VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

ANALÝZA TUHOSTI PŘEDNÍ ČÁSTI VOZIDEL

STIFFNESS ANALYSIS OF FRONT PART OF THE VEHICLE

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE
Ph.D. THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. TOMÁŠ COUFAL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. ALEŠ VÉMOLA, Ph.D.
SUPERVISOR

STUDIJNÍ PROGRAM — P3917 Soudní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR — 3917V001 Soudní inženýrství

BRNO 2014

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou tuhosti přední části moderních vozidel se zaměřením pro využití v oboru Soudního inženýrství při analýze dopravních nehod. Při analýze dopravní nehody se mimo jiné řeší vlastní střet vozidel, jehož nedílnou součástí je určení energetické ztráty vozidla při nárazu, respektive deformační energie vyjádřené ve formě *EES* (Energy Equivalent Speed). V případě známé tuhosti dané části vozidla je možné na základě hloubky deformace exaktně vypočíst deformační energii, resp. *EES* odpovídající danému poškození vozidla. V oboru Soudního inženýrství však hodnoty tuhostí jednotlivých částí vozidla nejsou známé, a proto jsou pro výpočet *EES* využívány alternativní metody, jejichž přehled je uveden v rešeršní části této dizertační práce. Současné metody stanovení *EES* však disponují jistými omezeními v použitelnosti, a proto byl v rámci řešení dizertační práce navržen výpočet *EES* pro přední část vozidla zpracovaný na základě dat z reálných nárazových zkoušek s využitím reálné tuhostní charakteristiky přední části vozidla. Přední část vozidla je rozdělena do jednotlivých oblastí, kde každou z těchto oblastí charakterizuje příslušná tuhostní charakteristika. Navržený výpočet *EES* lze tedy s výhodou použít i pro střety s částečným překrytím se zohledněním reálné tuhosti poškozené části vozidla, což dosavadní metody neumožňovaly. V rámci řešení dizertační práce byl dále zpracován výpočetní program deformační energie a *EES* pracující s jednotlivými tuhostními charakteristikami v daných oblastech, jehož vstupními parametry jsou uživatelem zadaná hloubka trvalé deformace přední části vozidla v jednotlivých oblastech, hmotnost vozidla, směr nárázové síly a koeficient tření na kontaktní ploše. Vzhledem k tomu, že tuhost vozidla je také jedním z kontrolních parametrů při řešení střetu v simulačním programu PC-Crash využívaném v soudně inženýrské praxi pro analýzu nehodového dějě, byl dále zpracován doplněk výpočetního programu, který na základě výše uvedených vstupních hodnot dále vypočte údaje pro řešení střetu v simulačním programu, konkrétně tuhost, koeficient restituce a deformaci vozidla uváděnou ve výstupním protokolu simulačního programu. Na základě těchto údajů má tedy znalec možnost vyřešit střet vozidel v simulačním programu takovým způsobem, aby co možná nejpřesněji odpovídal reálnému střetu vozidel.

Abstract

The thesis deals with the front part stiffness of modern vehicles, especially for the use in the field of forensic engineering in the traffic accident analysis. During the traffic accident analysis, an inquiry into the collision between vehicles is carried out which is an integral part of determining the energy loss of the vehicle at the impact, or more precisely the deformation energy expressed in the form of Energy Equivalent Speed (*EES*). In case of known stiffness of given part of the vehicle and based on the depth of deformation, it is possible to calculate the deformation energy, or more precisely *EES* corresponding with given damage of the vehicle. In the field of forensic engineering, the values of stiffness of individual vehicle components are not known and therefore, alternative methods are used to calculate the *EES*, they are outlined in the research part of this dissertation. However, the current methods of *EES* determination have some limitations when it comes to usability, and therefore, new *EES* calculation for the front part of the vehicle was designed in the research. It was based on the real crash test results using real stiffness characteristics of the front part of a vehicle. The front part of the vehicle is divided into individual areas and each of these parts is characterised by its own stiffness coefficient. The designed *EES* calculation can thus be also used for collisions with partial overlapping, taking into account the real stiffness of the damaged part of the vehicle, which was not possible with existing methods. In the research part of this dissertation, a computer programme to calculate deformation energy and *EES* was processed. It works with individual stiffness characteristics in given areas where the input data are entered by the user and include the depth of permanent front part deformation in

individual areas, vehicle weight, the direction of an impact force and the friction coefficient on the contact surface. Considering the fact that the vehicle stiffness is also one of the control parameters at solving collisions in the PC-Crash simulation programme, which is used in forensic engineering practice for the analysis of a collision process, a supplementary computer programme was designed. Based on the above-mentioned input data, the supplementary programme can further calculate data for collision solving in the simulation programme, namely stiffness, restitution coefficient and the vehicle damage stated in the output report of the simulation programme. Based on these data, the expert thus has the opportunity to solve the collision of two vehicles in the simulation programme with as much preciseness as if it was a real collision.

Klíčová slova

Vozidlo, tuhost, střet, *EES*, *EBS*

Key words

Vehicle, stiffness, crash, *EES*, *EBS*

Místo uložení práce

Knihovna Ústavu soudního inženýrství VUT v Brně

Bibliografická citace

COUFAL, T. Analýza *tuhosti přední části vozidel.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2014. 119 s, 32 s příloh. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.

Obsah

1 Úvod 5
1.1 Vymezení problémové situace 5
2 Současný stav řešené problematiky 6
2.1 Vymezení problémů 8
2.2 Vymezení cílů práce 8
3 Návrh metody pro experimentální stanovení tuhosti přední části vozidla 10
3.1 Vymezení vhodných nárazových zkoušek 10
3.2 Způsob vyhodnocení experimentálně naměřených dat z nárazových zkoušek 11
3.2.1 Zpracování záznamu z akcelerometru 11
3.2.2 Zpracování záznamu ze snímačů síly umístěných v bariéře 11
3.2.3 Vyhodnocení tuhostní charakteristiky přední části vozidla 12
3.3 Porovnání experimentálně zjištěné tuhosti s výsledky modelování tuhosti dosavadními metodami využitelnými v oboru Soudního inženýrství 13
4 Návrh výpočtového modelu pro stanovení deformační energie s využitím experimentálně stanovené tuhosti 14
4.1 Výpočet deformační energie, *EES* 14
5 Porovnání výpočtu *EBS*, *EES* jednotlivých metod 18
6 Návrh výpočtového modelu pro stanovení deformační energie s využitím experimentálně stanovené tuhosti v jednotlivých oblastech přední části vozidla 19
6.1 Rozdělení přední části vozidla 19
6.2 Vyhodnocení deformační energie pro jednotlivé zóny přední části vozidla 20
6.3 Příklad použití navrženého výpočtového modelu ve znalecké praxi 23
7 Vymezení parametru tuhosti vozidla v programu PC-Crash a návrh výpočtového modelu pro jeho kvantifikaci 25
7.1 Návrh výpočtového modelu parametrů střetu sloužicího pro odlazení střetu v simulačním programu PC-Crash 26
7.1.1 Příklad využití výpočetního programu *EES* a jeho doplňku pro stanovení parametrů střetu 28
8 Kvantifikace tuhosti přední části moderních vozidel 30
9 Závěr 31
Seznam použitých zdrojů 34

1 Úvod

Zvolené téma dizertační práce se zabývá problematikou, která spadá do speciálních metodik soudního inženýrství, a to do analýzy dopravních nehod. Problematika předmětné dizertační práce úzce souvisí se znaleckou činností zabývající se základním oborem doprava, odvětvím doprava silniční a městská se specializací zabývající se technickými posudky o příčinách dopravních nehod. Zaměření předmětné dizertační práce také souvisí i s dalšími technickými obory, např. automobilním a dopravním inženýrstvím, popřípadě jinými obory zabývajícími bezpečností, konstrukcí a deformačním chováním karoserií vozidel.

1.1 Vymezení problémové situace

V rámci technických posudků o příčinách dopravních nehod se ve většině případů provádí komplexní analýza nehodového děje, jehož nedílnou součástí je mimo jiné řešení vlastního střetu vozidel. I přesto, že v současné době znalci při analýze nehodového děje využívají sofistikované simulační programy, kterými jsou zejména PC-Crash a Virtual Crash, je korektnost výsledků značně závislá na uživatelem zadaných vstupních parametrech, které se musí pohybovat v technicky přijatelném rozmezí. Při řešení vlastního střetu vozidel je jedním z důležitých parametrů určení deformační energie pohlcené deformačními zónami vozidla při nárazu do překážky. Na jejím množství závisí celkový pohyb vozidla během nehodového děje, zejména pak výpočet rychlosti jízdy vozidla těsně před střetem. Ve znalecké praxi je jediným vodítkem k určení deformační energie rozsah poškození vozidla, resp. hloubka deformace jeho příslušných částí. K exaktnímu určení deformační energie z rozsahu poškození je nutná znalost tuhosti příslušné zdeformované části vozidla. Tuhost vozidla je také důležitým parametrem pro ověření správnosti, uživatelem zadávaných vstupních údajů při analýze nehodového děje s pomocí simulačního programu PC-Crash, který je hojně využíván ve znalecké činnosti. Výstupem z tohoto simulačního programu je mimo jiné protokol obsahující hodnotu tuhosti předmětných vozidel, která je závislá na uživatelem zadaných vstupních parametrech (zejména na poloze bodu rázu, respektive hloubce deformace vozidla a předstřetové rychlosti vozidla). Na základě známé tuhosti příslušné části vozidla by mohl znalec upravit vstupní parametry simulačního programu tak, aby výsledná tuhost vozidel v jeho výstupním protokolu byla v souladu s reálnou tuhostí daného vozidla. V současné době však nejsou hodnoty tuhostí příslušných částí vozidel znalcům dostupné. Detailně zpracované tuhostní charakteristiky vozidel mají možnost získat díky moderním výpočetním programům využívajících metodu konečných prvků pouze výrobci automobilů. Jedná se však o data, která jsou jednotlivými výrobci automobilů kvůli konkurenčnímu boji přísně utajená, protože bezpečnost vozidla je v současnosti pro zákazníka jedním ze zásadních parametrů při výběru vozidla. Vzhledem k obtížnosti získání detailních tuhostních charakteristik vozidel přímo od výrobců je nezbytné pro jejich získání volit alternativní metody. Jednou z možností je získání příslušné tuhostní charakteristiky analýzou experimentálně naměřených dat z nárazových zkoušek, která je cílem předmětné dizertační práce zabývající se analýzou tuhosti přední části moderních vozidel.

Ve znalecké praxi se k určení deformační energie vozidla při nárazu nejčastěji užívá odborný odhad energetické ekvivalentní rychlosti - *EES*, která vyjadřuje kinetickou energii vozidla úměrnou deformační energii, jež je potřebná k dosažení příslušného stupně deformace. V předmětné dizertační práci tedy bude řešena tuhost přední části moderních vozidel v návaznosti na možnost určení deformační energie, respektive *EES*.

2 Současný stav řešené problematiky

V současné době existuje v oboru Soudního inženýrství několik metod pro stanovení množství deformační energie, resp. *EES*, *EBS* vozidla z rozsahu jeho poškození. Z hlediska využití tuhosti vozidla ve výpočtovém modelu lze tyto metody rozdělit do dvou základních skupin.

1) Metody pro stanovení *EES*, *EBS* založené na výpočtovém modelu pracujícím s tuhostí vozidla, mezi které lze zařadit:
   A) program CRASH 3,
   B) program Energy Loss Calculator.
2) Metody pro stanovení *EES*, *EBS* založené na výpočtovém modelu, který nepracuje s tuhostí vozidla, mezi které lze zařadit:
   A) metoda korelačního diagramu založená na výzkumu Morelanda,
   B) metoda energetického rastru založená na výzkumu Röhricha a Schapera,
   C) metoda energetického rastru navržená Burgem a Rau,
   D) komparační metoda.

Metodami využitelnými ve znalecké praxi, které spadají do první z výše uvedených skupin, je výpočet deformační energie, resp. *EES, EBS* s pomocí programu CRASH 3 a Energy Loss Calculator.

Korektnost výpočtu deformační energie s využitím programu CRASH 3, resp. Energy Loss Calculator je limitována tím, že závislost síly na hloubce deformace, z níž výpočet deformační energie vychází, je odvozena z lineárního předpokladu závislosti nárazové rychlosti na hloubce deformace a tudíž není zohledněn skutečný průběh deformační síly během střetu. Dalším limitujícím faktorem je skutečnost, že výpočtový model programu nezohledňuje proměnlivou tuhost vozidla v jednotlivých částech. Lze totiž předpokládat, že tuhost přídě vozidla bude rozdílná v příčném směru na krajích a ve středu, ve svislém směru pak v dolní, střední a horní části. Ve výpočtovém modelu programu je však počítáno s jediným parametrem tuhosti *B* charakterizujícím jakoukoliv část přídě vozidla, což může, zejména při poškození vozidla vlivem střetu s částečným překrytím, vést k nesprávným výsledkům množství deformační energie, resp. *EES*, *EBS*.

Mezi metody užívané pro výpočet deformační energie, resp. *EES, EBS* využívané ve znalecké praxi, které spadají do druhé z výše uvedených skupin, patří metoda korelačního diagramu, metoda energetického rastru a komparační metoda.

Metoda korelačního diagramu umožňující stanovení *EBS* vozidla vychází zejména ze subjektivního posouzení rozsahu poškození vozidla, které se odvíjí od zkušeností konkrétního znalce. Na základě tohoto posouzení poté znalec vypočte koeficient deformace vozidla, s jehož pomocí odečte v korelačním diagramu hodnotu *EBS*. Problémem je, že klasifikace poškození vozidla, z níž koeficient deformace vychází, se dělí pouze na poškození lehká, střední a těžká s tím, že není definováno, jaký rozsah poškození dané klasifikaci poškození odpovídá. Výpočet *EBS* s pomocí této metody dává výsledky v širokém rozmezí, což může vést k nesprávnému řešení výsledné analýzy nehodového děje. Další problém souvisí s tím, že vzhledem k období, ze kterého diagram pochází (50. léta 20. století), se struktura vozidel výrazně změnila a pro současná vozidla je nepoužitelný.

Metoda energetického rastru založená na výzkumu Röhricha a Schapera na rozdíl od ostatních metod vychází z experimentálního měření síly během střetu a uvažuje rozdílnou tuhost jednotlivých částí přídě vozidla. Pro odvození energetického rastru bylo vozidlem naráženo s různým překrytím do překážky a měřeno zpomalení během nárazu – tím byla získána závislost síly na deformaci konkrétní části vozidla, na základě čehož byly příslušné části rozděleny z hlediska procentuálního přerozdělení deformační energie. Výsledky pak byly zpracovány do grafického rozdělení přední části vozidla s odpovídajícími energetickými obsahy - energetické rastry. Vzhledem k tomu, že výzkum byl prováděn v 80. letech

20. století pouze pro určitý typ vozidla a vzhledem k neustálemu vývoji konstrukčních prvků vozidel za účelem zvyšování bezpečnosti posádky, nelze tato data považovat v současné době za aktuální. Ekonomická náročnost této metody je navíc značná, protože je zapotřebí provést nárazové zkoušky daného typu vozidla v několika střetových konfiguracích – pro zjištění deformačního chování jednotlivých částí je tedy nutné „rozbít“ hned několik vozidel jednoho typu.

Metoda energetického rastru, kterou navrhl Burg a Rau, publikovaná v Handbuch der Verkehrsunfall-Rekonstruktion [6] a v Soudním inženýrství [3], vychází z dat z čelní nárazové zkoušky do tuhé bariéry. Její výpočtový model je založen na lineárním proložení známé střetové rychlosti, při ní vzniklé hloubce deformace a předpokládané rychlosti, při níž nedochází k trvalým deformacím vozidla. Z této lineární závislosti střetové rychlosti na hloubce deformace je vypočten energetický rastr přední části vozidla, který uvažuje s rozdílnou tuhostí napříč přední části vozidla, což je zohledněno proměnlivým přerozdělením množství deformační energie napříč přídě vozidla. Vzhledem k tomu, že výpočtový model této metody pracuje s lineární závislostí střetové rychlosti na hloubce deformace, nemusí vypočtené množství deformační energie pro různé hloubky deformací odpovídat skutečnému množství energie, která byla během střetu přeměněna na deformaci vozidla. Další problém souvisí s tím, že dostupná schémata pro přerozdělení deformační energie napříč přídě vozidla, které zohledňují rozdílnou tuhost jednotlivých struktur přídě vozidla, jsou pro moderní vozidla značně zastaralá a nemusí odpovídat současným vozidlům. Vzhledem k tomu, že metoda vychází pouze ze střetové rychlosti vozidla se zanedbáním restituční fáze, umožňuje tato metoda pouze stanovení *EBS*.

Komparační metoda slouží ke stanovení *EES* vozidla na základě porovnání poškození vozidla, u kterého je *EES* neznámé s poškozením druhého vozidla stejného nebo srovnatelného typu se známou hodnotou *EES*. Vychází ze subjektivního posouzení rozsahu poškození vozidel, které se odvíjí od zkušeností konkrétního znalce. Pro účely této metody slouží *EES* katalogy, jejichž problémem je omezená databáze vozidel, která je často zastaralá a neobsahuje současná vozidla.

Pro stanovení tuhosti přední části vozidla lze využít dvou metod, kterými jsou:

1) stanovení počáteční tuhosti dle NHTSA (Initial Stiffness),
2) stanovení tuhosti z programu CRASH 3.

Metoda pro stanovení počáteční tuhosti byla společností NHTSA zavedena pro možnost hodnocení závažnosti střetu mezi vozidly rozdílných velikostí s důrazem na hodnocení úrovně ochrany posádky. Výhodou je, že výpočtový model této metody vychází ze skutečné síly experimentálně naměřené během střetu. Problémem však je, že pro soudně inženýrskou praxi nejsou hodnoty počáteční tuhosti vozidel běžně dostupné. S danou metodou se lze setkat zejména ve vědeckých článcích zabývajících se nárazovými zkouškami vozidel, ve kterých se hodnotí zejména závažnost střetu v návaznosti na poranění posádky vozidla, nikoliv však možnost použití pro potřeby v oboru Soudního inženýrství. Další problém souvisí s tím, že se jedná pouze o počáteční tuhost vozidla, která je stanovena pouze do určité hloubky deformace a její hodnota nemusí charakterizovat skutečnou závislost nárazové síly na hloubce deformace, což při jejím využití v soudně inženýrské praxi může vést ke špatným výsledkům řešení analýzy nehodového děje.

Tuhost vozidla lze dále vypočíst z programu CRASH 3. Problémem je, že postup pro zjištění tuhosti z programu CRASH 3 není v kurzech specializačního studia technického znalectví analýzy silničních nehod standardně vyučován a bez vlastního samostudia dané problematiky není tato metoda znalcům běžně dostupná. Další problém souvisí s tím, že tuhost získaná z programu Crash 3 není stanovena z experimentálně naměřené nárazové síly, tudíž její hodnota nemusí odpovídat skutečné tuhosti vozidla.

2.1 Vymezení problémů

1) První problém souvisí s určením deformační energie, resp. *EES*, *EBS* vozidla z úrovně jeho poškození, jež je nedílnou součástí řešení každého střetu. Pro tyto účely lze ve znalecké praxi v současnosti využít následující metody, kterými jsou:

- komparační metoda,
- metoda korelačního diagramu,
- metoda energetického rastru,
- výpočet *EES* dle programu PC-Crash využívající výpočtový model programu Crash 3,
- výpočet pomocí programu Energy Loss Calculator využívající upravený výpočtový model programu Crash 3.

Problémem je, že při aplikaci výše uvedených metod může být stanoveno množství deformační energie, resp. *EES*, *EBS* v poměrně širokém rozmezí, které ne vždy odpovídá skutečnému množství deformační energie pohlcené deformačními zónami vozidla při nárazu. Na určení množství deformační energie však významnou měrou závisí korektnost řešení vlastního střetu vozidla a tím i celkové analýzy nehodového děje, na jejímž základě mohou orgány činné v trestním řízení rozhodnout o míře zavinění dopravní nehody jednotlivými účastníky.

2) Druhý problém souvisí s kvantifikací tuhosti jednotlivých tříd vozidel. Při řešení střetu v simulačním programu PC-Crash pracují jeho výpočetní modely zejména s polohou bodu rázu, hloubkou deformace, která je dána překrytím vozidel a polohou bodu rázu, parametrem *EES*, koeficientem restituce, hmotností a předstřetovou rychlostí. Jedním z kontrolních parametrů určujicím korektnost řešení střetu, která je závislá na variaci těchto vstupních veličin, je parametr tuhosti uvedený v jeho výstupním protokolu. V současné době však problém tkví v kvantifikaci tuhosti jednotlivých tříd moderních vozidel, neboť tyto hodnoty tuhosti nejsou znalcům běžně dostupné. Z analýzy současného stavu řešené problematiky vyplynulo, že existují dvě metody pro stanovení tuhosti vozidla, které by mohly být ve znalecké praxi využitelné. Jedná se o metodu pro stanovení počáteční tuhosti dle NHTSA a o metodu stanovení tuhosti z programu CRASH 3. Z analýzy současného stavu poznání však vyplynulo, že hodnota tuhosti vozidla zjištěná pomocí těchto metod nemusí vždy odpovídat reálné tuhosti vozidla a jejich použití ve znalecké praxi může vést k nesprávným výsledkům při řešení analýzy nehodového děje. Tento problém navíc nabírá na závažnosti tím, že parametr tuhosti uváděný ve výstupním protokolu PC-Crash není v dostupné literatuře pro znaleckou praxi vymezen, a proto není zcela zřejmé, zda lze jeho hodnotu porovnávat s tuhostí stanovenou pomocí výše uvedených metod.

2.2 Vymezení cílů práce

Z výše uvedené formulace problémů lze definovat dílčí cíle práce vedoucí ke zlepšení současné situace v oblasti řešené problematiky.

1) Navrhněte metodu experimentálního stanovení tuhosti přední části vozidla.

2) Experimentálně zjištěné výsledky tuhosti porovnejte s výsledky modelování tuhosti dle doposud využívaných metod v oboru Soudního inženýrství a posuďte možnosti jejich využití v soudně inženýrské praxi.

3) Upravte, případně navrhněte výpočtový model pro stanovení deformační energie vozidla, resp. *EES* z úrovně jeho poškození na základě experimentálně stanovené tuhosti vozidla.

4) Porovnejte upravený, případně navržený model pro stanovení deformační energie vozidla, resp. *EES* s doposud využívanými metodami v oboru Soudního inženýrství a posuďte možnosti využití jednotlivých metod v soudně inženýrské praxi.

5) Vymezte parametr tuhosti uváděný ve výstupním protokolu simulačního programu PC–Crash a navrhněte metodu pro jeho kvantifikaci.

6) Kvantifikujte parametr tuhosti uváděný ve výstupním protokolu simulačního programu PC-Crash pro přední část moderních vozidel.

3 Návrh metody pro experimentální stanovení tuhosti přední části vozidla

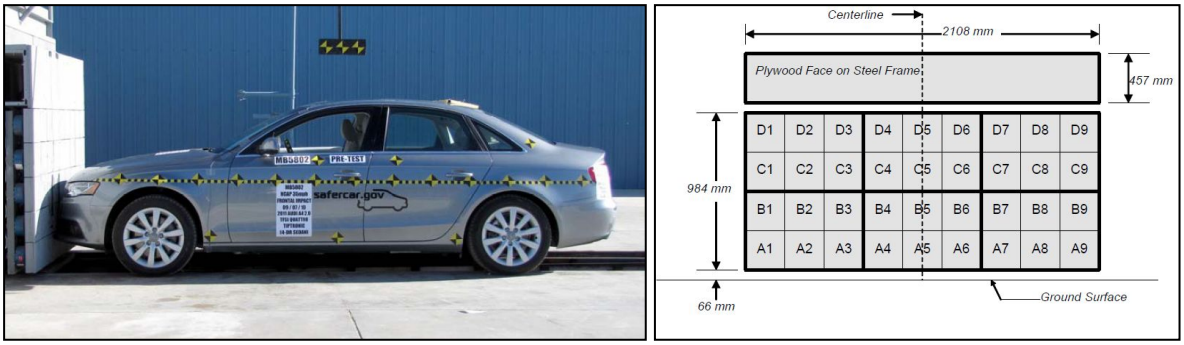
Řešení dizertační práce je založeno na analýze experimentálně naměřených dat při nárazových zkouškách. Z důvodu vysokých finančních nároků na nárazové zkoušky moderních vozidel nebyl proveden experiment vlastní, ale byla využita experimentálně naměřená data z nárazových zkoušek prováděných americkou společností NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration). Vzhledem ke skutečnosti, že americký trh vozidel je na rozdíl od evropského tvořen z velké části odlišnými modely, byl nejprve proveden průzkum databáze nárazových zkoušek a následně vybrána pouze taková vozidla, která jsou shodná s evropskými modely z důvodu aplikovatelnosti výzkumu v České Republice, resp. v Evropě. Snahou autora bylo zajistit data i od evropských společností provádějících nárazové zkoušky vozidel, např. Škoda Auto, Volkswagen a EuroNCAP. Těmito společnostmi však nebyla data autorovi zpřístupněna.

3.1 Vymezení vhodných nárazových zkoušek

Pro vyhodnocení tuhostní charakteristiky přední části vozidla jsou využitelné čelní nárazové zkoušky prováděné americkou společností NHTSA [28]. NHTSA se zabývá bezpečností silničního provozu, která mimo jiné provádí i nárazové zkoušky motorových vozidel za účelem zjištění úrovně pasivní ochrany posádky uvnitř vozidla při nárazu. Na základě dat získaných při nárazových zkouškách pak společnost NHTSA ověřuje a hodnotí bezpečnost silničních vozidel. Naměřená data lze však s výhodou využít i pro obor soudního inženýrství tak, že se použijí data z nárazových testů, která primárně slouží k jiným účelům a vhodným způsobem se analyzují tak, aby byla přínosná pro oblast analýzy dopravních nehod. V předmětné dizertační práci budou analyzována data z nárazových testů za účelem získání tuhostních charakteristik moderních vozidel a jejich tuhostních koeficientů.

Čelní nárazová zkouška společností NHTSA se provádí dle NCAP (New Car Assessment Program), standardně při nárazové rychlosti 56 km/h (35 mph) tak, že vozidlo narazí celou přední částí do tuhé bariéry osazené senzory síly. Nárazová zkouška je spolu se signály ze senzorů zaznamenávána současně šestnácti kamerami v jednotném čase. Ve vozidle je rozmístěno osm senzorů přetížení. Uvnitř vozidla jsou standardně umístěny dvě testovací figuríny představující dospělé osoby řidiče a spolujezdce (Hybrid III), kdy každá z nich je osazena čtyřiceti senzory. Dalších osm senzorů je umístěno na bezpečnostních pásech.

Pro čelní nárazovou zkoušku jsou využívány 3 typy tuhých bariér, které se od sebe navzájem liší rozmístěním a počtem senzorů síly.



Obr. 1 Čelní nárazová zkouška dle NCAP – 1. typ bariéry [28]

3.2 Způsob vyhodnocení experimentálně naměřených dat z nárazových zkoušek

Způsob vyhodnocení experimentálně naměřených dat z nárazových zkoušek pro potřeby této dizertační práce je demonstrován na čelní nárazové zkoušce vozidla Audi A4, modelového roku 2011. Níže zpracovávaná data jsou čerpána z NHTSA [28].

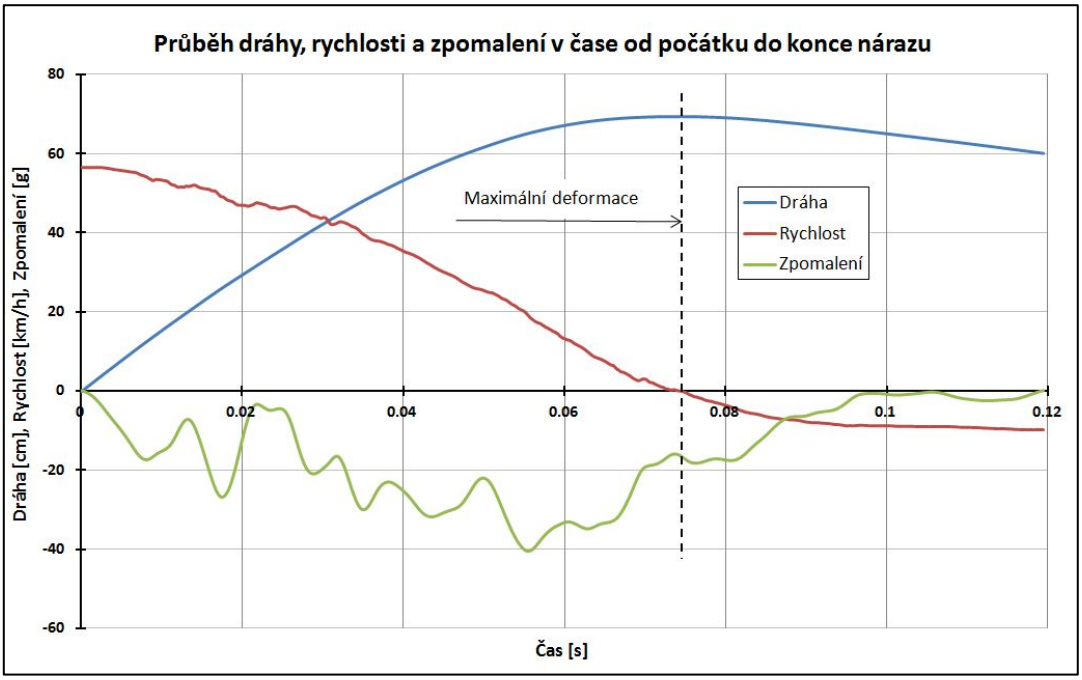
3.2.1 Zpracování záznamu z akcelerometru

Integrací zrychlení podle času (vztah (1)) byl vypočten průběh rychlosti v čase. Druhou integrací zrychlení podle času (vztah (2)) byl vypočten průběh dráhy v čase.

$$\vec{v}(t) = \int_{t_1}^{t_2} \vec{a}(t)dt \qquad [\mathrm{m/s}] \qquad (1)$$

$$s(t) = \int_{t_1}^{t_2}\int_{t_1}^{t_2} \vec{a}(t)dtdt \qquad [\mathrm{m}] \qquad (2)$$

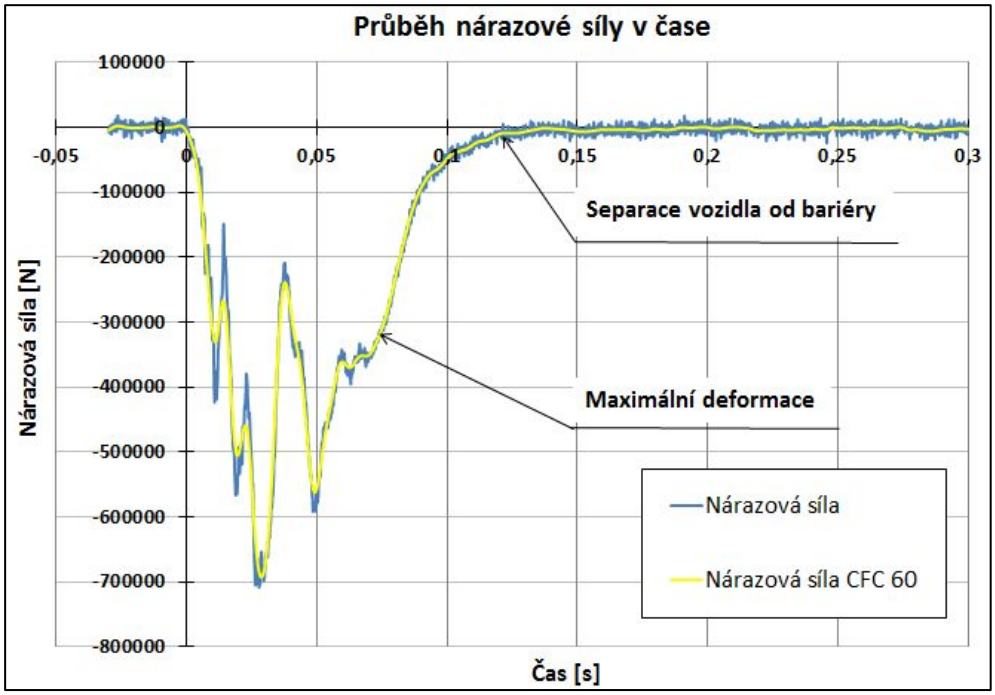
Kde: $t_2 - t_1$ [s] perioda, s jakou je měřeno zpomalení,
$\boldsymbol{a}(t)$ [m/s^2] aktuální hodnota zpomalení v čase t.



Obr. 2 Dráha rychlost a zpomalení během čelního nárazu

3.2.2 Zpracování záznamu ze snímačů síly umístěných v bariéře

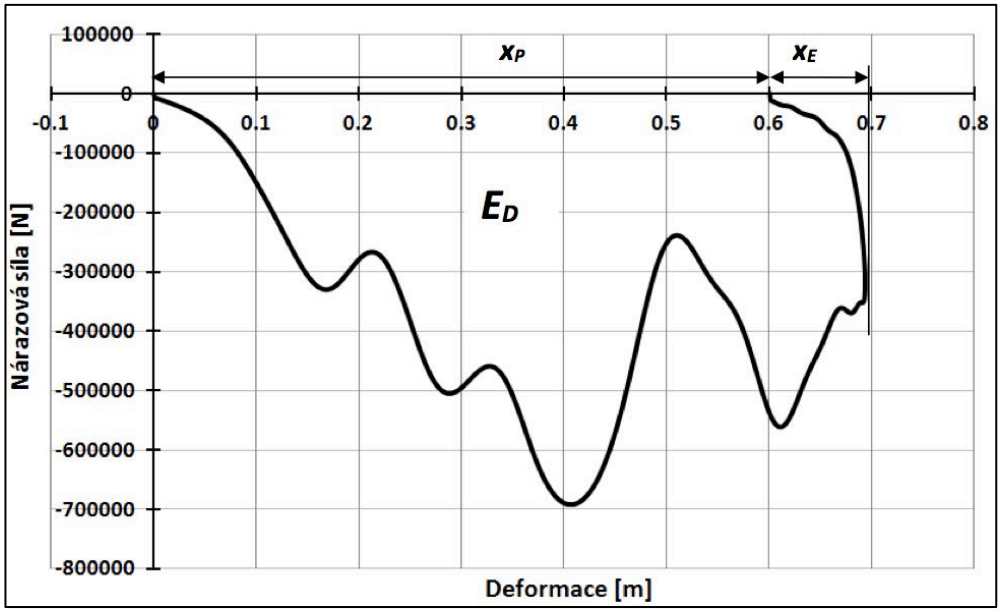
Záznam byl zpracován z jednotlivých snímačů síly umístěných v bariéře, ze kterých je vyhodnocena celková síla působící na vozidlo během nárazu.



Obr. 3 Průběh nárazové síly během čelního nárazu

3.2.3 Vyhodnocení tuhostní charakteristiky přední části vozidla

Na obr. 4 je vyhodnocena závislost nárazové síly na deformaci vozidla, což je, ve své podstatě, tuhostní charakteristika přední části vozidla. Deformace vozidla je vyhodnocena ze záznamu akcelerometru, tj. dvojitou integrací zpomalení, viz vztah (2). Na obr. 4 je zakótována velikost plastické deformace x_P a velikost elastické deformace x_E. Obsah plochy nad křivkou vyjadřuje deformační energii.



Obr. 4 Tuhostní charakteristika přední části vozidla Audi A4

3.3 Porovnání experimentálně zjištěné tuhosti s výsledky modelování tuhosti dosavadními metodami využitelnými v oboru Soudního inženýrství

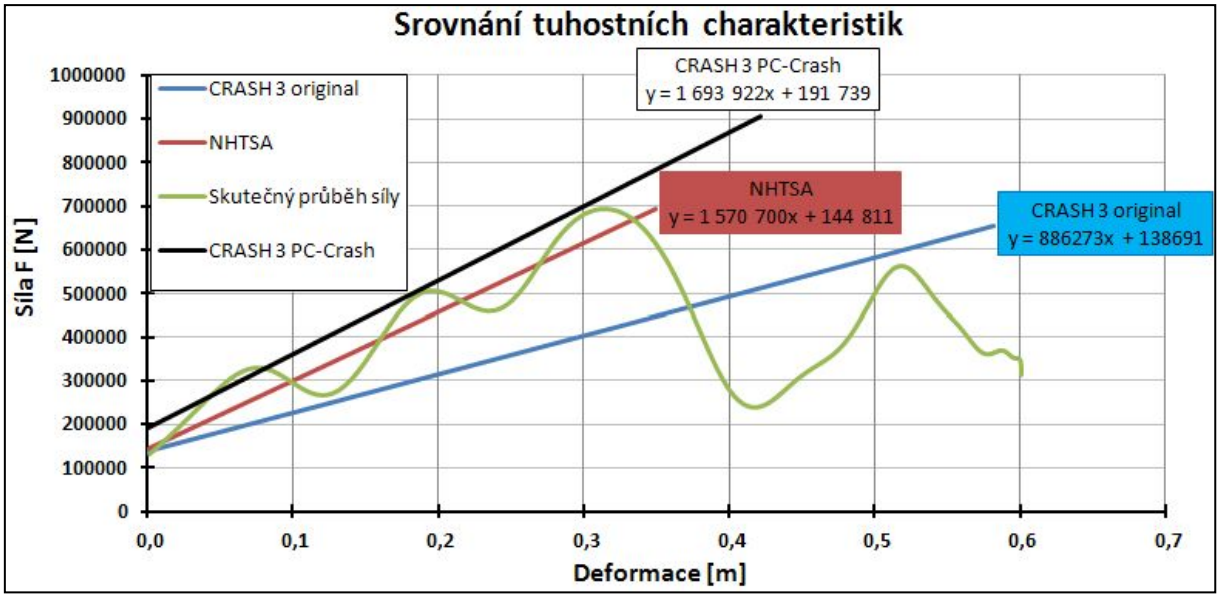
V oboru Soudního inženýrství lze pro stanovení tuhosti přední části vozidla využít dvou metod, kterými jsou:

1) stanovení tuhosti z programu CRASH 3,
2) stanovení počáteční tuhosti dle NHTSA (Initial Stiffness).

Na obr. 5 jsou porovnány tuhostní charakteristiky vozidla Audi A4 2011 jednotlivých metod, jejichž tuhostní koeficienty jsou shrnuty v tab. 1. Je zřejmé, že tuhost, která je s pomocí jednotlivých metod vypočtena, je v poměrně širokém rozmezí. Z průběhu tuhostní charakteristiky jednotlivých metod je dále zřejmé, že lineární nahrazení tuhostní charakteristiky není vzhledem k proměnnému průběhu skutečné tuhostní charakteristiky v žádném z případů dostačující přes celou hloubku deformace, čímž je jejich využitelnost ve znalecké praxi značně limitována. Pro řešení problematiky této dizertační práce je tedy z důvodu co možná nevyšší přesnosti výsledků nezbytné pracovat s reálnou tuhostní charakteristikou, která je dána skutečným, experimentálně naměřeným průběhem síly v závislosti na hloubce deformace.

Tab. 1 – Stanovení tuhosti dle jednotlivých metod

Metoda pro stanovení tuhosti	**CRASH 3** Original	**CRASH 3** PC-Crash	**NHTSA**
Tuhost k [kN/m]	886,3	1 693,9	1 570,7
V intervalu hloubky deformace [m]	0 až 0,581	0 až 0,420	0 až 0,348



Obr. 5 Srovnání tuhostních charakteristik na vozidle Audi A4 2011

4 Návrh výpočtového modelu pro stanovení deformační energie s využitím experimentálně stanovené tuhosti

Z důvodu možnosti využití řešené problematiky v soudně inženýrské praxi byl navržen výpočtový model pro stanovení deformační energie, resp. *EES*, který vychází z experimentálně naměřených dat z nárazové zkoušky, resp. z experimentálně stanovené tuhostní charakteristiky.

4.1 Výpočet deformační energie, *EES*

Výpočet je sestaven pro vozidlo Audi A4 2011 s pomocí experimentálně stanovené tuhostní charakteristiky vozidla, která je modifikována tak, aby ji bylo možné využít k výpočtu deformační energie, viz obr. 6. Původní tuhostní charakteristika je tedy posunuta směrem vlevo o vzdálenost, které odpovídá množství elastické části deformační energie E_{DE}, respektive o velikost elastické deformace x_E, protože o tuto velikost se po ukončení nárazu vrátí přední část vozidla zpět. Po ukončení střetu zůstane tedy přední část vozidla zdeformována o velikost plastické deformace x_P. Z velikosti deformace vozidla lze potom vypočítat deformační energii.

$$E_D = \int_0^{x_P} \vec{F} \cdot dx \qquad [\mathrm{J}] \qquad (3)$$

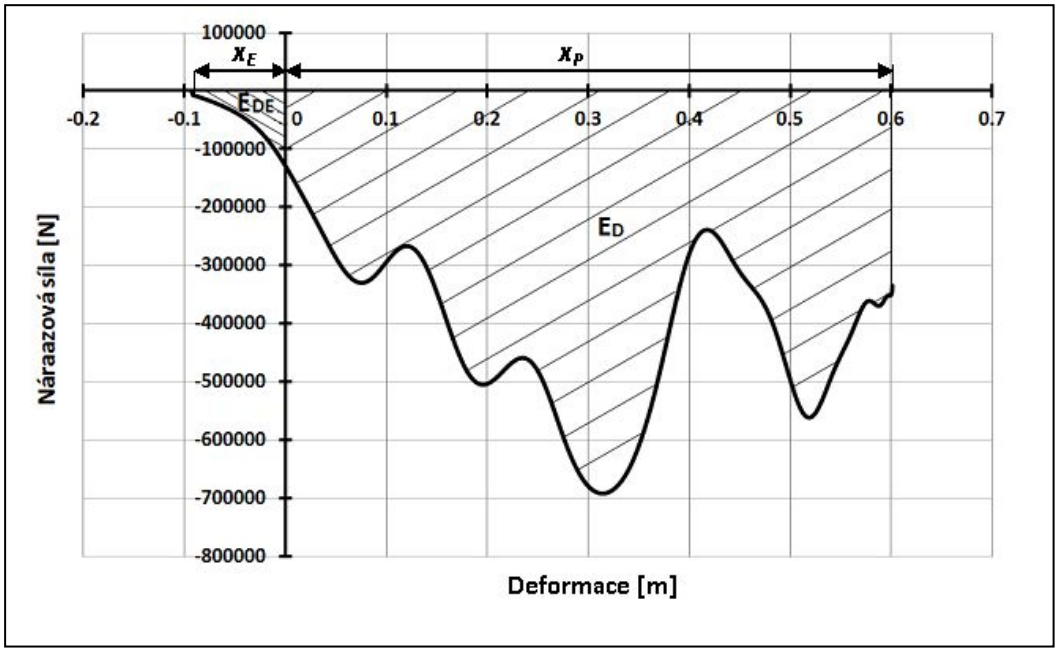
Ve znalecké praxi se k určení deformační energie vozidla nejčastěji užívá odborný odhad ekvivalentní energetické rychlosti *EES*, která vyjadřuje kinetickou energii vozidla úměrnou deformační práci, která je potřebná k dosažení příslušného stupně deformace.

$$EES = \sqrt{\frac{2 \cdot E_D}{m}} \qquad [\mathrm{m/s}] \qquad (4)$$

Z druhé odmocniny poměru energií odpovídající elastické a plastické deformaci lze stanovit koeficient restituce, viz vztah (5).

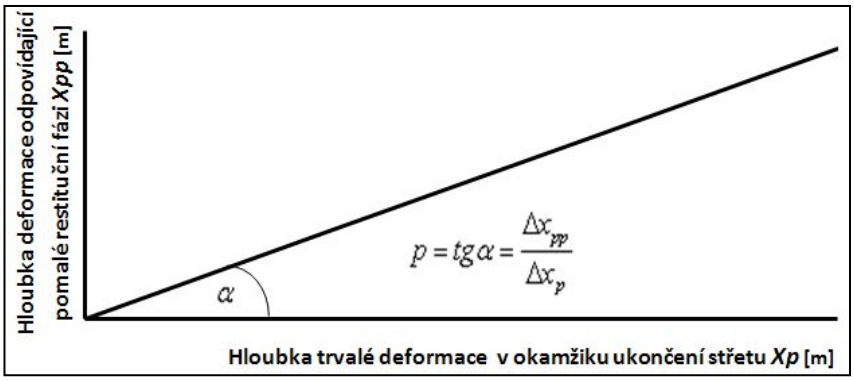
$$e = \sqrt{\frac{E_{DE}}{E_D}} \qquad [-] \qquad (5)$$

Kde:	E_D	[J]	deformační energie spotřebovaná při nárazu vozidla odpovídající plastické, resp. trvalé deformaci,
	E_{DE}	[J]	energie odpovídající elastické, resp. pružné deformaci,
	$\boldsymbol{F}$	[N]	nárazová síla,
	x	[m]	dráha (hloubka) deformace, na které působí nárazová síla,
	m	[kg]	hmotnost vozidla,
	e	[-]	koeficient restituce,
	EES	[m/s]	energeticky ekvivalentní rychlost vozidla.



Obr. 6 Modifikovaná tuhostní charakteristika přední části vozidla Audi A4

Při zpracování naměřených dat bylo zjištěno, že hloubka deformace v okamžiku ukončení střetu, tj. v okamžiku odpoutání vozidla od bariéry je větší, než skutečná naměřená hloubka deformace po nárazovém testu, kterou má možnost znalec změřit na vozidle po dopravní nehodě (pokud je vozidlo dostupné). Proto byla odvozena lineární závislost mezi změnou hloubky deformace odpovídající pomalé restituční fázi a trvalou hloubkou deformace, která je na vozidle v okamžiku ukončení střetu, viz obr. 7.



Obr. 7 Koeficient pomalé restituce

Na základě lineární závisloti uvedené na obr. 7 lze definovat koeficient pomalé restituce, viz vztah (6). S pomocí vztahu (7) lze potom vypočíst hloubku trvalé deformace, kterou lze manuálně odměřit na vozidle po nárazu.

$$p = tg\alpha = \frac{\Delta x_{pp}}{\Delta x_p} \qquad [-] \qquad (6)$$

$$x_{real} = x_p \cdot (1 - p) \qquad [m] \qquad (7)$$

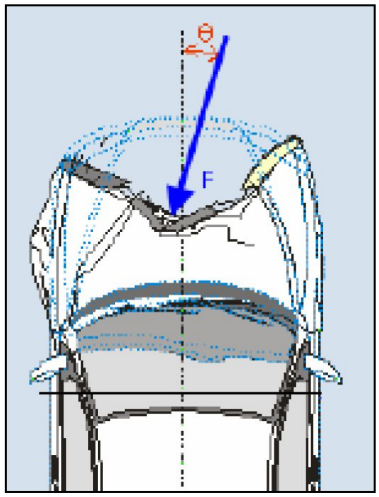
Kde: x_{pp} [m] hloubka deformace, o kterou se vrátí přední část vozidla zpět v pomalé restituční fázi, tj. po odpoutání vozidla od bariéry,

x_p	[m]	hloubka trvalé deformace v okamžiku ukončení střetu (okamžik odpoutání od bariéry),
x_{real}	[m]	skutečná hloubka deformace, kterou lze po střetu na vozidle odměřit.

V případě, že deformační síla nepůsobí v podélné ose vozidla, je nutné deformační energii korigovat v závislosti na úhlu, který svírá deformační síla s podélnou osou vozidla, viz obr. 8. Tuto korekci umožňuje koeficient ECF (Energy Correction Factor), který je v programu CRASH 3 definován následovně.

$$ECF = 1 + tg^2\phi \qquad [-] \qquad (8)$$

Kde:	ECF	[-]	Energy Correction Factor – koeficient zohledňující směr deformační síly,
	θ	[°]	úhel vychýlení směru působení deformační síly, nabývá hodnot v rozmezí ± 45°.



Obr. 8 Výchylka směru působení deformační síly od podélné osy vozidla [25]

Takto definovaný koeficient ECF je použitelný pro úhly v rozpětí ± 45° a nabývá hodnot od 1 do 2.

V literatuře [21] byl navržen nový vztah zohledňující vyosení deformační síly, který zohledňuje tření na kontaktní ploše a je použitelný pro úhly ± 60°. ECF potom nabývá hodnot od 1 do 1,95 při koeficientu tření na kontaktní ploše μ = 0,55. Vztah (9) bude pravděpodobně zakomponován v programu CRASH 4.

$$ECF = 1 + \mu \cdot tg\phi \qquad [-] \qquad (9)$$

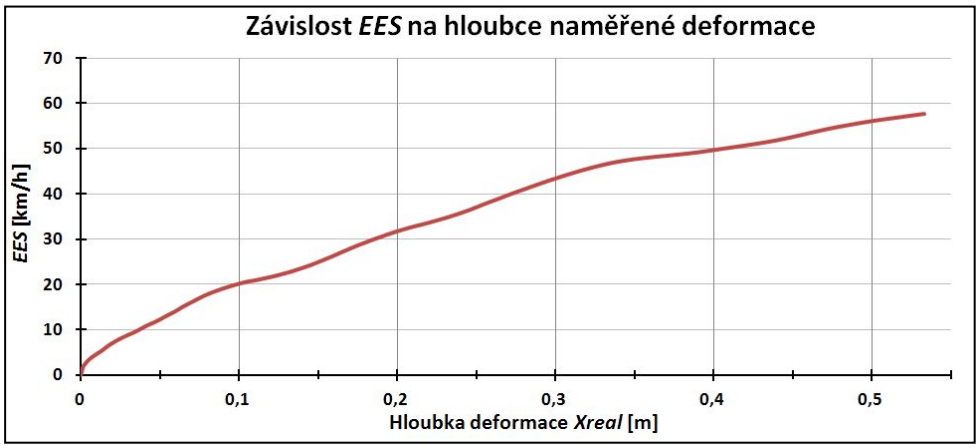
Kde:	θ	[°]	úhel vychýlení směru působení deformační síly nabývá hodnot v rozmezí ± 60°,
	μ	[-]	koeficient tření na kontaktní ploše.

Na základě výše uvedeného je s pomocí modifikované tuhostní charakteristiky sestaven výpočetní program pro výpočet *EES* vozidla Audi A4 2011 ze zadané průměrné deformace jeho přední části, okamžité hmotnosti a směru deformační síly, viz obr. 9. Do výpočtu byla zakomponována výše uvedená hypotéza pomalé restituce, tudíž lze do

programu přímo zadávat naměřenou hodnotu hloubky deformace. Uživatelem je nutné vyplnit bíle označená pole, na jejichž základě bude vypočteno množství deformační energie a hodnota *EES*. Na obr. 10 je pak uvedena závislost *EES* na hloubce deformace vozidla.

Vozidlo :	Audi A4 2011				
Zadej směr deformační síly ϕ (0°-60°)		Zadej koeficient tření na kontaktní ploše μ (0,4 - 0,55)			
0	[°]	0,55			[-]
Zadej průměrnou deformaci v metrech		v rozmezí			
		od	do		
0,3	[m]	0	0,53		[m]
Zadej okamžitou hmotnost vozidla		1953,3			[kg]
Zahrnout do výpočtu plíživou restituci (ANO/NE)?					ANO
Vypočtená hloubka deformace odpovídající plíživé restituci					[m]
					0,038
Výpočet	***EES***		**Deformační energie E_D**		
	[km/h]	[m/s]	[J]		
	43,3	12,05	**141821,08**		

Obr. 9 Výpočetní program EES pro Audi A4



Obr. 10 Závislost EES na deformaci vozidla Audi A4

5 Porovnání výpočtu *EBS*, *EES* jednotlivých metod

Porovnání bylo provedeno na vozidle Audi A4 2011 poškozeného při čelní nárazové zkoušce do tuhé bariéry s plným překrytím při rychlosti 56,6 km/h.

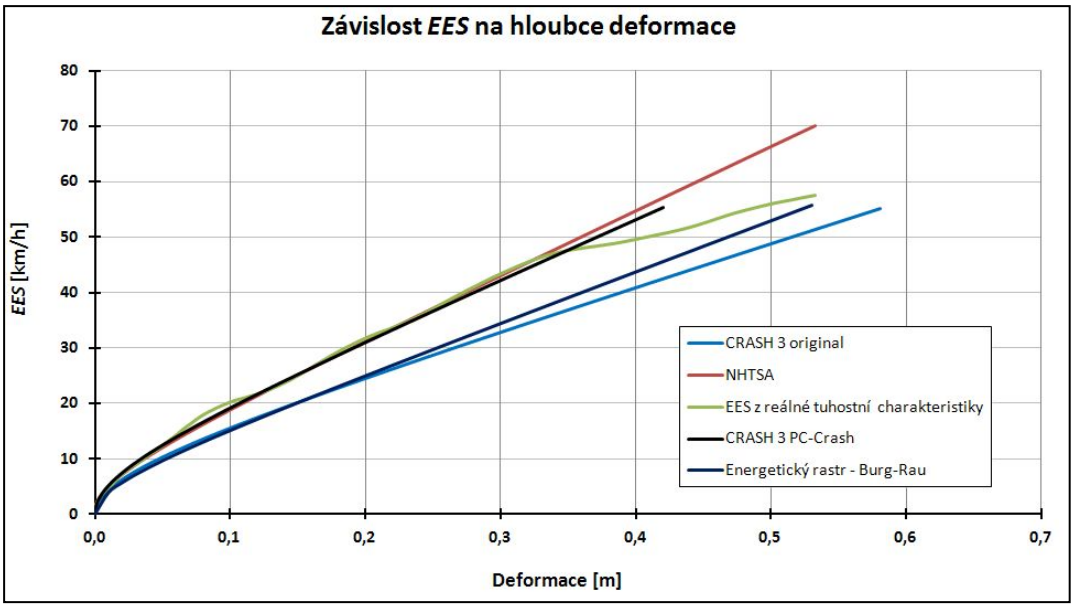
V tab. 2 je uvedeno porovnání výpočtu *EBS*, resp. *EES* u jednotlivých metod. Přesnost určení *EBS* resp. *EES* metody energetického rastru (Burg-Rau) a CRASH 3 nelze v daném případě hodnotit, neboť samotný princip metody vychází z nárazové rychlosti a z při ní vzniklé hloubky deformace. Pokud se tedy zpětně určí hodnota *EBS* na základě naměřené deformace (v tomto případě z nárazové zkoušky, ze které výpočtový model metody vychází) dochází pouze k „uzavření kruhu“ a ke zpětnému určení nárazové rychlosti. V tab. 2 je tedy zřejmé, že při zpětném výpočtu *EBS* na základě vzniklé deformace (s použitím příslušné metody odměřování hloubky deformací) se vypočte opět nárazová rychlost, která byla vstupním parametrem pro výpočet.

Na obr. 11 je dále uvedena závislost *EES* na hloubce deformace jednotlivých metod, u kterých bylo možné z hlediska principu tyto závislosti vykreslit.

Tab. 2 Porovnání výpočtu EBS, resp. EES jednotlivých metod

Rychlost z nárazové zkoušky *EBS*	Korelační diagram	Komparační metoda	CRASH 3 + metoda energetického rastru *		Navržený výpočtový model		Počáteční tuhost NHSTA	
v_{test} [km/h]	*EBS* [km/h]	*EES* [km/h]	*EBS* [km/h]	*EES* [km/h]	*EBS* [km/h]	*EES* [km/h]	*EBS* [km/h]	*EES* [km/h]
56,6	7	33	56,6	55,3	58	57,5	70,5	70

* Pozn. : Nelze hodnotit přesnost výpočtu *EES*/*EBS*.



Obr. 11 Srovnání závislosti EES na hloubce deformace pro vozidlo Audi A4 2011

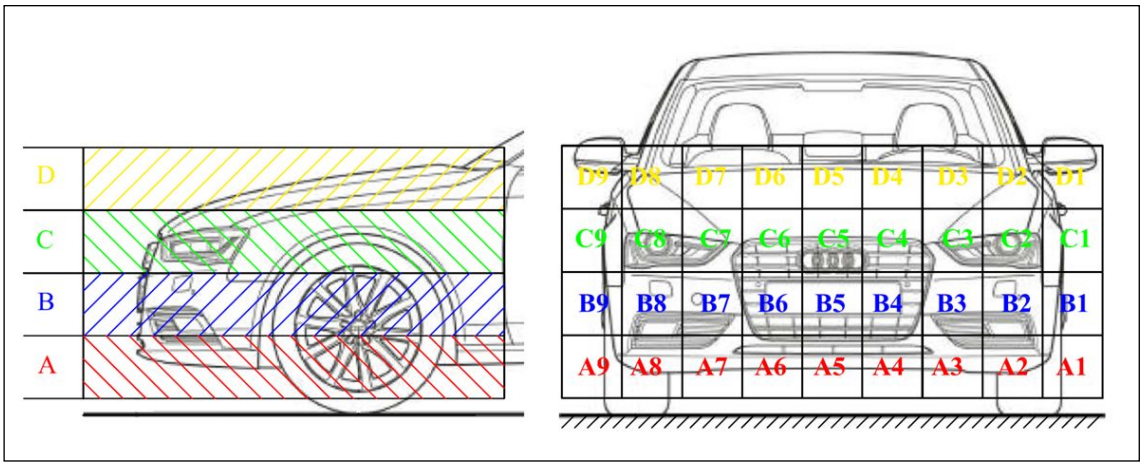
Po celkové analýze jednotlivých metod umožňujících stanovení *EBS*, resp. *EES* na základě úrovně poškození vozidla v soudně inženýrské praxi bylo zjištěno, že současné metody dávají hledanou hodnotu *EES* v poměrně širokém rozmezí a že neexistuje aktuální výpočetní metoda, která by zohledňovala rozdílné tuhosti jednotlivých partií přídě vozidla.

6 Návrh výpočtového modelu pro stanovení deformační energie s využitím experimentálně stanovené tuhosti v jednotlivých oblastech přední části vozidla

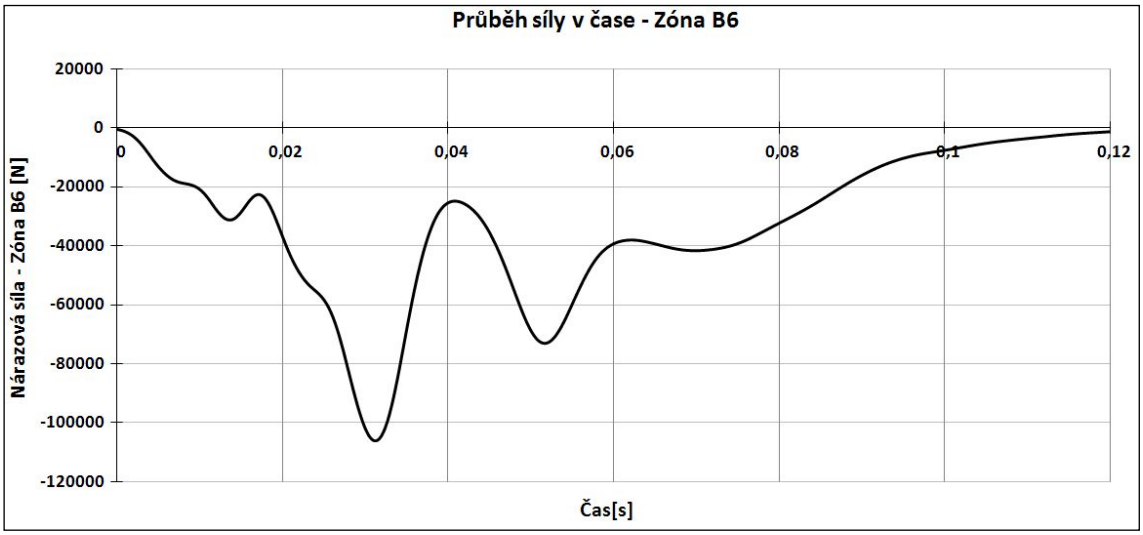
Doposud bylo deformační chování přední části vozidla charakterizováno jedinou centrální tuhostní charakteristikou, která je dobře využitelná v případě čelního nárazu vozidla s plným překrytím, při kterém dochází k rovnoměrnému poškození celé šířky přední části vozidla. Jestliže však dojde k čelnímu nárazu vozidla pouze s částečným překrytím, je již použitelnost centrální tuhostní charakteristiky omezená, neboť lze předpokládat, že jednotlivé oblasti přední části vozidla budou různě tuhé. Lze předpokládat, že nejtužší oblast přední části vozidla bude v blízkém okolí podélných nosníků majících za úkol programové pohlcení kinetické energie vozidla během čelního nárazu do překážky. Programovým pohlcením kinetické energie je myšlena řízená deformace přední části vozidla v čase takovým způsobem, aby byla co možná nejlépe ochráněna posádka vozidla, jak z hlediska průniku deformace do prostoru cestujících, tak z hlediska velikosti přetížení v časové souslednosti na ní působícího. Pro možnost exaktního určení deformační energie, respektive *EES* u nerovnoměrně poškozeného vozidla je tedy žádoucí zabývat se detailní analýzou tuhosti jeho jednotlivých oblastí.

6.1 Rozdělení přední části vozidla

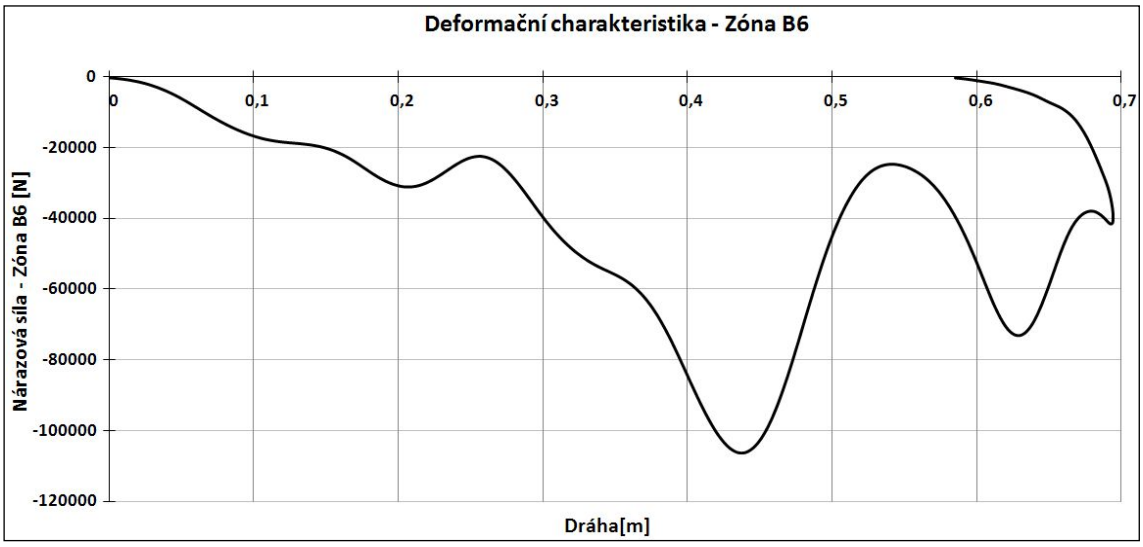
Vzhledem k členitému osazení bariéry senzory síly, lze s výhodou vyhodnotit tuhost přední části vozidla jednotlivě pro každou oblast A1 – D9 (v případě 1. typu bariéry). Rozdělení přední části předmětného vozidla do jednotlivých zón je zřejmé z obr. 12. Pro ilustraci je uvedeno zpracování záznamu průběhu síly v čase pro zónu B6, viz obr. 13. Na obr. 14 je pak vyhodnocena tuhostní charakteristika příslušící této zóně. Analogicky lze rozdělit přední část vozidla pro 2. a 3. typ bariéry.



Obr. 12 Promítnutí zón A1 – D9 na vozidlo



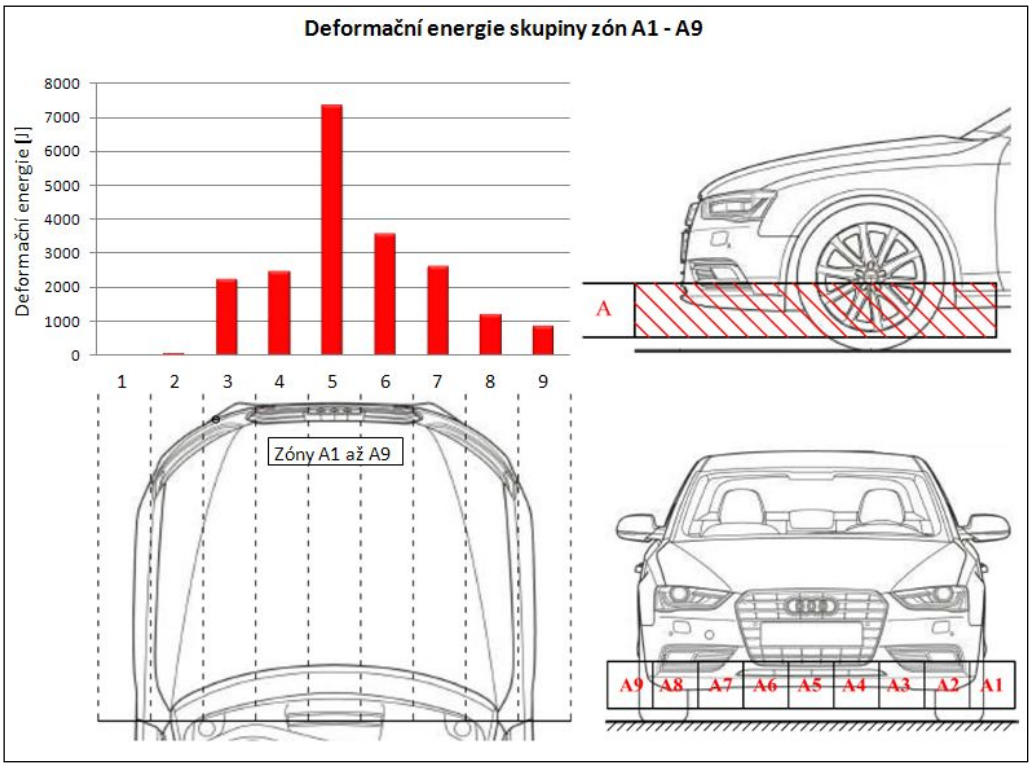
Obr. 13 Průběh nárazové síly v čase pro zónu B6



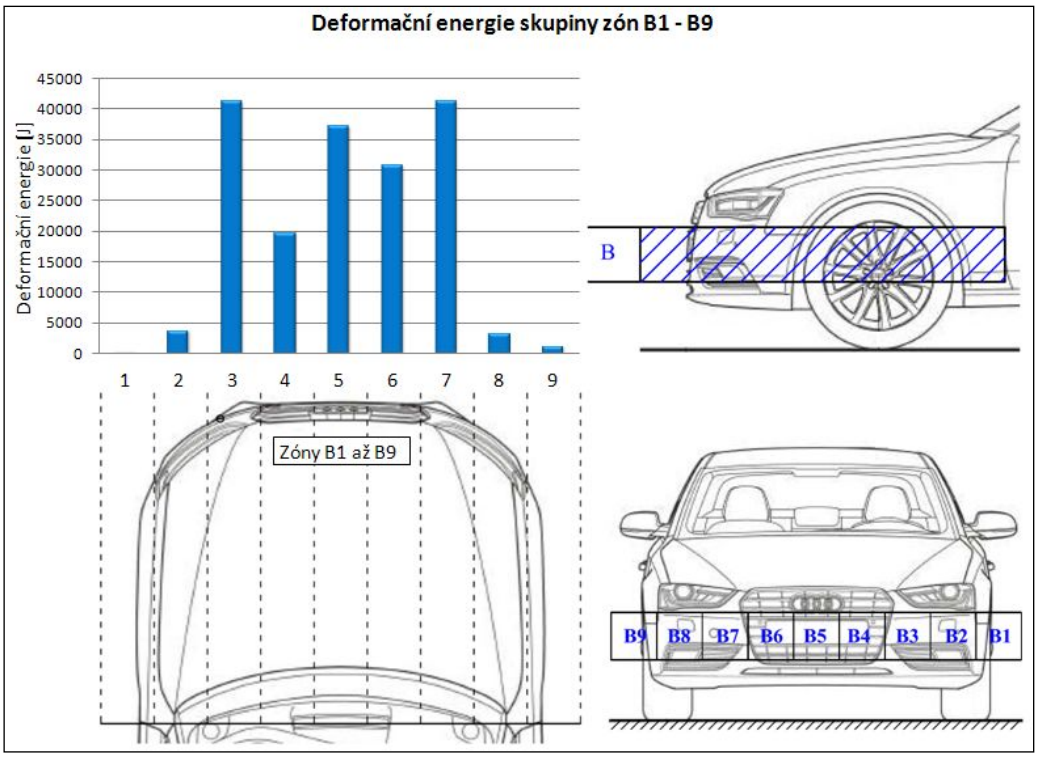
Obr. 14 Tuhostní charakteristika zóny B6

6.2 Vyhodnocení deformační energie pro jednotlivé zóny přední části vozidla

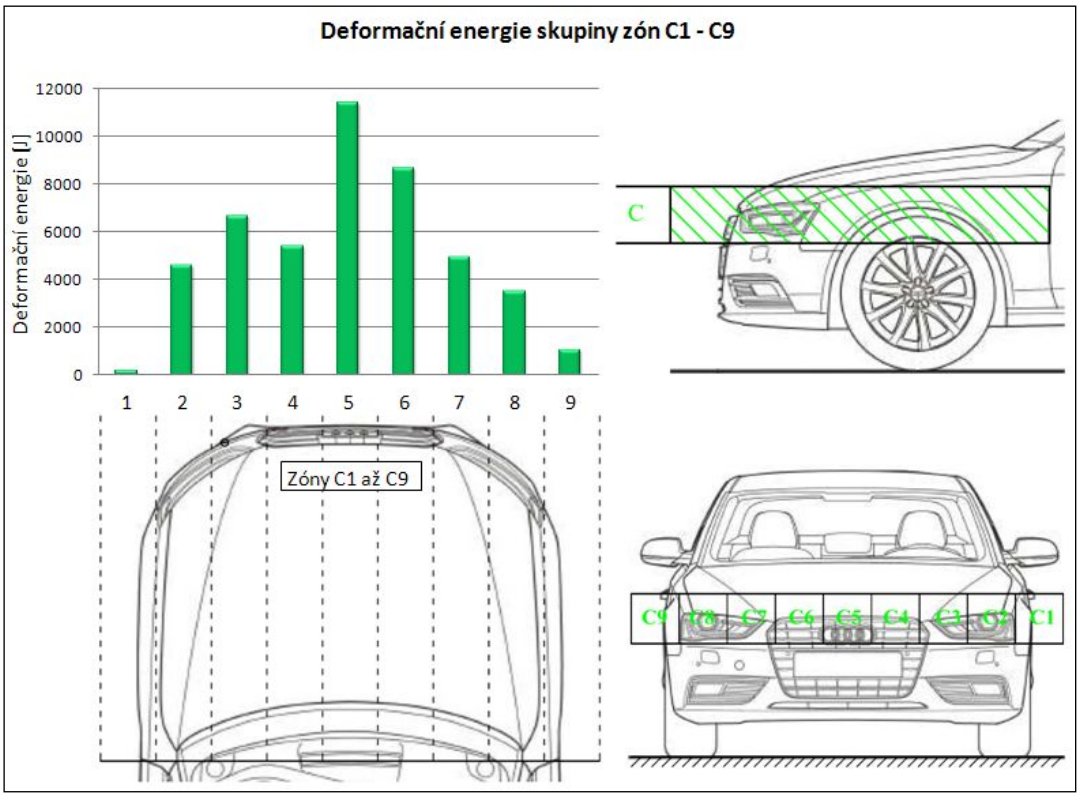
Na obr. 15 až 18 je znázorněno množství pohlcené deformační energie jednotlivými partiemi přední části vozidla při předmětném nárazovém testu včetně grafického znázornění lokací jednotlivých zón a jejich promítnutí na vozidlo.



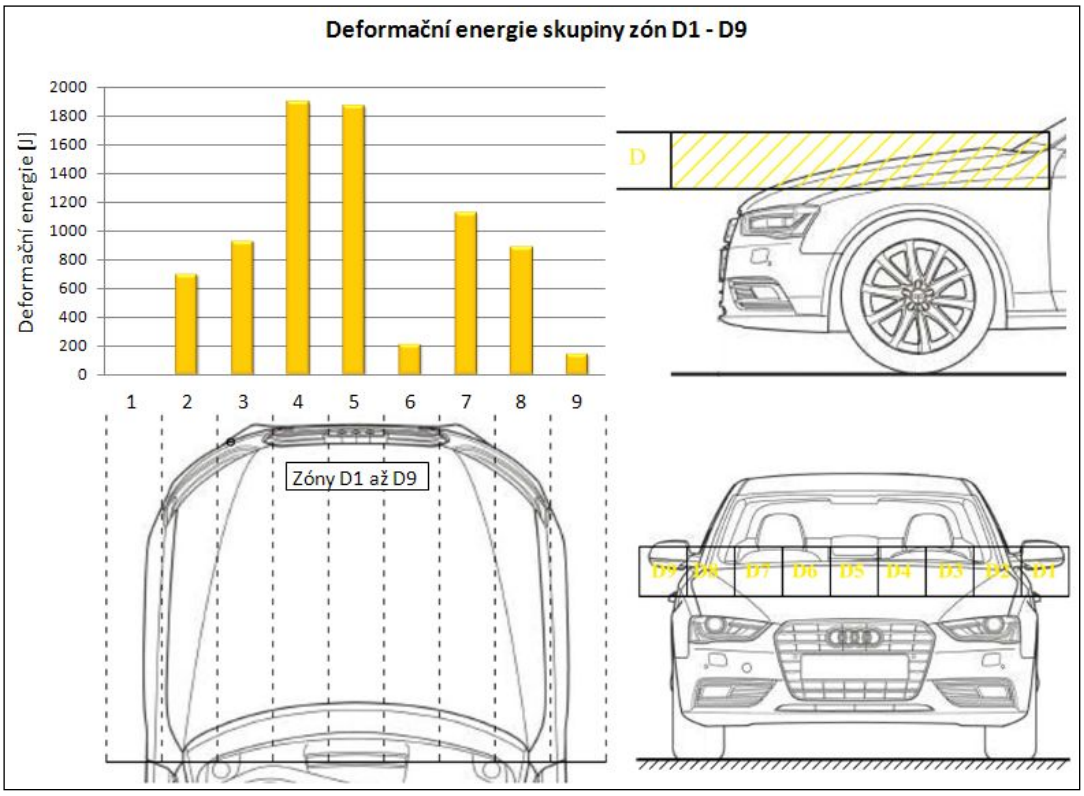
Obr. 15 Deformační energie zón A1 - A9



Obr. 16 Deformační energie zón B1 - B9



Obr. 17 Deformační energie zón C1 - C9

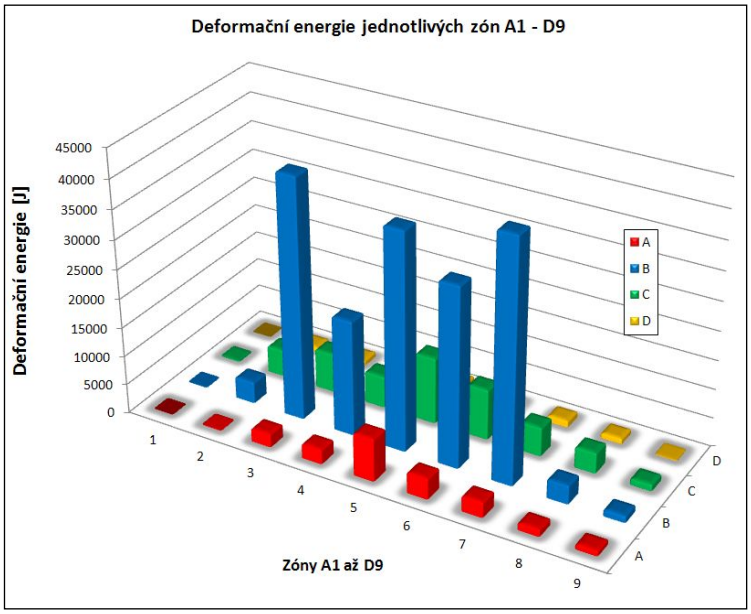


Obr. 18 Deformační energie zón D1 - D9

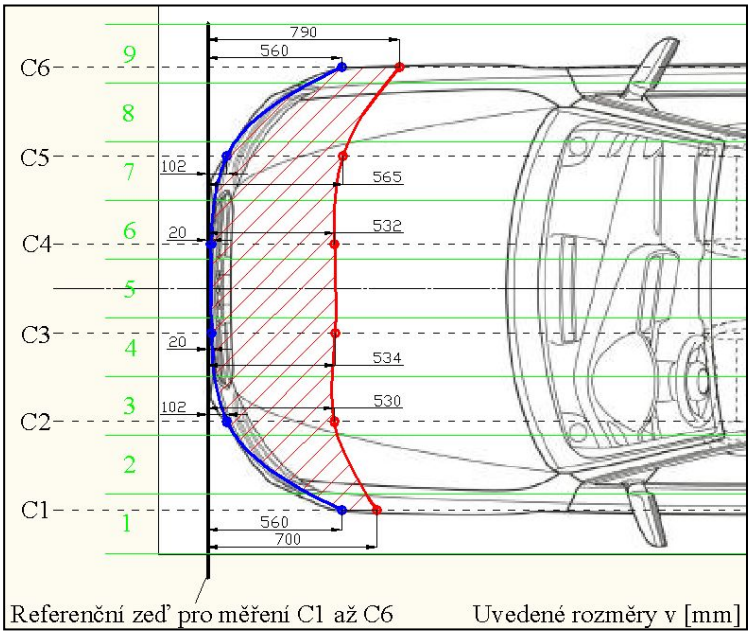
Na obr. 19 je vyobrazena celková deformační energie zmařená při předmětné nárazové zkoušce ve všech 36 zónách A1 až D9. S výhodou lze v takovém zobrazení vzájemně porovnat tuhosti jednotlivých partií přední části vozidla. Je zřejmé, že nejtužší

partie přední části vozidla jsou v oblasti zóny B, z čehož lze dovodit umístění hlavních podélných nosníků, příčné vzpěry a uchycení motoru s převodovkou.

Na obr. 20 je na předmětném vozidle zakresleno poškození, jehož hloubky deformací byly v místě C1 až C6 odměřeny po nárazové zkoušce. Modrá křivka představuje původní profil a červená zdeformovaný profil přední části vozidla. Na tomto obrázku jsou dále zeleně vyznačené zóny 1 až 8 odpovídající pozicím snímačů síly na tuhé bariéře.



Obr. 19 Deformační energie zón A1 - D9



Obr. 20 Zakreslené poškození vozidla na základě hloubky deformací odměřených po nárazové zkoušce v místě C1 až C6

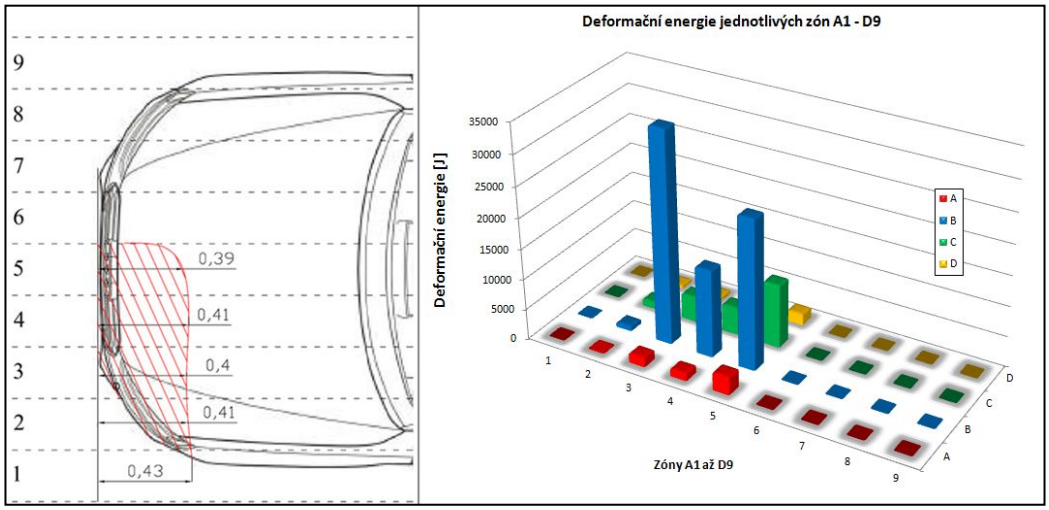
6.3 Příklad použití navrženého výpočtového modelu ve znalecké praxi

Pro možnost využití dosažených výsledků ve znalecké praxi byl sestaven výpočetní program, jehož vstupními hodnotami jsou uživatelem zadané deformace v jednotlivých

zónách A1 až D9, směr nárazové síly, koeficient tření na kontaktní ploše a okamžitá hmotnost vozidla. Pogramem je na základě dat z nárazové zkoušky vypočtena deformační energie zmařená deformačními zónami vozidla při nárazu a *EES*. Jako příklad ukázky programu byl zvolen čelní náraz vozidla s přibližně 55 % a hloubkou deformace zakótovanou v levé části obr. 22. Tyto deformace jsou zadány do výpočetního programu, viz obr. 21, s pomocí kterého je vypočtena deformační energie zmařená při nárazu a jí odpovídající hodnota *EES*. V pravé části obr. 22 je pak v 3D grafu znázorněno zmařené množství deformační energie jednotlivými zónami.

Vozidlo:	Audi A4 2011							
Zadej směr nárazové síly					v rozmezí			
					od	do	[°]	
0			[°]		0	60		
Zadej koeficient tření na kontaktní ploše m (0,4 - 0,55)					v rozmezí			
					od	do	[-]	
0,55			[°]		0,4	0,55		
Zadej okamžitou hmotnost vozidla					1953,3		[Kg]	
Zadej deformaci v metrech jednotlivých zón C1 - D9 v rozmezí [od] - [do] uvedeném v intervalu níže								
0	0		0			0		0
0,69	0,6		0,6			0,6		0,69
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
0,43	0,41	0,4	0,41	0,39	0	0	0	0
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
0,43	0,41	0,4	0,41	0,39	0	0	0	0
Zahrnout do výpočtu plíživou restituci (ANO/NE)							ANO	
Zadej deformaci v metrech jednotlivých zón A1 - B9 v rozmezí [od] - [do] uvedeném v intervalu níže								
0	0		0			0		0
0,69	0,53		0,53			0,56		0,69
B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
0,43	0,41	0,4	0,41	0,39	0	0	0	0
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
0,43	0,41	0,4	0,41	0,39	0	0	0	0
Výpočet	EES				Deformační energie E_D			
	[m/s]		[km/h]		[J]			
	10,3		37		104266			

Obr. 21 Výpočetní program EES a deformační energie

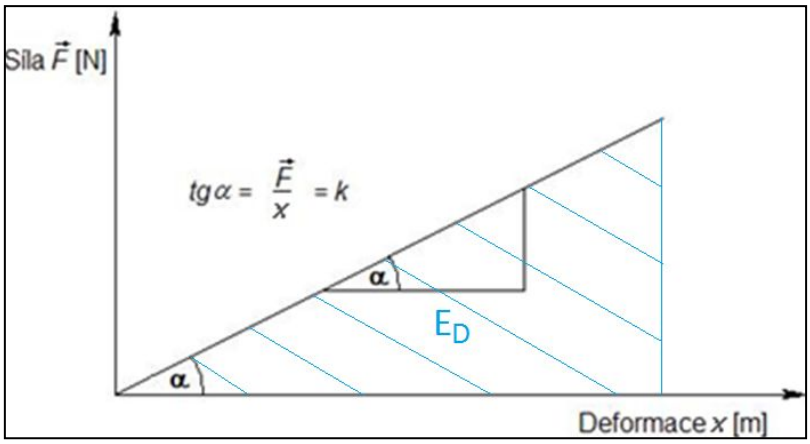


Obr. 22 Hloubka deformace vozidla a jí odpovídající deformační energie v jednotlivých zónách

7 Vymezení parametru tuhosti vozidla v programu PC-Crash a návrh výpočtového modelu pro jeho kvantifikaci

Úvodem této kapitoly je nutno uvést, že v protokolu simulačního programu PC-Crash je pod označením *k* uveden koeficient restituce a tuhost je popsána pouze slovně. Dále pak hloubka deformace je v daném protokolu označena písmenem *e*, které je v rámci této dizertační práce použito pro označení koeficientu restituce. Z důvodu zachování jednotného značení v této dizertační práci bude tedy i nadále uvažováno označení tuhosti písmenem *k* a hloubky deformace písmenem *x*.

Ve výstupním protokolu simulačního programu PC-Crash lze mimo jiné nalézt hodnotu tuhosti *k* v jednotkách kN/m. Co však tato hodnota znamená a do jaké míry představuje skutečnou tuhost dané části vozidla, není ve znalecké sféře příliš známo. Vzhledem k tomu, že je tuhost v simulačním programu PC-Crash definována jediným koeficientem tuhosti, jedná se o lineární závislost síly na hloubce deformace, neboli lineární tuhostní charakteristiku, viz obr. 23. Tuhost v simulačním programu PC-Crash vychází ze základní úvahy rovnosti deformační energie, viz vztah 10, ze kterého pak lze odvodit výpočet tuhosti *k*, viz vztah 11.



Obr. 23 Lineární tuhostní charakteristika v programu PC-Crash

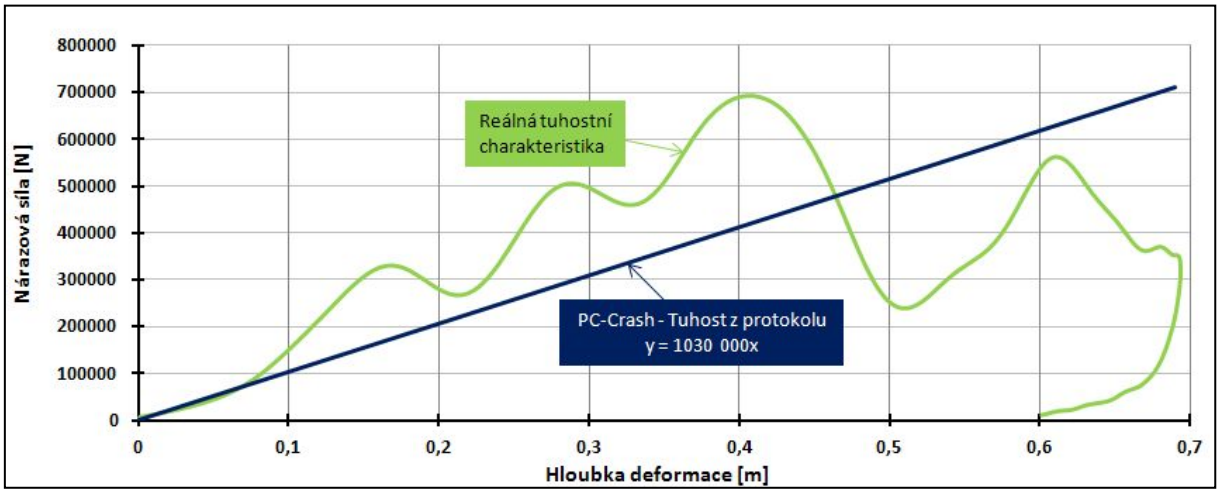
$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot EES^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 \qquad (10)$$

$$k = \frac{m \cdot EES^2}{x^2} \qquad [\mathrm{N/m}] \qquad (11)$$

Kde:	*m*	[kg]	okamžitá hmotnost vozidla,
	EES	[m/s]	energetická ekvivalentní rychlost vozidla,
	k	[N/m]	koeficient tuhosti vozidla,
	x	[m]	hloubka deformace vozidla ve směru impulzu rázové síly – jedná se o celkovou maximální deformaci, tedy o plastickou + elastickou část. Tato hodnota ve výstupním protokolu simulačního programu PC-Crash tedy neodpovídá naměřené hloubce deformace po střetu, neboť ta bude menší o elastickou část.

Hodnota tuhosti v simulačním programu PC-Crash je tedy dána koeficientem tuhosti charakterizujícím lineární tuhostní charakteristiku, která je zpětně získána z množství deformační energie (*EES*) příslušící danému vozidlu při střetu. Množství deformační energie je v tuhostní charakteristice dáno obsahem plochy pod křivkou, viz modře vyšrafovaná oblast na obr. 23. Pokud je tedy toto množství známé, je třeba dopočítat takovou směrnici přímky, aby obsah pod ní byl v příslušné úrovni deformace vozidla rovný právě dané deformační energii příslušného vozidla. Tato směrnice přímky potom představuje hodnotu tuhosti vypočtenou simulačním programem PC-Crash.

Pro zajímavost byla na základě koeficientu tuhosti ze simulačního programu PC-Crash sestavena tuhostní charakteristika a porovnána s reálnou tuhostní charakteristikou vyhodnocenou z nárazové zkoušky, viz obr. 24. Deformační energie, jakožto plocha pod křivkou, je v obou případech stejná. Tuhost v programu PC-Crash však nepopisuje reálný průběh závislosti síly na deformaci, tedy nezohledňuje skutečnou strukturu vozidla, ale vzhledem k její definici představuje pouze směrnici přímky tak, aby bylo dosaženo na příslušné hloubce překrytí daného množství deformační energie. Nicméně se jedná o parametr, který může uživateli simulačního programu PC-Crash ledacos napovědět. Je-li totiž hodnota tuhosti extrémně vysoká, je zřejmé, že uživatel zvolil malou hloubku překrytí, která neodpovídá stanovené hodnotě *EES*. Je-li naopak hodnota tuhosti extrémně nízká, je zřejmé, že uživatel zvolil velkou hloubku překrytí, která neodpovídá stanovené hodnotě *EES*. Hloubka překrytí se v simulačním programu PC-Crash volí překrytím dané části vozidla do překážky a polohou bodu rázu.



Obr. 24 Porovnání tuhosti z protokolu simulačního programu PC-Crash a reálné tuhostní charakteristiky

7.1 Návrh výpočtového modelu parametrů střetu sloužicího pro odlazení střetu v simulačním programu PC-Crash

Na základě výše uvedené definice tuhosti uváděné v simulačním programu PC-Crash je možné z dat předmětné nárazové zkoušky dopočíst parametry střetu zadávané v okně „Impulz výběh-ráz“ v simulačním programu PC-Crash. Konkrétně se jedná o parametry „Tuhost“, „Koeficient restituce“ a „Deformace“. Pro tento účel byl vytvořen doplněk výše uvedeného výpočetního programu *EES*.

Tuhost je vypočtena dle vztahu (11), který vyplývá ze vztahu (10) uvedeného výše. Koeficient restituce je vypočten dle vztahu (5) a je platný pro dané vozidlo. Vzhledem k tomu, že v simulačním programu PC-Crash nelze zadávat jednotlivé koeficienty restituce vozidla 1 a vozidla 2 (v případě střetu dvou vozidel), byl odvozen vztah (17) pro výpočet koeficientu restituce celého střetu. Deformace, resp. hloubka překrytí v simulačním programu

PC-Crash představuje maximální hloubku deformace při nárazu, tedy součet plastické + elastické části deformace. Tato hodnota tedy neodpovídá hloubkám deformací reálně naměřených na vozidle po střetu, ale je větší o elastickou část deformace, případně o část deformace odpovídající plíživé restituci. Vzhledem k definici tuhosti v simulačním programu PC-Crash lze pak deformaci odvodit ze vztahu 12, viz vztah 13.

$$k = \frac{m \cdot EES^2}{x^2} = \frac{2 \cdot E_D}{x^2} \qquad \text{[N/m]} \qquad (12)$$

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot E_D}{k}} \qquad \text{[m]} \qquad (13)$$

Kde:	m	[kg]	okamžitá hmotnost vozidla,
	E_D	[J]	deformační energie,
	k	[N/m]	koeficient tuhosti vozidla,
	x	[m]	hloubka deformace vozidla.

Koeficient restituce pro střet dvou vozidel je odvozen na základě poměru druhé odmocniny mezi elastickou a plastickou částí deformační energie, viz vztahy (14). Ze vztahů (14), (15) a (16) lze pak odvodit vztah (17), který umožňuje výpočet koeficientu restituce celého střetu při srážce dvou vozidel, na základě hmotností, koeficientů restituce a *EES* jednotlivých vozidel.

$$e_1 = \sqrt{\frac{E_{DE1}}{E_{DP1}}}\,,\ e_2 = \sqrt{\frac{E_{DE2}}{E_{DP2}}}\,,\ e_c = \sqrt{\frac{E_{DE1} + E_{DE2}}{E_{DP1} + E_{DP2}}} \qquad \text{[-]} \qquad (14)$$

$$E_{DE1} = e_1^2 \cdot E_{DP1},\ E_{DE2} = e_2^2 \cdot E_{DP2} \qquad \text{[J]} \qquad (15)$$

$$E_{DP1} = m_1 \cdot EES_1^2,\ E_{DP2} = m_2 \cdot EES_2^2 \qquad \text{[J]} \qquad (16)$$

$$e_C = \sqrt{\frac{e_1^2 \cdot E_{DP1} + e_2^2 \cdot E_{DP2}}{E_{DP1} + E_{DP2}}} = \sqrt{\frac{e_1^2 \cdot m_1 \cdot EES_1^2 + e_2^2 \cdot m_2 \cdot EES_2^2}{m_1 \cdot EES_1^2 + m_2 \cdot EES_2^2}} \qquad \text{[-]} \qquad (17)$$

Kde:	$E_{DE1,2}$	[J]	elastická část deformační energie vozidla 1, 2,
	$E_{DP1,2}$	[J]	plastická část deformační energie vozidla 1, 2,
	$m_{1,2}$	[kg]	okamžitá hmotnost vozidla 1, 2,
	$EES_{1,2}$	[m/s]	energetická ekvivalentní rychlost vozidla 1, 2,
	$e_{1,2}$	[-]	koeficient restituce vozidla 1, 2,
	e_C	[-]	celkový koeficient restituce střetu dvou vozidel.

Na základě výše uvedených vztahů byl vytvořen doplněk výpočetního programu *EES*, který vypočte tuhost, koeficient restituce a deformaci vozidla, s jejichž pomocí lze v simulačním programu PC- Crash „odladit“ střet takovým způsobem, aby co nejlépe odpovídal reálnému střetu, viz obr. 25. V předmětném doplňku programu se v případě střetu dvou vozidel vyplní *EES*, okamžitá hmotnost a koeficient restituce druhého vozidla, viz bílá políčka na obr. 25, na jejichž základě je spočten koeficient restituce, který lze přímo využít jako vstupní parametr pro simulační program PC-Crash. Na obr. 25 jsou uvedeny parametry odpovídající předmětné nárazové zkoušce vozidla Audi A4 do tuhé bariéry s plným překrytím.

Údaje pro řešení střetu v simulačním programu PC-Crash							
Tuhost přední části vozidla uvedená v protokolu simulačního programu PC-Crash						1029,6	[kN/m]
Koeficient restituce *e*						0,16	[-]
Deformace (PC-Crash)						0,69	[m]
Přepočet koeficientu restituce pro vlastní střet dvou vozidel							
EES 1 [km/h]	*m* 1 [kg]	*e* 1 [-]	*EES* 2 [km/h]	*m* 2 [kg]	*e* 2 [-]	*e* c	[-]
56,8	1953,3	0,16	56,8	1953,3	0,16	0,16	

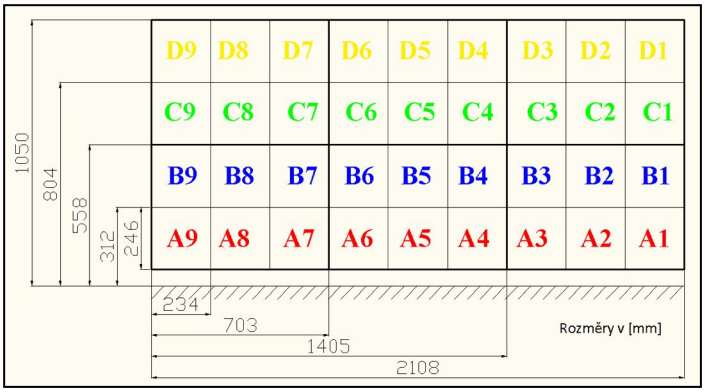
Obr. 25 Doplněk výpočetního programu EES pro výpočet vstupních parametrů k řešení střetu v simulačním programu PC-Crash

7.1.1 Příklad využití výpočetního programu *EES* a jeho doplňku pro stanovení parametrů střetu

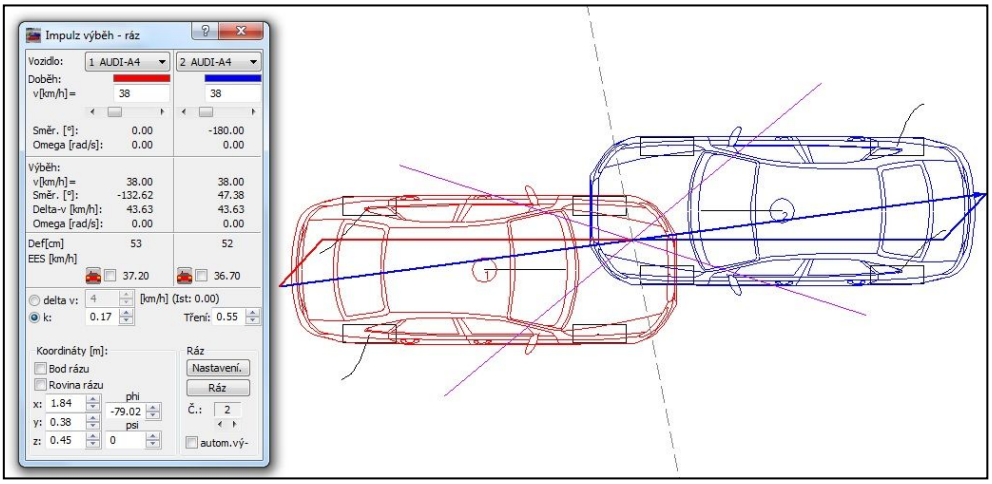
Jako příklad využití výpočetního programu *EES* a jeho doplňku pro simulační program PC-Crash ve znalecké praxi byl nakonfigurován čelní střet s částečným překrytím dvou totožných vozidel, konkrétně předmětného Audi A4 s konfigurací shodnou s příkladem uvedeným na obr. 22. Na základě zadané okamžité hmotnosti vozidla a hloubky deformací v jednotlivých polích je programem vypočtena deformační energie vozidla a *EES*, viz obr. 21 výše a údaje pro řešení střetu v simulačním programu PC-Crash, viz obr. 26. Z 3D grafického zobrazení deformační energie na obr. 22 je zřejmé, že největší množství deformační energie odpovídá oblasti zóny B, z čehož lze dovodit, že v její výšce se nachází výška bodu rázu. Z obr. 27 je zřejmé, že výška bodu rázu se tedy bude pohybovat mezi 312 až 558 mm. V konkrétním případě byla tedy výška rázu zvolena na 450 mm, tedy 0,45 m, viz obr. 28. Z obr. 28 je dále zřejmé, že taktéž koeficient restituce a deformace (hloubka překrytí) je zvolena s ohledem na výpočet uvedený na obr. 26. Z obr. 28 je taktéž zřejmé, že střet je nakonfigurován takovým způsobem, aby i hodnota *EES* byla v souladu s výpočtem uvedeným na obr. 21 výše. Jako kontrolní parametr celé konfigurace střetu pak slouží hodnota tuhosti uvedená v protokolu simulačního programu, viz obr. 29, která je taktéž v souladu s výpočtem uvedeným na obr. 26. Mírné odchylky tuhosti, přibližně do 50 kN/m, nejsou nijak závažné, nicméně uživatel simulačního programu by se měl snažit vlastní střet nakonfigurovat takovým způsobem, aby se hodnota tuhosti v jeho protokolu blížila co nejvíce tuhosti vypočtené v doplňku výpočetního programu *EES* uvedeného na obr. 26, jehož výpočty jsou založeny na experimentálně naměřených datech z reálné nárazové zkoušky.

Údaje pro řešení střetu v simulačním programu PC-Crash							
Tuhost přední části vozidla uvedená v protokolu simulačního programu PC-Crash						757,8	[kN/m]
Koeficient restituce *e*						0,175	[-]
Deformace (PC-Crash)						0,52	[m]
Přepočet koeficientu restituce pro vlastní střet dvou vozidel							
EES 1 [km/h]	*m* 1 [kg]	*e* 1 [-]	*EES* 2 [km/h]	*m* 2 [kg]	*e* 2 [-]	*e* c	[-]
37	1953,3	0,175	37	1953,3	0,175	0,175	

Obr. 26 Parametry střetu pro simulační program PC-Crash



Obr. 27 Rozměry bariéry pro nalezení výšky bodu rázu



Obr. 28 Střet dvou vozidel v simulačním programu PC-Crash

1.Kolize

Vozidlo :	1 AUDI-A4	2 AUDI-A4
Řidič :		
t [s]:	0.00	0.00
Rychlost [km/h]:	**38.00**	**38.00**
Rychlost výběhu [km/h]:	**7.76**	**7.76**
Změna rychlosti dv [km/h] :	43.63	43.63
Deformace e [m] :	0.53	0.52
EES [km/h] :	37.20	36.67
Tuhosti [kN/m]:	729.4	750.5
k-faktor :	0.17	
Rychlost bodu rázu [km/h]:	12.9	
Tření při rázu (MUE) :	0.55	
Poloha bodu rázu x [m] :	1.84	
Poloha bodu rázu y [m] :	0.38	
Poloha těžiště z [m] :	0.45	
Směr roviny tření (phi) [Grad] :	-79.02	
Směr roviny tření (psi) [Grad] :	0.00	
Celková deformační energie [J] :	205609.32	
Impulz rázu [Ns] :	23671.88	
Směr rázové síly [Grad] :	-172.48	
Směr rázové síly vertikálně[Grad] :	-0.00	
Rameno bodu rázu [m] :	0.13	0.12
Úhel bodu rázu [Grad] :	-172.48	-172.48
GEV :	1.17	1.19

Obr. 29 Výňatek z protokolu simulačního programu PC-Crash

8 Kvantifikace tuhosti přední části moderních vozidel

Jak již bylo v úvodu zmíněno a jak vyplývá z předchozích kapitol této dizertační práce, tuhost jednotlivých částí vozidla je velmi žádaným parametrem v oboru Soudního inženýrství při analýze dopravních nehod, neboť na jejím základě lze ze známé hloubky deformace získat kýžený parametr *EES*, jež je nedílnou součástí řešení střetu při analýze nehodového děje. Pro představu o tom, jakých hodnot tuhosti dosahuje přední část moderních vozidel, byla tuhost zpracována u flotily vozidel, která se skládá z reprezentantů pokrývajících téměř celou škálu tříd vozidel, kde každý z těchto reprezentantů zastupuje danou třídu, viz tab. 3. Výběr reprezentantů byl proveden na základě shodnosti modelů předmětných vozidel pro Spojené státy americké a evropský trh, neboť v rámci řešení dizertační práce byla zpracována data z nárazových zkoušek prováděných v USA. Dalším kritériem pro výběr vhodných reprezentantů bylo posouzení zpracovatele této dizertační práce, zda se lze s vybraným reprezentantem dané třídy běžně setkat v silničním provozu na území ČR.

Tuhost uvedená v tab. 3 představuje hodnotu tuhosti, jež je uvedena ve výstupním protokolu simulačního programu PC-Crash. Jedná se o tuhost přední části daného vozidla při nárazu do tuhé překážky s plným překrytím při rychlosti přibližně 56 km/h. Reálná tuhost vozidla však není v závislosti na střetové rychlosti, resp. jí odpovídající hloubce deformace konstantní, což je zřejmé z reálné tuhostní charakteristiky, viz obr. 24. Navíc jednolivé oblasti přední části vozidla vykazují rozdílné hodnoty tuhosti. Z tohoto důvodu byli jednotliví reprezentanti daných tříd vozidel zpracováni do výpočetního programu *EES* a jeho doplňku pro řešení střetu v simulačním programu PC-Crash, viz přílohy dizertační práce a přiložené CD. S jeho využitím lze na základě okamžité hmotnosti, směru nárazové síly, koeficientu tření na kontaktní ploše a zadaných hloubek deformací v jednotlivých oblastech vypočíst deformační energii, *EES*, hodnotu tuhosti, koeficient restituce a hloubku deformace zadávanou v simulačním programu PC-Crash při řešení střetu.

Tab. 3 Tuhosti přední části moderních vozidel

Třída vozidel	Minivozy	Malé vozy	Nižší střední třída	Střední třída	Vyšší střední třída	SUV	Velké SUV
Reprezentant	Fiat 500	Suzuki SX4	Mazda 3	Audi A4	MB E-Class	VW Tiguan	Volvo XC90
Modelový rok	2007 -	2006 - 2013	2010 - 2013	2008 -	2009 -	2008 -	2007 - 2014
Tuhost (PC-Crash) [kN/m]	2165	971	670	1030	1199	1480	1557

9 Závěr

Předmětná dizertační práce uvádí ucelený přehled současného stavu řešené problematiky, ze kterého mimo jiné vyplývá, že v současné době nejsou znalcům dostupné hodnoty tuhostí moderních vozidel, na základě kterých by mohli korigovat výpočet střetu v simulačních programech využívaných při analýze nehodového děje. Existují sice dvě metody umožňující stanovení tuhosti přední části vozidla, kterými jsou:

- stanovení počáteční tuhosti dle NHTSA (Initial Stiffness),
- stanovení tuhosti z programu Crash 3.

Jedná se však o metody, které nejsou znalcům ve znalecké praxi běžně dostupné, a bylo ověřeno, že stanovují hodnotu tuhosti v poměrně širokém rozmezí.

Tuhost dané části vozidla je v oboru Soudního inženýrství velice žádaným parametrem, neboť s jeho pomocí je možné exaktně určit – na základě hloubky deformace dané části vozidla – deformační energii zmařenou při nárazu, resp. *EES*. Vzhledem k doposud neznámým reálným hodnotám tuhosti jsou však v soudně inženýrské praxi pro stanovení *EES* (*EBS*) vozidla využívány alternativní metody, kterými jsou:

- komparační metoda,
- metoda korelačního diagramu,
- metoda energetického rastru,
- výpočet *EES* dle programu PC-Crash využívající program Crash 3,
- výpočet pomocí programu Energy Loss Calculator.

Současné metody stanovení *EES* však disponují jistými omezeními v přesnosti a použitelnosti. Z provnání jednotlivých metod stanovení *EBS,* resp. *EES* bylo ověřeno, že zejména metoda korelačního diagramu není vhodná pro moderní vozidla, neboť hodnota *EBS* je v daném případě za použití korelačního diagramu značně podhodnocena. Také ostatní, doposud užívané metody dávají hodnoty *EES* vůči experimentálně stanovené hodnotě v poměrně širokém rozmezí, viz obr. 11. Navíc neexistuje aktuální výpočetní metoda deformační energie, resp. *EES*, která by zohledňovala rozdílné tuhosti jednotlivých oblastí přídě moderních vozidel, což je klíčové zejména při částečném poškození typickém při přesazených nárazech.

Z výše uvedených metod je při výpočtu deformační energie resp. *EES* využíváno tuhosti pouze v případě výpočetního programu CRASH 3 (taktéž Energy Loss Calculator, který je založen na podobném výpočtovém modelu). I v tomto případě se však nejedná o reálnou tuhost vozidla, neboť tato je modelována z nárazové rychlosti, rychlosti, při níž nedochází k trvalým deformacím, a na základě odpovídající hloubky deformace vzniklé vlivem nárazu vozidla do tuhé bariéry předmětnou nárazovou rychlostí. Nejedná se tedy o reálnou, experimentálně naměřenou závislost síly na hloubce deformace. Uvažovaná tuhostní charakteristika je v daném případě lineární, což zpravidla neodpovídá reálné tuhostní charakteristice přední části vozidla. Limitujícím faktorem je zde dále fakt, že i pro střety s částečným překrytím, ať už šířkovým, či výškovým, je využívána pouze jedna „centrální“ tuhostní charakteristika. V reálném případě mají však jednotlivé části přídě vozidla rozdílnou tuhost a v případě využití „centrální“ tuhostní charakteristiky při přesazeném nárazu může být přesnost výpočtu deformační energie, resp. *EES* omezena.

Vzhledem k nedostatkům dosavadních metod sloužících v oboru Soudního inženýrství k určení deformační energie, resp. *EES* a tuhosti vozidla byla v rámci řešení dizertační práce navržena metoda pro experimentální stanovení tuhosti přední části vozidla, která vychází z experimentálně naměřených dat při nárazových zkouškách vozidel. Z důvodu restrikce finančních prostředků byla využita data z nárazových zkoušek prováděných americkou společností NHTSA, která tyto zkoušky realizuje za účelem hodnocení úrovně ochrany posádky při nárazu vozidla a jejich výsledky poskytuje pro další využití ve vědecké činnosti. Pro stanovení deformační energie, resp. *EES* vozidla byl navržen výpočetní

program, jehož výpočtový model pracuje, na rozdíl od dosavadních metod, s reálnou, experimentálně stanovenou tuhostí vozidla. Tento výpočtový model navíc uvažuje s rozdílnou tuhostí jednotlivých oblastí přídě vozidla a pro každou tuto oblast využívá k výpočtu *EES* dílčí, experimentálně stanovenou tuhost. Díky tomu je program využitelný i pro stanovení *EES* vozidla, jehož přední část byla poškozena vlivem částečně přesazeného nárazu (výškového i šířkového). Přesnost výpočtového modelu navrženého programu byla ověřena porovnáním vypočtené hodnoty *EBS* a nezávisle naměřené rychlosti při čelní nárazové zkoušce vozidla do tuhé bariéry a bylo zjištěno, že u vozidla Audi A4 2011 se tyto hodnoty liší o 2,5%. U ostatních vozidel, která byla v rámci řešení dizertační práce zpracována, byla přesnost ještě vyšší. Lze tedy předpokládat, že navržený výpočtový model stanovuje deformační energii, resp. *EES* s přesností do cca 3% v případech, kdy úroveň poškození vozidla, u kterého hledáme hodnotu *EES*, odpovídá úrovni poškození vozidla z nárazové zkoušky. Vzhledem k tomu, že pro řešení předmětné dizertační práce nebyly k dispozici nárazové zkoušky prováděné v jiných rychlostech než 56 km/h, nebylo možné hodnotit přesnost výpočtového modelu pro různé úrovně poškození vozidla. Je tedy žádoucí zabývat se v budoucích výzkumech analýzou experimentálně stanovené tuhosti přední části vozidla zejména při nízkých nárazových rychlostech (odhadem do 10 až 15 km/h) a dále pak při vyšších nárazových rychlostech (nad 56 km/h) tak, aby bylo možné exaktně stanovovat deformační energii, resp. *EES* v širokém rozpětí úrovně poškození vozidel.

Vzhledem k tomu, že se předmětná dizertační práce zabývá analýzou tuhosti vozidla, jejíž hodnota je také uváděna ve výstupním protokolu simulačního programu PC-Crash, byla předmětem řešení také možnost využití experimentálně stanovené tuhosti pro kontrolu parametru tuhosti v simulačním programu PC-Crash. Parametr tuhosti uváděný ve výstupním protokolu simulačního programu PC-Crash není v dostupné literatuře vymezen, a proto byl vymezen v rámci dizertační práce. Z obr. 24 je zřejmé, že experimentálně stanovená tuhost vozidla a parameter tuhosti v simulačním programu PC-Crash nejsou přímo porovnatelné, avšak z vymezení parametru tuhosti uvažovaného v simulačním programu PC-Crash vyplynulo, že z experimentálně naměřených dat při nárazových zkouškách lze přepočtem vyhodnotit aktuální parametr tuhosti využitelný v simulačním programu PC-Crash. Na základě vymezení parametru tuhosti byl navržen výpočtový model parametrů střetu sloužící pro odlazení střetu v simulačním programu PC-Crash. Tento výpočtový model pracuje taktéž s experimentálně naměřenými daty při nárazových zkouškách a s jeho pomocí lze mimo parameter tuhosti vypočíst také další parametry střetu zadávané v simulačním programu PC-Crash v okně „Impulz výběh-ráz“, kterými jsou „Deformace“ a „Koeficient restituce“. (Parametr „Deformace“ je pro exaktní řešení střetu také dopočten, neboť v simulačním programu PC-Crash je uvažován jako maximální hloubka deformace (elastická+plastická), tudíž se nejedná o plastickou deformaci, jejíž hloubku může znalec vyhodnotit na poškozeném vozidle.) S pomocí navrženého výpočtového modelu byl vytvořen doplněk výpočetního programu *EES*, který ho rozšiřuje o výpočet parametrů střetu pro simulační program PC-Crash. Ve spojení výpočetního programu *EES* s tímto doplňkem vznikl nástroj umožňující exaktní řešení střetu vozidel v simulačním programu PC-Crash. Nástroj je rovněž využitelný také pro uživatele pracující se simulačním programem Virtual Crash i přes to, že ten ve svém výstupním protokolu parametr tuhosti neuvádí. V případě potřeby si jej totiž jeho uživatel může na základě vztahu (10), resp. (11) v případě potřeby dopočíst.

Tuhost přední části vozidla byla analyzována u flotily vozidel skládající se z reprezentantů pokrývajících téměř celou škálu tříd vozidel od minivozů až po vozidla SUV. Každý z těchto reprezentantů byl zakomponován do výpočetního programu *EES* a údajů pro řešení střetu v simulačním programu. Tento program na základě uživatelem zadané hloubky trvalé deformace přední části vozidla v příslušných oblastech, okamžité hmotnosti vozidla, směru nárazové síly a koeficientu tření na kontaktní ploše vypočte deformační energii vozidla, *EES* a dále pak údaje pro řešení střetu v simulačním programu, resp. tuhost přední

části vozidla, koeficient restituce a deformaci, která je dána hloubkou překrytí vozidel a polohou bodu rázu.

Vzhledem k tomu, že v rámci této dizertační práce byla řešena pouze tuhost přední části vozidla, bylo by žádoucí zabývat se v budoucích výzkumech analýzou tuhosti boční části, zadní části případně i střechy vozidla tak, aby byla daná problematika v oboru soudního inženýrství na co možná nejvyšší úrovni poznání se zaměřením aplikace výzkumu do soudně inženýrské praxe, ve které budou moci znalci čerpat z výsledků jednotlivých výzkumů při vypracování znaleckých posudků.

Seznam použitých zdrojů

[1] *AUTOVIEW* [CD-R]. Gallneukirchen: C.A.R. Crash Analyse Ratschbacher GmbH, 2014. [cit. 01.05.2014]. Dostupné z: http://www.autoview.at/.

[2] BATISTA, M. *A Note on Linear Force Model in Car Accident Reconstruction* [online]. In: *ARXIV: eprint arXiv:physics/0511127*. 3. vyd. Ithaca: Cornell University, 11/2005. 9 s. [cit. 2014-01-22]. Dostupné z: http://arxiv.org/abs/physics/0511127v3.

[3] BRADÁČ, A. a kol. *Soudní inženýrství.* 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 1999. 725 s. ISBN 80-7204-133-9.

[4] BRANCH, R. M., BRANCH, R. *Vehicle accident analysis and reconstruction methods*. 2. vyd. Warrendale: SAE International, 2011. 418 s. ISBN 978-0-7680-3437-0.

[5] BURG, H., MOSER, A. *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation.* 2. vyd. Wiesbaden: Vieweg Teubner, 2009. 1032 s. ISBN 978-3-8348-0546-1.

[6] BURG, H., RAU, H. *Handbuch der Verkehrsunfall-Rekonstruktion*. 1. vyd. Kippenheim: Verl. Information Ambs, 1981. 838 s. ISBN 38-855-0020-5.

[7] CAMPBELL, K. L. *Energy Basis for Collision Severity.* Warrendale: SAE International, 1974. DOI: 10.4271/740565.

[8] CICHOS, D. a kol. *Crash Analysis Criteria Description* [online]. Bergisch Gladbach: Workgroup Data Processing Vehicle Safety, 2008. 156 s. [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: http://www.crash-network.com/CrashAnalysisCriteria_2.1.1.pdf.

[9] CIPRIANI, A., BAYAN, F., WOODHOUSE, M. a kol. *Low Speed Collinear Impact Severity: A Comparison Between Full Scale Testing and Analytical Prediction Tools with Restitution Analysis.* Detroit: SAE International, 2002. DOI 10.4271/2002-01-0540.

[10] ERNST, T. *Accident Reconstruction Guidelines* [online]. Graz: Graz university of technology, 2003. 135 s. [cit. 2014-02-04]. Dostupné z: http://www.vsi.tu graz.at/pendant/download/D4%20Accident%20Reconstruction%20Guidelines.pdf.

[11] *EuroNCAP: For Safer Cars* [online]. Brusel: EuroNCAP, 2014. [cit. 2014-02-17]. Dostupné z: http://www.euroncap.com/home.aspx.

[12] HARMATI, I., VÁRLAKI, P. *Identification of Energy Distribution for Crash Deformational Processes of Road Vehicles* [online]. Budapešť: Acta Polytechnica Hungarica, 2007. s. 19-28. [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: http://www.uni-obuda.hu/journal/Harmati_Varlaki_10.pdf.

[13] HOWARD, R., BOMAR, J., BARE, C. *Vehicle Restitution Response in Low Velocity Collisions*. Washington DC: SAE Technical Paper,1993. DOI 10.4271/931842.

[14] HUANG, M. *Vehicle crash mechanics*. Boca Raton: CRC Press, 2002. 481 s. ISBN 08-493-0104-1.

[15] HUGEMANN, W. a kol. *Unfallrekonstruktion*. 1. vyd. Münster: Autorenteam, 2007. s. 649-1254. ISBN 30-001-9419-3.

[16] JANÍČEK, P., MAREK, J. a kol. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013. 592 s. ISBN 978-80-247-4127-7.

[17] JANÍČEK, P. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí*. 1. vyd. Brno: CERM, 2007. s. 683-1234. ISBN 978-80-7204-556-32.

[18] KALTHOFF, W. The Coefficient of Restitution on Rear-End Collisions - New Findings. In *17th EVU Conference*. Nice: EVU France, 2008. s. 281 - 286.

[19] KASANICKÝ, G. *Teória pohybu a rázu pri analýze a simulácii nehodového deja*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2001. 350 s. ISBN 80-710-0597-5.

[20] *Latin NCAP: Para Autos Mas Seguros* [online]. Montevideo: Latin NCAP, 2013. [cit. 2014-02-17]. Dostupné z: http://www.latinncap.com/en/.

[21] MCHENRY, B. G. *Energy Correction Factor and Coefficient of Restitution* [online]. Cary: McHenry Software, Inc., 2008. 4 s. [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: http://www.mchenrysoftware.com/forum/McHenry_ECF.pdf.

[22] MCHENRY, B. G. *The algorithms of CRASH* [online]. Cary: McHenry Software, Inc., 2001. 37 s. [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: www.mchenrysoftware.com.

[23] MORELAND, J. D. *Damage Index: A Scale for Assessing Car Damage.* Harmondsworth: Road Research Laboratory, 1962. s. 1-11.

[24] MELEGH, G. *CD-EES 4.0* [CD-R]. Hungary: AutoExpert Hungary, 2005.

[25] *PC-CRASH 9.1* [CD-R]. Linz: DSD, Dr. Steffan Datentechnik Ges.m.b.H., 2011.

[26] PRASAD, A. K. *CRASH3 Damage Algorithm Reformulation for Front and Rear Collisions*. Warrendale: SAE International, 1990. DOI: 10.4271/900098.

[27] PTÁČEK, P. Chyby ve znaleckých posudcích. In *Soudní inženýrství*. 10. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1999., s. 119-122. ISSN 1211-443X.

[28] *Query Vehicle Crash Test Database* [online]. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2014. [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/database/VSR/veh/QueryVehicle.aspx.

[29] RÖHRICH, W. *Die Verteilung der Energiaufnahmefähigkeit bei PKW: Strukturen und Anwendungsmöglichkeiten bei der Unfallanalyse*. Berlín: TU Berlín, 1977.

[30] SEIFFERT, U., WECH, L. *Automotive safety handbook*. 2 vyd. Warrendale: SAE International, 2007. 293 s. ISBN 978-0-7680-1798-4.

[31] SCHAPER, D. Určení střetové rychlosti podle deformace havarovaného vozidla. In *Automobil*. 3. vyd. 1981.

[32] SCHIMMELPFENNIG, K., H., PTÁČEK, P. Die Analyse von Serien-Auffahrunfällen mit Hilfe des Delta V-Schrirr-Verfahrens. In *Verkensunfall und Fahrzeugtechnik*. 3 vyd. 1984. s. 73-75.

[33] SMITH, R., TSONGOS, N. *Crash Phase Accident Reconstruction*. Warrendale: SAE International, 1986. DOI 10.4271/860209.

[34] STEFFAN, H. *PC-Crash: Technický manuál* [online]. Linz: DSD, Dr. Steffan Datentechnik Ges.m.b.H., 2010. 298 s. [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: http://www.pccrash.cz/files/manualy/pcc90sk.pdf.

[35] STROHRER, CH. E.,WOLLEY, R. L., JAMES, M. B. a kol. *Crush energy in accident reconstruction*. Warrendale: SAE International, 1986. DOI 10.4271/860371.

[36] SUCHA, D. *Virtual Crash 3.0* [CD-R]. Bratislava: Virtual Crash, 2013. Dostupné z: http://www.vcrash3.com/download/vcrash3full.exe.

[37] SUMMERS, S., PRASAD A., HOLLOWEL, W. *NHTSA's Compatibility Research Program Update.* Warrendale: SAE International, 2001. DOI 10.4271/2001-01-1167.

[38] VANGI, D., BEGANI, F. Energy loss in vehicle collisions from permanent deformation: an extension of the Triangle Method. In *Vehicle System Dynamics*. London: Taylor & Francis Group, 2013. s. 857-876. DOI 00423114.2013.770538.

[39] VANGI, D., BEGANI, F. The Triangle Method for Evaluation. In *19th EVU Congress*. Brno: Tribun EU s.r.o., 2010. s. 265-299. ISBN 978-80-7399-128-9.