



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Martina Jelínková

**ROZŠÍŘENÁ NUMERICKÁ STUDIE CHOVÁNÍ
LANOVÉHO SVODIDLA**

Diplomová práce

Praha 2016



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta dopravní
d ě k a n**

Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K618Ústav mechaniky a materiálů

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Martina Jelínková

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Rozšířená numerická studie chování lanového svodidla**

Název tématu (anglicky): Extended Numerical Study of the Behavior of the Rope Barriers

Zásady pro vypracování

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

- V obecné části stručně pojednat o používaných lanových svodidlech v ČR a v zahraničí, popsat jejich konstrukci a uvést předpisy a technické podmínky podle kterých se řídí jednotlivé způsoby použití lanových svodidel.
- Vytvořit pokročilý geometrický a následně numerický model delšího úseku lanového svodidla. Tento model použít pro numerickou analýzu nárazu vozidla do lanového svodidla s využitím řešiče LS-DYNA pro dynamické děje využívající metodu konečných prvků.
- Provést rozbor výsledků získaných z numerické analýzy, provést jejich vyhodnocení a vyvodit závěry.

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího DP v textu nebo příloze

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

Seznam odborné literatury: ČSN EN 1317-2 Silniční zachytné systémy - Část 2: Svodidla a mostní svodidla
ČSN EN 1317-5+A2 Silniční zachytné systémy - Část 5: Požadavky na výrobky a posuzování shody zachytných systémů pro vozidla
LS-DYNA User's manual, LSTC 2015


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Vyčichl, Ph.D.**


Datum zadání diplomové práce: **28. srpna 2015**


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

Datum odevzdání diplomové práce: **1. června 2016**

- 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


.....
prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu mechaniky a materiálů


L. S.


.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


.....
Bc. Martina Jelínková
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....28. srpna 2015

Prohlášení

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

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

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).

V Praze dne 29. května 2016



.....
Martina Jelínková

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Janu Vyčichlovi, Ph.D. za vstřícnost při konzultacích a cenné rady při zpracování této práce. Též chci poděkovat panu Tomáši Kalkusovi ze společnosti PROZNAK Praha, s.r.o. za poskytnuté materiály. V neposlední řadě tímto děkuji své rodině za podporu během celého mého studia.

Název práce: Rozšířená numerická studie chování lanového svodidla

Autor: Bc. Martina Jelínková

Obor: Dopravní systémy a technika

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Vyčichl, Ph.D.

K618 – Ústav mechaniky a materiálů

Fakulta dopravní

České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na studie chování lanových silničních svodidel zatížených nárazem osobního automobilu. V obecné části práce je uveden přehled používaných záchytných systému na pozemních komunikacích. Základní druhy svodidel, popis jejich konstrukčních prvků a popis jejich testování. Praktická část se věnuje definici numerického modelu lanového svodidla a jeho kontaktní dynamické analýze. K tomu je použito softwaru LS-DYNA pro numerické řešení rázových dějů využívající metodu konečných prvků. Hlavním cílem této práce je zjistit proveditelnost simulace nárazu vozidla do lanového silničního svodidla a určit deformační a tlumící chování tohoto modelu. Na závěr jsou shrnuty výsledky provedených analýz, ze kterých jsou vyvozeny závěry.

Klíčová slova: LS-DYNA, LS-PrePost, lanové svodidlo, metoda konečných prvků, numerický model, nárazová zkouška

Title: Extended Numerical Study of the Behavior of the Rope Barriers

Author: Bc. Martina Jelínková

Branch: Transportation Systems and Technology

Document type: Thesis

Supervisor: Ing. Jan Vyčichl, Ph.D.

K618 – Department of Mechanics and Material
Faculty of Transportation Sciences
Czech Technical University in Prague

Abstract

This thesis is mainly focused on a study of rope barriers behaviour under an impact loading of a vehicle. In the general part of the thesis there is given a list of the detention system on the road. Listed here are the basic types of barriers, description of the structural elements and a description of their testing. The practical part of the thesis copes with a definition of a numerical model of the road rope barrier and its contact dynamic analysis. For this purpose the LS-DYNA software is used and it is also used for a numerical solution of impact processes using the finite element method. Main goal of this thesis is to find out whether the simulation of vehicle crash into the road rope barrier is feasible and to determine the deformation and damping behaviour of this model. Finally, in closing of the thesis there are summed up all of the results of the analysis from which conclusions are drawn.

Keyword: LS-DYNA, LS-PrePost, rope barriers, finite element method, numerical model, crash test

Obsah

Seznam zkratek	9
1 Úvod.....	10
2 Klasifikace záchytných silničních systémů	12
2.1 Dělení silničních záchytných systémů	12
2.2 Rozdělení svodidel.....	13
3 Metodika zkoušení silničních svodidel	18
3.1 Všeobecné údaje	18
3.1.1 Specifikace vozidel pro zkoušky.....	18
3.1.2 Index prudkosti nárazu (ASI).....	19
3.1.3 Nárazová rychlost teoretické hlavy (THIV).....	20
3.1.4 Ponárazové zpomalení hlavy (PHD).....	22
3.1.5 Index deformace kabiny vozidla (VCDI)	22
3.2 Testování silničních svodidel.....	23
3.2.1 Úroveň zadržení.....	24
3.2.2 Úroveň prudkosti nárazu	25
3.2.3 Deformace vyjádřená pracovní šířkou a vychýlením vozidla	25
3.2.4 Deformace vozidla při zkoušce.....	27
3.2.5 Chování vozidla při zkoušce.....	27
4 Lanová svodidla.....	29
4.1 Konstrukce lanových silničních svodidel.....	29
4.1.1 Lanová svodidla na silnicích.....	31
4.2 Testování a úroveň zadržení lanových svodidel	32
4.3 Použití lanových svodidel	34
4.3.1 Lanová svodidla v ČR	35
4.3.2 Lanová svodidla v zahraničí	36
4.3.3 Výhody lanových svodidel	37

4.3.4	Nevýhody lanových svodidel	37
4.4	Lanová svodidla v praxi	38
5	Numerická studie a použité softwary	40
5.1	Autodesk Inventor	41
5.2	LS-PrePost.....	41
5.3	LS-DYNA Solver	42
6	Tvorba modelu.....	43
6.1	System jednotek.....	44
6.2	Geometrický model	44
6.2.1	Model sloupku	44
6.2.2	Model zeminy	45
6.2.3	Model lana	47
6.2.4	Model impaktoru	49
6.2.5	Model vozidla	50
7	Numerický model.....	52
7.1	Materiály	52
7.1.1	Modified piecewise linear plasticity (Bilineární ocel)	52
7.1.2	Soil and foam	53
7.1.3	Curvature beam	53
7.1.4	Materiál Null	55
7.2	Kontakty	56
7.2.1	Kontakty v sestavě lanových svodidel	56
7.2.2	Kontakty mezi lanovým svodidlem a vozidlem.....	57
7.3	Numerické analýzy	57
7.3.1	Zatěžování sloupku v zemině rostoucí silou	57
7.3.2	Test lan	62
7.3.3	Náraz vozidla do sloupku	62
7.3.4	Náraz vozidla do lan.....	64

7.4	Výsledný numerický model sestavy lanového svodidla.....	65
8	Výsledky	67
8.1	Průběh nárazu vozidla do lanového svodidla	67
8.2	Maximální příčné vychýlení	72
8.3	Změna kinetické energie a rychlosti	74
9	Závěr	76
	Seznam obrázků	78
	Seznam tabulek	80
	Seznam grafů	81
	Seznam použitých zdrojů	82

Seznam zkratek

APDL	ANSYS Parametric Design Language
ASI	Acceleration Severity Index
AVI	Audio Video Interleave
CAD	Computer Aided Design
CE	Conformité Européenne (Posouzení výrobku Evropskou komisí)
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
EA	European Co-operation for Accreditation
EN	Evropská norma
HGV	Heavy Goods Vehicle
IGES	International Graphics Exchange Specification
JSNH4	Jednostranné svodidlo NH4
LSTC	Livermore Software Technology Corporation
MKP	Metoda konečných prvků
MPEG	Moving Picture Experts Group
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
OSNH4	Oboustranné svodidlo NH4
PHD	Post Impact Head Deceleration
STEP	STandard for Exchange of Product model data
STL	Standard Template Library
THIV	Theoretical Head Impact Velocity
TP	Technické podmínky
VCDI	Variable Companion Direct Index
VRS	Vehicle Restraint Systems
ZSNH4	Zábradelní svodidlo NH4
2D	dvoudimenzionální
3D	trojdimenzionální

1 Úvod

Za posledních deset let mají dopravní nehody klesající tendenci. A to díky zejména značnému pokroku v oblasti systémů aktivní bezpečnosti. Tyto systémy těží hlavně z rychlého technologického vývoje a s tím spojeným snížením finanční náročnosti nasazení pokročilých technologií. Dnes je běžné, že automobil upozorní na opuštění jízdního pruhu, či sám zastaví před překážkou.

Ani výše zmíněné systémy však nedokáží zabránit všem dopravním nehodám. Paradoxně zabraňují nehodám méně závažným, ke kterým dochází v nižších rychlostech. Daleko větší podíl na záchraně lidských životů při dopravních nehodách mají systémy pasivní bezpečnosti. Tyto systémy mají za úkol snížit následky nehody na lidském zdraví na minimum.

Systémy používané v automobilech prošly za poslední dobu značným vývojem. Naopak systémy pasivní bezpečnosti infrastruktury zůstávaly opomíjeny. Zatímco k vylepšení systému pasivní bezpečnosti v automobilu dochází vždy s uvedením nového modelu, záchytné systémy na komunikacích jsou již mnoho let beze změny. Teprve nyní dochází k rozvoji používání nových typů záchytných systémů, které jsou schopny výrazně přispět ke snížení následků dopravních nehod.

Mezi nové typy těchto záchytných systému patří moderní lanová svodidla, která nacházejí stále větší uplatnění, zejména ve státech severní a západní Evropy. Nezbytnou podmínkou vývoje je složitě, časově a finančně náročné testování svodidel.

Současná úroveň výpočetní techniky umožňuje nahrazení většiny testů počítačovou simulací. Jednou z těchto metod je numerická analýza, která efektivně napomáhá při určování deformací. Pomocí numerické simulace se dají v případě silničních svodidel nadefinovat nárazové zkoušky. Náraz do svodidla je možné neomezeně opakovat se stejnými parametry nebo tyto parametry libovolně měnit. Změnou parametrů modelu je možné otestovat široký rozsah situací, které mohou nastat, za výrazně nižší náklady než je zapotřebí k provedení reálného testu.

Studiu lanových silničních svodidel jsem se věnovala již ve své bakalářské práci a tato diplomová práce navazuje na mé předchozí poznatky. Cílem této práce je vytvořit explicitní numerické modely dvou typů lanových svodidel a ty následně zatížit nárazem osobního automobilu. K analýze bude použit software LS-DYNA. Výsledkem dynamické simulace má být pole deformací lan a sloupků svodidel a deformace karosérie vozidla.

Získané výsledky modelů se porovnají s platnými normami a dále se výsledky porovnají mezi sebou.

Teoretická část se zaměří na klasifikaci záchytných systému všeobecně, na jejich rozdělení a vlastnosti. Následuje popis silničních bariér, mezi které spadají lanová svodidla. Chystám se také věnovat způsobu testování silničních svodidel, dle normy ČSN EN 1317-2. Následně se podrobně zaměřím na lanová svodidla, která jsou hlavní problematikou této diplomové práce. V následující kapitole provedu stručný popis počítačových programů, se kterými se bude pracovat během celé této práce.

V praktické části se již zaměřím na samotnou tvorbu modelů lanových svodidel. Popíši zde, jak se modely tvořily a definovaly. Poslední část této diplomové práce je vyhodnocení jednotlivých dynamických simulací nárazových zkoušek a na závěr shrnutí celé této práce.

2 Klasifikace záchytných silničních systémů

Charakteristické pro pasivní bezpečnost je, že se nesnaží zabránit vzniku dopravní nehody, ale v případě, že k dopravní nehodě dojde, má za úkol minimalizovat její následky. Mezi prvky pasivní bezpečnosti na pozemních komunikacích patří záchytné systémy.

Záchytné silniční systémy se instalují do míst, kde je nutno zvýšit a udržet bezpečnost silničního provozu. Instalují se na krajnicích nebezpečného úseku, jako jsou prudké zatáčky, strmé násypy a na další konfliktní místa, jakou jsou střední dělicí pásy směrově rozdělené komunikace.

2.1 Dělení silničních záchytných systémů

Záchytné silniční systémy se dělí dle typu:

- na silniční záchytné systémy pro vozidla:
 - Silniční zábrany – slouží k ochraně silničního provozu od překážek a nebezpečí komunikace, jako jsou strmé svahy, pevné objekty a mostní pilíře. Používají se nejen podél silnic, ale osazují se i do středních dělicích pásů, aby zamezily střetu s protijedoucím vozidlem.
 - Střední zábrany – používané do středních dělicích pásů na směrově rozdělené komunikace. Na rozdíl od systému používaných podél vozovky, musí být navrženy tak, aby mohly odolat nárazu z obou stran.
 - Zábradelní svodidla – osazují se na kraje mostu, kde hrozí pád vozidla z mostní konstrukce. Jsou navržena tak, aby při nárazu vozidla odolala a neohrožilo převrácení vozidla přes okraj konstrukce.
 - Pracovní zóny – slouží k ochraně před nebezpečím provozu v pracovních zónách. Mohou být dočasná nebo stálá.
 - Dále mezi tyto typy záchytných systémů patří koncové a přechodové části, tlumiče nárazů a únikové zóny.

- na silniční záchytné systémy pro chodce:
 - o mostní zábradlí,
 - o silniční zábradlí.

Všeobecně nejznámějším prvkem záchytných silničních systémů je silniční svodidlo, které je i hlavním tématem této práce. Hlavním úkolem silničních svodidel je snížit nárazovou energii vozidla a zabránit vyjetí vozidla z vymezeného jízdního pásu. Slouží k tomu, aby zadržela nebo přesměrovala neovladatelné vozidlo při zajištění přiměřené bezpečnosti cestujících ve vozidle a jiných uživatelů pozemní komunikace a zabránila vyjetí vozidla mimo vozovku. Dalším účelem svodidla je směrové vedení jak motorových vozidel, tak i ostatních účastníků provozu na pozemních komunikacích. Svodidla se nejčastěji umísťují na krajnicích vozovky nebo na římsu mostu, kde mají za úkol chránit jedoucí vozidla před pádem nebo před nárazem do překážky. Dále se zřizují tam, kde by mohlo být nárazem vozidla ohroženo zdraví lidí nebo majetek. Jejich cílem je ochrana budov, vodních toků, železnic, pitné vody a podobně. [1, 2, 3]

2.2 Rozdělení svodidel

Svodidla se dle normy dělí na svodidla „schválená“ nebo na svodidla „jiná“ (kusové výroby). Na pozemních komunikacích je povolena instalace pouze svodidel „schválených“ (viz Tabulka 1). Na objektech jako jsou mosty, opěrné zdi bez přesypávky, galerie, podjezdy mostů a portály je možno použít mimo svodidel „schválených“ i svodidla „jiná“ kusově vyráběná. [3]

Tabulka 1 - Testy "schválených" svodidel [3]

Označení nárazu (test č.)	Nárazová rychlost [km/h]	Úhel nárazu [°]	Celková hmotnost vozidla [kg]	Kinetická energie E_k [kJ]
TB 11	100	20	900	40,6
TB 21	80	8	1300	6,2
TB 22	80	15	1300	21,5
TB 31	80	20	1500	43,3
TB 32	110	20	1500	81,9
TB 41	70	8	10000	36,6
TB 42	70	15	10000	126,6
TB 51	70	20	13000	287,5
TB 61	80	20	16000	462,1
TB 71	65	20	30000	572
TB 81	65	20	38000	724,6

Svodidla „jiná“ musí splňovat předem dané zatížení stejně jako svodidla „schválená“ (viz Tabulka 2).

Tabulka 2 - Testy "jiných" svodidel [3]

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

Podle tuhosti jsou svodidla rozdělena na:

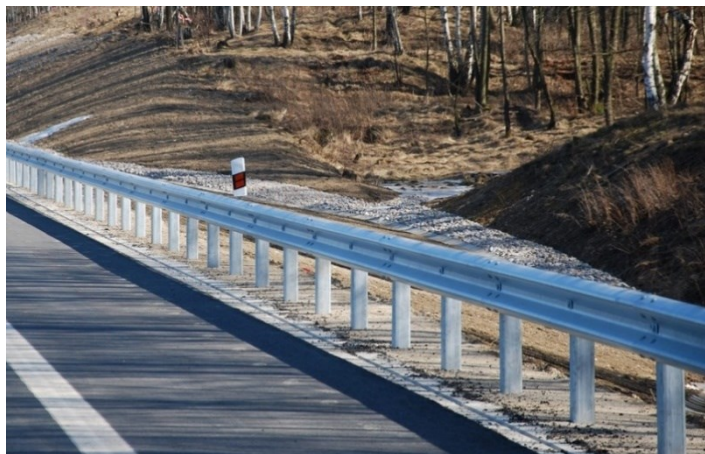
- Flexibilní, která jsou tvořena ocelovými lany a mají velké pohlcení nárazové energie. Energie je rozptýlena do lan, sloupků, zeminy, do karoserie vozidla a také mezi tření vozidla a vozovky.
- Polotuhá, která nejčastěji představují ocelová svodidla. Pohlcení energie není tak velké jako u flexibilních svodidel, ale i tak je značné. Nárazová energie se rozptýlí mezi svodidlo samotné, sloupky, půdu a karosérii vozidla.
- Tuhá, která jsou zhotovena obvykle z vyztuženého betonu. Tvar betonu bariéry je navržen tak, aby přesměřoval vozidlo rovnoběžně ve směru bariéry. V tomto případě je nárazová energie rozptýlena především v deformacích samotného vozidla. [4, 5]

Jedním z hlavních kritérií, jak silniční svodidla rozdělovat, je podle materiálu, ze kterého jsou vyrobená.

Ocelová svodidla

Ocelová svodidla jsou v naší zemi nejvíce rozšířeným typem záchytného systému. Jejich výhodou je dobrý poměr ceny a výkonu. Ocelové svodidlo zahrnuje kompletní ocelovou konstrukci, která se skládá z přepážky, nižších nosníků (v závislosti na typu), sloupků, spojovacích pásků, šroubů, podložek, spojovacího materiálu atd. (viz Obrázek 1). Podle svého působení při nárazu se používají ocelová svodidla deformovatelná (poddajná) nebo tuhá (nepoddajná). Dále se ocelová svodidla dělí na jednostranná nebo oboustranná. V dnešní době se u ocelových svodidel prosazuje nový materiál mikrolegované oceli, díky kterému je dosaženo vyšší pevnosti svodidla a zároveň

snížení hmotnosti tohoto svodidla. Aby se svodidla chránila proti korozi, bývá jejich povrch pozinkován. Příklady ocelových svodidel v České republice jsou JSNH4, OSNH4, ZSNH4. [6, 7]



Obrázek 1 - Ocelová svodidla [8]

Lanová svodidla

Lanová svodidla se poslední dobou prosazují čím dál více. Je to především proto, že při kolizi dochází k rovnoměrnému pohlcení kinetické energie a svodidla jsou tak více bezpečná k posádce vozidla. Dále jsou výhodná vzhledem k nízké pořizovací ceně, snadné údržbě, rychlé opravě po poškození nárazem, nebrání proudění vzduchu a hlavně tato svodidla dokážou plnit svoji funkci i při těžším nárazu, než na jaký byla zkušena. Konstrukce lanových svodidel je sestavená z drátěných lan, ocelových sloupků a betonových kotevních bloků s kotevními rámy (viz Obrázek 2). Jsou testována podle evropské normy EN 1317-2 a jejich úroveň zadržení je N2.



Obrázek 2 - Lanová svodidla [10]

V naší zemi lanová svodidla nemají takovou popularitu jako například ve Skandinávii. Například ve Švédsku se tento typ svodidel běžně instaluje na všechny dvouproudové komunikace. [6, 9]

Dřevoocelová svodidla

Tato svodidla se používají v místech, kde hrozí menší nebezpečí. Používají se k ohrazení parkovišť, místo plotů nebo k oddělení automobilové dopravy od cyklistické nebo pěší. Díky svému přirozenému vzhledu se často instalují do turistických oblastí, nebo se používají v chráněných oblastech. Kompletní konstrukce dřevoocelových svodidel se sestává z kombinovaných svodnic, sloupků, spojovacích pásků, spojek a kotevních prvků (viz Obrázek 3). Většinou je jejich úroveň zadržetí N2, ale některá dřevoocelová svodidla mají úroveň zadržetí i H2. U nás se s těmito svodidly můžeme setkat na komunikacích II. a III. třídy, kde je maximální povolená rychlost 90 km/h, jinak se s těmito svodidly můžeme setkat ve většině evropských států. [6]



Obrázek 3 - Dřevoocelová svodidla [11]

Betonová svodidla

Tato svodidla se instalují do míst, kde je požadována malá pracovní šířka a zároveň vysoká úroveň zadržetí. Díky jejich tvaru obrácenému Y je náraz pod malým úhlem velmi bezpečný pro posádku vozidla, neboť nedojde ke kontaktu svodidla s karosérií, ale dojde pouze ke kontaktu mezi svodidlem a koly vozidla. Kompletní konstrukce betonových svodidel je sestavená z prefabrikovaných segmentů a spojovacích dílů (viz Obrázek 4). Konstrukce může být také monolitická, betonovaná na místě. Podle

svého působení při nárazu vozidla mohou být betonová svodidla posuvná (poddajná) nebo neposuvná (nepoddajná), případně jednostranná nebo oboustranná. Nejznámější typy těchto svodidel jsou Nex Jersey nebo městský blok, sloužící pro oddělení ostrůvků pro chodce. Prefabrikované konstrukce se používají hlavně v ČR, monolitické zase v evropských státech, jako je například Francie. [6]



Obrázek 4 - Betonová svodidla [12]

Zábradelní svodidla

Zábradelní svodidla se umísťují na místa, kde hrozí pád z tělesa vozovky, uklouznutí nebo vstup do nebezpečného prostoru (viz Obrázek 5). Řadí se mezi ně i vodící madla pro invalidy, madla na protihlukových stěnách a madla pro zabezpečení mostů a jejich prohlídek. Zahrnují kompletní konstrukci sestavenou ze stejných součástí jako ostatní typy svodidel, toto svodidlo je však navíc doplněno o ocelová madla, výplň a v některých případech i o pletivo. [7]



Obrázek 5 - Zábradelní svodidla [13]

3 Metodika zkoušení silničních svodidel

Nejen na osobní automobily, ale i na ostatní opatření spojená s dopravou, jsou kladeny stále vyšší bezpečnostní požadavky. Mezi bezpečnostní opatření na pozemních komunikacích bezpochyby patří záchytné silniční systémy, které se řadí mezi systémy pasivní bezpečnosti. Pozemní komunikace se mohou osazovat pouze záchytnými systémy, které jsou popsány Technickými podmínkami a normami a jsou řádně otestovány podle normy ČSN EN 1317-2. Tato kapitola stručně pojednává o základních parametrech, podle kterých se testují silniční svodidla.

3.1 Všeobecné údaje

3.1.1 Specifikace vozidel pro zkoušky

Zkušební vozidla pro zkoušení silničních záchytných systémů musí splňovat dané specifikace (viz Tabulka 3). Hmotnost vozidla se udává včetně zátěže pro nákladní vozidla (HGV). Tato maximální zátěž je včetně měřicího a záznamového zařízení, které je umístěno na vozidle. Označení S u počtu náprav znamená řízená náprava. [14]

Tabulka 3 – Specifikace testovacích vozidel [14]

TYP VOZIDLA	Osobní	Osobní	Osobní	Nákladní	Autobus	Nákladní	Nákladní	Návěs
HMOTNOST [kg]								
hmotnost vozidla	825	1 300	1 500	10 000	13 000	16 000	30 000	38 000
	± 40	± 65	± 75	± 300	± 400	± 500	± 900	± 1100
včetně max. zátěže	100	160	180					
figurína	75							
celkem	900	1 300	1 500	10 000	13 000	16 000	30 000	38 000
	± 40	± 65	± 75	± 300	± 400	± 500	± 900	± 1100
ROZMĚRY [m]								
mezní odchylka ± 15% rozchod kol (přední a zadní)	1,35	1,40	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
poloměr kola (nezatíženého)				0,46	0,52	0,52	0,55	0,55
rozvor kol (vzdálen. nápravy)				4,60	6,50	5,90	6,70	11,25
počet náprav	1S+1	1S+1	1S+1	1S+1	1S+1	1S+1/2	2S+2	1S+3/4
světlná výška předního náraz. měřená bočním okrajem				0,58		0,58	0,58	0,58
UMÍSTĚNÍ TĚŽIŠTĚ [m]								
mezní odchylka ± 10%								
podélná vzdálenost od přední nápravy ± 10%	0,90	1,10	1,24	2,70	3,80	3,10	4,14	6,20
boční vzdálenost od středové osy vozidla	± 0,07	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10
Výška nad zemí:								
hmotnost vozidla ± 10%	0,49	0,53	0,53					
zatížení + 15% až - 5%				1,50	1,40	1,60	1,90	1,90

3.1.2 Index prudkosti nárazu (ASI)

Index prudkosti nárazu určuje míru nebezpečí uvnitř vozidla. Je funkcí času a vypočte se podle následujícího vztahu:

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Kde $\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z$ jsou složky zrychlení zvoleného bodu P vozidla vypočítané jako průměr doby pohybu $\delta = 50$ ms. Složky $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$ jsou mezní hodnoty složek zrychlení podél os karosérie xyz.

Mezní zrychlení pro připoutané pasažéry bezpečnostními pásy jsou $\hat{a}_x = 12$ g pro podélné zrychlení ve směru x, $\hat{a}_y = 9$ g pro boční zrychlení ve směru y a $\hat{a}_z = 10$ g pro vertikální zrychlení ve směru z.

Pomocí zvoleného bodu P, který by se měl nacházet co nejbližší těžišti vozidla, se určí $\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z$. Do bodu P se umístí přístrojové vybavení, které snímá zrychlení ve všech třech směrech. Po následném měření se získají tři složky zrychlení vozidla, kde jednotkou měření je gravitační zrychlení. Následně se určí počet vzorků, který je potřebný pro výpočet průměrného zrychlení. Zjištěné hodnoty se dosadí do vztahu pro výpočet indexu $ASI(t)$ společně s mezními hodnotami zrychlení $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$. Index prudkosti nárazu je bezrozměrná veličina, která je skalární funkcí času.

Čím větší je hodnota indexu ASI, tím větší je riziko pro posádku uvnitř vozidla, proto se jako výsledek bere maximální hodnota tohoto indexu. [15]

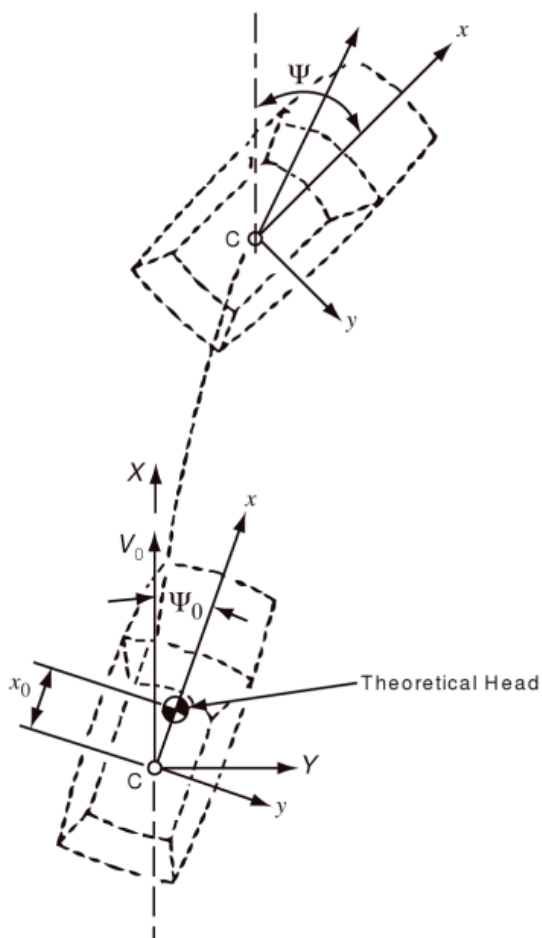
$$ASI(t) = \max[ASI(t)] \quad (2)$$

3.1.3 Nárazová rychlost teoretické hlavy (THIV)

THIV slouží k určení prudkosti nárazu cestujících ve vozidle, které se střetne se záchytným systémem, nebo jakoukoli jinou překážkou. Posádka ve vozidle se může považovat za volně se pohybující objekt (teoretická hlava), který při střetu pokračuje dále v pohybu, dokud se nezastaví o některý prvek z interiéru vozidla (viz Obrázek 6).

Předpokládá se, že před střetem vozidla se teoretická hlava pohybuje stejnou rychlostí a ve stejném směru jako vozidlo, a to pouze v horizontální rovině.

K výpočtu THIV se dle normy používají dvě soustavy souřadnic:



Obrázek 6 - Nárazová rychlost teoretické hlavy [16]

Souřadnicový systém vozidla Cxy :

C ... bod vozidla ležícího blízko těžiště

x ... podélná osa

y ... příčná osa

\ddot{x}_c ... zrychlení bodu C ve směru osy x [ms^2]

\ddot{y}_c ... zrychlení bodu C ve směru osy y [ms^2]

$\ddot{\psi}$... úhle pootočení [$\frac{rad}{s}$]

Základní souřadnicový systém OXY :

X ... ve směru rychlosti VO

O ... počáteční pozice k vztaženému bodu C

$X_c(t), Y_c(t)$... souřadnice bodu C , vozidlo

$X_b(t), Y_b(t)$... souřadnice bodu B , teoretická hlava

Hodnota nárazové rychlosti teoretické hlavy se stanoví podle vzorce:

$$THIV = [v_x^2(t) + v_y^2(t)] \quad [km/h] \quad (3)$$

3.1.4 Ponárazové zpomalení hlavy (PHD)

U výpočtu PHD se předpokládá, že hlava po nárazu vozidla zůstane ve styku s některým z prvků interiéru vozidla, a tudíž bude její zrychlení stejné jako zrychlení vozidla po zbytek kontaktu se záchytným systémem. Při měření je vozidlo vybaveno jedním akcelerometrem, který měří zrychlení v podélném směru a v některých případech je vozidlo vybaveno i snímačem pro úhlové rychlosti. Tento měřicí přístroj se umísťuje nejbližší k těžišti vozidla.

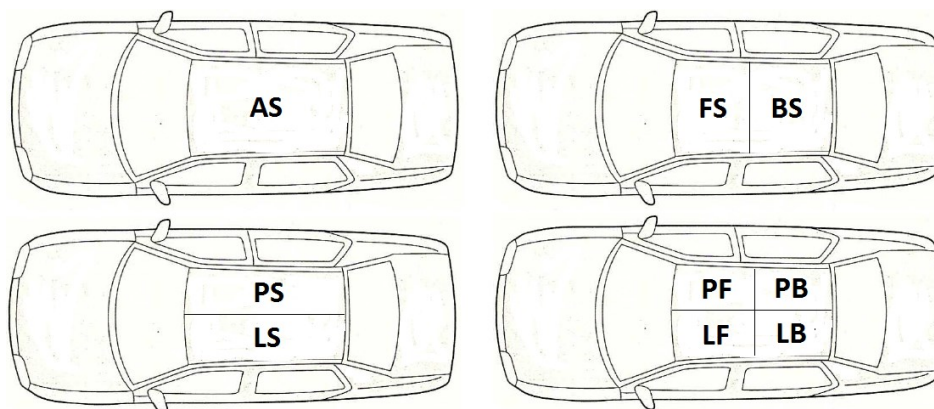
Hodnota PHD se vypočítá jako:

$$PHD = \max(\langle x_c \rangle^2 + \langle y_c \rangle^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Určí se maximální hodnota výsledného zrychlení bodu C z průměru 10 ms měřených složek x_c a y_c . Výsledek se vyjadřuje v násobcích g ; $g = 9,81 \text{ ms}^2$. [1,3]

3.1.5 Index deformace kabiny vozidla (VCDI)

Tento index zohledňuje jak deformaci kabiny, tak i rozsah deformace. Index VCDI se skládá ze dvou abecedních znaků a sedmi číselných znaků $XXabcde\text{fg}$, kde XX označuje místo deformace a $abcde\text{fg}$ označuje zmenšení sedmi vnitřních částí kabiny vozidla v % (viz Obrázek 7). [1, 3, 17]



Obrázek 7 - Deformační zóny vozidla [17]

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

- a ... vzdálenost mezi přístrojovou 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 přístrojové desky a podlahovým panelem
- e ... šířka vnitřku vozidla
- f ... vzdálenost mezi nižším okrajem pravého okna a vyšším okrajem levého okna
- g ... vzdálenost mezi vyšším okrajem pravého okna a nižším okrajem levého okna

3.2 Testování silničních svodidel

Aby mohla být svodidla osazována na pozemní komunikace, musí být v souladu s nárazovými zkouškami a nesmí žádným způsobem ohrožovat provoz na komunikaci. Výrobce nebo dovozce smí nabízet pouze takové úpravy konfigurace a úpravy svodidel, které nejsou v rozporu s certifikátem svodidla. Testování svodidel převážně provádí zkušební laboratoř, která je akreditovaná akreditačním orgánem, který je členem multilaterální dohody EA. Tyto testy se provádějí v souladu s parametry nárazových zkoušek pro svodidla (viz Tabulka 4).

Tabulka 4 - Parametry nárazových zkoušek [2]

Zkouška	Nárazová rychlost [km/h]	Úhel nárazu [°]	Celková hmotnost vozidla [kg]	Typ vozidla
TB 11	100	20	900	Osobní
TB 21	80	8	1300	Osobní
TB 22	80	15	1300	Osobní
TB 31	80	20	1500	Osobní
TB 32	110	20	1500	Osobní
TB 41	70	8	10000	Nákladní
TB 42	70	15	10000	Nákladní
TB 51	70	20	13000	Nákladní
TB 61	80	20	16000	Nákladní
TB 71	65	20	30000	Nákladní
TB 81	65	20	38000	Nákladní s návěsem

3.2.1 Úroveň zadržení

Důležité je se zmínit, že zatížení svodidel je možno vyjádřit dvěma způsoby, a to jako konkrétní náraz nebo statické zatěžování. Úroveň zadržení určuje míru, jakou je svodidlo schopno zachytit (viz Tabulka 5). Čím je úroveň zadržení větší, tím je svodidlo odolnější vůči nárazu a může se tak instalovat na komunikace s vyšší maximální rychlostí.

Tabulka 5 - Úrovně zadržení [2]

Úrovně zadržení			Požadovaná zkouška	
Nízkoúhlové zadržení	T1		TB 21	
	T2		TB 22	
		T3	TB 41 a TB 21	
Běžné zadržení	N1		TB 31	
	N2		TB 32 a TB 11	
Vyšší zadržení		H1	TB 42 a TB 11	
			L1	TB 42 a TB 32 a TB 11
		H2		TB 51 a TB 11
			L2	TB 51 a TB 32 a TB 11
		H3		TB 61 a TB 11
			L3	TB 61 a TB 32 a TB 11
Velmi vysoké zadržení		H4a	TB 71 a TB 11	
		H4b	TB 81 a TB 11	
		L4a	TB 71 a TB 32 a TB 11	
		L4b	TB 81 a TB 32 a TB 11	

Svodidlo, které je úspěšně odzkoušeno pro danou úroveň zadržení, se považuje za svodidlo, které splňuje zkušební podmínky nižší úrovně. Úrovně L jsou oproti úrovním H rozšířeny o zkoušku TB 32. Nízkoúhlová zadržení jsou určena jen pro svodidla dočasná. Ty mohou být ale zkoušena i pro vyšší úrovně zadržení. [2]

3.2.2 Úroveň prudkosti nárazu

Při testování svodidel se sleduje další faktor, který představuje úroveň prudkosti nárazu. Prudkost nárazu se značí indexy ASI a THIV, provádí se u osobních vozidel a musí splňovat dané požadavky (viz Tabulka 6). Vyhodnocení indexů prudkosti nárazu ASI a THIV se provádí pouze u osobních vozidel. Je-li úroveň prudkosti nárazu A, pak je v neovladatelném vozidle pro cestujícího poskytnuta největší bezpečnost.

Tabulka 6 - Úroveň prudkosti nárazu [2]

Úroveň prudkosti nárazu	Hodnoty indexu		
A	$ASI \leq 1,0$	a	$THIV \leq 33 \text{ km/h}$
B	$ASI \leq 1,4$		
C	$ASI \leq 1,9$		

V tabulce jsou definovány tři úrovně prudkosti nárazu A, B a C jako funkce hodnot indexů ASI a THIV. Úroveň prudkosti nárazu A poskytuje největší úroveň bezpečnosti pro cestujícího v neovladatelném vozidle, kdežto úroveň prudkosti nárazu C naopak nejmenší úroveň bezpečí. Naměřené hodnoty ze zkoušek náležitě upravené podle odstavce 6.3 EN 1317-1:2010 (Silniční zachytné systémy - Část 1: Terminologie a obecná kritéria pro zkušební metody) musí být přímo porovnány s hodnotami v tabulce 6. [2]

3.2.3 Deformace vyjádřená pracovní šířkou a vychýlením vozidla

Pracovní šířka a vychýlení vozidla umožňují určit, jak má být svodidlo správně instalováno a v jaké má být vzdálenosti před překážkou, aby byla splněna jeho funkce jako bezpečnostního prvku.

Pracovní šířka W_m – maximální boční vzdálenost mezi kteroukoli částí svodidla na jeho lícni straně před nárazem a maximální dynamickou polohou kterékoli části svodidla během nárazu.

Vychýlení vozidla VI_m – vyhodnocuje se ze záznamů vysokorychlostních kamer nebo video záznamů.

Pro získání tříd normalizovaných úrovní se používají normalizované hodnoty. Normalizované hodnoty pracovní šířky a vychýlení vozidla se získají výpočtem z naměřených hodnot. [1, 3]

Normalizovaná pracovní šířka:

$$W_n = W_u + \left[(W_m - W_u) \cdot \sqrt{\frac{M_t \cdot (V_t \cdot \sin \alpha_t)^2}{M_m \cdot (V_m \cdot \sin \alpha_m)^2}} \right] \quad [m] \quad (5)$$

Normalizované vychýlení vozidla:

$$VI_n = VI_m \cdot \sqrt{\frac{M_t \cdot (V_t \cdot \sin \alpha_t)^2}{M_m \cdot (V_m \cdot \sin \alpha_m)^2}} \quad [m] \quad (6)$$

W_m ... změřená pracovní šířka [m]

W_u ... nedeformovaná šířka systému

VI_m ... změřené vychýlení vozidla [m]

M_t ... specifikovaná (normou stanovená) celková hmotnost [kg]; tab.

V_t ... specifikovaná (normou stanovená) rychlost [m/s]; tab.

α_t ... specifikovaný (normou stanovený) úhel [°]; tab.

M_m ... změřená celková hmotnost [kg]

V_m ... změřená rychlost [m/s]

α_m ... změřený úhel [°]

3.2.4 Deformace vozidla při zkoušce

Při zkoušce svodidel se vyhodnocuje i vnitřní deformace interiéru vozidla. Tento index deformace se nazývá VCDI – index deformace kabiny vozidla (viz Tabulka 7).

Tabulka 7 - Index VCDI [17]

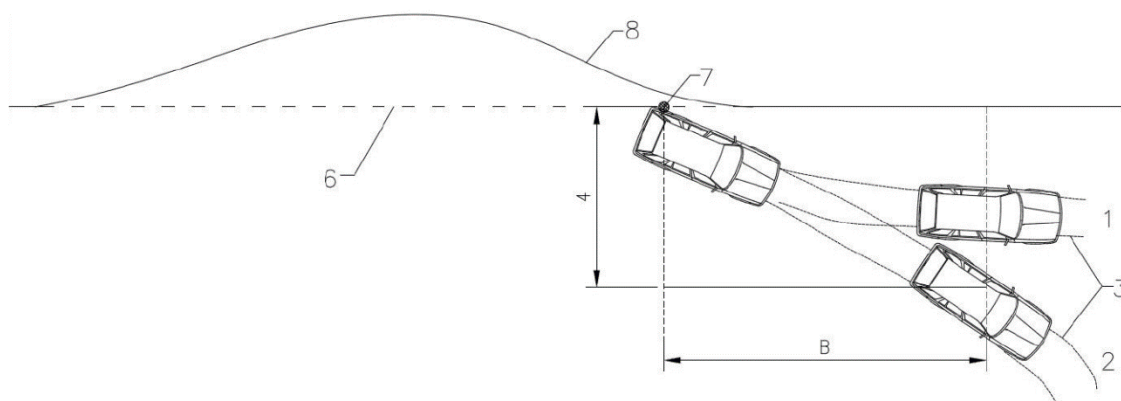
Úroveň zadržení	PARAMETRY			
	chování svodidla/mostního svodidla a vozidla	úroveň prudkosti nárazu ASI-THIV	deformace vozidla VCDI	deformace svodidla/mostního svodidla
T1	TB 21	TB 21	TB 21	TB 21
T2	TB 22	TB 22	TB 22	TB 22
T3	TB 41 + TB 21	TB 21	TB 21	TB 41 + TB 21
N1	TB 31	TB 31	TB 31	TB 31
N2	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11
H1	TB 42 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 42 + TB 11
H2	TB 51 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 51 + TB 11
H3	TB 63 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 63 + TB 11
H4a	TB 71 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 71 + TB 11
H4b	TB 81 + TB 11	TB 11	TB 11	TB 81 + TB 11
L1	TB 42 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 42 + TB 32 + TB 11
L2	TB 51 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 51 + TB 32 + TB 11
L3	TB 61 + TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 61 + TB 32 + TB 11
L4a	TB 71 + TB 32 + TB 12	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 71 + TB 32 + TB 12
L4b	TB 81 + TB 32 + TB 13	TB 32 + TB 11	TB 32 + TB 11	TB 81 + TB 32 + TB 13

3.2.5 Chování vozidla při zkoušce

Je těžké předpovědět, jak se bude vozidlo po nárazu do svodidla chovat, ale aby svodidlo splnilo zkoušku, musí být splněno alespoň několik požadavků. Během zkoušky se nesmí více jak jedno kolo vozidla dostat za svodidlo a zároveň se nesmí vozidlo převrátit, a to ani na bok. V případě, že se testuje nákladní vozidlo, nesmí se více jak 5% hmotnosti nákladu oddělit v průběhu zkoušky do doby, než vozidlo opustí výjezdovou plochu. Tyto plochy jsou definovány zvlášť pro osobní vozidla a zvlášť pro vozidla jiná (viz Tabulka 8, Obrázek 8). [17]

Tabulka 8 - Chování vozidla při nárazu [17]

Typ vozidla	A	B
Osobní vozidla	2,2 m	10,0 m
Jiná vozidla	4,4 m	20,0 m



Obrázek 8 - Schéma chování vozidla při nárazu [17]

- 1 ... “vyhovuje”
- 2 ... “nevyhovuje”
- 3 ... stopy kol
- 4 ... $A + \text{šířka vozidla} + 16\% \text{ délky vozidla}$
- B ... vzdálenost od posledního bodu P
- 6 ... počáteční lící plocha svodidla
- 7 ... bod P
- 8 ... prohnutý tvar svodidla

4 Lanová svodidla

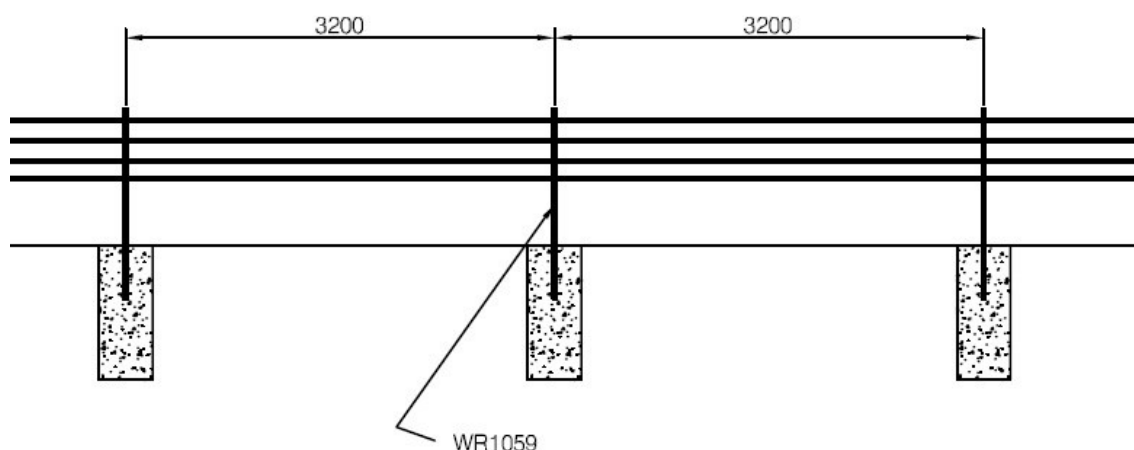
Tato diplomová práce je zaměřena na lanová svodidla, z toho důvodu je následující kapitola věnována právě tomuto typu záchytného systému. Část této kapitoly vychází z mé předešlé bakalářské práce a navazuje na ni.

Jak již bylo zmíněno, lanová svodidla spadají do záchytných systémů osazovaných na pozemních komunikacích. Aby tato svodidla mohla být instalována, buď podél vozovky nebo do středních dělících pásů, musí splňovat podmínky dané Českými technickými podmínkami, především TP 106 a českými normami jako jsou ČSN EN 1317-2, které pojednávají o testování silničních svodidel.

Podle TP 106 je lanové svodidlo kompletní konstrukce, která sestává z drátěných ocelových lan držících na ocelových sloupcích a betonových kotevních blocích s kotevními rámy buď koncovými nebo mezilehlými. Sloupky mohou být do zeminy upevněny několika způsoby, a to buď zasunutím sloupků do betonových kapes, pomocí kotvených šroubů do podkladu vozovky, nebo tzv. beraněním. Jedná se o záchytný systém nové generace, se kterým se můžeme setkat jako s tří nebo čtyřlanovým svodidlem. Hlavním úkolem lanového svodidla je minimalizovat zranění posádky vozidla a škody na vozidlech. Jeho hlavními výhodami jsou vysoká účinnost, nízké pořizovací náklady, téměř žádná údržba, velmi krátká doba instalace a opravy. [9, 18]

4.1 Konstrukce lanových silničních svodidel

Lanová svodidla jsou tvořena buď ze tří nebo ze čtyř ocelových lan o průměru 19 mm. Každé lano se skládá ze tří pramenů po sedmi drátech. Z toho každý drát přenese na mezi přetržení sílu větší než 10 kN. Lana jsou podporována sloupky v osově vzdálenosti v rozmezí většinou 2,40 m – 3,20 m (viz Obrázek 9). Ve výjimečných případech se hodnota osově vzdálenosti může snížit až na 1,20 m.

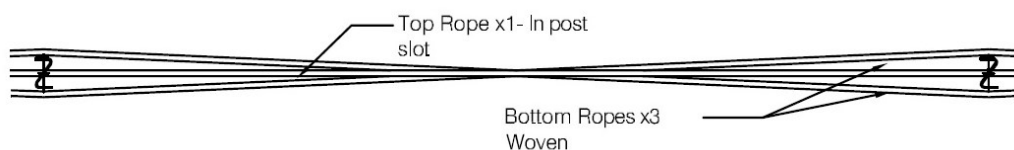


Obrázek 9 - Osová vzdálenost sloupků [19]

Lana jsou na koncích svodidel kotvena do tělesa vozovky, přičemž kotvy jsou od sebe vzdáleny maximálně 1385 m. Je-li svodidlo delší než zmíněných 1385 m, přidávají se mezilehlé kotvy. Existují lana krajní, která vycházejí z kotevních bloků a mají délku 6 m. Vnitřní lana, která jsou napojena na krajní lana, mají délku maximálně 153,60 m. Každé krajní lano má u kotevního bloku bezpečnostní lano o průměru 8 mm a délky 1,80 m. Při nárazu vozidla v blízkosti kotevního bloku se koncové lano vyvleče z kotvy (aby i zde byl náraz „měkký“ a omezil se účinek, který by mohl katapultovat vozidlo). Lana jsou mezi kotvy napnuta napínacími šrouby dle teploty při osazování (při +10 °C jsou lana napnuta na 25 kN).

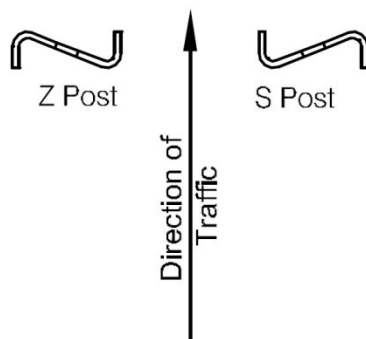
Umístění lan se u jednotlivých typů těchto svodidel liší. U jednoho typu jsou dvě vrchní lana umístěna v horních zářezích sloupků. Výška umístění těchto lan je stanovena na 585 mm a výška 490 mm udává, kde se nachází dvě spodní lana. Přípustná tolerance při osazování je +/- 30 mm vůči teoreticky správné výšce. Spodní dvě lana jsou umístěna po stranách sloupků tak, že se půdorysně proplétají vždy mezi sousedními sloupky (viz Obrázek 10). Tato lana jsou podepřena vymešovými háky nebo kolíky, které jsou uchyceny k přírubám sloupků. Tento typ lanového svodidla je použit v této práci a nadále budou sloupky tohoto typu svodidla označovány jako Sloupek 1 a kompletní sestava z nich jako Sestava 1.

Druhá možnost, jak mohou být lana umístěna, je následující. Vrchní lano je umístěno v zářezu sloupku, ostatní tři jsou po stranách sloupků v různých výškách od povrchu vozovky. Nejnižší lano se nachází ve výšce 480 mm a každé další je o 150 mm výše vždy na opačné straně. V této práci budou sloupky tohoto typu označovány jako Sloupek 2 a sestava z nich jako Sestava 2.



Obrázek 10 - Půdorysné propletení lan [19]

Co se týče sloupků u lanových svodidel, jsou většinou tvaru „S“ a „Z“, což vyjadřuje jejich polohu zaoblených hran, které musí být směřovány proti jízdě, jinak jde o tytéž sloupky (viz Obrázek 11). Z toho důvodu se ve středním dělicím pásu používají sloupky tvaru „Z“ a na vnějším okraji silnice tvaru „S“.



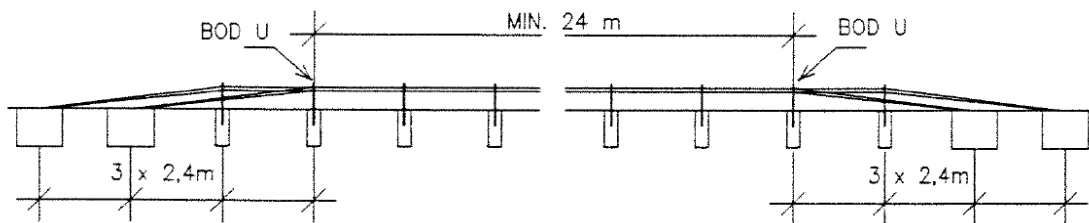
Obrázek 11 - Tvary sloupků [19]

V dnešní době se nejčastěji používají sloupky beraněné délky 1,425 m. Instalují se přednostně na místa, kde vznikají časté dopravní nehody z důvodu, že výměna těchto sloupků je výhodnější na manipulaci. Dále se používají sloupky dlouhé 1,675 m. Sloupky se osazují kolmo na osu svodidla. Na horní část sloupků se nasazují umělohmotná víčka, která slouží současně jako plocha pro reflexní odrazku. [9]

4.1.1 Lanová svodidla na silnicích

Výška lanového svodidla se měří v hraně zpevnění v případě, že je líc svodidla od této hrany vzdálen méně než 1,50 m. Když je vzdálenost větší než zmíněných 1,50 m, měří se výška svodidla přímo v líci. Důležité je, aby svodidla žádnou svou částí nezasahovala do volné šířky vozovky.

Minimální délka svodidla je 24 m jeho plné výšky, to je cca 38,4 m mezi krajními kotevními bloky. Svodidlo má plnou účinnost v bodě, ve kterém mají všechna lana plnou výšku. Tento bod je směrodatný pro začátek a konec svodidla. V místě mezilehlých kotev, kde lana nepřerušovaně probíhají, je plná účinnost nepřerušena (viz Obrázek 12).



Obrázek 12 - Minimální délka svodidla [9]

Je-li třeba svodidlo směrově odklonit, provádí se většinou směrový odklon 1:16 nebo mírnější. V tomto směrovém odklonu zůstává osová vzdálenost sloupků běžných 2,40 m. Pouze v případě strmějšího odklonu než je 1:16, se osová vzdálenost sloupků zmenší na 1,20 m. [9]

4.2 Testování a úroveň zadržení lanových svodidel

V případě dopravní nehody s lanovými svodidly se lana svodidel zatlačí do karoserie vozidla a následným uhýbáním se vysunou ze sloupků. Vlivem malé tuhosti se sloupky ve směru nárazu ohnou a vozidlo je přejede. Jakmile dojde k rovnováze příčných sil, působících mezi vozidlem a lany svodidla (v okamžiku největšího příčného průhybu lan), začnou lana vracet zpět vozidlo na komunikaci.

Silniční svodidla se testují pomocí různých nárazových zkoušek. U lanových svodidel jsou to zkoušky TB 11 a TB 32 (viz Tabulka 9).

Tabulka 9 – Informace o nárazových zkouškách [9]

Test č.	Stručný popis základních požadavků na test (kinetická energie skutečně provedených testů)	Index prudkosti nárazu ASI	Maximální dosažená příčná deformace při testu w_{max} [m]	Test je předepsán ČSN EN 1317-2 pro
TB 11	Vozidlo 900 kg rychlost 100 km/h úhel nárazu 20° $E_k = 41$ kNm	0,5 – 0,6	1,00 – 1,30	Normální úroveň zadrž. N1 a vyšší; tímto testem se zjišťuje hodnota indexu ASI
TB 32	Vozidlo 1500 kg rychlost 110 km/h úhel nárazu 20° $E_k = 82$ kNm	---	1,30 – 1,50	Normální úroveň zadrž. N2; tímto testem se zjišťuje w_{max} a chování svodidla

Jeden z nejdůležitějších sledovaných parametrů u nárazových zkoušek lanových svodidel je stupeň prudkosti nárazu ASI. Právě u lanových svodidel byly při bariérových zkouškách v roce 2005 naměřeny historicky nejmenší hodnoty indexu ASI, a to pouhých 0,2 ASI. Tato hodnota je třikrát menší než u ocelových svodidel, a dokonce pětkrát menší než u betonových. [18]

Hodnoty, dle kterých se volí svodidla vhodná pro daný úsek, se nazývají také jako návrhové parametry dle TP 59/1993 (viz Tabulka 10).

Tabulka 10 - Návrhové parametry svodidla [9]

Funkční třída svodidla	Hodnota kinet. Energie E_k [kNm]	Max. příčná deformace w_{max} [m] (odborně odhadnuto)	Hodnota w_{max} [m] pro návrh svodidla
A1	30	0,80 - 1,00	1,00
A2	75	1,20 - 1,40	1,50
B1	195	2,00 - 2,50 *	2,50 *

V současné době jsou lanová svodidla používána pro dva stupně zadržení, je to stupeň H1 – vyšší a stupeň N2. Oba tyto stupně jsou vhodné k instalaci svodidel jak do asfaltu, betonu, tak i do rostlého terénu. Návrhové parametry svodidel dle ČSN EN 1317-2 a dle revize TP 59/1999 (viz Tabulka 11).

Tabulka 11 - Návrhové parametry II. [9]

Úroveň zadržení	Předepsaný test	Hodnota kinet. energie E_k [kJ]	Hodnota W_{max} [m] pro návrh svodidla	Poznámka týkající W_{max}
normální N1	TB 31	43,3	1,20	zkoušeno TB 11
normální N2	TB 32 - TB 11	81,9	1,50	zkoušeno
vyšší H1	TB 42 - TB 11	126,6	2,00 *	odborně odhadnuto

- * Hodnoty pro funkční třídy H1 a B1 jsou stanoveny na základě vyhodnocení záznamů nehod těžkých vozidel.

Hodnota w_{max} je dána pro osovou vzdálenost sloupků 2,4 m. Do této vzdálenosti není možné umisťovat překážky, před kterými je podle příslušných norem třeba umístit svodidlo.

Z tabulek je vidět, že lanové svodidlo se může instalovat i tam, kde je jako minimální funkční třída určena třída H1, případně B1 (např. ve středním dělicím pásu). [9]

4.3 Použití lanových svodidel

Nejpoužívanějším druhem svodidel ve střední Evropě jsou stále ocelová svodidla. Jejich dominantní zastoupení na středoevropských pozemních komunikacích je dáno, mimo jiné, historicky. Lanová svodidla vznikla později a největšími průkopníky v jejich používání byly státy západní a severní Evropy.

Především v České republice jsou lanová svodidla navrhována jen výjimečně, na rozdíl od ostatních států. V dnešní době státní správa nutí investory, kteří financují rekonstrukce nebo stavby nových komunikací, aby používali taková svodidla, která jsou pro daný úsek nejvíce bezpečná. Zejména ze zahraničních zkušeností mnoha zemí lze usoudit, že lanová svodidla jsou velmi vhodná pro osazení ve středních dělicích pásích na rychlostních komunikacích a dálnicích.

4.3.1 Lanová svodidla v ČR

V České republice jsou lanová svodidla instalována především společností PROZNAK Praha, s.r.o. Společnost se zaměřuje především na tři a čtyřlanová svodidla o stupni zádržnosti N2 a H1.

Jedna z nejnovějších instalací lanových svodidel se nachází na dálnici D8, kde byla v roce 2006 osazována čtyřlanová svodidla ve středním dělicím pásu. Svodidla zde slouží pro účel služebního přejezdu a sloupky svodidla jsou osazeny do asfaltového povrchu (viz Obrázek 13 vpravo).



Obrázek 13 - Lanové svodidlo na dálnici D8 a komunikaci R63 [18]

Čtyřlanová svodidla jsou instalována také na rychlostní komunikace R63 (viz Obrázek 13 vlevo). Opět jsou umístěna ve středním dělicím pásu, tentokrát jsou instalována do rostlého terénu.

Třílanové středové svodidlo se nachází v Praze na ulici 5. května. Sloupky jsou zde do mostovky přivrtány do asfaltového povrchu a osazeny do ocelových kapes. Toto svodidlo dokáže pohltnout náraz stupně N2. Na ulici Strakonická v Praze jsou opět použita třílanová svodidla ve středním dělicím pásu komunikace. Zde jsou sloupky instalovány přímo do rostlého terénu. Další instalace lanových svodidel jsou například v Praze na ulici Evropská, úsek Nový Jičín – Příbor, na dálnici D8 úsek Nová Ves – Doksany a Doksany – Lovosice. [18]

4.3.2 Lanová svodidla v zahraničí

V zahraničí je záchytný systém v podobě lanových svodidel využíván více než v ČR. Například ve Skandinávii, která je známa pro svou vysokou bezpečnost na pozemních komunikacích. Lanová svodidla, doplněna betonovými, jsou v posledních letech osazována do středních dělících pásů.

Například Švédsko se může pyšnit tím, že pomocí lanových svodidel dokáže zkapacitnit stávající komunikace. Výrobou a instalací se zde zabývá společnost Ata Byggoch, která vyrábí dvou, tří a čtyřlanová svodidla. Společnost Ata Byggoch se zabývá i doplňky na tato svodidla, například reflexními odrazkami, které se umísťují přímo na sloupky (viz Obrázek 14). [20]



Obrázek 14 - Sloupek s odrazkou [21]

Velká Británie uvažuje o instalaci těchto svodidel do středu vozovky na extravilánových komunikacích, díky čemuž by došlo ke snížení čelních srážek. Samozřejmě to lze v případě, že šířka vozovky je dostačující a střední dělící pás se přizpůsobí pracovní šířce lanových svodidel.

V Austrálii je tento typ záchytného systému instalován především na mosty, propustky, a to jak ve venkovském, tak i v městském prostředí.

Další státy, kde se můžeme setkat s lanovými svodidly, jsou Norsko, Nový Zéland, Spojené státy americké, ale třeba také Spojené arabské emiráty a Indie. Lanová svodidla se v dnešní době instalují ve více než 30 zemích celého světa.

Ve světě je tento produkt znám pod názvem Brifen VRS. Vznikl ve Velké Británii ve společnosti Hill & Smith Ltd, kde byl testován ve dvou hlavních standardech

a byl schválen EN1317 a NCHRP 350 a získal ocenění CE. Rychlost instalace a nízké náklady vyzvedly tento produkt na vrchol.

Ve světě se používají převážně dva typy lanových zádržných systémů. Nejvíce se využívá čtyřlanový systém, méně pak tři a jen v ojedinělých situacích se používají svodidla dvoulanová. [18, 22, 23, 24]

4.3.3 Výhody lanových svodidel

Jak již bylo několikrát zmíněno, lanová svodidla mají mnoho výhod oproti klasickým záchytným systémům. Nejvíce důležité z bezpečnostního hlediska jsou následující:

- nízká hodnota ASI a s tím spojená velká ohleduplnost k posádce vozidla a vrácení vozidla zpět do jízdního prostoru, způsobeno plynulým pohlcením kinetické energie;
- svodidlo koná svou funkci i při těžším nárazu, než na jaký bylo zkoušeno;
- jednoduchá údržba (kontrolují se pouze napínací spojky lan a stav kotevních bloků);
- díky své konstrukci jsou lanová svodidla plně funkční i bezprostředně po nehodě;
- levné a jednoduché opravy (lana zůstávají, pouze se dopínají a vyměňují poškozené sloupky);
- svodidlo nebrání proudění vzduchu, netvoří se u něj závěje, a tedy údržba v jeho okolí je jednodušší;
- svodidlo je vhodné pro dodatečné osazení i do míst s nedostatečně širokou krajnicí;
- esteticky neruší okolí, je tedy vhodné ho instalovat v místech s krásným výhledem, jako je u památek. [9, 18]

4.3.4 Nevýhody lanových svodidel

Jako jiné typy silničních svodidel, tak i lanová svodidla mají své nevýhody. Jde především o omezení, kam se tato svodidla nesmějí instalovat:

- nelze je použít v úseku, kde by jejich délka plné výšky byla menší než 24 m;
- nelze je umístit do směrových oblouků o poloměru menším než 200 m;
- ve výškových polnicových obloucích o poloměru menším než 3000 m;
- lanová svodidla nesmějí být použita ve středních dělicích pásech, kde je šířka menší než 3,00 m (při zachování osově vzdálenosti sloupků 2,40 m);

- v kombinaci s obrubníkem výšky větší než 110 mm (vzdálenost hrany obruby od líce svodidla menší než 1,5 m, při vzdálenosti 1,5 m a větší může být výška obrubníku větší než 110 mm);
- svodidlo nesmí být připojeno k žádnému jinému svodidlu, ani k zábradelnímu;
- psychické aspekty;
- střet svodidel s motorkáři. [9, 25]

4.4 Lanová svodidla v praxi

Ze světa

White Rock je kanadská společnost, která se zabývá instalací lanových svodidel. Společnost byla požádána, aby vyřešila neobvyklý problém s dětským hřištěm, které se nacházelo pod úrovní vozovky a hrozilo nebezpečí střetu dětí s vozidlem, které by opustilo vozovku (viz Obrázek 15). Z bezpečnostních důvodů se do těchto míst nesmělo umístit betonové svodidlo, neboť by příliš zatěžovalo svah. Společnost tento problém vyřešila pomocí čtyřlanového svodidla typu TL-4. Řešení se osvědčilo natolik, že během následujících let poptávka po těchto svodidlech výrazně vzrostla. [26]



Obrázek 15 - Lanová svodidla v Abbotsfordu [26]

Česká republika

Na dálnici D5 zabránila lanová svodidla přejetí nákladního vozidla do protisměru. Dle policejní dokumentace jelo nákladní vozidlo přes 90 km/h a bylo plně naloženo, i přes tyto okolnosti lanová svodidla obstála (viz Obrázek 16). Tato vlastnost je výrobcem lanových svodidel důkladně sledována a doposud nebylo zaznamenáno, že by tato svodidla byla překonána jakýmkoliv typem vozidla. [18]



Obrázek 16 - Nehoda kamionu na D8 [18]

Úsek Nový Jičín – Příbor

V letech 2002 – 2003 byla na rychlostní komunikaci R48 instalována lanová svodidla. Přesněji se jedná o úsek Nový Jičín – Příbor, aby se zde zvýšila bezpečnost provozu. Pro analýzu dopravních nehod byl úsek rozdělen do několika mezikřižovatkových úseků a ty se jednotlivě porovnávaly. Analýza prokázala, že po instalaci lanových svodidel došlo ke snížení počtu dopravních nehod s usmrcením a zraněním na tomto úseku. Na jednom mezikřižovatkovém úseku je dokonce po instalaci tohoto záchytného systému počet nehod s usmrcením nulový. Analýzy prokázaly, že v úseku Nový Jičín – Příbor došlo ke zvýšení bezpečnosti na komunikaci a lanová svodidla tak splnila svůj účel. [14]

5 Numerická studie a použité softwary

Bezpečnost silniční dopravy stále roste. Je to způsobeno tím, že během vývoje a testování jak osobních automobilů, tak ostatních bezpečnostních prvků na komunikaci, se začíná masivně využívat numerická simulace pomocí metody konečných prvků. Tyto simulace výrazně napomáhají při určování deformačních zón automobilu a jeho bezpečnostních prvků, vedoucí ke snížení následků dopravní nehody. Metoda konečných prvků slouží k řešení velkého množství typů inženýrských problémů, nejen z dopravní oblasti. Pomocí této metody se dají řešit úlohy z oblasti dynamiky, proudění kapaliny a plynů, vedení tepla, záření atd.

Princip metody konečných prvků spočívá v rozdělení spojitého modelu na jednotlivé elementy a uzly. Právě v uzlech se hledají neznámé parametry řešení. Řešení spočívá v tom, že se zkoumají jednotlivá posunutí uzlů při daném zatížení. Čím větší počet elementů, tím je výsledek přesnější. [27]

Postup metody konečných prvků lze zapsat v následujících bodech [28]:

- diskretizace kontinua;
- volba básových funkcí posunutí;
- odvození matice tuhosti jednotlivého elementu pomocí variačního principu;
- globalizace, sestavení celkové matice tuhosti pro celé kontinuum, sestavení globálního vektoru zatížení;
- výpočet neznámých posunutí, je nutné znát okrajové podmínky uložení;
- výpočet odvozených veličin, tedy např. deformací a napětí ze známých uzlových posunutí.

V této diplomové práci se pracuje s programy, které využívají metodu MKP. Jedná se o řešič LS-DYNA, který je součástí softwaru ANSYS. ANSYS je nástroj pro strukturální analýzu, včetně lineárních, nelineárních a dynamických studií. Dynamickou analýzu jsem vyhodnotila v aplikaci LS-PrePost. [29, 30]

5.1 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor je modelář od firmy Autodesk, který obsahuje mnoho funkcí jako je například tvorba 2D výkresové dokumentace, 3D parametrické a adaptivní navrhování, dále tento program zvládá fotorealistické vizualizace a animace. Jelikož má podobné prostředí jako Autodesk AutoCAD, je práce v něm poměrně intuitivní a vytváření složitých 3D návrhů je jednodušší než v LS-PrePostu nebo ANSYS Design Modeleru.

Základ tvorby v tomto programu tvoří 2D náčrty, které se následně převádí do 3D modelů. Modely a jejich součásti pak mohou být kombinovány a vázány různými typy vazeb do sestav. Pro tuto práci je důležité, že Inventor podporuje funkce pro modelování plechových součástí a ocelových konstrukcí, což byl hlavní důvod, proč jsem tento program zvolila pro vymodelování ocelových sloupků, které jsou součástí lanových svodidel. [31]

5.2 LS-PrePost

LS-PrePost je od společnosti Livermore Software Technology Corporation, stejně jako LS-DYNA. Na rozdíl od LS-DYNA je tento program volně šiřitelný a zdarma. Slouží k přípravě modelu právě pro řešič LS-DYNA. Jeho velkou výhodou je přehledné grafické uživatelské rozhraní, díky kterému lze vytvořit i složitý model. Na vytvořeném geometrickém modelu je možné v LS-PrePostu definovat síť konečných prvků, nastavit počáteční podmínky, kontakty, zatížení, symetrie a další podmínky pro úspěšný výpočet. Výstupním formátem je K-file, který se vypočte pomocí řešiče LS-DYNA. Je schopen zejména importu, editace a exportu souborů z řešiče LS-DYNA. Geometrický model lze importovat řadou různých formátů, jako je formát STEP, IGES nebo STL. Výsledky se dají zobrazit graficky, je možné si i vykreslit grafy požadovaných závislostí nebo exportovat číselná data. V rámci postprocessingu lze vytvořit videostopu ve formátu MPEG nebo AVI.

LS-PrePost podporuje nejnovější standardy rychlého vykreslování pro okrajové podmínky a vyobrazuje výsledky pomocí animace. Je stále vyvíjen a nové trendy se do tohoto programu velmi rychle začleňují. [30, 32]

5.3 LS-DYNA Solver

LS-DYNA je multifunkční explicitní řešič konečných prvků schopný simulovat složité problémy reálného světa, který v současné době vyvíjí společnost LSTC. Je používán v automobilovém, leteckém, vojenském průmyslu, také ve stavebnictví a v bioinženýrství. Aplikace řeší především analýzy silně nelineárních fyzikálních dějů spojených s velkými deformacemi, které probíhají v krátkém časovém období. Umí řešit nelineární analýzy, například kontakty mezi částicemi, nelineární materiály, které nevykazují v ideálním případě elastické chování. Nejznámější a typickou aplikací jsou crash simulace, analyticky ověřující podmínky bariérových zkoušek dopravní techniky, osobními automobily počínaje, přes nákladní a těžká vozidla, autobusy, lodě, až po letadla a kosmickou techniku. Jak je patrné, možnosti LS-DYNA jsou četné a jsou přizpůsobeny mnoha oblastem.

LS-DYNA neobsahuje klasické uživatelské rozhraní. Je to softwarový řešič, do kterého se vkládají takzvané K-files, které lze vytvořit v jiných programech, například v již zmíněném LS-PrePostu. Díky spolupráci firem LSTC a ANSYS Inc. je možné použít řešič integrovaný v ANSYS Mechanical APDL. [33, 34, 35]

6 Tvorba modelu

Následující část diplomové práce je již věnována samotnému vytváření geometrických modelů. Na dvou typech lanových svodidel jsem definovala náraz osobního automobilu. Nárazová zkouška odpovídá parametrům zkoušky TB 32. Vybrané vozidlo má hmotnost 1 800 kg. Jelikož je hmotnost vozidla o 300 kg větší, než je požadováno od testu TB 32, je vozidlu ponechána přednastavená rychlost 100 km/h. Ve skutečnosti by mělo mít vozidlo rychlost 110 km/h. Rychlost 100 km/h byla získána přepočtem kinetické energie. Tento přepočtení je uveden v následující podkapitole Model vozidla.

Důležité je zmínit, že závěrečné výpočty budou prezentovány na základních modelech sestav lanového svodidla. Vytvořeny však budou i rozšířené sestavy lanových svodidel, ve kterých bude zahrnuta i část modelu představující nesoudržnou zeminu. V práci bude tedy popsána tvorba tohoto rozšířeného modelu. Základní model sestavy lanového svodidla je téměř totožný s rozšířeným modelem, je zde pouze absence části představující zeminu. Nicméně, základní model je nastaven tak, že je adekvátní rozšířenému modelu. Je to z toho důvodu, že rozšířený model sestavy lanového svodidla je výpočetně velmi náročný a nad rámec schopností dostupné výpočetní techniky, navíc je výpočet limitován omezenou školní licencí řešiče LS-DYNA. Předpokládám, že výsledky základního a rozšířeného modelu budou totožné.

V obou případech dynamické simulace se jedná o čtyřlanová svodidla. Sloupky jsou tvaru S a vždy čtyřicet sloupků se čtyřmi lany tvoří výslednou sestavu. Rozdíl je pouze v rozměrech sloupků, jako je výška, šířka a tloušťka plechu. Dále se sestavy svodidel liší v různé variaci propletení lan a ve vzájemné vzdálenosti sloupků od sebe. U Sestavy 1 jsou sloupky od sebe umístěny ve vzdálenosti 2 400 mm. U Sestavy 2 jsou sloupky od sebe vzdáleny 3 200 mm.

Všechny modely jsem tvořila postupně. Nejprve jsem vytvořila geometrii jednotlivých dílů svodidel, jako jsou sloupky a úchyty lan. Následně jsem vytvořila zeminu a poté celou sestavu lanových svodidel. Během zpracování výsledného modelu se jednotlivé části průběžně testovaly, aby se včas podchytily a popřípadě vyřešily vzniklé problémy. Jelikož byl postup vytvoření obou typů svodidel totožný, bude popsán pro oba typy svodidel najednou. Totéž platí i pro veškeré nastavené parametry.

6.1 Systém jednotek

Veškeré definice výsledného modelu se nastavují v programu LS-PrePost. Tento program nepracuje se základními jednotkami SI, ale při prvním zadání hodnot je nutné si uvědomit, v jakých jednotkách se budou jednotlivé veličiny zadávat, a tento rozměr je nutné poté dodržovat během tvorby celého numerického modelu (viz Tabulka 12).

Tabulka 12 - Zvolené jednotky

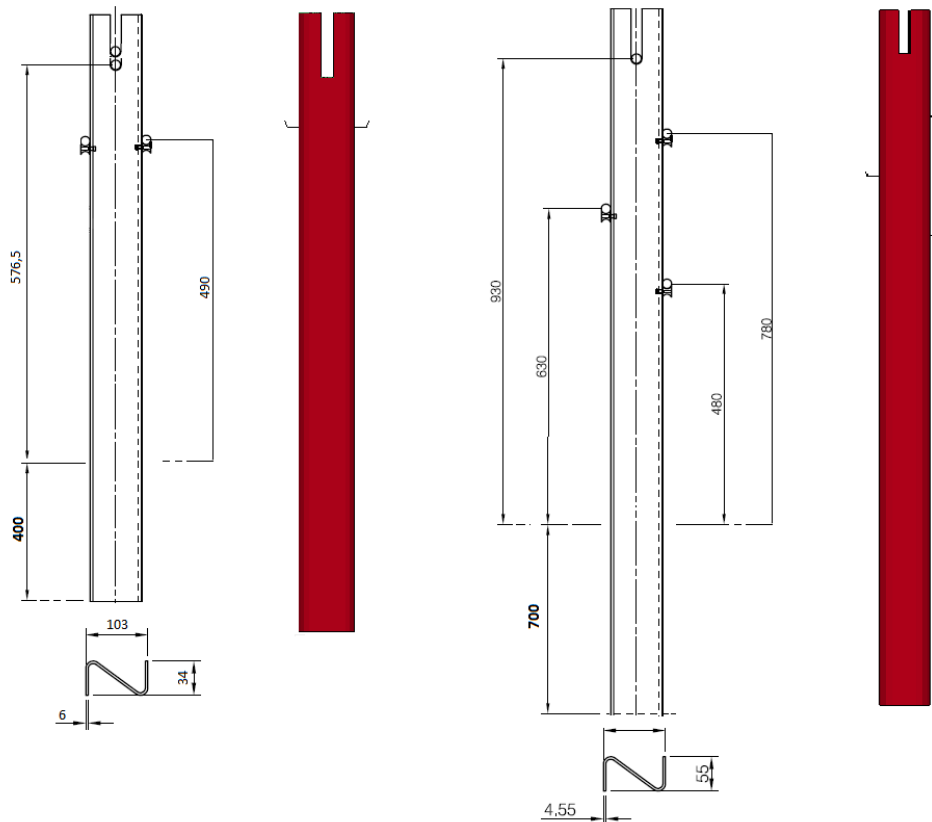
Hmotnost	Rozměry	Čas	Síla	Napětí	Energie	Hustota	Rychlost
tuna	milimetr	sekunda	Newton	Mega Pascal	Newton na milimetr	tuna na milimetr krychlový	milimetr za sekundu
t	mm	s	N	Mpa	N/mm	t/mm ³	mm/s

6.2 Geometrický model

Veškeré geometrické modely, tvořící výslednou sestavu, jsem tvořila v programu LS-PrePost. V programu byl také vytvořen model impaktoru, pomocí kterého jsem prováděla zatěžovací test sloupku v zemině.

6.2.1 Model sloupku

Geometrické modely obou typů sloupků, byly převzaty z mé bakalářské práce. 3D model sloupku byl vytvořen v programu Inventor a následně byl importován do programu LS-PrePost, kde byl vytvořen konečněprvkový model, včetně nastavení materiálů, kontaktů a okrajových podmínek. Model sloupku z mé předešlé práce, oproti modelu sloupku, který je použit v této práci, byl zjednodušen. Zjednodušení spočívalo v tom, že sloupek byl vetknut, z toho důvodu se uvažovalo pouze s jeho horní částí. V této práci se již uvažuje se sloupkem, který je do zeminy beraněn (nastřelen pod tlakem) a z toho důvodu musel být sloupek prodloužen na požadovanou délku (viz Obrázek 17).

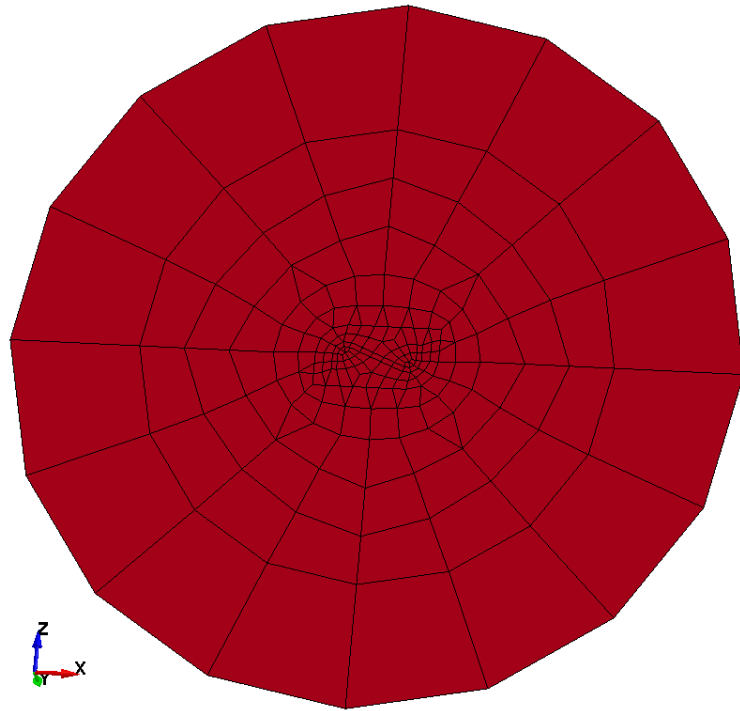


Obrázek 17 - Geometrie Sloupku 1 a Sloupku 2

Sloupek 1 byl prodloužen o 400 mm. Sloupek 2 byl prodloužen o 700 mm. Prodloužení sloupků bylo provedeno přímo v programu LS-PrePost, neboť tak došlo k zjednodušení a stačilo vytvořit pouze síť na prodloužené části sloupku a spojit ji s již stávající sítí modelu. Nová síť tak automaticky převzala již nastavený materiál. Jediné co se u geometrie sloupků liší, jsou jejich rozměry a způsob uchycení ocelových lan.

6.2.2 Model zeminy

Aby model zeminy byl co nejpřesnější, musela jsem vytvořit správnou 2D síť kruhového tvaru, kde byl uprostřed umístěn profil sloupku. Program LS-PrePost umožňuje vytvořit automaticky síť pomocí funkce NLineM, kam se zadají hrany a počet elementů, na kolik má být plocha rozdělena. V tomto případě se ale v oblasti sloupku tvaru S vytvořily elementy, které měly trojúhelníkový tvar a velmi ostré úhly. Tato síť byla pro výpočet velmi nevhodná. Tento problém se vyřešil tím, že se 2D síť vytvořila manuálně (viz Obrázek 18).

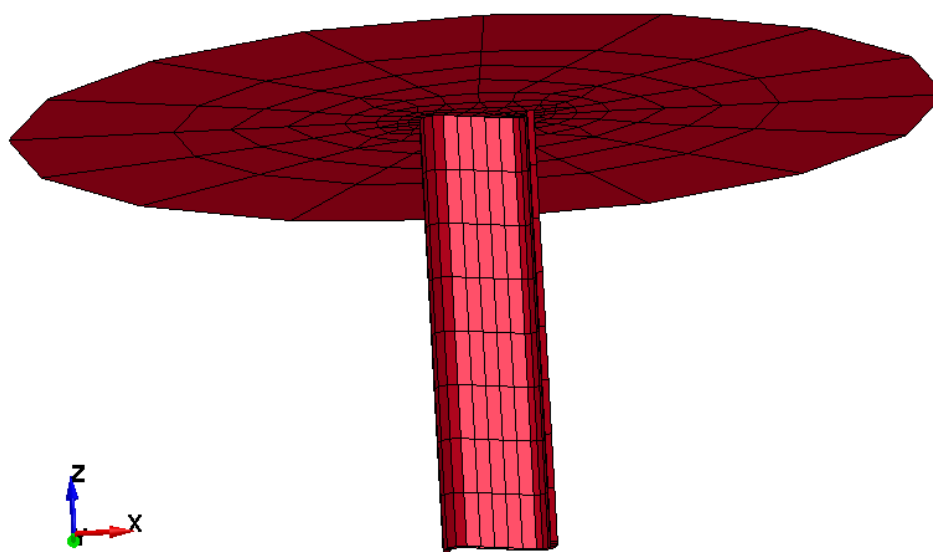


Obrázek 18 - 2D síť zeminy

Po vytvoření správné 2D sítě se pomocí funkce ShellSweep tato plocha protáhla a vytvořila se tak objemová síť, která představovala válec zeminy, v níž byl zasazen sloupek svodidla. Poloměr válce je 425 mm a jeho výška je 1100 mm. Velikost jednoho elementu sítě jsem zvolila na 50 mm, a to z toho důvodu, aby se mohly jednoduše odstranit elementy protínající sloupek.

Důležitou věcí, kterou bylo třeba vyřešit v tomto místě, byl kontakt mezi sloupkem a zeminou. Z toho důvodu jsem vytvořila pomocnou síť Null, který obepíná zeminu, včetně vytvořeného zářezu pro sloupek (viz Obrázek 19). Materiál této sítě má zanedbatelné hodnoty. Jelikož má tato síť společné uzly se zeminou, ve výpočtech se jeví jako jedna síť elementů. Samotný kontakt se tak nastavil mezi sloupkem a touto pomocnou sítí. Krajní elementy zeminy byly vetknuty (byl jim odepřen pohyb a rotace ve všech směrech), tím pádem vzniklo něco jako válec naplněný zeminou.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost



Obrázek 19 – Pomocná síť Null

6.2.3 Model lana

Pomocí funkce SeatBeltFit jsem vytvořila lana. Tato funkce umožňuje plynulé obepnutí lan s požadovaným odstupem od sloupků. Nejprve se vytvořily elementy, které posloužily jako orientační body pro umístění lan do požadované polohy. Tyto elementy představují začátek, respektive konec lana. Pomocí zmíněné funkce se lana propletla mezi sloupky. Vytvořené elementy lan nejsou však požadované Beam elementy, ale SeatBelt elementy. Aby se tyto elementy změnilly na požadované Beam elementy, musela jsem upravit zdrojový kód modelu.

Po upravení zdrojového kódu však nastal problém. Beam elementy nebyly tvořeny třemi body, ale pouze dvěma. Tyto body jsou důležité pro určení orientace průřezové plochy ve směru osy x. Po vyřešení tohoto problému byly Beam elementy již správné a s modelem lana jsem mohla dále pracovat. Elementům byl přiřazen materiál, průměr a veškeré možné kontakty se sloupkem a vozidlem.

Pomocí numerické analýzy lze vytvořit také geometrii ocelového lana dle reálu (viz Obrázek 20). Lano je tvořeno třemi svazky po 7 drátech. Celkový průměr lana je 19 mm. Ocelové lano je schopné přenést napětí až 210 kN (viz Obrázek 21).



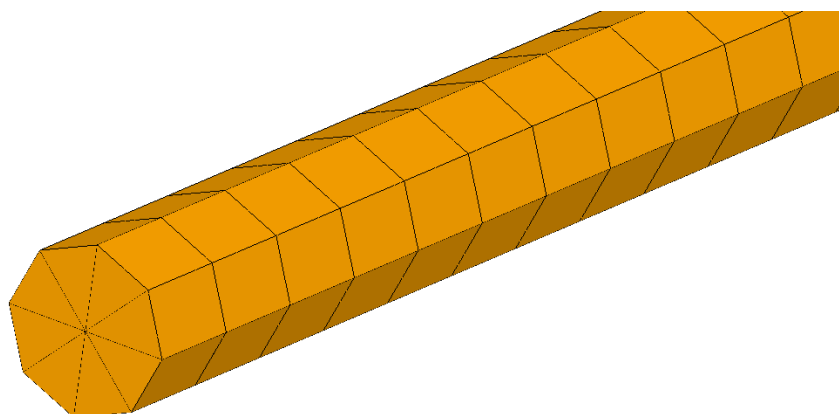
Obrázek 20 - Geometrie reálného lana [36]



Obrázek 21 - Reálné ocelové lana [37]

Geometrii lana, kterou použiji ve své výsledné sestavě, sice průřezem neodpovídá reálnému ocelovému lanu, ale vykazuje stejné mechanické vlastnosti (viz Obrázek 22). Model ocelového lana je schopen přenést stejné napětí jako reálné. Dále je toto lana modelováno, jako předepnuté na požadovaných 25 kN.

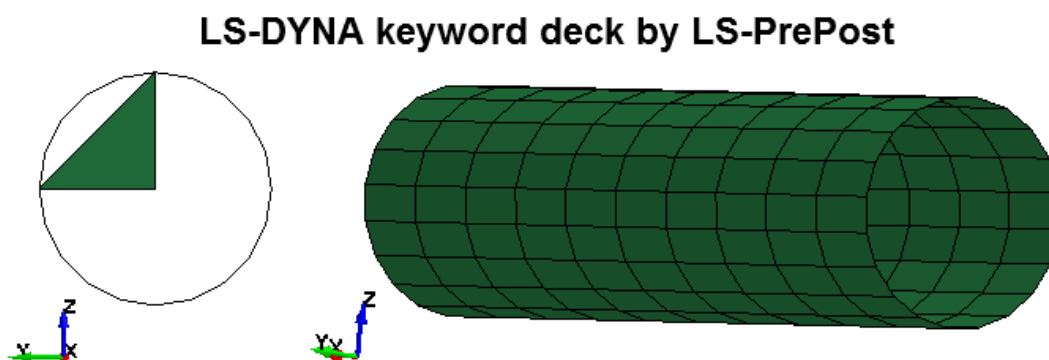
Na tuto sílu se lana předepíná při teplotě 10 °C. Toto předepnutí je jedna z nejdůležitějších parametrů pro lanová svodidla. Předepnutím se určí tuhost lana, od toho se odvíjí, jak se lana bude chovat při nárazu.



Obrázek 22 - Model ocelového lana

6.2.4 Model impaktoru

Další model, který bylo třeba vytvořit, byl impaktor. Tento model posloužil jako testovací nářadí do sloupku umístěného v zemině a také při testu sloupku umístěného v zemině a zároveň propleteného ocelovými lany. Impaktor představoval dutý válec vytvořený z rigidního materiálu, kterému byla přiřazena rostoucí síla (viz Obrázek 23). Touto rostoucí silou impaktor působil na sloupek.



Obrázek 23 - Model impaktoru

6.2.5 Model vozidla

Pro náraz do modelu lanového svodidla jsem vybrala model osobního vozidla americké značky Chevrolet. Typ vozidla je C2500 HD Pickup (viz Obrázek 24). Tento typ vozidla nemá samonosnou karosérii a tento jev může mít vliv na výsledný průběh nárazové zkoušky, především z hlediska deformací karosérie.



Obrázek 24 - Vozidlo Chevrolet C2500 [38]

Model tohoto vozidla jsem stáhla z oficiálních stránek společnosti National Crash Analysis Center (<http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>). Z mnoha modelů vozidel jsem vybrala tento model, neboť měl nejmenší počet elementů (viz Obrázek 25). Model osobního automobilu se skládá z celkem 10 563 elementů, tudíž nebude výpočetně příliš náročný.

Model vozidla měl přednastavenou hmotnost na 1 800 kg. Tato hmotnost, jak bylo zmíněno, neodpovídá parametrům zkoušky TB 32. Rychlost modelu byla přednastavena na 100 km/h. V jednotkách mnou zvolených byla rychlost přesně 27 980 mm/s. Pomocí přepočtu kinetické energie, jsem ověřila, zda přednastavená rychlost vozidla odpovídá zkoušce TB 32 v závislosti na vyšší hmotnosti vozidla.

Kinetická energie se spočte jako:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [J] \quad (7)$$

kde m je hmotnost vozidla a v je rychlost vozidla. Po úpravě vzorečku do tohoto tvaru:

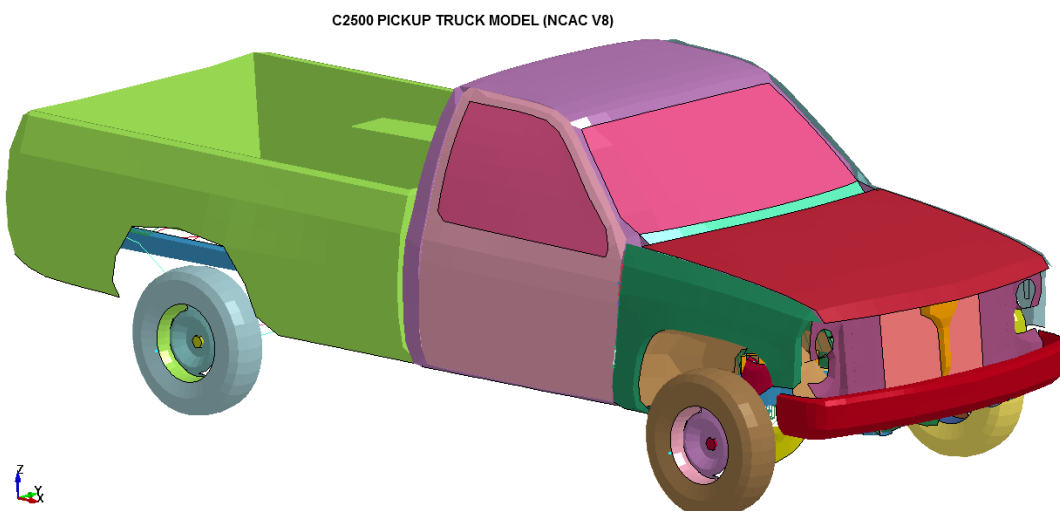
$$v = \sqrt{\frac{E_k \cdot 2}{m}} \quad [m/s] \quad (8)$$

jsem ověřila, že simulovaný náraz odpovídá zkoušce TB 32. Veškeré parametry, ověřující tento vztah, jsou pro přehlednost vypsány v tabulce (viz Tabulka 13).

Tabulka 13 - Parametry vozidla

Přepočet kinetické energie				
		Rychlost [m/s]	Hmotnost [kg]	Kinetická energie [J]
1	Parametry zkoušky TB 32	30,556	1 500	700 251,852
2	Přednastavené parametry	27,980	1 800	704 592,360
3	Vypočtené parametry	27,894	1 800	700 251,852
Odchylka mezi 2 a 3		0,086		

Při výpočtu byla zjištěna mála odchylka mezi přednastavenou a vypočtenou rychlostí. Tato odchylka mohla být způsobena při přepočtu jednotek z angloamerické měrné soustavy na jednotky soustavy SI, již při nastavování parametrů vozidla.



Obrázek 25 - Model vozidla Chevrolet C2500

7 Numerický model

Po vytvoření geometrie všech jednotlivých dílů lanového svodidla jsem mohla vytvořit již celou výslednou sestavu. Vytvoření výsledného modelu bylo provedeno v programu LS-PrePost. Pomocí souboru K-file se do jednoho souboru importovalo 40 sloupků i se zeminou. U Sestavy 1 se sloupky od sebe importovaly ve vzdálenosti 2 400 mm, u Sestavy 2 byla tato vzdálenost větší, a to 3 200 mm. Po importaci jsem sjednotila jednotlivé části modelu a provedla vyčištění modelu.

Dále jsem propletla ocelová lana pomocí funkce SeatBeltFit, jak bylo zmíněno v předešlé kapitole. Provedla jsem veškerá nastavení modelu. Jednotlivým dílům jsem nadefinovala materiál. Nadefinovala jsem veškeré kontakty mezi jednotlivými díly a na závěr jsem celé sestavě určila souřadný systém. Díky tomuto souřadnému systému se mohla sestava libovolně transformovat a pootáčet do zvoleného úhlu. Použité materiály a kontakty jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.

7.1 Materiály

Ve výsledné sestavě lanového svodidla bylo použito několik druhů materiálů. Prvním materiálem byla bilineární ocel, z níž byly zhotoveny všechny sloupky včetně úchytů. Jiný materiál představoval zeminu. V práci byl dále použit materiál představující ocelové lano a v neposlední řadě je třeba zmínit materiál Null, který byl velmi důležitý, především u definování kontaktů, i když ve skutečnosti měl zanedbatelné hodnoty. Program LS-PrePost nemá dopředu defaultně nastavené materiály, z toho důvodu je nutné všechny materiály uživatelsky nadefinovat.

7.1.1 Modified piecewise linear plasticity (Bilineární ocel)

Bilineární ocel patří mezi materiály s dvěma stupni linearity. Řadí se mezi materiály s pružně – plastickou deformací.

Z bilineární oceli jsou v modelu zhotoveny sloupky a úchyty lan. Elementy sloupků jsou definovány jako Shell. Tloušťka elementů je u sloupku 1 stanovena na 6 mm, u sloupku 2 je tloušťka 4,55 mm a úchyty mají tloušťku 2 mm. Nastavení materiálů je uvedeno v tabulce (viz Tabulka 14).

Tabulka 14 - Nastavení bilineární oceli

Bilineární ocel		
Hustota materiálu	$7,85 \cdot 10^{-9}$	$t \cdot mm^{-3}$
Youngův modul	$2,00 \cdot 10^5$	MPa
Poissonovo číslo	0,3	[-]
Mez kluzu	250	MPa
Tečný modul	1450	MPa
Mez pevnosti	200	MPa

7.1.2 Soil and foam

Materiál, představující půdu a pěnu, jsem zvolila pro vymodelování zeminy. Vlastnosti tohoto materiálu jsou velmi různorodé. V případě, že je napětí na mezi kluzu příliš nízké, materiál se chová jako tekutina, v opačném případě se materiál chová jako pevná látka. Elastické vlastnosti tohoto materiálu vychází z křivky, která je definována pomocí volumetrických hodnot. V případě, že hydrostatické napětí překročí mezní hodnotu, je tlak nastaven na hodnotu Cut-off a deviatorský tenzor napětí je vynulován. Veškeré hodnoty, které definují zeminu, jsou vypsány v tabulce (viz Tabulka 15). [39]

Tabulka 15 - Nastavení materiálu Soil and foam

Soil and foam		
Hustota materiálu	$2,20 \cdot 10^{-9}$	$t \cdot mm^{-3}$
Tažný modul	2,748	MPa
Objemový modul	75,428	MPa
Povrchová napjatost	0,025	N/mm
Cut-off	- 0,309	MPa
Volumetrické hodnoty	$6,09 \cdot 10^{-4}$; 0,002; 0,044; 0,069	[-]

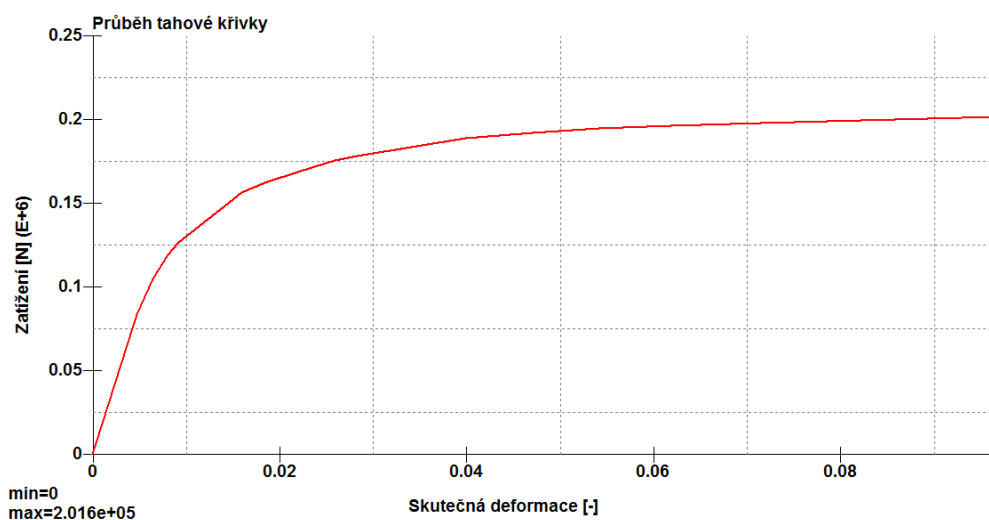
7.1.3 Curvature beam

Pro lana jsem zvolila nelineární materiál. Elementy lana jsou nadefinovány jako Beam o průměru 19 mm. Aby se materiál choval stejně jako ocelová lana, musely se správně nastavit vlastnosti tohoto materiálu. Modul pružnosti byl z toho důvodu zvolen větší, materiál se tedy jeví jako tužší. Díky tomu lano získalo vlastnosti, jako by bylo

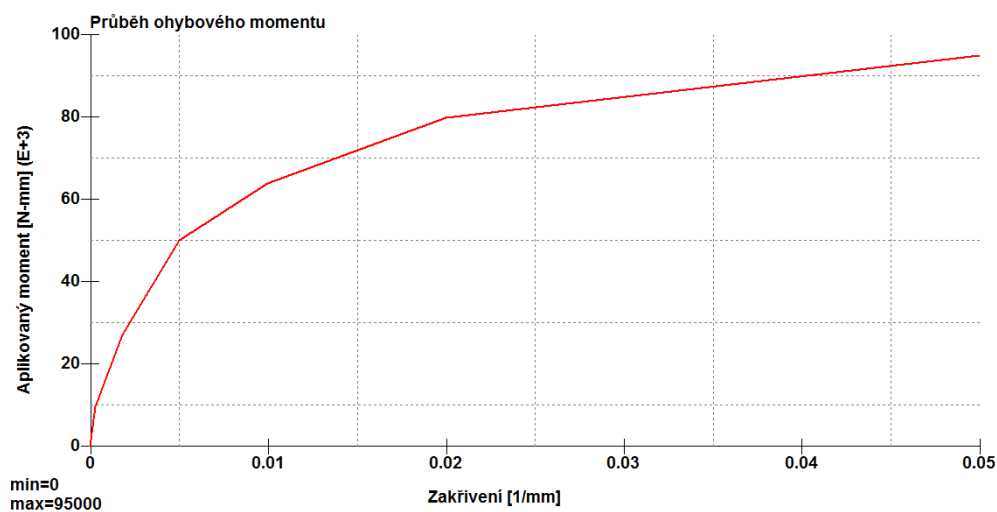
předepnuto silou 25 kN. Materiálu byly dále přiřazeny závislosti skutečné deformace na zatížení, na moment ohybu a torzního momentu. Křivky všech těchto veličin jsou znázorněny na grafech (viz Graf 1, Graf 2, Graf 3). V tabulce jsou uvedeny vlastnosti materiálu (viz Tabulka 16). [36]

Tabulka 16 - Nastavení materiálu Curvature beam

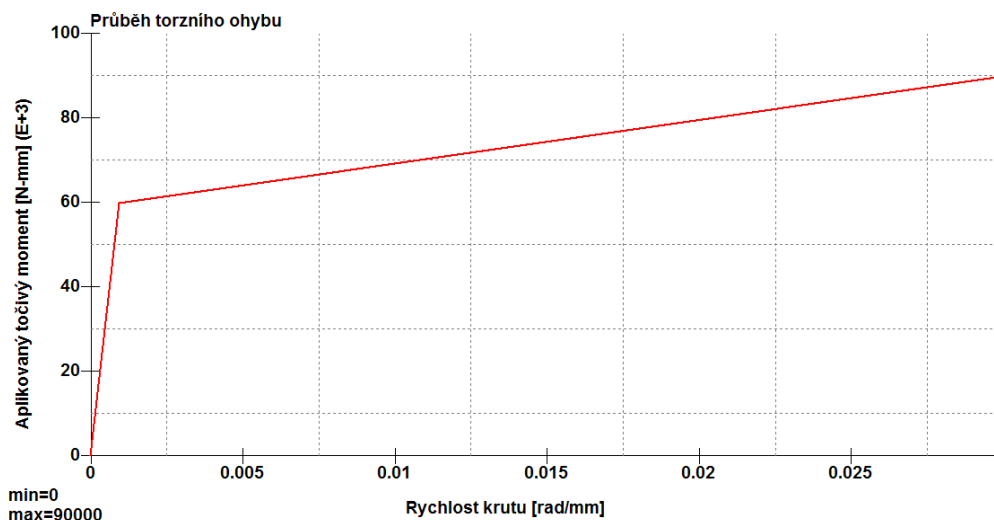
Curvature beam		
Hustota materiálu	$4,309 \cdot 10^{-9}$	$t \cdot mm^{-3}$
Modul pružnosti	$6,29 \cdot 10^4$	N/mm^2
Efektivní plastická deformace	0,0185	[–]



Graf 1 - Křivka napětí [36]



Graf 2 - Křivka ohybového momentu [36]



Graf 3 - Křivka torzního ohybu [36]

7.1.4 Materiál Null

Tento materiál slouží především k vyřešení problému s kontakty mezi jednotlivými díly. Nejprve byl použit materiál Null kolem sloupku, aby nedocházelo k penetraci lan o hranu sloupku. Zde byly zvoleny elementy Beam. Dále byl tento materiál použit okolo zeminy v místech, kde se zemina přicházela do kontaktu sloupek. Zde byly elementy zvoleny jako Shell o tloušťce 1 mm. V obou případech má materiál Null zanedbatelnou hustotu materiálu, nebude tedy nijak ovlivňovat výpočty a výsledky, materiál je pouze pomocný (viz Tabulka 17).

Tabulka 17 - Nastavení materiálu Null

Materiál NULL		
Hrana sloupku		
Hustota materiálu	$1,000 \cdot 10^{-12}$	$t \cdot mm^{-3}$
Nulový materiál zeminy		
Hustota materiálu	$2,200 \cdot 10^{-12}$	$t \cdot mm^{-3}$

7.2 Kontakty

Během tvorby výsledného modelu bylo nutné správně nadefinovat kontakty mezi jednotlivými součástmi sestavy. Kontakty se mohou určit tak, že se určí celé části, které jsou spolu v kontaktu, nebo se určí pouze části ploch, které jsou spolu ve skutečnosti v kontaktu.

7.2.1 Kontakty v sestavě lanových svodidel

První nadefinovaný kontakt byl mezi sloupkem a úchytem lan. Tento kontakt jsem zvolila jako `AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE`, tzn. kontakt plocha na plochu. K vytvoření je nutné minimálně definovat Master Segment Set, Slave Segment Set a statický koeficient tření.

Další kontakt byl nadefinován mezi sloupkem a pomocnou sítí, která obepíná zeminu. Jak již bylo zmíněno, tato pomocná síť má totožné uzly se sítí zeminy a tudíž se jeví jako jeden celek. Zde jsem opět zvolila kontakt plocha na plochu.

Po vytvoření lan bylo třeba nadefinovat veškeré kontakty mezi plochami, se kterými by lana při nárazu mohla přijít do kontaktu. Nejprve se nadefinoval kontakt mezi lany a sloupkem. Tento kontakt byl zvolen jako `AUTOMATIC_BEAM_TO_SURFACE`, tzn. vlákno na hranu. Stejný kontakt byl použit i mezi lany a úchyty lan.

Kontakt `AUTOMATIC_GENERAL` jsem nastavila mezi lany a setem tvořícím hrany sloupeků. V tabulce jsou vypsány veškeré kontakty, které byly použity v sestavě svodidla (viz Tabulka 18).

Tabulka 18 - Kontakty v sestavě svodidla

CONTACT	SSID (Slave segment set ID)	MSID (Master segment set ID)	SSTYP (Slave segment set or node set type)	MSTYP (Master segment type)
(1) <code>AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE</code>	(3) Uchyceni	(2) Sloupek1/2	part	part
(2) <code>AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE</code>	(1) Zemina1/2_null	(1) Sloupek1/2_uchyceni	part	part set
(3) <code>AUTOMATIC_BEAMS_TO_SURFACE</code>	(4) Lana	(2) Set_Sloupy	part	part set
(4) <code>AUTOMATIC_BEAMS_TO_SURFACE</code>	(4) Lana	(3) Set_uchyceni	part	part set
(5) <code>AUTOMATIC_GENERAL</code>	(4) Set_lana_hrana	0	part set	segment set

7.2.2 Kontakty mezi lanovým svodidlem a vozidlem

Veškeré kontakty mezi jednotlivými částmi modelu vozidla byly nadefinovány jako AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE. Byl určen set částí, do kterého byly přidány jednotlivé části vozidla. Tento kontakt byl nastaven již v modelu. Kontakty, které bylo nutno uživatelsky nastavit, byly kontakty mezi modelem vozidla a modelem lanové sestavy.

V tabulce jsou vypsány kontakty, které byly použity mezi jednotlivými díly sestavy svodidel a mezi vozidlem (viz Tabulka 19).

Tabulka 19 - Kontakty mezi vozidlem a sestavou

CONTACT	SSID (Slave segment set ID)	MSID (Master segment set ID)	SSTYP (Slave segment set or node set type)	MSTYP (Master segment type)
(6) AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE	(5) Set_vozidlo	0	part set	segment set
(22) AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE	(5) Set_vozidlo	(2) Sloupek1/2	part set	part
(23) AUTOMATIC_BEAMS_TO_SURFACE	(5) Hrana_sloupku	(5) Set_vozidlo	part	part set
(24) AUTOMATIC_BEAMS_TO_SURFACE	(5) Set_vozidlo	(4) Lana	part set	part

7.3 Numerické analýzy

Během celé tvorby výsledného modelu jsem průběžně prováděla numerické analýzy jednotlivých částí svodidla. Tyto testy posloužily k tomu, aby se zjistilo, zda jsou části svodidla nadefinovány správně a zda se chovají reálně. Nejdůležitější bylo sledovat materiál a kontakty mezi jednotlivými díly.

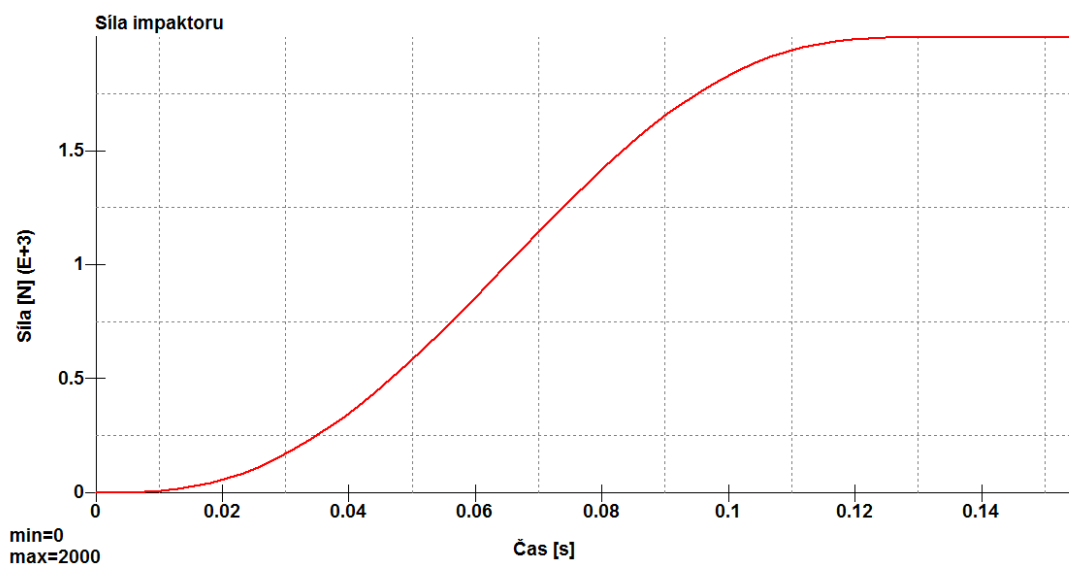
7.3.1 Zatěžování sloupku v zemině rostoucí silou

První test, který jsem provedla, byl test zatěžování sloupku rostoucí silou. Tato analýza představovala test, který se provádí při osazování sloupku na komunikacích (viz Obrázek 26).



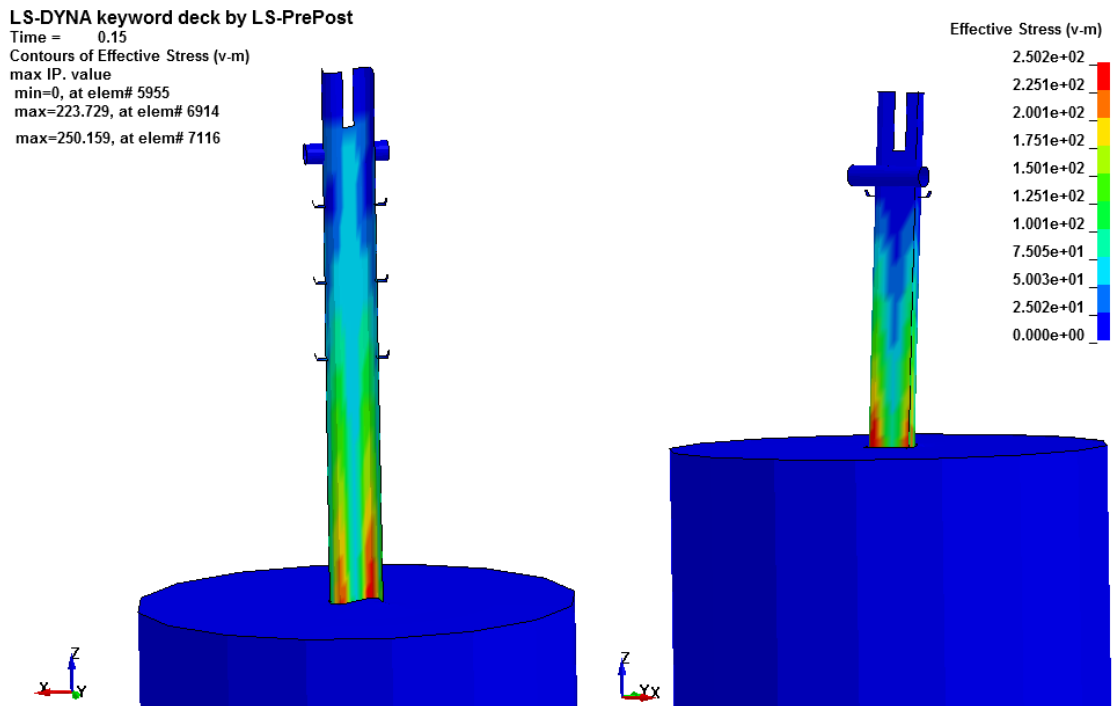
Obrázek 26 - Zatížení sloupku v zemině [40]

V ČR se tento test při osazování svodidel neprovádí, je tedy brán pouze orientačně. Pro tuto analýzu jsem vytvořila impaktor, který rostoucí silou zatěžoval sloupek. U sloupku 1 se impaktor umístil 135 mm od shora a u sloupku 2 byl impaktor umístěn 145 mm od shora sloupku. Zatěžování se provádělo po 45° z každé strany sloupku, aby se ověřilo, zda se sloupek v zemině jeví stabilně. Impektoru byla přiřazena rostoucí síla za čas (viz Graf 4).



Graf 4 - Rostoucí síla impaktoru

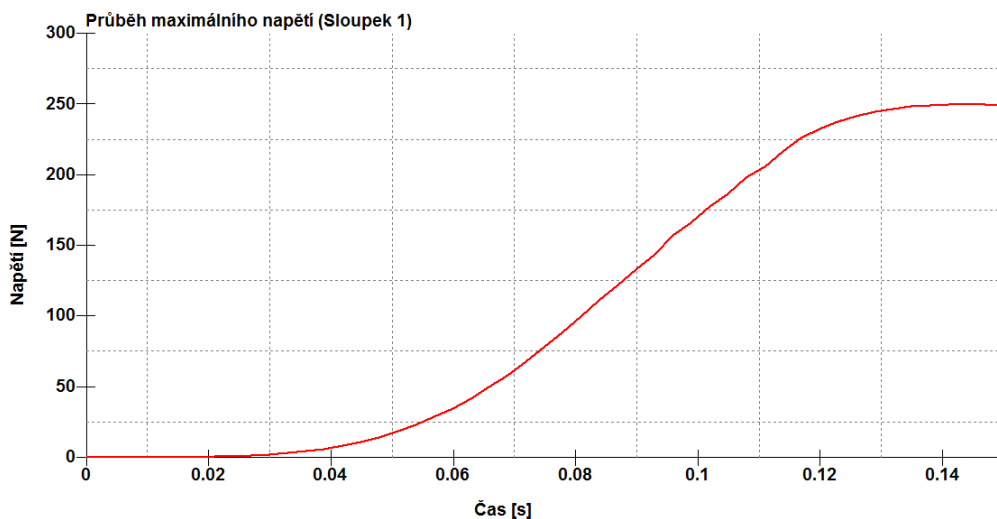
Zatěžování impaktorem probíhalo po dobu 0,15 sekund. Během simulace se sloupek jevil stabilně a maximální napětí se vyskytlo, jak bylo předpokládáno, ve spodní části sloupku, v místě, kde se sloupek střetává se zeminou. Maximální napětí u Sloupku 1 (viz Obrázek 27 vpravo) bylo více než 250 N.



Obrázek 27 - Maximální napětí (zatížení impaktorem)

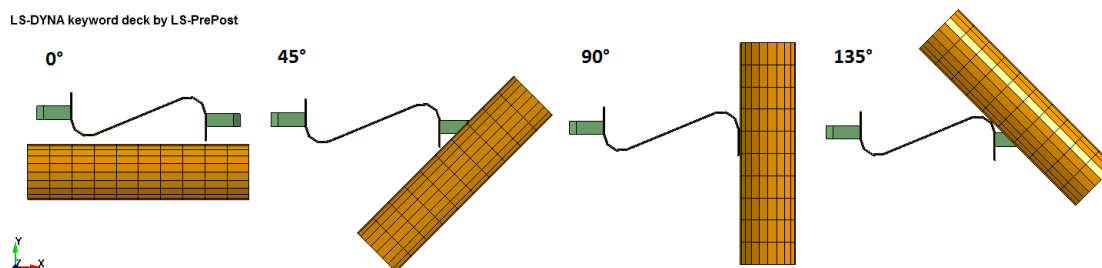
U Sloupku 2 (viz Obrázek 27 vlevo) byla hodnota maximálního napětí o něco menší. Hodnota maximálního napětí u Sloupku 2 byla necelých 224 N. Tento fakt byl způsoben tím, že Sloupek 2 je vyšší než Sloupek 1 a síla se tak více rozloží.

Impaktorem se pootáčelo kolem osy z, vždy po 45°. Celkem proběhlo osm zatížení, čtyři pro Sloupek 1 a čtyři pro Sloupek 2. Na grafu je vykreslen průběh maximálního napětí u Sloupku 1 s původní polohou impaktoru (viz Graf 5).



Graf 5 - Průběh maximálního napětí (Sloupek 1)

Během všech osmi analýz byl průběh maximálního napětí téměř totožný. Pro přehlednost jsou maximální napětí vypsána v tabulce (viz Tabulka 20). Hodnoty maximálního napětí se v některých případech liší. Je to způsobeno tím, že impaktor působí na užší hranu sloupku (viz Obrázek 28).

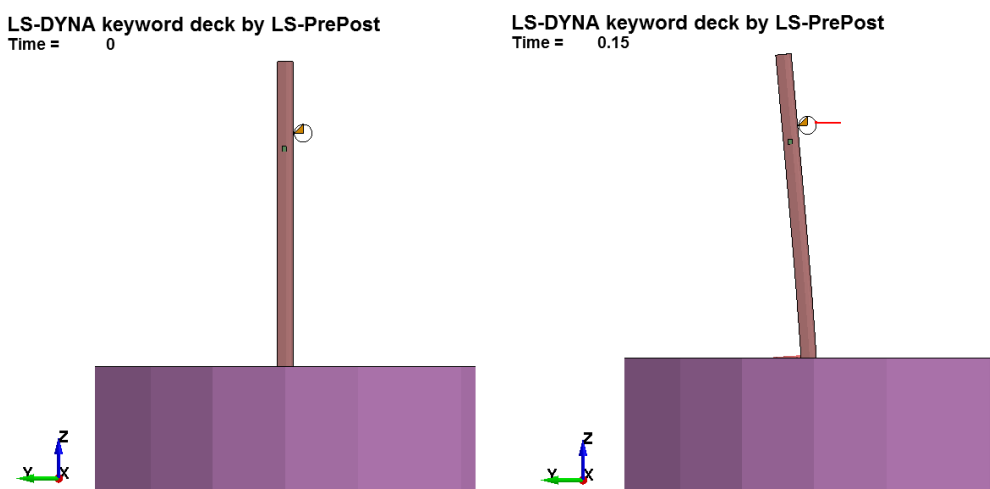


Obrázek 28 - Pootočení impaktoru

Tabulka 20 - Test zatěžování sloupku

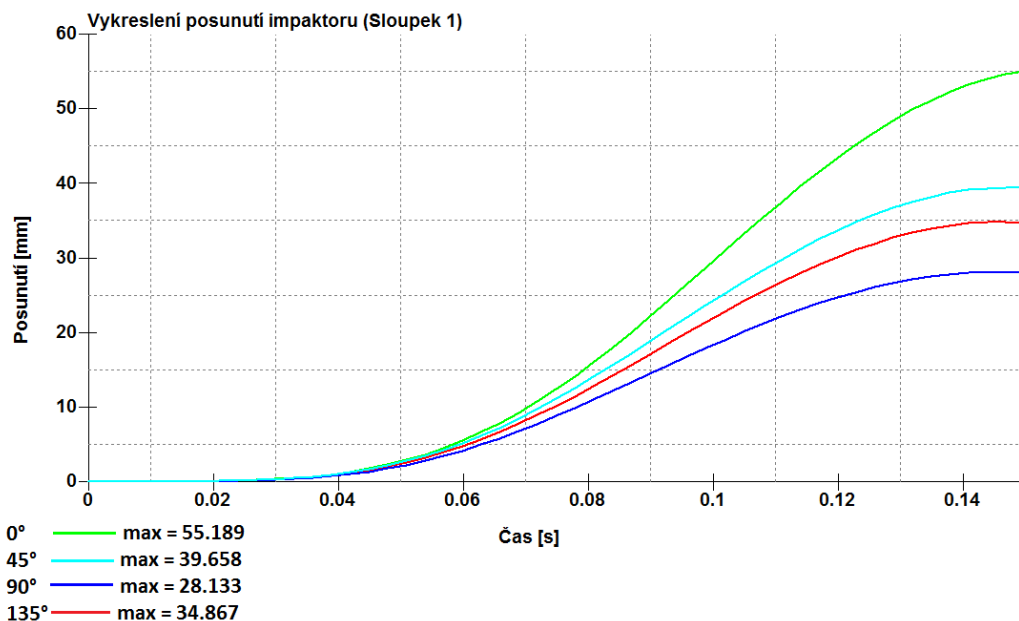
	Maximální napětí	
	Sloupek 1	Sloupek 2
	Max napětí [N]	Max napětí [N]
zatížení 0°	250,159	223,729
zatížení 45°	249,496	181,178
zatížení 90°	112,719	99,005
zatížení 135°	163,087	126,962

Dále co jsem během zatěžování sledovala, byl pohyb impaktoru, přesněji jaké je jeho výsledné posunutí. Níže je vidět poloha impaktoru v původní poloze (viz Obrázek 29). Na dalším obrázku je znatelná změna polohy impaktoru. Tato změna činí přesně 55,189 mm.

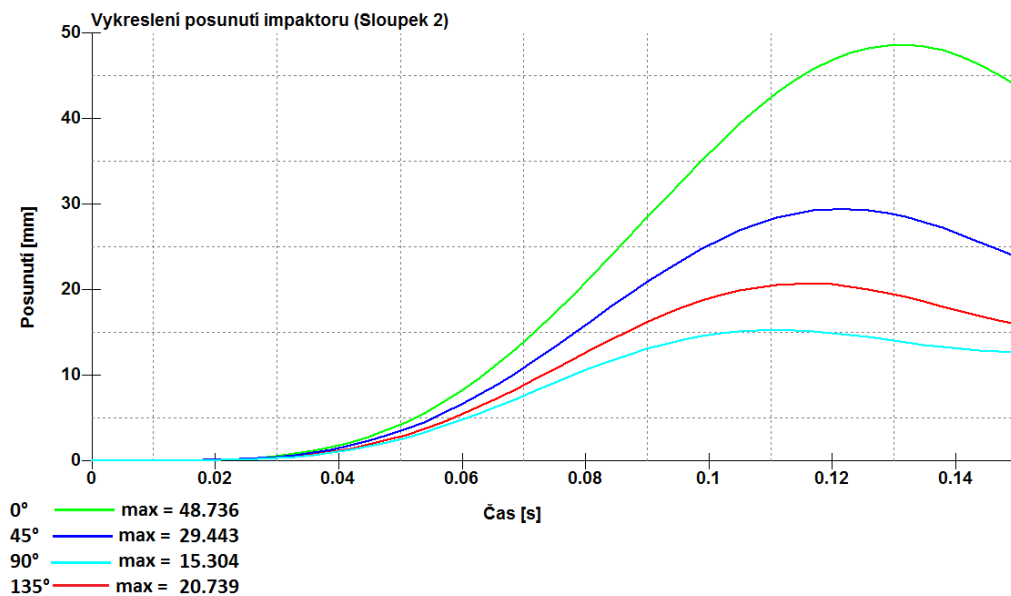


Obrázek 29 - Změna polohy impaktoru

Pro větší přehlednost jsou hodnoty posunu impaktoru, v závislosti na změně úhlu pro Sloupek 1, vyobrazeny v jednom grafu (viz Graf 6). Pro Sloupek 2 jsou posuny zakresleny opět v jednom grafu (viz Graf 7).



Graf 6 - Vykreslení posunutí impaktoru (Sloupek 1)

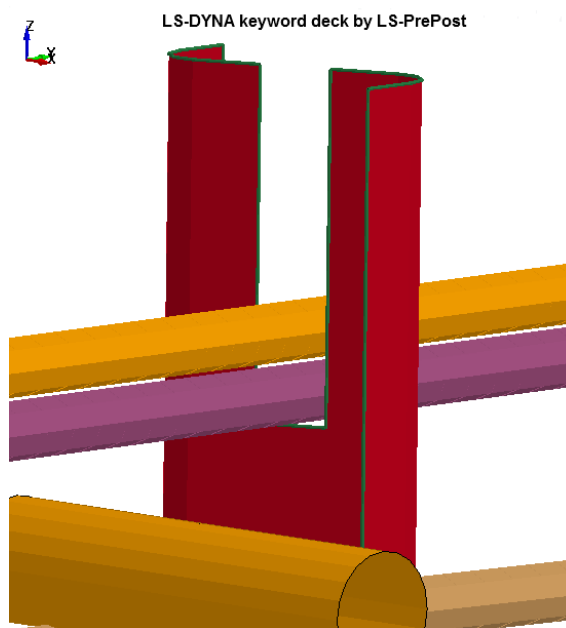


Graf 7 - Vykreslení posunutí impaktoru (Sloupek 2)

Během této numerické analýzy nedošlo k žádným problémům. Modely zeminy a sloupků zatížené silou se jeví jako stabilní. Modely byly považovány za správné a mohlo se s nimi dále pracovat.

7.3.2 Test lan

Další numerickou analýzou byl test, který měl za úkol zjistit, zda jsou správně nadefinované kontakty mezi sloupkem a ocelovými lany. Test měl stejný průběh jako předešlý, pouze byl rozšířen o čtyři ocelová lana. Opět se sloupek zatěžoval rostoucí silou, která byla přiřazena impaktoru. Test měl prokázat správnost nadefinovaných kontaktů a materiálů. Důležité bylo, aby nedocházelo k penetraci sloupku lany. To zajistil pomocný materiál Null, který představoval hranu sloupku. Test se jevil jako stabilní a bez nežádoucí penetrace (viz Obrázek 30).

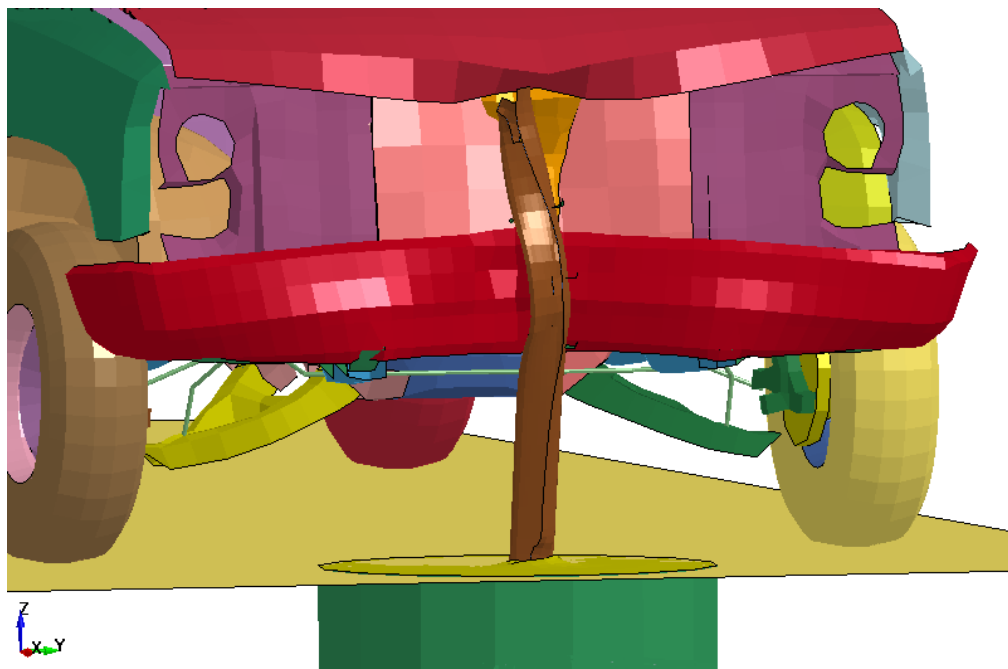


Obrázek 30 - Kontakt mezi lany a sloupkem

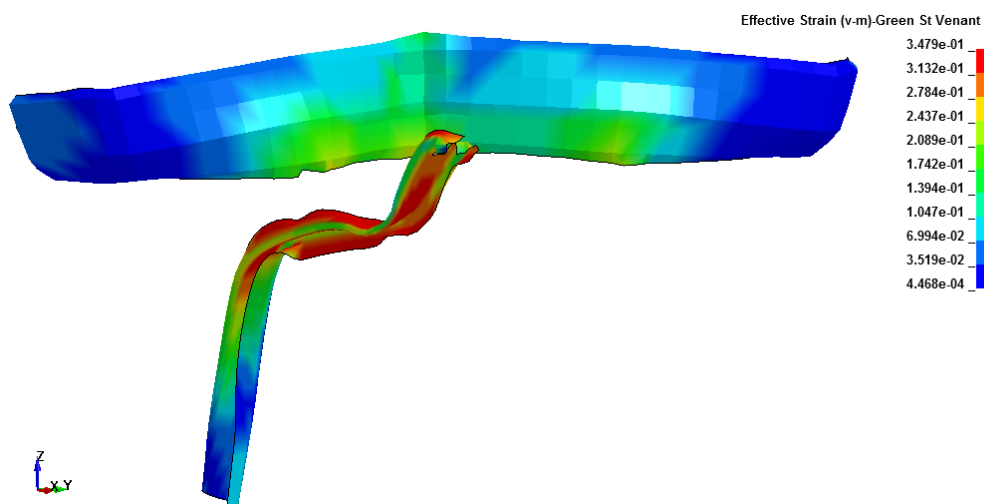
7.3.3 Náraz vozidla do sloupku

Po analýzách, které otestovaly správné nastavení jednotlivých částí tvořící sestavu lanového svodidla, bylo nutno otestovat správné nastavení mezi sestavou a modelem vozidla. Provedla jsem zjednodušený test, který byl definován nárazem vozidla do samostatného sloupku. Tento test měl především ověřit správné nastavení kontaktů mezi jednotlivými částmi. Během tohoto testu nastalo několik problémů, a to právě v nastavených kontaktech. Během dynamické simulace, kdy se vozidlo střetlo se sloupkem, se začala síť zeminy jakoby vytahovat a elementy se začaly natahovat do nekonečna. Tento problém jsem vyřešila změnou parametrů v kartě kontaktu mezi sloupkem a pomocnou nulovou sítí zeminy.

Další problém nastal, když se sloupek zařízl do nárazníku vozidla a deformace se jevila nereálně. Tento problém jsem vyřešila, že jsem nastavila zvlášť kontakt mezi sloupkem a vozidlem a zvlášť mezi hranou sloupku a vozidlem (viz Obrázek 31). Poté se test nárazu jevil jako stabilní a opravené kontakty byly vhodně zvoleny (viz Obrázek 32).



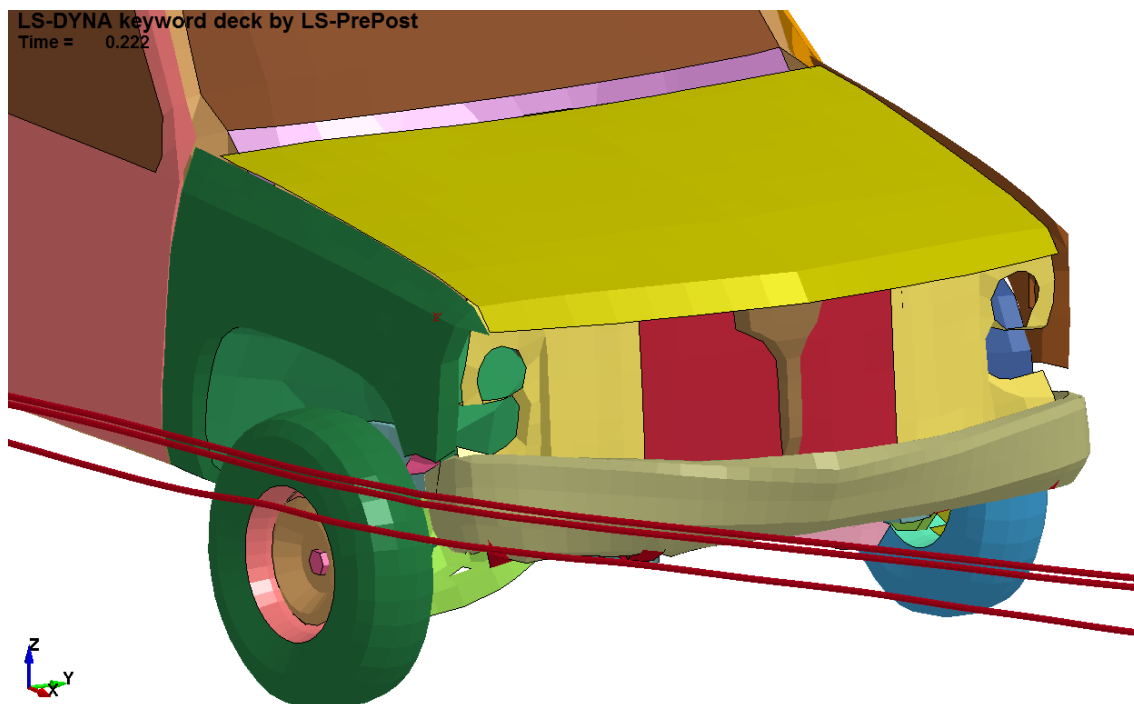
Obrázek 31 - Test vozidlo vs. Sloupek 2



Obrázek 32 - Deformace nárazníku a Sloupku 2

7.3.4 Náraz vozidla do lan

Poslední analýza, kterou jsem musela provést, byla numerická analýza nárazu vozidla do ocelových lan. Vytvořila jsem zjednodušený model lanového svodidla. Tři ocelová lana byla podepřena pouze body, které představovaly sloupky. Délka lan byla 96 metrů. Vozidlu byla přiřazena rychlost 100 km/h a pod úhlem 20° narazilo do lan. Analýza měla opět prokázat, zda jsou kontakty správně nadefinovány (viz Obrázek 33).



Obrázek 33 - Náraz vozidla do lan

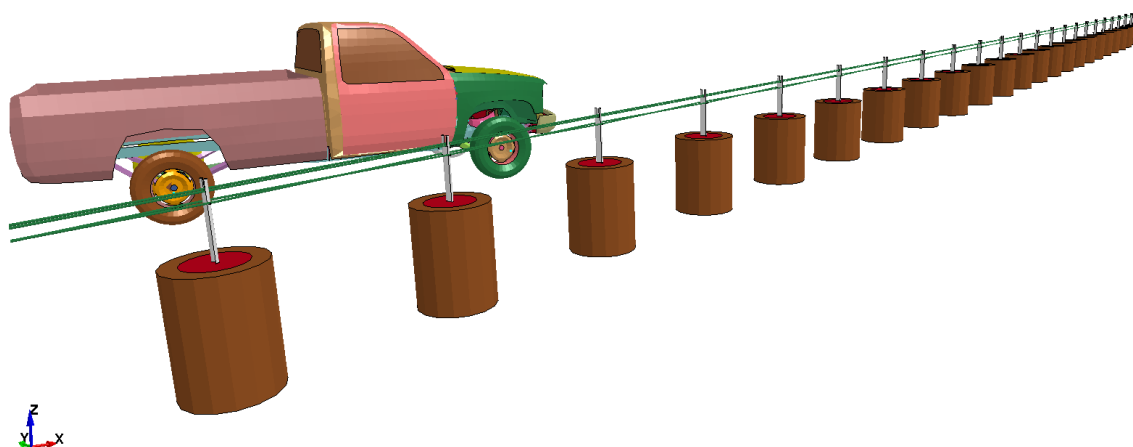
Během simulace došlo k nepatrné deformaci předního nárazníku vozidla a bočních plechů. Test byl velmi zjednodušený, neboť zde byla absence sloupků, což mělo značný vliv na chování lan a výsledné vychýlení vozidla, které bylo více než 2,50 m.

Lana neměla tendence se zařezávat do karoserie, což byl jev, který byl nejdůležitější v této analýze. Z toho plyne, že zvolený kontakt mezi lany a modelem vozidla je zvolen správně a může se s ním dále pracovat.

7.4 Výsledný numerický model sestavy lanového svodidla

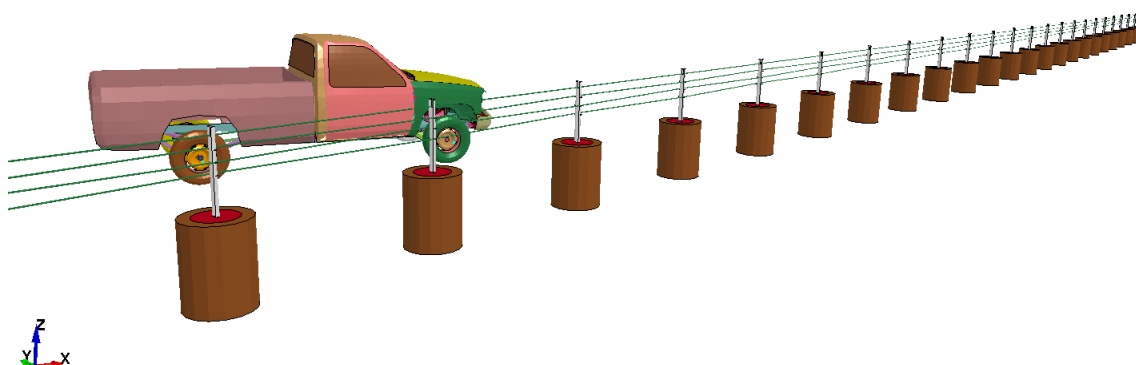
Po předchozích numerických analýzách, které prokázaly správné nastavení jednotlivých částí, jsem již mohla vytvořit výsledný model sestavy lanového svodidla.

Po sjednocení sloupků zasazených do zeminy, propletení lan, importaci vozidla a nastavení okrajových podmínek jsem již mohla spustit výpočet simulace. Krajní elementy zeminy byly vetknuty a krajním elementům lan byl odebrán možný pohyb ve směru x, y, z, ale možná rotace okolo těchto os jim byla ponechána. Celková délka Sestavy 1 byla 98,4 m (viz Obrázek 34).



Obrázek 34 - Výsledná Sestava 1

Po kompletaci Sestavy 2 byla její výsledná délka 131,2 m (viz Obrázek 35).



Obrázek 35 - Výsledná Sestava 2

Vozidlo bylo vůči svodidlu posunuto o 300 mm, byla mu přiřazena rychlost 100 km/h. Touto rychlostí, pod již zmíněným úhlem 20°, se vozidlo rozjelo proti svodidlu mezi desátým a jedenáctým sloupkem.

Poslední, co jsem musela před spuštěním výpočtu provést, bylo nastavení sběru dat a výpočtu. Celková doba simulace byla nastavena na 1,50 s. Tento čas byl dostatečný, aby proběhla nejdůležitější část dynamické simulace, ze které se dají vyčíst potřebné údaje, jako je například maximální příčné vychýlení vozidla.

Po nastavení a definování všech parametrů, týkajících se sběru dat, se výsledný model sestavy lanových svodidel uložil jako K-file a pomocí řešiče LS-DYNA byl numerický model vypočítán. Výsledkem byla dynamická simulace nárazu osobního vozidla do lanového svodidla.

8 Výsledky

Numerická analýza byla provedena s využitím řešiče LS-DYNA. Výsledky simulace jsou porovnány s testem TB 32, který je adekvátní k nastavení dynamické simulace nárazu vozidla do lanového svodidla. První typ lanového svodidla, označen jako Sestava 1, má splnit stupeň zádržnosti N2 a model lanového svodidla označen jako Sestava 2 má splnit stupeň zádržnosti H1. Obě sestavy musí však splnit podmínku maximálního vychýlení, které v tomto případě činí 1,30 – 1,50 m.

Jak již bylo zmíněno, výpočty byly provedeny na základních modelech lanových svodidel. Základní modely byly totožné jako rozšířené, pouze zde byla absence zeminy, sloupky byly upevněny vetknutím a nastaveny tak, aby odpovídaly rozšířeným modelům sestav lanových svodidel. Ve výsledku byly tedy vytvořeny čtyři modely. Dva rozšířené modely, na kterých bylo prokázáno, že v dnešní době je možno numericky vymodelovat i tak složitý materiál, jako je nesoudržná zemina. Druhé dva základní modely posloužily pro výpočty určující zádržnost lanových svodidel. Sledoval se průběh nárazu vozidla, maximální vychýlení a změna kinetické energie v závislosti na změně rychlosti.

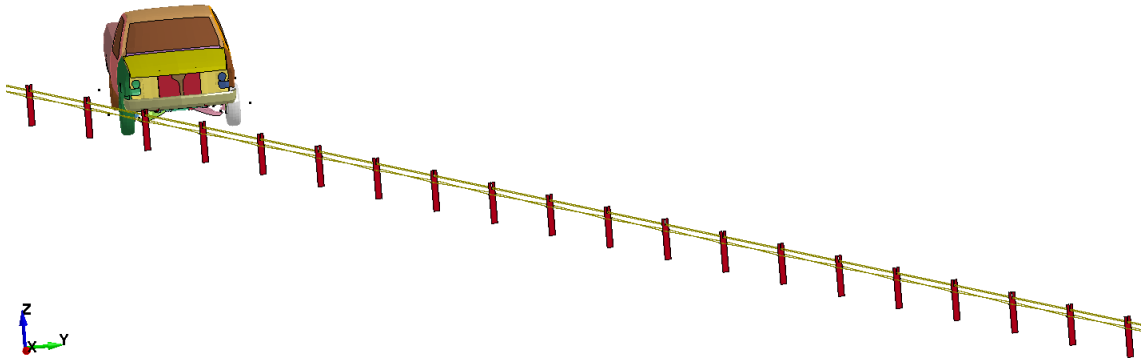
8.1 Průběh nárazu vozidla do lanového svodidla

První simulace nárazu vozidla do lanového svodidla, byla definována na prvním typu (viz Obrázek 36). Zde jsou sloupky blíže u sebe a mají menší rozměr. Ze simulace je patrné, že se nárazová zkouška jeví reálně. Vozidlo se střetne s lany a ty následně vypadnou z úchytů. Důležité je především předeptnutí lana, sloupky mají v tomto významu malou roli, slouží spíše jako podpora lan.

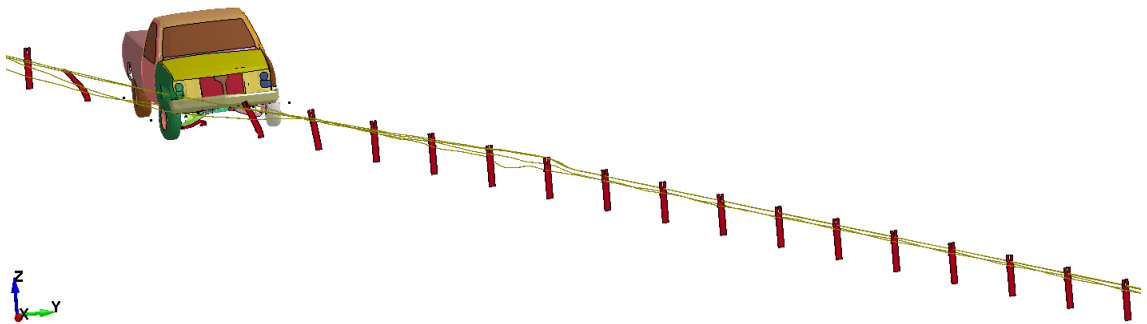
Lana se následně napnou, začnou působit proti rozjetému vozidlu a začnou vozidlo směřovat do jeho původního jízdního pruhu. V čase 0,63 s, však nastane problém a celé vozidlo se dostane až za konstrukci svodidla. Lana ale svůj účel splnila a vozidlo se tak nedostalo do protisměru.

Tento jev mohl být způsoben tím, že byl zvolen vůz značně vysoký o hmotnosti větší než bylo dáno normou. V úvahu se také musí brát fakt, že vozidlu je přiřazena rychlost, která se mění pouze následkem střetu se svodidlem. V reálu by bylo vozidlo řízeno a při střetu se svodidlem by ve většině případu řidič co nejdříve zastavil.

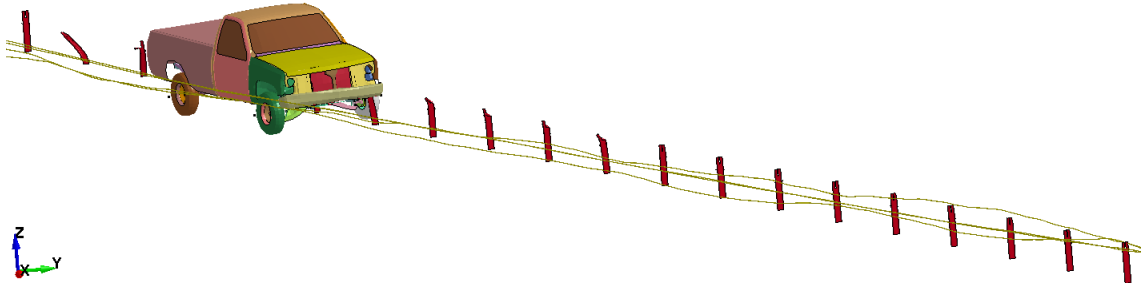
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0



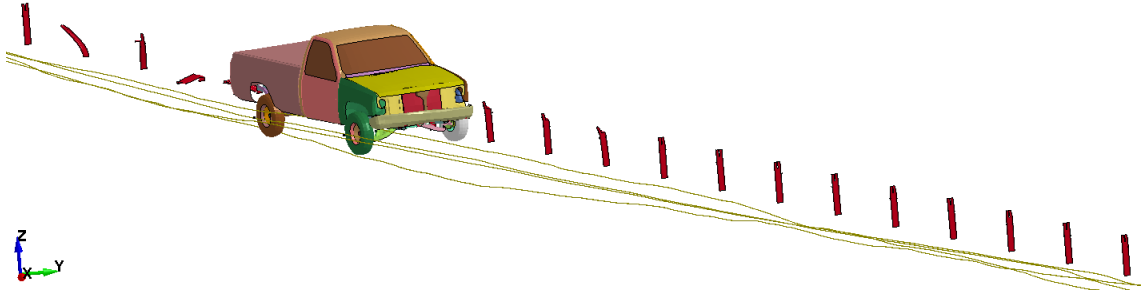
Time = 0.219

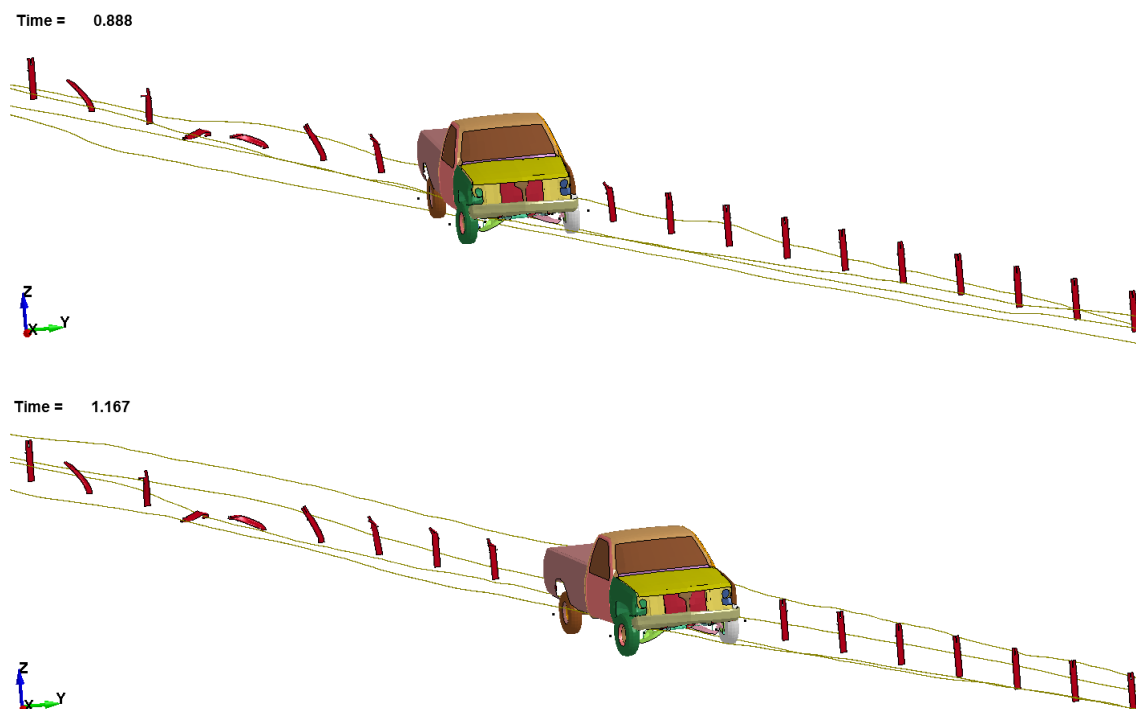


Time = 0.429



Time = 0.63





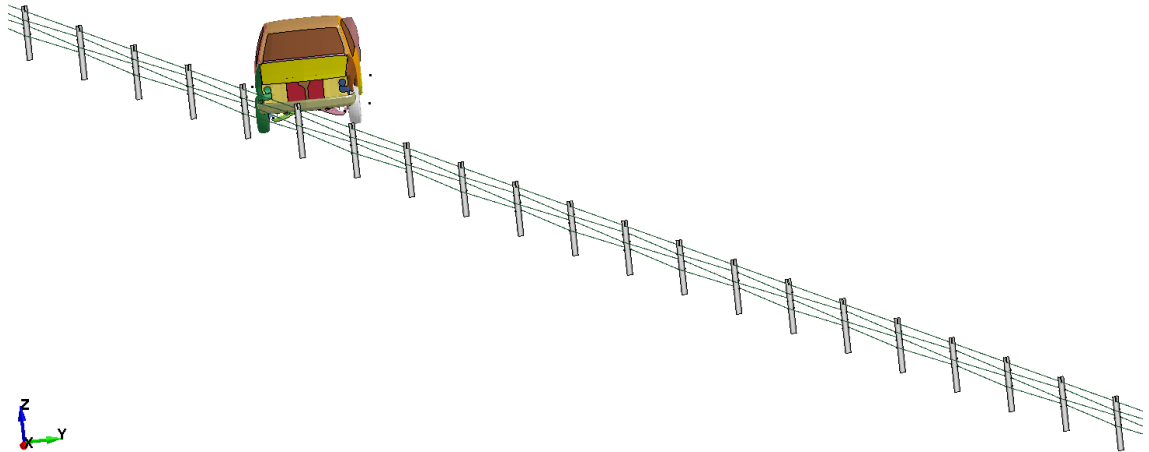
Obrázek 36 - Průběh dynamické simulace (Sestava 1)

Deformace vozidla se také jeví reálně. Lana a sloupky poškodí pouze plechy karoserie v místě, kde se střetnou. Jelikož tento typ vozidla nemá samonosnou karosérii, je použitý materiál lehce deformovatelný, především v místě zadního ložního prostoru, zde se používají tenké plechy.

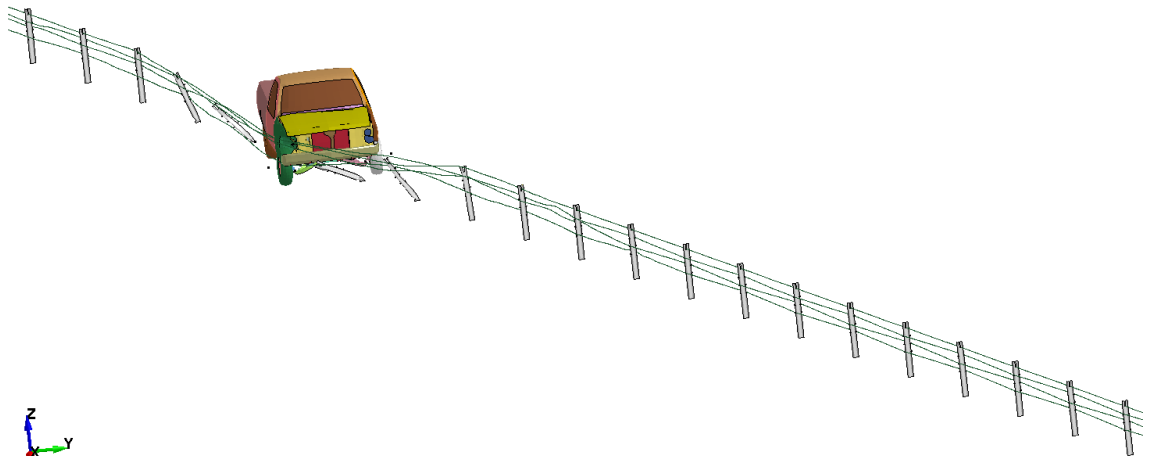
Průběh nárazu do lanového svodidla u Sestavy 2 se jeví opět reálně (viz Obrázek 37). U Sestavy 2 jsou sloupky od sebe ve větší vzdálenosti a jsou vyšší než u předchozího modelu. Po střetnutí vozidla s lany se lana napnou a začnou působit proti vozidlu. Vozidlo má v čase 0,50 s maximální příčné vychýlení a poté se začne vracet do svého původního jízdního pruhu. Po 1 s je již znatelné, že se vozidlo vrací. Zde svodidla zafungovala správně, jak měla. Velký vliv na průběh nárazu mělo také uspořádání lan. V tomto případě byla lana výše od povrchu vozovky a to mohlo způsobit plynulé vrácení vozidla do původní polohy. Jako u předchozího modelu, je i zde znatelná deformace plechů, především na předním a bočním nárazníku.

Opět zde platí, že vozidlo není řízené a tato skutečnost může mít vliv na průběh nárazové zkoušky oproti reálnému nárazu do svodidla.

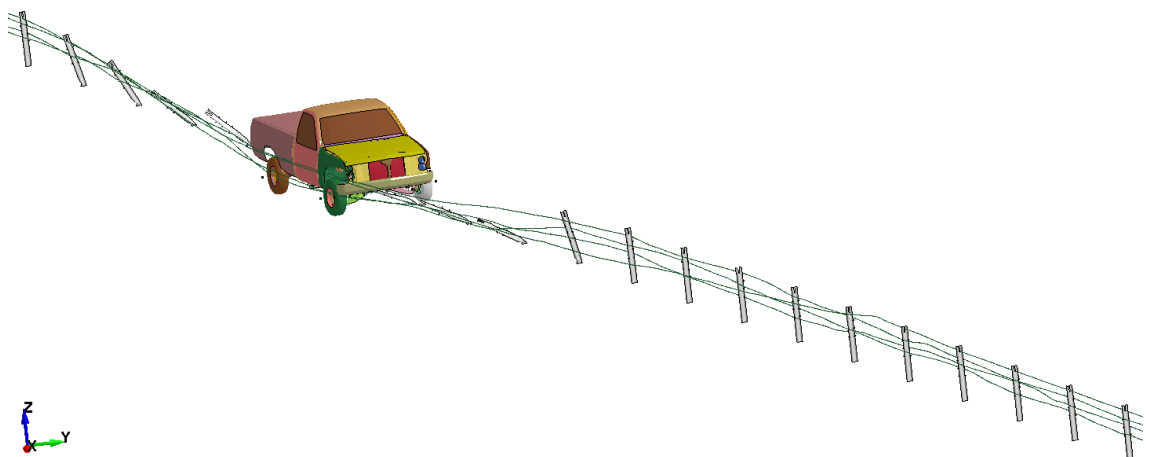
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0



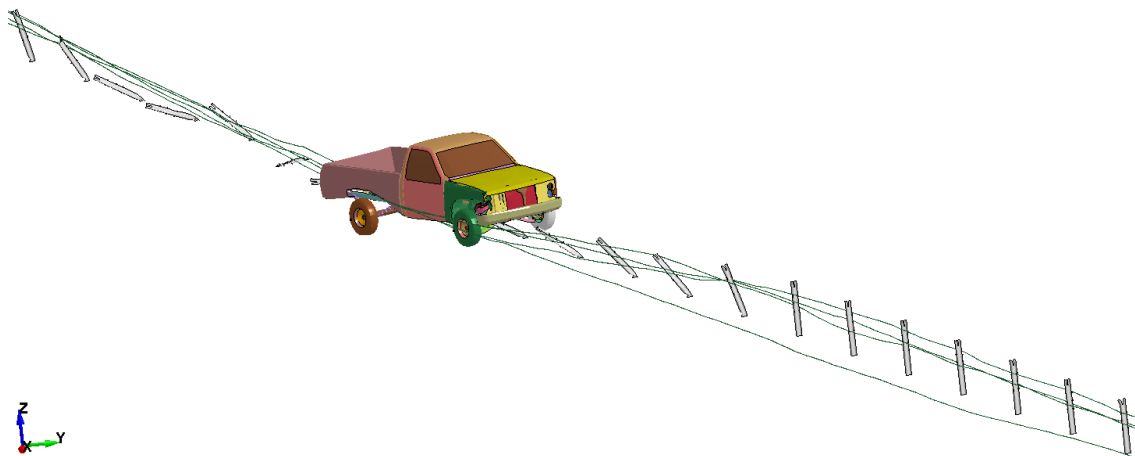
Time = 0.222



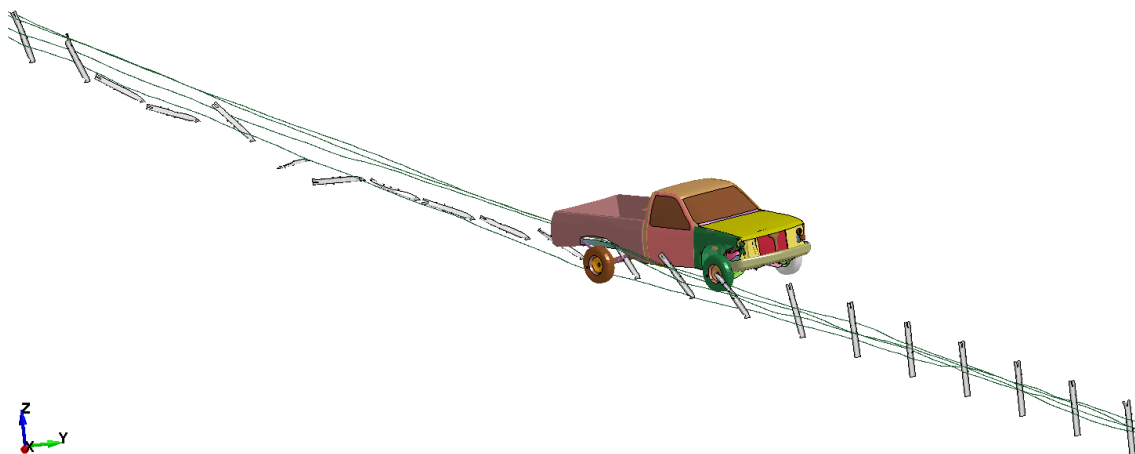
Time = 0.372



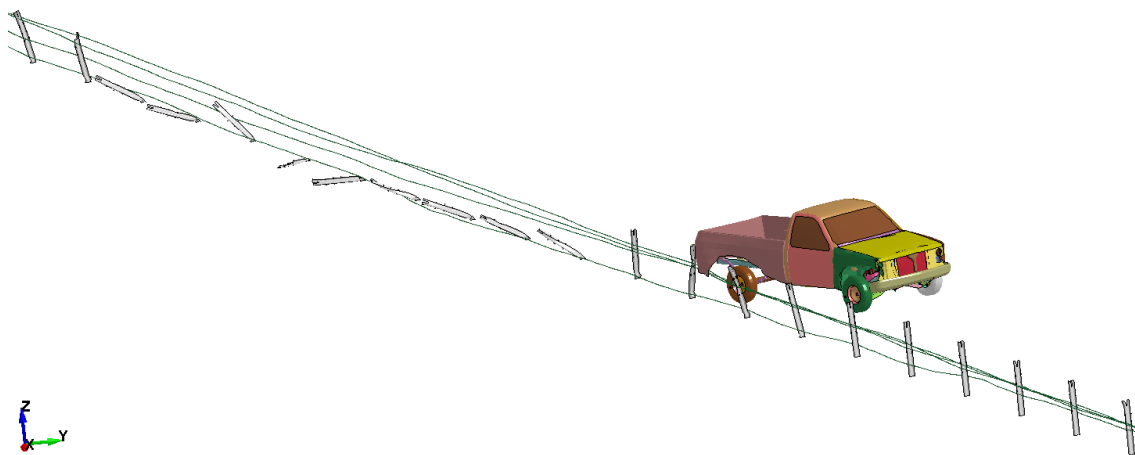
Time = 0.63



Time = 1.023



Time = 1.233

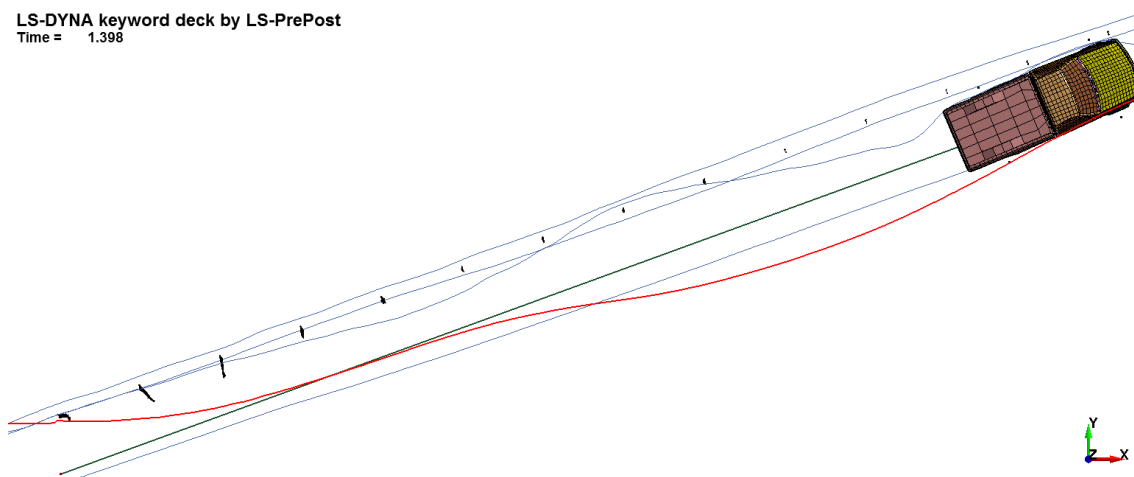


Obrázek 37 - Průběh dynamické simulace (Sestava2)

8.2 Maximální příčné vychýlení

Tento údaj je důležitý především v případě instalace svodidel do středních dělicích pásů. Tento fakt určuje, jak má být široký střední dělicí pás, aby se vozidlo v případě vyjetí ze svého pruhu nedostalo do protisměru.

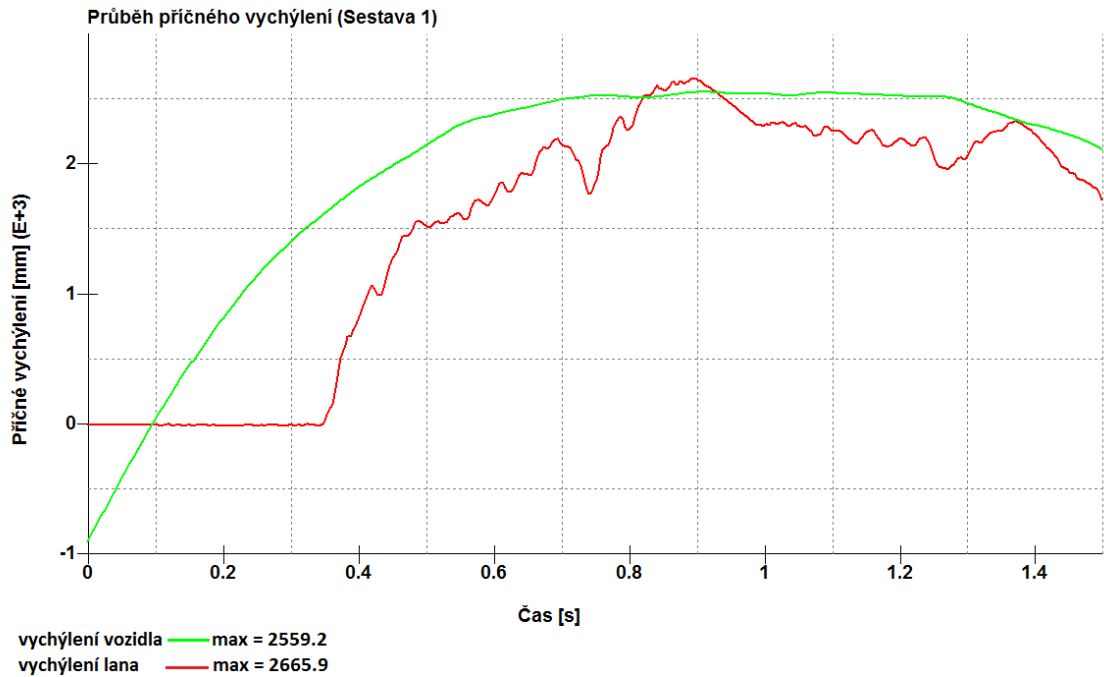
Na obrázku níže je červeně znázorněn průběh bodu vozidla, který dosáhl maximálního příčného vychýlení (viz Obrázek 38). Vychýlení dané normou je znázorněno zelenou úsečkou, která je rovnoběžná se svodidlem. Z kraje nárazu je průběh standartní, ale okolo 0,63 sekund simulace vozidlo přejede lana a opět se vzdálí od svého jízdního pruhu. Vozidlo se však okolo času 1,25 sekund začne vracet. Tento test dokázal, že i jedno lano, dokáže vozidlu zabránit vjetí do protisměru.



Obrázek 38 - Maximální vychýlení (Sestava 1)

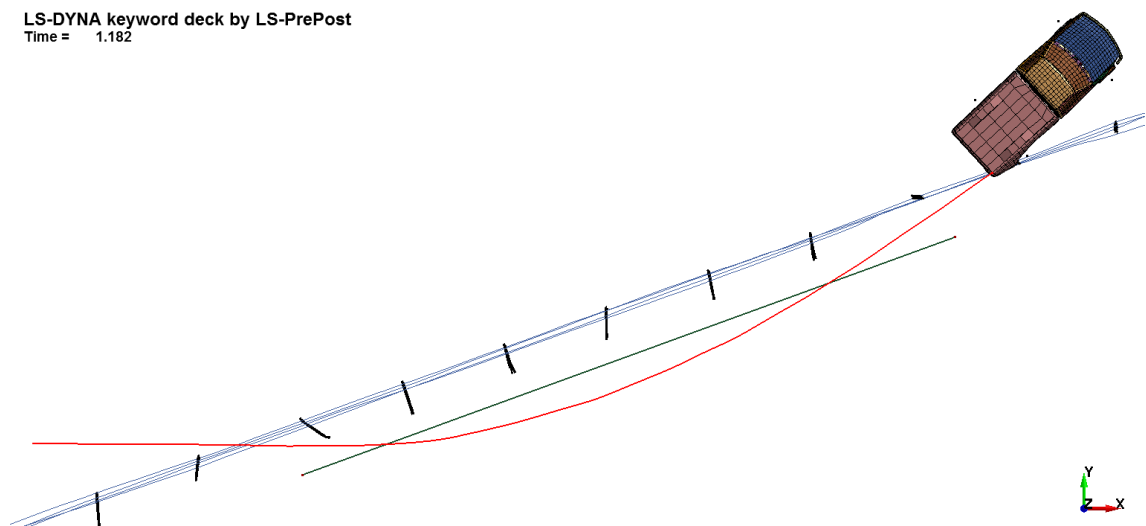
Maximální příčné vychýlení vozidla u Sestavy 1 nastalo v čase 0,72 sekund a bylo 2,5592 m (viz Graf 8). Vychýlení překonalo hodnotu danou normou a to o více než jeden metr. Na grafu je také znázorněno vychýlení lan, tato hodnota je vyšší než u vozidla, a to 2,6659 m. V obou případech bylo vychýlení více, než udává norma.

Problém nastal v tom, že tři ze čtyř ocelových lan osobní automobil překonal a vozidlo tak směřovalo pouze jedno lano. Jak již bylo zmíněno, vozidlo bylo oproti pravidlům normy těžší a i tento fakt mohl výsledek ovlivnit.



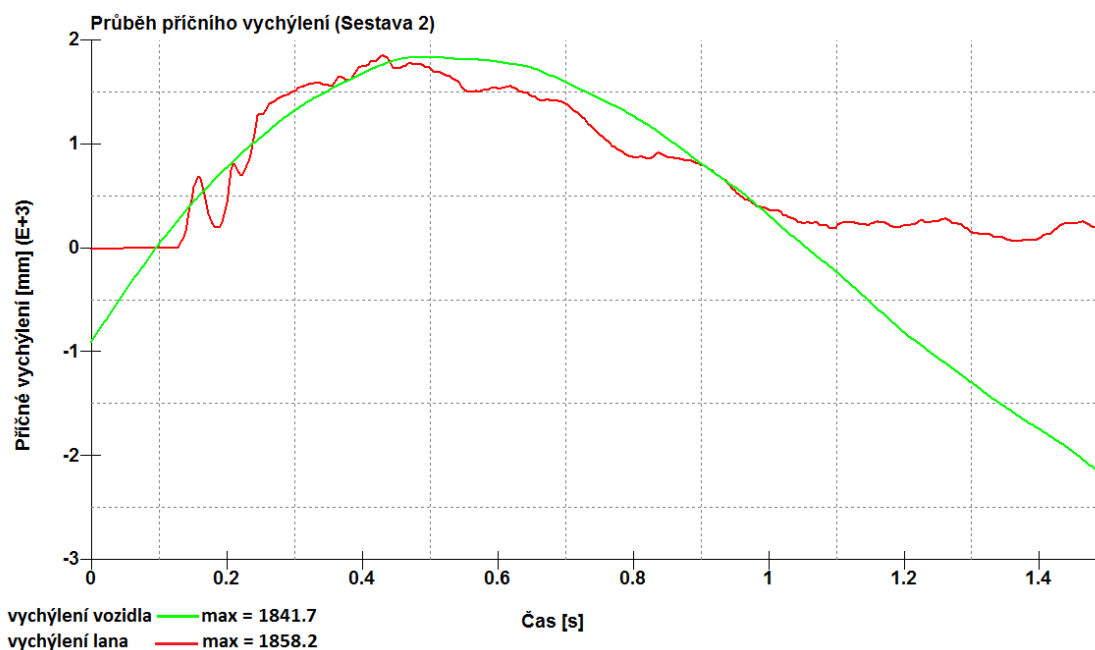
Graf 8 – Průběh maximální vychýlení (Sestava 1)

Na obrázku níže je červeně vyznačena trajektorie bodu vozidla, který dosáhl nejvyššího příčného vychýlení u Sestavy 2. Zeleně je vyznačena úsečka, představující maximální vychýlení dané normou (viz Obrázek 39). Je zde znatelný plynulý průběh vrácení vozidla do svého původního jízdního pruhu. Oproti Sestavě 1 se tento průběh jeví reálněji. Tento fakt může být způsoben různým poskládáním ocelových lan u jednotlivých sestav.



Obrázek 39 - Maximální vychýlení (Sestava 2)

Na grafu jsou vykresleny průběh vychýlení vozidla a lan. Maximální hodnota vychýlení u vozidla je značně menší, než u předchozího modelu a činí přesně 1,8417 m (viz Graf 9). Toto vychýlení nastalo v čase 0,50 sekund. Maximální hodnota vychýlení u lan byla 1,8582 m, což je téměř totožné jako u vozidla. Maximální vychýlení lan nastalo v čase 0,41 s.



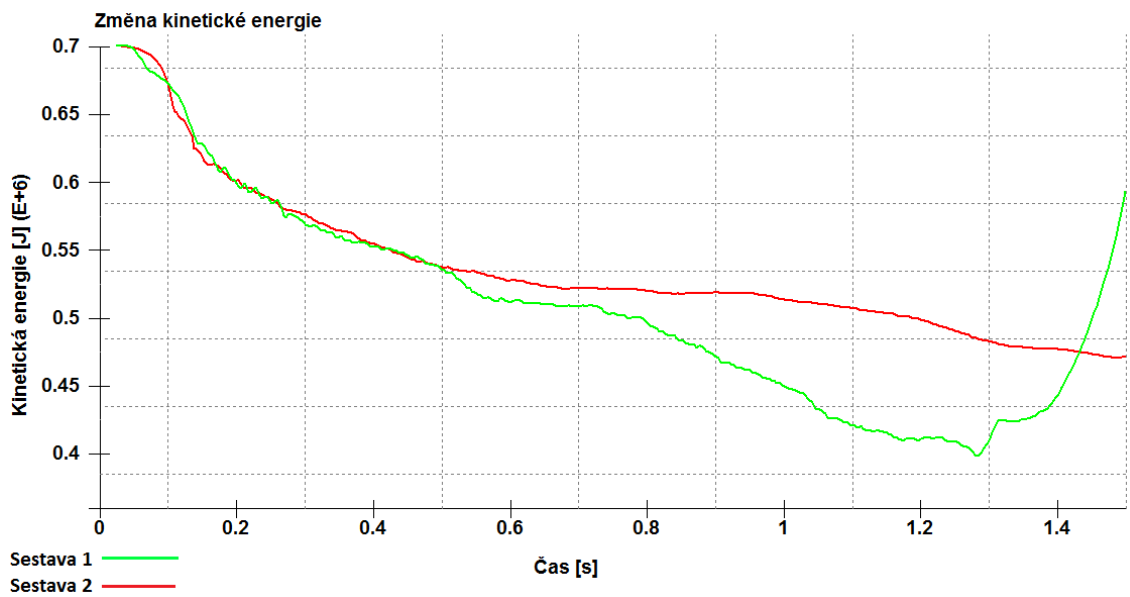
Graf 9 - Průběh maximálního vychýlení (Sestava 2)

8.3 Změna kinetické energie a rychlosti

Hodnota počáteční kinetické energie u vozidla je 704 592,36 J. Jelikož je vývoj kinetické energie úzce spojen s rychlostí, je změna křivky této energie závislá na změně rychlosti vozidla. Ta byla na začátku dynamické simulace nastavena na 2,798 mm/s.

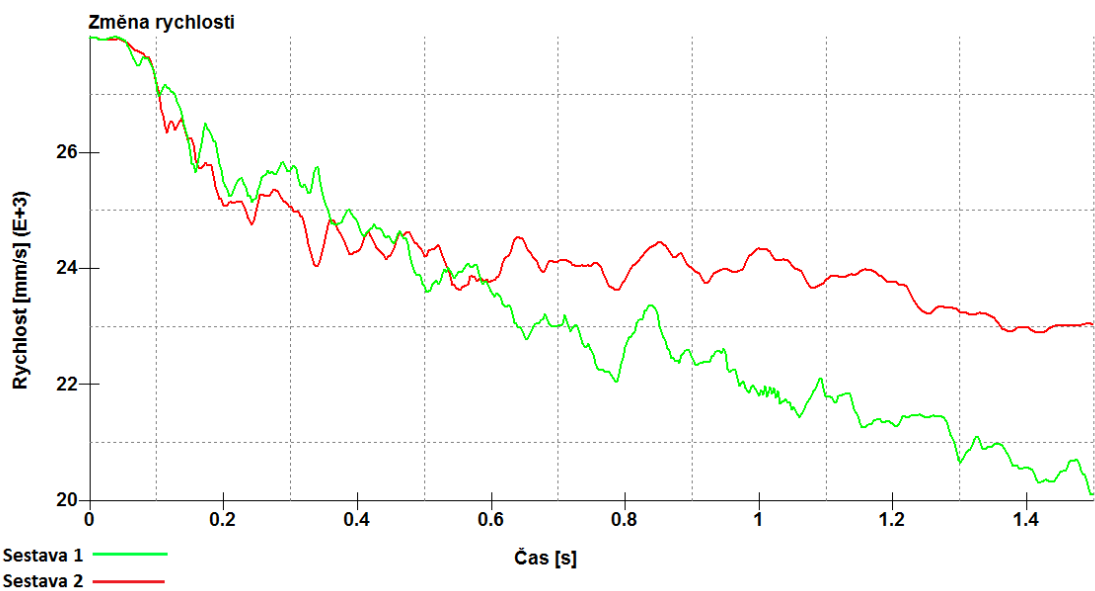
Hned po rozjetí vozidla se zvýší rychlost a tím i spojená kinetická energie. V tomto bodě má kinetická energie maximální hodnotu. Poté vozidlo narazí do svodidla a jeho rychlost se začne snižovat. Dochází tedy i ke změně kinetické energie, která klesá. Nikdy však není nulová, neboť se vozidlo stále pohybuje.

Na grafu je znázorněna změna kinetické energie u obou sestav (viz Graf 10). Ze začátku se energie snižuje rychleji, poté dojde k ustálení rychlosti a tím k zpomalení změny kinetické energie. V případě, že by simulace pokračovala dále a bylo by vozidlu navrženo, aby po určitém úseku zastavilo, byla by v tomto místě tato energie nulová.



Graf 10 - Změna kinetické energie

Jak bylo zmíněno, počáteční rychlost vozidla u obou typů sestav je 100 km/h. U Sestavy 2 je změna rychlosti menší. Klesne na hodnotu 83 km/h a na této rychlosti se ustálí. U Sestavy 1 klesne rychlost na 72 km/h. V případě, že by simulace pokračovala dál, rychlost by stále klesala (viz Graf 11).



Graf 11 - Změna rychlosti

9 Závěr

Úkolem této práce bylo dokázat proveditelnost dynamické simulace nárazu vozidla do dvou typů lanových svodidel. V první části této práce jsem provedla analýzu technických norem, které se věnují záchytným systémům na pozemních komunikacích. Následuje stručný popis silničních svodidel, jejich rozdělení a použití. V následující kapitole jsem se zaměřila na metodiku zkoušení svodidel. Kapitola obsahuje popis zkoušek záchytných systémů, dále je zde uveden stručný popis měřených a zkoumaných veličin.

Hlavní problematikou této práce byla lanová svodidla, z tohoto důvodu je jejich popis v samostatné kapitole. Jsou zde řešeny konstrukční prvky lanových svodidel, zásady instalace a jejich použití. Následuje podkapitola o použití lanových svodidel v praxi, nejen na našem území, ale i v zahraničí. V závěru této podkapitoly jsou uvedeny výhody a nevýhody lanových svodidel. Poslední kapitola v teoretická částí této práce se věnuje použitým programům, pomocí kterých se tvořil výsledný model.

V další kapitole je již popsán postup tvorby numerických modelů. Geometrie sloupků vycházela z mé bakalářské práce a byla upravena v programu LS-PrePost, ve kterém byla provedena samotná tvorba výsledného modelu. Numerická analýza byla provedena s využitím řešiče LS-DYNA. Mezi výslednými sestavami bylo několik rozdílů. Sestava 1 měla kratší sloupky než Sestava 2. Sloupek 1 byl pod povrchem zeminy 400 mm. Tloušťka plechu byla stanovena na 6 mm a vzdálenost mezi sloupky byla 2 400 mm. U Sestavy 2 byl sloupek pod povrchem zeminy 700 mm. Tloušťka plechu byla 4,55 mm a vzdálenost mezi sloupky byla o 800 mm větší než u Sestavy 1. Dále se sestavy lišily v různém způsobu propletení ocelových lan.

Po vytvoření geometrických modelů, bylo nutné nadefinovat numerické modely. Jednotlivým částem byl přiřazen materiál a velmi důležité bylo správně nastavit kontakty mezi jednotlivými díly.

Při vytváření modelů nastalo několik problémů, které bylo třeba vyřešit. První problém nastal právě u kontaktu mezi sloupkem a pomocným nulovým materiálem zeminy. Tento problém se vyřešil nastavením jiných parametrů v kartě kontaktu. U nastavení lan se vyskytl problém u jednotek, zde bylo třeba změnit jednotky na požadované.

Po odstranění všech problémů se již mohla provést dynamická simulace nárazu osobního vozidla.

Během tvorby jsem prováděla průběžné numerické analýzy, které měly prokázat, zda jsou jednotlivé díly sestavy lanového svodidla správně nadefinovány. První analýza měla prokázat, zda jsou správně nastaveny kontakty mezi sloupkem a zemí. Pomocí impaktoru se rostoucí silou zatěžoval sloupek. Tento test byl úspěšný. Následovala analýza, která měla prokázat správně nadefinované kontakty mezi hranou sloupku a lany. Zde bylo důležité, aby nedocházelo k penetraci sloupku lanem. Další dvě analýzy představovaly již náraz vozidla, nejprve do sloupku a následně do lan.

Za model vozidla byl zvolen osobní automobil značky Chevrolet C2500 HD. Náraz probíhal, jak již bylo zmíněno, dle zkoušky TB 32. Vozidlu byla přiřazena rychlost 100 km/h, náraz probíhal pod úhlem 20° mezi desátý a jedenáctý sloupek sestavy a hmotnost vozidla byla 1 800 kg.

Celkem jsem vytvořila čtyři modely lanových svodidel. Dva rozšířené modely, na kterých bylo prokázáno, že numerická analýza dokáže vyřešit i tak složitý materiál jako je nesoudržná zemina. Další dva modely posloužily pro výpočty, ze kterých bylo vyčteno maximální příčné vychýlení a změna kinetické energie.

Obě dynamické simulace se jeví reálně. U Sestavy 1 sice nebyla splněna podmínka maximálního příčného vychýlení, ale to mohlo být způsobeno vyšší hmotností a výškou vozidla. Přesto se vozidlo nedostalo do protisměru a lanová svodidla, tak splnila svůj účel. U Sestavy 2 proběhla nárazová zkouška přímo ukázkově. Lana zapůsobila proti vozidlu a plynule vozidlo vrátila do původního jízdního pruhu. Přestože byla hmotnost vozidla vyšší, než je dáno normou, bylo maximální příčné vychýlení překonáno jen o 341 mm. Z výsledku je tedy patrné, že Sestava 2 splňuje požadavky lépe, než Sestava 1. Maximální příčné vychýlení u Sestavy 1 bylo 2,5592 m a u Sestavy bylo 1,841 m. V obou případech byla deformace vozidla velmi nízká, z toho jasně vyplývá, že lanová svodidla jsou šetrnější, než ostatní. Z bezpečnostního hlediska je pro posádku nejvíce důležitá změna kinetické energie. Právě plynulá změna kinetické energie je jedna z největších předností, tohoto typu zachytného systému.

Práce prokázala, že se pomocí metody konečných prvků dá namodelovat, i tak složitý děj, jako je střet vozidla s lanovým svodidlem. Největším přínosem této práce pro mě bylo, že jsem byla schopna vyřešit vzniklé problémy.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Ocelová svodidla [8].....	15
Obrázek 2 - Lanová svodidla [10].....	15
Obrázek 3 - Dřevocelová svodidla [11].....	16
Obrázek 4 - Betonová svodidla [12].....	17
Obrázek 5 - Zábradelní svodidla [13].....	17
Obrázek 6 - Nárazová rychlost teoretické hlavy [16].....	21
Obrázek 7 - Deformační zóny vozidla [17].....	23
Obrázek 8 - Schéma chování vozidla při nárazu [17].....	28
Obrázek 9 - Osová vzdálenost sloupků [19].....	30
Obrázek 10 - Půdorysné propletení lan [19].....	31
Obrázek 11 - Tvary sloupků [19].....	31
Obrázek 12 - Minimální délka svodidla [9].....	32
Obrázek 13 - Lanové svodidlo na dálnici D8 a komunikaci R63 [18].....	35
Obrázek 14 - Sloupek s odrazkou [21].....	36
Obrázek 15 - Lanová svodidla v Abbotsfordu [26].....	38
Obrázek 16 - Nehoda kamionu na D8 [18].....	39
Obrázek 17 - Geometrie Sloupku 1 a Sloupku 2.....	45
Obrázek 18 - 2D síť zeminy.....	46
Obrázek 19 – Pomocná síť Null.....	47
Obrázek 20 - Geometrie reálného lana [36].....	48
Obrázek 21 - Reálné ocelové lano [37].....	48
Obrázek 22 - Model ocelového lana.....	49
Obrázek 23 - Model impaktoru.....	49
Obrázek 24 - Vozidlo Chevrolet C2500 [38].....	50
Obrázek 25 - Model vozidla Chevrolet C2500.....	51
Obrázek 26 - Zatížení sloupku v zemině [40].....	58
Obrázek 27 - Maximální napětí (zatížení impaktorem).....	59
Obrázek 28 - Pootočení impaktoru.....	60
Obrázek 29 - Změna polohy impaktoru.....	60
Obrázek 30 - Kontakt mezi lany a sloupkem.....	62
Obrázek 31 - Test vozidlo vs. Sloupek 2.....	63
Obrázek 32 - Deformace nárazníku a Sloupku 2.....	63
Obrázek 33 - Náraz vozidla do lan.....	64

Obrázek 34 - Výsledná Sestava 1	65
Obrázek 35 - Výsledná Sestava 2	65
Obrázek 36 - Průběh dynamické simulace (Sestava 1)	69
Obrázek 37 - Průběh dynamické simulace (Sestava2)	71
Obrázek 38 - Maximální vychýlení (Sestava 1).....	72
Obrázek 39 - Maximální vychýlení (Sestava 2).....	73

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Testy "schválených" svodidel [3].....	13
Tabulka 2 - Testy "jiných" svodidel [3].....	14
Tabulka 3 – Specifikace testovacích vozidel [14].....	19
Tabulka 4 - Parametry nárazových zkoušek [2].....	24
Tabulka 5 - Úrovně zadržení [2].....	24
Tabulka 6 - Úroveň prudkosti nárazu [2].....	25
Tabulka 7 - Index VCDI [17].....	27
Tabulka 8 - Chování vozidla při nárazu [17].....	28
Tabulka 9 – Informace o nárazových zkouškách [9].....	33
Tabulka 10 - Návrhové parametry svodidla [9].....	33
Tabulka 11 - Návrhové parametry II. [9].....	34
Tabulka 12 - Zvolené jednotky.....	44
Tabulka 13 - Parametry vozidla.....	51
Tabulka 14 - Nastavení bilineární oceli.....	53
Tabulka 15 - Nastavení materiálu Soil and foam.....	53
Tabulka 16 - Nastavení materiálu Curvature beam.....	54
Tabulka 17 - Nastavení materiálu Null.....	55
Tabulka 18 - Kontakty v sestavě svodidla.....	56
Tabulka 19 - Kontakty mezi vozidlem a sestavou.....	57
Tabulka 20 - Test zatěžování sloupku.....	60

Seznam grafů

Graf 1 - Křivka napětí [36]	54
Graf 2 - Křivka ohybového momentu [36]	54
Graf 3 - Křivka torzního ohybu [36].....	55
Graf 4 - Rostoucí síla impaktoru	58
Graf 5 - Průběh maximálního napětí (Sloupek 1).....	59
Graf 6 - Vykreslení posunutí impaktoru (Sloupek 1)	61
Graf 7 - Vykreslení posunutí impaktoru (Sloupek 2)	61
Graf 8 – Průběh maximální vychýlení (Sestava 1).....	73
Graf 9 - Průběh maximálního vychýlení (Sestava 2).....	74
Graf 10 - Změna kinetické energie	75
Graf 11 - Změna rychlosti	75

Seznam použitých zdrojů

- [1] 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, 2011.
- [2] 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, 2011.
- [3] TP 114. *SVODIDLA NA POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH ZATÍŽENÍ STANOVENÍ ÚROVNĚ ZADRŽENÍ NA PK NAVRHOVÁNÍ „JINÝCH“ SVODIDEL ZKOUŠENÍ A UVÁDĚNÍ SVODIDEL NA TRH*. Praha: Dopravoprojekt Brno, a.s., 2010.
- [4] Radimský, M. *Bezpečnostní zařízení na pozemních komunikacích*. Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební [online]. Dostupné z: www.fce.vutbr.cz/PKO/juza.p/vyuka/1.ppt
- [5] MABA PREFA spol. s r. o. *MABA komponenty*. 2016(1), 1.
- [6] Doporučený standard technický. Skupina: silniční stavby. *Silniční záchytné systémy* [online]. DOS T soubor 5: č.10 2002. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: www.profesis.cz
- [7] TECHNICKÉ KVALITATIVNÍ PODMÍNKY STAVEB POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ. *KAPITOLA 11 SVODIDLA, ZÁBRADLÍ A TLUMIČE NÁRAZŮ*. Praha: Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, 2010.
- [8] MIDOS CHEB Milan Dolejš. *MIDOS CHEB* [online]. Cheb: Web-co, 2011 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.midos-cheb.cz/svodidla/ocelova>
- [9] TP 106. *Lanová svodidla na pozemních komunikacích*. Praha: Dopravoprojekt Brno, a.s., 1998.
- [10] BRIFEN CANADA. *BRIFEN* [online]. Canada: Web-co, 2013 [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: <http://www.brifen.ca/>
- [11] SAFEROAD Czech Republic s.r.o. *SAFEROAD* [online]. Líně: Web-co, 2015 [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: <http://www.flop-dz.cz/vyroba-a-prodej-svodidla-drevoocelova-svodidla-t40-4ms2/>

- [12] HAREX INVEST s.r.o.: *Dopravní značení. SAFEROAD* [online]. KV: WebSnadno, 2016 [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: <http://www.dopravniznacenivbs.cz/Betonova-silnicni-svodidla.html>
- [13] M-konstrukce s.r.o. [online]. Sedlčany: Xcreative, 2015 [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: <http://www.m-konstrukce.cz/kovovyroba/>
- [14] ŠŤASTNÁ, Barbora. *Vliv silničních záchytných systémů na počet a druh dopravních nehod*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] *Evaluation of the Acceleration Severity Index Threshold Values Utilizing Event Data: Recorder Technology*. Glassboro, 2016. Rowan University.
- [16] *Manual for Assessing Safety Hardware*. 1. United States of America: AASHTO, 2009. ISBN 978-1-56051-416-9.
- [17] TP 101. *Výpočet svodidel: Technické podmínky*. Ministerstvo dopravy a spojů ČR Praha: Dopravoprojekt Brno, a.s., 1997.
- [18] PROZNAK. *PROZNAK - dopravní značení* [online]. [2014] [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.proznak.cz/cze/index.php?pageid=detail.php?item%3D5-0000-0000>
- [19] *BRIFEN NCHRP 350 - L4 Length of Need general Layout - 4 Rope - 3.2m Post Spacing*. Wolverhampton, 2008.
- [20] Brifen vajerräcke. *Trafiksäkerhet, utyrning och utbildningar* [online]. [2014] [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.ata.se/eshop/infra/vagracken/vajerracken/brifen.aspx>
- [21] Vajerskärmen för ställineräcken. *Driving safety around the world* [online]. [2014] [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.ata.no/eshop/infra/vagracken/tillbehor/vajerskarmen.aspx>
- [22] Hill and Smith BRIFEN VRS Wire Rope Safety Fence system. *Welcome to Hill and Smith* [online]. © 2014 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.hill-smith.co.uk/brifen>
- [23] *Brifen Wire Rope Safety Fence (Brifen WRSF) Used in the United States* [online]. © 2003-2007 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.brifenus.com/>

- [24] Brifen - Road Wire-Rope Barrier Fences - Road Traffic Technology. *Road Traffic Technology* [online]. © 2014 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.roadtraffic-technology.com/contractors/safety/brifen/>
- [25] MESTANOVÁ, Dana. FA EKON 2-hý blok přednášek. *FA EKON 2-hý blok přednášek*. 2014, č. 2.
- [26] Brifen Canada - The World Leader in Cable Barrier Technology. *Brifen Canada - The World Leader in Cable Barrier Technology* [online]. © 2013 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.brifen.ca/pages/projects.php>
- [27] VRBKA, Martina, VAVERKA, Michal. Ústav konstruování. *1. přednáška – Úvod*. 2016, č. 1. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [28] JIROUŠEK, Ondřej. *Metoda konečných prvků - poznámky k přednáškám*. 2006. vyd. 134 s.
- [29] Mechanical Design Software - ANSYS Mechanical. *ANSYS - Simulation Driven Product Development* [online]. © 2014 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Structural+Analysis/ANSYS+Mechanical>
- [30] LS-PrePost Online Documentation | Index. *Welcome to Livermore Software Technology Corp. | Livermore Software Technology Corp.* [online]. © 2012 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.lstc.com/lsppl/>
- [31] Autodesk Inventor – Wikipedie. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Inventor
- [32] LS-PREPOST — *LS-DYNA and services from DYNAMore Website —* [online]. © 2014 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.dynamore.de/en/products/prepost>
- [33] ZVĚŘINA, Martin. *Výpočtová simulace procesu třískového obrábění*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [34] LS-DYNA | Livermore Software Technology Corp. *Welcome to Livermore Software Technology Corp. | Livermore Software Technology Corp.* [online]. © 2011 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>

[35] LS-DYNA | SVS FEM s.r.o. SVS FEM s.r.o. | FEM Specialista pro ANSYS, LS-DYNA, CFD, Fluent [online]. [2014] [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/content/ls-dyna>

[36] Development of Advanced Finite Element Material Models for Cable Barrier Wire Rope. *A Cooperative Research Project sponsored by the U.S. Department of Transportation Research and Innovative Technology Administration*. 2010, č. 1.

[37] Boater-Supplies: Happy Boat - Happy Life. *Boater-Supplies*[online]. Copyright, 2015 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://boater-supplies.com/product7-x-19-aircraft-quality-cable-running-rigging-2>

[38] CarCurus. *CarCurus* [online]. Inc., 2016 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: https://www.cargurus.com/Cars/Discussion-t27831_ds543247

[39] *LS-DYNA Theory Manual: Material Models*. 2016.

[40] *BRIFEN Australia: BRIFEN Design Manual*. Draft Ver 1.0. Australia, 2009.