant data.

**Keywords**

Pedestrien protection, pedestrien airbag, active bonnet, PC Crash, passive safety

# Obsah

Úvod ... 9
*Úvod* ... *9*
*Struktura diplomové práce* ... *9*
*Definice účelu diplomové práce* ... *10*
*Očekávané přínosy* ... *10*
Teoreticka část práce (literární rešerše) ... 13
*Současná situace a metodika pro ochranu chodců* ... *13*
Testy pasivní bezpečnosti chodců ... 13
*Konstrukce a vybavení jednotlivých impaktorů* ... *14*
Impaktor hlavy ... 14
Impaktor stehenní oblasti ... 15
Impaktor dolní končetiny ... 16
*Hodnotící kritéria prováděných testů* ... *17*
Impaktor hlavy ... 19
Impaktor stehenní oblasti ... 20
Impaktor dolní končetiny ... 20
*Ukázka hodnocení dle Euro NCAP* ... *21*
*Prvky pasivní bezpečnosti pro ochranu chodců* ... *23*
Konstrukce nárazníku ... 23
Konstrukce kapoty ... 24
Uchycení světlometu ... 26
Konstrukce čelního skla ... 27
*Aktivní prvky pasivní bezpečnosti pro ochranu chodců* ... *27*
Aktivní nárazník a spoiler ... 27
Systém aktivní kapoty vozidla ... 28
Systém airbagů pro chodce ... 30
Praktická část práce ... 35
*Výběr vhodného software* ... *35*
*Popis výpočetních metod* ... *36*
Multi-Body systémy ... 36
Metoda konečných prvků ... 36
*Konečný výběr systému* ... *38*
*Postup prací* ... *38*

Vytvoření modelu chodce v prostředí PC Crash ..... 38
Vytvoření modelu automobilu v prostředí PC Crash ..... 40
Vytvoření scénáře srážky v prostředí PC Crash ..... 43
Diskuse ..... 46
*Vyhodnocení simulací v PC Crash ..... 46*
*Vyhodnocení pozice nárazu na automobil ..... 47*
*Vyhodnocení trajektorie a pozice chodce po zastavení automobilu ..... 49*
*Vyhodnocení trajektorie měřené od místa srážky ..... 50*
Závěr ..... 52
*Zhodnocení provedených simulací ..... 52*
*Konstrukční návrh pro zamezení pádu chodce do strany a před vozidlo, příprava funkčního vzorku ..... 52*
*Shrnutí závěrů řešení ..... 54*
Zdroje ..... 55

# Úvod

## Úvod

### Základní motivace

Moje diplomová práce je založená na části projektu, na kterém jsem pracoval v rámci úkolu zadaného mi mým zaměstnavatelem. Jednalo se o jednu z fází dlouhodobého projektu, který je součástí grantu Ministerstva dopravy.

Konkrétně se jedná o projekt číslo: TA03030791

Název projektu: Výzkum nových přístupů k ochraně chodců, řešení střetu vozidla s pohybující se kompletní postavou chodce

Obecným cílem projektu je zvyšování bezpečnosti silniční dopravy s využitím komplexních analýz počínaje zkoumáním vlastního nehodového děje, přes zjištění dopravně inženýrských parametrů lokality pro zjištění pohybu chodce, po využití progresivních numerických a experimentálních metod. Účelu projektu bude dosaženo vytvořením metodiky pro systematický výzkum střetu vozidla s chodcem a prověřením možností systémů pro zabránění pádu chodce do stran a před automobil. Na základě výzkumu skutečných dopravních nehod a komplexní analýzy ochrany chodců bude definována nová metodika analýzy ochrany chodců. Tato nová metodika bude založena na hodnocení celé postavy chodce, a to v dynamickém režimu. V případě prokázání pozitivního vlivu nových bezpečnostních systémů se předpokládá jejich právní ochrana a komercializace výsledků formou zahájení spolupráce s výrobci airbagů, případně jiných systémů pro aktivní a pasivní ochranu chodců.

## Struktura diplomové práce

### Cíl diplomové práce

Primárním cílem této diplomové práce je vytvoření metodiky pro pokročilé analýzy střetu vozidla s chodcem na základě numerických a experimentálních analýz celé postavy a analýza nových přístupů ochrany chodců z hlediska pádu chodce na vozovku. Praktická stránka diplomové práce se zaměří zejména na možnosti využití externích airbagů zabraňujících pádu chodce do strany, případně před vozidlo, a co nejdetailnější zmapování typických střetů vozidla s chodcem. Sekundárním cílem je predikce vývoje metod pro hodnocení bezpečnosti vozidel z hlediska ochrany chodců, posouzení vhodnosti metodiky EuroNCAP pro ochranu chodců a efektivity nákladů vynaložených na „změkčení" přední

části vozidla. Dalším cílem je komplexní analýza nových reálných dopravních nehod na základě nové metodiky a predikce snížení úrazovosti chodců u automobilů optimalizovaných na základě metodiky EuroNCAP.

**Dílčí cíle**

- Numerické analýzy střetu vozidla s chodcem
- Ideové návrhy systémů pro zvýšení ochrany chodců a jejich hodnocení z hlediska vyrobitelnosti a možností integrace do osobních automobilů
- Porovnání reálných dopravních nehod s numerickými analýzami s celou postavou, metodikou EuroNCAP a posléze experimentálními zkouškami s figurínou
- Konstrukční návrhy a numerické analýzy systémů pro zamezení pádu chodce do strany a před vozidlo
- Závěrečné zhodnocení na základě komplexního zhodnocení dílčích cílů

## Definice účelu diplomové práce

Obecným cílem mé diplomové práce je zvyšování bezpečnosti silniční dopravy s využitím komplexních analýz, počínaje zkoumáním vlastního nehodového děje, přes zjištění dopravně inženýrských parametrů lokality pro zjištění pohybu chodce, po využití progresivních numerických a experimentálních metod. Účelu diplomové práce bude dosaženo vytvořením metodiky pro systematický výzkum střetu vozidla s chodcem a prověřením možností systémů pro zabránění pádu chodce do stran a před automobil. Na základě výzkumu skutečných dopravních nehod a komplexní analýzy ochrany chodců bude definována nová metodika analýzy ochrany chodců. Tato nová metodika bude založena na hodnocení celé postavy chodce, a to v dynamickém režimu.

## Očekávané přínosy

Přínosy diplomové práce předpokládám ve dvou oblastech. Prvním a nejdůležitějším přínosem je přínos v oblasti jiných přínosů, a sice snížení počtu usmrcených a zraněných chodců po střetu s vozidlem. Dále předpokládám postupné snižování obětí dopravních nehod při působení aktivních a pasivních prvků ochrany, založených na budoucí nové metodice ochrany chodců. Další přínosy spočívají ve využití výsledů řešení ke zvýšení

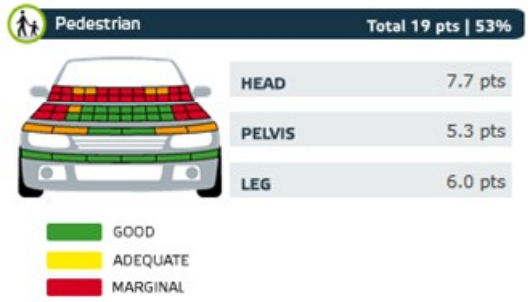
atraktivity vozidel, která budou díky systému vyvinutému v rámci diplomové práce bezpečnější.

Ze všech možných dopravních nehod, které se stávají na dopravních komunikacích, jsou nejzávažnější právě střety vozidel s chodci. Mívají nejzávažnější následky, což je dáno hned několika faktory. Prvním a nejdůležitějším je obrovský nepoměr mezi hmotností a kinetickou energií mezi chodcem a vozidlem, přičemž chodec má jen minimální možnost, jakým způsobem by se mohl proti střetu s vozidlem chránit, jelikož neexistují prakticky žádné ochranné pomůcky, které by zmírnily následky střetu s vozidlem. Na rozdíl od toho – současná vozidla jsou vybavena spoustou prostředků, jejichž účelem je zmírnění, případně úplné zabránění střetu s chodcem. Mezi ně patří například různé deformační zóny na karoserii a další, ať už mechanické nebo elektronické systémy zabraňující střetu s chodcem, případně mírnící následky srážky. Jedním z cílů této diplomové práce je vytvoření přehledu těchto systémů a vzájemné porovnání jejich přínosů. [1] [2]

*„Ze statistik vyplývá, že nejvíce smrtelných případů při srážkách vozidel s chodci je způsobeno v důsledku těžkého nárazu hlavy na tuhou kapotu nebo čelní sklo, případně A – sloupky. Ovšem velmi často také dochází k závažným poraněním dolních končetin, v důsledku prvotního kontaktu s nárazníkem, případně maskou vozidla. “ [1]*

Na základě analýz dostupných dopravních nehod kolize chodců s osobním automobilem z období let 2011 a 2012 vyplývá, že v 60% dochází ke zranění, respektive úmrtí, následkem nárazu na kapotu a následným pádem na vozovku. Podrobnější analýzou bylo zjištěno, že závažná zranění způsobená pádem na vozovku se vyskytují u 41% ze všech kolizí chodce s osobním automobilem. Tato zranění by bylo možné eliminovat použitím airbagů zabraňujících pádu chodce na stranu. V případě nárazu na kapotu dosahuje tento ukazatel hodnotu 48%. Tento systém by bylo možné využít i při ochraně cyklistů. Ke kontaktu s kapotou dochází v 62% všech kolizí mezi cyklisty a osobními automobily. Podrobnější analýzou bylo zjištěno, že závažná zranění způsobená pádem na vozovku se vyskytují u 39% ze všech kolizí cyklistů s osobním automobilem. V případě nárazu na kapotu dosahuje tento ukazatel hodnotu 38%. Tyto statistické údaje jsou získány na základě omezeného množství vzorků a rovněž omezených možnostech identifikace hlavní příčiny zranění. Aktuální metodiky analýzy dopravních nehod využívané v ČR neobsahují dostatečné podklady pro hloubkovou analýzu trajektorie a mechanizmů zranění.

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Označení nehody:** | | 60130018 | | | Firma: | | CDV | | |
| **Místo nehody:** | | Brno, ulice Chodská | | | | | Obec: | Ano | *ano / ne* |
| upřesnění: | | u zastávky MHD Šelepova | | | GPS: | | 49°12'48.411"N, 16°35'45.537"E | | |
| Datum: | 4.2.2013 | Čas: | 7:30 | | Světlo: | světlo | *světlo / šero / tma* | | |
| **Auto:** | | | | | | | | | |
| značka: | Peugeot 308 | | | | | | | | |
| rok výroby: | 2010 | | | | | | | | |
| **EuroNcap:** | Mapa s výsledkem: | | | | | | | | |
| hodnocení ochrany chodců: | 19 | bodů | | | | | | | |
| rok testu: | 2009 | | | | | | | | |
| Link na EuroNcap: | | | | | | | | | |
| http://euroncap.com/results/peugeot/308/2009/387.aspx | | | | | | | | | |
| **Chodec:** | věk: | 14 | let | výška: | ? | metrů | hmotnost: | ? | kg |
| **Primární náraz na auto - odhad zranění:** | | | | | odhadnutá rychlost auta: | | | 40 | km/h |
| odhad zranění - noha: | max. lehké | | | | *žádné / lehké / střední / těžké / smrt* | | | | |
| odhad zranění - hlava: | těžké | | | | *žádné / lehké / střední / těžké / smrt* | | | | |
| **Popis a komentář k nehodě:** | | | | | | | | | |
| Čelní sklo | | | | | | | | | |
| náraz byl do čelního skla a A sloupku, podle mapy EuroNcap lze očekávat těžké a horší zranění | | | | | | | | | |
| Kapota | | | | | | | | | |
| bez výrazného kontaktu s kapotou | | | | | | | | | |
| Nárazník: | | | | | | | | | |
| v EuroNcap zeleně, zranění by mělo být max. lehké | | | | | | | | | |
| Odpovídá zranění EuroNcap: | | | | | | | | | |
| Rychlost ano, pozice na hraně zóny, zranění chodce nejsou známá | | | | | | | | | |
| Pozice nárazu: | 9 | | | | | | | | |
| *Střed auta je 0, kraj auta je 10* | | | | | | | | | |
| **Návrh opatření na snížení zranění:** | | 0 bez přínosu, 10 jasný přínos | | | | | | | |
| Aktivní kapota: | 0 | na kapotě se nic nestalo | | | | | | | |
| Airbag na čelní sklo: | 9 | bylo zasaženo čelní sklo a A sloupek | | | | | | | |
| AEB (autom. brzdění): | 4 | chodec vyběhl před stojícím autobusem a nebyl vidět | | | | | | | |
| **Sekundární pád - odhad zranění:** | | | | | | | | | |
| odhad zranění - noha: | ? | *žádné / lehké / střední / těžké / smrt* | | | | | | | |
| odhad zranění - hlava: | ? | *žádné / lehké / střední / těžké / smrt* | | | | | | | |
| Návrh opatření na snížení zranění: | Airbag chodce na čelní sklo by snížil riziko poranění | | | | | | | | |



C.2.1.1 – Pohled na poškození pravé přední části osobního automobilu Peugeot 308

***Obr. 1 –*** *List ze statistiky zpracované společností IDIADA CZ* [3]

Pro účely diplomové práce byly analyzovány ztráty způsobené srážkou chodce s vozidlem za roky 2009 a 2010 na území České republiky. Z výsledků vyplývá, že při snížení následků úrazů o jeden stupeň by došlo ke snížení ročních ztrát o 2280 mil. Kč. Pádu na vozovku

odpovídají ztráty 912 mil. Kč za rok! Účinnost tohoto systému je obtížné odhadnout. Na základě kvalifikovaného odhadu by se pohyboval v rozsahu 30-60%. Kalkulace uvažovala 82 úmrtí, 331 těžkých zranění, 1413 lehkých zranění a 2021 hmotných škod následkem pádu na vozovku. Snížením následků o jeden stupeň - místo smrtelných těžká, místo těžkých lehká a místo lehkých pouze hmotná škoda.

Sociální a ekonomické přínosy zavedení tohoto systému jsou závislé zejména na jeho rozšířenosti. Obdobně jako u zavádění airbagů pro ochranu posádky, softnose, aktivní kapoty a čelních airbagů pro ochranu chodců se přínos tohoto systému projeví zejména v dlouhodobém horizontu. Hlavním přínosem v období následujících 1-5 let, je získání podkladů pro co nejefektivnější směrování vývojových aktivit v oblasti ochrany chodců.

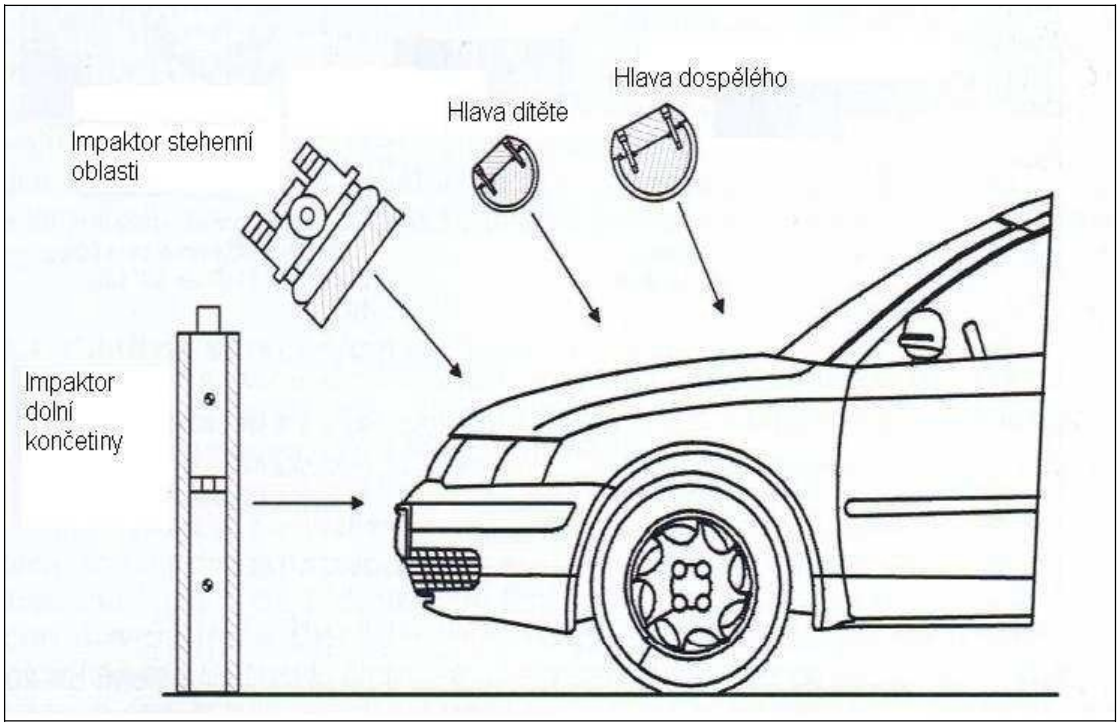
# Teoreticka část práce (literární rešerše)

## Současná situace a metodika pro ochranu chodců

### *Testy pasivní bezpečnosti chodců*

Na současném automobilovém trhu se stala důležitou motivací při výběru vozidla úroveň ochrany, kterou je schopno poskytnout jak posádce, tak i ostatním účastníkům provozu v případě nehody. Touto problematikou se dlouhodobě zabývají jak výrobci vozidel, tak i různé nezávislé subjekty, ať už státní nebo soukromé. Nejvýznamnější evropské jsou EuroNCAP (European New Car Assessment Programme) a EEVC (European Enhanced Vehicle-safety Committee). Dnes už je běžným zvykem, že téměř všechny nové modely jsou podrobovány sérii testů podle aktuální metodiky, která se neustále vyvíjí v závislosti na používání novějších a novějších technologiích pro aktivní a pasivní bezpečnost. Hlavní součástí testování vozidla jsou tzv. crash testy, při nichž jsou s vozidlem simulovány různé nehodové děje jako například čelní náraz s různým překrytím, boční náraz, tzv. pole test, bumper test (této tematice se budu podrobněji dále věnovat). Jelikož při většině z těchto testů jsou auta nenávratně poškozena, testy se provádějí s tzv. impactory, a to simulujícími pevnou překážku, jiné vozidlo a také části lidského těla v případě testování srážky s chodcem. Moje diplomová práce je zaměřená právě na ochranu chodců, kde se používají impactory pro čelní střet s chodcem. Bylo zjištěno, že abychom dosáhli relevantních výsledků, tak nám stačí tento nehodový děj rozložit do tří fází. První z nich je sražení chodce nárazníkem vozidla v oblasti kolene. K tomu slouží impactor dolní končetiny. V druhé fázi dochází k nabalování chodce na přední část vozidla. V tu chvíli nás zajímá

oblast kyčle – impactor stehenní oblasti. Na závěr pak náraz hlavy do kapoty v oblasti stěračů a předního skla, případně A-sloupku. Zde jsou impactory dva, a to hlava dospělého a hlava dítěte. Tyto jsou zobrazeny na obr. 2. Při vyhodnocování jsou měřeny hodnoty zrychlení, posunu a síly. Na základě výsledků měření je poté vozidlu udělen určitý bodový zisk v dané kategorii. Tento výsledek pak slouží jako podklad udělení určitého počtu hvězd (v případě Euro NCAP). [1],[2]




***Obr. 2 –*** *Zkoušky ochrany chodců dle EEVC WG17* [1]

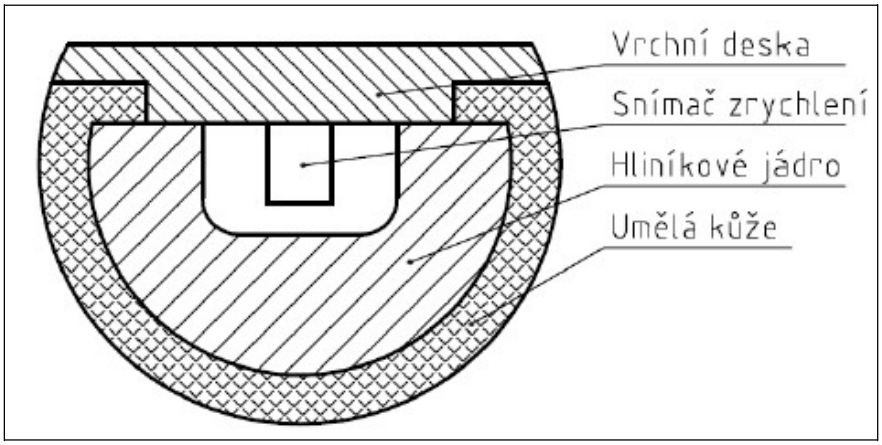
## Konstrukce a vybavení jednotlivých impaktorů

***Impaktor hlavy***

U tohoto impactoru záleží hlavně na hmotnosti a průměru, kde se liší dospělá a dětská hlava. Co se týče provedení, jsou impactory prakticky stejné. Jedná se o tuhé hliníkové kulovité jádro pokryté umělou kůží, uvnitř kterého je umístěn akcelerometr, nebo-li tříosý snímač zrychlení. Případně jsou zde tři jednoosé snímače zrychlení, jejichž osy svírají pravé úhly. Parametry jsou uvedeny v tabulce 1 a popis částí na obrázku 3. [1],[2]

***Tab. 1 –*** *Parametry impaktoru dětské a dospělé hlavy* [1]

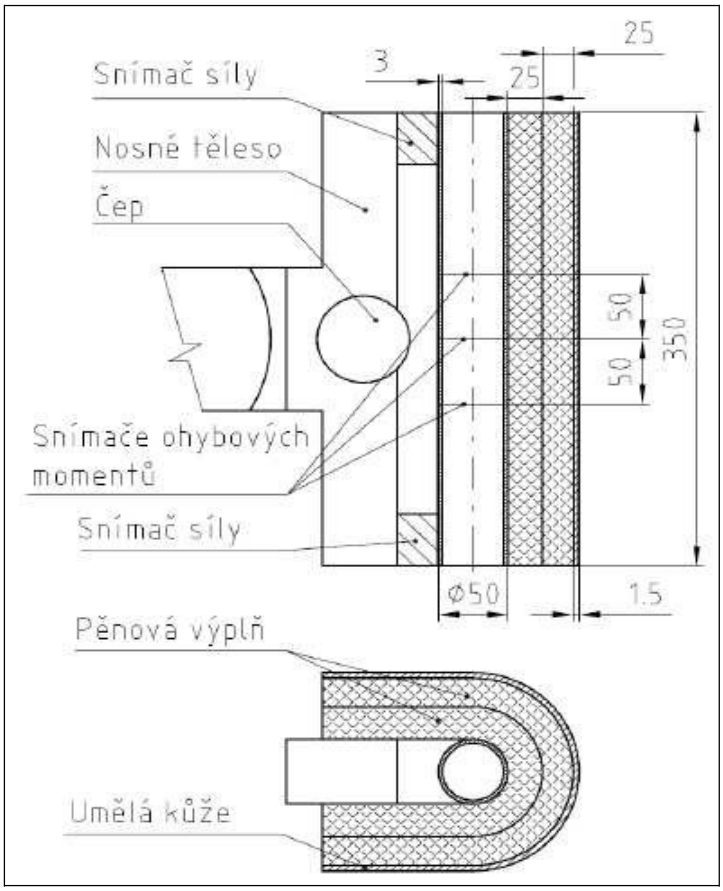
| | Hmotnost | Ø Impaktoru | Tloušťka kůže |
|---|---|---|---|
| Dětská hlava | 2,5 kg | 130 mm | 11,0 mm |
| Dospělá hlava | 4,8 kg | 165 mm | 13,9 mm |




***Obr. 3 –*** *Konstrukce impaktoru hlavy* [1]

***Impaktor stehenní oblasti***

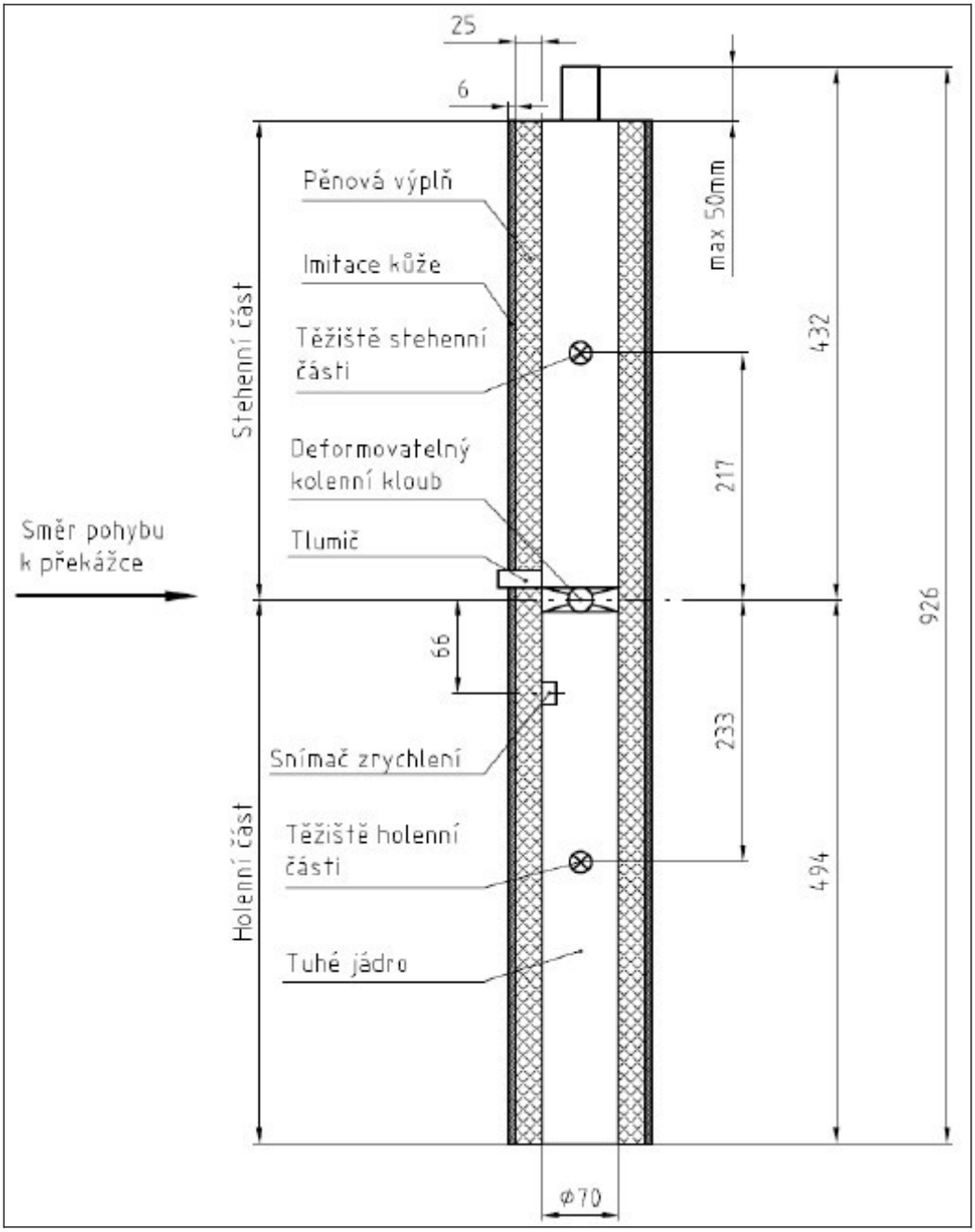
U tohoto impactoru zjišťujeme, kolik energie je schopna pohltit přední část vozidla, resp. k jakým silám a tlakům při nárazu dojde *"Základem konstrukce je ocelová trubka o vnějším průměru 50 milimetrů s tloušťkou stěny 3 milimetry. Kolem této trubky je ve dvou vrstvách ve tvaru písmene U umístěna pěnová výplň (materiál tzv. Confor) o celkové šířce 50 milimetrů. Na povrchu je ještě 1,5 milimetru silná vrstva umělé kůže. Trubka je k nosnému tělesu uchycena pomocí dvou snímačů síly. Nosné těleso je na nosné rameno přichyceno přes čep, který plní ochrannou funkci impaktoru." [1]* Řez impaktorem je zobrazen na obr. 4.




***Obr. 4 –*** *Konstrukce impaktoru stehenní oblast* [1]

***Impaktor dolní končetiny***

*„Impaktor dolní končetiny se skládá ze stehenní části, deformovatelného kolenního kloubu a holenní části. Základem je tuhé jádro o průměru 70 mm, které reprezentuje stehenní a holenní kost. Na tomto jádře je dále 25 milimetrů silná pěnová vrstva simulující svalstvo. Šestimilimetrová vrstva kůže je tvořena neoprénovou pryží potaženou z obou stran 0,5 milimetru tenkou nylonovou látkou. Konstrukce je doplněna ještě o tlumič posunutí stehenní části vůči holenní části." [1]* Řez impaktorem je zobrazen na obr. 5.




***Obr. 5 –*** *Konstrukce impaktoru dolní končetiny* [1]

## Hodnotící kritéria prováděných testů

Současná metodika vyhodnocení nárazových testů je známá dlouho dopředu tak, aby se výrobci vozidel dokázali připravit a přizpůsobit požadavkům, jimž bude při zkouškách jejich vozidlo čelit. Součástí vývoje jsou tedy cíle na předpokládaný bodový zisk, kterého by mělo vozidlo dosáhnout. Tomu je pak podřízeno téměř vše.

Se vzrůstající úlohou bezpečnosti vozidel je třeba čím dál více zpřísňovat hodnotící kritéria prováděných testů. Nejvýraznější změny v metodice hodnocení by se daly rozdělit do dvou základních fází.

- *„Fáze 1 – těmito zkouškami musely projít všechny nově schvalované vozy od r. 10/2005 a musí je splňovat veškeré nové vozy na trhu od 12/2012. Jedná se o testy nárazu dětské hlavy do kapoty vozidla a testy nárazu impaktoru dolních končetin (u vozidel kategorie SUV impaktoru stehenní oblasti) na nárazník.*
- *Fáze 2 - těmito zkouškami musí projít všechny nově schvalované vozy od r. 09/2010 a musí je splňovat veškeré nové vozy na trhu od 09/2015. Jedná se o testy nárazu dětské hlavy a hlavy dospělého do kapoty vozidla, testy nárazu impaktoru dolních končetin (u vozidel kategorie SUV impaktoru stehenní oblasti) na nárazník a testy nárazu impaktoru stehenní oblasti s hranou přední kapoty vozidla.“* [1]

Na základě mnoha dlouhodobých výzkumů byly experimenty na zvířatech a lidských mrtvolách zjištěny limity pro poškození lidských tkání a kostí, při nichž dochází k nevratnému poškození lidských orgánů, zlomeninám kostí a trhání vazů.

*„Hranice mezi přípustnými a nepřípustnými hodnotami jsou tzv. kritéria poranění, ze kterých pak s příslušnou mírou bezpečnosti jsou odvozena kritéria ochrany. Kritéria ochrany (bezpečnostní limity) představují mezní hodnoty mechanického zatížení (síly, zrychlení), které lze měřit na zkušebních figurínách a které nesmí být překročeny.“ [1]*

HIC kritérium se ale např. nedá měřit přímo, nýbrž je vypočítáno z naměřených hodnot.

***Obr. 6 –*** *Provedení testu s jednotlivými impaktory* [1]

***Impaktor hlavy [4]***

Při nárazu impaktoru hlavy na kapotu vozidla se zaznamenává časový průběh zrychlení snímače uvnitř impaktoru. Z něho se dále určí výpočtem HIC kritérium (Head Injury Criterion), což je hodnota určující velikost poranění. Jedná se o integrál zrychlení impaktoru v průběhu kontaktu s překážkou. Plocha pod křivkou je omezena časovým úsekem (t2-t1).

Výsledná zrychlení měřená v těžišti impaktoru:

$$A_R = \sqrt{Ax^2 + Ay^2 + Ay^2} \ [\mathrm{m/s^2}] \qquad (1)$$

Kde: Ax [$m/s^2$] – podélné zrychlení

Ay [$m/s^2$] – svislé zychlení

Az [$m/s^2$] – příčné zrychlení

HIC kritérium:

$$HIC = (t_2 - t_1) \cdot \left[ \frac{\int_{t_1}^{t_2} A_R \cdot dt}{(t_2 - t_1)} \right]^{2,5} \quad [-] \tag{2}$$

Časový interval: (t2 –t1) = *max.* 15 ms.

HIC kritérium nesmí v žádném místě kapoty překročit hodnotu HIC = 1000 s časovým omezením maximálně 15 ms, aby nedošlo k vážným poraněním hlavy. [4]

***Impaktor stehenní oblasti [4]***

Maximální celkový součet sil působících na impaktor horní části dolní končetiny může být Fc = 5 kN.

Okamžitá celková síla:

$$Fc(t) = Ft(t) + Fb(t) \quad [\mathrm{N}] \tag{3}$$

Kde: Ft(t) – okamžitá hodnota horního snímače síly

Fb(t) – okamžitá hodnota spodního snímače síly

Maximální hodnota ohybového momentu může být Mo = 300 Nm.

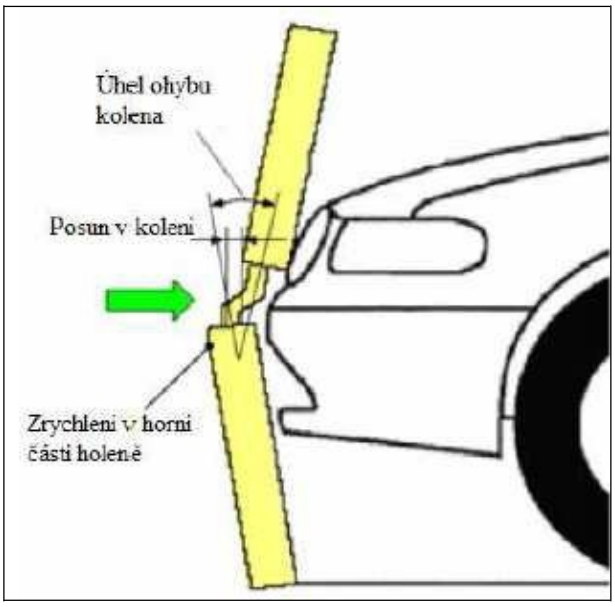
***Impaktor dolní končetiny [4]***

Vyhodnocují se zde tři kritéria: úhel ohybu kolena, posun ve smyku kolena a zrychlení horní bércové části.

Maximální úhel ohybu kolena může být $\alpha = 15°$.

Maximální posuv v koleni b = 6 mm.

Maximální zrychlení horní bércové části a = 150 g.




***Obr. 7 –*** *Zobrazení vyhodnocovaných parametrů* [4]

## Ukázka hodnocení dle Euro NCAP

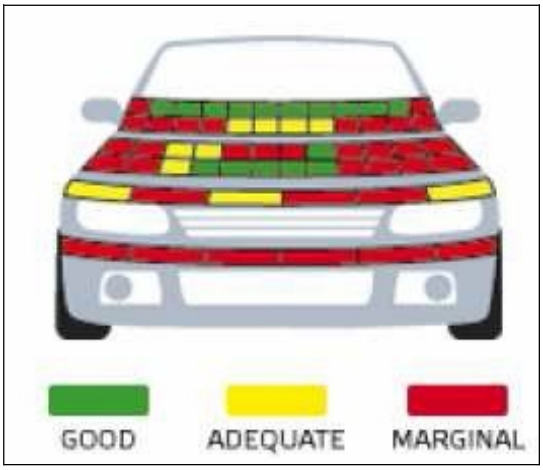
Výsledkem hodnocení vozidla v oblasti ochrany chodců je výsledný počet hvězdiček v této oblasti a zároveň symbolický obrázek v přední části vozu s vyznačením oblastí obarvených podle výsledků měření. Barva je těmto oblastem přidělována na základě jejího bodového zisku. *„Každé barvě přísluší určitý bodový rozsah (zelená 2 body, žlutá 0,01 – 1,99 bodu, červená 0 bodu).“ [1]*

Za tímto na pohled jednoduchým obrázkem stojí dlouhý a náročný vývoj. Vzhledem k tomu, že fyzické testy pro každou vyznačenou oblast jsou neúměrně finančně a technologicky náročné – znamenalo by to pro každou danou oblast nový testovací vůz. Zkouší se jen určitý počet oblastí a výsledný bodový zisk ostatních oblastí se předpokládá podle podkladů předaných výrobcem. Jde o to, že výrobce už předem vyvíjí dané součásti vozidla na určitý bodový zisk v následných testech. Jedná se o použité materiály, jejich pružnost a schopnost absorbce napětí, odstupy mezi komponenty, deformačními zónami. Tomu je přizpůsobena konstrukce vyztužení, odstup mezi kapotou a tvrdými součástmi v motorovém prostoru a také prostor mezi nárazníkem a výztuhou. Tyto hodnoty jsou předem známé díky empirickým výpočtům, zkouškám ve virtuálním prostředí nebo na základě zkušeností z předchozích modelů, které v této oblasti uspěly. Výrobcem jsou předány informace o očekávaném bodovém zisku. Testující subjekt vybere daný počet oblastí, ve kterých se budou fyzicky provádět testy, a

porovná výsledky s předpokládaným bodovým ziskem. V případě, že se výsledky vejdou do tolerance, jsou ostatní oblasti schváleny ve stávajícím stavu. V případě, že se výsledné hodnoty značně odchylují od předpokladu, je výrobci udělena penalizace. Jeho předpokládaný bodový zisk je přiměřeně ponížen. [1], [5]

***Tab. 2 –*** *Hodnocení jednotlivých oblastí dle Euro NCAP* [1]

| **Impaktor** | **Kritérium** | **Dobré** | **Dostatečné** | **Marginální** |
|---|---|---|---|---|
| Dolní končetina | Zrychlení [9] | a < 150 | 150 ≤ a < 200 | a ≥ 200 |
| | Posun [mm] | b < 6 | 6 ≤ b < 7 | b ≥ 7 |
| | Ohyb [°] | α < 15 | 15 ≤ α < 20 | α ≥ 20 |
| Stehenní oblast | Ohybový moment | Mo < 300 | 300 ≤ Mo < 380 | Mo ≥ 380 |
| | Celková síla [kN] | Fc < 5 | 5 ≤ Fc < 6 | Fc ≥ 6 |
| Hlava | HIC | HIC < 1000 | 1000 ≤ HIC < 1350 | HIC ≥ 1350 |




***Obr. 8 –*** *Barevné znázornění ochrany chodců* [1]

***Tab. 3 –*** *Počty bodů potřebné pro udělení hvězdiček za ochranu chodců* [1]

| **Počet hvězdiček** | ☆ ☆ ☆ ☆ | ☆ ☆ ☆ | ☆ ☆ | ☆ |
|---|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Celkový počet bodů** | 28 - 36 | 19 - 27 | 10 - 18 | 1 - 9 |

## Prvky pasivní bezpečnosti pro ochranu chodců

***Konstrukce nárazníku***

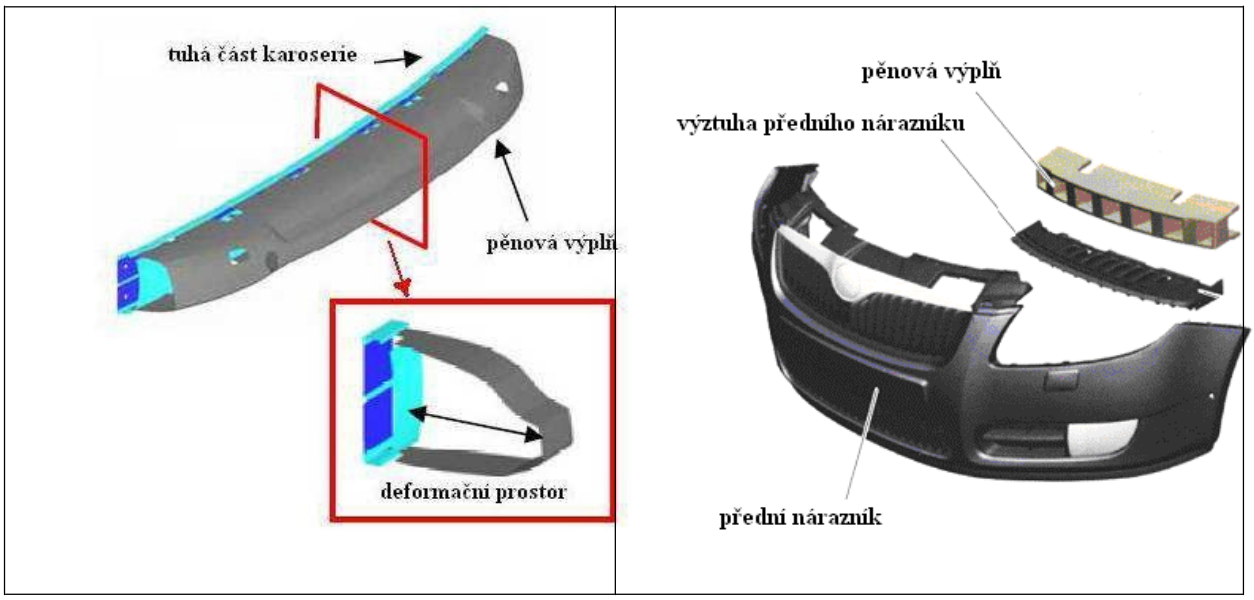
Nárazníky dnešních vozidel jsou od počátku konstruovány tak, aby ochránily a snížily případné škody na daném vozidle a zároveň jsou tvarem přizpůsobeny ke snížení možnosti zranění při střetu s chodcem. Je zjištěno, že vozidla s nižší přídí vycházejí lépe v testech střetu s chodci, a to jak počítačových, tak fyzických. To je způsobeno tím, že se chodec při střetu lépe „nabaluje“ na vozidlo a spodní část jeho nohou (od kolen dolů) rotuje v souhlasném směru se zbytkem těla. Naproti tomu – u automobilů s vyšší přídí, např. u vozů kategorie SUV, dochází k opačné rotaci mezi spodními částmi končetin a zbytkem těla, což mnohdy vede k většímu poškození – přetrhání kolenních vazů. Tato situace je zobrazena na obr. 9. [6]

***Obr. 9 –*** *Více polohová simulace střetu vozidla – chodec* [6]

Napříč všemi kategoriemi vozidel je dnes standartní součástí v přední části vozidla několik opatření, která zamezují, případně zmírňují, zranění při střetu s chodcem.

Nárazník je nejen tvarovaný z venku, ale i zevnitř je doplněn dalšími prvky. Co se vnějšího tvaru týče, tak jeho spodní část je přibližně v úrovni nejpřednější oblasti, která bývá umístěna ve střední části nárazníku, případně může i přečnívat. Tomu se říká podrážedlo, které bývá zevnitř vyztuženo buď zesílenou plastovou konstrukcí nárazníku, případně tam jsou občas vkládány kovové profily. Jeho účelem je „podrazit chodce“ tak, aby nedošlo k jeho „přejetí“. Cílem totiž je dostat chodce na přední část vozidla, kde díky dalším opatřením, jako je „měkká“ kapota, případně aktivní kapota, airbagu pro chodce a dobře deformovatelnému přednímu sklu, má větší šanci vyhnout se vážnějšímu zranění. Viz obr. 10

Dalším opatřením umístěným z vnější části nárazníku je tzv. padding. Ten je umístěn zpravidla před výztuhou, což je kovový profil spojující přední podélníky vozidla. Padding je obvykle vytvořen z polystyrenu, ale zkoušejí se i hliníkové paddingy z rolovaného profilu, případně plastové. Jeho hlavním cílem je zachytit co největší množství energie při nárazu, a to ať už chodce, tak jiné pevné překážky. [7]




***Obr. 10 –*** *Vlevo – horní deformační prvek, vpravo – horní a spodní deformační prvek* [7]

***Konstrukce kapoty***

Při většině srážek s chodcem dochází k nárazu hlavy chodce buď právě na kapotu, nebo na oblast stěračů, případně skla. Proto se výrobci velmi snaží o to, aby tyto oblasti byly co „nejměkčí“. Co se týče oblasti stěračů a waser kanálu není příliš mnoho možností pro

vylepšení. Tato oblast, stejně jako např. oblast A-sloupků vždycky vyjde špatně. Oblast čelního skla vychází dobře, jediné, co se dá zlepšovat, je oblast tzv. lepicí drážky, a to jejím zúžením, případně deformovatelným nebo pružným uložením. Proto je pozornost výrobců nejvíce zaměřena na kapotu. Prostory pro vylepšení jsou hlavně a v menší míře lze také zlepšit výsledky v oblasti uchycení a zámku. Oblasti s největším prostorem pro zlepšení jsou konstrukce vnitřního plechu kapoty (výztuhy kapoty) a zvětšení nebo dodržení dostatečného deformačního prostoru pod kapotou.

Konstrukce výztuhy kapoty je v dnešní době vyvíjena na základě počítačových simulací a dalších fyzických zkoušek, kdy jsou na ni kladeny nároky na dostatečnou poddajnost, ale spíše lokální, aby nedošlo k jejímu prolomení v celé její ploše. Tím by mohlo dojít k nárazu hlavy až na pevné části v motorovém prostoru. Současným trendem je odklon od klasické koncepce, jako je na obr. 11 vlevo, k rozdělení výztuhy na menší stejnoměrné elementy (žebra) po celé ploše, viz obr. 11 vpravo.

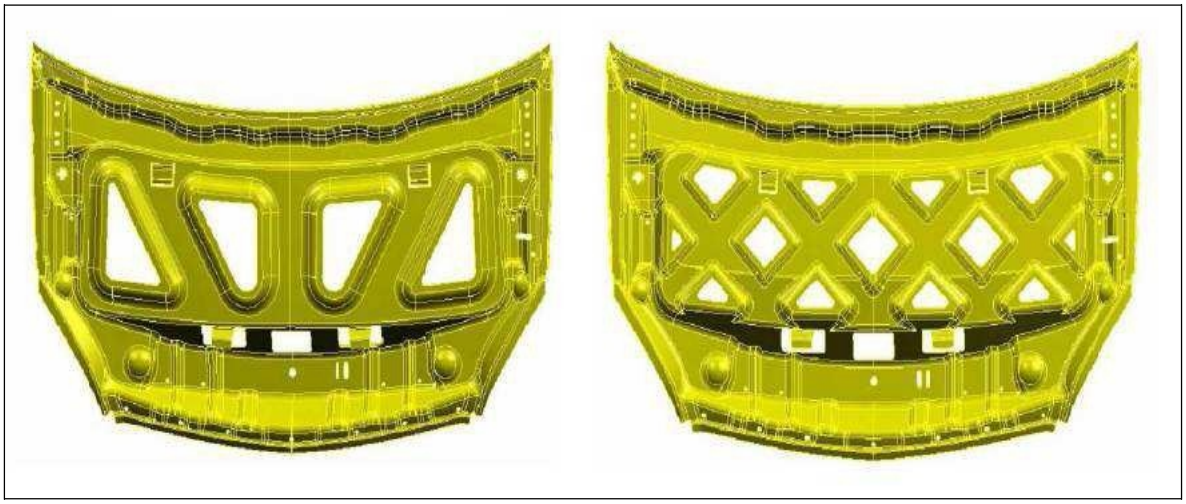
Dodržení odstupu mezi kapotou a tuhými částmi je asi nejdůležitějším parametrem, který se na kapotě „ladí“ a hledá se kompromis mezi požadavky designu, požadavky na aerodynamický odpor, vyrobitelnost, odolnost vůči vibracím a požadavky oddělení „motorářů“ a konstruktérů dílů přední části vozidla.

V zájmu oddělení designu je zachovat původní model vozidla tak, jak byl prezentován, aby bylo docíleno co možná nejčistších linií kapoty a geometrických návazností na přední část a sklo.

Vzhledem k současným trendům na snižování spotřeby a emisí CO2 je snížení aerodynamického odporu vozidla, to v oblasti kapoty klade požadavky na snížení koeficientu odporu vzduchu při jejím obtékání, což se ne vždy slučuje s požadavky designu.

Požadavky na vyrobitelnost jsou dány použitým technologickým postupem výroby a při požadavku na odolnost vůči vibracím jde o dodržení určitých geometrických zákonitostí, jako například minimální rádius v podélném směru 10 000 mm, maximální rádius v příčném směru atd. Naproti tomu jdou většinou požadavky z oddělení vývoje motorů a oddělení zodpovědného právě za pasivní bezpečnost, jejímž zájmem je vytvořit co největší prostor mezi kapotou a tuhými částmi pod ní. Nedá se říct, že výsledkem těchto jednání je vždy kompromis z jedné nebo z druhé strany, záleží na vyjednávací síle jednotlivých stran. V každém případě tlak na dosažení plného počtu hvězd je veliký u běžně prodávaných modelů, např. u sportovních modelů je naproti tomu kladem velký

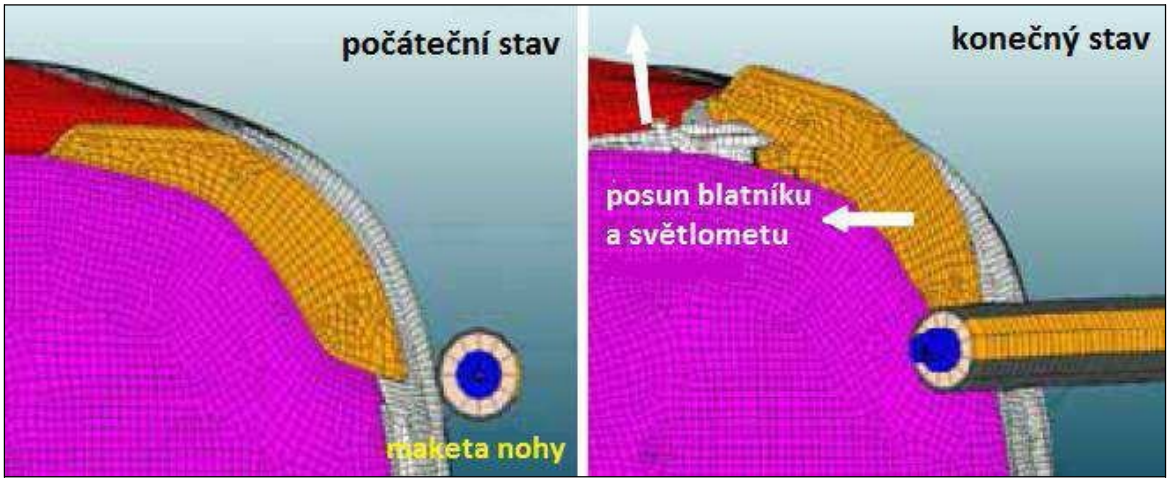
důraz na aerodynamiku, design a u velkých SUV je technologicky velmi náročné dosáhnout alespoň slušného výsledku. [4],[2]



***Obr. 11 –*** *Vlevo – klasická výztuha kapoty, vpravo – vylepšená výztuha kapoty* [4]

***Uchycení světlometu***

Současné trendy na zvyšování bezpečnosti a snižování odporu vzduchu se nevyhnuly ani oblasti světlometů. Ty jsou nyní konstruovány tak, aby na jedné straně doplňovaly, nebo spíše ještě zvýrazňovaly myšlenku designérů, nerušily proudění vzduchu a zároveň byly i funkční v pohlcování energie při srážce. Toho se většinou dosahuje narušením upevnění (které je navrženo už v konstrukci) a jeho plánovanou destrukcí při srážce nebo například rotačním uložením světlometu, který se při srážce posune nebo orotuje v připraveném vedení (příklad z vozidla Citroen C4 je uveden na obr. 12), a tím pohltí více energie. [7]



***Obr. 12 –*** *Kinematika světlometu a blatníku vozidla Citroën C4 při nárazu (pohled zhora)* [7]

#### *Konstrukce čelního skla*

Čelní sklo je společně s kapotou jedna z oblastí, do kterých nejčastěji dopadá hlava chodce, a proto je mu věnována také zvýšená pozornost. Zmírnění následků je možné dosáhnout jeho tvarem, sandwitchovou konstrukcí a jeho pružným upevněním.

Aby sklo co nejlépe tlumilo náraz, měl by být jeho úhel co nejmenší a z pohledu shora by mělo mít zaoblený tvar. Sandwitchovou konstrukcí tvořenou dvěma skly proloženými plastovou folií lze dosáhnout toho, že se sklo při nárazu prohne ve směru pádu a pružnou deformací folie zachytí část energie dopadu a zároveň zadrží střepy přilepené na folii z obou stran. Tím nedojde ani k pořezání chodce ani posádky odlétávajícími střepy. Jako příklad pružného uložení lze uvést řešení organizace Cranfield Impact Center (CIC) (viz obr. 13), kdy je sklo nalepeno na profilu o průřezu ve tvaru písmene Z, který je při nárazu svou deformací schopen pohltit část energie. [8]

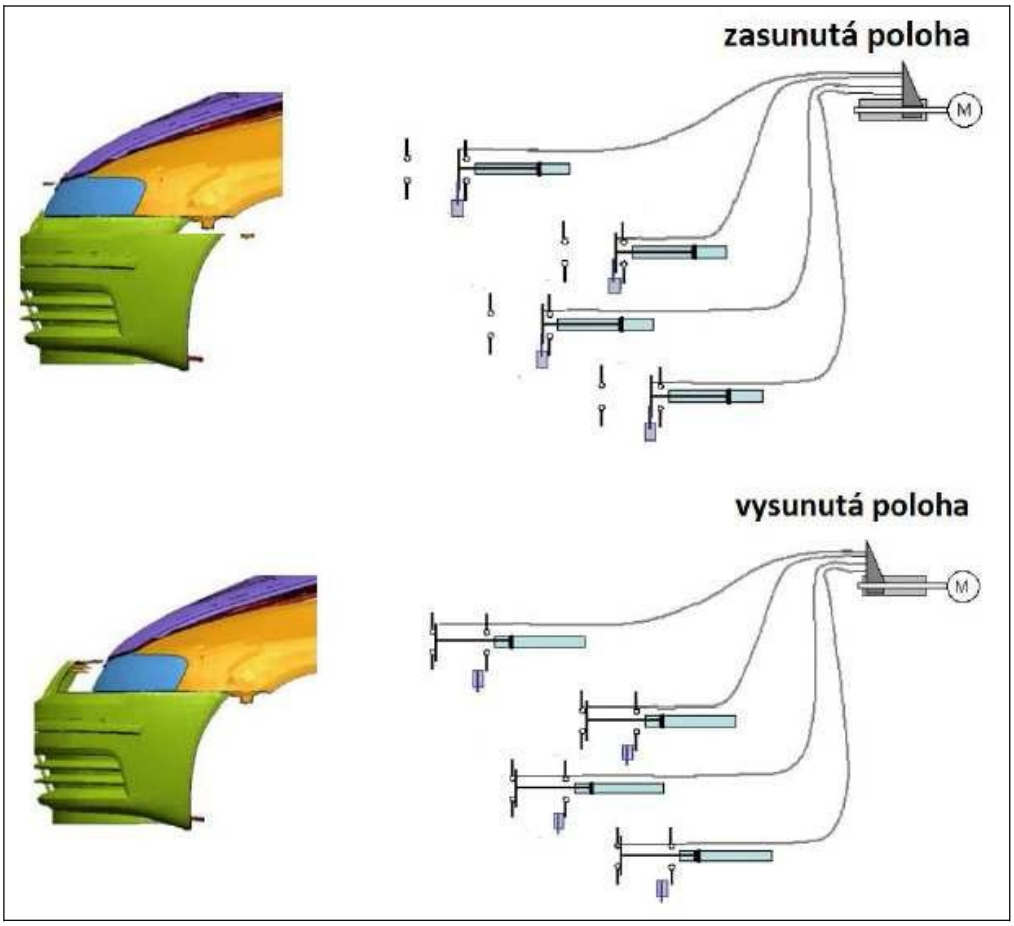
***Obr. 13 –*** *Systém uchycení čelního skla absorbujícího energii při nárazu* [8]

## Aktivní prvky pasivní bezpečnosti pro ochranu chodců

#### *Aktivní nárazník a spoiler*

Další možností, jak zvýšit pasivní bezpečnost v přední části vozidla, je použití aktivního nárazníku nebo spojleru. Toto opatření nám slouží ke zvětšení deformačního prostoru před tuhými částmi za nárazníkem, případně spojlerem. Princip funkce si můžeme vysvětlit na příkladu řešení automobilky Fiat ve spolupráci s technickou univerzitou Chalmers. Jedná se o to, že přední nárazník se za pomoci plynopružinových jednotek posune směrem vpřed, a tím dojde ke zvětšení deformačního prostoru. Impulsem je

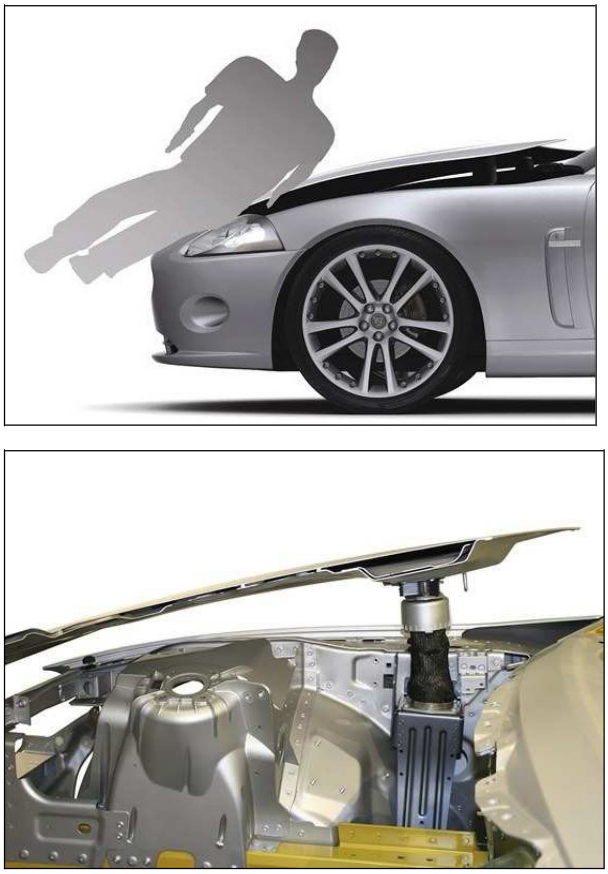
signál z jednoduchých snímačů, který za pomoci elektromotoru aktivuje čtyři plynopružinové válce. Ty po odemčení zámků okamžitě přesunou nárazník do předsunuté polohy a zároveň pohlcují část energie. (viz obr. 14) [8]




***Obr. 14 –*** *Systém plynových pružin pro vysunutí nárazníku* [6]

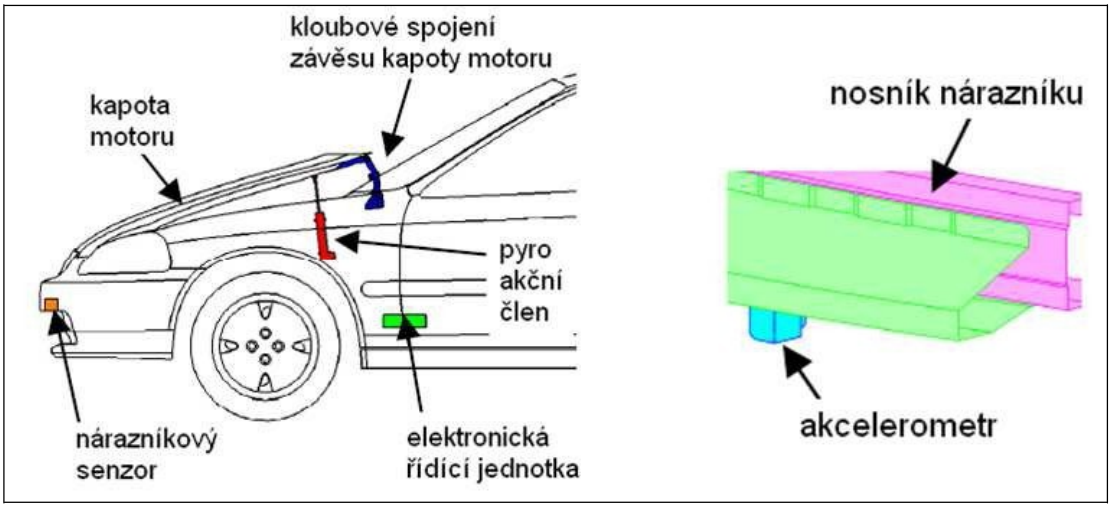
***Systém aktivní kapoty vozidla***

Na principu navýšení deformačního prostoru pracuje i systém aktivní kapoty. Jde o to, že celá kapota v přední části zůstane „viset“ na zámku, případně zámcích, a v zadní části, ve směru jízdy, dojde k jejímu nadzvednutí. Tím je vytvořen dodatečný prostor, díky kterému jsme schopni splnit limity pro odstup kapoty od pevných součástí v motorovém prostoru. [9]



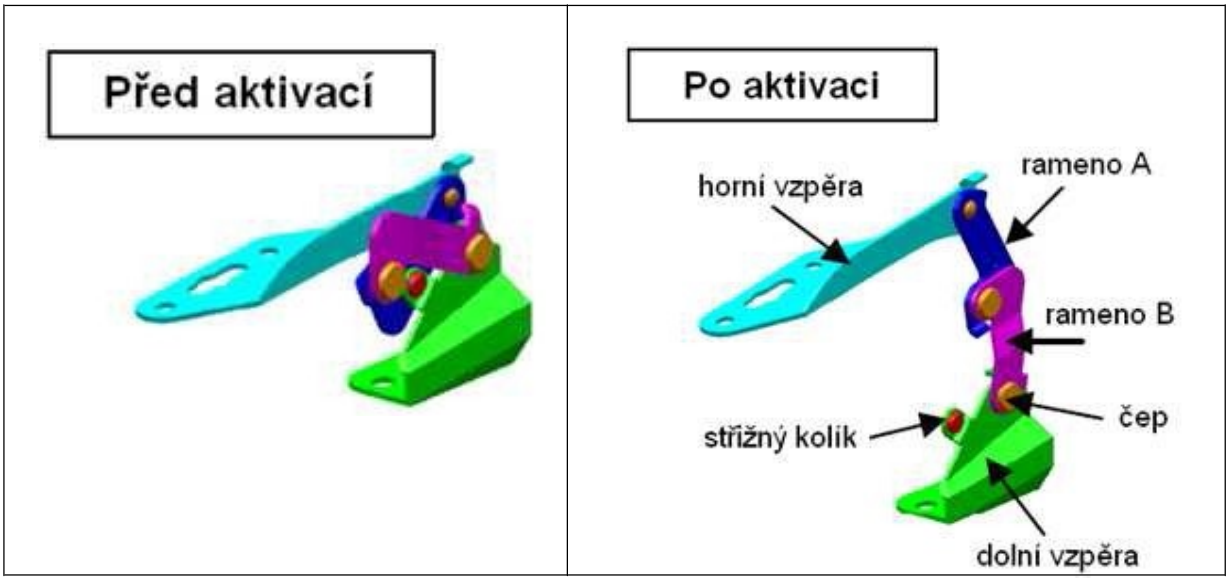
***Obr. 15 –*** *Systém aktivní kapoty firmy Jaguar, zdvihací mechanismus* [9]

K vlastnímu zdvihání se používá několika metod: pyropatron, předepjatých členů (pružiny, torzní tyče), vzduchových měchů, případně je systém spojen ještě s airbagem pro chodce, kdy ke zdvihnutí kapoty dochází právě nafouknutím airbagu.




***Obr. 16 –*** *Komponenty systému aktivní kapoty* [4]

Impuls pro vystřelení aktivní kapoty přichází z vnějších senzorů, a to pracujících na principu membrány nebo optických vláken. U membránových spínačů je například použita trubice naplněná kapalinou, která prochází za nárazníkem v oblasti, kde dochází k prvnímu kontaktu s překážkou a na základě zvýšeného tlaku v kapalině dojde k detekci nárazu. K výstřelu aktivní kapoty by ovšem mělo dojít jen případě střetu s chodcem, a proto je třeba jasně určit, zda se jedná o tento případ, nebo náraz do jiné pevné překážky. Aktivace při nárazu, například do jiného vozidla, by pravděpodobně měla vážné důsledky na bezpečnost posádky díky oslabení integrity přední části vozu. K vyhodnocení dochází na základě analyzování impulzů ze snímačů, případně v kooperaci s dalšími už aktivními prvky bezpečnosti, jako třeba radarem nebo kamerou. Při vyhodnocení překážky jako chodce a po aktivaci zdvihacího mechanismu je třeba, abychom kapotu udrželi v horní poloze. Toho se dosahuje například mechanickými zámky v pantech otvírání kapoty. [4]




***Obr. 17 –*** *Kloubové spojení závěsu kapoty motoru* [4]

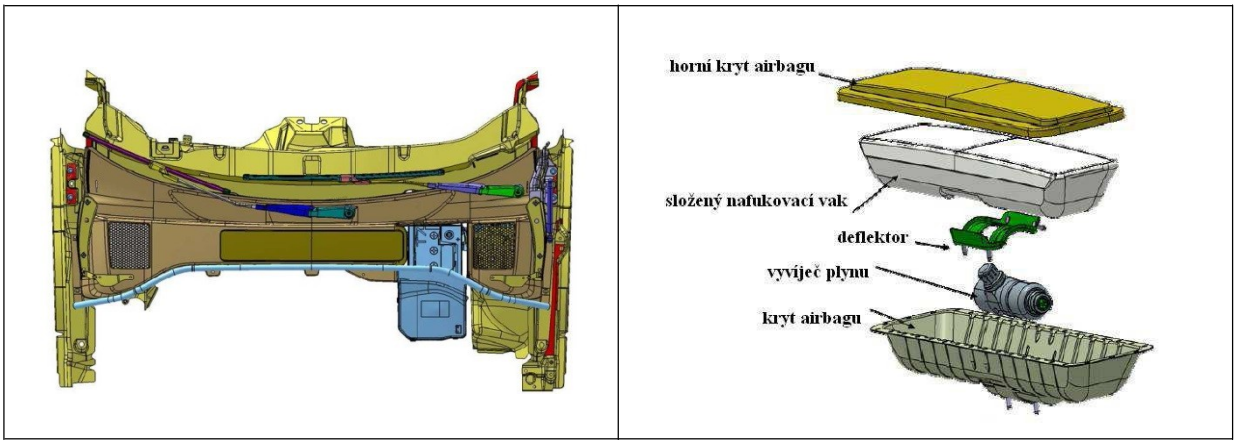
***Systém airbagů pro chodce***

Jak už jsem se zmínil několikrát výše, co se týče ochrany chodců, je na přední části vozidla velmi kritická oblast zadní hrany kapoty a stěračů, tzv. waser kanálu a oblast A-sloupků. V této oblasti se bohužel střetávají protichůdné tendence v ochraně posádky a chodců. V zájmu ochrany posádky vozidla je tyto oblasti udělat co nejpevnější, a to jde úplně proti zájmu ochrany chodců. Vhodným kompromisem může být právě airbag pro

chodce. Jak už název napovídá, jedná se o vzduchový vak, svou konstrukcí vycházející z osvědčených airbagů chránících posádku uvnitř vozidla. Po vyhodnocení signálu pro aktivaci airbagu se vzduchový vak rozprostře právě přes tyto kritické oblasti. A tím zabrání, případně sníží pravděpodobnost závažného poranění chodce při nárazu. Pokud je vozidlo vybaveno systémem aktivní kapoty, může být součástí tohoto systému, jako je tomu například u Volva V40, viz obr. 18. [10]

***Obr. 18 –*** *Systém airbagu pro chodce Volvo V40* [11]

Tomuto systému musí být přizpůsobena konstrukce oblasti kolem zadní hrany kapoty a zároveň použita speciální konstrukce stěračů. Aby při výstřelu nebyl poškozen, nesmí mu v cestě bránit žádné pevné překážky. Proto je téměř nemožné použít toto řešení u již vyrobených vozidel. Umístění a komponenty systému airbagů jsou zobrazeny na obr. 19. [10]




***Obr. 19 –*** *Vlevo – umístění modulu airbagu, vpravo – komponenty modulu airbagu* [10]

**Airbag pro chodce v praxi**

Jsou známá 2 opatření pro snížení rizika poranění chodce při srážce s automobilem.

- aktivní kapota: aktivní kapota zvětšuje deformační prostor od tuhých dílů pod kapotou (závěsy kapoty, hlava motoru, podélníky karoserie, akumulátor,…). Z podstaty toho zařízení nelze najít žádné řešení, které bude měnit kinematiku chodce a bránit jeho dalšímu pohybu.
- airbag pro chodce: airbag pro chodce je zařízení kryjící tuhé části karoserie, jako jsou A-sloupky, prostor mezi kapotou a čelním sklem. Tvar airbagu není ničím zásadně omezen, proto bychom se chtěli věnovat jeho optimalizaci tak, aby nejen chránil chodce při nárazu na automobil, ale aby usměrňoval i jeho následný pohyb, snížil kinetickou energii pádu a trajektorii pádu.

Airbag pro chodce je v sérii nasazen na 2 automobilech: Volvo V40 a Land Rover Discovery Sport.

**Popis systému airbagu na Volvo V40**

Volvo V40 má airbag pro chodce v kombinaci s aktivní kapotou. Při detekci chodce dojde nejprve k aktivaci aktivní vystřelovací kapoty a následně dojde k rozbalení airbagu. Airbag kryje pouze čelní sklo, neovlivní dopad hlavy na kapotu.

***Obr. 20 –*** *Volvo V40 Airbag pro chodce* [11]

**Popis systému airbagu Land Rover Discovery Sport**

Land Rover Discovery Sport má airbag pro chodce ve schránce na kapotě. Po detekci chodce dojde k aktivaci airbagu, a ten kryje čelní sklo a část kapoty.

***Obr. 21 –*** *Land Rover Discovery Sport Airbag pro chodce* [12]

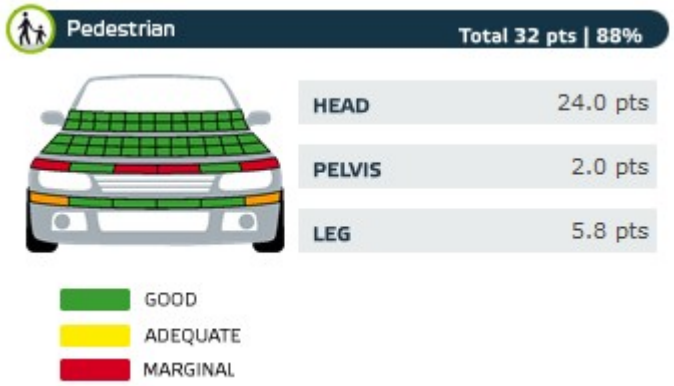
Obecně v obou systémech není zásadní rozdíl a záleží na rozhodnutí výrobce, kam airbag umístí a kterou oblast bude zlepšovat

Pokud porovnám výsledky v EuroNCAP, pak lepší ochranu poskytuje systém Volvo, který dosáhl v oblasti kapoty a čelního skla plného bodového zisku.

Výsledky Land Rover:

***Obr. 22 –*** *Výsledky pro Land Rover Discovery Sport* [14]

Výsledky Volvo V40 :




***Obr. 23 –*** *Výsledky pro Volvo V40* [14]

# Praktická část práce

## Výběr vhodného software

Pro vytvoření této matice vycházíme z parametrů dopravní nehody:

1. Automobil
    a. Rychlost automobilu před srážkou
    b. Tvar automobilu
    c. Zpomalení automobilu po srážce (intenzita brždění)

2. Chodec
    a. Velikost chodce
    b. Rychlost chodce
    c. Pozice chodce při srážce před automobilem

Prvním krokem je rozhodnutí, v jakém software budeme simulace provádět. Vzhledem k řešení velkého množství případů kolize chodce s automobilem potřebujeme SW, který bude dostatečně rychlý a s možností rychlého zpracování výsledků. Nabízí se 2 typy SW:

1. MBS (Multi body systém), např. Madymo nebo PC Crash
    a. Výhody MBS jsou:
        i. Rychlost
        ii. Snadné vytvoření geometrie automobilu a chodce
        iii. Bez omezení doby trvání děje
    b. Nevýhody MBS jsou:
        i. Povrch automobilu i chodce má je jednu tuhost, nerespektujeme lokální změnu tuhosti např. na karoserii automobilu

2. FEM (Finite element method), např. Abaqus nebo PamCrash
    a. Výhody FEM jsou:
        i. Přesnost
    b. Nevýhody FEM jsou:
        i. Potřebujeme detailní model automobilu včetně materiálových vlastností
        ii. Ztráta přesnosti výpočtu pro delší časové intervaly díky kumulaci numerické chyby

## Popis výpočetních metod

### *Multi-Body systémy*

Multibody systémy jsou výpočetní programy, které nám kromě výpočtů běžných statických problémů umožní řešit i soustavy těles tím, že nám umožňují přidání vazeb mezi jednotlivými prvky soustavy, které je dále možné zatížit obecnými vnějšími silami. Ty mohou být obecně proměnné, případně mohou být i následkem daného pohybu soustavy. MBS nám slouží jak k navržení dané soustavy, tak i k ověření její funkčnosti v případě její existence. Jedná se o mocný nástroj ve vývoji i v praxi. [6]

### *Metoda konečných prvků*

Základním principem FEM je převedení silových účinků mezi elementy tělesa na soustavu parciálních diferenciálních rovnic. Při řešení za pomoci metody FEM postupujeme podle následujících pěti kroků. [15]

1. Rozdělení oblasti na konečné prvky

   Jednotlivé prvky, z nichž sestává počítaná soustava, rozdělíme na tzv. konečné prvky, což jsou malé oblasti v ploše (např. trojúhelníky), v prostoru (např. jehlany) navzájem se stýkající v bodech, tzv. uzlech. Součtem těchto jednotlivých prvků by nám měl zpětně vzniknout celý objem původního tělesa. Na jejich velikost, případně tvar, nejsou kladena žádná omezení, nicméně s jejich zmenšující se velikostí vzrůstá přesnost a zároveň se navyšuje čas výpočtu a zvětšuje se objem dat a náročnost výpočtu. Jediným omezením na jednotlivý konečný prvek je, že v prostoru jím uzavřeným musí být jím vypočítávaná veličina konstantní. [15]

2. Aproximace

   Po rozdělení celého objemu tělesa na jednotlivé konečné prvky můžeme přikročit k vyjádření aproximací hledané neznámé funkce. A to pro každý jednotlivý prvek. *„Obvykle přitom neznámé řešení aproximujeme lineární kombinací zvolených aproximačních funkcí a neznámých aproximačních koeficientů.“* [15] Výsledkem je jedna rovnice o n-neznámých aproximačních koeficientech pro každý jednotlivý prvek. Po nalezení těchto koeficientů *„získáme aproximaci rozložení hledané veličiny v celé analyzované oblasti“*. [15]

3. Rezidua

   Výsledná aproximace by po dosazení zpět do výchozí diferenciální parciální rovnice nedala přesný výsledek právě díky tomu, že aproximace nikdy není dokonalá. Proto aproximovanou funkci doplníme o tzv. reziduum, které nám doplní rozdíl. *„Aproximace bude přirozeně tím přesnější, čím menších hodnot bude nabývat zbytková funkce.“* [15] K minimalizaci zbytkových reziduí je možné použít metodu vážených reziduí, která nám umožní minimalizaci reziduí přes celou zkoumanou oblast. [15]

4. Metoda vážených reziduí

*„Pokud bychom dosadili získané přibližné řešení problému do výchozí parciální diferenciální rovnice, nebyla by v důsledku přibližnosti řešení splněna tato rovnice dokonale. Tuto skutečnost respektujeme zavedením zbytkové funkce (rezidua). Aproximace*

*bude přirozeně tím přesnější, čím menších hodnot bude nabývat zbytková funkce. Proto se budeme snažit zbytkovou funkci minimalizovat, a to přes celou zkoumanou oblast. Jednou z možností, která se nám pro minimalizaci nabízí, je metoda vážených reziduí.“* [15]

5. Výsledné řešení

*„Vyřešením maticové rovnice pro vektor neznámých aproximačních koeficientů získáme řešení problému. Dosazením aproximačních koeficientů do formální aproximace dostaneme aproximaci hledané funkce v každém bodě každého konečného prvku, sjednocením aproximací nad všemi konečnými prvky pak získáme globální aproximaci ve všech bodech prostoru, nad kterým jsme hledali řešení zadané parciální diferenciální rovnice.“* [15]

## Konečný výběr systému

Se zohledněním výše uvedených výhod a nevýhod budeme nehody simulovat v MBS systému PC Crash, což nám přinese:

- možnost snadno vytvořit modely karoserie automobilů na základě CAD dat
- počítat libovolně dlouhý časový interval střetu chodce s automobilem
- dobrou přesnost trajektorie pohybu chodce při srážce.

Nevýhodou bude:
- nemůžeme přesně hodnotit zranění chodce. Lze získat hodnoty zrychlení na hlavě chodce, ale tyto hodnoty budou pouze orientační a vhodné pouze pro porovnání mezi jednotlivými variantami pro získání obecného trendu.

## Postup prací

### *Vytvoření modelu chodce v prostředí PC Crash*

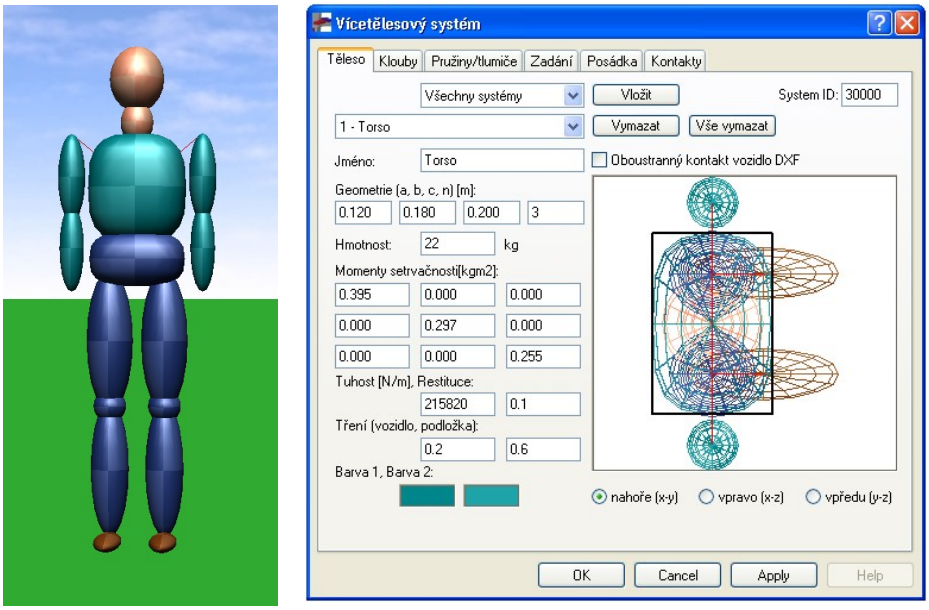
V mé diplomové práci se oprostím od chodce jako člověka a použiji model zkušební figuríny, která chodci odpovídá a zároveň je vhodná pro srážku s automobilem. Po prozkoumání trhu, kde panuje téměř monopol americké firmy Humanetics, dodávající testovací figuríny víceméně všem testujícím subjektům, včetně Euro NCAP, jsem vybral tyto tři standardizované figuríny.

| Hybrid III 50th Pedestrian Man | Hybrid III 5th Pedestrian Woman | Hybrid III 10 Year Old Pedestrian |
|---|---|---|
| Dále označováno: Man | Dále označováno: Woman | Dále označováno: Child |
| | | |

***Obr. 24 –*** *Vybrané typy chodců* [13]

Jedná se o padesátiprocentního muže, pětiprocentní ženu a desetileté dítě – jako ideální zástupce většiny populace. Na vysvětlenou: padesátiprocentní muž znamená, že jeho vnější tělesné rozměry a hmotnost odpovídají přibližně 50% mužů v dané populaci. Zjistit podrobné rozměry a hmotnosti se mi podařilo náročným vyhledáváním v testovacích protokolech společnosti Euro NCAP.

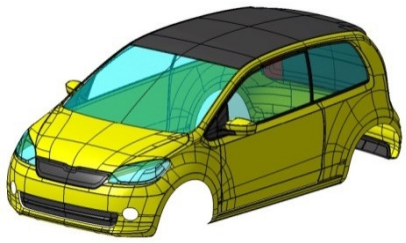
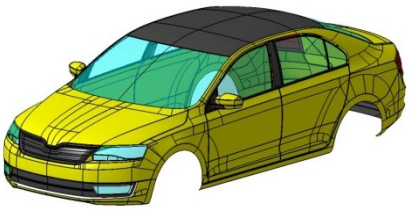
K těmto figurínám byly vytvořeny modely v prostředí PC Crash, které zohledňují hmotnost a rozměry komponent figuríny, jak je znázorněno na následujícím obrázku:




***Obr. 25 –*** *Náhled modelu chodce v programu PC-Crash* [3]

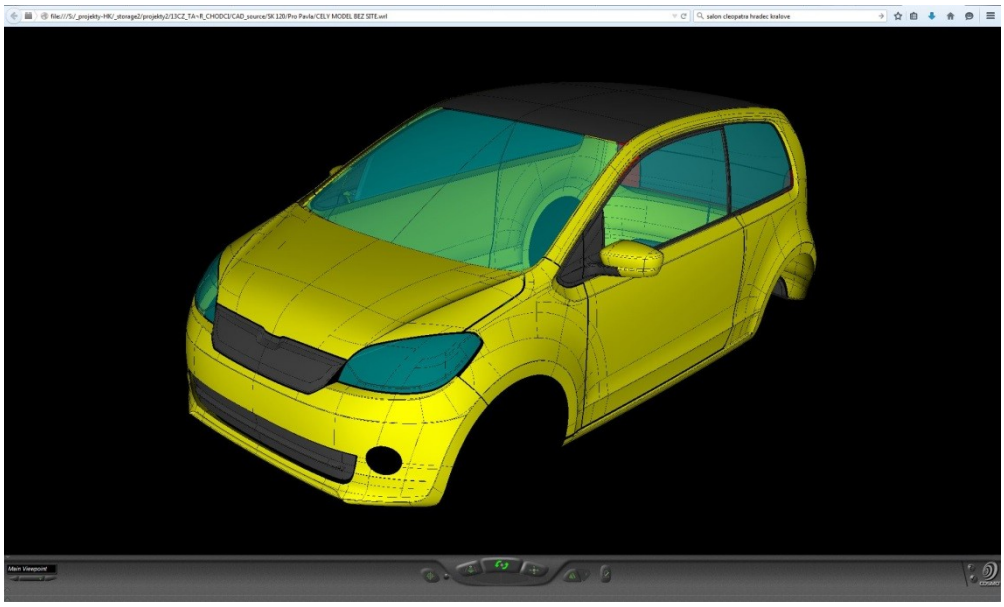
### *Vytvoření modelu automobilu v prostředí PC Crash*

Kinematika pohybu chodce je určena tvarem přední části automobilu. Obecně existuje velké množství tvarů a já se ve své diplomové práci omezím na 3 základní tvary:

| Městský automobil s krátkou kapotou a nízkou přední hranou kapoty | Rodinný automobil s průměrnou délkou kapoty a výškou přední hrany kapoty | SUV automobil s průměrnou délkou kapoty a vysokou výškou přední hrany kapoty |
|---|---|---|
| Škoda Citygo<br>SK 120 | Škoda Rapid<br>SK 251 | Škoda Yeti<br>SK 316 FL |
|  |  | |

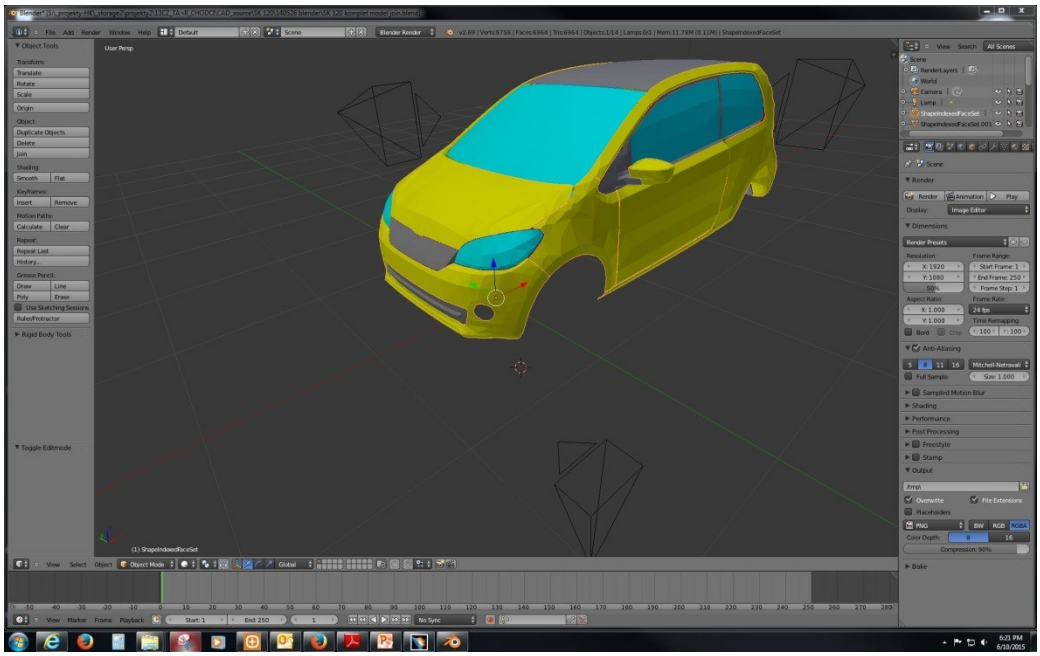
***Obr. 26 –*** *Vybrané typy karosérií* [3]

Při vývoji modelů pro vozidla bylo na začátku důležité se rozhodnout, zda použiji reálné modely vozidel, nebo vytvořím své vlastní. Nakonec jsem dospěl k závěru, že lepší variantou budou reálné, a to z důvodu větší objektivity měření. Reálná vozidla mají totiž nespornou výhodu v tom, že jsou přesně známé a dostupné informace o jejich vnějších rozměrech, hmotnostech, rozvorech atd. Díky této skutečnosti se mi povedlo sestavit velmi reálné modely pro simulace.



***Obr. 27 –*** *Základní model bez sítě a textury* [3]

Cesta k nim však nebyla vůbec jednoduchá, jak by se na první pohled mohlo zdát. Jakožto konstruktér ve společnosti, která se podílí na vývoji vozidel pro několik automobilek, mám přístup k datům jednotlivých dílů, které tvoří povrch vozidla. Bylo potřeba extrahovat z jednotlivých dílů právě jen ty plochy, které tvoří povrch, ty pak zjednodušit a vložit do souboru, jenž by byl převeden do formátu podporovaného PC Crash. To ovšem nešlo přímo. Bylo zapotřebí nalézt a naučit se pracovat s programem, který by mi umožňoval převod souboru z Catia V5 do VRLM. Tou nejlepší volbou se ukázal být Blender. Ten požadované zvládl (pozn. jedná se o program používaný při vytváření virtuální reality a filmových triků i pro nejlepší současné velkofilmy).

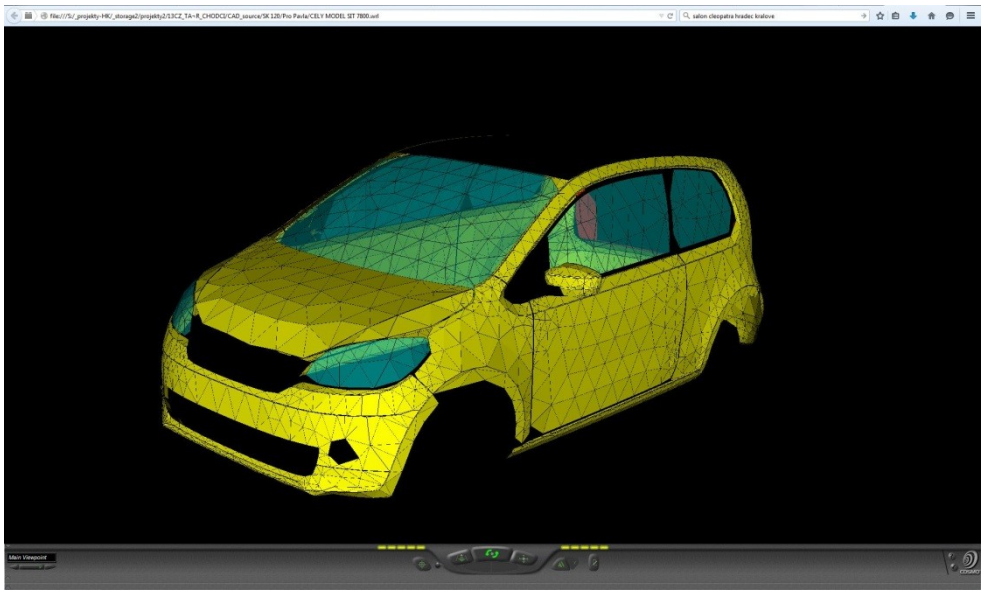


***Obr. 28 –*** *Náhled modelu se sítí v programu Blender* [3]

Když se mi podařilo sestavit tento řetězec, bylo ještě potřeba výsledný model vyladit tak, aby v programu PC Crash nejenom fungoval, ale i vypadal dobře. Právě funkčnost se ukázala být největším problémem. V žádném z dostupných pramenů ani v dokumentaci nebylo totiž řečeno, jaké parametry má model mít, a proto bylo třeba se postupným systematickým zkoušením dopracovat k funkčnímu modelu.

Krok za krokem jsem se dopracoval k tomu, že pokud chci, aby byly zobrazeny všechny části, ze kterých se vůz skládá, musí být díly tvořící jeden celek, např. karoserii nebo světla, navzájem spojené a zároveň se nesmějí dotýkat nebo procházet přes jiné díly. Aby byly díly zobrazeny korektně a ne jen jako černá silueta, bylo zapotřebí tyto jednotlivé celky „osíťovat“. Síťování se používá například při pevnostních výpočtech ve strojírenství, v programech jako Ansa. Catia V5 ve svých vrcholných licencích obsahuje i modul právě pro síťování a pevnostní výpočty, ale tím, že se jedná jen o okrajovou oblast použití, není tento modul tak fundovaný, jako například zmíněná Ansa. Síťování vedlo k tomu, že model byl již zobrazen korektně, nicméně byl pořád pouze černý. Zároveň se ukázala neschopnost programu zobrazit síťovaný model s větším počtem než 7500 elementů. Proto bylo třeba sítě upravit a zjednodušit. Po dalším zkoušení všech možných kombinací parametrů jsem zjistil, že ke korektnímu zobrazení je zapotřebí pokrýt model texturou. Nezbývalo než porozumět jazyku VRLM natolik, abych byl schopen ve

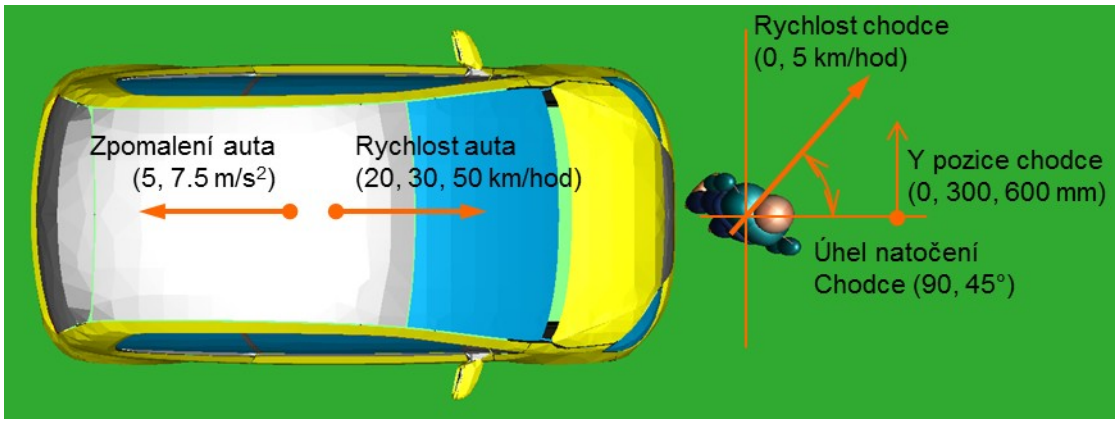
zdrojovém kódu danému objektu přiřadit texturu. Ani tato část nebylo zcela snadná, jelikož PC Crash nebyl schopen akceptovat všechny možné textury. Proto jsem byl nucen vytvořit si vlastní. Po několika stech hodinách práce se mi podařilo sestavit model, jenž byl funkční, korektně zobrazený i v barvě, se kterým jsem mohl začít pracovat.



***Obr. 29 -*** *Výsledný model s aplikovanou sítí a texturou* [3]

### *Vytvoření scénáře srážky v prostředí PC Crash*

Pro PC Crash mám připraveny 3 chodce a 3 tvary automobilů. Toto jsou vstupy pro nastavení simulace. Scéna v PC Crash vypadá následovně:




***Obr. 30 –*** *Situační obrázek* [3]

V PC Crash budeme pracovat s těmito parametry, z nichž vznikne kompletní matice simulací pro všechny kombinace:

3 tvary automobilu

3 rychlosti automobilu před střetem s chodcem

2 zpomalení automobilu po střetu s chodcem

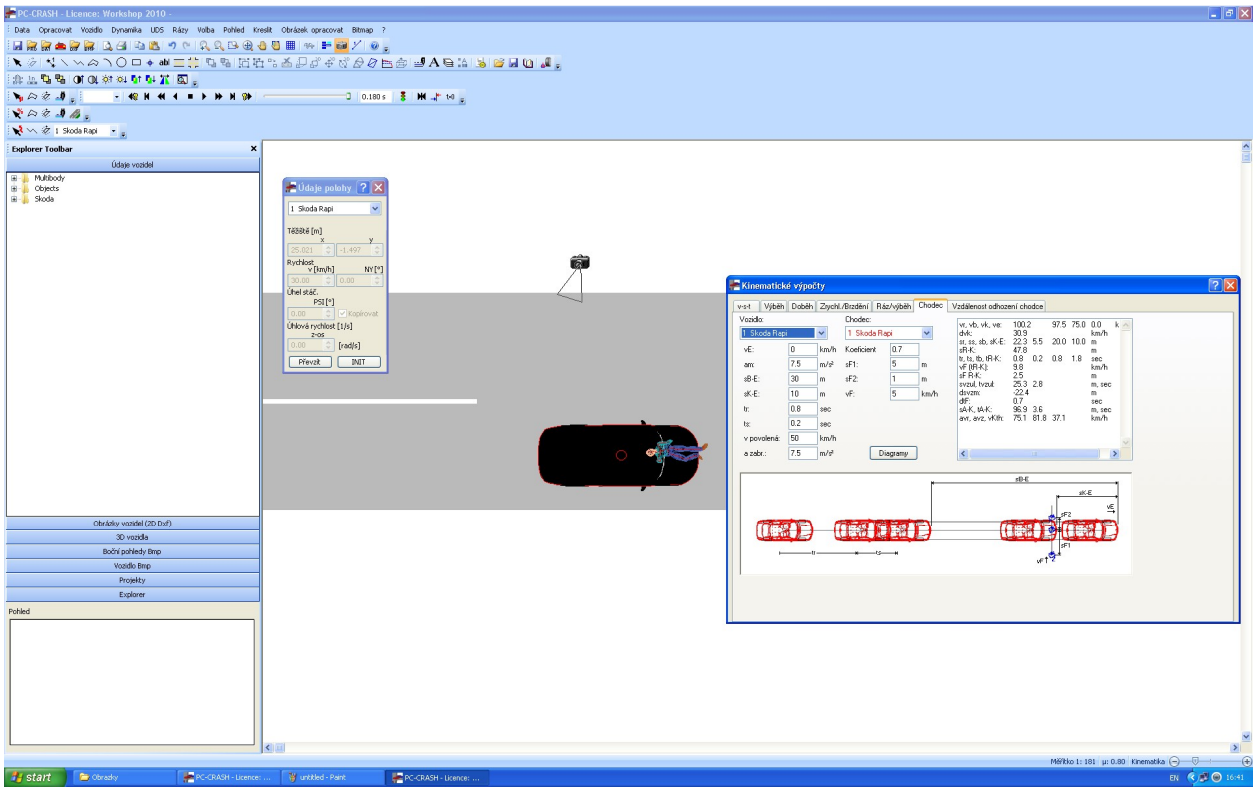
3 tvary chodce

3 pozice chodce při srážce

2 rychlosti chůze chodce

2 úhly chůze chodce

Z toho vychází provedení 648 simulací, na základě jejichž výsledků budu mít dobrý statistický přehled o kinematice chodce při střetu s vozidlem.




***Obr. 31 -*** *Nastavení scény v prostředí programu PC Crash* [3]

| Typ vozidla | chodec | pozice chodce při střetu Y [mm] | zrychlení vozidla [m/s²] | rychlost vozidla [km/hod] | rychlost chodce [km/hod] | směr [°] | zrychlení hlavy primární náraz [m/s²] | zrychlení hlavy sekundární náraz [m/s²] | vzdálenost dopadu hlavy WAD[mm] | pozice dopadu hlavy při střetu X1 [m] | pozice dopadu hlavy při střetu Y1 [m] | pozice dopadu hlavy při střetu Y1 [m] | vzdálenost dopadu chodce od vozidla X2 [m] | vzdálenost dopadu chodce od vozidla Y2 [m] | předpoklad závažnosti zranění [1,..,10] | | t1 | t2 | vzdálenost dopadu chodce od počátku X1 [m] | vzdálenost dopadu chodce od počátku X2 [m] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 20 | 0 | 45 | 291,0 | 554,0 | 1500 | 1,079 | -0,001 | 0,000 | 2,733 | 0,109 | | | 0,245 | 0,885 | 2,290 | 5,69 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 20 | 0 | 90 | 448,5 | 220,6 | 1300 | 1,231 | 0,044 | 0,000 | 2,661 | 0,020 | | | 0,420 | 0,865 | 3,123 | 5,60 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 20 | 5 | 45 | 376,3 | 261,5 | 1600 | 0,977 | 0,194 | 0,200 | 2,425 | 0,322 | | | 0,315 | 0,880 | 2,479 | 5,38 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 20 | 5 | 90 | 204,3 | 548,4 | 1500 | 1,028 | 0,445 | 0,400 | 2,392 | 0,703 | | | 0,305 | 0,850 | 2,490 | 5,31 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 30 | 0 | 45 | 824,0 | 225,2 | 1800 | 0,773 | -0,071 | -0,100 | 3,275 | -0,434 | | | 0,180 | 1,250 | 2,192 | 9,79 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 30 | 0 | 90 | 188,0 | 646,7 | 1900 | 0,704 | -0,005 | 0,000 | 3,874 | -0,095 | | | 0,225 | 1,315 | 2,453 | 10,51 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 30 | 5 | 45 | 594,7 | 161,6 | 1800 | 0,783 | 0,115 | 0,100 | 3,251 | 0,552 | | | 0,205 | 1,040 | 2,386 | 9,21 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 30 | 5 | 90 | 303,5 | 311,3 | 1900 | 0,724 | 0,280 | 0,300 | 2,793 | 1,230 | | | 0,205 | 1,135 | 2,328 | 9,03 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 50 | 0 | 45 | 1051,9 | 1229,6 | 2100 | 0,425 | -0,045 | 0,000 | 3,408 | -0,273 | | | 0,130 | 1,700 | 2,189 | 19,79 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 50 | 0 | 90 | 493,3 | 415,9 | 2100 | 0,488 | 0,002 | 0,000 | 3,197 | -0,099 | | | 0,140 | 1,640 | 2,384 | 19,25 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 50 | 5 | 45 | 1030,8 | 910,4 | 2000 | 0,555 | 0,075 | 0,100 | 3,615 | 0,692 | | | 0,130 | 1,485 | 2,318 | 18,73 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -5 | 50 | 5 | 90 | 333,1 | 545,9 | 2100 | 0,441 | 0,186 | 0,200 | 2,468 | 1,561 | | | 0,150 | 1,535 | 2,468 | 17,90 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 20 | 0 | 45 | 490,6 | 480,3 | 1600 | 0,949 | -0,095 | -0,100 | 3,209 | -0,362 | | | 0,270 | 0,900 | 2,175 | 5,17 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 20 | 0 | 90 | 448,8 | 507,4 | 1300 | 1,239 | 0,024 | 0,000 | 3,287 | 0,022 | | | 0,360 | 0,845 | 2,753 | 5,30 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 20 | 5 | 45 | 301,6 | 213,1 | 1500 | 1,087 | 0,206 | 0,200 | 3,084 | 0,445 | | | 0,335 | 0,860 | 2,527 | 5,09 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 20 | 5 | 90 | 216,1 | 531,2 | 1400 | 1,135 | 0,438 | 0,400 | 3,234 | 0,741 | | | 0,305 | 0,845 | 2,481 | 5,25 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 30 | 0 | 45 | 828,7 | 674,6 | 1800 | 0,809 | -0,088 | -0,100 | 4,117 | -0,610 | | | 0,185 | 1,110 | 2,222 | 8,75 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 30 | 0 | 90 | 250,0 | 299,8 | 1900 | 0,721 | 0,007 | 0,000 | 4,761 | 0,051 | | | 0,225 | 1,160 | 2,406 | 9,38 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 30 | 5 | 45 | 617,2 | 328,5 | 1700 | 0,842 | 0,109 | 0,100 | 3,669 | 0,303 | | | 0,205 | 0,910 | 2,393 | 8,15 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 30 | 5 | 90 | 346,9 | 333,4 | 1800 | 0,728 | 0,296 | 0,300 | 4,104 | 1,159 | | | 0,220 | 1,155 | 2,380 | 8,73 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 50 | 0 | 45 | 1071,3 | 736,7 | 2100 | 0,503 | -0,050 | -0,100 | 6,732 | -0,380 | | | 0,125 | 1,590 | 2,180 | 19,33 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 50 | 0 | 90 | 448,3 | 617,9 | 2100 | 0,462 | -0,003 | 0,000 | 6,100 | -0,009 | | | 0,140 | 1,665 | 2,333 | 18,83 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 50 | 5 | 45 | 1038,2 | 876,8 | 2000 | 0,574 | 0,066 | 0,100 | 6,278 | 0,784 | | | 0,130 | 1,485 | 2,316 | 18,63 |
| SK 120 | HIII 50th man | 0 | -7,5 | 50 | 5 | 90 | 482,4 | 1045,0 | 2000 | 0,559 | 0,172 | 0,200 | 4,621 | 1,104 | | | 0,135 | 1,340 | 2,366 | 16,50 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 20 | 0 | 45 | 493,6 | 266,4 | 1700 | 0,884 | 0,219 | 0,200 | 2,606 | 0,143 | | | 0,255 | 0,895 | 2,138 | 5,58 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 20 | 0 | 90 | 172,3 | 631,6 | 1600 | 0,987 | 0,311 | 0,300 | 2,521 | 0,553 | | | 0,320 | 0,945 | 2,509 | 5,54 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 20 | 5 | 45 | 374,5 | 251,2 | 1600 | 0,897 | 0,549 | 0,500 | 2,589 | 1,373 | | | 0,330 | 1,195 | 2,458 | 5,66 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 20 | 5 | 90 | 58,1 | 343,4 | 1400 | 0,905 | 0,716 | 0,700 | 1,418 | 1,236 | | | 0,290 | 0,690 | 2,306 | 4,06 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 30 | 0 | 45 | 579,0 | 476,1 | 1800 | 0,791 | 0,252 | 0,300 | 3,162 | 0,257 | | | 0,170 | 1,190 | 2,136 | 9,54 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 30 | 0 | 90 | 324,3 | 280,0 | 1900 | 0,691 | 0,310 | 0,300 | 3,262 | 0,723 | | | 0,220 | 1,290 | 2,403 | 9,85 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 30 | 5 | 45 | 743,2 | 473,9 | 1800 | 0,749 | 0,437 | 0,400 | 3,056 | 1,478 | | | 0,210 | 1,150 | 2,389 | 9,33 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 30 | 5 | 90 | 139,1 | 311,8 | Zrcátko | 0,654 | 0,873 | 0,900 | 2,117 | 2,108 | | | 0,340 | 1,405 | 3,199 | 8,89 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 50 | 0 | 45 | 1115,6 | 651,3 | 2100 | 0,529 | 0,262 | 0,300 | 4,459 | 1,826 | | | 0,120 | 1,665 | 2,160 | 20,65 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 50 | 0 | 90 | 417,6 | 1044,2 | 2100 | 0,500 | 0,313 | 0,300 | 1,911 | 1,579 | | | 0,140 | 1,340 | 2,395 | 16,03 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 50 | 5 | 45 | 1059,6 | 948,9 | 2100 | 0,518 | 0,376 | 0,400 | 2,931 | 2,921 | | | 0,135 | 1,465 | 2,347 | 17,91 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -5 | 50 | 5 | 90 | 413,2 | 244,4 | 2200 | 0,339 | 0,511 | 0,500 | 0,889 | 3,629 | | | 0,160 | 1,555 | 2,497 | 16,44 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 20 | 0 | 45 | 557,0 | 312,2 | 1600 | 0,979 | 0,201 | 0,200 | 3,095 | 0,435 | | | 0,275 | 0,830 | 2,223 | 5,12 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 20 | 0 | 90 | 410,8 | 421,0 | 1300 | 1,212 | 0,333 | 0,300 | 3,080 | 0,543 | | | 0,395 | 0,875 | 2,821 | 5,07 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 20 | 5 | 45 | 336,9 | 236,3 | 1500 | 0,996 | 0,574 | 0,600 | 3,146 | 1,300 | | | 0,355 | 1,065 | 2,495 | 4,81 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 20 | 5 | 90 | 538,9 | 364,6 | 1400 | 0,981 | 0,684 | 0,700 | 2,441 | 1,617 | | | 0,310 | 0,750 | 2,342 | 4,50 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 30 | 0 | 45 | 634,4 | 463,1 | 1900 | 0,695 | 0,252 | 0,300 | 4,514 | 0,421 | | | 0,190 | 1,160 | 2,143 | 9,14 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 30 | 0 | 90 | 273,6 | 260,4 | 1800 | 0,748 | 0,314 | 0,300 | 4,176 | 0,708 | | | 0,230 | 1,065 | 2,467 | 8,80 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 30 | 5 | 45 | 641,2 | 227,0 | 1800 | 0,766 | 0,442 | 0,400 | 3,903 | 1,411 | | | 0,215 | 0,990 | 2,384 | 8,48 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 30 | 5 | 90 | 38,7 | 209,4 | 1700 | 0,741 | 0,682 | 0,700 | 3,911 | 2,172 | | | 0,260 | 1,175 | 2,654 | 8,53 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 50 | 0 | 45 | 997,5 | 642,5 | 2100 | 0,541 | 0,263 | 0,300 | 6,346 | 1,988 | | | 0,120 | 1,465 | 2,154 | 18,64 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 50 | 0 | 90 | 357,5 | 893,6 | 2200 | 0,374 | 0,310 | 0,300 | 2,899 | 1,115 | | | 0,160 | 1,420 | 2,501 | 15,06 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 50 | 5 | 45 | 714,5 | 659,9 | 2100 | 0,525 | 0,385 | 0,400 | 5,628 | 2,092 | | | 0,130 | 1,490 | 2,267 | 18,00 |
| SK 120 | HIII 50th man | 300 | -7,5 | 50 | 5 | 90 | 804,7 | 917,6 | 2100 | 0,410 | 0,512 | 0,500 | 3,137 | 2,914 | | | 0,150 | 1,385 | 2,409 | 15,18 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 20 | 0 | 45 | 435,5 | 124,2 | 1700 | 0,759 | 0,580 | 0,600 | 3,031 | 1,742 | | | 0,275 | 1,275 | 2,098 | 6,05 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 20 | 0 | 90 | 241,1 | 153,3 | 1700 | 0,762 | 0,572 | 0,600 | 1,612 | 1,848 | | | 0,325 | 1,100 | 2,304 | 4,70 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 20 | 5 | 45 | 472,4 | 208,2 | Zrcátko | 0,694 | 0,958 | 1,000 | 0,561 | 0,997 | | | 0,375 | 0,695 | 2,425 | 3,21 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 20 | 5 | 90 | NIL | NIL | NIL | NIL | NIL | NIL | NIL | NIL | | | NIL | NIL | NIL | NIL |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 30 | 0 | 45 | 572,5 | 509,9 | 2000 | 0,505 | 0,580 | 0,600 | 1,799 | 2,063 | | | 0,210 | 0,980 | 2,145 | 7,56 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 30 | 0 | 90 | 703,7 | 520,6 | A | 0,449 | 0,618 | 0,600 | 0,299 | 1,836 | | | 0,225 | 0,605 | 2,197 | 4,43 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 30 | 5 | 45 | NIL | 411,0 | NIL | NIL | NIL | NIL | 0,532 | 1,684 | | | NIL | 0,575 | NIL | 4,50 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 30 | 5 | 90 | NIL | 356,7 | NIL | NIL | NIL | NIL | -0,454 | 1,491 | | | NIL | 0,470 | NIL | 2,91 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 50 | 0 | 45 | 952,2 | 962,5 | 2000 | 0,467 | 0,589 | 0,600 | -0,030 | 4,715 | | | 0,120 | 1,175 | 2,098 | 12,84 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 50 | 0 | 90 | 424,4 | 1028,4 | 2300 | 0,155 | 0,612 | 0,600 | -3,008 | 4,097 | | | 0,155 | 1,210 | 2,248 | 10,14 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 50 | 5 | 45 | NIL | 392,2 | NIL | NIL | NIL | NIL | -0,898 | 4,255 | | | NIL | 0,840 | NIL | 9,01 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -5 | 50 | 5 | 90 | NIL | 319,5 | NIL | NIL | NIL | NIL | -0,942 | 2,480 | | | NIL | 0,455 | NIL | 4,86 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 20 | 0 | 45 | 447,9 | 256,8 | 1600 | 0,828 | 0,580 | 0,600 | 2,532 | 1,044 | | | 0,280 | 1,060 | 2,090 | 4,21 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 20 | 0 | 90 | 277,5 | NIL | 1600 | 0,848 | 0,572 | 0,600 | NIL | NIL | | | 0,340 | NIL | 2,304 | NIL |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 20 | 5 | 45 | NIL | 366,3 | NIL | NIL | NIL | NIL | 0,784 | 1,089 | | | NIL | 0,560 | NIL | 2,72 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 20 | 5 | 90 | NIL | 436,4 | NIL | NIL | NIL | NIL | 0,263 | 1,475 | | | NIL | 0,550 | NIL | 2,18 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 30 | 0 | 45 | 480,1 | 434,5 | 2000 | 0,555 | 0,577 | 0,600 | 2,567 | 1,587 | | | 0,210 | 0,910 | 2,139 | 7,05 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 30 | 0 | 90 | 1014,4 | 522,3 | 2000 | 0,467 | 0,628 | 0,600 | 1,209 | 2,198 | | | 0,235 | 0,595 | 2,218 | 4,84 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 30 | 5 | 45 | NIL | 528,5 | NIL | NIL | NIL | NIL | 0,626 | 1,492 | | | NIL | 0,540 | NIL | 4,03 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 30 | 5 | 90 | NIL | 461,1 | NIL | NIL | NIL | NIL | 0,968 | 2,369 | | | NIL | 0,530 | NIL | 4,33 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 50 | 0 | 45 | 777,5 | 190,0 | 2000 | 0,484 | 0,587 | 0,600 | 2,261 | 4,008 | | | 0,120 | 1,145 | 2,097 | 13,25 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 50 | 0 | 90 | 462,9 | 483,2 | 2300 | 0,258 | 0,607 | 0,600 | -0,755 | 4,386 | | | 0,150 | 1,305 | 2,257 | 10,98 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 50 | 5 | 45 | NIL | 442,4 | NIL | NIL | NIL | NIL | -0,333 | 4,630 | | | NIL | 0,975 | NIL | 9,64 |
| SK 120 | HIII 50th man | 600 | -7,5 | 50 | 5 | 90 | NIL | 174,9 | NIL | NIL | NIL | NIL | -1,739 | 3,187 | | | NIL | 0,765 | NIL | 6,69 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 20 | 0 | 45 | 374,4 | 242,2 | 1700 | 0,857 | -0,374 | -0,400 | 2,943 | -1,648 | | | 0,260 | 1,120 | 2,132 | 6,03 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 20 | 0 | 90 | 172,3 | 631,6 | 1600 | 0,987 | -0,311 | -0,300 | 2,521 | -0,553 | | | 0,320 | 0,945 | 2,509 | 5,54 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 20 | 5 | 45 | 343,3 | 415,6 | 1500 | 0,998 | -0,117 | -0,100 | 2,515 | -0,352 | | | 0,315 | 0,890 | 2,500 | 5,48 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 20 | 5 | 90 | 175,2 | 604,2 | 1500 | 1,047 | 0,141 | 0,100 | 2,560 | 0,367 | | | 0,310 | 0,865 | 2,529 | 5,50 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 30 | 0 | 45 | 665,4 | 275,5 | 1900 | 0,704 | -0,370 | -0,400 | 3,361 | -1,046 | | | 0,185 | 1,140 | 2,161 | 9,61 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 30 | 0 | 90 | 324,3 | 280,0 | 1900 | 0,691 | -0,310 | -0,300 | 3,262 | -0,723 | | | 0,220 | 1,290 | 2,403 | 9,85 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 30 | 5 | 45 | 550,2 | 438,6 | 1900 | 0,711 | -0,169 | -0,200 | 2,593 | -0,240 | | | 0,215 | 0,975 | 2,387 | 8,34 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 30 | 5 | 90 | 306,7 | 213,5 | 1900 | 0,667 | -0,013 | 0,000 | 2,898 | 0,863 | | | 0,225 | 1,405 | 2,415 | 9,67 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 50 | 0 | 45 | 1266,1 | 821,2 | 2100 | 0,514 | -0,350 | -0,400 | 3,580 | -2,215 | | | 0,125 | 1,530 | 2,211 | 18,98 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 50 | 0 | 90 | 417,6 | 1044,2 | 2100 | 0,500 | -0,313 | -0,300 | 1,911 | -1,579 | | | 0,140 | 1,340 | 2,395 | 16,03 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 50 | 5 | 45 | 1103,1 | 1021,4 | 2000 | 0,582 | -0,238 | -0,200 | 3,839 | -0,589 | | | 0,130 | 1,425 | 2,345 | 18,55 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -5 | 50 | 5 | 90 | 463,5 | 380,9 | 2200 | 0,352 | -0,115 | -0,100 | 1,726 | 1,928 | | | 0,160 | 1,810 | 2,510 | 18,67 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 20 | 0 | 45 | 439,3 | 427,6 | 1600 | 0,927 | -0,408 | -0,400 | 2,808 | -1,080 | | | 0,275 | 0,865 | 2,171 | 4,81 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 20 | 0 | 90 | 410,8 | 421,0 | 1300 | 1,212 | -0,333 | -0,300 | 3,080 | -0,543 | | | 0,395 | 0,875 | 2,821 | 5,07 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 20 | 5 | 45 | 280,4 | 251,6 | 1400 | 1,135 | -0,117 | -0,100 | 3,262 | -0,124 | | | 0,330 | 1,130 | 2,560 | 4,75 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 20 | 5 | 90 | 369,0 | 575,7 | 1400 | 1,091 | 0,143 | 0,100 | 2,798 | 0,369 | | | 0,305 | 0,800 | 2,437 | 4,84 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 30 | 0 | 45 | 796,4 | 453,4 | 1800 | 0,759 | -0,388 | -0,400 | 4,560 | -1,113 | | | 0,190 | 1,140 | 2,207 | 9,19 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 30 | 0 | 90 | 273,6 | 260,4 | 1800 | 0,748 | -0,314 | -0,300 | 4,176 | -0,708 | | | 0,230 | 1,065 | 2,467 | 8,80 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 30 | 5 | 45 | 521,7 | 558,7 | 1800 | 0,755 | -0,175 | -0,200 | 3,218 | -0,166 | | | 0,215 | 0,940 | 2,373 | 7,74 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 30 | 5 | 90 | 350,8 | 286,6 | 1800 | 0,770 | -0,010 | 0,000 | 4,436 | 0,704 | | | 0,215 | 1,205 | 2,388 | 9,03 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 50 | 0 | 45 | 1088,4 | 467,0 | 2100 | 0,509 | -0,352 | -0,400 | 7,607 | -2,414 | | | 0,125 | 1,630 | 2,186 | 20,28 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 50 | 0 | 90 | 357,5 | 893,6 | 2200 | 0,374 | -0,310 | -0,300 | 2,899 | -1,115 | | | 0,160 | 1,420 | 2,501 | 15,06 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 50 | 5 | 45 | 984,1 | 820,9 | 2100 | 0,462 | -0,219 | -0,200 | 5,645 | -0,334 | | | 0,140 | 1,580 | 2,332 | 18,23 |
| SK 120 | HIII 50th man | -300 | -7,5 | 50 | 5 | 90 | 459,8 | 1123,4 | 2200 | 0,374 | -0,114 | -0,100 | 2,882 | 0,498 | | | 0,160 | 1,400 | 2,500 | 14,98 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 20 | 0 | 45 | 355,6 | 270,1 | A | 0,752 | -0,693 | -0,700 | 1,216 | -1,210 | | | 0,290 | 0,735 | 2,153 | 3,95 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 20 | 0 | 90 | 241,1 | 153,3 | 1700 | 0,762 | -0,572 | -0,600 | 1,612 | -1,848 | | | 0,325 | 1,100 | 2,304 | 4,70 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 20 | 5 | 45 | 376,9 | 413,7 | 1600 | 0,966 | -0,397 | -0,400 | 2,526 | -1,103 | | | 0,335 | 0,995 | 2,546 | 5,58 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 20 | 5 | 90 | 225,8 | 345,2 | 1600 | 0,943 | -0,169 | -0,200 | 2,974 | 0,424 | | | 0,300 | 1,015 | 2,385 | 6,04 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 30 | 0 | 45 | 539,1 | 340,2 | A | 0,515 | -0,664 | -0,700 | 1,174 | -2,318 | | | 0,210 | 0,945 | 2,155 | 6,82 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 30 | 0 | 90 | 703,7 | 520,6 | A | 0,449 | -0,618 | -0,600 | 0,299 | -1,836 | | | 0,225 | 0,605 | 2,197 | 4,43 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 30 | 5 | 45 | 470,6 | 293,2 | 1900 | 0,636 | -0,447 | -0,400 | 2,068 | -1,713 | | | 0,225 | 0,995 | 2,385 | 7,88 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 30 | 5 | 90 | 471,2 | 317,0 | 1800 | 0,726 | -0,331 | -0,300 | 2,103 | -1,095 | | | 0,210 | 1,095 | 2,366 | 8,23 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 50 | 0 | 45 | 763,0 | 362,7 | A | 0,316 | -0,675 | -0,700 | -1,711 | -3,398 | | | 0,140 | 1,070 | 2,211 | 10,29 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 50 | 0 | 90 | 424,4 | 1028,4 | A | 0,155 | -0,612 | -0,600 | -3,008 | -4,097 | | | 0,155 | 1,210 | 2,248 | 10,14 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 50 | 5 | 45 | 888,4 | 639,3 | A | 0,390 | -0,681 | -0,700 | -0,801 | -3,968 | | | 0,150 | 0,965 | 2,417 | 10,27 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -5 | 50 | 5 | 90 | 654,4 | 476,7 | 2100 | 0,489 | -0,421 | -0,400 | 0,442 | -3,736 | | | 0,140 | 1,405 | 2,385 | 15,02 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 20 | 0 | 45 | 432,0 | 506,6 | A | 0,818 | -0,682 | -0,700 | 1,590 | -1,222 | | | 0,300 | 0,685 | 2,147 | 3,64 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 20 | 0 | 90 | 277,5 | NIL | 1600 | 0,848 | -0,572 | -0,600 | NIL | NIL | | | 0,340 | NIL | 2,304 | NIL |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 20 | 5 | 45 | 236,3 | 133,0 | 1500 | 1,046 | -0,374 | -0,400 | 2,656 | -0,868 | | | 0,370 | 0,920 | 2,589 | 4,59 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 20 | 5 | 90 | 351,1 | 327,5 | 1500 | 1,088 | -0,189 | -0,200 | 3,529 | -0,302 | | | 0,275 | 0,805 | 2,332 | 5,57 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 30 | 0 | 45 | 1442,3 | 365,0 | Zrcátko | 0,602 | -0,863 | -0,900 | 2,457 | -2,349 | | | 0,305 | 1,040 | 2,795 | 7,07 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 30 | 0 | 90 | 1014,4 | 522,3 | A | 0,467 | -0,628 | -0,600 | 1,209 | -2,198 | | | 0,235 | 0,595 | 2,218 | 4,84 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 30 | 5 | 45 | 463,8 | 654,2 | 1900 | 0,678 | -0,449 | -0,400 | 3,257 | -1,580 | | | 0,230 | 1,030 | 2,396 | 7,86 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 30 | 5 | 90 | 488,5 | 483,3 | 1700 | 0,817 | -0,329 | -0,300 | 3,476 | -0,739 | | | 0,215 | 1,050 | 2,435 | 8,09 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 50 | 0 | 45 | 975,0 | 660,2 | A | 0,475 | -0,657 | -0,700 | 1,109 | -4,419 | | | 0,125 | 1,045 | 2,152 | 11,53 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 50 | 0 | 90 | 462,9 | 483,2 | A | 0,258 | -0,607 | -0,600 | -0,755 | -4,386 | | | 0,150 | 1,305 | 2,257 | 10,98 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 50 | 5 | 45 | 929,9 | 646,5 | 2200 | 0,367 | -0,520 | -0,500 | 1,197 | -2,976 | | | 0,150 | 1,305 | 2,366 | 12,94 |
| SK 120 | HIII 50th man | -600 | -7,5 | 50 | 5 | 90 | 730,5 | 656,5 | 2100 | 0,485 | -0,429 | -0,400 | 1,484 | -3,545 | | | 0,140 | 1,245 | 2,356 | 12,96 |

***Tab. 4 -*** *Výsledky simulací pro jedno vozidlo a jednu postavu* [3]

# Diskuse

### Vyhodnocení simulací v PC Crash

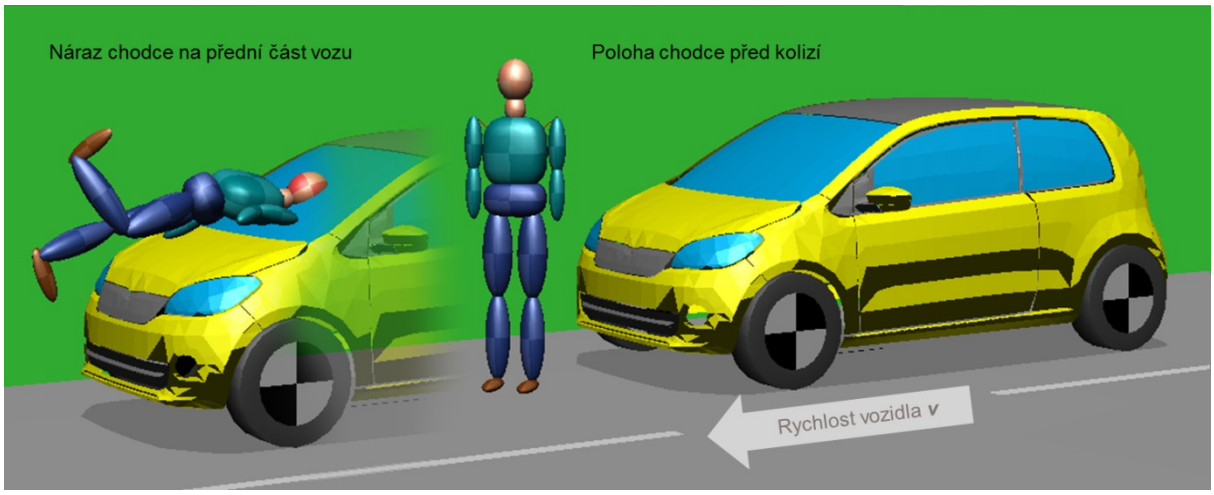
Nejkritičtější z pohledu ohrožení života je úraz hlavy. Proto budeme sledovat pozici dopadu hlavy na karoserii automobilu a pozici hlavy při dopadu na vozovku. Hlavním cílem diplomové práce je nalézt řešení, které bude snižovat riziko poranění hlavy chodce při nárazu.

Pozice nárazu na karoserii automobilu je důležitá z tohoto důvodu:
karoserie vykazuje různou tuhost v různých místech. Obecně je potřeba na zastavení hlavy letící rychlostí 40 km/h 100 mm deformačního prostoru, pokud nemá dojít k poškození mozku (HIC menší než 1000). Obecně např. sklo vykazuje dobré chování při deformaci pro zpomalení hlavy a stejně tak prostřední oblast kapoty lze vyvinout tak, aby její deformace efektivně zpomalovala hlavu. Naopak oblasti karoserie, kde nelze udělat poddajný povrch pro deformaci jsou:

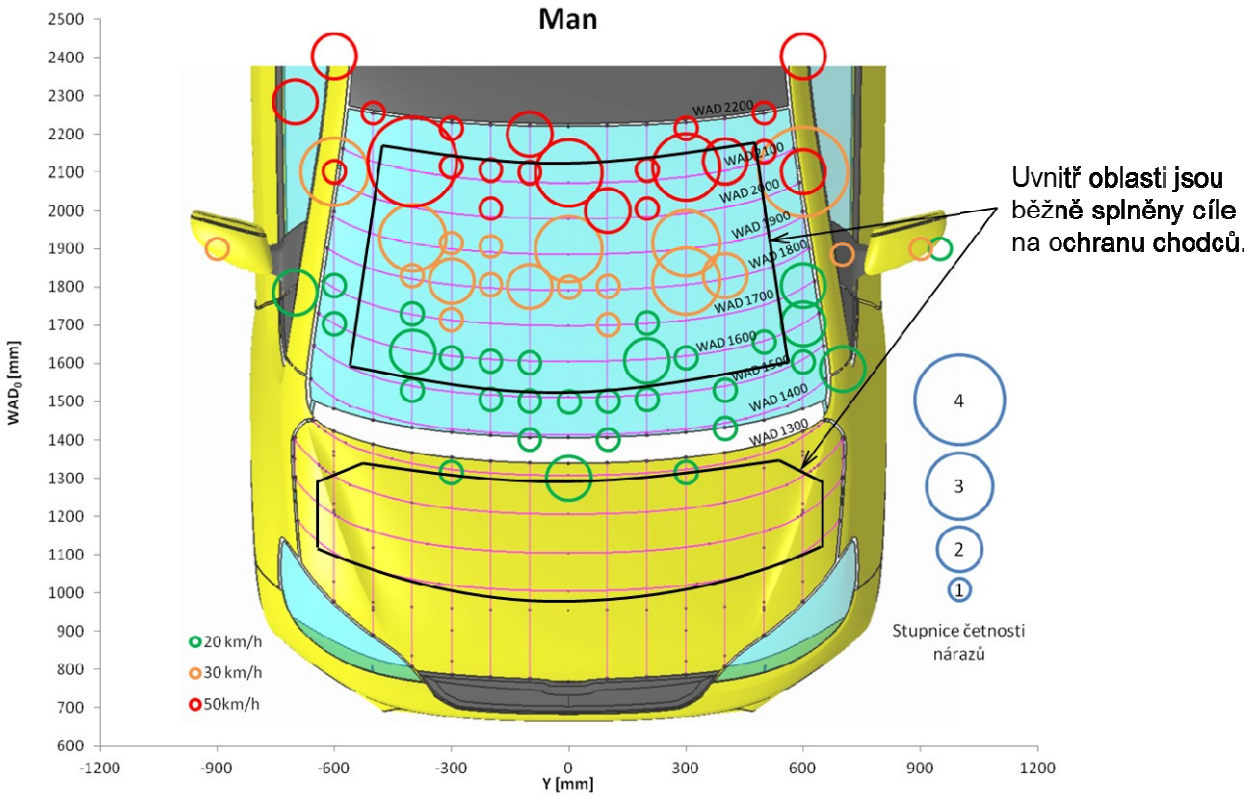
- A-sloupky karoserie. A-sloupky musí být tuhé kvůli zachování strukturální integrity karoserie při čelním nárazu. Dalším omezením jsou výhledy řidiče z vozidla. Proto nelze A-sloupky udělat deformovatelné. Jediným řešením je airbag pro chodce na čelní sklo, který A-sloupky zakryje.
- oblast lepení spodní hrany čelního skla do karoserie a oblast stěračů. Tuto oblast lze udělat deformovatelnou ve střední části, pokud se budeme přibližovat k A-sloupkům, její tuhost poroste.
- oblast kapoty nad závěsy a hrana kapoty. Obecně je tato oblast riziková a známým řešením pro zlepšení v této oblasti je aktivní kapota.

## Vyhodnocení pozice nárazu na automobil

Situační obrázek je zde:

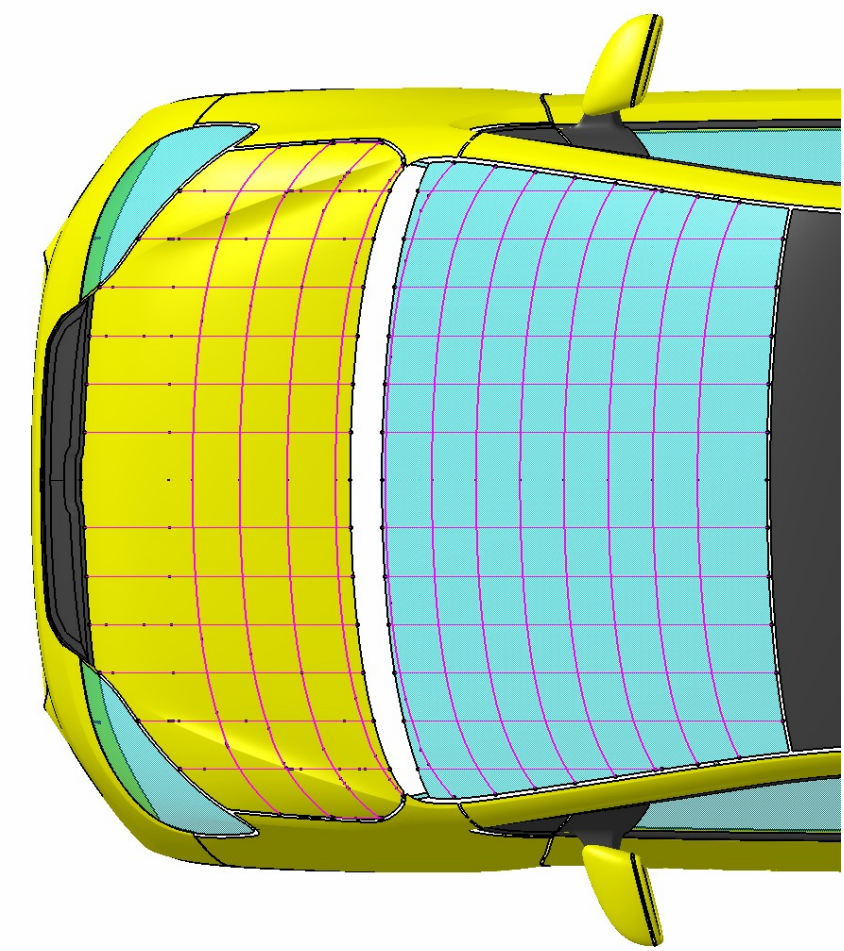



***Obr. 32 -*** *Automobil sráží chodce a je vyhodnocena pozice dopadu hlavy na karoserii* [3]




***Obr. 33 –*** *Zobrazení četností pozic dopadu* [3]

Vyhodnocení je provedeno následujícím způsobem:
Na karoserii je rastr 100 x 100 mm, který odpovídá rozměření podle EuroNCAP. Podélné linie tvoří roviny rovnoběžné se základní rovinou vozu XZ a příčné potom WAD křivky používané v metodice ochrany chodců, viz obr. 34.



***Obr. 34 -*** *Rastr na kapotě a čelním skle* [3]

Místo dopadu je vyznačeno v bodech toho rastru. Pokud je v daném místě z více dopadů, tak je kružnice zvětšena.
Zároveň je vyznačena oblast, kde jsou splněny požadavky na ochranu chodců a nebude v nich docházet k významným zraněním.

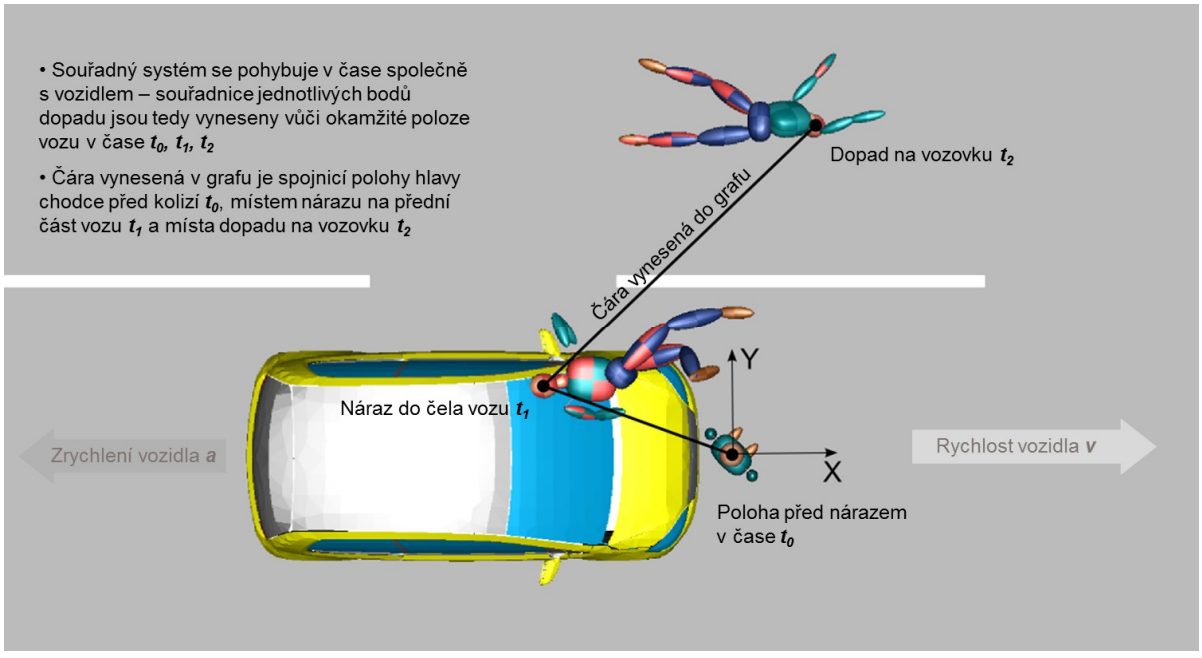
Shrnutí závěrů pro pozici nárazu hlavy na karoserii automobilu:

1. většina nárazů je v oblasti WAD 1000 až 2100, které vymezují oblast zkoušení podle EuroNCAP.
2. Pro tvar městského automobilu s nízkou hranou kapoty jsou pozice dopadu hlavy figuríny muže výrazně nad WAD 2100.
3. Pro tvar MPV dopadá hlava dítěte před hranici WAD 1000.
4. Není významný odklon od pozice sražení chodce, tj. hlava dopadá zhruba na stejné Y souřadnici, jako byl chodec sražen. To je očekávané pro 0 rychlost chodce, ale ani rychlost chodce 5 km/h nezpůsobí významný posun od místa sražení.
5. Ze simulací vyplývá, že nejúčinnější opatření pro snížení rizika poranění chodce bude v oblasti A-sloupku. Platí, že čím kratší kapota a nižší přední hrana kapoty, tím víc zásahů je do oblasti A-sloupku.

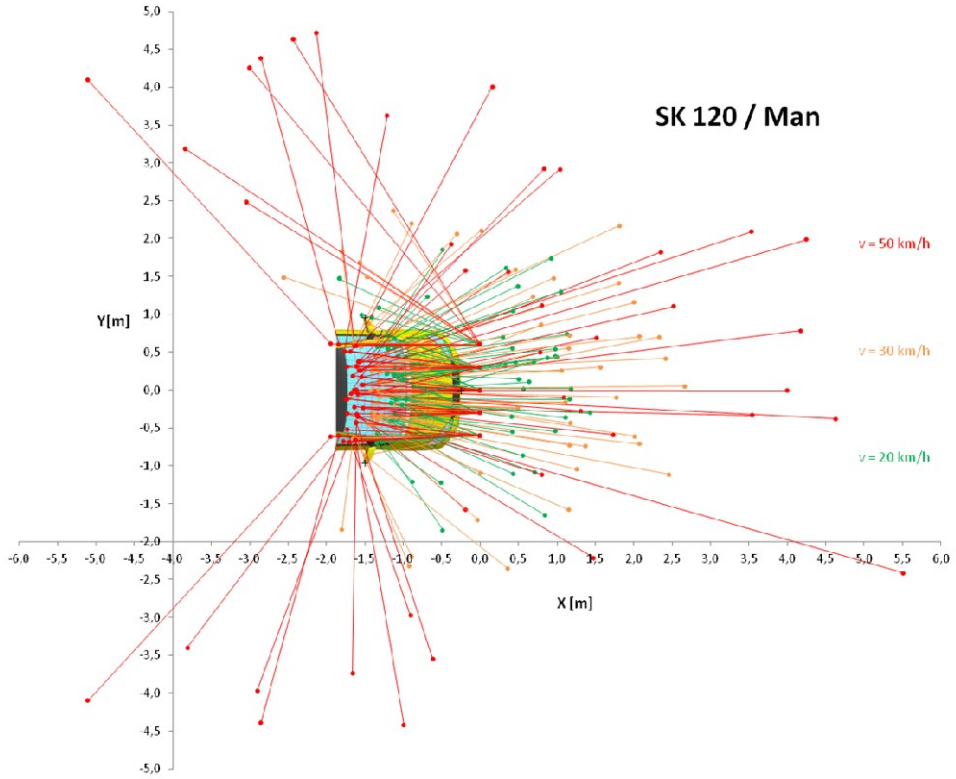
## Vyhodnocení trajektorie a pozice chodce po zastavení automobilu

Další vyhodnocení je trajektorie a pozice, kde se chodec nachází po zastavení automobilu. Toto vyhodnocení je provedeno proto, abychom měli představu, jak daleko by mělo působit opatření, které bude snižovat riziko poranění chodce.

Zde je obrázek se zobrazením způsobu vyhodnocení:




***Obr. 35 –*** *Situační obrázek* [3]




***Obr. 36 -*** *Shrnutí závěrů pro pozici chodce po nárazu na karoserii automobilu* [3]

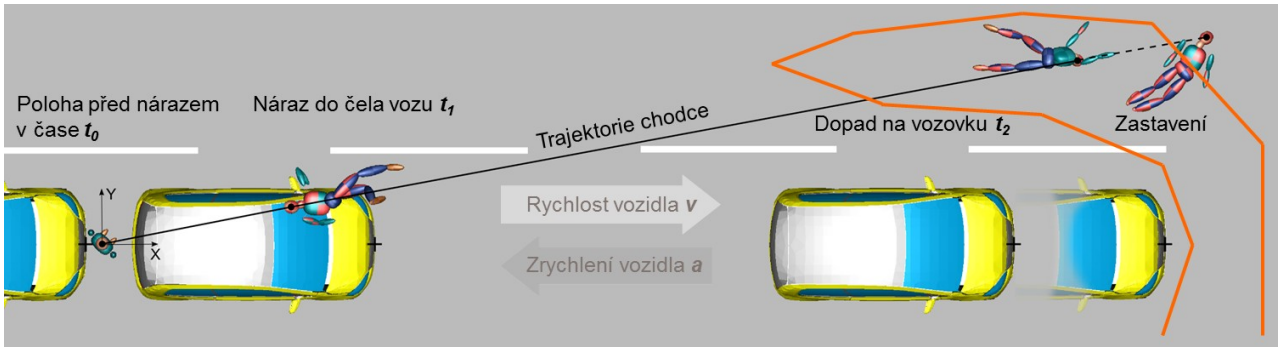
1. Nejzazší vzdálenost, kde skončí chodec po nárazu na automobil, je cca 4 m od boku vozidla. Tato hodnota je zhruba stejná pro všechny tvary karoserie. Boční vzdálenost považujeme za kritičtější než vzdálenost před autem, protože na boku se vyskytují tuhé předměty jako lampy veřejného osvětlení, stromy, zábradlí a náraz do těchto tuhých předmětů bude chodce výrazně ohrožovat na zdraví.
2. Pozice chodce po sražení před vozem je až 5 m. Tato hodnota je ovlivněna zpomalením vozu po kolizi.
3. Z daných výsledků vyplývá, že oblast, kam chodec po nehodě může dopadnout, je extrémně velká a nelze nalézt zařízení, které namontujeme na automobil, a bude snižovat riziko poranění chodce.

## Vyhodnocení trajektorie měřené od místa srážky

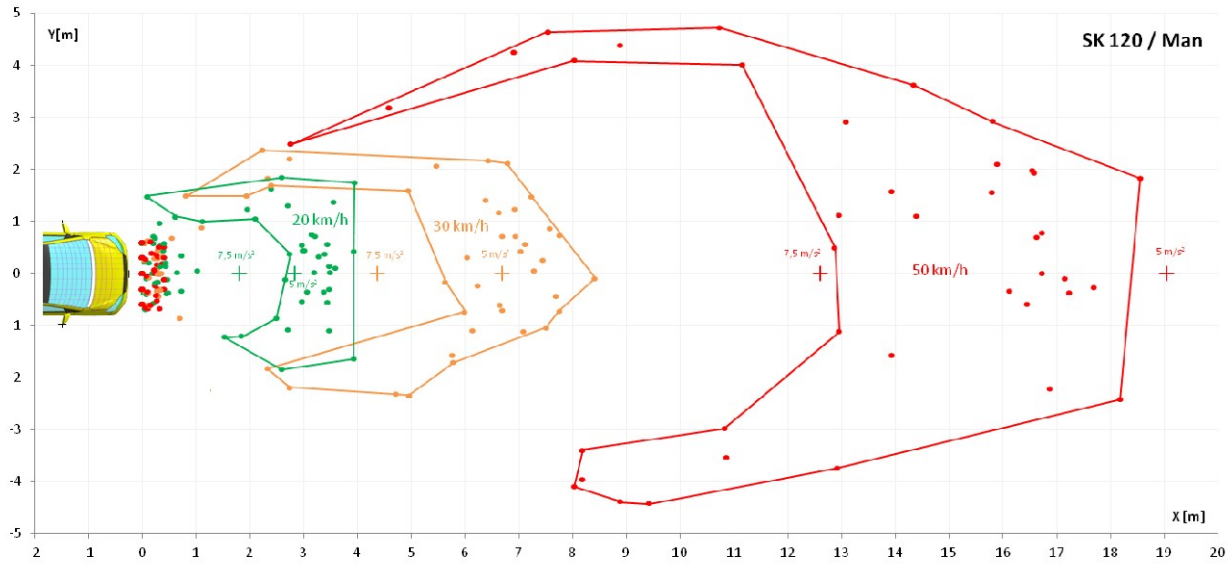
Posledním vyhodnocením je trajektorie měřená od místa srážky. Výsledky z tohoto zobrazení nejsou užitečné pro naši práci, je ale snadné je zobrazit, protože data jsou k dispozici. Tato data můžou pomoci k navržení opatření na vozovce a v jejím okolí, protože vymezují oblast, kam může dopadnout tělo chodce. V této oblasti by ideálně

neměly být žádné tuhé předměty, do kterých může chodec po srážce s automobilem narazit.

Zde je obrázek se zobrazením způsobu vyhodnocení:




***Obr. 37 –*** *Situační obrázek* [3]




***Obr. 38 -*** *Obrázek s příkladem vyhodnocení* [3]

# Závěr

## Zhodnocení provedených simulací

Jsou zmapována místa dopadu chodce na karoserii. Obecně není žádné významně častější místo, kam hlava dopadá nebo nedopadá. Proto je potřeba mít všechna místa na karoserii dostatečně poddajná. Toho nelze dosáhnout především na A-sloupcích a největší potenciál vidíme v nasazení airbagu na čelní sklo, který tato kritická místa zakryje.

Jsou zmapována místa, kam chodec po odražení od auta dopadne. Jako kritičtější považujeme pád směrem do boku vozidla, kdy při pádu může chodec narazit do tuhých předmětů, a tím se zvyšuje riziko jeho poranění. Z tohoto důvodu vidíme smysluplné věnovat se systému, který omezí pád chodce směrem do boku vozidla.

## Konstrukční návrh pro zamezení pádu chodce do strany a před vozidlo, příprava funkčního vzorku

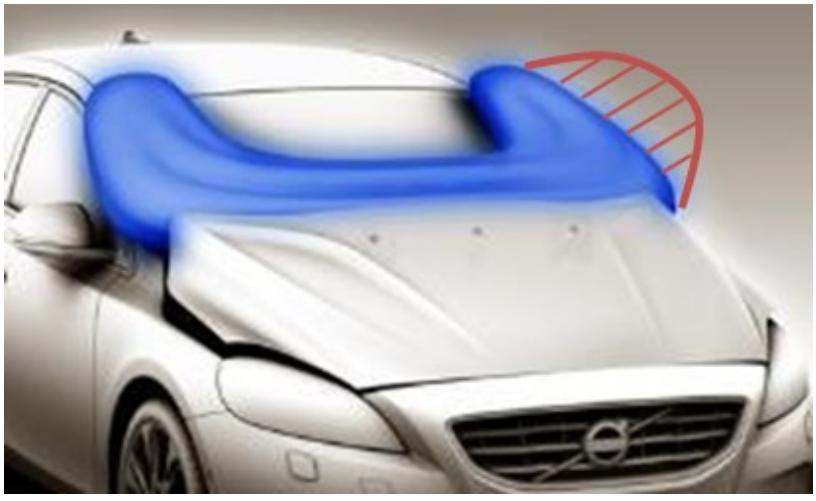
Můj návrh bude vycházet z následujícího scénáře srážky:

1. Chodec je sražen krajní částí vozidla [3]

2. Chodec dopadá na A-sloupek [3]

3. Následně je chodec odhozen do boku [3]

Můj návrh bude airbag pro chodce na čelní sklo automobilu s rozšířením na boční části tak, aby omezil rychlost odražení chodce od automobilu a jeho pád ve směru od boku vozidla.



***Obr. 39 –*** *Vlastní návrh rozšířeného airbagu* [11], [3]

## Shrnutí závěrů řešení

Jsou provedeny simulace matice případů nárazu na automobil. Na základě těchto výsledků je rozhodnuto věnovat se vývoji airbagu chodce s jeho rozšířením o funkci odebrání kinematické energie chodce po odražení od automobilu a změnu jeho trajektorie.

Dojde k vytvoření modelu airbagu pro chodce a tvar airbagu bude optimalizován na základě detailních FEM simulací.

Po nalezení vhodného tvaru airbagu pro chodce bude proveden jeho test pro ověření jeho funkce a přínosů.

# Zdroje

[1] Bezpečnost vozidel silničního provozu, materiály k předmětu, dostupné na : http://www.vutbr.cz/usi/dokumenty/dokumenty-ke-stazeni-f23776/bezpecnost-vozidel-silnicniho-provozu-materialy-k-predmetu-d75943/09-bezpecnost-chodcu-pdf-p67170

[2] POKORNÝ, Jan.: *Bezpečnost a ochrana chodců: průvodní text k prezentaci Bezpečnost a ochrana chodců,* dostupné na : http://envi.upce.cz/pisprace/ostatni/pokorny_text.pdf

[3] Vlastní zdroj, vlastní práce

[4] KERKELING, Christoph.: *Structural hood and hinge concepts for pedestrian protection*. GM Europe – Adam OPEL AG, dostupné na : http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv19/05-0304-W.pdf

[5] *European New Car assessment Programme: Test Procedures, d*ostupné na : http://www.euroncap.com/content/test_procedures/downloads.php?area_ID=3

[6] MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ MECHANICKÝCH SYSTÉMŮ VOZIDEL, diplomová práce, dostupné na : https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6493

[7] PINECKI, Christian.: *Technical solution for enhancing the pedestrian protection.* PSA Peugeot Citroen, dostupné na : http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/esv/esv20/07-0307-W.pdf

[8] *External airbag protects pedestrians, d*ostupné na : http://www.wired.com/autopia/2009/05/external-airbag-protects-pedestrians

[9] *Pedestrian protection, d*ostupné na : www.jaguar.com

[10] *Making the road safer for pedestrian, d*ostupné na : http://pedpro2011.blogspot.com

[11]Volvo car ČR, ochrana chodců, dostupné na : http://www.volvocars.com/cz

[12]Land Rover ČR, ochrana chodců, dostupné na : http://www.landrover.cz/index.html

[13] Humanetics, dostupné na : http://www.humaneticsatd.com/

[14] EuroNCAP, dostupné na : http://www.euroncap.com/en

[15] Metoda konečných prvků, slovník pojmů, dostupné na : http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=metoda_konecnych_prvku&bck=3