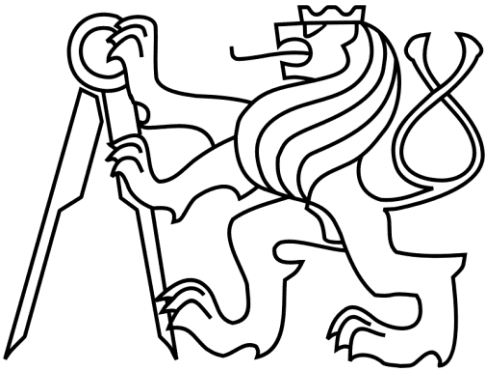
České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie



Materiálová a konstrukční analýza silničních záchytných systémů

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Jiří Studnička

Doktorský studijní program:	P3604 - Stavební inženýrství
Studijní obor:	3911V005 - Fyzikální a materiálové inženýrství
Školitel:	prof. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.
Praha	2019

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Jiří Strudnička

Název disertační práce: Materiálová a konstrukční analýza silničních záchytných systémů

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Zbyška Pavlíka, Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Tato disertační práce vznikla z podnětu Technického a zkušebního ústavu stavebního Praha, s.p. pro účely certifikace silničních záchytných systémů dle ČSN EN 1317-5.

V Praze dne 28. ledna 2020 Ing. Jiří Studnička
podpis

Na tomto místě bych rád upřímně poděkoval mému vedoucímu práce prof. Ing. Zbyškovi Pavlíkovi, Ph.D. za vedení práce, cenné rady, poskytnuté materiály a zejména za všestrannou pomoc a podporu. Poděkování patří také mým spolupracovníkům z Technického a zkuševbího ústavu stavebního Praha, s.p. Ing. Stanislavu Vanišovi, Ing. Michalu Holíkvi, Romanu Ondruškovi, Martinu Peškovi a z firmy K.I.K s.r.o. RNDr. Tomáši Weberovi, Ing. Pavlu Jedelskému. Zapomenout nesmím ani na přispění a podporu mých nejbližších – děkuji.

Abstrakt disertační práce:

Hlavním cílem disertační práce bylo stanovení metody pro vývoj a validaci postupů pro počítačové modelování dějů zjištěných při reálných nárazových zkouškách záchytných systému a to s možností využití výsledků zkoušek provedených v minulosti. V současnosti je používán velice rozličný sortiment svodidel, a to jak z hlediska použitých materiálů, konstrukčního provedení, druhuju použití a tříd zádržné schopnosti. Tato disertační práce se věnuje záchytným systémům pro vozidla na pozemních komunikacích svodnicového typu z oceli pro třídy zadržení T1 – H4b. Při disertační práci bylo analyzováno cca 100 reálně provedených nárazových zkoušek realizovaných v České republice v období let 2002 – 2019, ke kterým je k dispozici veškerá předepsaná technická dokumentace výrobce, způsob instalace zkušebního vzorku a úplné záznamy z měření fyzikálních hodnot účinků nárazu a předepsané záznamy z rychloběžných kamer. V rámci disertační práce byla provedena analýza údajů z provedených reálných zkoušek a rozbor možností, jakým způsobem ze zjištěných údajů vytěžit další technické informace pro nadstavbové činnosti se zaměřením na počítačové 3D modely. Byly popsány děje, ke kterým dochází v krátkém časovém úseku při nárazu vozidla a při přetváření záchytného systému vlivem absorpce kinetické energie vozidla při nárazu v čase. Následně bylo definováno namáhání kritických částí a dílů konstrukce ocelového záchytného systému. Vyvinutá metoda vychází z obrazové analýzy videozáznamu z rychloběžných kamer. K hodnotám zjištěných obrazovou analýzou byly následně přirazeny další technické hodnoty, které byly použity jako vstupy do programů na 3D modelace. Závěrem byly stanoveny přípustné tolerance odchylek hodnot vytvořeného 3D počítačového modelu od reálného 3D modelu. Na základě výsledků disertační práce byly navrženy a formulovány metodiky pro zkoušení a ověření modifikace silničních záchytných systémů a validaci počítačových modelů silničních záchytných systémů a jejich modifikace.

Klíčová slova: *záchytný systém pro vozidla, modifikace, certifikace, funkční charakteristiky, obrazová analýza, verifikace, validace, materiálová analýza, numerický model, virtuální zkoušky, reálné zkoušky, pasivní bezpečnost, silniční komunikace, typová zkouška*

Abstract of the dissertation:

The main aim of the dissertation thesis was to establish a method for the development and validation of procedures for computer modelling of effects detected during real crash tests of road restraint systems with the possibility of using the results of tests performed in the past. At present, a very diverse range of crash barriers is used, namely in terms of materials used, construction, type of use, and retention classes respectively. This dissertation thesis focuses on road restraint systems made of steel with beam(s) classes T1 - H4b. Within the dissertation thesis, approximately 100 real crash tests carried out in the Czech Republic in the period 2002 - 2019 were analysed, which have all the prescribed technical documentation of the manufacturer, the method of installation of the test sample and complete records of physical measurements and high-speed cameras records. In the framework of the dissertation, the data from the real tests was analysed together with the possibilities how to extract new technical information for the extension activities with a focus on computer 3D models. Processes that occur over a short period of time during a vehicle impact and during the deformation of the restraint system due to absorption of the kinetic energy of the vehicle in a crash over time have been closely described. After that the stresses of the critical parts and components of the steel restrain systems structure were defined. The developed method is based on the analysis of high speed cameras records. Additional technical parameters were then added to the values determined by image analysis, which were used as inputs for 3D modelling programs. Finally, the tolerances of deviations of the values obtained by the created 3D computer model from the real 3D model were assessed. Based on the results of the dissertation thesis, methodologies for testing and verification of modifications of road restraint systems and validation of computer models of road restraint systems and their alterations were designed and formulated.

Key words: *vehicle restraint systems, modification, certification, performance characteristics, analysis of records, verification, validation, material analysis, numerical model, virtual tests, real tests, passive safety, road communication, type test*

Obsah

	Úvod	9
1	**Rozbor současného stavu problematiky**	11
1.1	Fyzikální mechanismy při nárazu do pevné překážky	11
1.2	Měření pro zjišťování fyzikálních veličin při zkouškách stavebních výrobků nárazem vozidla	12
1.3	Měření prováděná před nárazem	13
1.4	Měření prováděná v průběhu nárazu	16
1.5	Měření po nárazu vozidla	18
2	**Rozbor problému**	20
3	**Cíle disertační práce**	23
4	**Experimentální část a diskuse**	24
4.1	Obrazová nanalýza videozáznamů rychloběžných kamer	21
4.2	Stanovení ohybových a krouticích momentů na základě obrazové analýzy záběrů z rychloběžných kamer	27
4.2.1	Zjištění a ověření výsledků postupu stanovení hodnot namáhání prvků ocelového záchytného systému	28
4.2.2	Experimentální ověření dynamického účinku nárazu pomocí kinetické energie padajícího beranu	32
4.3	Validace počítačových modelů silničního záchytného systému	33
5	**Aplikace experimentální části**	35
5.1	Příklad modifikace ocelového záchytného systému – změna druhu oceli	35
5.2	Příklad validace modelu ocelového záchytného systému s integrovanou stěnou	41
6	**Závěr**	45
	Citovaná literatura a dokumenty	47
	Navazné technické dokumenty a předpisy	49
	Související literatura	50

Přílohy:

Příloha č.1	Metodika pro zkoušení a ověření modifikace silničních záchytných systémů počítačovou simulací
Příloha č.2	Protokol o zkoušce č. 09E H3
Příloha č.3	Metodika validace počítačových modelů silničního záchytného systému a jejich modifikace

Seznam použitých symbolů

ASI	Acceleration Severity Index	Index prudkosti nárazu
CoG	Centre of gravity	Těžiště (vozidla)
D	Dynamic deflection	Dynamický průhyb
D_m	Measured maximum Dynamic Deflection of the real test, in metres (m)	Maximální naměřeny dynamický průhyb při skutečné zkoušce v metrech (m)
$D_{m\ mod}$	Measured maximum Dynamic Deflection of the real test with a tolerance or ±0,15m, in metres (m)	Maximální naměřeny dynamický průhyb při skutečné zkoušce v metrech s připočtenou tolerancí ±0,15 m
D_{VT}	Measured maximum Dynamic Deflection of the virtual test, in metres (m)	Zjištěný maximální dynamický průhyb z virtuálního zkoušky v metrech (m)
FE	Finite elements	Konečné prvky
FEA	Finite elements analysis	Analýza metodou konečných prvků
HGV	Heavy goods vehicle	Těžké nákladní vozidlo
LD	Lateral displacement	Boční psun
LD_m	Measured Lateral displacement of the real test, in metres (m)	Naměřený boční posun při reálné zkoušce v metrech (m)
$LD_{m\ mod}$	Measured Lateral displacement of the real test with a tolerance or ±0,15m, in metres (m)	Naměřený boční posun při reálné zkoušce v metrech (m) s připočtenou tolerancí ±0,15 m
LD_{VT}	Measured Lateral displacement of the virtual test, in metres (m)	Naměřený boční posun při virtuální zkoušce v metrech (m)
MB	Multi-body	Multi-body simulace
MBA	Multi-body analysis	Analýza Multi-body simulace
THIV	Theoretical Head Impact Velocity	Nárazová rychlost teoretické hlavy
TT	Type Test	Typová zkouška
VI	Vehicle intrusion	Vniknutí do vozidla (do konstrukce záchytného systému)
VI_m	Measured Vehicle Intrusion of the real test, in metres (m)	Vniknutí do vozidla při skutečné zkoušce v metrech (m)
$VI_{m\ mod}$	Measured Vehicle Intrusion of the real test with a tolerance or ±0,15m, in metres (m)	Vniknutí do vozidla při skutečné zkoušce v metrech (m) s připočtenou tolerancí ±0,15 m
VI_{VT}	Measured Vehicle Intrusion of the virtual test, in metres (m)	Vniknutí do vozidla při virtuální zkoušce v metrech (m)
VT	Virtual test or virtual testing	Virtuální zkouška
W	Working width	Pracovní šířka

W_m	Measured Working Width of the real test, in metres (m)	Pracovní šířka změřená při skutečné zkoušce v metrech (m)
$W_{m\ mod}$	Measured Working Width of the real test with a tolerance or ±0,15m, in metres (m)	Pracovní šířka při skutečné zkoušce v metrech (m) s připočtenou tolerancí ±0,15 m
W_{VT}	Measured Working Width of the virtual test, in metres (m)	Pracovní šířka zjištěná při virtuální zkoušce v metrech (m)

Úvod

Zvýžení pasivní bezpečnosti při používání silničních komunikací je hlavní motivací pro zjišťování chování stavebních výrobků používaných na pozemních komunikacích z hlediska jejich chování při nárazech vozidel. Tomuto se věnuje obor, který je souhrnně nazýván „Pasivní bezpečnost pozemních komunikací“ [1-2]. Evropská legislativa zavedla tento pojem formou základního požadavku v NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011, „bezpečnosti při užívání“ staveb [3]. Při užívání dopravních staveb mají stavební výrobky a použitá zařízení v případě nárazů vozidel v maximálně možné míře eliminovat následky dopravních nehod, kdy se vozidla mohou:

- zřítit se z nechráněné krajnice nebo mostu;
- narazit do silničního vybavení, zábran nebo překážek vedle vozovky;
- srazit se s jinými uživateli stavebního objektu především s protijedoucími vozidly;
- převrátit nebo jinak ztratit stabilitu do té míry, že pro cestující uvnitř dopravního prostředku nebo jiným uživatelům stavebního objektu vznikne riziko úrazu.

Tento základní požadavek je následně konkretizován soustavou harmonizovaných evropských norem [4, 5, 6,], které řeší připouštění stavebních výrobků tohoto charakteru na evropský trh. Jedná se především o následující výrobky:

- záchytné systémy pro vozidla,
- osvětlovací stožáry,
- portály dopravního značení,
- nosiče svislých dopravních značek.

Pro ilustraci pojmu pasivní bezpečnosti si dovoluji uvést jeden typický příklad dopravní nehody, která se odehrála v České republice na dálnici D1.

Nákladní vozidlo o celkové hmotnosti 40 000 kg při jídě vybočilo z přímého směru jízdy, prorazilo záchytný systém ve středním dělícím pásu, nanejelo do protisměrného jízdního pruhu kde se střetlo s vozily v protisměru.

:

Obrázek 1 Fotodokumentace nehody na dálnici D1

Vyšetřovatelé uzavřeli vyšetřování s následujícím konstatováním. Nehodu zavinil řidič kamionu, který přejel přes svodidla do protisměru a srazil dvě dodávky a jedno osobní auto. Všechna tři vozidla pak skončila v příkopu. V jednom ze tří aut zemřel pasažér. Jedna z dodávek začala po srážce hořet. Dále byly zraněny další 4 osoby z toho jeden sedmiletý chlapec [16].

Z těchto situací vyplymula potřeba zjistit fyzikálních vlastnosta chování silničních záchytných systémů pomocí reálně prvedené nárazové zkoušky při dodržaní standardizovaných podmínek.

Vývoj nárazových zkoušek záchytných systémů započal již ve 30. letech minulého století v USA současně s rozvojem dálniční sítě a rychlostních komunikací. V Evropě se požadavky na pasivní bezpečnost dálnic a rychlostních silničních komunikací začaly formulovat po druhé světové válce opět s rozvojem tranzitní a osobní dopravy na dálnicích. Nastala potřeba sjednocení technický požadavků a způsoby jejich zjištění a vyhodnocení. K tomu byla založena v rámci evropské normalizace CEN pracovní skupina TC 226, která se dále člení do pracovních skupin (WG) a tematických skupin (TG). Pro zkoušky záchytných systému vnikly normy řady EN 1317 [4, 5, 6] a EN 12767 [17].

- EN 1317 – 1 Silniční záchytné systémy-Část 1: Terminologie a obecná kritéria pro zkušební metody [4];
- EN 1317 – 2 Silniční záchytné systémy-Část 2: Svodidla - Třídy funkčních charakteristik, kritéria přijatelnosti zkoušek nárazem a zkušební metody [5];
- EN 1317 – 5 Silniční záchytné systémy - Část 5: Trvanlivost a hodnocení shody[6]
- EN 12767 Pasivní bezpečnost podpěrných konstrukcí zařízení na pozemní komunikaci – Požadavky a zkušební metody.

Tyto normy specifikují požadavky na druhy a třídy zádržných systému pro vozidla. Norma ČSN EN 1317-5[6], harmonizuje požadavky na jednotnou certifikaci jako stavební výrobek dle Nařízení Evropského parlamentu a Rady EU č. 305/2011 (CPR) [3].
Tento technický a právní rámec dal podnět ke vzniku zkušebních laboratoří převážně akreditovaných dle ČSN EN ISO/IEC 17025 [18], které jako nezávislá „třetí strana“ prováděly zkoušky záchytných systému na základě zadání certifikačních orgánů. Cerifikační orgány pak vhodnotí výsledky zkoušek, provádějí kategirizaci základních sledovaných prarametrů, určují podmínky pro projektování způsoby instalace na silničních komunikacích. Dále schvalují přípustné modifikace a odchylky ve způsobu instalace na silničních komunikacích. Pro tyto případy chyběly technické a metodické prostředky pro doložení postupů.

1. Rozbor současného stavu problematiky

1.1 Fyzikální mechanismy při nárazu do pevné překážky

Při nárazu vozidla do pevné překážky dojde k prudkému zpomalení vozidla a tedy i všech předmětů i osob ve vozidle. Fyziolognomické působení přetížení na člověka se projevuje dvěma směry. Jednak ztěžuje vnitřní orgány těla a jednak způsobuje přelévání krve v těle (překrvení a odkrvení). Nejmenší výdrž má lidské tělo ve směru nohy - hlava (negativní přetížení). V tomto směru člověk trvale nevydrží ani 1 g. V opačném směru (hlava - nohy) vydrží po dobu až stovky sekund přetížení až 3 g. Nejlépe člověk snáší přetížení ve směru hruď - záda (po dobu desítek sekund snese 15 až 20 g). V této poloze proto obvykle létají kosmonauti. Popsat matematicky zcela přesně děj odehrávající se po nárazu vozidla do překážky z pohledu účinků na osobu (v dalším textu použit termín „osádka“) připoutanou bezpečnostními pásy k sedadlu vozidla je v obecné poloze prakticky nemožné. Bylo by to natolik složité, že by použití pro dané konkrétní vyhodnocení nehodového děje vyžadovalo

definovat převážnou většinu z mnoha vstupních parametrů výpočtu vždy znovu, tj. každé posouzení by bylo unikátní. Lze však jistě přijmout jisté omezující předpoklady celého nárazového děje a pomocí nich pak zjednodušeně popsat obecné účinky nárazu na tělo řidiče.

Předpokládejme, že:

- řidič je uvažován jako hmotný bod bez jakéhokoliv vlivu deformace kostry i těla, vlivu bezpečnostních pásů, airbacků apod.,
- vozidlo naráží na překážku kolmo a deformace (překážky i vozidla před řidičem) je rovnoměrně plynulá, tj. lze uvažovat s rovnoměrným zpožděním v průběhu celé dráhy deformace,
- vozidlo před nárazem jede po prostorové vodorovné přímce konstantní rychlosti pouhou setrvačností (bez předchozí akcelerace nebo decelerace), jsou zanedbány veškeré jízdní odpory a součet deformací před řidičem je konstantní v dané konkrétní hodnotě.

Jedním z faktorů, který se významnou mírou podílí na poškození těla řidiče je „zrychlení“ (v daném případě „zpoždění“) pohybu. Zrychlení (zpoždění) je jednou z charakteristik pohybu, udávající závislost změny rychlosti pohybu na čase. Zrychlení má rozměr [$m.s^{-2}$] a lze je odvodit derivací funkce rychlosti podle času. Je-li rychlost v čase rostoucí, pak je derivace funkce kladná – zrychlení má kladnou hodnotu, je-li rychlost v čase klesající, pak je derivace záporná – zrychlení má zápornou hodnotu a v tom případě mluvíme o „zpoždění“. Zpoždění lze tedy považovat za zrychlení se záporným znaménkem a veškeré úvahy tak lze převést na situaci zrychlení, kterému v konečné podobě je přiřazeno záporné znaménko. Na tomto základním předpokladu je založeno zjišťování schopnosti přežití posádky ve vozidle, které je vyjádřeno ve dvou základních ukazatelích:

- indexu prudkosti nárazu
- teoretické rychlosti hlavy řidiče při nárazu.

Pro zjištění těchto hodnot je potřeba provést celou řadu měření a dílčích úkonů, které jsou popsány v následující kapitole.

1.2 Měření pro zjišťování fyzikálních veličin při zkouškách silničních záchytných systémů nárazem vozidla

Pro silniční svodidla byly v Evropské unii standardizovány zkušební metody a kritéria přijatelnosti. Požadavky jsou uvedeny v ČSN EN 1317-1,2 [4,5] Předmětem těchto norem je stanovení terminologie, obecná kriteria, funkční třídy, zkušební metody a kriteria přijatelnosti

nárazových zkoušek. Ve stručnosti lze říci, že pasivní bezpečnost u svodidel je dána těmito základními charakteristikami:

- indexem prudkosti nárazu (ASI), který vypovídá o schopnosti přežití posádky v osobním vozidle;
- úrovní zadržení - tento parametr vypovídá o velikosti vozidla, které je schopen zádržný systém zadržet a přesměrovat;
- deformací - pracovní šířkou - tato hodnota udává potřebný volný prostor, který musí být při instalaci za svodidlem zachován, aby v případě nárazu vozidla byly zachovány všechny jeho bezpečnostní funkce.

Pro zjištění těchto základních charakteristik svodidla je potřeba provést celou řadu přesných, vzájemně provázaných měření, která lze rozdělit do tří kroků:

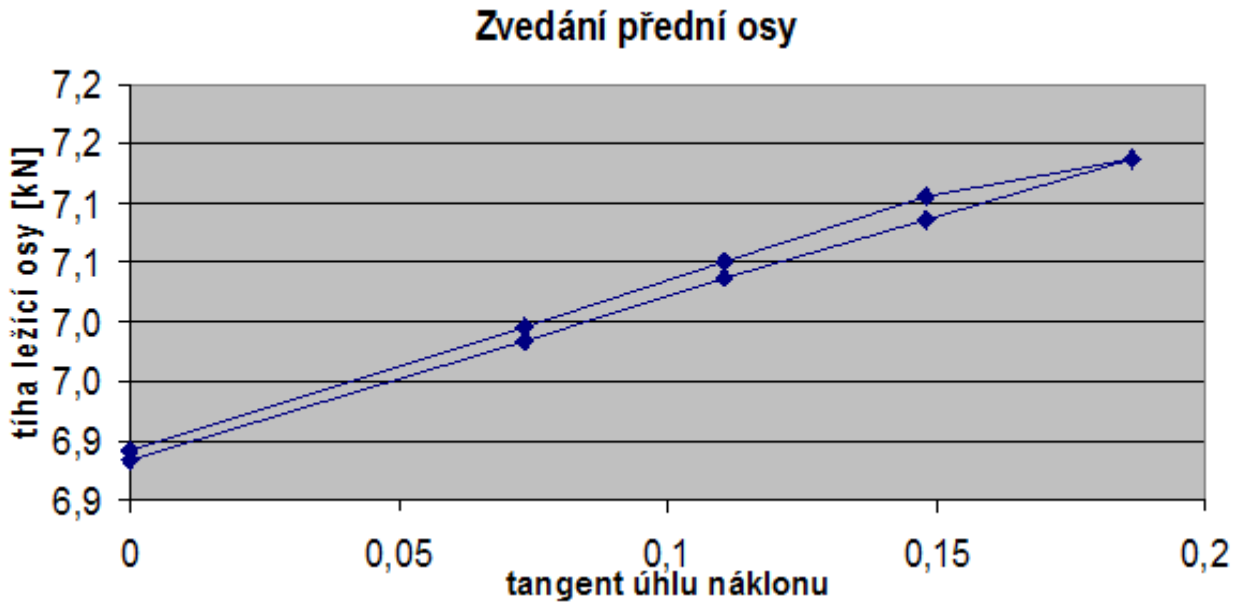
- měření na zkušebním vozidle a měření zkušebního vzorku před nárazem;
- měření v průběhu nárazu zkušebního vozidla;
- měření na zkušebním vozidle a měření zkušebního vzorku po nárazu.

1.3 Měření prováděná před nárazem

Pro stanovení indexu prudkosti nárazu jsou normou předepsána osobní vozidla o celkové hmotnosti od 900 do 1500 kg. Na těchto vozidlech musí být změřeny předepsané rozměrové charakteristiky, jako např. měření prostoru pro posádku. Zde jsou použita délková měřidla: pásmo 50 m - rozšířená nejistota měření $U = \pm (0{,}3 + 0{,}007L\ (m))$ mm koeficient $K = 2$, ocelový svinovací metr 5 m - rozšířená nejistota měření $U = \pm (212 + 3L\ (m))$ μm, koeficient $K = 2$. Velice důležité je zjištění těžiště vozidla. Toto měření je založeno na metodě vážení. (Obr. 2). Vážení je prováděno na speciálním zařízení, které sleduje předepsané kroky postupu měření, automaticky zaznamenává naměřené hodnoty a počítačovým programem vypočte polohu těžiště, které se pak vytyčí pomocí laserového systému. Požadavky na stanovení jsou: rozšířená nejistota měření průměrná = ± 0,48 %, maximální = ± 1,9 % (koeficient K = 2).

Obr. 2 Zařízení pro měření těžiště vozidla ZVST – 01, 10 kN

Výsledkem vážení je následující graf (Obr. 3), ze kterého je vypočteno těžiště vozidla ve třech osách. Vypočtené hodnoty jsou laserovým systémem přeneseny do zkušebního vozidla (Obr.4). Do tohoto místa je následně nainstalován tříosý snímač zrychlení pro snímání dynamického účinku nárazu.



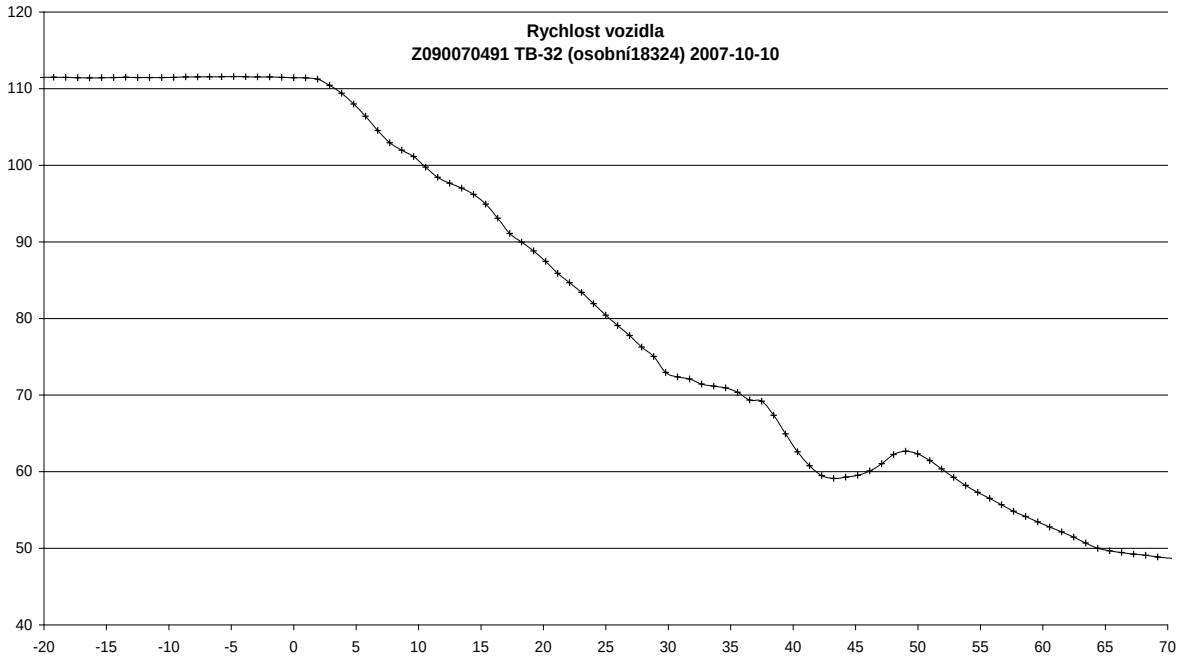
Obr. 3 Výsledek vážení vozidla pro stanovení jeho těžiště

Obr. 4 Vytyčení těžiště ve vozidle laserovým systémem

Výše popsaná metoda vytyčení těžiště ve vozidle byla porovnána s metodou vyvinutou MIDWEST ROADSIDE SAFETY FACILITY University of Nebraska-Lincoln a bylo konstatováno, že nová metoda používaná v ČR je spolehlivější a nižší pracností a vylučuje ovlivnění výsledků měření.

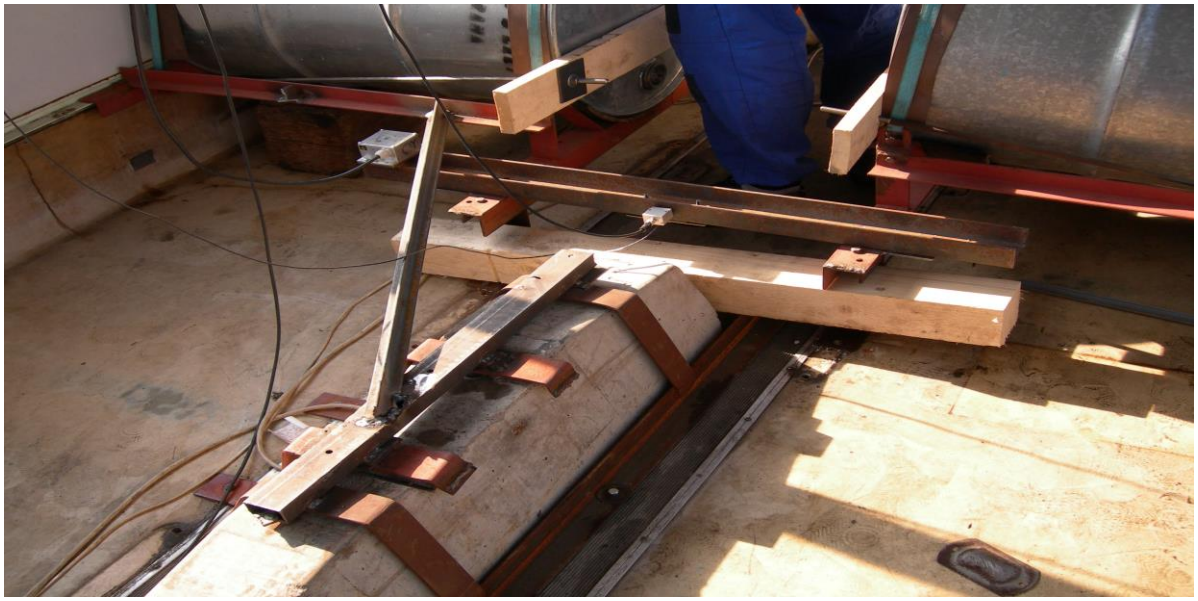
1.4 Měření prováděná v průběhu nárazu vozidla

Měření těsně před a v průběhu nárazu vozidla do bariéry jsou nejnáročnější, protože děje se odehrávají ve velmi krátkém časovém úseku v řádu milisekund. Klíčová měření jsou: měření okamžité rychlosti vozidla, měření trajektorie jeho pohybu a zpoždění při nárazu ve třech osách současně. Hodnoty jsou zaznamenávány s frekvencí 2000 Hz. K měření okamžité rychlosti vozidla je užíván digitální rychloměr s přesností měření na ± 0,5 % umístěný na kole vozu. Příklad změny rychlosti vozidla v průběhu nárazu je uveden na Obr. 5.



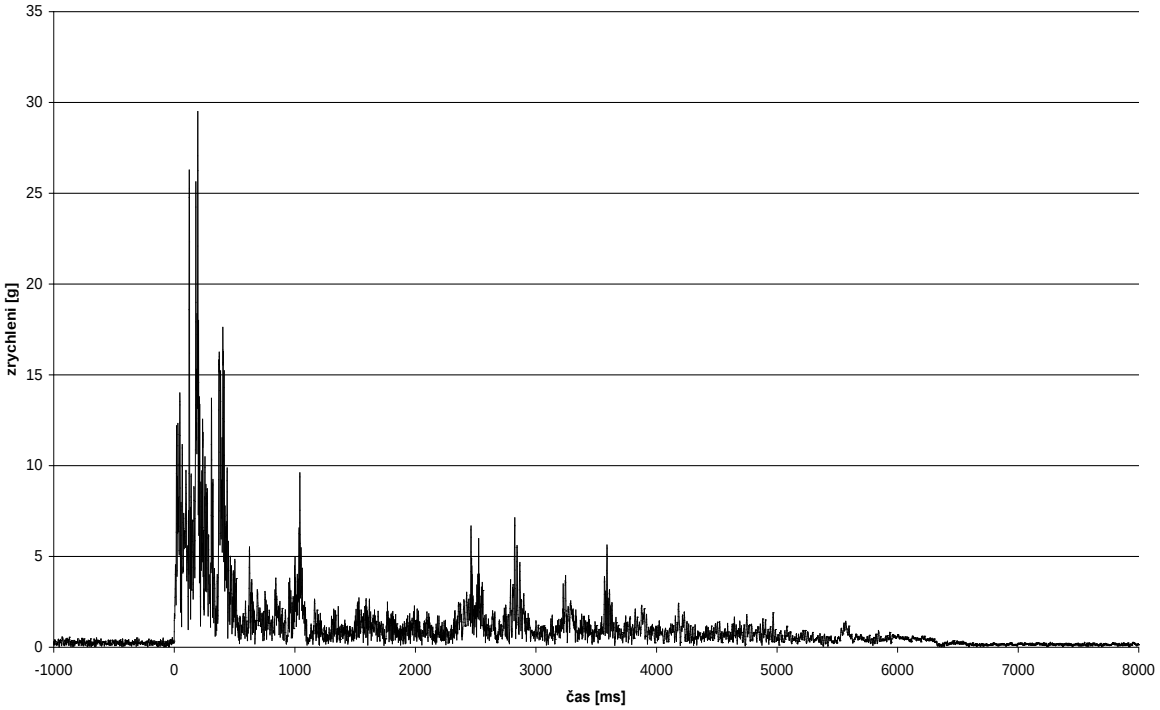
Obr. 5 Charakteristický záznam změny rychlosti v průběhu nárazu vozidla

Pro měření dynamického účinku nárazu je užíván tříosý akcelerometr typ BK - 4520 s frekvencí snímání1000 Hz v měřícím rozsahu ± 500 g. Měřící systém je pro důležitost dat ve vozidle zdvojen. Stanovení trajektorie pohybu před, v průběhu a po nárazu se určuje z hodnot tříosého gyroskopu, jehož přesnost měření je s nejistotou ± 1%. Příklad umístění snímačů dráhy a zrychlení při aplikaci ve zkušebním autobusu je uveden na Obr. 6.



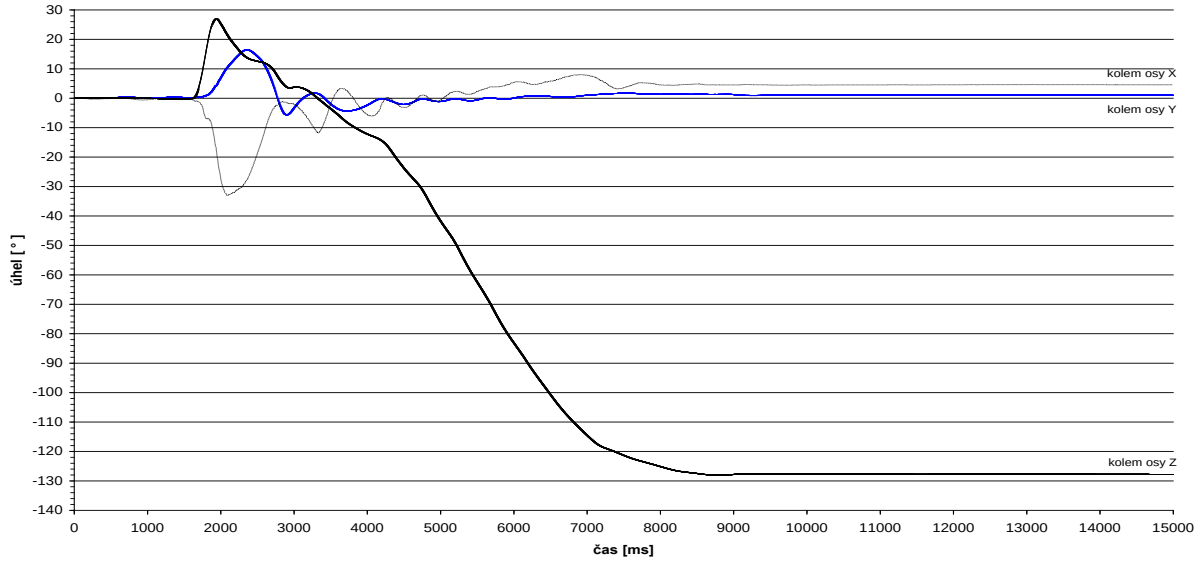
Obr. 6 Umístění snímačů dráhy a zrychlení při aplikaci ve zkušebním autobusu

Charakteristický záznam zrychlení v jedné ose sejmuté tříosím akcelerometrm je demonstrován na Obr. 7.



Obr. 7 Charakteristický záznam zrychlení v jedné ose.

Charakteristický záznam trajektorie vozidla změřené ve třech osách je uveden na Obr. 8.



Obr. 8 Charakteristický záznam trajektorie pohybu vozidla ve třech osách.

1.5 Měření po nárazu vozidla

Po nárazu vozidla je nutno změřit deformaci kabiny vozidla v prostoru pro posádku. K měření délek je užíván svinovací metr 5 m - rozšířená nejistota měření U = ± (212 + 3L (m)) μm koeficient K = 2.

Obr. 9 Měření deformace kabiny vozidla.

K určení deformace záchytného systému musí být zjištěn statický a dynamický průhyb. Statický průhyb je vypočten z přesných geodetických měření instalovaného vzorku systému před a po nárazu. Měření statického průhybu se provádí standardními geodetickými metodami. Mnohem složitější je změření tzv. dynamického průhybu, protože musí být zachycen a změřen maximální průhyb v průběhu nárazu. V minulosti byla používána kontaktní měřidla, která se však neosvědčila, protože s destrukcí svodidla byla zničena i měřidla a takto získané záznamy byly neprůkazné. Selhali i další pokusy zjišťovat dynamický průhyb jinými nekontaktními způsoby měření. Po vyhodnocení všech možností se ukazuje jako reálná metoda zjištění dynamického průhybu využití záznamu rychloběžných kamer.

2 Rozbor problému

Při reálných nárazových zkouškách vozidel jsou v rámci předepsaného zkušebního postupu a předepsaných měření a videozáznamu získány technické údaje, které je nutno přenést do podoby údajů, které si vyžaduje počítačové modelování a verifikovat je jinou nezávislou metodou. Technická data, zjištěná před, v průběhu nárazu a při výjezdu vozidla po nárazu jsou exaktně naměřené fyzikální hodnoty. Problém nastává v případě přenosu kynické energie vozidla a jejího rozložení v čase do zkoušeného vzorku a její absorpce v průběhu nárazu. Toto určuje základní charakteristiky chování zádržného systému.

Tento děj je velice obtížně měřitelný a jediná informace o tomto ději je zakličována ve video záznamech kamer, které jsou předepsaným způsobem rozmístěny. Problém je ve velice omezeném množství využitelných informací, které jsou navíc ovlivněny rušivými vlivy a technickými možnostmi kamerového snímání. K eliminaci těchto vlivů byly vyvinuty analýzy obrazových video záznamů. Následně pak lze vytvořit počítačový 3-D model reálně provedené zkoušky, který je možno použít jako kalibr pro modely vytvořené počítačovou simulací. Dále lze tento model použít pro analýzu přenosu kinetické energie do konstrukce záchytného systému a jeho jednotlivých dílů. Tímto způsobem lze pak zjistit a definovat jejich mechanické namáhání.

V současnosti je používán velice rozličný sortiment svodidel, a to jak z hlediska použitých materiálů, konstrukčního provedení, druhuju použití a tříd zádržné schopnosti.

Jak z předchozích kapitol vyplývá, k zjišťování účinku nárazu na posádku ve vozidle jsou k dispozici fyzikální způsoby měření opřené o jasně určené metody měření, u kterých jsou identifikovatelné přesnosti měření, způsoby kalibrace [14], reprodukovatelnost [12] a další metrologické parametry, které musí mít zkušební laboratoř stanovena tak, aby mohla pracovat v systému akreditace dle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří [10]. Výsledky z nárazových zkoušek převezme pro posouzení a hodnocení certifikační orgán pro výrobky. V praxi po dobu výroby certifikovaného zádržného systému dochází k variantním úpravám a změnám materiálu, technologie výroby a podobně. Certifikační orgán musí reagovat na požadavky držitele certifikovaného systému v rámci pravidelných dohledů nad funkcí systému řízení výroby. K tomuto účelu norma ČSN EN 1317-5 [6]. připouští změny, které se řídí pravily pro modifikace. U ocelových svodidel jsou obecně připuštěny následující modifikace:

1. Změna kotvení mostních sloupků do římsy, pokud při nárazové zkoušce nebyla porušena soudržnost kotev s římsou, ani nebylo na kotvách dosaženo meze kluzu, se považuje za modifikaci kategorie B, změna bude ověřena dynamickou zkouškou nárazem závaží na zakotvený sloupek. V případě, že nové kotvy (kotvení) budou mít vyšší únosnost v tahu, než kotvy použité při nárazové zkoušce, může být od dynamické zkoušky upuštěno a postačí provést srovnávací statickou zkoušku za podmínek shodných jako při nárazové zkoušce (počet kotev, jejich vzdálenost a hloubka ukotvení, kvalita betonu,…).

2. Změna v případech kdy při nárazové zkoušce byla porušena soudržnost kotev s římsou, nebo bylo na kotvách dosaženo meze kluzu, je velmi složitá a musí se posuzovat individuálním způsobem. Pokud dojde k rozhodnutí, že se jedná o modifikaci typu C, provede se nárazová zkouška těžkým vozidlem a lze upustit od nárazové zkoušky TB 11 v souladu s čl. A.5.2. EN 1317-5 [6].

Problém je demonstrován na fotografiích ze zkoušky ocelového záchytného systému, u které došlo k extrémní destrukci a v rámci hodnocení pro CE certifikaci je nutno objektivně vyhodnotit jeho parametry.

Obr. 10 Vzorek ocelového svodidla před zkouškou

Obr.11 Vzorek ocelového svodidla po zkoušce

3 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je navrhnout a následně ověřit metodu stanovení kritérií přijatelnosti konstrukčních a materiálových změn při modifikacích silničních záchytných systémů na základě materiálové analýzy a porovnání jejich základních funkčních prvků vycházející z počítačového modelování dějů zjištěných při reálných nárazových zkouškách záchytných systémů a to s možností využití výsledků zkoušek provedených v minulosti. Na základě verifikovaných počítačových modelů pak provádět modifikace při certifikaci záchytných systémů případně další změny v konstrukci a instalaci záchytných systémů.

Disertační práce je zaměřena na záchytné systémy pro vozidla na pozemních komunikacích svodnicového typu z oceli pro třídy zadržení T1 – H4b definované v ČSN EN 1317-2 [5].

Pro splnění hlavního cíle práce byly formulovány a následně vyřešeny následující dílčí cíle:

- vytvořit metodu obrazové analýzy videozáznamů pro vizualizaci v 3D modelu,
- vytvořit metodu stanovení namáhání částí konstrukce a prvků záchytného systému v průběhu nárazu vozidla,
- zpracovat metodu validace 3D počítačových modelů,
- ověřit metodu na konkrétních případech zatížení záchytných systémů v praxi.

4 Experimentální část a diskuse

4.1 Obrazová nanalýzy videozáznamů rychloběžných kamer

Na základě rozboru videozáznamů provedených zkoušek bylo vytvořeno zadání pro bakalářskou práci s názvem „*Využití obrazové analýzy k vyhodnocení dynamického průhybu silničního záchytného systému*“ která byla řešena ve Filmové akademii Miroslava Ondříčka v Písku pod vedením prof. MgA. Josefa Pecáka studentem BcA. Jiřím Studničkou. Plné znění práce je k dispizici ve Filmové akademii Miroslava Ondříčka v Písku. Proto uvádím pouze princip postupu.

Postup je charakterizován těmito realizačními kroky:

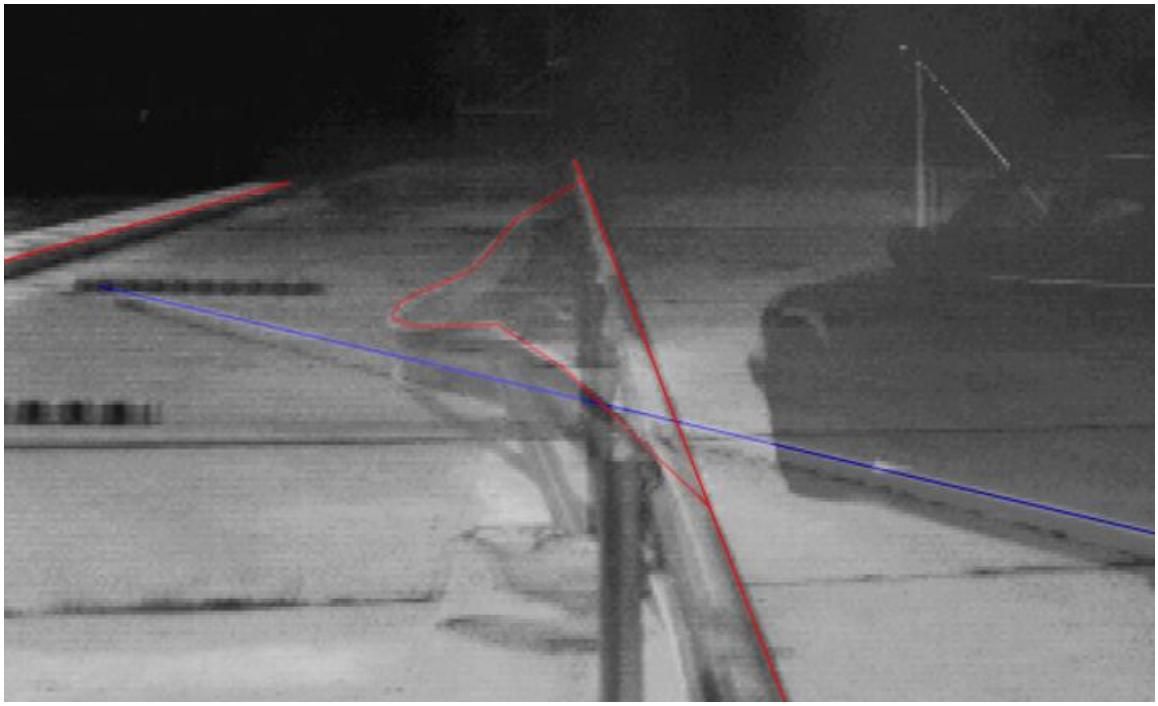
1. Přenos vybraných snímků z videozáznamu do vhodného počítačového programu
2. Superpozice snímků
3. Odečet dat ze snímků
4. Transfer dat do počítačového programu Cinema 3D – vznik virtuálního prostoru
5. Odečet geometrických hodnot

Pro názornost uvádím postup obrazové analýzy v následujících obrázcích.

Krok 2: super pozice snímků - požítačovým způsobem jsou vzájemně prolnuty snímky, které složí pro odměřování.

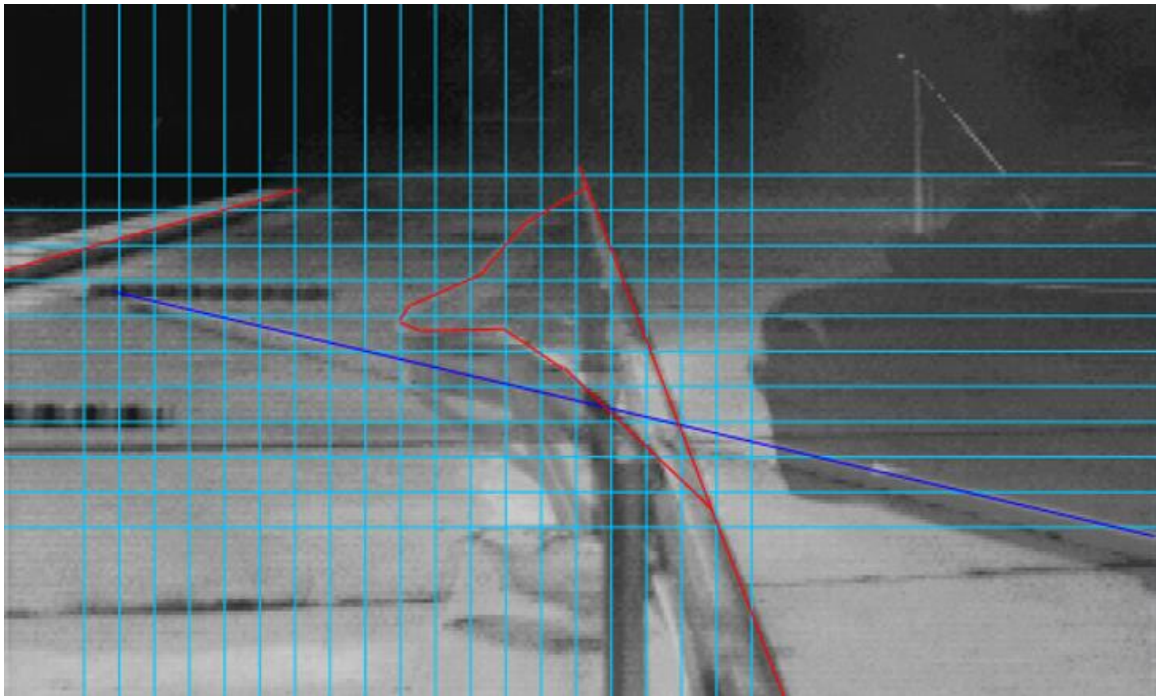
Obr. 12 Super pozice snímk

V kroku 3 - v tomto kroku jsou proloženy základní křivky k odečtu dat ze snímků.



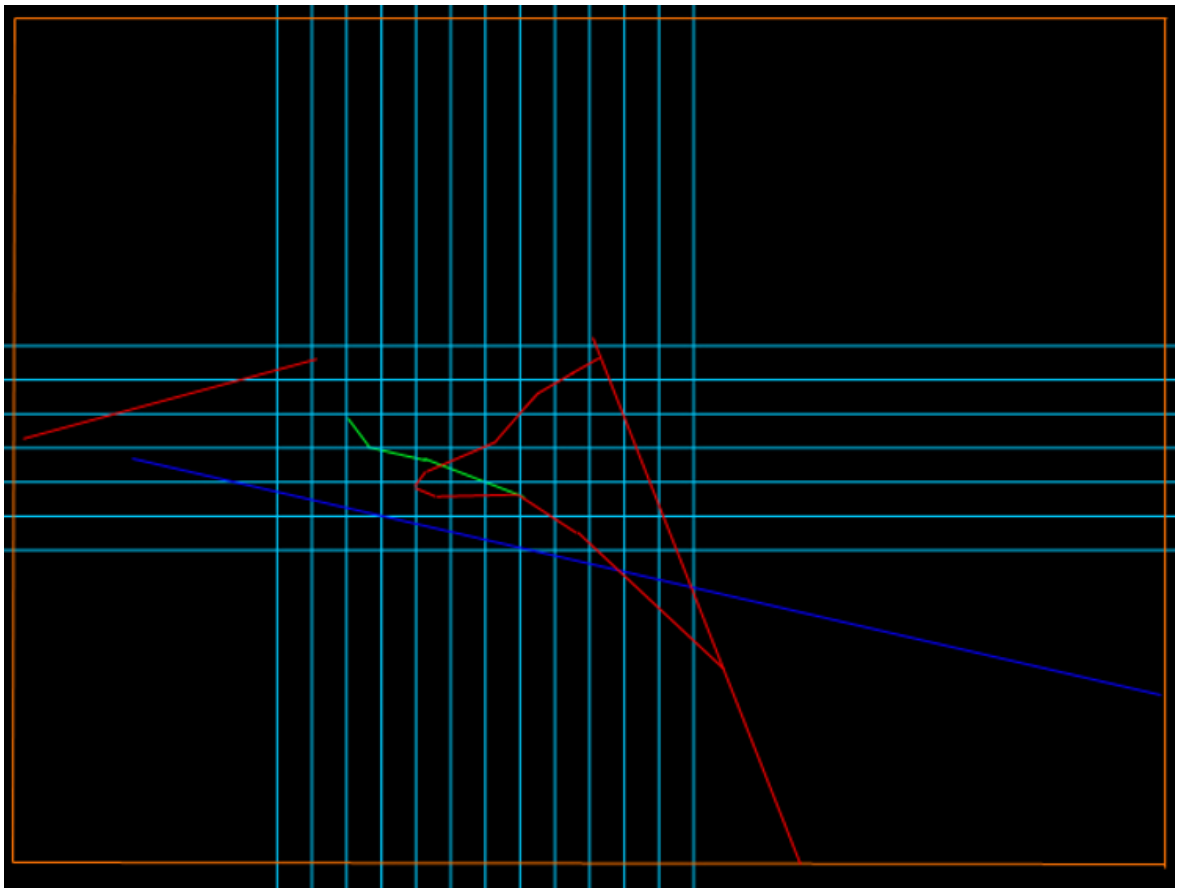
Obr. l3 Odečet dat ze snímků

Po této úpravě snímků je možné sejmout data do počítačového programu Cinema 3D – a vytvořit tak virtuálního prostor.



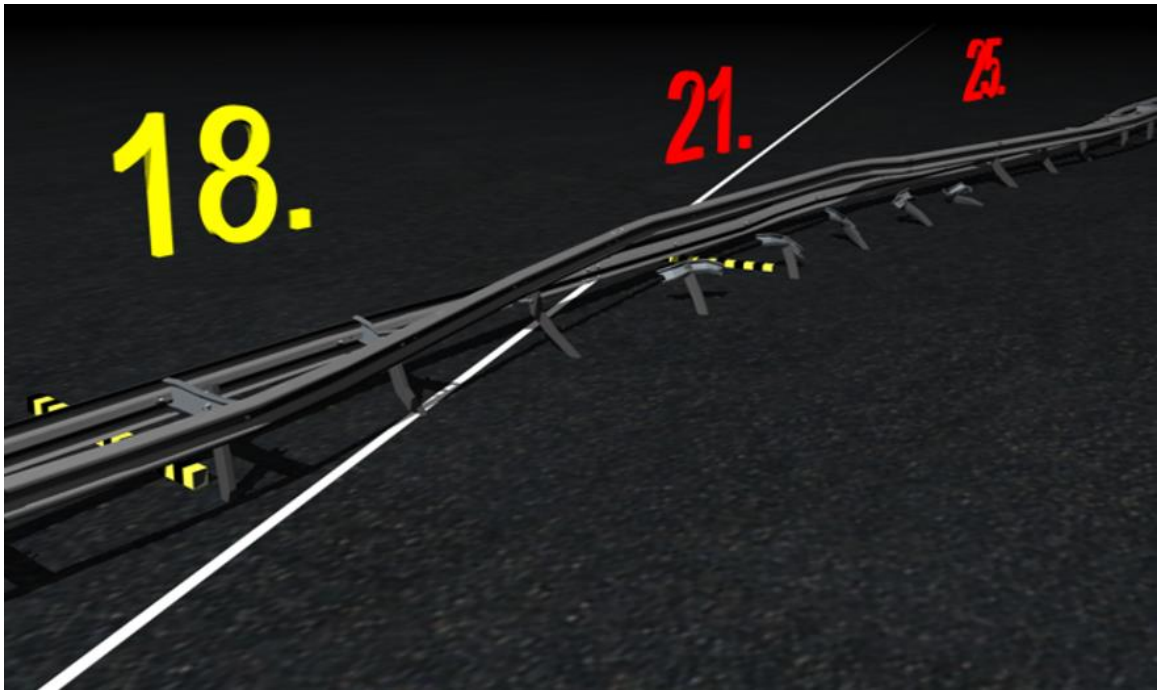
Obr. l3 Přenos dat do virtuálního prostoru

Následně v posledním kroku je možné provést odečet geometrických hodnot pro 3D model (viz Obr. 14).



Obrázek l4 Odečet geometrických hodnot

Transformací záběrů z vysokorychlostních kamer dle předchozího postupu lze převést data do modelové 3D animace. Výsledkem je animace pohybu a deformace konstrukce záchytného systému, která je očištěna od parazitních efektů (zákryt vozidlem, odlesky, zvířený prach, odlesky a podobně). Lze pak vybrat snímek, kde se projevila největší zatížení v průběhu nárazu (Obr. 15).



Obr. 15 Příklad vybraného snímků z 3D animace

Na základě 3D animace je poté možné provést rozbor poměrného zatížení kroutícím a ohybovým momentem jednotlivých prvků záchytného systému. V případě ocelových záchytných systémů jsou kritickým prvkem konstrukce ocelové sloupky v místě jejich kotvení. 3D animace primárně slouží k vizualizaci kinetických dějů s vysokou pravděpodobností skutečného dějeje na základě rekonstrukce obrazových dat. Nejedná se o simulaci děje při zkoušce. Slouží jako přehledný sumář všech zjištěných dat, kdy je možno volit různé úhly pohledu a s určitou pravděpodobností rekonstrukovat nezabíratelné úhly pohledu na děj.

4. 2 Stanovení ohybových a krouticích momentů na základě obrazové analýzy záběrů z rychloběžných kamer

Pro validaci počítačových modelů je potřeba zjistit namáhání jednotlivých prvků záchytného systému. K tomu je nutno zjistit namáhání jednotlivých prvků v průběhu nárazu vozidla, což je velice obtížné vzhledem k velice omezeným možnostem měření hodnot.

Princip vychází z normy ČSN EN 1317-1 příloha B [4], kdy je známa celková kinetická energie vozidla při nárazu a lze tedy vypočítat průměrné síly z jak z kinematiky pohybu vozidla, tak z energetické rovnováhy. Tuto průměrnou sílu lze pak rozložit na jednotlivé

prvky záchytného systému. Příloze B ČSN EN 1317-1 [4] jsou výpočtově pouze určeny pouze průměrné síly ve vztahu k stupni zadržení, tj ve vztahu kinetické energii vozidla (viz Tabulka 1).

Tabulka 1 Průměrné síly při nárazu vozidla [4]

Úroveň zadržení	Kinetická energie	Průhyb lice svodidla m					
	kJ	0,1	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
-		Průměrná síla $\bar{F}$ kN					
T1	6,2	16,8	9,3	5,8	4,2	3,3	2,7
T2	21,5	36,5	24,2	16,7	12,7	10,3	8,6
T3	36,6	46,7	33,8	24,7	19,4	16,0	13,6
N1	43,3	59,2	42,0	30,3	23,7	19,4	16,5
N2	81,9	112,0	79,4	57,2	44,7	36,7	31,1
H1	126,6	93,6	76,6	61,7	51,6	44,4	38,9
H2	287,5	133,0	116,8	100,4	88,1	78,5	70,8
H3	462,1	266,4	227,1	189,8	163,0	142,9	127,1
H4a	572,0	311,3	267,6	225,4	194,7	171,4	153,1
H4b	724,6	269,1	242,1	213,6	191,1	172,8	157,8

4.2.1 Zjištění a ověření výsledků postupu stanovení hodnot namáhání prvků ocelového záchytného systému

Na základě 3D animace je možné provést rozbor poměrného zatížení kroutícím a ohybovým momentem jednotlivých prvků záchytného systému. Rozbor je demonstrován na ocelovém záchytném systému, kde jsou kritickým prvkem konstrukce ocelové sloupky v místě jejich kotvení. Metoda byla aplikována na ocelové svodidlo (Obr.16), na kterém byla provedena zkouška TB 61 dle ČSN EN 1317–1, 2 [4, 5]. Hodnoty z protokolu o zkoušce byly použity se souhlasem jeho majitele, kterým je firma DAK Maďarsko.

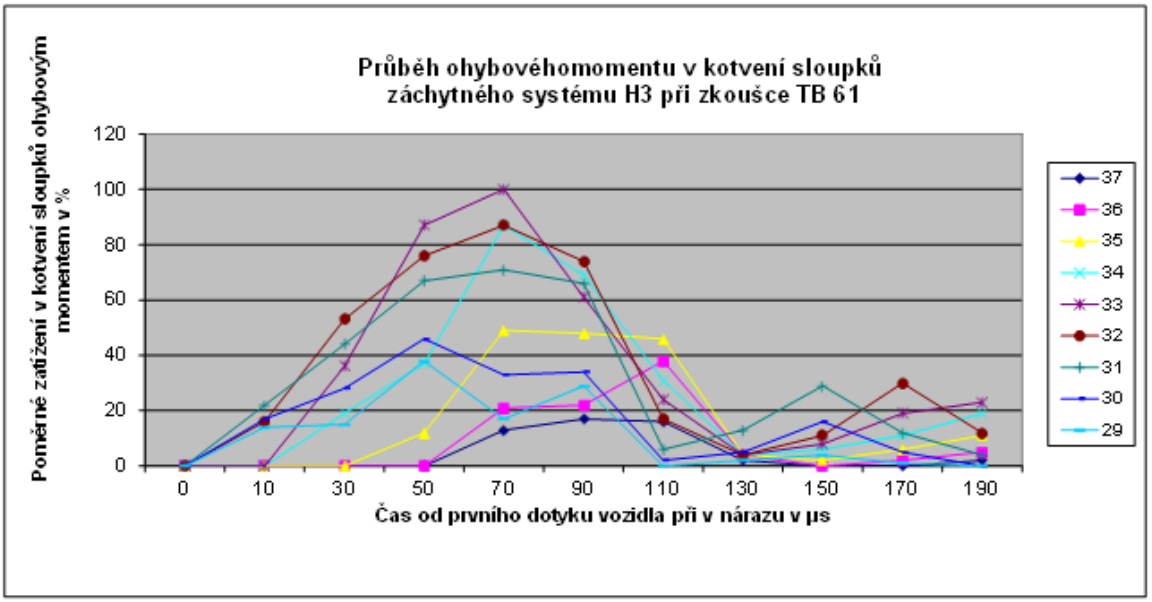
Obr. L6 Ilustrační fotografie deformace záchytného systému po zkoušce

Na základě obrazové analýzy byly zjištěny následující hodnoty namáhání nosných sloupků ocelového záchytného systému a uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2 Poměrné zatížení sloupků ohybovým momentem

Poměrné zatížení ohybovým momentem v kotvení jednotlivých sloupků záchytného systému v (%) v místě nárazu při zkoušce TB 61 dle ČSN EN 1317									
Výrobce systému			xxx						
Typ záchytného systému			**H3**						
	Číslo sloupku ve zkušebním vzorku								
Čas od prvního dotyku μs	37	36	35	34	33	32	31	30	29
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	16	22	17	14
30	0	0	0	19	36	53	44	28	15
50	0	0	12	37	87	76	67	46	38
70	13	21	49	87	100	87	71	33	17
90	17	22	48	69	61	74	66	34	29
110	16	38	46	31	24	17	6	2	0
130	2	4	4	4	4	4	13	5	2
150	0	0	2	6	8	11	29	16	4
170	0	2	6	11	19	30	12	5	1
190	2	5	11	19	23	12	4	0	0

Pro přehlednost uvádím výsledky obrazové analýzy v grafické podobě (Obr. 17)



Obr. 17 Poměrné zatížení sloupků ohybovým momentem v grafickém znázornění

Následným přepočtem lze vypočítat absolutní hodnoty ohybového momentu v kotvení jednotlivých sloupů jak je patrné z Tabulky 3.

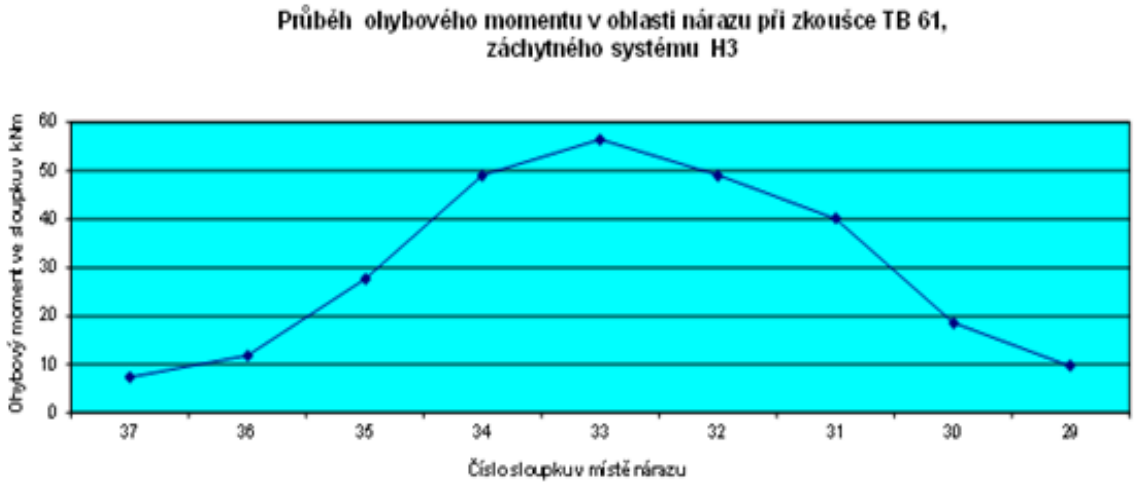
Tabulka 3 Výpočet maximální hodnotyohybového momentu

TB 61, H3 , kinetická energie (kJ)	462,1	Výpočet ohybového momentu v kN								
		Number of beam in impact area								
Číslo sloupku		37	36	35	34	33	32	31	30	29
Relativní ohybový moment v %		13	21	49	87	100	87	71	33	17
Kinetická energie vozidla při úhlu 20° v	92,42	2,5135	4,0603	9,474	16,821	19,335	16,821	13,728	6,3805	3,2869
Deformace D=0,94 m, síla v kN	180	4,8954	7,9079	18,452	32,762	37,657	32,762	26,736	12,427	6,4017
Ohybový moment v kNm		7,3431	11,862	27,678	49,142	56,485	49,142	40,105	18,64	9,6025

Maximální hodnota ohybového momentu v kotvení sloupk 56,5 kNm

Bod působení síly 1,5 m

Dále lze graficky vynést průběh ohybových momentů v jednotlivých sloupcích systému v místě nárazu, jak je uvedeno na Obr. 17.



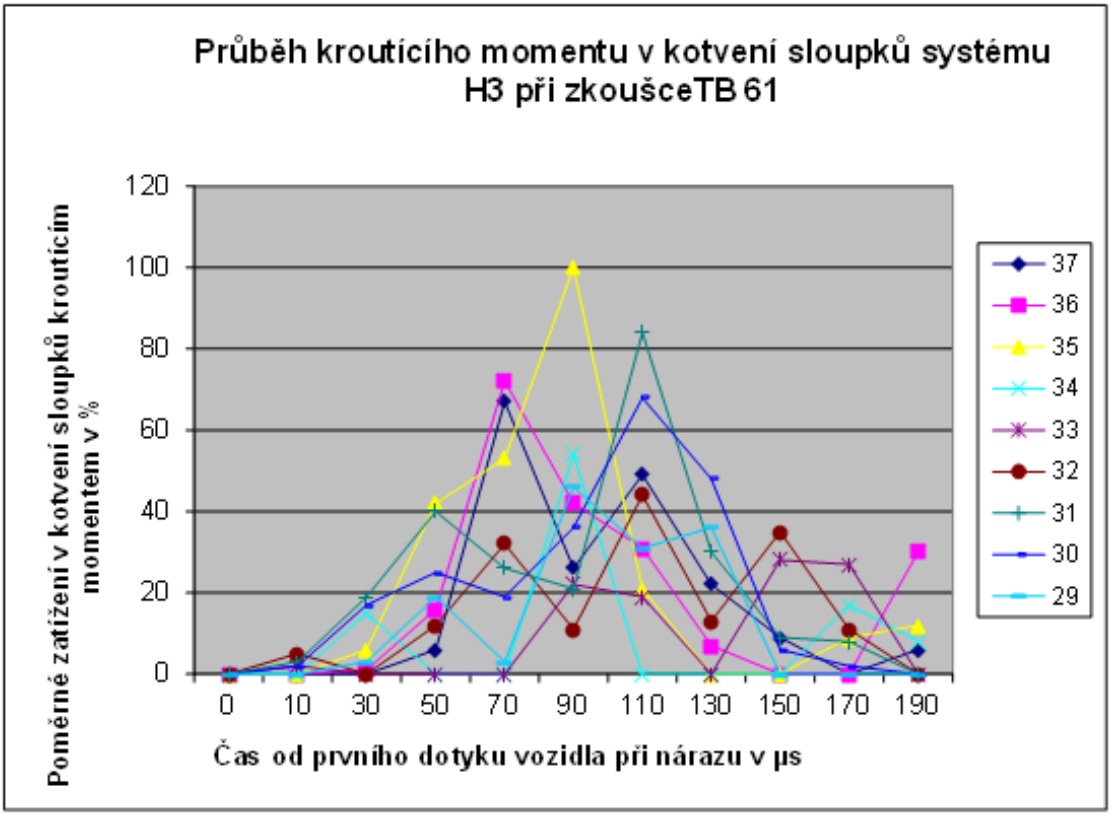
Obr. 18 Průběh ohybového momentu v grafickém znázornění

Stejným postupem pak lze určit ohybové momenty ve sloupcích konstrukce (viz Tabulka 4)

Tabulka 3 Poměrné zatížení sloupků kroutícím momentem

Poměrné zatížení kroutícím momentem v kotvení jednotlivých sloupků záchytného systému v (%) v místě nárazu při zkoušce TB 61 dle ČSN EN 1317									
Výrobce systému									
Typ záchytného systému:			**H3**						
	Číslo sloupku								
Čas pd prvního dotyku vozidla v µs	37	36	35	34	33	32	31	30	29
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	2	5	3	2	0
30	0	1	6	15	0	0	19	17	3
50	6	16	42	0	0	12	40	25	19
70	67	72	53	0	0	32	26	19	3
90	26	42	100	54	22	11	21	36	46
110	49	31	21	0	19	44	84	68	31
130	22	7	0	0	0	13	30	48	36
150	9	0	0	0	28	35	9	6	0
170	0	0	9	17	27	11	8	2	0
190	6	30	12	8	0	0	0	0	0

Pro názornost je možné poměrné zatížení v kotvení sloupků kroutícím momentem lépe vyjádřit výsledky v grafické podobě (obr. 19):



Obr. 19 Poměrné zatížení sloupků krouticím momentem v grafickém znázornění

Na základě popsaného rozboru výsledků z reálné zkoušky a provedených výpočtů je možno získat relevantní data pro validaci počítačového modelu zkoušky.

4.2.2 Experimentální ověření dynamického účinku nárazu pomocí kinetické energie padajícího beranu

Pro experimentální ověření předchozích postupů byla zvolena metoda pádové zkoušky realizovaná pomocí padajícího ocelového beranu, který je veden ocelovými vodítky s aplikací metody obrazové analýzy. Náraz je beranu je snímám rychloběžnou kamerou rychlostí snímání minimálně 300 snímků za sekundu. Z části videozáznamu (před a po nárazu) jsou extrahovány jednotlivé snímky (prakticky je to cca 150 snímků), které zachycují dynamický děj nárazu.

Na beranu a na pozadí jsou zvoleny vztažné body s přesně změřenou výškovou odlehlostí. Ve snímaném obraze lze tuto vzdálenost vyjádřit ve formě počtu pixelů. Následně lze dle počtu snímků z kamery provést délková měření dráhy beranu v závislosti na čase. Následně lze vypočíst nárazovou energii beranu v závislosti na jeho poloze při přetvoření vzorku. Do výpočtu bylo zahrnuto tření ve vedení beranu.

Na tomto teoretickém základě byla vypracována metodika zkoušky a měření, která je plném znění uvedena v Příloze č 1. pod názvem „Metodika pro zkoušení a ověření modifikace silničního záchytného systému“. Užití metodiky je prakticky demonstrováno v protokolu ze zkoušek, který je v **Příloze č. 2**

4.3 Validace počítačových modelů silničního záchytného systému

Při reálných nárazových zkouškách záchytných systémů jsou v rámci předepsaného zkušebního postupu zjištěny měřením technické údaje a pořízeny videozáznamy. Pro potřebu počítačového modelování je nutno tyto údaje přenést do podoby, kterou vyžaduje zadání počítačového modelování a verifikovat je jinou nezávislou metodou. Technická data, zjištěná před, v průběhu nárazu a při výjezdu vozidla po nárazu jsou exaktně naměřené fyzikální hodnoty. Problém nastává v případě, kdy je nutno popsat přenos kynické energie vozidla do zkouženého vzorku. Je nutno definovat jejich rozložení v čase tj. absorpci v průběhu nárazu. Tento děj určuje základní charakteristiky chování zádržného systému.

V rámci tato práce vznikla „Metodika pro zkoušení a ověření modifikace silničních záchytných systémů počítačovou simulací“, která dává obecná doporučení k této činnosti založené na zkušenostech při analýze reálných zkoušek záchytných systémů na základě postupů uvedeného v přdchozích kapitolách.

V metodice jsou definovány základní požadavky a kritéria přípustnosti pro numerické modely vozidel tak, aby modelovaný zádržný systém a zkušební vozidlo v maximální míře reprezentovalo děje při reálné zkoušce.

Validace výsledků získaných výpočtem je na principu mechanické práce a energetické bilance průběhu maření energie v průběhu nárazu vozidla a ověření spolehlivosti virtuálního testu.

V metodice jsou formulována obecná doporučení založená na zkušenostech při analýze reálných zkoušek záchytných systémů pro virtuální počítačové modely zádržných systémů a jejich následnou validaci.
Pro validaci jsou dva typy modelování v systémech:
- metoda konečných prvků (FE);
- metoda Multi-Body (MB) approach [18]

Ke sjednocení postupu interpretace pro potřeby programátorů, posuzovatelů a hodnotitelů těchto motelů vznikla v rámci CEN/TC 226/WG 1/ tematická skupina TG5, která se zaměřila na tyto problémy. Česká republika se zapojila do činnosti této skupiny, aby mohla uplatnit poznatky a postupy, které byly vyvinuty a ověřeny, do evropské normalizace a získat jejich uznání orgány, které jsou činné v koordinaci činnosti pověřených certifikačních orgánů – notifikovaných osob ve smyslu CPR [3]. Poznaty uvedené v této disertační práci jsou uplatněny v návrhu přednormy prEN 16303:2017[19] Road restraint systems — Validation and verification process for the use of virtual testing in crash testing against vehicle restraint systém.

5 Aplikace experimentální části

5.1 Příklad modifikace ocelového záchytného systému – změna druhu oceli

Významný výrobce záchytných systému v ČR měl záměr uplatnit nové technologie povrchových úprav proti korozi jako náhradu za stávající klasické technologie žárovým pozinkováním. S tímto je spojena změna druhu oceli základních konstrukčních prvků systému. Výrobce deklaroval zlepšení funkčních vlastností záchytného systému. Tato deklarace je shrnuta na obrázku č. 20.

Obr. 20 Deklarace vlastností svodidla spojených s novým způsobem povrchové úpravy

V tomto případě musí posuzovatel certifikačního orgánu doložit důkazy, že koncové vlastnosti záchytného systému stanovené nárazovou zkouškou se nezmění. Lze toho dosáhnout dvěma způsoby. Předepsat opakovanou nárazovou zkoušku dle ČSN EN 1317-1,2 [4,5] nebo provést srovnání změn na základě materiálové analýzy a 3D počítačového modelu. První způsob důkazu je vysoce nákladný a v současnosti dosahují celkové náklady cca 3 mil. Kč. Druhý způsob důkazu je výrazně levnější a méně pracný. Posuzovatel certifikačního orgánu však musí provést srovnávací analýzu sledovaných vlastností záchytného systému.

U ocelových záchytných systému přicházejí v úvahu mechanické a dynamické vlastnosti při nárazu vozidla a účinnost protikorozní ochrany.

Příklad rozboru pro posouzení mechanických a dynamických vlastností:

- rozbor vychází z ČSN EN 10149-2 [20] podle kterého se dodávaly původní profily značky S355MC a S420MC a ČSN EN 10 346 pro modifikované značky HX340LAD a HX420LAD.
- původní značky S355MC a S420MC jsou deklarovány jako svařitelné legované jakostní oceli s vyšší mezi kluzu válcované za tepla určené pro tváření za studena.
- nové značky HX340LAD a HX420LAD jsou deklarovány jako kontinuálně žárově ponorem povlakované legované oceli s vyšší mezí kluzu vhodné pro tváření za studena.

Na základě této deklarace oceli je rozdíl pouze v povrchové úpravě, která je v ČSN EN 10346 [21] řešena přímo. Oproti tomu norma ČSN EN 10149-2 [20] neřeší povrchovou úpravu (žárovým zinkováním), pouze uvádí požadavky na chemické složení v případě zinkování s odkazem na ČSN EN ISO 1461 [22].

Pro porovnání mechanických a technologických vlastností by měly být provedeny zkoušky vybraných vlastností nových a původních značek oceli a to i s ohledem na dynamický účinek nárazu k následnému porovnání.

Nárazová práce:

- dle ČSN EN 10149-2 [20] použít pouze u výrobků tl. 6 mm a více
- dle ČSN EN 10346 [21] použít pouze u výrobků dotloušťky 6 mm

Svařitelnost:

- dle ČSN EN 10149-2 [20] jsou oceli svařitelné za podmínek stanovených v kap. 7.5.1 ČSN EN 10149-1 [23]
- dle ČSN EN 10346, kap. 7.13 [21] jsou výrobky podle této normy vhodné ke svařování s výjimkou S550GD

Tváření za studena:

- dle ČSN EN 10149-2 [20] zkouška ohybem za podmínek stanovených v ČSN EN 10149-2, příl.B
- dle ČSN EN 10346 [21] není stanoven ožadavek, ale je třeba deklarovat jako u původních značek

Jakost povrchu:

- dle ČSN EN 10149-2 [20] - stav povrchu nesmí zhoršovat vhodnost oceli k použití, oprava vad broušením, oprava povrchových vad zavařováním není povolena
- dle ČSN EN 10346 [21] jsou požadavky na jakost povrchu (z důvodů povlakovaných výrobků)

Vnitřní vady:

- dle ČSN EN 10149-2 [20] požadavek na zkoušení u výrobků tl. 6 mm a více

Chemické složení:

požadavky na chemické složení jsou velice podobné a z velké části se překrývají - deklarace chemického složení nových značek by měla odpovídat deklaraci původních značek.

- dle ČSN EN 10149-2 [20] u ocelí S355MC a S420MC deklarují obsah C, Mn, Si, P, S, Al, Nb, V, Ti
- ČSN EN 10346 [21] u ocelí HX340LAD a HX420LAD deklarují C, Mn, Si, P, S, Al, Nb, Ti

Vyhodnocení a porovnání jsou obsahem hodnotící zprávy se závěry a kritérii přijatelnosti odchylek zjištěných hodnot vztahující se ke všem prvkům záchytného systému. Demonstrace je uvedena v následujícím příkladu:

V tabulkách níže jsou vyspecifikované mechanické vlastnosti základních materiálů. Ve variantě 1 je materiál, který byl zkoušený při nárazové zkoušce. Ve variantě 2 je uvedený ekvivalentní materiál, kde v případě odchylek u mechanických vlastností materiálu od normy je uvedena *. Takto jsou upravené požadavky na mechanické vlastnosti materiálu, které požadujeme, aby odpovídaly hodnotám, které má materiál použitý u bariérové zkoušky.

Tabulka 5 Porovnání charakteristik ocelí svodnice záchytných systémů

Název	tloušťka [mm]	Varianta	ČSN EN	Označení oceli	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	A_5 [%]
Svodnice AM	2,8	1	10149-2	S355MC	≥355	430 - 550	≥19	
		2	10346	HX340LAD+ZM310	355* - 420	430* - 510	≥19*	
Svodnice A-AM-11	2,5	1	10149-2	S420MC	≥420	480 - 620	≥16	
		2	10346	HX420LAD+ZM310	420 - 520	480*- 590	>=16*	
Svodnice A-AM-14	2,5	1	10149-2	S420MC	≥420	480 - 620	≥16	
		2	10346	HX420LAD+ZM310	420 - 520	480*- 590	>=16*	
Svodnice A-NH-94	3	1	10025-2	S235JR	≥235	360 - 510		>=26
		2	10346	S250 GD+ ZM310	≥250	360* - 510*		>=26*
Svodnice NH4	4	1	10025-2	S235JR	≥235	360 - 510		>=26
		2	10346	S250 GD+ ZM310	≥250	360* - 510*		>=26*
Spodní pásnice M	2,8	1	10149-2	S355MC	≥355	430 - 550	≥19	
		2	10346	HX340LAD+ZM310	355* - 420	430* - 510	≥19*	
Spodní pásnice AM	2,8	1	10149-2	S355MC	≥355	430 - 550	≥19	
		2	10346	HX340LAD+ZM310	355* - 420	430* - 510	≥19*	
Spodní pásnice SP3	3	1	10025-2	S235JR	≥235	360 - 510		>=26
		2	10346	S250 GD+ ZM310	≥250	360* - 510*		>=26*

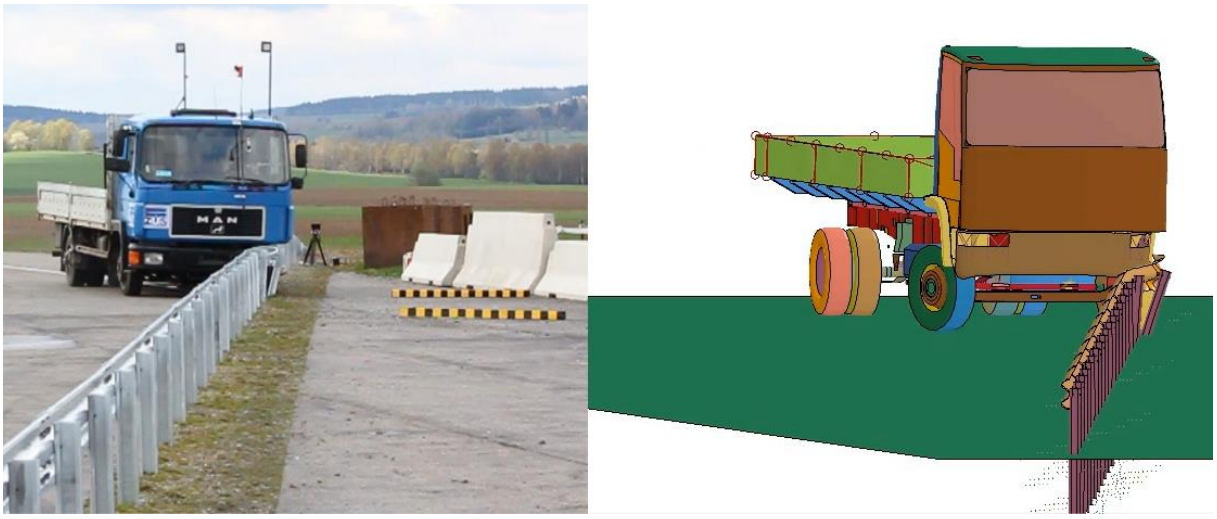
Tabulka 6 Porovnání charakteristik ocelí sloupků záchytných systémů

Název	tloušťka [mm]	Varianta	ČSN EN	Označení oceli	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	A_5 [%]
Sloupek C 150	3,5	1		S420MC	≥420	480 - 620	NA	≥19
		2		HX420LAD+ZM310	420 - 520	480* - 590	N/A	≥19*
Sloupek C 120	4	1		S420MC	≥420	480 - 620	NA	≥19
		2		HX420LAD+ZM310	420 - 520	480* - 590	N/A	≥19*
Sloupek Sigma 100	4,2	1		S235JR	≥235	360 - 510	NA	>=26
		2		S250 GD+ ZM310	>= 250	360* - 510*		>=26*
Sloupek C 140	4	1		S420MC	≥420	480 - 620	NA	≥19
		2		HX420LAD+ZM310	420 - 520	480* - 590	N/A	≥19*

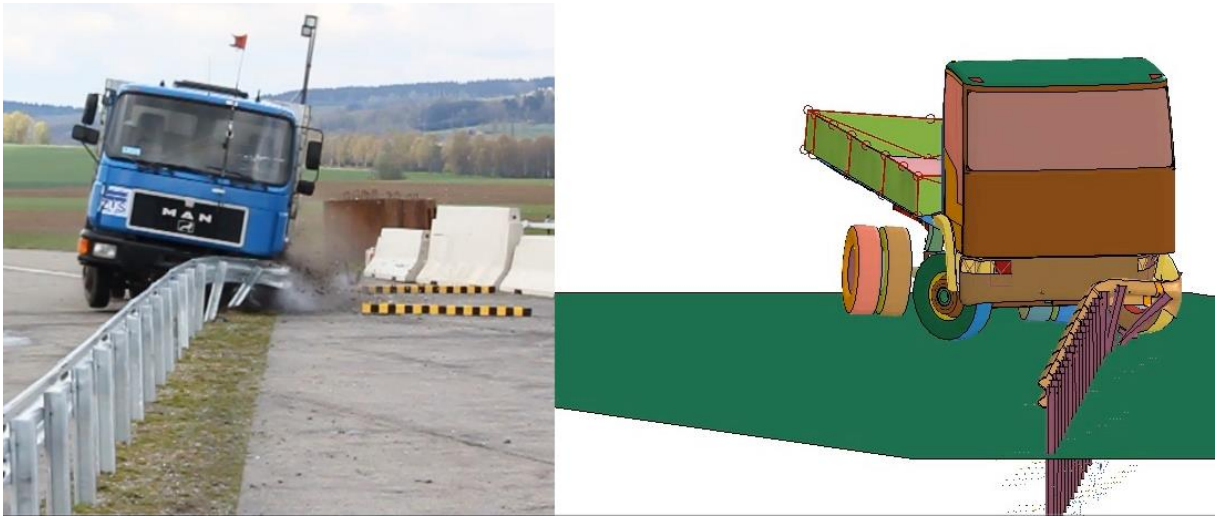
Tabulka 7 Porovnání charakteristik ocelí dalších konstrukčních prvků záchytných systémů

Název	tloušťka [mm]	Varianta	ČSN EN	Označení oceli	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	A_5 [%]
Zadní pásek	5	1		S235JR	≥235	360 - 510	NA	≥24
		2		S250 GD+ ZM310	≥ 250	360* - 510*		>=26*
Distanční díl AM OB	2,8	1		S355MC	≥355	430 - 550	≥19	NA
		2		HX340LAD+ZM310	355* - 420	430* - 510	≥19*	N/A
Distanční díl NH4 II	4	1		S235JR	≥235	360 - 510	NA	>=26
		2		S250 GD+ ZM310	≥ 250	360* - 510*		>=26*

Výstupy z této materiálové analýzy byly použity do počítačového modelu, mechanické namáhání prvků zjištěné z validovaného 3D modelu vytořeného v programu LS-DYNA (metoda konečných prvků). Model byl validován dle metodiky uvedené v článku 4.3 této disertační práce. Pro ilustraci jsou demonstrovány 3 fáze nárazu vozidla, které jsou dominantní pro validaci 3D počítačového modelu. Hodnotí se chování při prvním dotyku, při maximálním dynamickém průhybu a chování výjezdu vozidla po nárazu. Tyto děje jsou demonstrovány na následujících obrázcích.



Obr. 21 První kontat vozidla se záchytným systémem v porovnání s 3D modelem



Obr. 22 Maximální dynamický průhyb záchytného systémem v porovnání s 3D modelem

Obr. 23 Výjezd vozidla po nárazu do záchytného systémem v porovnání s 3D modelem

Z demonstračních obrázků je patrná shoda 3D pořítačového modelu, v kterém jsou uplatněny změny vycházející z předchozí materiálové analýzy, s reálně provedenou zkouškou záchytného systému.

V tomto případě kvalifikovaného vyhodnocení lze přijmout virtuální počítačový 3D model jako důkaz k přípustné modifikaci záchytného systému.

5.2 Příklad validace modelu ocelového záchytného systému s integrovanou stěnou

Za účelem tvorby „Metodiky pro navrhování silničních svodidel s integrovanou protihlukovou stěnou“ byly realizovány reálné nárazové zkouška do experimentální konstrukce mostnícho ocelového záchytného systému. Přešitelem metodiky byla firma ALGON, a.s.. Cílem bylo zjistit chování konstrukce systému při nárazech kategorie TB 11 a TB 51 dne ČSN EN 1317 – 2[5] pří reálné zkoušce, tyto pomocí 3D reálného modelu zobecnit do virtuálního 3D modelu v počítačovém programu LS-DYNA.

Jednalo se o ocelovou konstrukci záchytného systému svodnicového typu. Do sloupů záchytného systému kotvených do betonového mostního parapetu byly osazeny sloupy protihlukové stěny s transparentní výplní. Konstrukce tohoto záchytného systému je zřejmá z obrázků 24 a 25.

Obr. 24 Experimentální záchytný systém čelní pohled

Obr. 25 Experimentální záchytný systém boční pohled

Zkouška byla provedena na Zkušebním polygonu Kámen-Věžná u Pacova. Zkušební plocha je upravena tak, aby splňovala podmínky zkušební normy. - sklon plochy v podélné ose instalace je ± 0,13 %, sklon plochy ve směru nájezdu vozidla je 0,49 %. Povrch zkušební plochy je asfaltový. Plocha byla geodeticky zaměřena – výškové parametry splňují podmínku normy max..sklonu 2,5 %. Jako zkušebníívozidlo byl zvolen autobus značky KAROSA typ 731. V rámci zkoušky byla provedena předepsaná měření popsaná v kapitole 1.

Ze zjištěných údajů byl provedena obrazová ananlýza popsaná v kapitole 4.1 této disertační práce s následujícími výsledky (Obr.26).

Normalizovaný dynamický průhyb D_N (m)	0,46	0,5

Nedeformovaná (kostrukční) šířka svodidla W_U (m) :	0,58	
Pracovní šířka W_m (m) :	2,00	
Normalizovaná pracovní šířka W_N (m) :	1,94	1,9

Třídy úrovně normalizované pracovní šířky :

W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
0,6	0,8	1	1,3	1,7	2,1	2,5	3,5

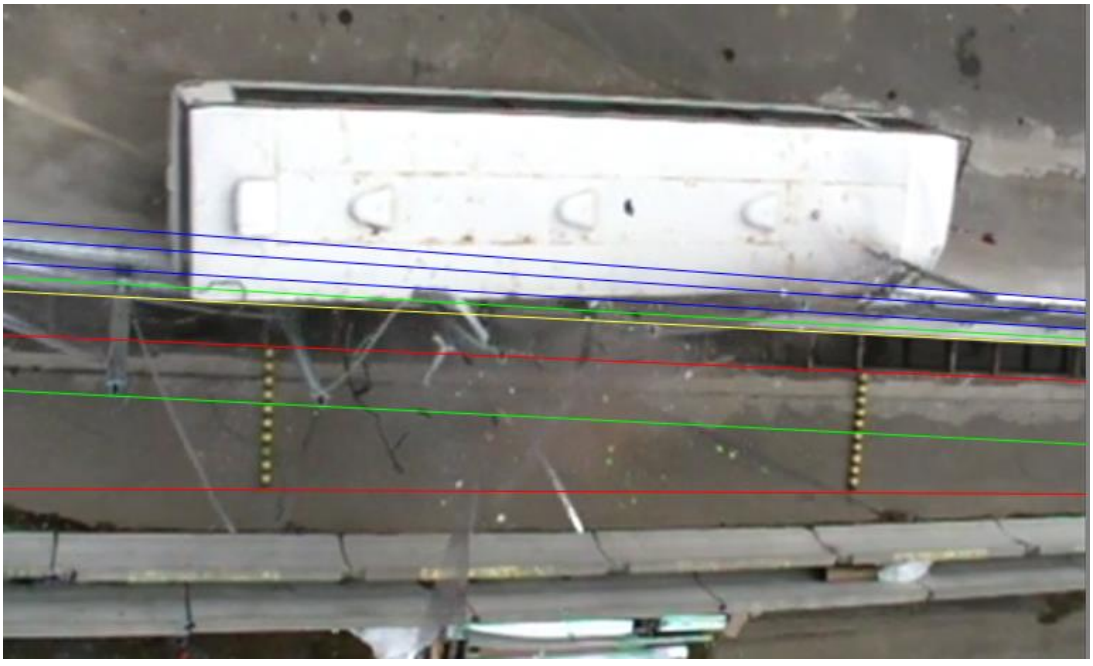
Dynamické vychýlení vozidla VI_m (m) :	0,90	
Normalizované dynamické vychýlení vozidla VI_N (m) :	0,86	0,9

Třídy úrovně normalizovaného vychýlení vozidla :

VI1	VI2	VI3	VI4	VI5	VI6	VI7	VI8	VI9
0,6	0,8	1	1,3	1,7	2,1	2,5	3,5	

Obr. 26 Výsledky z obrazové analýzy reálné zkoušky experimentálního svodidla

Aplikace obrazové analýzy je znázorněna obrázku 27 .



Obrázek 27 Obrazová analýza vidozáznamu

Poškození vozidla po nárazu by zcela netypické. Z přiložených fotografie je patrná významná devastace přední části vozu a průnik do prostoru pro cestujících. Demonstrováno na obrázku 28.

Obrázek 28 Poškození zkušebního vozidla

Ve spolupráci s řešitelem byly výstupy z této reálné zkoušky záchtného systému přeneseny do virtuálního 3D počítačového modelu v programu LS-DYNA, který sloužil jako základ pro metodiku navrhování záchytných systémů s integrovanou protihlukovou stěnou.

6. Závěr

V disertační práci jsou shrnuty poznatky z oboru zkoušení silničních záchytných systémů za období let 2002 až 2019 provedených především v České republice. V uvedeném období přišel rychlý nástup počítačových technologií pro simulaci technických dějů. Byly a budou snahy uplatnit tento trend také v tomto oboru zkoušení. Mojí motivací bylo poukázat na nedostatky zjednodušeného názoru, že lze reálné zkoušky záchytných systémů nahradit pouze počítačovými simulacemi. Počítačové simulace mohou být vhodnou pomůckou pro zdokonalení odborných výroků a jejich doložení věrohodnými důkazy na základě jasně definovaných vstupních podmínek a porovnávacích kritérií.

Výstupy z disertační jsou zobecněny ve 2 metodických postupech:

1. **Metodika pro zkoušení a ověření modifikace silničního záchytného systému počítačovou simulací**
2. **Metodika validace počítačových modelů silničního záchytného systému a jejich modifikace.**

Metodika č. 1 byla předložena k posouzení Sektorové skupině oznámených osob SG 04, která metodicky kordinuje v rímci CPR [3] certifikační orgány pro harmonizovanou normu EN 1317-5 [6]. Tato metodika byla akceptována bez připomínek a je k dispozici ostaním oznámeným subjetům působících v EU

Metodika č. 2 byla uplatněna v rámci pracovnískupiny CEN/TC 226, která je ustavena pro tvorbu normy prEN 16303:2017 [19], Road restraint systems — Validation and verification process for the use of virtual testing in crash testing against vehicle restraint systém. Principy metodiky jsou uplatněny ve stávajícím návrhu textu.

Obě metodiky jsou využívány Technickým a zkušebním ústavem Praha, s.p. s sídlem Praha 9, Prosecká 811/76a jako verifikované postupy při certifikaci záchytných systémů. Prosím, aby nebyly dále šířeny bez jeho souhlasu.

Principy metodiky byly dále uplatněny v těchto odborných pracích:

(1) IMPACT OF NEW VEHICLE CONFIGURATIONS ON ROAD EQUIPMENTS, ABOVE ALL SAFETY BARRIERS

Zpracovala firma TRANSFORMERS na základě evropského grantu číslo 605170. Předmětem bylo vypracování počítačových modelů pro ověření chování záchytných systémů v případě nárazů nadrozměrnými vozidly a vozidly se změněnými technickými parametry než mají v současnosti homologovaná vozidla.

(2) VIRTUAL TESTING OF CURVED VEHICLE RESTRAIT SSYSTEMS

Řešil nezávislý dopravní odborník Bertold Fröhlich na zadání Bundesanstalt für Straßenwesen SRN. Pomocí počítačového modelu jsou simulovány situace nárazů vozidla do záchytných systémů v zakřivení různých poloměrů.

(3) METODIKA PRO NAVRHOVÁNÍ SILNIČNÍCH SVODIDEL S INTEGROVANOU PROTIHLUKOVOU STĚNOU
Řešitelé: Algon, a.s., TÜV SÜD Czech, s.r.o. České vysoké učení v Praze, Kloknerův ústav.
Cílem metodiky je poskytnout ucelený pohled na problematiku návrhu silničních svodidel doplněných o integrovanou protihlukovou stěnu.

Dovolte mi, abych tuto práci uzavřel bonmotem:

„Virtuální počítačový model zůstane jen hezkou pohádkou, pokud není navázán na realitu“

Citovaná literatura a dokumenty

[1] ČSN EN ISO/IEC 17000 Posuzování shody – Slovník a základní principy – ČNI, březen 2005.

[2] Zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky – Praha, 1997 v platném znění.

[3] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011, kterým se stanoví harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh a kterým se zrušuje směrnice Rady 89/106/EHS.

[4] ČSN EN 1317-1 (73 7001) Silniční záchytné systémy - Část 1: Terminologie a obecná kritéria pro zkušební metody.

[5] ČSN EN 1317-2 (73 7001) Silniční záchytné systémy - Část 2: Svodidla - Funkční třídy, kritéria přijatelnosti nárazových zkoušek a zkušební metody.

[6] ČSN EN 1317-5 Silniční záchytné systémy - Část 5: Trvanlivost a hodnocení shody.

[7] ČSN ENV 1991 -3 (73 6203) Zásady navrhování a zatížení konstrukcí. Část 3: Zatížení mostů dopravou

[8] Internetové stránky Českého metrologického institutu (www.cmi.cz) – leden 2009

[9] TNI 01 0115 Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM) – ÚNMZ, únor 2009

[10] ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří - ČNI, listopad 2005

[11] MPA 20-01-16 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na zkoušení způsobilosti v akreditačním systému České republiky– ČIA, březen 2016

[12] ČSN EN ISO/IEC 17043 Všeobecné požadavky na zkoušení způsobilosti

[13] Internetové stránky Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (www.unmz.cz) – leden 2016

[14] Zákon č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů – Praha

[15] Nařízení vlády č. 163/2002 Sb. v platném znění, kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky ve znění pozdějších předpisů

[16] Pasivní bezpečnost pozemních komunikací Zkušenosti z České republiky a ze zahraničí Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

[17] EN 12767 Pasivní bezpečnost podpěrných konstrukcí zařízení na pozemní komunikace – Požadavky a zkušební metody.

[18] Multi-Body (MB) approach (popis nahttp://www.lenam.cz/simulace-cae/multi-body-simulace/)

[19] prEN 16303:2017 Road restraint systems — Validation and verification process for the use of virtual testing in crash testing against vehicle restraint systém.

[20] ČSN EN 10 149-2 Ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena - Část 2: Technické dodací podmínky pro termomechanicky válcované oceli

[21] ČSN EN 10346 Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky - Technické dodací podmínky

[22] ČSN EN ISO1461 Žárové povlaky zinku nanášené ponorem na železných a ocelových výrobcích - Specifikace a zkušební metody

[23] ČSN EN 10149-1 Ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena - Část 1: Všeobecné dodací podmínky

Navazné technické dokumenty a předpisy

1. ČSN 736100 -1 - Názvosloví pozemních komunikací - Část 1: Základní názvosloví
2. ČSN 736101 - Projektování silnic a dálnic
3. ČSN 736110 - Projektování místních komunikací
4. ČSN 736200 - Mosty - Terminologie a třídění
5. ČSN 736201 -Projektování mostních objektů
6. Technické podmínky č. 129 "Zkoušení a schvalování svodidel"
7. Technické podmínky č. 63 "Ocelová svodidla na pozemních komunikacích"
8. Technické podmínky č. 106 "Lanová svodidla na pozemních komunikacích"
9. Technické podmínky č. 114 "Svodidla na pozemních komunikacích"
10. Technické podmínky č. 128 "Ocelové svodidlo NH4"
11. Technické podmínky č. 139 "Betonové svodidlo"
12. Technické podmínky č. 158 "Tlumiče nárazu"
13. Technické podmínky č. 167 "Ocelová svodidla ArcelorMittal "
14. Technické podmínky č. 203 "Ocelová svodidla (svodnicového typu)"
15. Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací
16. Technické kvalitativní podmínky pro dokumentaci staveb pozemních komunikací
17. Vzorové listy staveb PK - VL 4 - mosty

Poznámka:

Předpisy uvedené pod čísly 6-17 jsou vydány Ministerstvem dopravy České republiky

Související literatura:

1. American Association of State Highway and Transportation Officials, *Roadside Design Guide*, 1989 1996

2. American Association of State Highway and Transportation Officials, *Guide for Selecting, Locating, and Designing Traffic Barriers*, 1977.

3. Hutchinson, J.W. and Kennedy, T.W., *Safety Considerations In Median Design*, Highway Research Record 162, 1966.

4. Glennon, John C., *Roadside Safety Improvement Programs on Freeways: A Cost- Effectiveness Priority Approach*, Transportation Research Board, NCHRP Report 148, 1974.

5. Ross, H.E. et. al., *Warrants for Guardrail on Embankments*, Highway Research Board, Record 460, 1973.

6. Turner, Daniel S., and Hall, Jerome W., *Severity Indices for Roadside Features*, National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 202, 1994.

7. Glennon, J.C. and Tamburri, T.N., *Objective Criteria for Guardrail Installation*, Highway Research Board, Record 174, 1967.

8. Glennon, John C., and Wilton, Cathy J.,*Effectiveness of Roadside Safety Improvements*, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-75-23, 1974.

9. Graham, J.L., and Harwood, D.W., *Effectiveness of Clear Recovery Zones*, Transportation Research Board, NCHRP Report No. 247, 1982.

10. Weaver, Graeme D., Marquis, Eugene L., and Olson, Robert M., *Selection of Safe Roadside Cross Sections*, Transportation Research Board, NCHRP Report No. 158, 1975.

11. Zeeger, C.V., et. al.,*Safety Effects of Cross-Section Design for Two- Lane Roads*, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-87-008, 1987.

12. Highway Research Board, *Highway Guardrail - Determination of Need and Geometric Requirements*, Special Report 81, 1964.

13. Perchonok, K., et. al., *Hazardous Effects of Highway Features and Roadside Objects*, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-78-202, 1978.

14. Stonex, K.A., *Roadside Design for Safety*, Highway Research Board Proceedings, 1960.

15. Olson, Robert M., Post, Edward R., and McFarland, William F., *Tentative Service Requirements for Bridge Rail Systems*, Transportation Research Board, NCHRP Report 86, 1970.

16. Sicking, Dean L., Gereshy, Asif B., and Ross, Hayes E., Jr., *Development of Guardrail Extruder Terminal*, Texas Transportation Institute, Paper No. 880484, 1989.

17. Federal Highway Administration, *Synthesis of Safety Research Related to Traffic Control and Roadway Elements*, Volume 1, Chapter 3, 1982.

18. Federal Highway Administration, *A Handbook of Highway Safety Design and Operating Practices*, 1968, 1973, and 1978.

19. Federal Highway Administration, *Maintenance and Highway Safety Handbook*, 1977.

20. Federal Highway Administration, *Roadside Improvements for Local Roads and Streets*, 1986.

21. Transportation Research Board, *Designing Safer Roads*, Special Report 214, 1987.

22. Ivey, Don L., Bronstad, M.E., and Griffin, Lindsay I., III, *Guardrail End Treatments in the 1990?s*, Texas Transportation Institute, Paper No. 920910, 1992.

23. Ross, H.E., Jr., Sicking, D.L., Zimmer, R.A., and Michie, J.D., *Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features*, Transportation Research Board, NCHRP Report 350, 1993.

24. Michie, J.D., and Calcote, L.R., *Location, Selection, and Maintenance of Highway Guardrails and Median Barriers*, Transportation Research Board, NCHRP Report 54, 1968.

25. Glennon, J.C., Neuman, T.R., and Leisch, J.E.,*Safety and Operational Considerations for Design of Rural Highway Curves*, Federal Highway Administration, 1983.

26. "The Desirability of Highway Design for Operating Speeds Above 70 MPH,? Proceedings, Institute of Traffic Engineers, 1970.

27. Center for Auto Safety, *The Yellow Book Road: The Failure of Americans Roadside Safety Program*, 1974.

28. American Association of State Highway and Transportation Officials, *Highway Design and Operational Practices Related to Highway Safety*, 1974.