

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Dynamická numerická studie nárazu
vozidla do silničního ocelového
svodidla**

Autor:
Kristina KLETEČKOVÁ

Vedoucí bakalářské práce:
Ing. Petra VYČICHLOVÁ
Ing. Michal FRYDRÝN, Ph.D.

Ústav soudního znalectví v dopravě (16122)

26. srpna 2018





K622 Ústav soudního znalectví v dopravě

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Kristina Kletečková

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Dynamická numerická studie nárazu vozidla do silničního ocelového svodidla**

Název tématu (anglicky): **Dynamic Numerical Study of the Vehicle Impact on a Road Steel Barrier**

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- V obecné části zpracovat přehled používaných silničních svodidel v ČR i zahraničí, uvést technické podmínky pro jejich používání a jejich konstrukční řešení. Uvést příklady použití silničních svodidel v praxi.
- Vytvořit geometrické a následně konečněprvkové modely vybraných typů silničních svodidel a doplnit je o vzorový model vozidla.
- Definovat okrajové podmínky nárazu dle normy pro testování silničních svodidel a provést jejich numerickou analýzu v softwaru LS-DYNA.
- Provést rozbor a vyhodnocení získaných výsledků.





- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího BP v textu nebo v příloze
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ČSN EN 1317-2 Část 2: Svodidla a mostní svodidla
ČSN EN 1317-3 Část 3: Tlumiče nárazu
ČSN EN 1317-5+A1 Část 5: Požadavky na výrobky a posuzování shody záchytných systémů pro vozidla
LS-DYNA User's manual, LSTC 2017

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petra Vyčichlová**
Ing. Michal Frydrýn, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: **28. července 2017**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **27. srpna 2018**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


.....
doc. Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D. prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
vedoucí děkan fakulty
Ústavu soudního znalectví v dopravě



Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.


.....
Kristina Kletečková
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....28. července 2017

Prohlášení autora

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Podpis:

V Havlíčkově Brodě dne:

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav soudního znalectví v dopravě (16122)

Bakalářská práce

**Dynamická numerická studie nárazu vozidla do silničního ocelového
svodidla**

od Kristiny KLETEČKOVÉ

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je simulace chování ocelových silničních svodidel při nárazu vozidla s využitím metody konečných prvků. V rámci teoretické části je zpracována problematika silničních záchytných systémů, popis základních druhů svodidel, podmínky jejich použití a popis jednotlivých konstrukčních částí. V závěru obecné části je popsán způsob testování svodidel, specifikace vozidel určených pro testování a způsob vyhodnocení naměřených parametrů stanovených normou ČSN EN 1317.

V praktické části je hlavním cílem provedení dynamické numerické simulace nárazu vozidla do silničního ocelového svodidla s využitím softwaru ANSYS a LS-DYNA. Pro simulaci jsem vybrala dva typy ocelových svodidel JSNH4/H1 a JSNH4/N2.

Klíčová slova: ocelové svodidlo, metoda konečných prvků, dynamický model, LS-DYNA.

Abstract

The aim of the bachelor thesis is to simulate the behavior of steel road barriers in the event of a vehicle impact using finite element methods. In the theoretical part is the issue of road safety systems, description of basic types of barriers, conditions for their use and description of individual components. This section describes the method of testing the barriers, the specification of the vehicles to be tested and the method of evaluation of the measured parameters determined by the standard ČSN EN 1317.

The main aim of the practical part is to perform dynamic numerical simulation in ANSYS and LS-DYNA. I have been selected two types of steel barriers are used: JSNH4/H1 and JSNH4/N2.

Keywords: steel barriers, finite element method, dynamics analysis, LS-DYNA.

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Petře Vyčichlové a Ing. Janu Vyčichlovi, Ph.D., za odborné vedení, vstřícnost a ochotu při zpracování této práce.

Velký dík patří také mé rodině za podporu a trpělivost během mého studia.

Obsah

Prohlášení autora	iii
Abstrakt	iv
Poděkování	v
1 Úvod	1
2 Bezpečnost pozemních komunikací	2
2.1 Záchytné silniční systémy	3
2.2 Dělení záchytných silničních systémů	3
3 Svodidla	4
3.1 Dělení dle zákona a požadavky na TPV	4
3.2 Dělení svodidel dle umístění na pozemní komunikaci	5
3.3 Dělení svodidel dle materiálu	5
3.4 Osazování svodidel	7
3.5 Historie	8
4 Zkoušení silničních svodidel	10
4.1 Chování svodidel	10
4.2 Zatížení svodidel	10
4.3 Úroveň zadržení	11
4.4 Deformace záchytného systému	12
4.5 Zkušební vozidlo	14
4.6 Bezpečnost vozidla pro posádku	14
4.6.1 Index prudkosti nárazu	14
4.6.2 Nárazová rychlost teoretické hlavy	15
4.6.3 Index deformace kabiny vozidla	15
4.7 Chování vozidla při zkoušce	16
4.8 Zkušební místo	17
5 Ocelové svodidlo	18
5.1 Konstrukční díly	18
5.1.1 Sloupek	19
5.1.2 Svodnice NH4	19
5.1.3 Trubková spojka	20
5.1.4 Materiál	20
5.2 Testování a úroveň zadržení	20
5.3 Ocelová svodidla na silnicích	21

6 Geometrický model	22
6.1 Model svodidla	22
6.2 Model automobilu	23
6.2.1 TB11	24
6.2.2 TB32	24
7 Numerický model	26
7.1 Systém jednotek	26
7.2 Tvorba sítě	27
7.3 Šroubové spojení	28
7.4 Materiál	28
7.4.1 Elastic (konstrukční ocel)	28
7.4.2 Piecewise linear plasticity (bilineární ocel)	28
7.5 Kompletace sestavy	29
7.6 Okrajové podmínky	30
7.6.1 Uložení	30
7.6.2 Gravitace	30
7.7 Kontakty	31
8 Analýza a ověření modelu	32
8.1 Statická analýza	32
8.2 Zkouška přímočarého pohybu automobilu	33
8.3 Dynamická analýza I	34
8.4 Dynamická analýza II	34
9 Hodnocení výsledků simulace	36
9.1 JSNH4/H1	36
9.1.1 Průběh bariérové zkoušky – Analýza I	36
9.1.2 Průběh bariérové zkoušky – Analýza II	37
9.1.3 Srovnání analýz	38
9.2 JSNH4/N2	40
9.2.1 Průběh bariérové zkoušky – Analýza I	40
9.2.2 Průběh bariérové zkoušky – Analýza II	40
9.2.3 Dynamický průhyb svodidla	42
9.2.4 Index prudkosti nárazu ASI	43
9.2.5 Výjezdová plocha vozidla	45
9.3 Experiment	46
10 Závěr	48

Seznam obrázků

2.1	Podíl vlivů na nehodovost [2]	2
3.1	Jednostranné svodidlo [8]	5
3.2	Oboustranné svodidlo [8]	5
3.3	Jednostranné ocelové svodidlo NH4 [11]	6
3.4	Lanové svodidlo [12]	6
3.5	Dřevoocelové svodidlo	7
3.6	Betonové svodidlo [8]	8
4.1	Naměřené hodnoty dynamického průhybu, pracovní šířky a vychýlení vozidla [5]	13
4.2	Deformační zóny vozidla [5]	15
4.3	Schéma chování vozidla při nárazu [5]	16
5.1	Konstrukční díly svodidla JSNH4/H1 a JSNH4/N2 [18]	19
5.2	Příčný řez svodnice NH4 [20]	20
6.1	Geometrický model sestavy	23
6.2	Model automobilu	25
7.1	Typy 2D elementů [27]	27
7.2	Ukázka sítě sestavy	27
7.3	Zatěžovací křivka oceli S235JR	29
7.4	Uspořádání modelu pro nárazovou zkoušku	30
7.5	Kontaktní vzdálenost a její funkce [22]	31
8.1	Celková deformace sestavy	32
8.2	Graf průběhu deformace v čase	33
8.3	Ekvivalentní napětí (von Mises)	33
8.4	Trajektorie translačního pohybu vozidla a rotačního pohybu kol	34
8.5	Uspořádání modelu pro analýzu I – svodidlo JSNH4/N2	35
8.6	Uspořádání modelu pro analýzu II – svodidlo JSNH4/H1	35
9.1	Průběh analýzy I pro svodidlo JSNH4/H1	37
9.2	Průběh analýzy II pro svodidlo JSNH4/H1	38
9.3	TB32 t=1.020 s	38
9.4	TB11 t=1.020 s	38
9.5	TB32 t=2.448 s	39
9.6	TB11 t=2.448 s	39
9.7	Změna rychlosti v čase	39
9.8	Průběh analýzy I pro svodidlo JSNH4/N2	41
9.9	Průběh analýzy II pro svodidlo JSNH4/N2	41
9.10	Analýza I – vychýlení líce svodidla	42
9.11	Analýza II – vychýlení líce svodidla	42

9.12 Průběh zrychlení při zkoušce TB32	44
9.13 Průběh zrychlení při zkoušce TB11	44
9.14 Průběh hodnot ASI při zkouškách TB32 a TB11	44
9.15 Schéma rozměrů výjezdové plochy [5]	45
9.16 Ponárazové chování vozidla při zkoušce TB32	46
9.17 Ponárazové chování vozidla při zkoušce TB11	46
9.18 Experiment-01 [33]	47
9.19 Simulace-01	47
9.20 Experiment-02 [33]	47
9.21 Simulace-02	47
9.22 Experiment-03 [33]	47
9.23 Simulace-03	47

Seznam tabulek

4.1	Zatížení svodidel "schválených"[7]	11
4.2	Zatížení svodidel "jiných"[7]	11
4.3	Úrovně zadržení svodidel "schválených"[5]	12
4.4	Rozměry výjezdových ploch [5]	16
5.1	Soupis dílů svodidla JSNH4/H1 a JSNH4/N2 [18], [19] . . .	18
5.2	Parametry svodidla JSNH4/H1 a JSNH4/N2 [18], [19] . . .	21
5.3	Minimální délka svodidla [20]	21
6.1	Parametry	23
6.2	Parametry vozidla pro zkušební test TB11	24
7.1	Systém jednotek [26]	26
7.2	Materiálová charakteristika oceli pro šroubová spojení . . .	28
7.3	Materiálová charakteristika oceli S235JR	29
7.4	Soupis částí kompletní sestavy	29
7.5	Přehled použitých kontaktů	31
9.1	Parametry svodidla JSNH4/N2 [18]	40
9.2	Maximální deformace	43
9.3	Maximální hodnoty indexu prudkosti nárazu ASI pro testy TB32 a TB11	43
9.4	Koeficienty pro určení rozměrů výjezdové plochy [5]	45
9.5	Rozměry modelu vozidla a rozměry výjezdové plochy	45

Seznam symbolů

Označení	Název	Jednotka
a	zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
ASI	index prudkosti nárazu	–
D_m	dynamický průhyb	m
E	Youngův modul pružnosti	MPa
E_k	kinetická energie	J
F	síla	N
F_g	gravitační síla	N
g	gravitační zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
m	hmotnost	kg
m_t	teoretická hmotnost	kg/m
r	poloměr	m
t	čas	s
$THIV$	nárazová rychlost teoretické hlavy	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v	rychlost	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
v_n	nárazová rychlost	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
VI_u	vychýlení vozidla	m
W_u	pracovní šířka	m
μ	poissonovo číslo	–
ρ	hustota	$\text{t} \cdot \text{mm}^{-3}$
ω	úhlová rychlost	–1

Seznam použitých zkratk

TP	Technické Podmínky
TPV	Technické Podmínky Vv ýrobce
CAD	Computer Aided Design
ČSN	Česká Soustava Norem
SI	Système International d'unités (International System of Units)
MKP	Metoda Konečných Prvků
FHWA	The Federal Highway Administration

Kapitola 1

Úvod

Česká republika disponuje velmi rozvětvenou a hustou sítí silnic a dálnic. Silniční doprava je jedním z nejdynamičtěji se rozvíjejícím druhem dopravy, který u nás tvoří 90 % přepravního výkonu a jehož objem stále stoupá. Zejména v osobní dopravě dochází k extrémnímu růstu automobilizace, která s sebou však přináší i řadu negativ, jako jsou dopravní kongesce, znečištění ovzduší a nárůst dopravních nehod.

Faktorů, které ovlivňují vznik a závažnost dopravních nehod, je více. Často jde o kombinaci několika činitelů. Na tuto skutečnost je třeba reagovat, a to vytvářením opatření, která předchází vzniku dopravních nehod, ale i opatření, která snižují jejich následky. Jedním z prvků sloužících k ochraně účastníků silničního provozu a snížení následků dopravních nehod jsou svodidla, která patří mezi silniční záchytné systémy.

Pro stanovení vlastností svodidla a jejich schválení k uvedení na trh se běžně v České republice používají 2 typy nárazových zkoušek s přesně předepsaným scénářem, definujícím konkrétní zatížení i úhel nárazu. Avšak při reálných dopravních nehodách nedochází k nárazům automobilů o stejných hmotnostech, jedoucích totožnou rychlostí a pod stejným úhlem nárazu. Variabilitu skladby dopravního proudu i různorodost chování vozidel není možno při nárazových zkouškách postihnout. Efektivní využití numerických metod by umožnilo vytváření nových bezpečných konstrukcí silničních svodidel a snadnější zkoušení pro širší spektrum testů. V ideálním případě by takto navrženému svodidlu postačila jedna fyzická zkouška, kterou by byla zkouška homologační. Tato zkouška by ověřila správnost chování numerického modelu. V případě potvrzení vlastností svodidla by bylo umožněno jeho uvedení na trh.

Ve své práci bych ráda ověřila využitelnost numerické metody pro stanovení vlastností a popis chování záchytných systémů při nárazu vozidla. Pro numerickou studii jsem vybrala dvě jednostranná ocelová svodidla s různou úrovní zadržení. Zvolila jsem svodidla běžně využívaná na českých silnicích, jedná se o typy JSNH4/N2 a JSNH4/H1. V praktické části vytvořím geometrický a následně numerický model obou typů svodidel. Pro oba typy provedu dvě bariérové zkoušky s různými scénáři a nastavením dle normy ČSN EN 1317. Pro výpočet využiji explicitní řešič software LS-DYNA. Výstupem budou dynamické simulace nárazu automobilu do ocelového svodidla. Provedu vyhodnocení všech analýz. Nakonec porovnáím výsledky simulace s výsledky, které garantují výrobci svodidel.

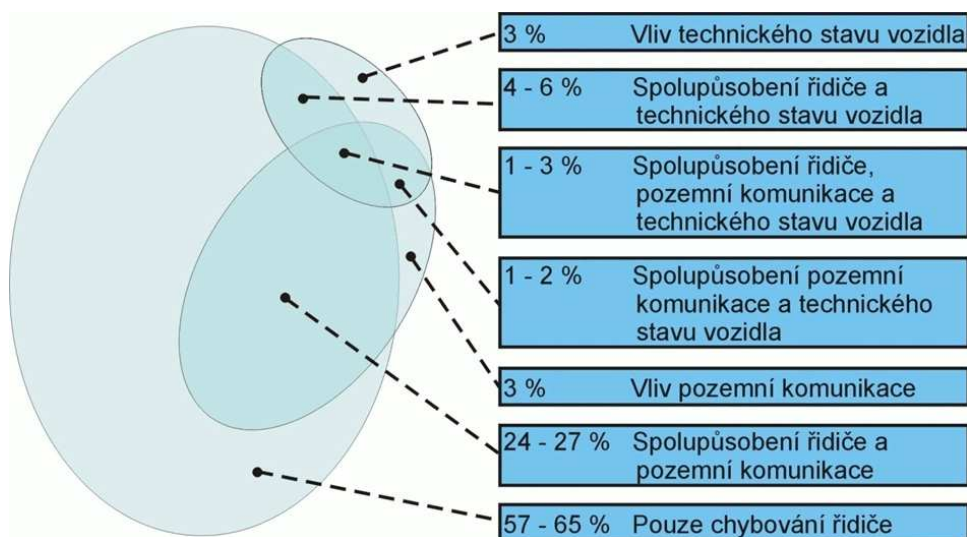
Kapitola 2

Bezpečnost pozemních komunikací

K dopravním nehodám dochází v situacích, kdy nastane nerovnováha mezi účastníky silničního provozu, vozidly a prostředím. Proto by měl být kladen důraz nejen na zlepšení znalostí, dovedností a chování řidičů a vývoj bezpečných automobilů, ale stejnou měrou je třeba reagovat i na stav stávající a nově vznikající infrastruktury takovým způsobem, aby byla „samovysvětlující“ a „odpouštějící“ . [1]

„Samovysvětlující“ komunikace svým uspořádáním, značením a dalšími prvky dává uživateli komunikace jednoznačné množství srozumitelných informací pro její bezpečné využívání. Uspořádání by mělo předcházet vzniku dopravních nehod. [1]

„Odpouštějící“ komunikace by při chybě řidiče, či při nestandardním chování vozidla v případě poruchy, měla eliminovat, popř. minimalizovat, následky dopravní nehody (žádná chyba by neměla být trestána smrtí). Zvýšení bezpečnosti může být dosaženo osazením zachytných systémů, používáním příhradových konstrukcí u dopravních značek, odstraňováním stromů a jiných pevných překážek poblíž komunikace. [1]



OBRÁZEK 2.1: Podíl vlivů na nehodovost [2]

2.1 Záchytné silniční systémy

Pasivní bezpečností pozemní komunikace rozumíme vhodně navrženou a vystavěnou komunikaci včetně dopravního zařízení, dělicích ostrůvků, svahů těles, příkopů, či mostních objektů.

Mezi pasivní prvky patří bezpečnostní zařízení, která dělíme na základě svého účelu na záchytné a vodicí. Vodicí prvky slouží k optickému vedení vozidel zvláště při zhoršené viditelnosti a v noci. Patří mezi ně vodicí proužky, či směrové sloupky. Záchytné silniční systémy se umísťují na krajnice rizikových míst a ve středním dělicím páse směrově rozdělených komunikací, kde hrozí vyjetí automobilu mimo komunikaci (prudké zatáčky, strmá stoupání), či střetnutí s jiným účastníkem provozu nebo pevnou překážkou. [3]

2.2 Dělení záchytných silničních systémů

Záchytné silniční systémy dělíme na základě toho, pro jaký účel jsou navrhovány, podle typu konstrukce, materiálu, místa instalace, či z pohledu legislativy. Dle normy ČSN EN 1317-1 rozlišujeme:

1. Silniční záchytné systémy pro vozidla:

- svodidla/mostní svodidla – instalována podél vnějších okrajů nebo ve středním dělicím páse silnice, po stranách mostu, na opěrné zdi a podobné konstrukce;
- koncové části – koncová úprava svodidel;
- přechodové části – spojení dvou svodidel různého typu;
- otevírací svodidla – úseky svodidel, které jsou připojeny na koncích ke stálému svodidlu tak, aby mohlo být odstraněno nebo přemístěno ať už celé, či po částech;
- tlumiče nárazu – zařízení absorbující kinetickou energii vozidla instalované před nebezpečnými místy, či předměty.

2. Silniční záchytné systémy pro chodce:

- mostní zábradlí – systém instalovaný na okraje chodníku nebo stezky pro chodce, který zabraňuje vstupu chodců a jiných uživatelů do nebezpečných míst. [4]–[6]

Kapitola 3

Svodidla

Mezi nejznámějším prvky záchytných silničních systémů patří svodidla, která jsou hlavním tématem této bakalářské práce. Hlavní úlohou svodidel je zadržet, zpomalit a přeměřovat neovladatelné vozidlo tak, aby byla zajištěna bezpečnost cestujících i ostatních uživatelů pozemní komunikace. Umístí ují se na krajnice a ve středním dělicím pásu směrově rozdělených komunikací, tj. na silnice a mosty. Zabraňují vyjetí vozidla mimo komunikaci, chrání jej před nárazem do pevných překážek a před pádem do hloubky. Ochránují zdroje pitné vody, cizí majetek či zdraví chodců. [4]

Zejména na komunikacích nižších tříd, mají svodidla kromě ochranné funkce také psychologický efekt. Silnice ohraničují a opticky tedy zužují, nutí účastníky provozu zpomalit a chovat se opatrněji.

Svodidla rozdělujeme na základě různých pohledů. Může se jednat o dělení dle zákona, podle materiálu, jejich umístění na pozemní komunikaci, výrobce, konstrukce či na základě různých technických parametrů.

3.1 Dělení dle zákona a požadavky na TPV

Podle zákona č. 22/1997 Sb., (o technických požadavcích na výrobky), dělíme svodidla na „schválená“ a „jiná“. Toto dělení se netýká svodidel dočasných.

„Schválená“ svodidla jsou vyráběna pro opakovaná používání na pozemních komunikacích. Vztahují se na ně normy ČSN EN 1317-1, ČSN EN 1317-2 a harmonizovaná ČSN EN 1317-5+A2. Povinností výrobců/dovozců/zplnomocněných zástupců je k těmto výrobkům vydat montážní návod a TPV, které slouží jako návod pro použití a jejich prostorové uspořádání dle příslušných norem. TPV obsahují základní rozměry svodidla, návrhové parametry svodidla, vzdálenost líce svodidla od pevné překážky, způsob použití svodidel, minimální délku svodidel, zatížení, které musí přenést konstrukce podporující svodidlo, aj.

Svodidla „jiná“ se vyrábějí jako kusová výroba dle projektové dokumentace a nevztahují se na ně normy ČSN EN 1317-2 a ČSN EN 1317-5. Lze je používat pouze v ojedinělých případech, a to výhradně na mostech. Bývají nejčastěji posuzovány podle návrhových norem pro nosné konstrukce. [7]

3.2 Dělení svodidel dle umístění na pozemní komunikaci

Na základě umístění svodidel na komunikaci rozlišujeme dva typy svodidel, a to svodidla jednostranná a oboustranná. Svodidla jednostranná jsou osazována v prostoru nezpevněné části krajnice komunikace a jsou navržena pouze pro náraz z jedné strany. Svodidla oboustranná se nachází ve středním dělicím páse směrově rozdělených komunikací a jsou navržena pro oboustranný náraz.



OBRÁZEK 3.1:
Jednostranné svodidlo
[8]



OBRÁZEK 3.2:
Oboustranné svodidlo
[8]

3.3 Dělení svodidel dle materiálu

Svodidla můžeme rozlišit také na základě materiálu, ze kterého jsou vyrobená. Nejčastějším materiálem pro výrobu svodidel v České republice je ocel.

Ocelová svodidla

Jedná se o vývojově nejstarší typ svodidel, který je současně i nejrozšířenějším v Evropě. Tvoří je kompletní ocelová sestava, která zahrnuje svodnici (případně další podélné pruty), sloupky, distanční díly, spojovací pásy, podložky přípojných prvků, kotevních prvků atd. Vynikají schopností pohltit velké množství kinetické energie, čímž zabraňují vážným zraněním. Ocelová svodidla můžeme dělit na základě jejich chování při nárazu na deformovatelná (poddajná) a nedeformovatelná (tuhá). Z důvodu prodloužení životnosti a zamezení koroze (koroze způsobuje, že materiál degraduje neboli koroduje) je na povrch ocelových prvků aplikována protikorozní ochrana. V České republice se používají například ocelová svodidla JSNH4, ZSNH4, OSNH4. [9], [10]



OBRÁZEK 3.3: Jednostranné ocelové svodidlo NH4 [11]

Lanová svodidla

Lanová svodidla se v České republice vyskytují spíše ojediněle. Jejich výhodou je rovnoměrné pohlcení kinetické energie, minimalizace zranění účastníků silničního provozu a minimalizace škody na vozidlech. Jedná se o nejbezpečnější typ svodidel. Dalšími jejich výhodami jsou nízká pořizovací cena i snadná údržba a oprava. Lana se při nehodě nikdy nepoškodí a svodidlo zůstává funkční i před opravou. Za nevýhody můžeme považovat, že tento typ svodidel je vysoce nebezpečný pro motocyklisty a není vhodný na úseky kratší než 40 metrů. Konstrukce svodidel se skládá z drátěných lan, ocelových sloupků a betonových kotevních bloků s kotevními rámy. [9], [10], [12]



OBRÁZEK 3.4: Lanové svodidlo [12]

Dřevoocelová svodidla

Dřevoocelová svodidla se instalují nejčastěji v místech, kde nehrozí velké nebezpečí, např. k ohrazení parkovišť, místo plotů, či k oddělení automobilové od cyklistické nebo pěší dopravy,

na různých rekreačních, lesních a místních komunikacích a silnicích nižších tříd. Často se s nimi setkáváme v turistických a chráněných oblastech díky přirozenějšímu vzhledu těchto svodidel. Konstrukce dřevoocelových svodidel se skládá z kombinovaných svodnic, kombinovaných sloupků, spojovacích pásků, spojek, kotevních prvků atd. [9], [10]



OBRÁZEK 3.5: Dřevoocelové svodidlo

Betonová svodidla

S tímto typem svodidel se nejčastěji setkáváme na místech, kde je požadována vysoká úroveň zadržetí, ale malá pracovní šířka. Jedná se o velmi bezpečné svodidlo, co se týče možnosti jeho překonání, ale při nárazu velmi negativně působí na posádku havarovaného vozidla. Betonová svodidla často způsobují rozsáhlá vnitřní zranění právě z důvodu prudkosti nárazu (ASI). Nevýhodou je vysoká pořizovací cena a vysoká hmotnost, k instalaci tohoto typu svodidel je zapotřebí jeřáb. Betonové svodidlo je tvořeno prefabrikovanými segmenty a spojovacími díly, nebo monolitickou betonovou konstrukcí. [9], [10]

3.4 Osazování svodidel

O umístění svodidel na pozemní komunikaci se rozhoduje na základě požadavků ČSN 73 6101, ČSN 73 6201 nebo ČSN 73 6110, požadavků dotčených orgánů státní správy, návrhu projektanta, popř. jiných odůvodněných požadavků.

Důvody k osazení svodidly:

- ochrana provozu na pozemní komunikaci – účelem je ochrana účastníků dopravního provozu před vyjetím z vozovky do místa nebezpečí nebo před nárazem do pevné překážky;
- ochrana okolí pozemní komunikace (včetně osob a staveb);



OBRÁZEK 3.6: Betonové svodidlo [8]

- dále je doporučováno zohlednit míru nebezpečí konkrétní pozemní komunikace, a to s ohledem na dovolenou rychlost, intenzitu a skladbu provozu, směrové a výškové poměry. [13]

3.5 Historie

Výroba silničních svodidel v České republice začala v Ostravě v roce 1969. Vývoj ocelových svodidel byl úzce spjat s Novou hutí, dříve zvanou Nová huť Klemenata Gottwalda, dnes většinou patřící společnosti ArcelorMittal Ostrava, a. s.. [14]

První typy svodidel nebyly podrobovány nárazovým zkouškám, jak je tomu v dnešní době. Byly navrženy a vyrobeny na základě výpočtů a zkušeností odborníků. Jednalo se především o jednostranná a oboustranná svodidla typu NHKG, které jsou dosud instalovány na rozsáhlé síti silnic v České republice. Šlo o jediný typ, který byl do roku 1993 používán na silnicích v Československu. To je také důvod, proč se nejčastěji setkáváme právě se svodidly ocelovými. [15], [16]

V devadesátých letech 20. století systém NHKG prošel modernizací a vznikl nový typ svodidel NH4, který na rozdíl od bariér NHKG splňuje požadavky stávajících předpisů (ČSN EN 1317-2, TP 114 a TP 129). Bariérová zkouška byla provedena v roce 1997 ve zkušebním ústavu v Lyonu ve Francii. Přesněji se jednalo o svodidlo JSNH4/N2 s úrovní zadržení N2 a o oboustranné svodidlo OSNH4/H1 pro úroveň zadržení H1. Dále bylo navrženo nové zábradelní svodidlo používané na mostech ZSNH4/H2 pro úroveň zadržení H2. Pro toto svodidlo byla bariérová zkouška provedena Technickým zkušebním ústavem stavebním v Praze v roce 2003. [14], [15]

Společnost ArcelorMittal Distribution Solutions Czech Republic (AMDS CR) v roce 2009 převzala zodpovědnost za vývoj a výrobu od dceřinné společnosti ArcelorMittal Ostrava, a.s. V roce 2010 tato společnost úspěšně vyvinula a odzkoušela nový typ svodnice AM. Jde o pokračovatele typu NH4. Nový typ svodnice AM je velmi podobný předchozímu typu NH4.

U nového svodidla se používá mikrolegovaná ocel s označením S355MC, která disponuje větší pevností než dosud používaný materiál S235JR. Použití S355MC umožnilo snížit tloušťku z dosavadních 4 mm na 2,8 mm a tím snížit i celkovou hmotnost systému při zachování stejných vlastností. Zároveň byl snížen index prudkosti nárazu ASI. [15], [16]

AMDS CR se také v letech 2008 až 2012 aktivně podílela na výzkumu a vývoji tzv. chytrého svodidla s čidly pro zaznamenání nehody, který je garantován Evropskou unií. Získané zkušenosti byly využity při výrobě nového speciálního typu svodidla JSAM-M/H1, jehož hlavním účelem je ochrana motocyklistů proti podjetí svodidel a nárazu do sloupků. Ve spolupráci s univerzitou v Zaragoze došlo k vyvinutí vhodného tvaru spodních pásnic. Tato svodidla byla nejprve podrobena počítačové simulaci nárazu motocyklisty do svodidla a poté byly výsledky srovnány s reálnou bariérovou zkouškou. Na konci roku 2013 byl tento typ umístěn na zkušebním úseku dlouhém 142 m u obce Šebrov v okrese Blansko. [14], [17]

Na českých silnicích se můžeme setkat i s jinými typy svodidel, jako jsou lanová či betonová, ale jde spíše o ojedinělé případy. AMDS CR je stále jediným výrobcem v České republice a je členem Evropské federace silnic (ERF). Vyrábí více než 80 % svodidel používaných na českých silnicích.

V České republice v současné době státní správa nenutí investory používat na novostavbách dálnic bezpečnostně nejvýhodnější typ svodidel, jako tomu bývá v zahraničí. Svodidla musí splňovat požadavky na bezpečnost, ale jde o rozhodnutí investora či projektanta, kterou variantu zvolí. [12]

Kapitola 4

Zkoušení silničních svodidel

Závěrečným procesem vývoje a zkoušení svodidel je nárazová (bariérová) zkouška, která musí být provedena na každém svodidle, má-li být schváleno k použití na pozemních komunikacích. Podle požadované úrovně zadržení se používají standardizované nárazové zkoušky.

Kritéria pro tyto zkoušky jsou obsažena v evropské normě ČSN EN 1317-2, která přesně definuje veličiny měřené při nárazových zkouškách, specifikovány parametry vozidel používaných při zkouškách, přístrojové vybavení, metody zaznamenávání dat, jejich vyhodnocování.

4.1 Chování svodidel

Při zkoušce se sleduje několik charakteristik, na základě kterých se predikuje chování svodidla při nárazu v reálném provozu a následně rozhoduje o vhodnosti jeho použití.

Požadavky na chování svodidel při zkoušce:

- Svodidlo musí zadržet a přeměřovat vozidlo, aniž by došlo k úplnému zničení jakýchkoliv základních podélných prvků svodidla.
- Žádná část svodidla by se neměla zcela oddělit. Každá zcela oddělená část svodidla o hmotnosti vyšší než 2 kg musí být identifikována, lokalizována a zaznamenána v protokolu.
- Žádná část svodidla nesmí proniknout do vozidla.
- Proniknutí svodidel do kabiny cestujícího ve vozidle nebo její deformace, které by mohly ohrozit posádku vozidla, jsou nepřípustné. [5]

4.2 Zatížení svodidel

Zatížení svodidel vyjadřujeme dvěma způsoby. Svodidla „schválená“ zatěžujeme konkrétními nárazy dle tabulky 4.1. Svodidla „jiná“ zatěžujeme silou statickou F dle tabulky 4.2. Síla F může působit na kterékoliv části svodidla, s výjimkou koncových částí a musí být jen jedna. Směr působení je kolmý na podélnou osu svodidla. [7]

TABULKA 4.1: Zatížení svodidel "schválených"[7]

Označení nárazu	Nárazová rychlost [km/h]	Úhel nárazu [°]	Celková hmotnost vozidla [kg]	Kinetická energie [kJ]
TB11	100	20	900	40,6
TB21	80	8	1300	6,2
TB22	80	15	1300	21,5
TB31	80	20	1500	43,3
TB32	110	20	1500	81,9
TB41	70	8	10000	36,6
TB42	70	20	10000	126,6
TB51	70	20	13000	287,5
TB61	80	20	16000	462,1
TB71	65	20	30000	572,0
TB81	65	20	38000	724,6

TABULKA 4.2: Zatížení svodidel "jiných"[7]

Zatěžovací třída	Síla [kN]	Výška působíště nad přilehlou vozovkou [m]
A	100	0,65
B	200	0,10 pod horní hranou svodidla avšak nejvýše 1,10
C	400	0,10 pod horní hranou svodidla avšak nejvýše 1,10
D	600	1,25

4.3 Úroveň zadržení

Podle stupně ochrany prostředí a míry rizika konkrétní pozemní komunikace (výškové a směrové vedení trasy, poloměry oblouků, návrhová rychlost, nebezpečné úseky atd.) se stanovuje úroveň zadržení, na základě kterého se vybírá určitý typ svodidel. [5]

Úroveň zadržení svodidla je taková velikost bočního nárazu vozidlem, kterému je svodidlo schopné odolat, aniž by bylo překonáno vozidlem, při zajištění požadované prudkosti nárazu a přijatelnosti chování svodidla. [7]

Nízká úhlová zadržení jsou navržena pouze pro dočasná svodidla. Úspěšně schválená svodidla pro konkrétní úroveň splňují i podmínky pro nižší úroveň zadržení, výjimkou jsou pouze úrovně zadržení N1 a N2, která v sobě nezahrnují T3. Úrovně zadržení L jsou oproti úrovni H zkoušeny testem TB32 dle tabulky 4.3. V České republice nejsou požadována svodidla s úrovní zadržení L. [5]

TABULKA 4.3: Úrovně zadržení svodidel "schválených"[5]

Rozdělení úrovní zadržení	Úroveň zadržení	Požadované testy	Úroveň zadžení	Požadované testy
Nízké úhlové zadržení	T1	TB21	-	-
	T2	TB22	-	-
	T3	TB41 a TB21	-	-
Běžné zadržení	N1	TB31	-	-
	N2	TB32 a TB11	-	-
Vyšší zadržení	H1	TB42 a TB11	L1	TB42 a TB32 a TB11
	H2	TB51 a TB11	L2	TB51 a TB32 a TB11
	H3	TB61 a TB11	L3	TB61 a TB32 a TB11
Velmi vysoké zadržení	H4a	TB71 a TB11	L4a	TB71 a TB32 a TB11
	H4b	TB81 a TB11	L4b	TB81 a TB32 a TB11

4.4 Deformace záchytného systému

Deformace svodidla v průběhu nárazové zkoušky charakterizují tři veličiny.

Dynamický průhyb D_m je definován jako maximální boční dynamické přemístění kteréhokoliv bodu líce záchytného systému.

Pracovní šířka W_m je maximální boční vzdáleností mezi libovolnou částí svodidla na jeho lící straně před nárazem a maximální dynamickou polohou kterékoliv části svodidla během nárazu.

Vychýlení vozidla VI_m se určuje pouze u nákladních automobilů či autobusů. Jedná se o maximální dynamickou boční polohu od líce nedeformovatelného svodidla. Vyhodnocuje se ze záznamů vysokorychlostních kamer nebo videozáznamu. [5]

Na základě dynamického průhybu, pracovní šířky a vychýlení vozidla jsme schopni určit, jak a v jaké vzdálenosti má být svodidlo instalováno tak, aby byla zachována funkce systému. Deformace závisí nejen na typu systému, ale i na charakteristikách nárazové zkoušky.

Pro srovnání se využívají normalizované hodnoty dynamického průhybu, pracovní šířky a vychýlení vozidla, které získáme výpočtem z naměřených hodnot. [5]

- Normalizovaný dynamický průhyb

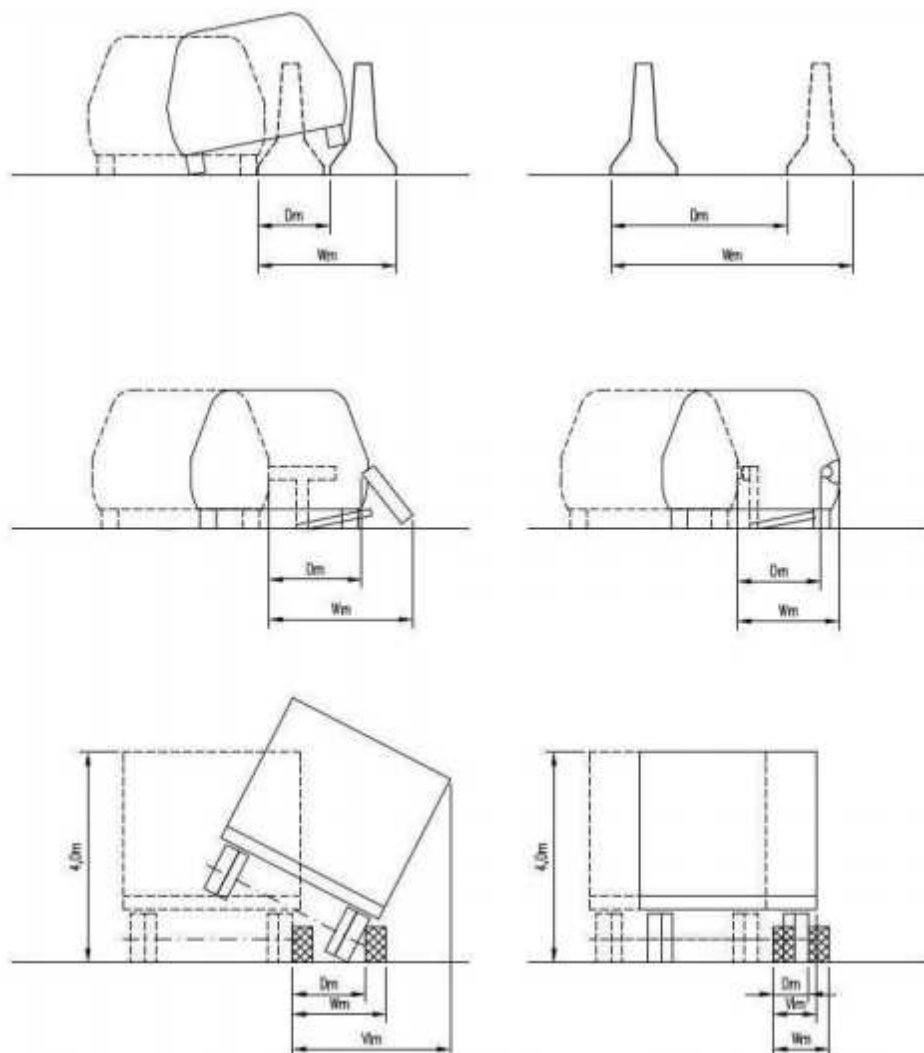
$$D_N = D_m * \sqrt{\frac{M_t * (V_t * \sin\alpha_t)^2}{M_m * (V_m * \sin\alpha_m)^2}} \quad [\text{m}]$$

- Normalizovaná pracovní šířka

$$W_N = W_u * [(W_m - W_u) * \sqrt{\frac{M_t * (V_t * \sin\alpha_t)^2}{M_m * (V_m * \sin\alpha_m)^2}}] \quad [\text{m}]$$

- Normalizované vychýlení vozidla

$$VI_N = VI_m * \sqrt{\frac{M_t * (V_t * \sin\alpha_t)^2}{M_m * (V_m * \sin\alpha_m)^2}} \quad [\text{m}]$$



OBRÁZEK 4.1: Naměřené hodnoty dynamického průhybu, pracovní šířky a vychýlení vozidla [5]

- D_m změřený dynamický průhyb [m]
 W_m změřená pracovní šířka [m]
 W_u nedeformovaná šířka systému [m]

V_{I_m}	změřené vychýlení vozidla [m]
M_t	specifikovaná (normou stanovená) celková hmotnost [kg]
V_t	specifikovaná (normou stanovená) rychlost [m/s]
α_t	specifikovaný (normou stanovený) úhel [°]
M_m	změřená celková hmotnost [kg]
V_m	změřená rychlost [m/s]
α_m	změřený úhel [°]

4.5 Zkušební vozidlo

Pro zkoušení silničních záchytných systémů jsou přesně specifikovaná zkušební vozidla. Hmotnost vozidla je udána včetně zátěže pro nákladní vozidla (HGV) a do maximální zátěže je započítána hmotnost měřícího a záznamového zařízení, i hmotnost všech tekutin a plynů. Zároveň zátěž nemůže být umístěna v takových místech, kde by mohla změnit (ovlivnit) deformaci vozidla, či do něj vniknout.[5]

4.6 Bezpečnost vozidla pro posádku

Nárazové zkoušky jsou podrobně popsány v ČSN EN 1317-1 a ČSN EN 1317-2. Tyto normy shrnují základní požadavky na výpočet kritérií týkajících se nebezpečnosti nárazu osobního automobilu při bariérové zkoušce:

- index prudkosti nárazu ASI;
- nárazová rychlost teoretické hlavy THIV;
- index deformace kabiny vozidla VCDI.

4.6.1 Index prudkosti nárazu

Index prudkosti nárazu ASI je bezrozměrnou veličinou, která určuje míru nebezpečí pro osoby nacházející se uvnitř vozidla. Vypočítá se z údajů získaných pomocí přístrojového vybavení vozidla. Pro tento účel je třeba zaznamenat data minimálně 500 ms před kontaktem a 500 ms po kontaktu. [4]

Hodnota ASI je funkcí času a vypočítá se na základě následujícího vzorce:

$$ASI(k) = \left(\left(\frac{\overline{a_x}}{12} \right)^2 + \left(\frac{\overline{a_y}}{9} \right)^2 + \left(\frac{\overline{a_z}}{10} \right)^2 \right)^{0,5}$$

Kde $\overline{a_x}$, $\overline{a_y}$, $\overline{a_z}$ jsou filtrované složky zrychlení vozidla. Čím vyšší je hodnota indexu prudkosti nárazu ASI, tím vyšší je riziko pro osoby uvnitř vozidla. Výsledný index se proto stanovuje jako maximum z vypočítaných hodnot. [4]

$$ASI = \max[ASI(k)]$$

4.6.2 Nárazová rychlost teoretické hlavy

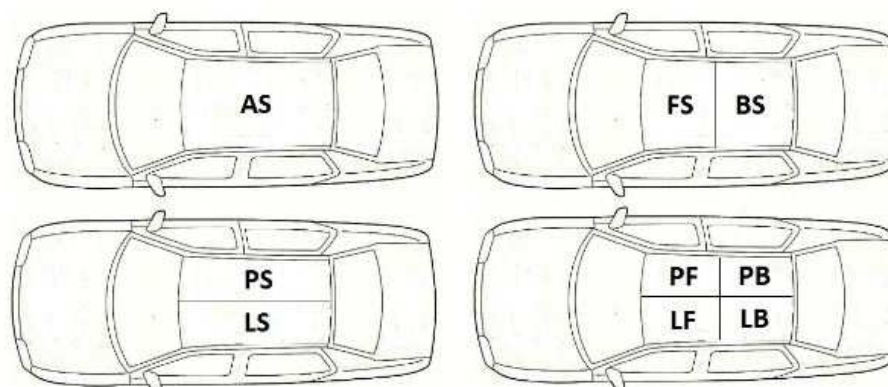
Nárazová rychlost teoretické hlavy THIV slouží ke stanovení prudkosti nárazu cestujícího uvnitř vozidla, kdy dojde ke kolizi mezi ním a záchytným systémem. Osobu uvnitř vozidla považujeme za volně pohybuující se předmět (hlavu), který v případě nárazu do záchytného systému pro vozidla dále pokračuje v pohybu, dokud nedojde k nárazu do některé části interiéru vozidla. [4]

Konečná hodnota THIV je rychlost hlavy v čase T. Stanovíme ji dle vzorce:

$$THIV = ((v_x^2(T) + (v_y^2(T)))^2$$

4.6.3 Index deformace kabiny vozidla

Účelem indexu deformace kabiny vozidla VCDI je popsat deformaci vnitřního prostoru vozidla, která byla způsobena nárazem do záchytného systému nikoliv následnými nárazy. Index je složen ze dvou písmen a sedmi číslic – XXabcdefg. Písmena značí umístění deformací, číslice udávají zmenšení sedmi vnitřních rozměrů v procentech. [5]



OBRÁZEK 4.2: Deformační zóny vozidla [5]

AS	všechna sedadla
BS	zadní sedadla
FS	přední sedadla
PS	pravá sedadla
LS	levá sedadla
PF	pravé přední sedadlo
PB	pravé zadní sedadlo
LF	levé přední sedadlo
LB	levé zadní sedadlo

- a vzdálenost mezi přístroj. deskou a horním okrajem zadních sedadel
- b vzdálenost mezi střešou a podlahovým panelem
- c vzdálenost mezi zadními sedadly a panelem motoru
- d vzdálenost mezi nejnižším bodem přístroj. desky a podlah. panelem
- e šířka vnitřku vozidla

f vzdálenost mezi nižším okrajem pravého okna a vyšším okrajem levého
 g vzdálenost mezi vyšším okrajem pravého okna a nižším okrajem levého

4.7 Chování vozidla při zkoušce

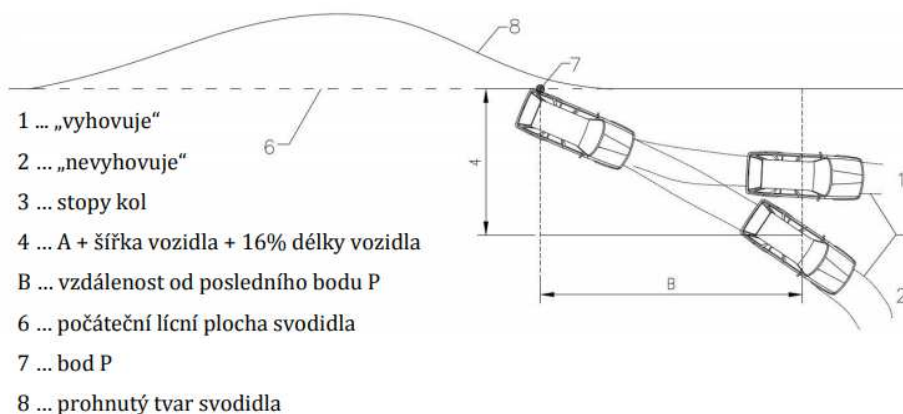
Požadavky na chování vozidel při zkoušce:

- V průběhu nárazu a po nárazu se nesmí více než jedno kolo vozidla dostat za svodidlo (vrchem nebo spodem).
- V průběhu nárazu a po nárazu se vozidlo nesmí převrátit na žádnou svou stranu.
- Při zkouškách s těžkými vozidly a autobusy se nesmí více jak 5 % hmotnosti nákladu oddělit nebo rozlít do doby, než kola opustí výjezdový prostor.
- Vozidlo musí po nárazu definovaně opustit svodidlo. [5]

Rozměry výjezdové plochy jsou definované v tabulce 4.4, a to jak pro vozidla osobní, tak i pro vozidla ostatní.

TABULKA 4.4: Rozměry výjezdových ploch [5]

Typ vozidla	A [m]	B [m]
Osobní vozidla	2,2	10,0
Ostatní vozidla	4,4	20,0



OBRÁZEK 4.3: Schéma chování vozidla při nárazu [5]

4.8 Zkušební místo

Místo provedení bariérové zkoušky je přesně specifikováno v ČSN 1317-1. Sklon příjezdové dráhy i výjezdové plochy nesmí přesáhnout 2,5 %. Povrch musí být zpevněný a v době zkoušky zbaven prachu, stojaté vody, ledu, popř. sněhu. Pro příjezdovou plochu jsou nutné dostatečné rozměry k dosažení požadované rychlosti vozidla. Zároveň musí zkušební místo umožňovat kontrolu stability vozidla při příjezdu i odjezdu od záchytného systému. Podrobný půdorysný náčrt včetně kót je součástí zkušebního protokolu. [5]

Kapitola 5

Ocelové svodidlo

Hlavním cílem bakalářské práce je provedení dynamické numerické simulace nárazu vozidla do silničního ocelového svodidla. Pro simulaci bylo zvoleno jednostranné silniční svodidlo NH4 s úrovní zatížení H1 a N2, na kterých byla provedena bariérová zkouška dle normy ČSN EN 1317. Obě zvolená svodidla se skládají ze stejných konstrukčních dílů, liší se pouze vzdálenostmi mezi jednotlivými sloupky.

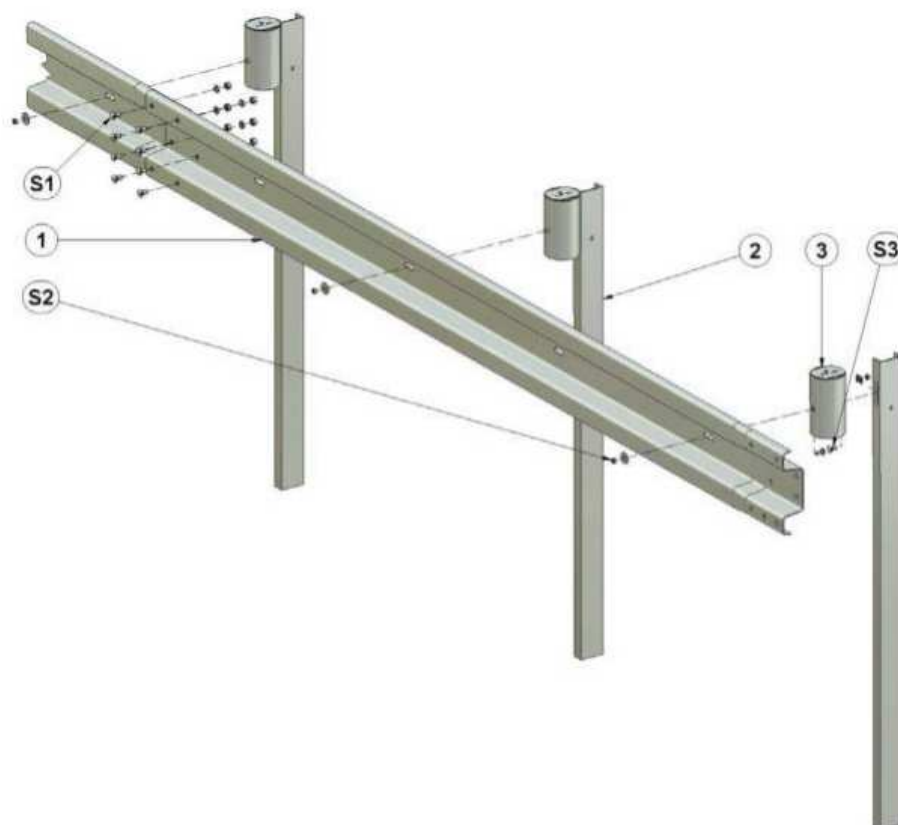
Svodidla typu NH4 patří v České republice mezi nejpoužívanější. Číslo „4“ udává tloušťku plechu 4 mm, ze kterého je vyrobena svodnice. Písmenné označení „NH“ značí výrobce Nová huť Ostrava. Konstrukční díly a prostorové uspořádání tohoto typu svodidel je předmětem TPV 167.

5.1 Konstrukční díly

Všechny součásti ocelového svodidla JSNH4/H1 i JSNH4/N2, jsou uvedeny v tabulce 5.1, která jsem získala z projektové dokumentace výrobce těchto typů svodidel společnosti Arcelor Mittal. Umístění jednotlivých dílů je zobrazeno na obrázku 5.1.

TABULKA 5.1: Soupis dílů svodidla JSNH4/H1 a JSNH4/N2 [18], [19]

Název dílu	Obrázek č. 5.1	ks/4m	
		H1	N2
Svodnice NH4	1	1	1
Sloupek UE 100 krajní 1900	2	2	1
Trubková spojka	3	2	1
Šroub s polokruhovou hlavou a nose M16x30-4.6-tZn	S1	8	8
Podložka 17,5-tZn (Ø30/17,5/3)		8	8
Matice M 16 – 6 – tZn ISO 4032		8	8
Šroub s polokruhovou hlavou a čtyřhranem M12x30-4.6-tZn	S2	2	1
Podložka 14-tZn (Ø45/14/4-otvor čtyřhranný)		2	1
Matice M 12 – 6 – tZn ISO 4032		2	1
Šroub s polokruhovou hlavou a čtyřhranem M12x30-4.6-tZn	S3	2	1
U-podložka 14-tZn (klínová podložka)		2	1
Matice M 12 – 6 – tZn ISO 4032		2	1



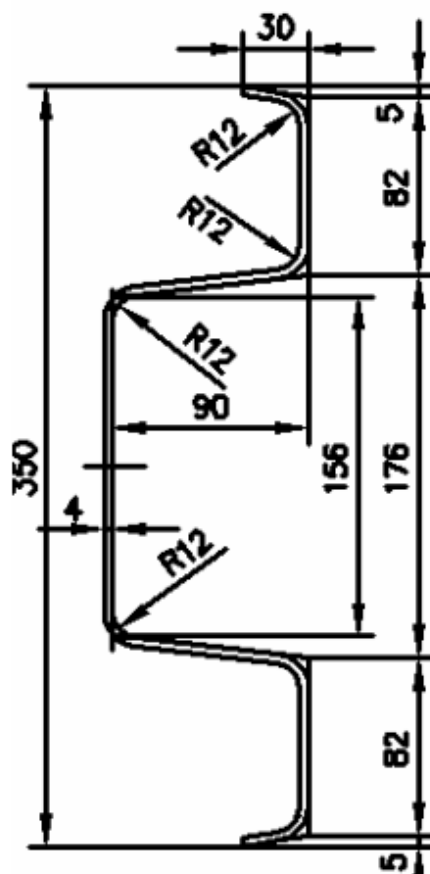
OBRÁZEK 5.1: Konstrukční díly svodidla JSNH4/H1 a JSNH4/N2 [18]

5.1.1 Sloupek

Sloupek je vyráběn z válcových profilů UE 100. Pro úroveň zatížení H1 se osazují ve vzdálenosti 2 m, pro úroveň zadržetí N2 jsou instalovány po 4 m. Sloupky jsou orientovány vnější stranou stojiny proti směru jízdy přilehlého jízdního pruhu. Sloupky jsou dlouhé 1900 mm z toho 710 mm se nachází nad terénem. [20]

5.1.2 Svodnice NH4

Svodnice NH4 je vyráběna z plechu o tloušťce 4 mm. Celková délka svodnice je 4250 mm. V běžné, nekalibrované části má průřez svodnice výšku 350 mm a šířku 94 mm. Kalibrace je taková úprava jednoho konce svodnice, která umožňuje těsné přiložení k nekalibrovanému konci další svodnice a jejich sešroubování. Průřez kalibrované části svodnice má výšku 341 mm. Svodnice jsou spojeny osmi šrouby s polokruhovou hlavou a noseM16x30, maticí M16 a podložkou 17,5 (která je umístěná pod maticí). Otvory pro spojení jsou v kalibrované části kruhové o poloměru 18 mm a v nekalibrované části kapkovité o poloměru 18 mm. Otvory pro připojení ke sloupku jsou oválné o poloměru 18 mm a délce 60 mm. Svodnice jsou vyráběny jak pro úseky přímé, tak pro úseky v oblouku – pro oblouky vnitřní i vnější o poloměrech od 6 m do 100 m, je-li poloměr oblouku větší než 100 m používají se svodnice přímé. [20]



OBRÁZEK 5.2: Příčný řez svodnice NH4 [20]

5.1.3 Trubková spojka

Trubková spojka je tvořena ocelovou trubkou o průměru 133 mm vytvořenou z 3mm plechu. Pro připojení svodnice k trubkové spojce a trubkové spojky ke sloupku se používají šrouby s polokruhovou hlavou a čtyřhranem M12x30-4.6-tZn. Hlava šroubu je orientována uvnitř trubkové spojky. Pod maticí se na lící straně používá kruhová podložka vnějšího průměru 45 mm se čtvercovým otvorem 14 mm, tloušťky 4 mm. Na straně příruby sloupku se používá klínová U-podložka. [20]

5.1.4 Materiál

Svodnice, sloupek i trubková spojka jsou vyrobeny z totožného materiálu, kterým je materiál S235JR. Jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel, kterou je možno svařovat všemi obvykle používanými způsoby svařování. [20]

5.2 Testování a úroveň zadržení

Oba zvolené typy svodidel jsou při bariérové zkoušce testovány zkouškou TB11, tedy nárazem osobního automobilu o hmotnosti 900 kg při rychlosti 100 km/h. Svodidlo H1 já dále zatěžováno testem TB42, kdy se jedná o náraz nákladního automobilu o hmotnosti 10 000 kg při rychlosti 70 km/h.

U svodidla N2 je druhým zatěžovacím testem TB32, který odpovídá nárazu osobního automobilu o hmotnosti 1500 kg při rychlosti 110 km/h. Testy prokázaly, že jsou svodidla schopna odolat velikosti bočního nárazu, který odpovídá úrovni zatížení H1 a N2. Další naměřené parametry jsou shrnuty v níže uvedené tabulce 5.2. [5]

TABULKA 5.2: Parametry svodidla JSNH4/H1 a JSNH4/N2 [18], [19]

Parametr	H1	N2
Pracovní šířka [m]	1,53	1,28
Dynamický průhyb [m]	1,20	1,19
Index prudkosti nárazu	0,925	0,725
Teoretická hmotnost [kg/m]	28,09	23,22

5.3 Ocelová svodidla na silnicích

Svodidla mají plnou účinnost tehdy, mají-li plnou předepsanou výšku. Do předepsané výšky se nepočítají výškové náběhy, které se umístí ují před/za nebezpečná místa, či chráněné úseky. Pro ocelová svodidla existují dva typy náběhů: dlouhý - o délce mezi 8 a 12 m a krátký o délce 4 m. Krátký výškový náběh lze použít pouze v ojedinělých případech. Minimální délky jednotlivých svodidel jsou uvedeny v tabulce 5.3. Výškové náběhy nejsou do minimální délky započítávané. [20]

TABULKA 5.3: Minimální délka svodidla [20]

Typ svodidel	Minimální délka svodidla [m] pro rychlost	
	do 80 [km/h]	nad 80 [km/h]
JSNH4/N2	28	44
JSNH4/H1	32	52

Kapitola 6

Geometrický model

Metoda konečných prvků je výpočetní metoda, která je založená na diskretizaci kontinua. Důležité je si uvědomit, že se jedná o přibližné řešení reálných problémů. Numerická simulace pomocí MKP nám umožňuje opakovaně provádět výpočty se stálými výsledky. Díky simulacím můžeme minimalizovat počet fyzických zkoušek, avšak výsledky z numerické simulace by vždy měly být srovnány se zkouškou fyzickou. V ideálním případě by měla postačit zkouška homologační. V případě bariérové zkoušky se jedná o dynamickou silně nelineární úlohu. Abychom se přiblížili reálným výsledkům, je třeba vycházet z kvalitního geometrického modelu, který je podkladem pro model numerický. [21], [22]

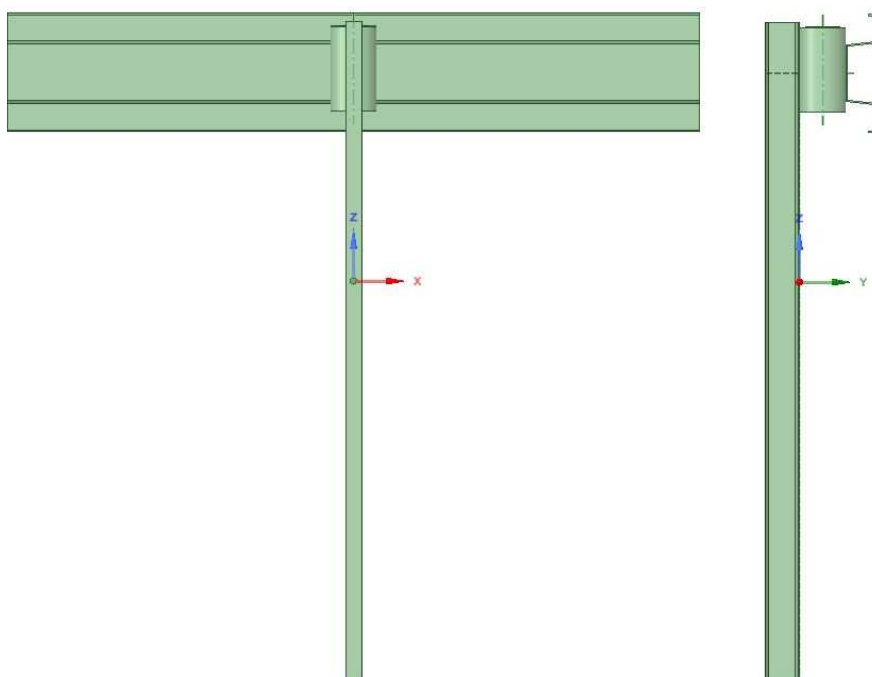
6.1 Model svodidla

Metod, kterými lze získat geometrický model, je mnoho. Pro účely této práce, byly jednotlivé částivýsledného geometrického modelu testované sestavy, vytvořeny pomocí 3D geometrického modeláře ANSYS SpaceClaim Direct Modeler. Sestava se skládá ze tří částí – sloupku, trubkové spojky a svodnice. [23]

Jako podklad pro tvorbu modelu sloužila informativní příloha TPV 167 – konstrukční díly. Vzhledem k tomu, že oba zkoušené typy svodidel se skládají ze stejných konstrukčních dílů a liší se pouze rozestupem sloupků, budu postup jejich tvorby popisovat současně.

Při tvorbě modelu jsem některé části oproti skutečnosti zjednodušila či zanedbala. Důvodem zjednodušení modelu je snížení výpočetního času. V rámci zjednodušení jsem šroubové spoje nahradila 1D prvky nosníkového typu (Beam).

Nejprve jsem vymodelovala jednotlivé části. Trubková spojka se skládá ze dvou částí z dutého neuzavřeného válce o tloušťce 4 mm a z plechovém pásku o stejné tloušťce umístěného na horní podstavě. Průřez sloupku má tvar U s rozměry 23x100 mm a délkou 1900 mm. Průřez svodnice je symetrický kolem středové osy. Při modelování jsem využila funkci zrcadlení. Rozměry průřezu jsou 94x350 mm a délka svodidla 2000 mm. Při modelování jsem zanedbala zaoblení hran sloupku i svodnice, vzhledem k malému poloměru křivosti. Ve všech třech případech jsem nejprve pomocí křivek vytvořila plochu průřezu a poté pomocí funkce extrude vznikl 3D model požadovaných rozměrů. Jednotlivé části jsem spojila v programu ANSYS SpaceClaim a vznikla sestava skládající se z jednoho kusu sloupku, trubkové spojky a 2 m dlouhé svodnice.



OBRÁZEK 6.1: Geometrický model sestavy

6.2 Model automobilu

Pro simulaci nárazu jsem zvolila model osobního automobilu značky Chevrolet – C2500 HD Pickup. Model vozidla byl vytvořen americkou společností National Crash Analysis Center (NCAC) a byl volně dostupný na jejich webových stránkách. Tvoří jej pouze 10500 elementů, a proto, s ohledem na co nejkratší výpočetní čas, se ukázal tento model osobního automobilu jako vhodný pro prováděnou simulaci.

Model vozidla již obsahuje přednastavenou hmotnost a rychlost. Proto porovnám přednastavené hodnoty s hodnotami testů TB11 a TB32 (tabulka č. 6.1. Kinetickou energii lze spočítat dle vzorce: [24]

$$E_k = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad [\text{J}]$$

TABULKA 6.1: Parametry

Veličina	Přednastavené parametry	Parametry	
		TB11	TB32
hmotnost [kg]	1800	900	1500
rychlost [m/s]	27,982	27,778	30,556
kinetická energie [J]	704693,092	347227,779	700251,852

Na základě znalosti potřebné kinetické energie spočítám, při zachování hmotnosti modelu, potřebnou rychlost vozidla, kterou použiji pro simulaci nárazu.

6.2.1 TB11

Výpočet po úpravě do požadovaného tvaru a dosazení vypadá takto:

$$v_v = \sqrt{\frac{E_k * 2}{m}} = \sqrt{\frac{344227,779 * 2}{1800}} = \mathbf{19,642} \quad [\text{m/s}]$$

V případě kol je pohybový stav určen kromě pohybu translačního i pohybem rotačním. Kola tedy konají dva pohyby. Otáčí se kolem osy kola O_k úhlovou rychlostí ω a zároveň se pohybují dopředu rychlostí automobilu v . V dalším kroku jsem tedy spočítala úhlovou rychlost, s jakou se budou kola otáčet. [24], [25]

Pro dopřednou rychlost středu kola a jeho úhlovou rychlost platí vztah:

$$v = r * \omega \quad [\text{m/s}],$$

kde r je poloměr kola. Z nastavení modelu znám velikost obou původních rychlostí. Úpravou základního vztahu dostanu vzorec pro výpočet poloměru kola:

$$r = \frac{v_p}{\omega_p} = \frac{27,982}{78,6} = \mathbf{0,356} \quad [\text{m}],$$

Vzhledem k tomu, že jsem již vypočítala rychlost vozidla pro simulaci a znám i poloměr kola, jsem schopna dopočítat rychlost rotačního pohybu kol.

Po úpravě a dosazení vypadá výsledný vztah následovně:

$$\omega = \frac{v_v}{r} = \frac{19,642}{0,356} = \mathbf{55,174} \quad [\text{s}^{-1}].$$

Hodnoty veličin pro nastavení pohybu shrnuje tabulka 6.2.

TABULKA 6.2: Parametry vozidla pro zkušební test TB11

Rychlost [m/s]	Úhlová rychlost [s ⁻¹]	Kinetická energie [J]	Poloměr kola [m]	Hmotnost [kg]
19,642	55,174	347227,779	0,356	1800

6.2.2 TB32

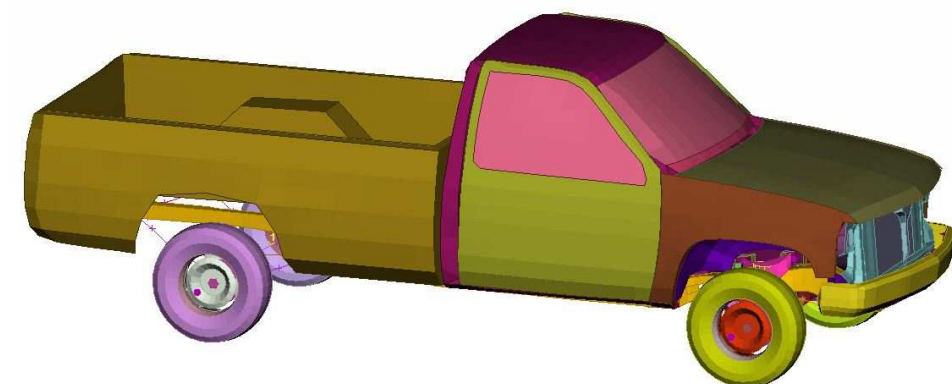
Výpočet po úpravě vzorec do požadovaného tvaru a dosazení vypadá pro TB32 následovně:

$$v_v = \sqrt{\frac{E_k * 2}{m}} = \sqrt{\frac{700251,852,092 * 2}{1800}} = \mathbf{27,894} \quad [\text{m/s}]$$

Rozdíl mezi přednastavenou a vypočtenou rychlostí:

$$\delta = v_p - v_v = 27,982 - 27,778 = \mathbf{0,086} \quad [\text{m/s}]$$

Při výpočtu jsem zjistila malou odchylku mezi přednastavenou a vypočtenou rychlostí. Přednastavené parametry tedy ponechám pro simulaci nárazu dle TB32.



OBRÁZEK 6.2: Model automobilu

Kapitola 7

Numerický model

Postup řešení numerických simulací pomocí metody konečných prvků se dá rozdělit na tři základní části:

- **preprocessing** – příprava modelu;
- **solution** – řešení;
- **postprocessing** – vyhodnocení a kontrola výsledků.

Podkladem pro numerický model svodidla je geometrický model (viz kapitola 6). Samotnou tvorbu modelu numerického jsem provedla v prostředí programu LS-PrePost, který slouží k přípravě modelů pro multifunkční explicitní řešič LS-Dyna.

Program LS-PrePost nám umožňuje definování sítě konečných prvků, nastavení kontaktů, počátečních podmínek, zatížení, materiálů a dalších okrajových podmínek pro dosažení kvalitních výsledků.

7.1 Systém jednotek

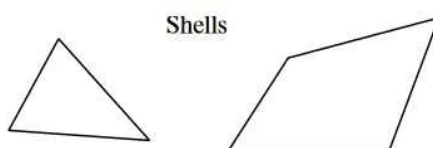
Program LS-PrePost nepracuje se základními jednotkami SI, ale v jejich poměrech. Při práci je třeba hned na začátku zvolit konkrétní sadu jednotek, kterou je nutno dodržovat po celou dobu vytváření numerického modelu. Jako referenčními body systému jsou poskytovány hustota oceli, Youngův modul pružnosti oceli a gravitační zrychlení. Zvolený systém jednotek pro tuto práci je uveden v tabulce 7.1 a byl převzat z oficiálních stránek pro LS-Dyna.

TABULKA 7.1: Systém jednotek [26]

Veličina	Název jednotky	Označení jednotky
Hmotnost	tuna	t
Délka	milimetr	mm
Čas	sekunda	s
Síla	Newton	N
Napětí	MegaPascal	MPa
Hustota	tuna na milimetr krychlový	t/mm ³
Rychlost	milimetr za sekundu	mm/s
Energie	Newton na milimetr	N · mm

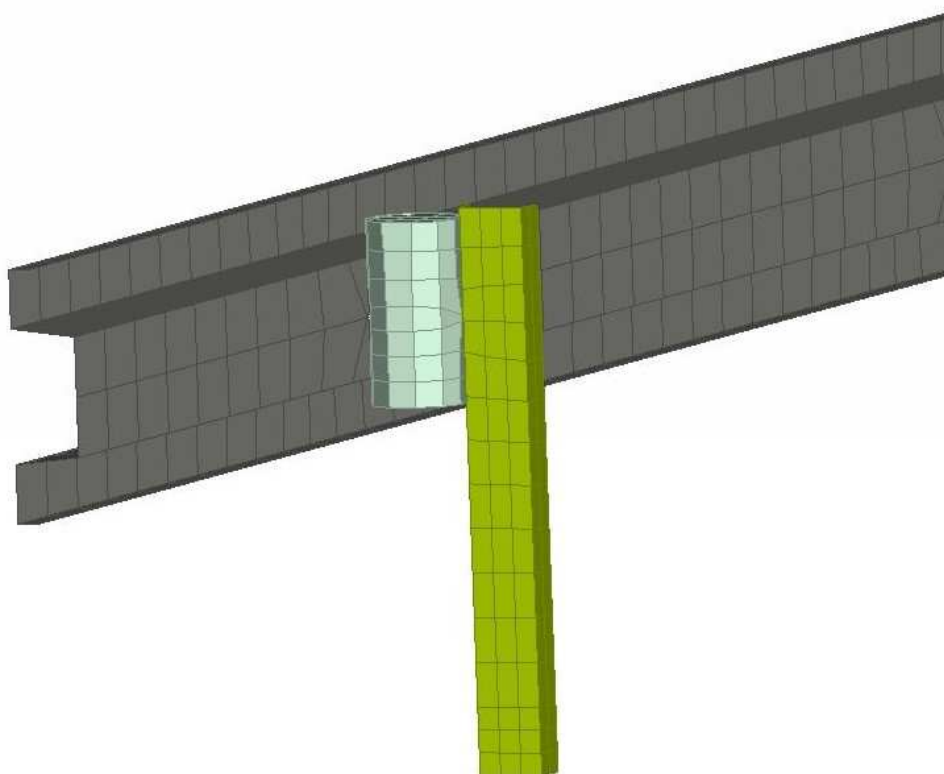
7.2 Tvorba sítě

Dalším krokem bylo vytvoření výpočetní sítě, který spočívá v rozdělení modelu na konečný počet elementů. Časový krok v MKP je určen velikostí nejmenšího elementu, což znamená, že čím je síť jemnější, tím přesnější a časově náročnější bude výpočet. Vzhledem k rozsahu řešeného problému, kdy kromě automobilu při simulaci musím uvažovat s desítkami metrů svodidel, je třeba vhodně zvolit velikost elementů tak, aby bylo dosaženo kvalitních výsledků v přiměřeném čase. Kvalitní síť se skládá z geometricky pravidelných, přibližně stejně velkých elementů. [22]



OBRÁZEK 7.1: Typy 2D elementů [27]

Charakteristickým prvkem ocelových svodidel je, že jeden rozměr (tloušťka) je výrazně menší než ostatní dva rozměry. Z toho důvodu jsem pro vytvoření sítě zvolila plošné skořepinové čtyř-uzlové a tří-uzlové prvky (viz obrázek č. 7.1). Plošnou síť pro jednotlivé díly jsem vytvořila pomocí střednicové roviny, které byla přiřazena požadovaná tloušťka. Pro sloupek jsem vytvořila střednicovou rovinu o proměnné tloušťce tak, aby co nejlépe charakterizovala geometrii sloupku. Výslednou síť lze vidět na obrázku č. 7.2. [28]



OBRÁZEK 7.2: Ukázka sítě sestavy

Pro síť svodidel jsem využila dva typy elementů - typ 2 a typ 16. Typ 2 je vhodný pro plechové prvky, proto byl přiřazen elementům svodnice a trubkové spojky. Zatímco sloupek se svým chováním podobá spíše nosníku, proto je tvořen elementy typu 16.

7.3 Šroubové spojení

Existují různé možnosti modelování šroubů. V rámci zjednodušení nebyly v tomto případě šroubové spoje modelovány jako 3D prvky. K simulaci šroubového spojení jsem použila funkci **BOLT**, která využívá prutových prvků k vytvoření těla šroubu. Tento přístup eliminuje potřebu definovat kontakty. V místě spojení je vytvořena matematická vazba reprezentující fyzická spojení. [29]

7.4 Materiál

Při tvorbě numerického modelu sestavy svodidla jsem použila dva druhy materiálů. V obou případech se jednalo o konstrukční oceli. Všechny součásti jsou nerigidní, tzn. deformovatelné. Svodnici, trubkové spoje a sloupku byl přiřazen bilineární materiál. Šroubová spojení, která jsem nahradila prvky typu beam, jsem vytvořila z lineárně pružného materiálu. V programu LS-PrePost jsem materiály dále definovala.

7.4.1 Elastic (konstrukční ocel)

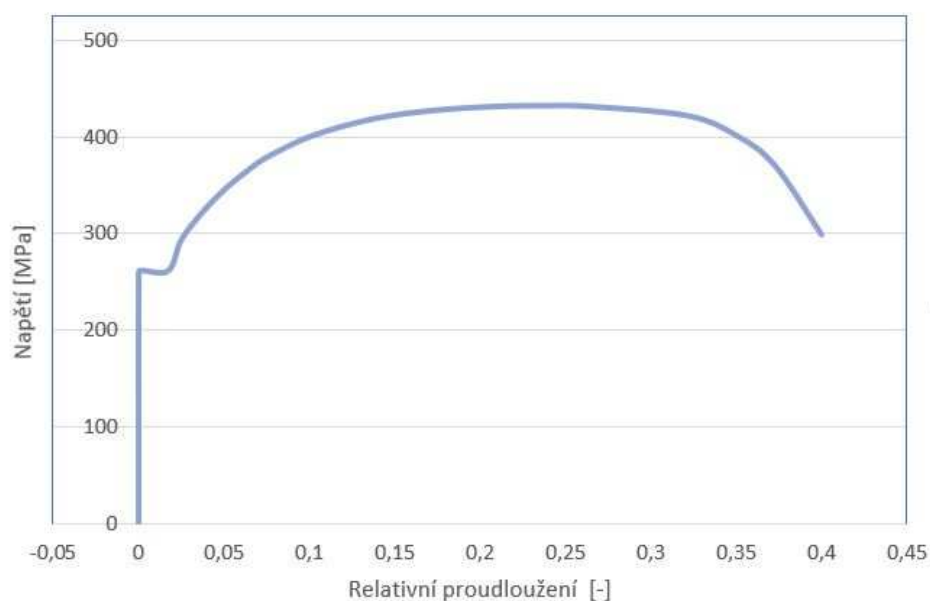
Pro těla šroubů jsem použila materiálovou charakteristiku elastic (konstrukční ocel). Jedná se o izotropní elastický materiál a je definován materiálovými konstantami, které jsou popsány v tabulce č. 7.2. [16]

TABULKA 7.2: Materiálová charakteristika oceli pro šroubová spojení

Hustota materiálu	$t * \text{mm}^{-3}$	$7,85 * 10^{-9}$
Youngův modul pružnosti	MPa	$2,0 * 10^5$
Poissonovo číslo	–	0,3

7.4.2 Piecewise linear plasticity (bilineární ocel)

Bilineární ocel je materiálová charakteristika, u níž je možné definovat elasto-plastický materiál s libovolnou křivkou závislosti mezi relativním prodloužením a napětím. Bilineární ocel je materiál se dvěma stupni linearity. Kromě materiálových konstant jako jsou hustota, Youngův modul, Poissonovo číslo (viz tabulka č. 7.3) musím specifikovat zatěžovací křivku (viz obrázek č. 7.3) pro daný typ oceli. [16], [30]



OBRÁZEK 7.3: Zatěžovací křivka oceli S235JR

TABULKA 7.3: Materiálová charakteristika oceli S235JR

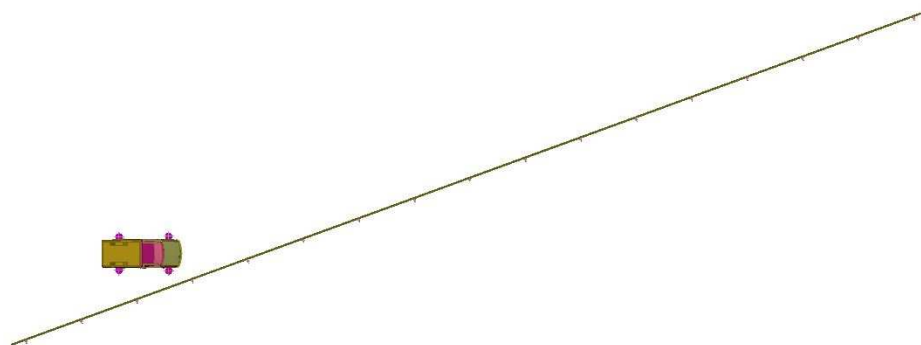
Hustota materiálu	$t * \text{mm}^{-3}$	$7,85 * 10^{-9}$
Youngův modul pružnosti	MPa	$2,0 * 10^5$
Poissonovo číslo	–	0,3
Mez kluzu	MPa	250
Mez pevnosti	MPa	460

7.5 Kompletace sestavy

Pomocí funkce **COPY** jsem vytvořila celou sestavu svodidel v délce 66 m. Celkový počet kusů jednotlivých součástí je popsán v tabulce č. 7.4.

TABULKA 7.4: Soupis částí kompletní sestavy

část	ks v sestavě		počet elementů v sestavě	
	N2	H1	N2	H1
Svodnice	33	33	5280	5280
Spojka	17	33	1547	3003
Sloupek	17	33	1819	3530
Vozidlo	1	1	10028	10028
Svodidlo	1	1	8646	11813
Celá sestava	-	-	18674	21842



OBRÁZEK 7.4: Uspořádání modelu pro nárazovou zkoušku

Dále jsem provedla kontrolu duplicit v místech, kde se jednotlivé kusy setkávaly a tyto duplicity jsem odstranila. Poté jsem celý model svodidla zkontrolovala a vyčistila. Následně jsem sloučila model automobilu a svodidla. Pomocí funkcí posunutí a rotace jsem svodidlo umístila takovým způsobem, aby odpovídalo předepsanému scénáři nárazové zkoušky. Výsledné umístění jednotlivých částí zobrazuje obrázek č. 7.4. Vozidlo jsem umístila takovým způsobem, aby k nárazu došlo v první třetině délky svodidla a mezi sloupky svodidla, kde dochází k největšímu namáhání.

7.6 Okrajové podmínky

Úloha je řešitelná teprve tehdy, jsou-li stanoveny okrajové podmínky. Jedná se o ukotvení součástí v prostoru pomocí předepsaných hodnot posunů a rotací, definic zatížení, podepření, kloubových spojení či vetknutí. Zjednodušeně tedy nahrazují kontakt řešeného tělesa s jeho okolím. [31]

7.6.1 Uložení

Výškové náběhy, které slouží k dosažení plné účinnosti, jsem v tomto případě nahradila vetknutím. Toho jsem docílila odebráním stupňů volnosti uzlům, které se nachází na koncích svodidel. Každý uzel má celkem 6 stupňů volnosti (3x posun, 3x rotace). V tomto případě byly odebrány všechny stupně volnosti, a tím došlo k omezení translačního i rotačního pohybu ve směrech všech os. Aby toto opatření výrazně neovlivňovalo výsledky, prodloužila jsem na obou koncích svodidla přibližně o trojnásobek délky vozidla. Automobil byl umístěn takovým způsobem, aby k největším deformacím nedocházelo blízko těchto okrajů.

V této práci jsem přistoupila k zjednodušení modelu sloupku a část nacházející se pod zemí jsem zanedbala a nahradila ji taktéž vetknutím. Toho jsem docílila stejně jako v předešlém případě odebráním všech stupňů volnosti uzlům, nacházejícím se na koncích sloupků v místě, kde se stýkají s terénem.

7.6.2 Gravitace

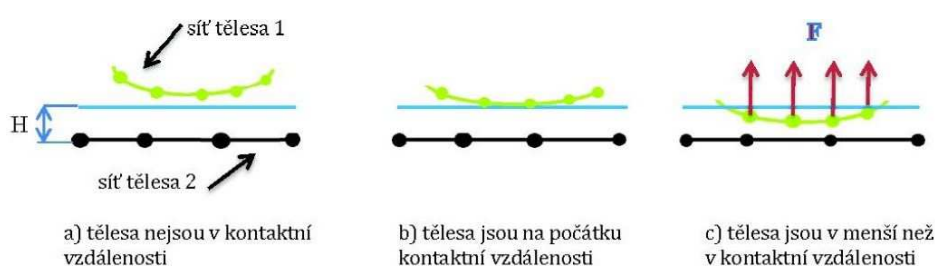
V úloze je uvažován i vliv gravitační síly. Na celý model působí gravitační zrychlení, které vyjadřuje intenzitu gravitačního pole. Velikost zrychlení

v mé úloze odpovídá dohodnuté střední hodnotě tíhového zrychlení, tzv. normálnímu tíhovému zrychlení. [24]

$$g = 9,8066 \text{ m/s}^2$$

7.7 Kontakty

Jedním z problémů nelineární dynamické simulace je správná definice kontaktů, jednak mezi jednotlivými součástmi sestavy a také mezi svodidlem a vozidlem. Kontakty se určují buď mezi celými částmi, nebo pouze mezi částmi ploch, které jsou spolu reálně v kontaktu. Tělesům jsou přiřazovány kontaktní vzdálenosti, ve kterých jsou poté systematicky vyhledávány další potenciální tělesa ke kontaktu. V případě že dojde k narušení kontaktní zóny, je vyvolána odezva v podobě síly úměrné hloubce průniku do kontaktní zóny. [10], [30]



OBRÁZEK 7.5: Kontaktní vzdálenost a její funkce [22]

U automobilu jsem použila vnitřní kontakt, který má zabránit průniku jednotlivých dílů nebo geometrie do sebe. Ostatní nastavené kontakty, jsou kontakty symetrickými mezi dvěma objekty. Tyto kontakty jsem nastavila pomocí hlavního a přidruženého tělesa (tzv. master-slave). Přehled všech kontaktů, které jsem nastavila v této úloze je vidět v tabulce č. 7.5. [22]

TABULKA 7.5: Přehled použitých kontaktů

Typ kontaktu	Slave	Master	Tření
AUTOMATIC SINGL SURFACE	set auto		
AUTOMATIC SURF TO SURF	svodnice	spojka	0, 1
AUTOMATIC SURF TO SURF	svodnice	sloupek	0, 1
AUTOMATIC SURF TO SURF	spojka	sloupek	0, 1
AUTOMATIC SURF TO SURF	set auto	svodidlo	

Kapitola 8

Analýza a ověření modelu

Termínem ověření modelu rozumíme proces, který shrnuje procesy validace a verifikace.

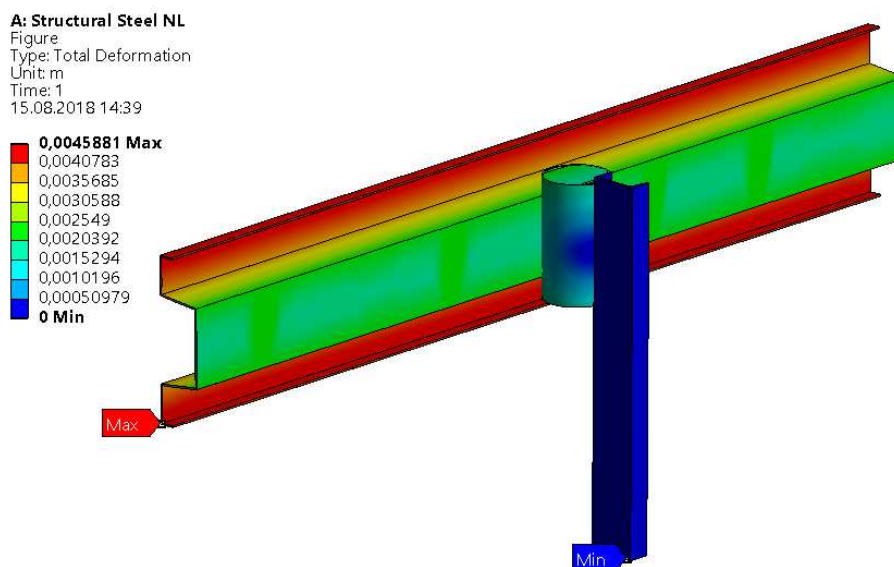
Validace vymezuje přesně daný rozsah, ve kterém lze výsledky a výstupy označit za platné. Díky validaci jsme schopni predikovat chování modelu při simulaci nárazových zkoušek.

Verifikace ověřuje a kontroluje reálnost modelu v globálním měřítku a umožňuje využití modelu k dalším analýzám. [22]

Numerické analýzy lze rozdělit na analýzy statické a dynamické.

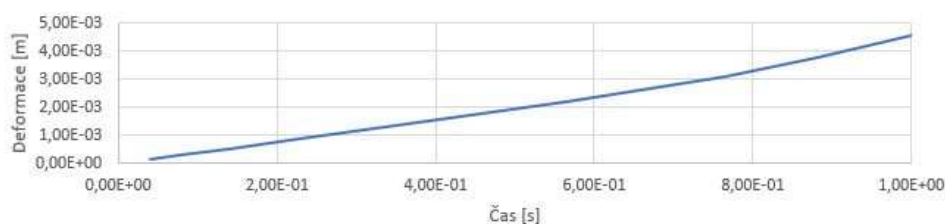
8.1 Statická analýza

Statickou analýzu jsem provedla v programu ANSYS WORKBENCH. Jedná se o analýzu sestavy skládající se z jednoho kusu sloupku, trubkové spojky a svodnice o délce 2 m. Sestava je zatížena pouze vlastní vahou a gravitací. Sloupek sestavy byl vetknut v místě styku se zemí, oběma krajům svodnice jsem omezila posun ve směru osy x. Čas simulace jsem nastavila na 1 s.



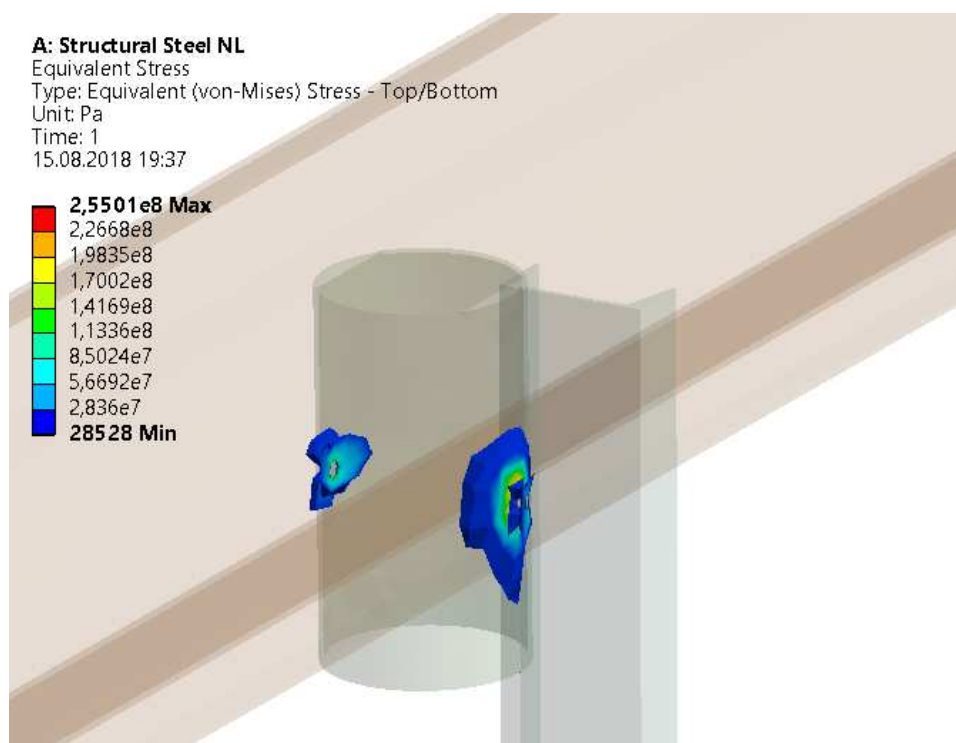
OBRÁZEK 8.1: Celková deformace sestavy

Na obrázku č. 8.1 lze vidět prohnutí svodidla, kdy největší deformace přibližně 4,5 mm je na okrajích svodnice. V místě vetknutí dochází k nulové deformaci.



OBRÁZEK 8.2: Graf průběhu deformace v čase

Dalším výstupem statické analýzy je popis chování svodidla z hlediska namáhání materiálu, které je charakterizováno ekvivalentním napětím (von Mises). Na obrázku 8.3 jsou zobrazena problémová místa, kde bylo dosaženo maximálních hodnot napětí. Jedná se o okolí otvorů pro šroubová spojení.

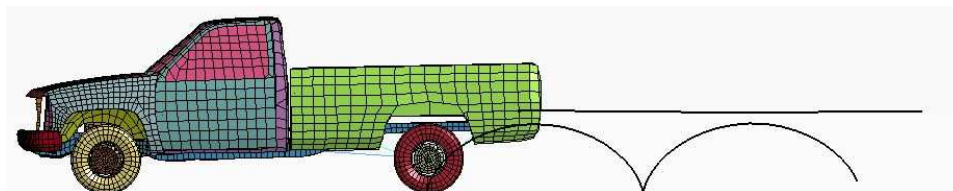


OBRÁZEK 8.3: Ekvivalentní napětí (von Mises)

8.2 Zkouška přímočarého pohybu automobilu

Dalším testem bylo provedení dynamické analýzy jízdy automobilu. Provedla jsem kontrolu pohybu, zda se vozidlo pohybuje rovnoměrně přímočaře, všechna kola se odvalují a celý model je stabilní. Pro simulaci jsem ponechala původní nastavení času analýzy, tj. 0,15 ms. Auto za tento čas při původní rychlosti ujelo přibližně 4,2 m.

V průběhu simulace zkoušky pohybu vozidla jsem pomocí funkce Trace v programu LS-PrePost získala trajektorie translačního pohybu vozidla a rotačního pohybu kol (obrázek č. 8.4). Ověřila jsem tedy funkčnost modelu vozidla pro další použití.



OBRÁZEK 8.4: Trajektorie translačního pohybu vozidla a rotačního pohybu kol

8.3 Dynamická analýza I

Provedla jsem totožné analýzy pro oba typy svodidel, první pro svodidlo JSNH4/H1, druhou pro svodidlo JSNH4/N2. Vzhledem k tomu, že obě zkoušky jsou řízeny stejným scénářem, stotožnými podmínkami a shodným počátečním rozvržením, budu popisovat jejich nastavení současně.

Tento dynamický test simuluje bariérovou zkoušku, která svým nastavením odpovídá zkoušce TB32. Ta se pro homologaci svodidel v České republice používá pouze pro jeden typ mnou zkoušeného svodidla - JSNH4/N2. Avšak analýzu provedu pro obě svodidla.

Pro vyhodnocení indexu prudkosti nárazu ASI potřebuji získat data i před samotným nárazem, proto se nachází ve vzdálenosti 17,5 m od místa nárazu. Automobil jsem umístila takovým způsobem, aby narazil pod úhlem 20° a bod nárazu se nacházel v první třetině délky svodidel. Rychlost automobilu byla ponechána na přednastavené hodnotě. Kinetická energie nárazu odpovídá zkoušce TB32.

Výstupem této analýzy bude popis chování svodidla a vozidla v průběhu bariérové zkoušky. Čas simulace jsem nastavila na 2,5 s, aby byl zaznamenán celý proces deformace svodidla a chování vozidla po nárazu.

Výpočet numerického modelu jsem provedla pomocí řešiče LS-DYNA. Výsledkem byla dynamická simulace nárazu osobního vozidla do ocelového svodidla.

8.4 Dynamická analýza II

Závěrečnou dynamickou analýzou je bariérová zkouška, která odpovídá svým nastavením bariérové zkoušce TB11.

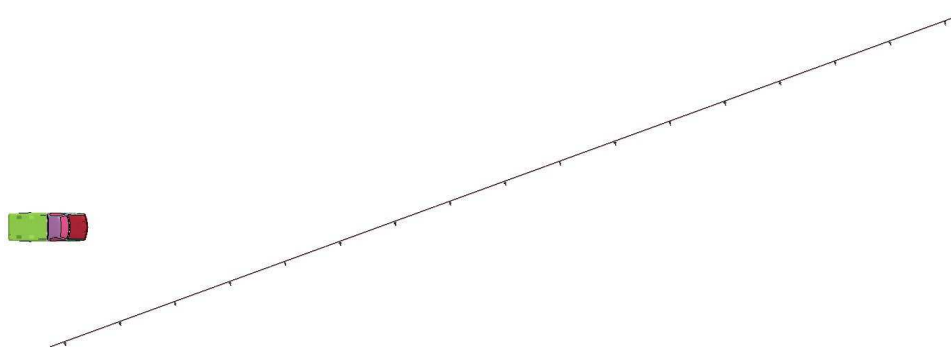
Stejně jako v případě předešlé analýzy, jsem provedla bariérovou zkoušku pro oba typy svodidel, pro svodidlo JSNH4/H1 a JSNH4/N2. Obě zkoušky jsou opět řízeny stejným scénářem, s totožnými podmínkami a shodným počátečním rozvržením, a proto budu popisovat jejich nastavení současně.

Celá sestava byla nastavena dle scénáře odpovídajícího bariérové zkoušce TB11, jehož nastavení je definováno normou EN ČSN 1317. Vozidlo

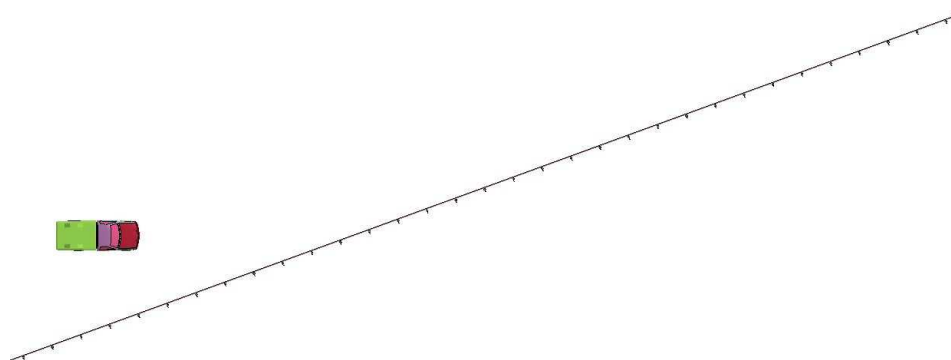
před nárazem ujede necelých 12 m. Pro vyhodnocení indexu prudkosti nárazu ASI potřebuji získat data i před samotným nárazem. Bod nárazu se nachází mezi 11. a 12. sloupkem pro svodidlo H1 a mezi 6. a 7. pro svodidlo N2. Automobil jsem umístila takovým způsobem, aby svíral se svodidlem 20°. Rychlost jsem nastavila na základě výpočtů v kapitole 6, aby výsledná kinetická energie odpovídala energii dle výše zmíněné normy vozidla se svodidlem.

Celková doba simulace byla nastavena na 3 s z důvodu vyhodnocování indexu prudkosti nárazu ASI, pro který je třeba zaznamenat data minimálně 500 ms před a 500 ms po kontaktu.

Dále jsem nastavila všechny parametry pro správný sběr dat a pomocí řešiče LS-DYNA provedla výpočet numerického modelu. Výsledkem byla dynamická simulace nárazu osobního vozidla do ocelového svodidla.



OBRÁZEK 8.5: Uspořádání modelu pro analýzu I – svodidlo JSNH4/N2



OBRÁZEK 8.6: Uspořádání modelu pro analýzu II – svodidlo JSNH4/H1

Uspořádání modelů pro analýzu I a II lze vidět na obrázcích č. 8.5 a 8.6.

Kapitola 9

Hodnocení výsledků simulace

Numerické analýzy byly vypočteny v řešiči LS-DYNA a výsledky simulace jsem zobrazila v prostředí programu LS-PrePost.

Celkem jsem provedla dvě dynamické analýzy nárazu automobilu do svodidel pro dva typy svodidel. Prvním testem pro obě svodidla, byl test s přednastavenou rychlostí, která splňovala kinetickou energii nárazu dle testu TB32. Druhý test proveden opět u obou typů jsem provedla s nově vypočítanou rychlostí, která byla získána na základě přepočtu kinetické energie a bariérová zkouška odpovídá testu TB11.

Vzhledem k volbě testovacích analýz, budu výsledky simulací hodnotit pro každé svodidlo zvlášť.

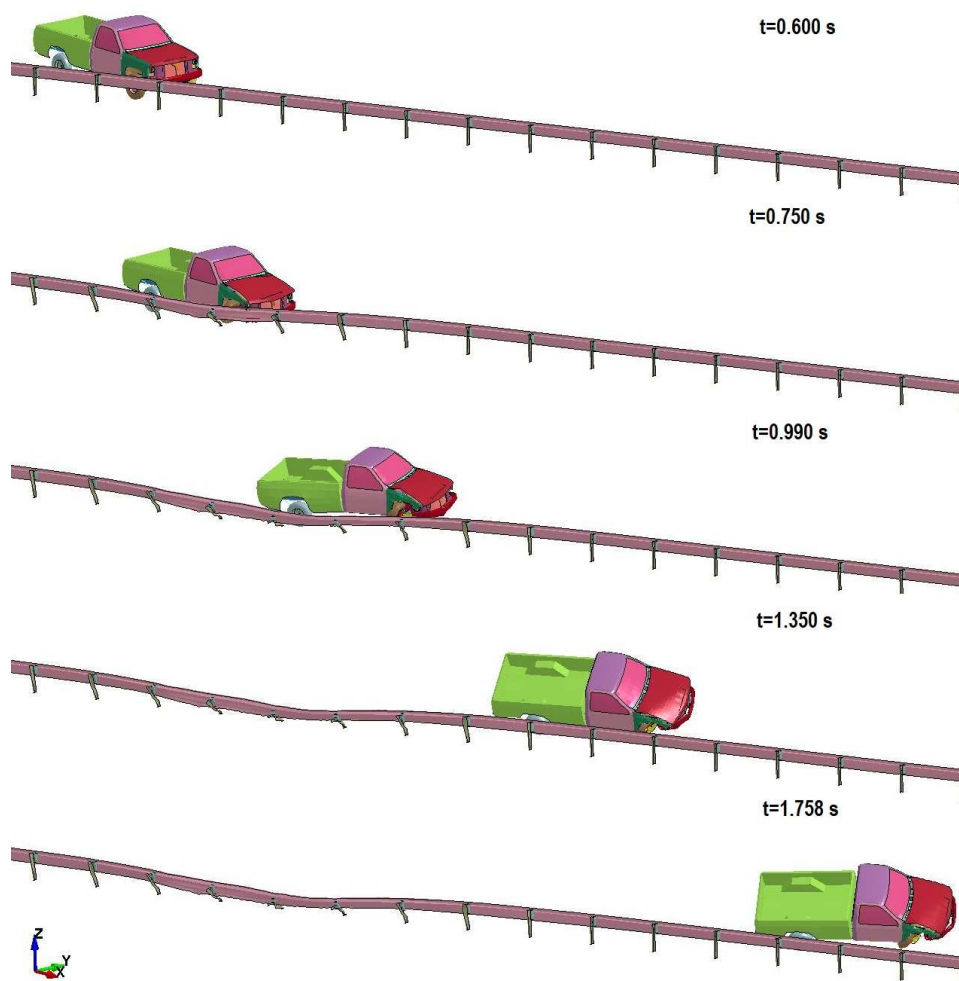
Jak jsem již zmiňovala v předešlých kapitolách, pracuji se zjednodušeným modelem svodidel. Šroubová spojení jsem nahradila matematickými vazbami a geometrii svodidel jsem zjednodušila. Dalším výrazným aspektem simulace je způsob upevnění sloupků, kdy při fyzických testech jsou svodidla zapuštěná v zemině, zatímco v mé simulaci se jejich nastavení blíží spíše sloupkům zabetonovaným. Proto očekávám odchylky od výsledků získaných z fyzických zkoušek.

9.1 JSNH4/H1

První typ svodidel JSNH4/H1 musí splnit kritéria odpovídající stupni zadržení H1. Oproti druhému typu svodidel má sloupky blíže u sebe. Tento typ svodidel se při schvalování zkouší testy TB11 a TB42. Má práce neobsahuje analýzu dle testu TB42, proto není možné srovnat výsledky numerického modelu s výsledky z fyzických zkoušek. Výstupem hodnocení tohoto typu svodidel bude popis průběhu bariérové zkoušky, zhodnocení provedených analýz a jejich srovnání.

9.1.1 Průběh bariérové zkoušky – Analýza I

Po spuštění simulace se bariérová zkouška jeví reálně. Vozidlo jede nastavenou rychlostí v přímém směru přibližně 17,5 m, poté naráží do ocelového svodidla, svodnice, trubkové spojky i sloupky se deformují v důsledku změny kinetická energie automobilu v mechanickou práci. Vozidlo najíždí na svodidlo, obě levá kola a později celé vozidlo je vyneseno do vzduchu, avšak svodidlo není v průběhu zkoušky překonáno. Svodidlo dále usměrňuje vozidlo, které se následně vrací do prostoru původního jízdního pruhu. Funkce svodidel byla tedy splněna, záchytný systém zadržel vozidlo a usměrnil jeho pohyb. Vzhledem k chování vozidla při rychlosti 100 km/h, předpokládám, že pokud by vozidlo jelo vyšší

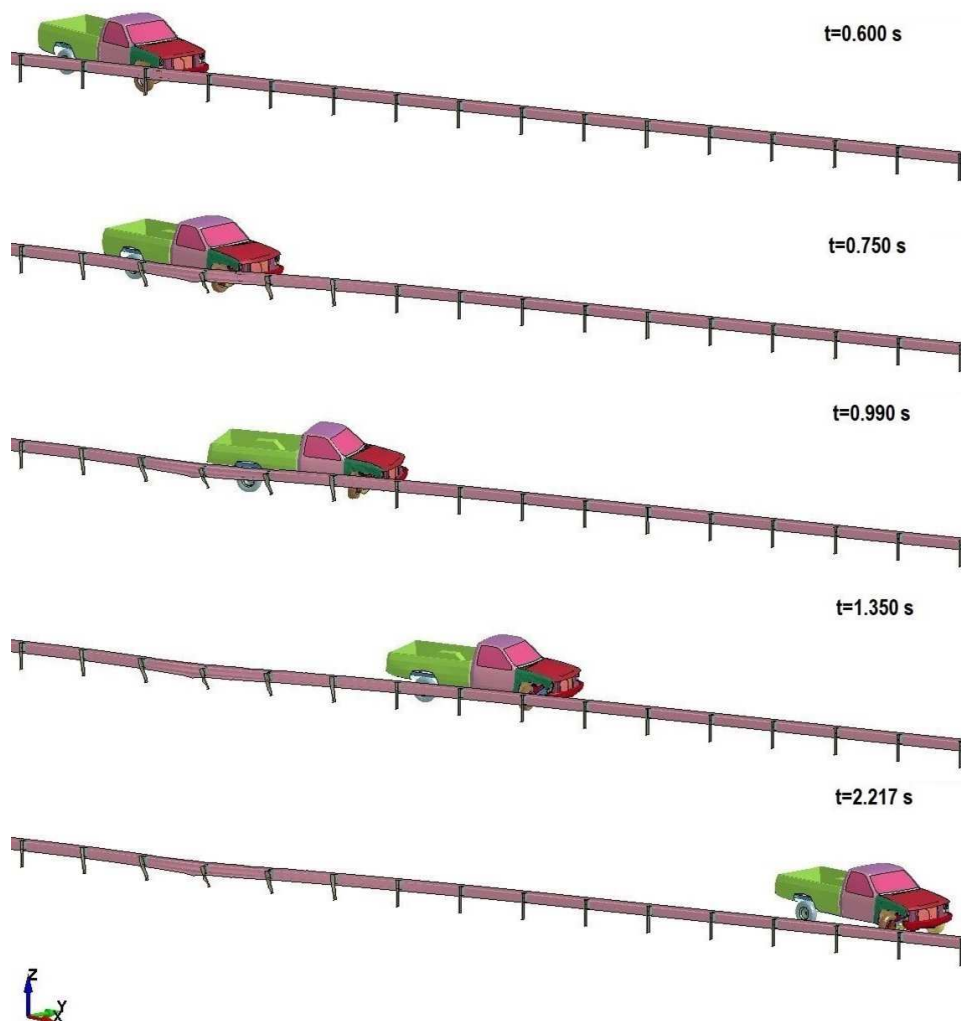


OBRÁZEK 9.1: Průběh analýzy I pro svodidlo JSNH4/H1

rychlostí, je pravděpodobné, že by svodidlo překonalo a funkce záchytného systému by nebyla splněna. Simulace může být ovlivněna volbou modelu vozidla, jehož těžiště je vysoko, ale také faktem, že vozidlo není nikým řízeno. Průběh dynamické simulace je zobrazen na obrázku č. 9.1.

9.1.2 Průběh bariérové zkoušky – Analýza II

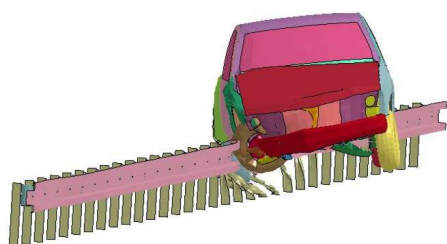
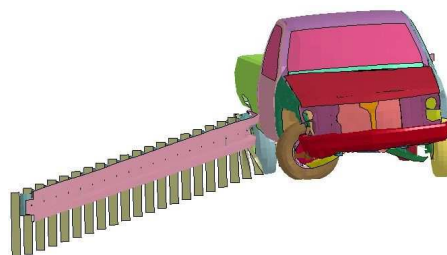
Simulace bariérové zkoušky se jeví reálně. Vozidlo jede rovnoměrně přímočaře. Po ujetí přibližně 12 m v čase 0,6 s narazí do ocelového svodidla. Dochází ke kontaktu mezi svodidlem a vozidlem. Kinetická energie automobilu se při nárazu mění na mechanickou práci, která deformuje svodnici, trubkové spojky i sloupky. Přeměnou kinetické energie v práci dochází ke zpomalení vozidla, které je svodidlem usměrňováno a navráceno do prostoru původního jízdního pruhu. Při kontaktu předního kola se sloupkem je přední pravé kolo vyvráceno, což ovlivňuje jeho pohyb po navrácení do jízdního pruhu. Vozidlo se stáčí. Funkce svodidel byla splněna. Na obrázku č. 9.2 je vidět chování vozidla i deformace svodidla v průběhu analýzy.



OBRÁZEK 9.2: Průběh analýzy II pro svodidlo JSNH4/H1

9.1.3 Srovnání analýz

Ze srovnání obou provedených analýz je patrné, že při vyšší kinetické energii nárazu, je vozidlo vymrštěováno do vzduchu. Z toho vyplývá, že v případě nárazu ve vysokých rychlostech může dojít k převrácení vozidla, či překonání svodidla. Toto chování je při testování svodidel nepřijatelné. Chování vozidla při opouštění prostoru svodidel je zobrazeno na obrázcích č. 9.3 a 9.4.

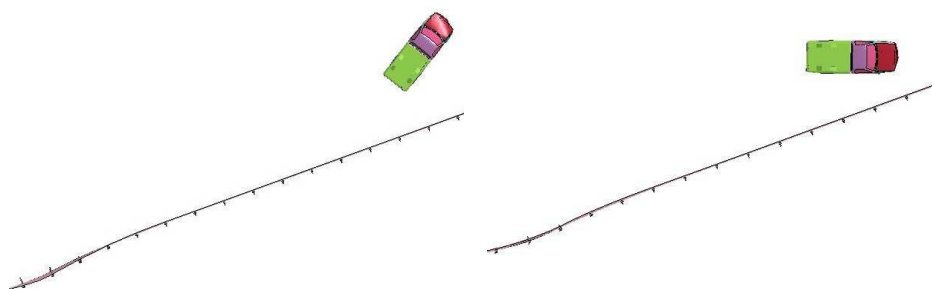
OBRÁZEK 9.3:
TB32 t=1.020 sOBRÁZEK 9.4:
TB11 t=1.020 s

Totožným jevem u obou analýz, který pozoruji, je vyvrácení předního pravého kola, což ovlivňuje chování vozidla, při opuštění prostoru svodidel.

V případě analýzy I je vozidlo vymrštěno a pohybuje se směrem od záchytného systému. Hrozí vjetí do protisměrného pruhu a náraz do protijedoucího vozidla.

U druhého testu, při výjezdu do původního jízdního pruhu, se vozidlo stáčí. Předpokládám, že pokud by simulace pokračovala, hrozí tzv. sekundární náraz do svodidla, který však nepředstavuje vyšší nebezpečí pro posádku ani svodidlo, než je náraz primární.

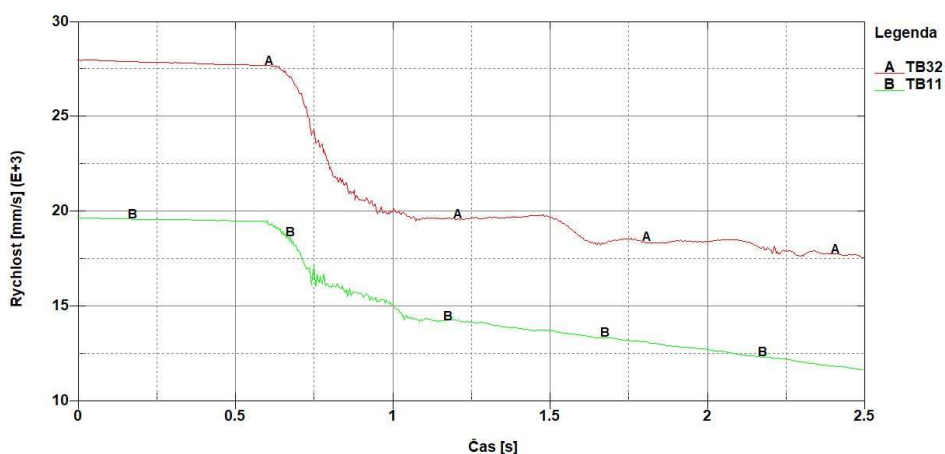
Porovnání chování vozidel při výjezdu od svodidel je zaznamenáno na obrázcích č. 9.5 a 9.6.



OBRÁZEK 9.5:
TB32 t=2.448 s

OBRÁZEK 9.6:
TB11 t=2.448 s

Graf na obrázku č. 9.7 zobrazuje změnu rychlosti v čase pro obě analýzy. Z grafu je patrné, že při nárazu dochází k prudkému poklesu rychlosti, poté je pokles rychlosti pozvolný. V případě první analýzy klesá rychlost vozidla a na hodnotě přibližně 63 km/h se ustálí. Zatímco rychlost vozidla při druhé analýze má stále klesající průběh.



OBRÁZEK 9.7: Změna rychlosti v čase

9.2 JSNH4/N2

Druhý typ svodidel JSNH/N2 musí splňovat kritéria pro stupeň zadržení N2. Tento typ svodidel se při schvalování zkouší testy TB11 a TB32, které odpovídají analýzám, které jsem provedla ve své práci. Úspěšnost numerické simulace je možné zhodnotit na základě shody s experimentem. Proto v rámci vyhodnocení budu srovnávat výsledky numerického modelu s výsledky z fyzických zkoušek. Veličiny, které využiji k porovnání, jsem zvolila tak, aby bylo zhodnoceno chování vozidla, svodidla i nebezpečí pro posádku automobilu. [22]

Budu analyzovat a srovnávat tyto parametry:

- dynamický průhyb svodidla;
- index prudkosti nárazu ASI;
- výjezdová plocha vozidla.

Hodnoty parametrů naměřených při fyzických testech jsem získala z projektové dokumentace výrobce ocelových svodidel společnosti Arcelor Mittal (viz tabulka č. 9.1).

TABULKA 9.1: Parametry svodidla JSNH4/N2 [18]

Parametr	N2
Dynamický průhyb [m]	1,19
Index prudkosti nárazu [-]	0,725
Výjezdová plocha vozidla	vyhovuje předpisům

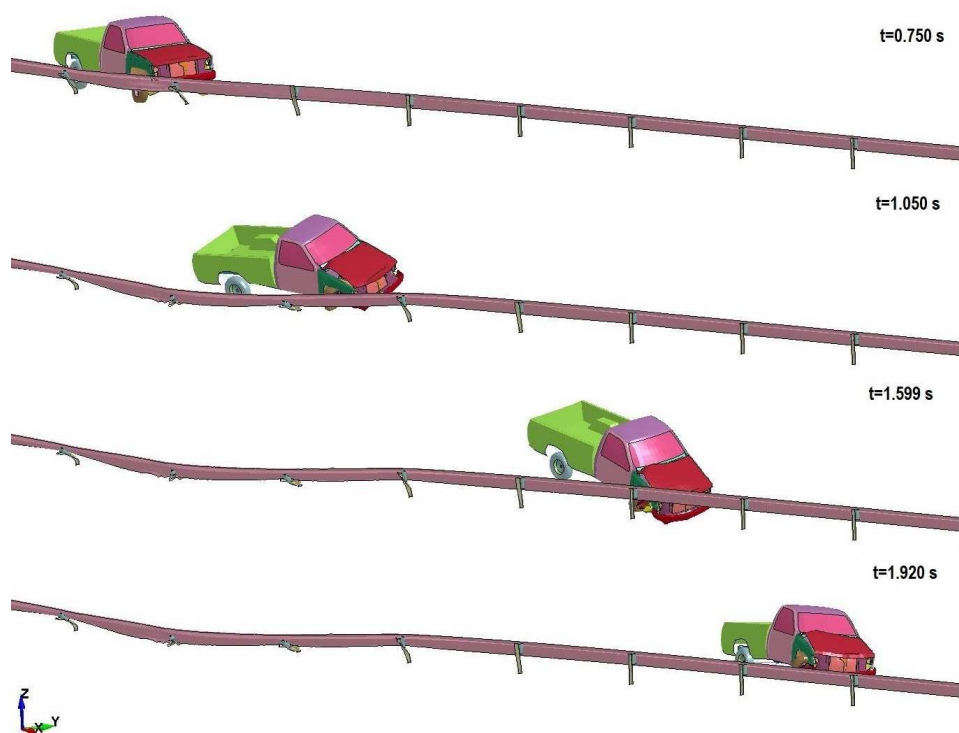
Vzhledem k tomu že průběh bariérových zkoušek pro svodidla JSNH4/N2 a JSNH4/H1 je velmi podobný, budu průběh analýz pro svodidlo JSNH4/N2 popisovat stručněji. Podrobněji se budu věnovat vyhodnocovaným parametrům.

9.2.1 Průběh bariérové zkoušky – Analýza I

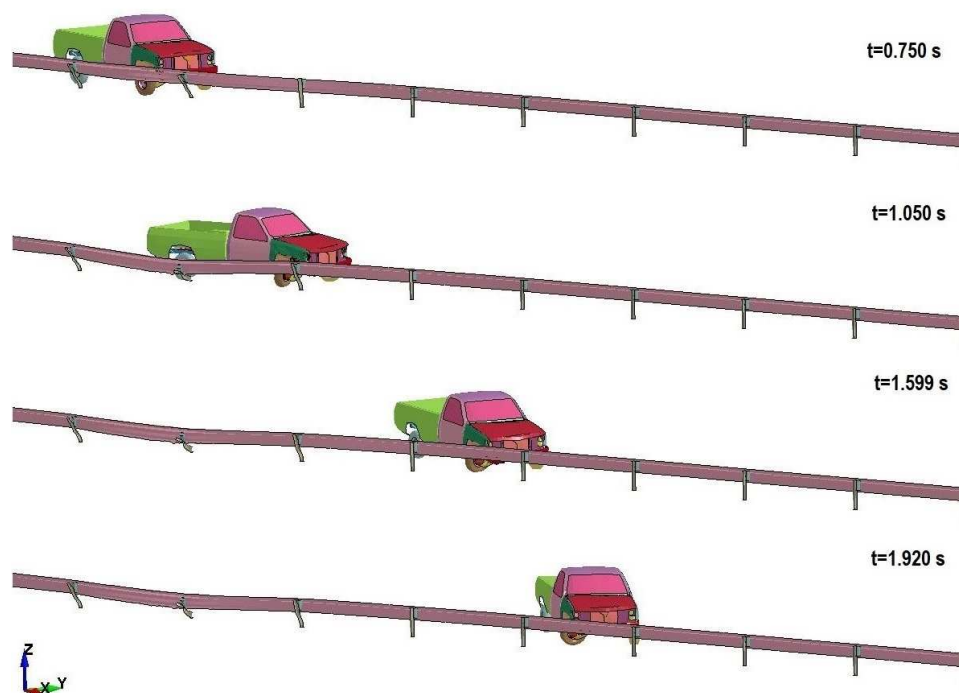
Počátek simulace je totožný s průběhem zkoušky TB32 pro svodidlo JSNH4/H1. V čase 0,6 s vozidlo naráží do ocelového svodidla, které se deformuje. Předního pravé kolo je nárazem do sloupku vyvráceno. Vozidlo stejně jako v případě prvního typu svodidla je vymrštno, ale svodidlo nepřekonává. Svodidlo dále usměrňuje vozidlo, které se následně vrací do prostoru původního jízdního pruhu. Avšak oproti předešlému typu svodidla se vozidlo stáčí směrem ke svodidlu a předpokládám, že pokud by simulace pokračovala, došlo by k sekundárnímu nárazu. Na obrázku č. 9.8 je vidět chování vozidla i deformace svodidla v průběhu analýzy.

9.2.2 Průběh bariérové zkoušky – Analýza II

Vozidlo jede rovnoměrně přímočaře a po ujetí přibližně 12 m naráží do ocelového svodidla. Dochází ke kontaktu mezi svodidlem a vozidlem a k deformacím jednotlivých částí svodidla a přední části vozidla. Svodidlo usměrňuje automobil do prostoru původního jízdního pruhu. Stejně jako u předešlých analýzách, je přední pravé kolo vyvráceno. Na obrázku č. 9.9 je vidět chování vozidla i deformace svodidla v průběhu analýzy.



OBRÁZEK 9.8: Průběh analýzy I pro svodidlo JSNH4/N2



OBRÁZEK 9.9: Průběh analýzy II pro svodidlo JSNH4/N2

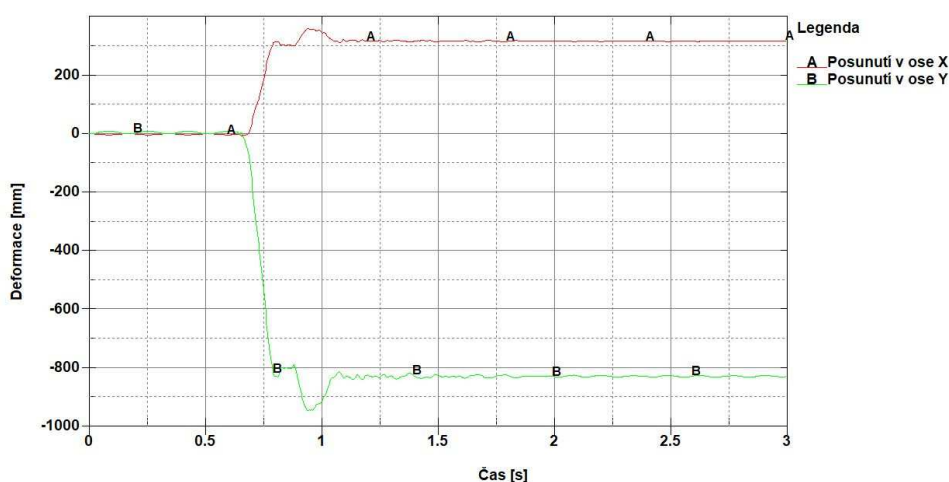
9.2.3 Dynamický průhyb svodidla

Dynamický průhyb je parametr, který vypovídá o chování svodidla v průběhu nárazu, vyčísluje maximální boční vychýlení libovolného bodu svodidla. [5]

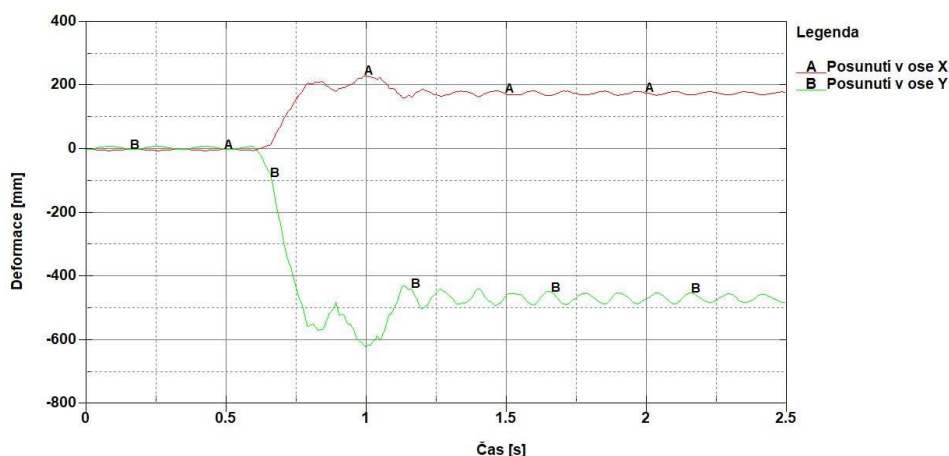
Hodnoty z reálných testů pro svodidlo typu JSNH4/N2:

$$D = 1,19 \text{ m}$$

V simulaci nárazové zkoušky lze snadno vyčíslit hodnoty dynamického průhybu v libovolném čase. Využila jsem hodnoty přesunutí uzlů, vykreslila jejich časovou závislost deformace v ose x a y (viz obrázky č. 9.10 a 9.11) a určila maxima pro oba provedené testy.



OBRÁZEK 9.10: Analýza I – vychýlení líce svodidla



OBRÁZEK 9.11: Analýza II – vychýlení líce svodidla

Dynamický průhyb určím podle vzorce:

$$D = \sqrt{x_{max}^2 + y_{max}^2} \quad [\text{m}]$$

TABULKA 9.2: Maximální deformace

Test	x [m]	y [m]	Dynamický průhyb [m]
TB32	0,36	-0,95	1,02
TB11	0,23	-0,62	0,66

Z numerické analýzy vyšlo, že maximální dynamický průhyb je 1,02 m (viz tabulka č. 9.2), což se oproti hodnotě naměřené při fyzických testech liší o 0,17 m. Rozdíl mezi hodnotou dynamického průhybu při fyzické zkoušce a simulaci je větší než 10%.

Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben ukotvením sloupků. V mé analýze jsou sloupky vetknuté, svým chováním se tak blíží spíše sloupkům zabetonovaný. Při reálných testech bývají sloupky umístěny v zemině.

9.2.4 Index prudkosti nárazu ASI

Jedním ze základních výstupů bariérových zkoušek je index prudkosti nárazu. Jeho výpočet je přesně definován normou ČSN EN 1317. Jako vstupní hodnoty slouží naměřené hodnoty zrychlení. Umístit akcelerometr do těžiště vozidla při fyzických zkouškách je ve většině případech nemožné. Avšak v případě numerického modelu není problém měřit jednotlivé složky zrychlení v těžišti. [22]

Hodnota indexu prudkosti nárazu z fyzických zkoušek pro svodidlo typu JSNH4/N2:

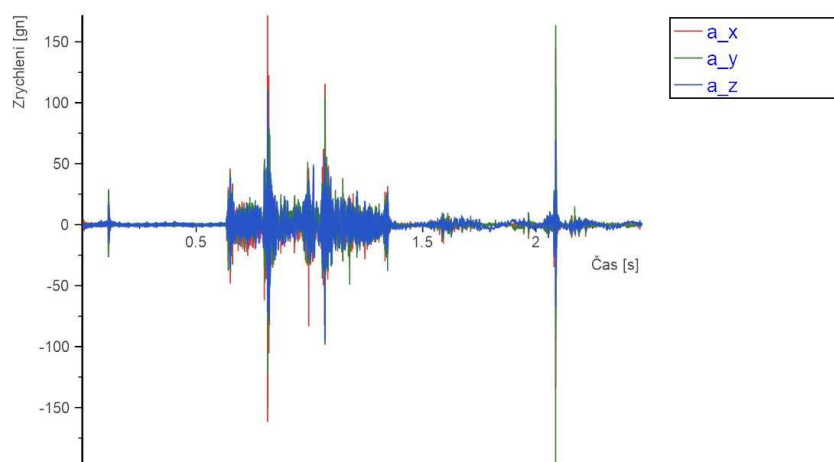
$$ASI = 0,725$$

Při výpočtu dynamického modelu, byla v těžišti zaznamenávána data o jednotlivých složkách zrychlení. Každou složku zrychlení jsem v programu LS-Prepost v závislosti na čase zobrazila a uložila ve formě textového souboru. Data jsem naimportovala do programu **DIAdem**, který obsahuje nástroj pro zpracování dat a výpočet indexu. Hodnoty zrychlení získané z programu LS-PrePost, byly v mm/s^2 . Tyto jednotky program DIAdem nepodporuje. Pro vyhodnocení ASI jsem hodnoty zrychlení převedla nejprve na m/s a poté pomocí nastavení jednotek a funkce Convert převedla na jednotky gravitačního zrychlení g_n . Takto upravené hodnoty jsem použila pro výpočet indexu prudkosti nárazu. Stejný postup jsem využila pro obě analýzy. [32]

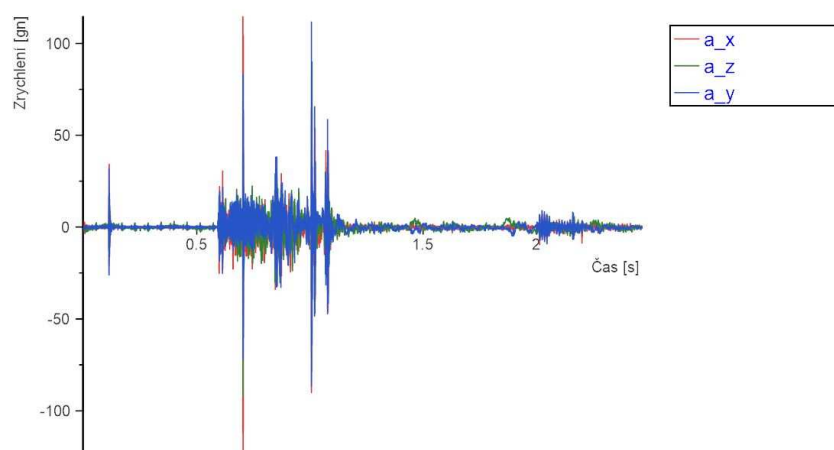
Výsledné hodnoty ASI pro jednotlivé testy jsem určila jako maxima z jednotlivých hodnot (viz tabulka č. 9.3. Čím vyšší index je, tím větší riziko představuje náraz pro posádku vozidla. Proto je jako výsledný index prudkosti nárazu brána nejvyšší hodnota dosažená při všech prováděných testech.

TABULKA 9.3: Maximální hodnoty indexu prudkosti nárazu ASI pro testy TB32 a TB11

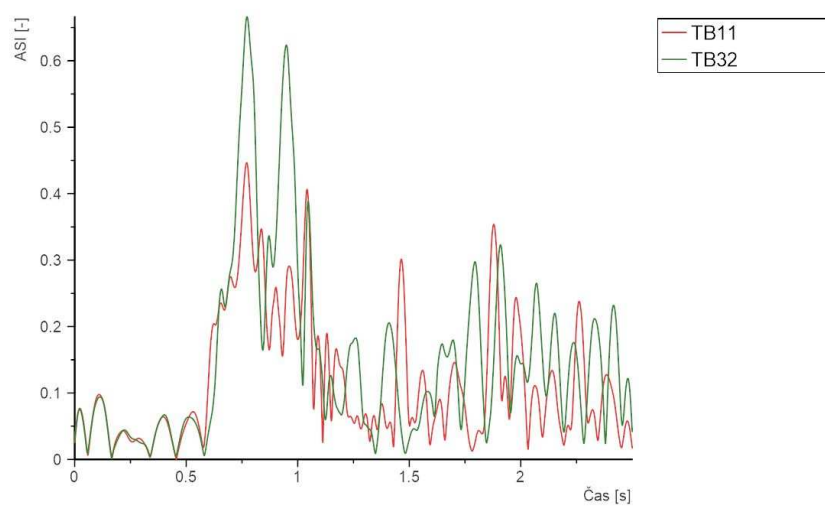
Test	ASI
TB32	0,666
TB11	0,447



OBRÁZEK 9.12: Průběh zrychlení při zkoušce TB32



OBRÁZEK 9.13: Průběh zrychlení při zkoušce TB11



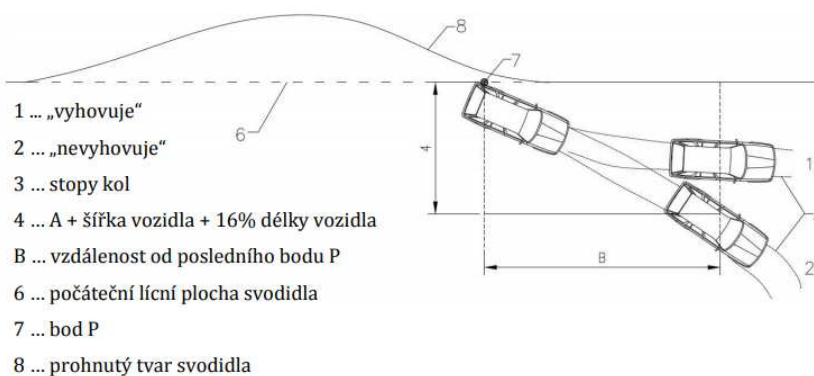
OBRÁZEK 9.14: Průběh hodnot ASI při zkouškách TB32 a TB11

Průběh jednotlivých složek zrychlení pro oba testy lze vidět na obrázcích č. 9.12 a 9.13. Srovnání průběhu hodnot ASI při zkouškách TB32 a TB11 je zobrazeno na obrázku 9.14.

Pro porovnání výsledků numerické simulace a fyzické zkoušky je tolerance pro ASI stanovena na $\pm 0,1$. Tuto toleranci výsledek mého modelu splňuje. Rozdíl mezi hodnotou stanovenou výrobcem a výsledkem dynamické simulace je 0,059.

9.2.5 Výjezdová plocha vozidla

ČSN EN 1317 požaduje výjezdovou plochu obdélníkového tvaru s rozměry, které určíme dle obrázku 9.15. Simulace musí zaznamenat chování vozidla do okamžiku, kdy těžiště vozu opouští vymezený prostor výjezdové plochy. Na základě jeho chování v době výjezdu z určené plochy, určím, zda svodidlo vyhovuje, či nevyhovuje.



OBRÁZEK 9.15: Schéma rozměrů výjezdové plochy [5]

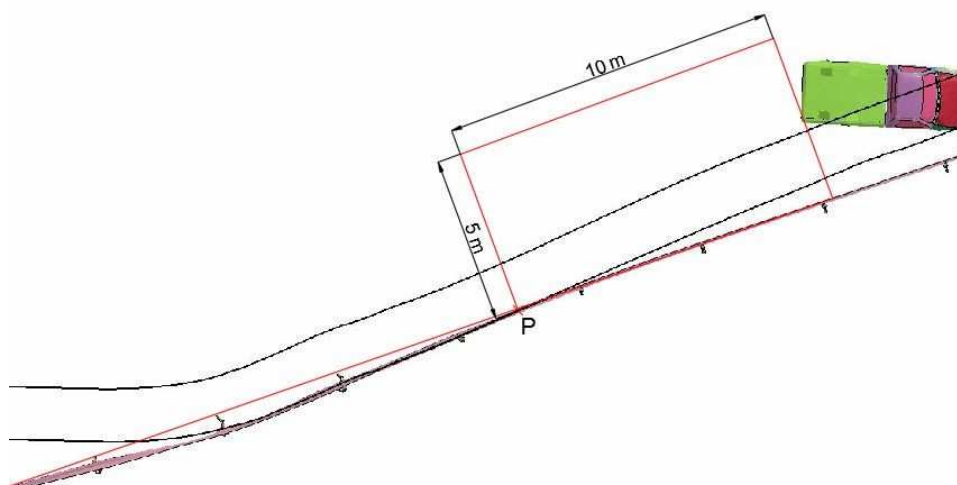
Abych určila rozměry výjezdové plochy, je třeba znát rozměry vozidla a koeficienty A a B (viz tabulky č. 9.4 a 9.5). Rozměry vozidla jsem změřila v programu LS-PrePost. Koeficienty se určují podle typu vozidla, jejich hodnoty jsou definovány v normě EN ČSN 1317.

TABULKA 9.4: Koeficienty pro určení rozměrů výjezdové plochy [5]

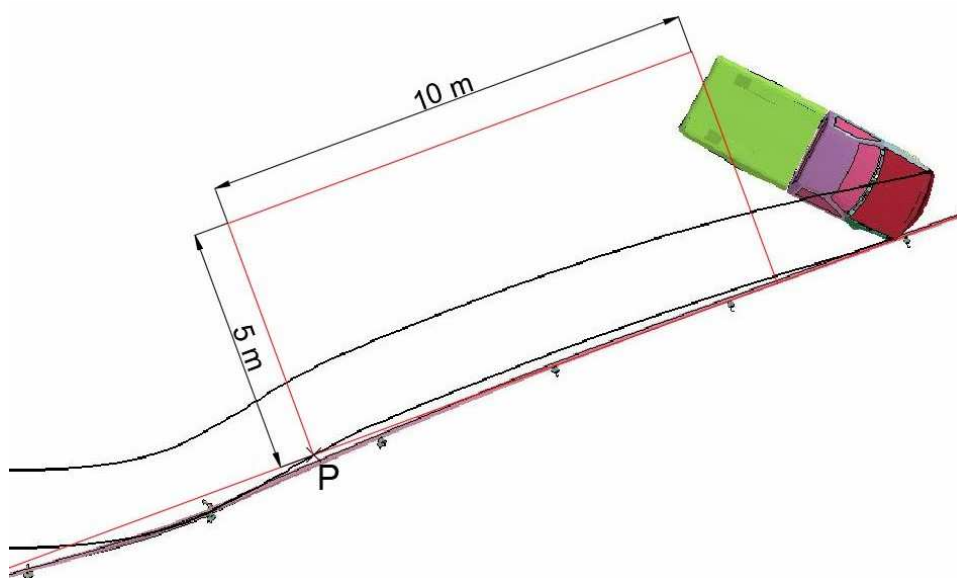
Koeficient	Hodnota
A[m]	2,2
B [m]	10

TABULKA 9.5: Rozměry modelu vozidla a rozměry výjezdové plochy

Rozměr	Hodnota
Šířka vozidla [m]	1,9
Délka vozidla [m]	5,4
Šířka výjezdové plochy [m]	5,0
Délka výjezdové plochy [m]	10



OBRÁZEK 9.16: Ponárazové chování vozidla při zkoušce TB32



OBRÁZEK 9.17: Ponárazové chování vozidla při zkoušce TB11

Výjezdové plochy vozidel jsou zobrazeny na obrázcích č. 9.16 a 9.17. Vozidlo ve sledovaném čase nevybočilo do protisměru, naopak chování vozidla při výjezdu z vyznačené plochy naznačuje, že dojde k sekundárnímu nárazu do svodidel. Tyto nárazy se při testech nevyhodnocují, protože riziko pro posádku i záchytný systém je menší než v případě primárního nárazu. Chování vozidla při analýzách „vyhovuje“ normě ČSN EN 1317-2 stejně jako v případě fyzických zkoušek.

9.3 Experiment

Federální správa silnic FHWA je útvar v rámci ministerstva dopravy Spojených států amerických. Tento útvar v roce 2006 provedl sérii

nárazových zkoušek s vozidlem Chevrolet C2500 pickup a několika typy ocelových svodidel. Nárazové podmínky byly obdobné podmínkám při Analýze I. Rozdíl byl pouze ve zkoušeném svodidlu. Při experimentu byl testován typ svodidel používaný na území Spojených států amerických. Zajímavé je chování vozidla, jeho kinetická energie v době nárazu odpovídala energii nastavené při simulaci zkoušky TB32. Chování vozidla v dynamické simulaci se podobalo chování vozidla při americkém experimentu (viz obrázky č. 9.18, 9.19, 9.20, 9.21, 9.22 a 9.23). [33]



OBRÁZEK 9.18:
Experiment-01
[33]



OBRÁZEK 9.19:
Simulace-01



OBRÁZEK 9.20:
Experiment-02
[33]



OBRÁZEK 9.21:
Simulace-02



OBRÁZEK 9.22:
Experiment-03
[33]



OBRÁZEK 9.23:
Simulace-03

Kapitola 10

Závěr

Hlavním cílem práce bylo provedení numerické simulace nárazu vozidla do ocelového svodidla a ověření využitelnosti metody konečných prvků při testování svodidel. V teoretické části se věnuji problematice silničních záchytných systémů, popisu základních druhů svodidel, podmínkám jejich použití a jejich historii. V závěru obecné části je popsán způsob testování svodidel, specifikace vozidel určených pro testování a způsob vyhodnocení naměřených parametrů stanovených normou ČSN 1317-2. Hlavním předmět této práce je studie nárazu do ocelových svodidel. Proto jsem tomuto typu svodidel věnovala samostatnou kapitolu, jejíž součástí je popis jednotlivých konstrukčních částí, výsledky fyzických nárazových zkoušek i podmínky jejich umístění na pozemních komunikacích.

Cílem praktické části bylo ověřit využitelnost numerické metody pro stanovení vlastností a popis chování záchytných systémů při nárazu vozidla. Pro potřeby numerické analýzy jsem nejprve na základě technické dokumentace výrobce svodidel JSNH4/N2 a JSNH4/H1 vytvořila v 3D modeláři ANSYS SpaceClaim geometrický model sestavy pro jmenovaná ocelová svodidla jako podklad pro model numerický. Při vytváření modelu jsem přistoupila k mnohým zjednodušením. Zaoblení hran jsem vzhledem k malému poloměru zanedbala a šroubová spojení jsem nahradila matematickými vazbami. Výraznou změnou oproti reálnému svodidlu je způsob upevnění sloupků. Spodní část sloupku, která se nachází v zemině, jsem zanedbala a nahradila vetknutím. Model sloupku jsem však vytvořila celý. V budoucnu bych se ráda více věnovala problematice simulace tak složitého materiálu, kterým je zemina. Všechna výše uvedená fakta mohla mít vliv na výsledky simulací.

Dalším krokem bylo vytvoření kompletního modelu obsahujícího sestavu svodidla a vozidla na základě scénáře dané analýzy. Oba typy svodidel byly podrobeny analýzám, které odpovídaly bariérovým zkouškám TB11 a TB32. Před samotným testováním celých sestav jsem ověřila funkčnost jednotlivých částí. Svodidlo jsem podrobila statické zkoušce v programu ANSYS Workbench. Funkčnost modelu automobilu jsem ověřila pomocí dynamické simulace jeho pohybu. Pohyb vozidla byl stabilní, přímočarý a odpovídal definované rychlosti.

Všechny provedené analýzy se jeví reálně. Analýzy prvního typu svodidla JSNH4/H1 byly vyhodnoceny pouze z pohledu funkčnosti modelu. Popsala jsem průběh bariérových zkoušek včetně fotodokumentace. Obě analýzy jsem podrobila srovnání.

Na svodidle JSNH4/N2 jsem provedla testy, které odpovídají bariérovým zkouškám prováděným pro úroveň zadržení N2 stanovených normou ČSN EN 1317, což mi umožnilo srovnání výsledků simulace

a hodnot, které uvádějí výrobci tohoto typu svodidel. Vybrala jsem tři parametry, které jsem vyhodnotila. Parametry jsem záměrně zvolila takovým způsobem, aby hodnotily chování vozidla i svodidla a zároveň posoudily nebezpečí pro posádku automobilu. Srovnávala jsem hodnoty dynamického průhybu svodidla, index prudkosti nárazu a výjezdovou plochu vozidla.

V závěru práce jsem provedla srovnání chování vozidla v průběhu dynamické simulace odpovídající zkoušce TB32 s americkým experimentem bariérové zkoušky. Vozidlo použité při experimentu odpovídalo použitému modelu vozidla v této práci.

Má práce prokázala využitelnost numerické metody konečných prvků pro testování silničních zachytných systémů. Ověřila jsem funkčnost modelu a jeho využitelnost pro další testování s využitím více modelů automobilů a různými scénáři bariérových zkoušek. Uvědomuji si ovšem, že v práci je mnoho oblastí, kterým se lze dále věnovat a rozpracovat je podrobněji, díky čemuž by bylo možné výsledky analýz této práce zpřesnit. Proto bych v navazujícím studiu tuto problematiku ráda dále rozvíjela.

Literatura

- [1] D. Novotný. *Přívětivé projektování*. URL: <http://www.ateliermok.eu/odpoustejicikomunikace.php> (cit. 11. 07. 2018).
- [2] Observatoř bezpečnosti silničního provozu. *Hlubková analýza silničních dopravních nehod – hlavní příčiny vzniku nehod*. © 2016. URL: <https://www.czrso.cz/clanek/hlubkova-analyza-silnicnich-dopravnich-nehod-hlavni-priciny-vzniku-nehod/?id=1654> (cit. 11. 07. 2018).
- [3] V. Holubová. *Bezpečnost silniční dopravy a ochrana majetku*. Ed. Praha: ČVUT. Sv. 149 s. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2014. URL: https://fbiweb.vsb.cz/safeteach/images/pdf/Materialy/Bezpecnost_silnicni_dopravy_a_ochrana_majetku.pdf.
- [4] Český normalizační institut. *ČSN EN 1317-1 – Silniční záchytné systémy – část 1: Terminologie a obecná kritéria pro zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, únor 2011.
- [5] Český normalizační institut. *ČSN EN 1317-2 – Silniční záchytné systémy – část 2: Svodidla a mostní svodidla – Funkční třídy, kritéria přijatelnosti nárazových zkoušek a zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, únor 2011.
- [6] Český normalizační institut. *ČSN EN 1317-3 – Silniční záchytné systémy – část 3: Tlumiče nárazu – Funkční třídy, kritéria přijatelnosti nárazových zkoušek a zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, únor 2011.
- [7] Ministerstvo dopravy České republiky. *TP 114 – Svodidla na pozemních komunikacích*. Praha: Dopravoprojekt Brno, a.s., červen 2015.
- [8] Svodidla s.r.o. *Svodidla ocelová AM(česká) - TP 167/2012*. URL: http://www.svodidla.cz/svodidlo_am.php (cit. 14. 07. 2018).
- [9] Ministerstvo dopravy České republiky. *Technické kvalitativní podmínky staveb – kapitola 11: svodidla, zábradlí a tlumiče nárazů*. Praha: Ministerstvo dopravy, duben 2010.
- [10] M. Jelínková. *“Rozšířená numerická studie chování lanového svodidla”*. Dipl. ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, 2016.
- [11] Midos Cheb. *Ocelová silniční svodidla*. URL: <https://www.midos-cheb.cz/svodidla/ocelova> (cit. 14. 07. 2018).
- [12] Proznak. *Lanová svodidla*. URL: <https://www.proznak.cz/cze/index.php?pageid=detail.php?item=5-0000-0000> (cit. 14. 07. 2018).

- [13] Ředitelství silnic a dálnic. *Požadavky na úroveň zadržení, navrhování a údržbu svodidel a tlumičů nárazu na dálnicích a silnicích ve správě Ředitelství silnic a dálnic ČR*. Praha: Dopravoprojekt Brno, a.s., leden 2014.
- [14] ArcelotMittal. *Historie společnosti*. URL: <https://ostrava.arcelormittal.com/o-spolecnosti/historie-spolecnosti.aspx> (cit. 25. 07. 2018).
- [15] D. Rochovanský. *Historie výroby ocelových svodidel v České republice*. URL: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/historie-vyroby-ocelovych-svodidel-v-ceske-republice/> (cit. 25. 07. 2018).
- [16] R. Likhonina. "Numerical simulation of impact with barriers". Dipl. ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, 2015.
- [17] red. <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/specialni-svodidlo-z-arcelormittal-ostrava-pomohlo-zachranit-motorkare-pred-tezkym-zranenim/>. (Cit. 25. 07. 2018).
- [18] ArcelorMittal. *Jednostrnné svodidlo JSNH/N2*. URL: http://www.svodidla.cz/nh4/1_JS4-N2.pdf (cit. 14. 07. 2018).
- [19] ArcelorMittal. *Jednostrnné svodidlo JSNH/H1*. URL: http://www.svodidla.cz/nh4/2_JS4-H1.pdf (cit. 14. 07. 2018).
- [20] a. s. ArcelorMittal Ostrava. *Technické podmínky výrobce – Ocelová svodidla ArcelorMittal: prostorové uspořádání*. Praha: Dopravoprojekt Brno, a.s., červen 2015.
- [21] M. Blechová. "Pokročilá dynamická numerická studie chování podvozku osobního automobilu". Dipl. ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, 2018.
- [22] ČVUT Kloknerův ústav Algon TÜV SÜD Czech. *Metodika pro ověřování silničních svodidel*. Sv. 188 s. únor 2016. URL: http://www.klok.cvut.cz/wp-content/uploads/2016/02/Methodika_navrhovani_svodidel_s_PHS.pdf.
- [23] Mechanical Design Software ANSYS Mechanical. *ANSYS Discovery SpaceClaim*. URL: <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim> (cit. 29. 07. 2018).
- [24] Z. Malá, D. Nováková a T. Vítů. *Fyzika I*. Ed. Praha: ČVUT. Sv. 188 s. Praha: ČVUT, 2009.
- [25] J. Reichl. *Tuhé těleso a jeho pohyby*. URL: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/83-tuhe-teleso-a-jeho-pohyby> (cit. 05. 08. 2018).
- [26] LS-DYNA Support. *Consistent Units*. URL: <https://www.dynasupport.com/> (cit. 29. 07. 2018).
- [27] Autodesk. *Shell Elements*. URL: http://download.autodesk.com/us/algor/userguides/mergedprojects/setting_up_the_analysis/nonlinear/Elements/Shell_Elements.htm (cit. 28. 07. 2018).
- [28] VŠB. *Idealizované prvky v pevnostních analýzách*. URL: <http://robot.vsb.cz/skripta/cad-iii/4-2-idealizovane-prvky-v-pevnostnich-analyzach.html> (cit. 28. 07. 2018).

-
- [29] LS DYNA. *Modelling of bolts under dynamic loads*.
- [30] LS DYNA. *LS – DYNA Manual R 8.0 - Vol I*.
- [31] VŠB. *Úvod k MKP*. URL: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Mech2_UvodDoMKP.pdf (cit. 01.08.2018).
- [32] National instruments. *DIAdem 2017 Help - Crash Analysis (ASI)*. URL: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370858N-01/dlgmaths/calc_crash_dlg/dlgchnasicalc_dialog/ (cit. 18.08.2018).
- [33] The Federal Highway Administration. "Evaluation of rail height effects on the safety performance of w-beam barriers". In: *6th European LS-DYNA Users' Conference* (2007).