



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

**MODELOVÁNÍ A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ
LANOVÉHO SKLUZU**

MODELLING AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF ZIPLINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Dobrovolný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR FRANTÍK, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Tomáš Dobrovolný
Název	Modelování a experimentální ověření lanového skluzu
Vedoucí práce	doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Literatura dle pokynů vedoucího práce.

Macur, J., Úvod do teorie dynamických systémů a jejich simulace, skripty, nakladatelství PC-DIR, Brno, 1995

Brepta, R., Půst, L., Turek, F.: Mechanické kmitání, Technický průvodce 71, nakladatelství Sobotáles, Praha, 1994.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Nastudování potřebných znalostí dle pokynů vedoucího práce. Zorientování se v problematice. Provedení experimentu a porovnání s výsledky výpočtu pomocí numerického modelu.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá numerickým modelováním lanového skluzu a jeho experimentálním ověřením v malém měřítku. Je provedena identifikace vlastností experimentálního lanového skluzu a následně porovnány výsledky s výstupy numerického modelu. Cílem je dosáhnout zhodnocení schopnosti numerického modelu simulovat lanový skluz.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lanový skluz, lano, kladka

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the numerical modeling of the zip-line and its experimental verification on a small scale. An experimental zip-line is identified and then the results are compared with the numerical model outputs. The goal is to validate abilities of the numerical model in the case of simulation of a zip-line.

KEYWORDS

Zip-line, rope, pulley

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Tomáš Dobrovolný *Modelování a experimentální ověření lanového skluzu*. Brno, 2019. 35 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Modelování a experimentální ověření lanového skluzu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Tomáš Dobrovolný
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Modelování a experimentální ověření lanového skluzu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Tomáš Dobrovolný
autor práce

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Petru Frantíkovi Ph.D. za cenné rady, postřehy a motivaci, díky které jsem práci zvládl dokončit. Dále bych chtěl poděkovat za pomoc při zkoušce v laboratoři Ing. Václavu Sadílkovi Ph.D. A nakonec děkuji rodičům za podporu a trpělivost po celou dobu studií.

Obsah

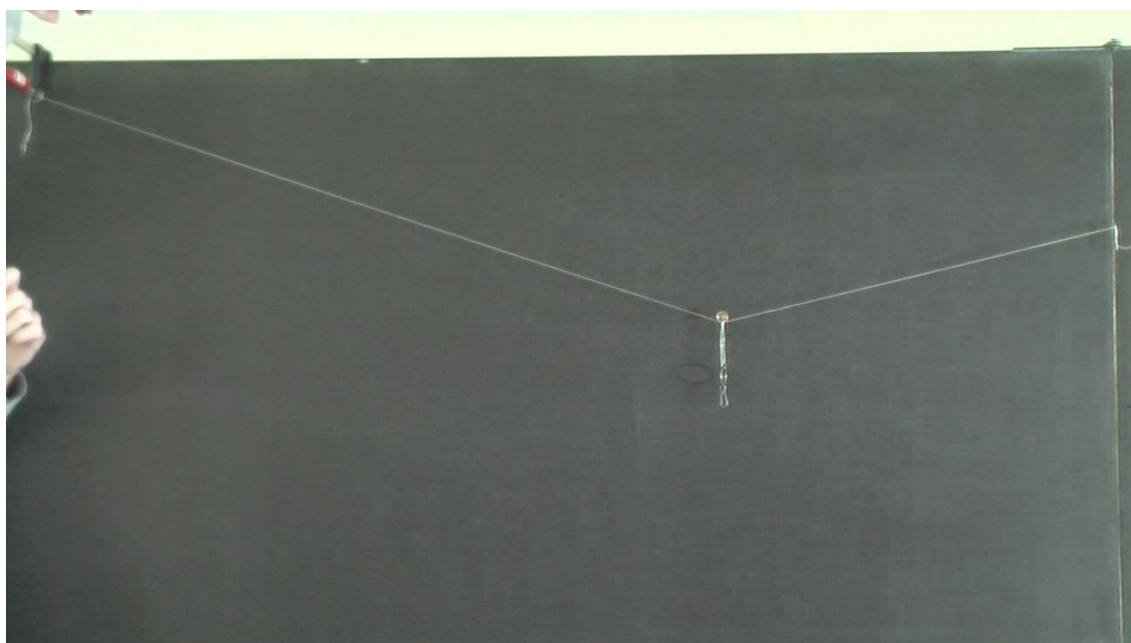
1. Úvod	1
2. Lanové konstrukce	2
2.1. Lanový skluz	2
2.2. Historie lanového skluzu	2
3. Lano.....	3
3.1. Textilní lana podle výroby:	3
3.2. Ocelová lana:	4
4. Teoretické modely lan	6
4.1. Rovinný vláknový polygon.....	6
4.1.1. Základní vztahy pro vláknový polygon.....	7
4.2. Parabolická řetězovka.....	9
4.3. Lano zatížené do tvaru tížné řetězovky.....	11
5. Dynamické chování lanových modelů.....	13
5.1. Volné kmitání struny	14
6. Program FyDiK.....	16
6.1. Diskrétní model FyDiK2D.....	16
6.2. Model lanového skluzu	17
6.3. Nastavení numerického modelu v programu FyDiK	19
7. Zjištění tuhostí lana.....	20
7.1. Normálová tuhost.....	20
7.1.1. Měření pomocí závaží.....	20
7.1.2. Měření tahovou zkouškou v lisu	21
7.1.3. Vyhodnocení tahové zkoušky.....	22
7.2. Ohybová tuhost	24
8. Experimentální lanový skluz	25
8.1. Videozáznam experimentu	25
8.2. Převod videa.....	26
9. Srovnání lanového skluzu s numerickým modelem	27
10. Závěr.....	30
11. Literatura	31

12.	Seznam ilustrací:.....	32
13.	Seznam tabulek:	34
14.	Seznam příloh:	35

1. Úvod

Práce se věnuje numerickému modelování lanové skluzu, včetně experimentálního ověření v malém měřítku a identifikaci jeho vlastností. Motivací jsou moderní požadavky na analýzu velkorozměrných lanových skluzů zřizovaných zejména pro potřeby zábavy a turismu. Cílem práce je prokázat, zda je zvolený přístup vhodný pro podrobnější analýzu dynamického chování skluzu v interakci s pohybujícím se břemenem.

Pro dosažení cíle práce je zde popisováno získání parametrů pro numerické modelování, zaznamenání výsledků pohybu lanového skluzu včetně jeho sestavení. Následuje seznámení s vytvořením numerického modelu a porovnání výsledků.



Obr. 1.1 Lanový skluz

2. Lanové konstrukce

Jednou ze základních vlastností lanových konstrukcí je, že součástí konstrukce je lano plnící nosnou funkci. U některých lanových konstrukcí, jako například lanový skluz nebo lanovka, tvoří hlavní nosnou a pojezdovou funkci pro kladku kabiny lanovky nebo kladku se závažím spouštěným po lanovém skluzu. U mostních konstrukcí zavěšených a vysutých zaujímá hlavní nosný prvek pro podporu mostovky.

2.1. Lanový skluz

Lanový skluz je lanová konstrukce složená z lana tuze upevněného v místě horním, třeba na vrcholu nějakého kopce, a v místě dolním, třeba v údolí. Mezi těmito místy je nataženo toto lano. Další součástí konstrukce je kladka, na které je zavěšeno závaží, což může být náklad zboží nebo i osoba. Princip přepravy po lanovém skluzu, je založen na dostatečném sklonu a prověšení, aby se mohl náklad nebo osoby přepravovat pouze gravitační silou, která působí na náklad a zároveň, aby se před koncem lanového skluzu kladka zastavila samovolně, případně pomocí brzdného mechanismu [10].

2.2. Historie lanového skluzu

Nejpravděpodobnější vznik lanového skluzu byl v horských oblastech vysokých hor, jako jsou Himaláje, Alpy a Andy atd., pro přepravu nákladu mezi určitými místy v těchto horách. Přesné datování vzniku prvního lanového skluzu není známo [10].

Lanové skluzy byly používány také ve válečných oblastech vojáky pro přepravu munice, potravin a pošty. Dále byly skluzy využívány badateli a specializovanými pracovníky, kteří zkoumali prostředí a přírodu v korunách stromů. Tito pracovníci přispěli k rozšíření lanových skluzů jako atrakcí. Od 70. let minulého století se lanové skluzy využívají hlavně jako adrenalinové zážitky v nějaké atraktivní přírodní lokaci. Takovými lokacemi jsou většinou lesy nebo různé řeky, vodopády atd. [10].

V současné době je nejdelším lanovým skluzem pro účely adrenalinových zážitků lanový skluz v Spojených arabských emirátech. Lanový skluz překlenuje vzdálenost 2,8 kilometrů a spouštění lidé mohou dosáhnout rychlosti až sto padesát kilometrů za hodinu. Pro upřesnění dodejme, že užití tohoto skluzu je limitováno maximální hmotností osoby 150 kg a minimální výškou osoby 122 cm [9]. K nejdelším lanovým skluzům patří také lanový skluz v Itálii u města Rocca Massima, který měří 2,2 km, a také v Peru u města Cusco měřící 2,1 km. V České republice jsou lanové skluzy mnohem kratší a jedny z nejdelších se nachází v Bouzově měřící 137 m, v Harachově o délce 117 m a v Hluboké nad Vltavou dosahuje délky 220 m [10].

3. Lano

Lano většinou vzniká smotáním mnoha vláken do pramenů, které jsou z různých materiálů. Tyto pramence jsou následně spleteny do výsledné podoby lana [11].

Nejčastěji se používají materiály, jako například přírodní z celulózy, kovové a různé syntetické materiály. Mezi přírodní materiály patří len, konopí. Přírodní textilní vlákna se v dnešní době používají velmi málo. Tyto vlákna nahradila v dnešní době hlavně syntetická vlákna, které mají danou délku příze [12]. Materiál těchto lan je většinou polyester a polyamid. Lana z těchto materiálů se využívají hlavně jako horolezecká a jistící lana. Dalšími materiály jsou kovy, z kterých se dělají hlavně konstrukční lana pro stavební konstrukce střech, mostů zavěšených a vysutých. U stavebních konstrukcí převládá ocel jako použitý materiál. Dalším odvětvím je elektrotechnika, kde se využívá převážně mědi, hliníkových slitin, bronzu a také z oceli. Lana z oceli plní i v elektrotechnice hlavně nosnou funkci jiných lan s vodící funkcí. Přitom lano, které vede elektrický proud, je většinou z mědi [4].

Lana, která jsou smotána z konopných nebo lněných vláken, se používají již několik tisíc let. V minulosti se nejčastěji využívala na lodích na úvaz plachet a řízení lodí. V 19. století začala být postupně takováto lana nahrazována lany ze syntetických materiálů a kovovými materiály [12].

3.1. Textilní lana podle výroby:

Stáčená a splétaná lana – vznikají buď stáčením různého počtu pramenů až do počtu šesti. Nebo splétáním vyššího počtu pramenců buď těsně spletené nebo s prostorem uvnitř takzvané duté lana [12].



Obr. 2.1 Stáčené konopné lano [12]

Lana s nízkým zákrutem – hlavní vlastností tohoto způsobu je jádro omotávané paralelně loženými lanky [12].



Obr. 2.2 Duté lano [12]

Tkaná lana (lanka) – výroba začala v 21. století. Použití hlavně v obuvním průmyslu na tkaničky, dále také při výrobě stanů. Hlavní předností těchto lanek je mnohem větší produktivita. Pevnosti těchto lanek ale nebyly dosud řádně vyzkoušeny [12].

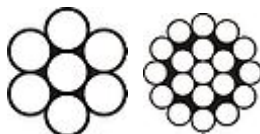
3.2.Ocelová lana:

Na evropském kontinentu vznikl první nápad na vytvoření kovového lana v Německu, kvůli potřebě lepší odolnosti a životnosti v dolech. První kovové lano vytvořili ručním smotáváním ve stříbrných dolech v Clausthalu v roce 1834. Technologie smotání byla převzata z výroby konopných lan. Už v roce 1836 se začala používali takováto lana i na území Slovenska také v dolech [8].

Základní složky při výrobě ocelového lana je lanový kovový drát, jádro lana a mazivo lana. Lanový drát je vyráběn většinou z oceli, jenom pokud má vest elektrický proud tak se používají slitiny mědi a hliníku. Jádro vede dráty při motání lana. Bývá většinou z plastu, ale pokud je lano používáno při vyšších teplotách, tak je jádro také z oceli. Mazivo má funkci především zabránit vznikaní vody do lana, aby nevznikala koroze [8].

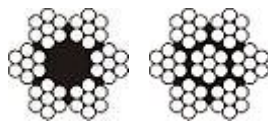
Rozdělení ocelových lan:

1. Jednopramenná lana – složena z jednoho pramene s jádrem bez něj [8].



Obr. 2.3 Jednopramenná lana [8]

2. Standartní lana – jsou spletena z několika pramenců a také jsou s jádrem nebo bez. Vinuta jsou standartním způsobem. Použití u lanovek atd. [8].



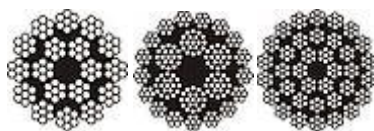
Obr. 2.4 Standartní lana [8]

3. Lana typu SEAL – vinuta jsou souběžným způsobem. Mají větší odolnost proti rázům. Používají se v těžších provozních podmínkách než standartní lana [8].



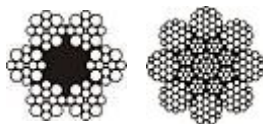
Obr. 2.5 Lana typu SEAL [8]

4. Lana typu Herkules – standartní způsob vinutí, pouze s mnohonásobně vyšším počtem drátů. Použití na speciálních jeřábech [8].



Obr. 2.6 Lana typu Herkules [8]

5. Lana typu Warrington – vinutí souběžně a střídání drátů s menším a větším průměrem [8].



Obr. 2.7 Lana typu Warrington [8]

6. Lana s trojbokými prameny – pro lepší využití profilu lana se ukládají prameny do trojúhelníkového tvaru profilu [8].
7. Lana z tvářeného drátu – dokáží lépe využít prostor profilu a tím dosáhnout větších minimálních pevností při stejném profilu [8].
8. Nerezová lana – jsou vinuta stejně jako standartní a používají se v případě horších korozních podmínek [8].
9. Hliníková a měděná lana – se používají pro vedení elektrického proudu a při použití jako nosné musí mít ocelové jádro [8].
10. Verope Lana – speciální ocelové lana s velkou životností [8].

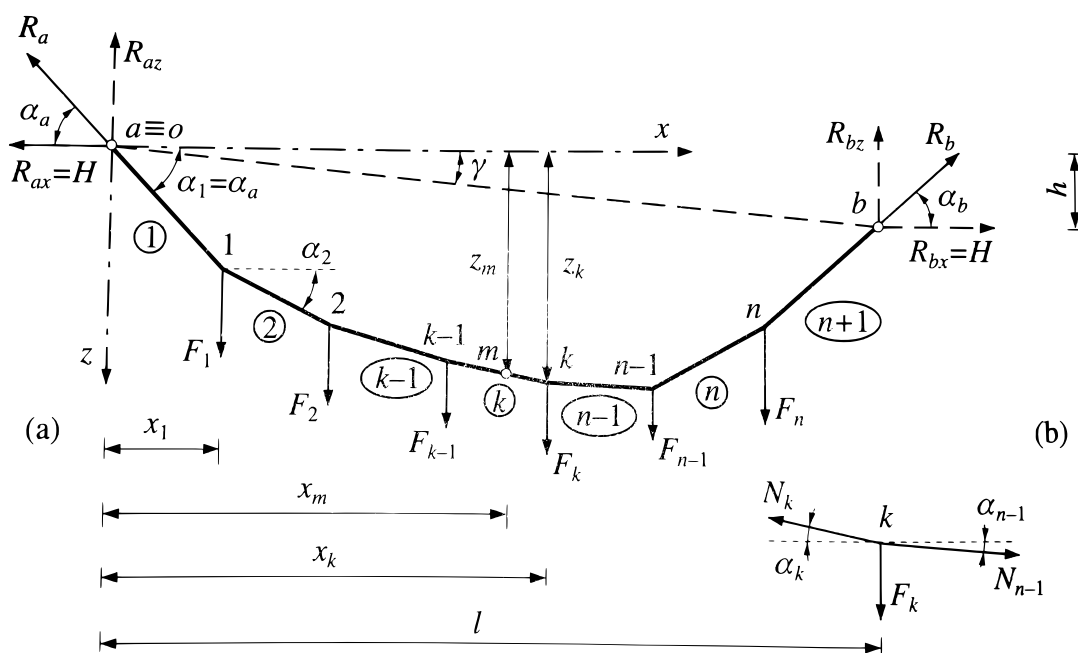
4. Teoretické modely lan

Pro stavební výpočty lanových konstrukcí v inženýrské praxi, se nejčastěji využívá pro modelování takzvané dokonale ohebné vlákno. Takovýto druh lana se dá využít u statických konstrukcí. U dokonale ohebného lana platí, že nepřenáší ohyb. Ohybová tuhost lana se pro modelování zanedbává. Ohybové momenty se musí rovnat po celé délce lana nule. Dokonale ohebné vlákno působí tak, že přenáší pouze tah. Geometrický tvar dokonale ohebného vlákna je velice úzce spjat se zatížením. Tvar takového vlákna vlastně kopíruje směr, intenzitu a polohu zatížení [1].

Statické modely jsou většinou rovinné a jejich základními vlastnostmi jsou tuhé kloubové podpory, mezi které je zavěšeno lano, které je tvarováno zatížením na základní tři tvary. Jeden z tvarů vzniká bodovým zatížením v několika místech lana, které je většinou pravidelně rozmístěné, a tím vzniká rovinný polygon. Další tvary vznikají rovnoměrným zatížením po délce lana, kterým vzniká takzvaná pravá tížná řetězovka nebo parabolická řetězovka. Tížná řetězovka vzniká vlastní tíhou, která vyvoluje rovnoměrné zatížení po střednici lana a parabolická vzniká spojitým zatížením na průmětu lana do jedné roviny [1].

4.1. Rovinný vláknový polygon

Je tvar lana po ustálení od zatížení soustavou sil F_1 až F_n , která je umístěna v jedné rovině stejné jako je umístěno lano. Lano je ukotveno ve dvou krajních bodech kloubově. Následně je možno počítat s touto lanovou soustavou, jako modelem kloubové prutové soustavy v jedné rovině [1].



Obr. 4.1 Vlákenný polygon [1]

Pro výpočet normálových sil ve stranách geometricky určeného polygonu lze využít styčnickové nebo průsečné metody stejně jako u rovinných příhradových konstrukcí [1].

V případě určených poloh kotvení lana a vodorovných souřadnic všech zatěžujících sil v ose x , které jsou součástí modelu polygonu, a také jejich intenzit. V tomto případě je potřeba zvolit ještě jednu veličinu, aby bylo možno určit přesný polygon. Bez této podmínky je možno vytvořit libovolný počet polygonů. Pro případ takto určeného polygonu jsou vypsány vztahy v odstavci 4.1.1. [1].

4.1.1. Základní vztahy pro vláknový polygon

Tyto vztahy jsou určovány ze základních statických podmínek rovnováhy. Z podmínky rovnováhy sil ve směru x je získán vztah (4.1) pro vodorovnou sílu H .

$$R_{ax} = R_{bx} = H \quad (4.1)$$

Z momentové podmínky k pravému ukotvenému bodu b vznikne vztah (4.2) pro hodnotu reakce ve svislém směru z pro levý ukotvený bod a . A z druhé momentové podmínky rovnováhy pro bod a vznikne druhá reakce ve svislém směru pro bod b [1].

$$R_{az} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n F_i (l - x_i) + H \frac{h}{l} \quad (4.2)$$

$$R_{bz} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n F_i x_i - H \frac{h}{l} \quad (4.3)$$

Následně je potřeba určit sílu H , pro kterou se musí určit dodatečná podmínka. Po zjištění této síly už lze dopočítat výsledné reakce a směrové úhly reakcí pomocí vztahů níže [1].

$$R_a = \sqrt{H^2 + R_{ax}^2} \quad (4.4)$$

$$R_b = \sqrt{H^2 + R_{bx}^2} \quad (4.5)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_a = \frac{R_{az}}{H} \quad (4.6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_b = \frac{R_{bz}}{H} \quad (4.7)$$

Podmínky pro určení polygonu a síly H :

- a) Určení jedné z souřadnice v určitém bodu m

Z momentové podmínky v bodě m , kde se využívá podmínky, že dokonale ohebné vlákno nepřenáší momenty, lze určit výsledná vodorovná síla H .

S následným dosazením vztahu (4.2) do této podmínky vznikne výsledný vztah pro vodorovnou sílu H (4.8) [1].

$$H = \frac{x_m \sum_{i=1}^n F_i(l-x_i) - l \sum_{i=1}^{k-1} F_i(x_m-x_i)}{l z_m - h x_m} \quad (4.8)$$

b) Určení reakce R v zakotveném bodu polygonu

Když je zvolena přímo hodnota jedné z reakcí R_a a R_b a výškový rozdíl $h = 0$ m, tak lze pomocí základního vztahu (4.4) pro tuto reakci, respektive vztahu (4.5), vyjádřit přímo hodnotu této vodorovné síly, a to dosazením svislé hodnoty reakce R_{az} nebo R_{bz} , které lze v tomto případě získat bez vlivu vodorovné síly H [1].

V případě, že je v polygonu výškový rozdíl kotvených bodů, musí se nejdříve získat kolmá vzdálenost reakce R a kotveného bodu pomocí momentové podmínky k jednomu z kotvených bodů. To závisí na reakci, kterou máme zadanou. Následně získáme pomocí pravoúhlého trojúhelníku složeného ze spojnice kotvených bodů a vzdálenosti r , což je kolmá vzdálenost ke směru reakce R , funkcí sinus úhel β , který svírá právě spojnice kotvených bodů a koncová strana polygonu, která je totožná se směrem reakce R . Dále získáme úhel γ , neboli sklon spojnice vetknutých bodů, a to funkcí tangens. Odečtením těchto úhlů získáme směr reakce R . Z tohoto směru už určíme všechny ostatní reakce a vodorovnou sílu pomocí základních vztahů [1].

$$r = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^n F_i x_i \quad (4.9)$$

$$\sin \beta = \frac{r}{\sqrt{l^2 + h^2}} \quad (4.10)$$

$$\tan \gamma = \frac{h}{l} \quad (4.11)$$

$$\alpha = \beta \pm \gamma \quad (4.12)$$

c) Určení směru jedné reakce v zakotveném bodu polygonu

Při známém směru reakce lze získat poměrně jednoduše výsledný výraz pro hodnotu vodorovné síly H , úpravou vztahů (4.6) nebo (4.7) a následným dosazením vztahů (4.2) nebo (4.3), což je závislé na tom, směr jaké reakce známe [1].

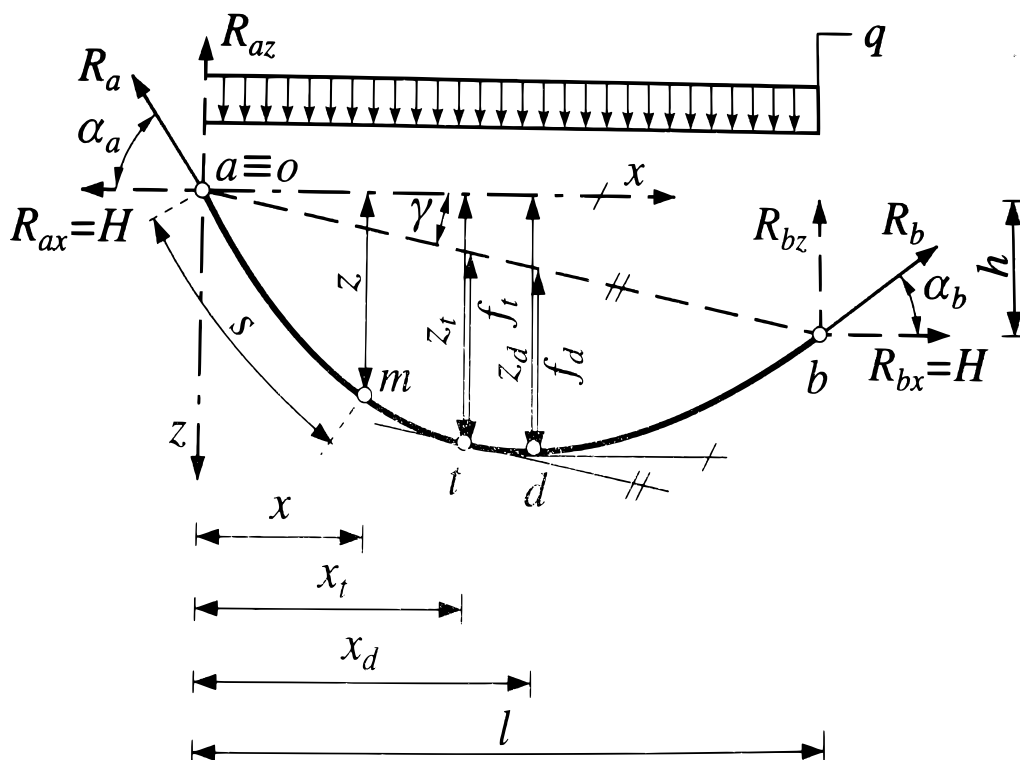
$$H = \frac{\sum_{i=1}^n F_i(l-x_i)}{l \tan \alpha_a - h} \text{ nebo } H = \frac{\sum_{i=1}^n F_i(l-x_i)}{l \tan \alpha_b + h} \quad (4.13)$$

- d) Určení jedné délky strany polygonu
- e) Zvolení celé délky lana polygonu

Když je určená délka lana L , pak je potřeba nejprve odhadnout vodorovnou sílu H a následným dopočtem délek stran polygonu zjistit celkovou délku. Postupným přibližováním se zpřesňuje velikost síly H , až do hodnoty skoro shodné se zadanou délkou L [1].

4.2. Parabolická řetězovka

Vzniká po zatížení lana rovnoměrným spojitým zatížením q na průmětu lana v rovině. Pro určení výrazů reakcí a směrů reakcí se vychází stejně jako u polygonu z podmínek rovnováhy silových a momentových. Tyto výrazy jsou závislé na vodorovné síle H , která se určuje také z doplňkových podmínek [1].



Obr. 4.2 Parabolická řetězovka [1]

Základní výrazy pro reakce:

$$R_{ax} = R_{bx} = H \quad (4.14)$$

$$R_{az} = \frac{ql}{2} + H \frac{h}{l} \quad (4.15)$$

$$R_{bz} = \frac{ql}{2} - H \frac{h}{l} \quad (4.16)$$

Pro výpočet parabolické řetězovky byla odvozena rovnice průvřesové křivky, z podmínky nulového momentu k obecnému bodu x , z . Derivací této rovnice vznikne takzvaná rovnice sklonů tečen (4.17) [1].

$$z(x) = \frac{qx}{l}(l-x) + \frac{h}{l}x \quad (4.17)$$

Doplňkové podmínky pro určení H :

- 1) Souřadnice jednoho bodu m na parabolické řetězovce.

Dosazením souřadnic bodu m do rovnice průvřesové křivky a úpravou, vznikne výraz pro vodorovnou sílu H [1].

$$H = \frac{qlx_m(l-x_m)}{2(lz_m-hx_m)} \quad (4.18)$$

- 2) Určený směr reakce parabolické řetězovky.

Vychází se ze stejného vztahu jako u vláknového polygonu, pouze se dosadí odlišné výrazy pro svislé reakce R_z (4.15) (4.16) [1].

$$H = \frac{ql}{2(l \operatorname{tg} \alpha_a - h)} \text{ nebo } H = \frac{ql}{2(l \operatorname{tg} \alpha_b + h)} \quad (4.19)$$

- 3) Zvolená reakce R pro parabolickou řetězovku.

Při určení vodorovné síly H platí stejné vztahy jako u polygonu s výjimkou vztahu (4.9) pro kolmou vzdálenost určené reakce r , který je nahrazen vztahem (4.20). Po určení úhlu lze zase dopočítat sílu H pomocí základních výrazů [1].

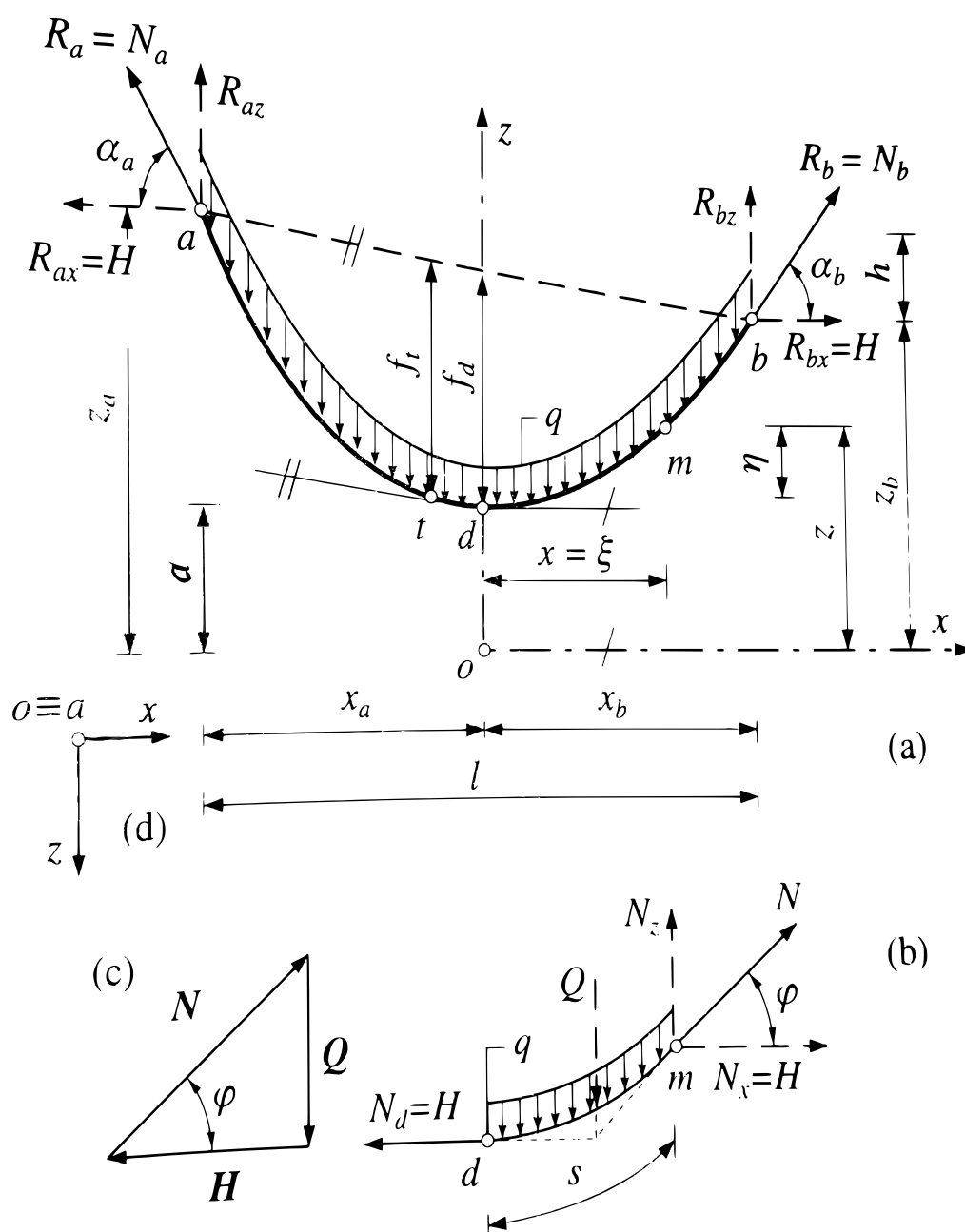
$$r = \frac{ql}{2R} \quad (4.20)$$

- 4) Zvolená L délka vlákna parabolické řetězovky.

Stejně jako u polygonu je potřeba odhadnou vodorovnou sílu H a následným dopočítáním délky L zjistit, jak blízko jsme zvolené délce. Následuje postupné zpřesňování H a přibližování se zvolené hodnotě L [1].

4.3. Lano zatížené do tvaru tížné řetězovky

Tížná řetězovka vzniká rovnoměrným zatížením q rozloženém na střednici lana s kloubově ukotvenými body. Při určení výrazů pro odvození diferenciální rovnice a rovnice tížné řetězovky, je potřeba umístit souřadnicovou osu v místo nejnižšího bodu křivky d . Dále jako na obr. 4.3b vybrat vzdálenost mezi nejnižším bodem d a obecně zvoleným bodem m [1].



Obr. 4.3 Tížná řetězovka [1]

Na zvoleném úseku se ze silových podmínek rovnováhy získají vztahy (4.21) (4.22) a jejich derivace.

$$H = N \cos\varphi \quad (4.21)$$

$$Q = N \sin\varphi = qs \quad (4.22)$$

Za využití ohebnosti lana a podle obr.4.3c lze odvodit vztah pro $\tan\varphi$ a jeho derivací dostaneme výraz představující diferenciální rovnici křivky tížné řetězovky [1].

$$z'' = \frac{dN_z}{H dx} = \frac{q ds}{H dx} \quad (4.23)$$

Následně je potřeba odvodit vztahy pro malý úsek délky lana ds a jejich srovnáním vznikne základní vztah pro integraci na výraz (4.24) a druhou integrací (4.25). Poté se dopočítají konstanty C_1 a C_2 a po dosazení konstant do těchto vztahů vznikne výraz pro rovnici tížné řetězovky (4.27). Pro lepší vzhled se vyjádří parametr a takzvaný parametr řetězovky, který vyjadřuje poměr mezi vodorovnou silou H a spojitým zatížením q [1].

$$z' = \sinh\left(\frac{qx}{H} + C_1\right) \quad (4.24)$$

$$z = \frac{H}{q} \cosh\left(\frac{qx}{H} + C_1\right) + C_2 \quad (4.25)$$

$$a = \frac{H}{q} \quad (4.26)$$

Za určených podmínek lze dopočítat konstanty C_1 a C_2 jako nulové. Z této skutečnosti vyplývá upravený výraz pro rovnici tížné řetězovky (4.27) [1].

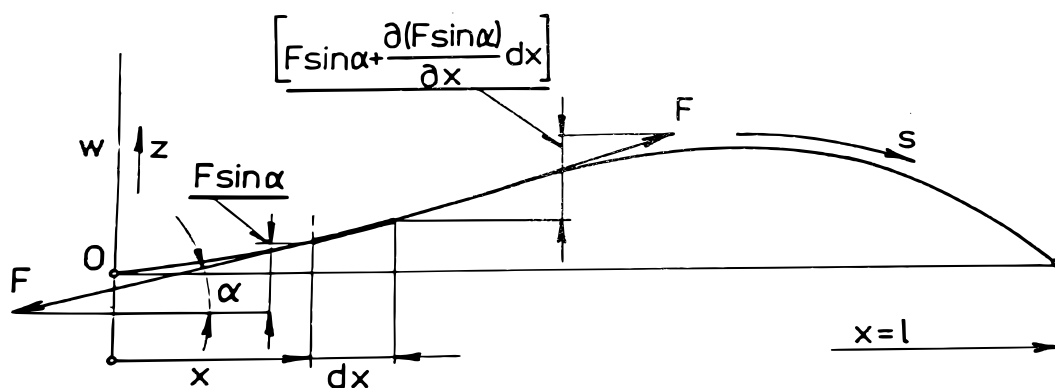
$$z = a \cosh \frac{x}{a} = \frac{a}{2} \left(e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}} \right) \quad (4.27)$$

Další možnou rovnicí tížné řetězovky je takzvaný Bernoulliův tvar rovnice tížné řetězovky (4.28) [1].

$$z^2 = a^2 + s^2 \quad (4.28)$$

5. Dynamické chování lanových modelů

Podobně jako u statických modelů se musí kvůli zjednodušení zavádět předpoklady, které zaručí možnost model popsat určitými vztahy. U kmitání a vlnění strun a lan se zavádí předpoklady, že struna představující lano má délku l a jednotkovou hmotnost m_l . Struna je dále zcela ohebná, což znamená, že je zanedbána ohybová tuhost a ohybový moment se rovná nule v každém místě délky struny. Další předpoklady jsou, že struna je homogenní, pružná a kmitá v jedné rovině. Pokud struna zaujímá plochou křivku a má malé průhyby, pak lze předpokládat, že se síla F působící v laně nemění. Také nevniká pohyb elementů ve směru osy x . Podle znázornění na obr. 5.1 a za předpokladů, které byly uvedeny v předešlém textu, můžeme odvodit pohybovou rovnici struny (5.1) a po úpravě výraz (5.2) [3].



Obr. 5.1 Kmitání struny

Vyjádření rovnice:

$$m_l dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left[F \sin \alpha + \frac{\partial(F \sin \alpha)}{\partial x} dx \right] - F \sin \alpha$$

$$m_l \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial(F \sin \alpha)}{\partial x}$$

U plochých křivek struny platí $dx \approx ds$ a $\sin \alpha \approx \alpha \approx \partial w / \partial x$ a po dosazení těchto předpokladů vznikne [3].

$$m_l \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c_s^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (5.2)$$

Výraz pro fázovou rychlost vlnění $c_s = \sqrt{\frac{F}{m_l}}$. Následnou úpravou výrazu (5.1) vznikne výraz pro vlnovou rovnici struny (5.2), která popisuje volné kmitání struny a postupné kmitání ve struně [3].

5.1. Volné kmitání struny

Volnému kmitání přísluší integrál typu (D. Bernoulli)

$$w = w_0(x)e^{i\Omega t} \quad (5.3)$$

$$w = w_0(x) \begin{cases} \cos \Omega t \\ \sin \Omega t \end{cases}$$

kde Ω je úhlová frekvence vlastního kmitání, $w_0(x)$ je tvar kmitání [3].

Podle výrazu (5.3) vyjádříme řešení vlnové rovnice (5.2) takto:

$$w = \left[C \cos\left(\frac{\Omega}{c_s}x\right) + D \sin\left(\frac{\Omega}{c_s}x\right) \right] [A \cos \Omega t + B \sin \Omega t] \quad (5.4)$$

Z okrajových podmínek pro $w = 0$, což je v místě $x = 0$ a $x = l$. Z těchto podmínek vyjde konstanta $C = 0$ a to vede na výraz pro frekvenční rovnici (5.5), která má spočetnou množinu kořenů [3].

$$\sin\left(\frac{\Omega}{c_s}l\right) \quad (5.5)$$

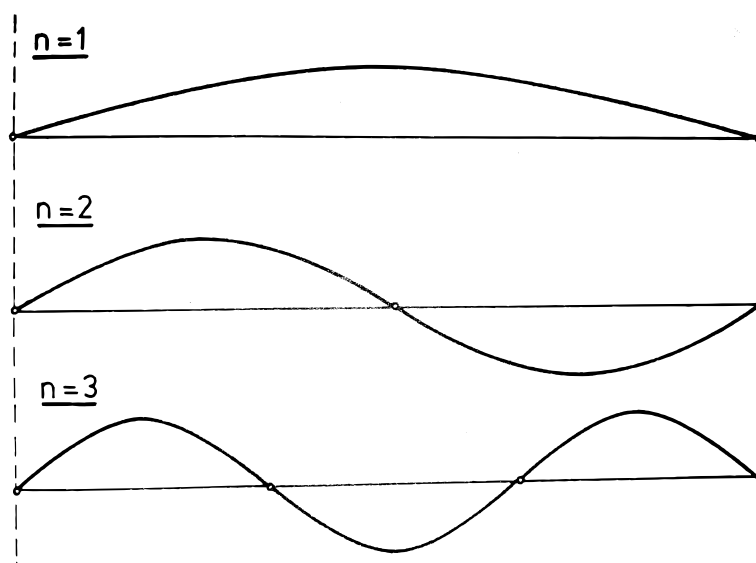
$$\Omega_n = \frac{n\pi c_s}{l}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (5.6)$$

Podle principu superpozice vznikne obecný tvar výrazu pro volné kmitání:

$$w = \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi}{l}x\right) \left[P_n \cos\left(\frac{n\pi c_s t}{l}\right) + Q_n \sin\left(\frac{n\pi c_s t}{l}\right) \right] \quad (5.7)$$

Vlastní tvary kmitání jsou podle výrazu (5.8) s obecným násobitelem C_n . První tři vlastní tvary kmitu můžeme vidět na obrázku 5.2 [3].

$$w_{0n}(x) = C_n \sin\left(\frac{n\pi}{l}x\right) \quad (5.8)$$



Obr. 5.2 Vlastní tvary kmitu [3]

Počáteční podmínky popisují rozložení výchylek a rychlostí elementů struny v počátečním čase $t = 0$. Z výrazu (5.7) plynou vztahy (5.9), za podmínek $w(x,0) = f(x)$ a $\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)_{t=0} = g(x)$. Kvůli nalezení koeficientů P_n a Q_n musíme řešit úlohu Fourierových rozvojů funkcí $f(x)$ a $g(x)$ [3].

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \sin\left(\frac{n\pi}{l}x\right), \quad (5.9)$$

$$g(x) = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \left(\frac{n\pi c_s}{l}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}x\right)$$

Kmitání struny s osamělou hmotou:

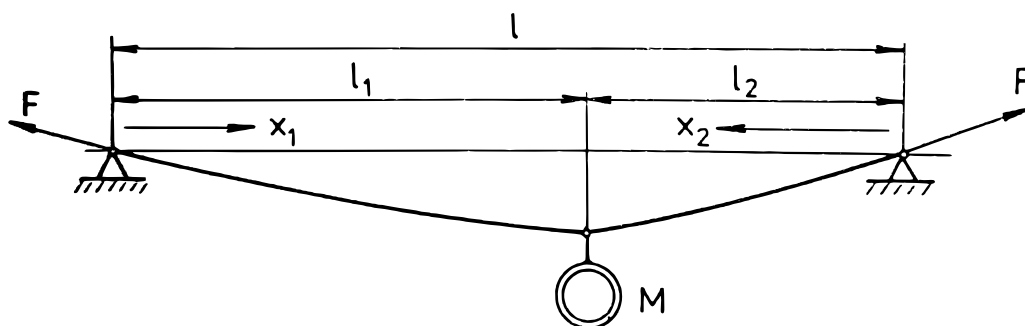
Toto kmitání vede na výraz frekvenční rovnice v tvaru

$$\frac{M}{m} \xi \sin\left(\xi \frac{l_1}{l}\right) \sin\left(\xi \frac{l_2}{l}\right) = \sin \xi \quad (5.10)$$

kde $\xi = \frac{\Omega}{c_s} l$ a hmotnost struny $m = m_l l$ následný tvar vlastního kmitání je dán výrazy (5.11), kde ξ_n je n -tý kořen rovnice z výrazu (5.10) [3].

$$w_{0n1} = C_n \sin\left(\xi_n \frac{x_1}{l}\right) \quad (5.11)$$

$$w_{0n2} = C_n \frac{\sin\left(\xi_n \frac{l_1}{l}\right)}{\sin\left(\xi_n \frac{l_2}{l}\right)} \sin\left(\xi_n \frac{x_2}{l}\right)$$



Obr. 5.3 Struna s osamělou hmotou [3]

6. Program FyDiK

Program FyDiK je veřejně dostupný ve variantě 2D a 3D. V této diplomové práci byla využita 2D varianta tohoto programu. Tento program byl vyvinut doc. Ing. Petrem Frantíkem, Ph.D. Program je založen na platformě Java Oracle [6].

Využití programu je nejčastěji pro zjištění velkých deformací, kmitání prutu, simulace sedání konstrukcí, lomu materiálu [7].

6.1. Diskrétní model FyDiK2D

Model je vytvořen z hmotných bodů, které jsou spojeny translačními pružinami. Hmotný bod je jediné místo, kde je v modelu soustředěna hmotnost. Další prvky modelu jsou vlastně zatížení, které působí na tyto hmotné body. Hmotnost je určena objemem V translační pružiny a hustotou materiálu ρ , který v modelu zaujímá. Tento hmotný bod také nahrazuje v modelu kloub, kterým jsou spojeny translační pružiny. Tyto pružiny jsou vlastně tyče s pružinkou uvnitř, na které vzniká prodloužení u . V této tyči vzniká interakční síla F , která je závislá na prodloužení u a na tuhosti pružiny K . Prodloužení u vznikne odečtením původní délky l_0 od aktuální délky l . Tuhost pružiny přímo závisí na modulu pružnosti materiálu E , na ploše pružiny A a nepřímo na počáteční délce l_0 . Dále jsou v modelu použity rotační pružiny, které jsou navázány na okolní 2 translační pružiny. Pomocí těchto pružin se do modelu zadává ohybová tuhost lana [7].

Výraz pro interakční sílu:

$$F = u K \quad (6.1)$$

Výraz pro tuhost translační pružiny:

$$K = \frac{E A}{l_0} \quad (6.2)$$

Výraz pro prodloužení u :

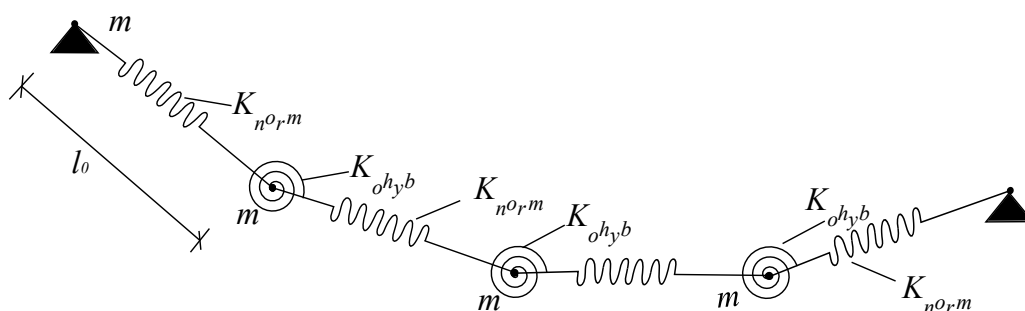
$$u = l - l_0 \quad (6.3)$$

Výraz pro hmotnost:

$$m = V \rho = l_0 A \rho \quad (6.4)$$

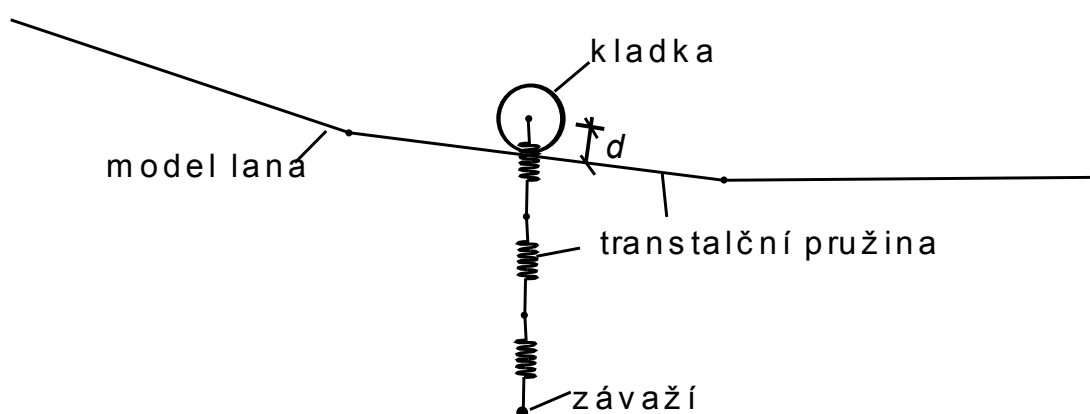
6.2. Model lanového skluzu

Konkrétní model, který byl vytvořen pro modelování lanového skluzu, je zatížen gravitačním zrychlením $g=9,81 \text{ ms}^{-2}$. Skládá se z hmotných bodů s danou hmotností. Hmotné body tvořící lano jsou spojeny dohromady translačními pružinami, do kterých jsou vloženy hodnoty plochy průřezu lana, tuhosti lana a jejich délka. Lano pro model skluzu je dále složeno z rotačních pružin, ve kterých je zadána ohybová tuhost. Na koncích je model lana přichycen do kloubových podpor, viz obr. 6.1.



Obr. 6.1 Modelové prvky pro model skluzu

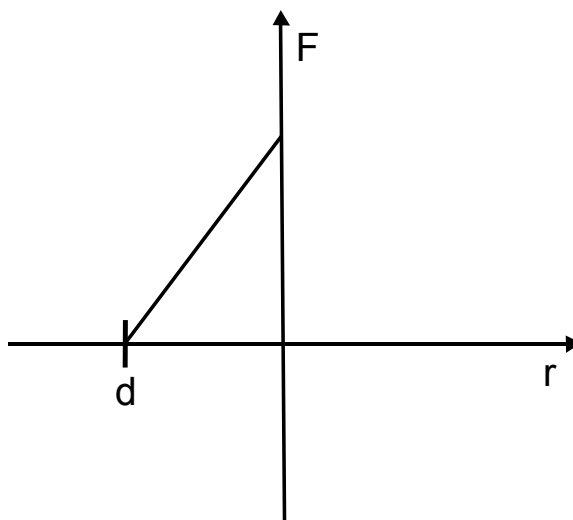
Dále jsou v modelu čtyři hmotné body, které představují kladku a závaží kladky, viz obr. 6.2. Bod nahrazující kladku působí na translační pružiny tvořící model lana pomocí interakční funkce, viz obr. 6.3. Tato funkce závisí na vzdálenosti středu kladky d od střednice nejbližší translační pružiny lana.



Obr. 6.2 Model kladky

Dostane-li se kladka do blízkosti translační pružiny začne působit interakční funkce, která brání propadnutí tohoto hmotného bodu skrz translační pružiny lana skluzu a

zajišťuje pohyb bodu po modelu lana, začne zároveň působit tlumení kladky nahrazující útlum vyvolaný kontaktem mezi lanem a kladkou.



Obr. 6.3 Interakční funkce

Model lana je složen ze 100 hmotných bodů a 99 translačních pružin a 98 rotačních pružin. Hmotné body v modelu mají každý hmotnost podle toho, kterou součást modelu představují.

6.3. Nastavení numerického modelu v programu FyDiK

Vzdálenost mezi podporami experimentálního skluzu je 1,5 m a výškový rozdíl 0,2 m a stejné hodnoty byly nastaveny i v numerickém modelu. Do hmotných bodů byla rozložena hmotnost provázku (187 μg na metr), která byla nastavena na hodnotu 2,94 μg pro jeden hmotný bod. Délka translačních pružin byla zjištěna rozdělením celkové délky provázku u experimentálního skluzu 1,571 m, na délku jedné pružiny 0,01587 m. V kapitole 7.1 je podrobně popsáno zjištění normálové tuhosti provázku. Z hodnot, které vyšly, byla odhadnuta relativní normálová tuhost $EA_l = 500 \text{ N}$. Ohybová tuhost lana $EI = 3,50 \times 10^{-6} \text{ Nm}^2$ vychází z náročnějšího experimentu, který je podrobněji popsán v kapitole 7.2. Translační pružiny reprezentující závěs závaží mají odhadnutou normálovou tuhost $EA_z = 60 \text{ kN}$.

Hmotnost kladky je 1,8 g a konstrukce pro zavěšení závaží a vedení kladky po provázku vážila 0,2 g. Závaží bylo složeno ze dvou částí, které vážily dohromady 5 g. Při vážení zvlášť vážila jedna část 1,5 g a druhá 3,5 g. Tyto hodnoty byly nastaveny také u hmotných bodů představujících tyto součásti v numerickém modelu.

Dalšími parametry ovlivňujícími pojezd kladky po provázku jsou konstanty tlumení jednotlivých prvků. Je užito takzvaného lineárního viskózního tlumení, definovaného pomocí parametru c . Toto tlumení je silou závislou na rychlosti hmotného bodu. Tlumící síla, jak už bylo uvedeno je odlišná pro volný hmotný bod a pro kladku v kontaktu s modelem lana.

Parametry pro tlumení numerického modelu byly nastavovány tak, aby bylo dosaženo co nejlepší podobnosti se skutečným modelem. Největší vliv na pohyb kladky mělo nastavení tlumení hmotného bodu kladky, následováno tlumením hmotných bodů představujících lano. Parametr c_1 představuje lineární viskózní tlumení a parametr c_2 kvadratické tlumení. Hodnoty zadané v modelu pro jednotlivé prvky můžeme najít v tabulce 6.1.

	$c_1 [\text{Ns m}^{-1}]$	$c_2 [\text{Ns}^2 \text{m}^{-2}]$
Hmotný bod kladky	0,0043000	0,0015000
Hmotné body lana	0,0003500	0,0001000
Hmotné body závaží kladky	0,0000001	0,0000000
Translační pružiny lana	0,0000100	0,0000000
Translační pružiny závaží kladky	0,0000000	0,0000000
Rotační pružiny	0,0000010	0,0000000

Tab. 6.1 Tlumení jednotlivých prvků numerického modelu

7. Zjištění tuhostí lana

Pro definici modelu lanového skluzu, bylo potřeba zjistit hodnoty tuhostí lana, který byl použit v modelu. Kvůli zjištění tuhostí provázku byly použity zkoušky, které měly přinést hodnoty tuhostí provázku. Pro zjištění normálové tuhosti provázku byla použita zkouška, při které se provázek zatíží závažím a odměří se protažení na přibližné určení normálové tuhosti. Další zkouška byla použita na určení ohybové tuhosti, a ta se prováděla pomocí vetknutí provázku a ohybu vlastní tíhou.

7.1. Normálová tuhost

7.1.1. Měření pomocí závaží

Pro zjištění normálové tuhosti provázku bylo potřeba nejdříve připevnit provázek na pevný úchyt a změřit délku při zatížení vlastní tíhou u_0 . Dále bylo zavěšeno závaží hmotnosti $m = 1 \text{ kg}$. Poté byla změřena délka po zatížení u_1 . Ke změření rychlé změření této délky bylo použito fotoaparátu a následného odměření v programu AutoCAD. Poté bylo zjištěno protažení Δu odečtením u_1 a u_0 . Normálová tuhost se následně získala násobením hmotnost m a gravitačním zrychlením g a pak dělením protažení provázku Δu . Další fáze byla vynásobit tuto vzniklou hodnotu normálové tuhosti původní délkou pro zjištění průměrné tuhosti.

První provedení experimentu:

$$K_{norm,1} = \frac{mg}{u_1 - u_0} = \frac{mg}{\Delta u} = \frac{1 * 9,81}{1,195 - 1,131} = \frac{1 * 9,81}{0,064} = 153,28 \frac{N}{m}$$

$$K_{norm} = K_{norm,1} u_0 = \frac{mg}{\varepsilon} = 153,28 * 1,131 = 173,36 \text{ N}$$

Druhé provedení experimentu: Tento experiment byl lépe udělán, takže došlo k menším nepřesnostem, způsobeným uvázáním a tím i k vyšší normálové tuhosti.

$$K_{norm,1} = \frac{mg}{u_1 - u_0} = \frac{mg}{\Delta u} = \frac{1 * 9,81}{0,5272 - 0,5124} = \frac{1 * 9,81}{0,0148} = 662,8 \frac{N}{m}$$

$$K_{norm} = K_{norm,1} u_0 = \frac{mg}{\varepsilon} = \frac{1 * 9,81}{0,5272 - 0,5124} * 0,5124 = 339,6 \text{ N}$$

7.1.2. Měření tahovou zkouškou v lisu

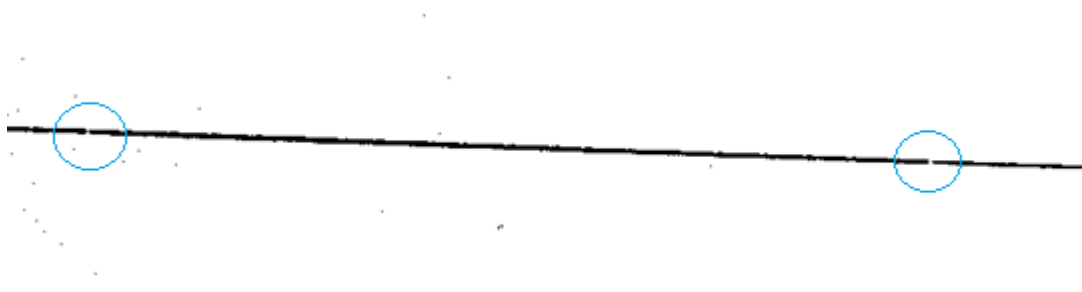
S vydatnou pomocí doktora Václava Sadílka byla provedena tahová zkouška v lisu v laboratoři stavební mechaniky. Zde byl uvázán provázek na čelisti lisu. Dále bylo pro možnost focení za provázek nachystán papír jednotné tmavé barvy, na provázek nakresleny čárky. Ty byly nakresleny pro možnost zjištění protažení této vzdálenosti mezi čárkami. Poté byl postaven monitor s hodnotou aktuálního zatížení provázku do záběru fotoaparátu. Před testem bylo ještě ustáleno zatížení při postupném dotažení a urovnání provázku v lisu. Ještě před spuštěním testu, byl postaven fotoaparát na stativ před lisem. Poté byl spuštěn test v lisu, který probíhal až do přetržení provázku. Při průběhu testu byl provázek zároveň i focen fotoaparátem na stativu.



Obr. 7.1 Příklad fotky provázku v lisu

7.1.3. Vyhodnocení tahové zkoušky

První výsledky zkoušky byly získány přímo ve formě elektronického výstupu z lisu zwick. Druhé výsledky byly získány pomocí optického měření fotoaparátem. úpravou fotek a získáním délek části provázku označené na fotografiích, které byly pořízeny při průběhu testu.



Obr. 7.2 Příklad převedení fotky [13]

Fotky musely být nejdříve upraveny pomocí funkce v programu napsaném doktorem Sadílkem. Tento program nastavil hodnotu thresh fotografií. Po téhle úpravě vznikly obrázky viz obr. 7.2, který je invertovaný. Na fotografii zůstaly jenom bílé části provázku. Program následně označil oblasti pomocí funkce regions a vybral největší plochu. Hranicemi plochy proložil obdélník a z něj zjistil délku v provázku mezi označenými body v pixelech. Z těchto délek a změřené počáteční délky byly zjištěny protažení provázku [13].

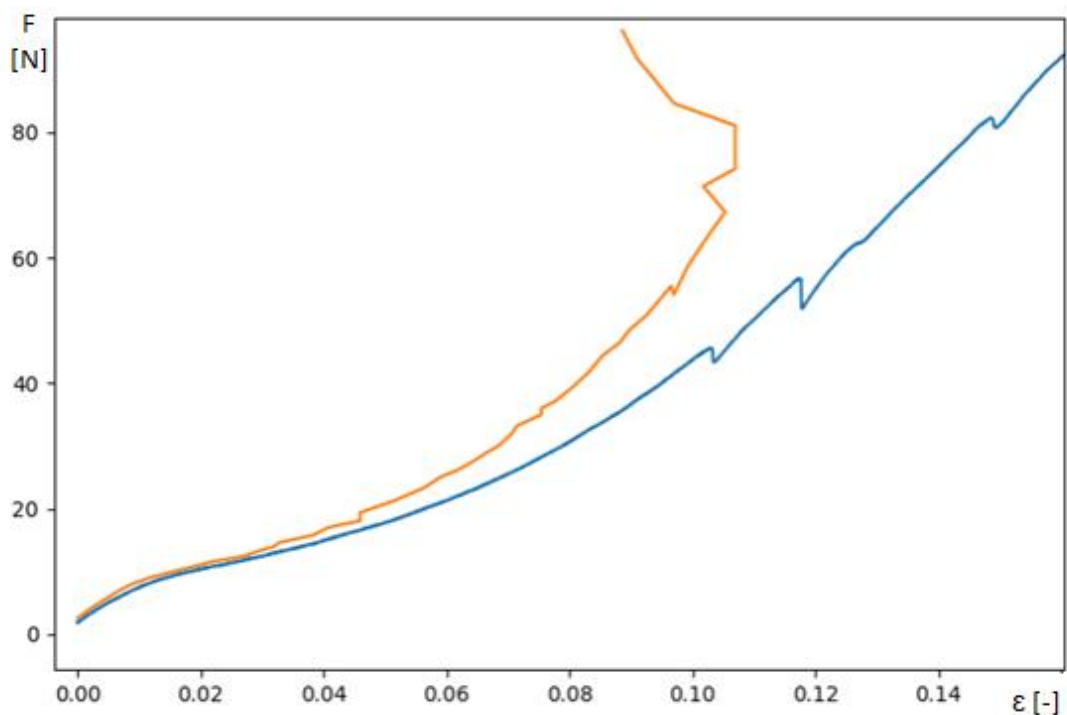
Výsledky ze snímků a výsledky ze zwicku byly vyneseny do grafu 7.3. Před vynesením grafu byly hodnoty z výsledků poděleny počátečními délkami, aby vzniklo poměrné přetvoření a daly se hodnoty porovnat.

$$K_{norm,1,lis} = \frac{F}{l_1 - l_0} = \frac{F}{\Delta l} = \frac{11}{0,8509 - 0,8419} = \frac{11}{0,009} = 1222,2 \frac{N}{m}$$

$$K_{norm,1,foto} = \frac{F}{l_1 - l_0} = \frac{F}{\Delta l} = \frac{11}{0,1745 - 0,1711} = \frac{11}{0,0034} = 3235,2 \frac{N}{m}$$

$$K_{norm,lis} = K_{norm,1,lis} l_0 = \frac{F}{\varepsilon} = \frac{11}{0,022} = 509,05 N$$

$$K_{norm,foto} = K_{norm,1,foto} l_0 = \frac{F}{\varepsilon} = \frac{11}{0,020} = 561,80 N$$



Obr. 7.3 Graf průběhu síly a poměrného přetvoření [13]

$$L_{0,\text{foto}} = 171,1 \text{ mm}$$

$$L_{0,\text{lis}} = 417 \text{ mm}$$

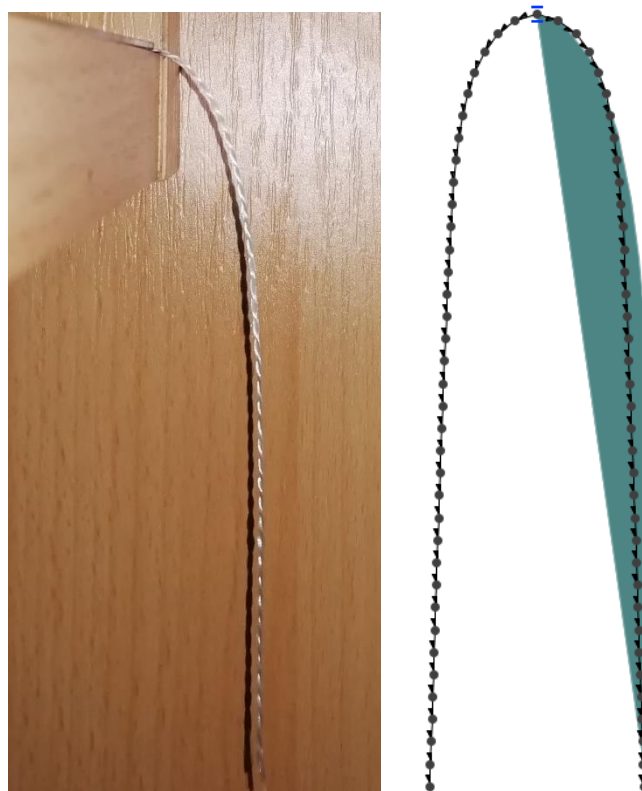
F [N]	L_foto [m]	ΔL_{foto} [m]	ϵ_{foto} [-]	K_foto [N]	L_lis [m]	ΔL_{lis} [m]	ϵ_{lis} [-]	K_lis [N]
2,600	171,151	-	-	-	841,915	-	-	-
4,300	171,555	0,404	0,002	1820,975	842,984	1,069	0,003	1677,362
7,000	172,317	1,166	0,007	1027,450	845,198	3,283	0,008	889,126
8,000	172,658	1,507	0,009	908,778	846,237	4,322	0,010	771,865
9,000	173,140	1,989	0,012	774,623	847,516	5,601	0,013	670,059
9,900	173,750	2,599	0,015	651,945	848,921	7,006	0,017	589,252
11,000	174,502	3,351	0,020	561,803	850,926	9,011	0,022	509,045
11,600	174,911	3,760	0,022	528,059	852,280	10,365	0,025	466,686
12,000	175,315	4,163	0,024	493,304	853,115	11,200	0,027	446,786
12,500	175,791	4,640	0,027	461,058	854,182	12,267	0,029	424,921
13,300	176,203	5,051	0,030	450,646	855,406	13,491	0,032	411,096

Tab. 7.1 Normálové tuhosti provázku

Tuhost provázku byla zvolena pro numerický model v lineární oblasti, a to kvůli velice malé hmotnosti kladky a závaží na kladce.

7.2. Ohybová tuhost

Měření ohybové tuhosti EI provázku se provádělo ohybovou zkouškou. Provázek byl upevněn jako konzolový nosník zatížený vlastní tíhou. Pro zjištění hmotnosti provázku na jeden metr bylo potřeba, kvůli malé měrné hmotnosti, změřit hmotnost osmimetrového provázku, který vážil 1,5 g. Z této hmotnosti plyne hmotnost provázku 0,1875 g/m. Následovala ohybová zkouška provázku o volné délce 108 mm. Deformovaný tvar byl vyfocen a pomocí programu AutoCAD převeden na křivku. Tato křivka byla poté užita k identifikaci ohybové tuhosti pomocí numerického modelu FyDiK. Následné převedení pomocí souřadnic bodů křivky do programu FyDiK, pomocí polygonu a vytvoření numerického model vetknutí provázku, který se pomocí úpravy ohybové tuhosti rotačních pružin, se docílilo výsledné ohybové tuhosti provázku $K_{ohyb} = 0,0035 \text{ mNm}^2$.



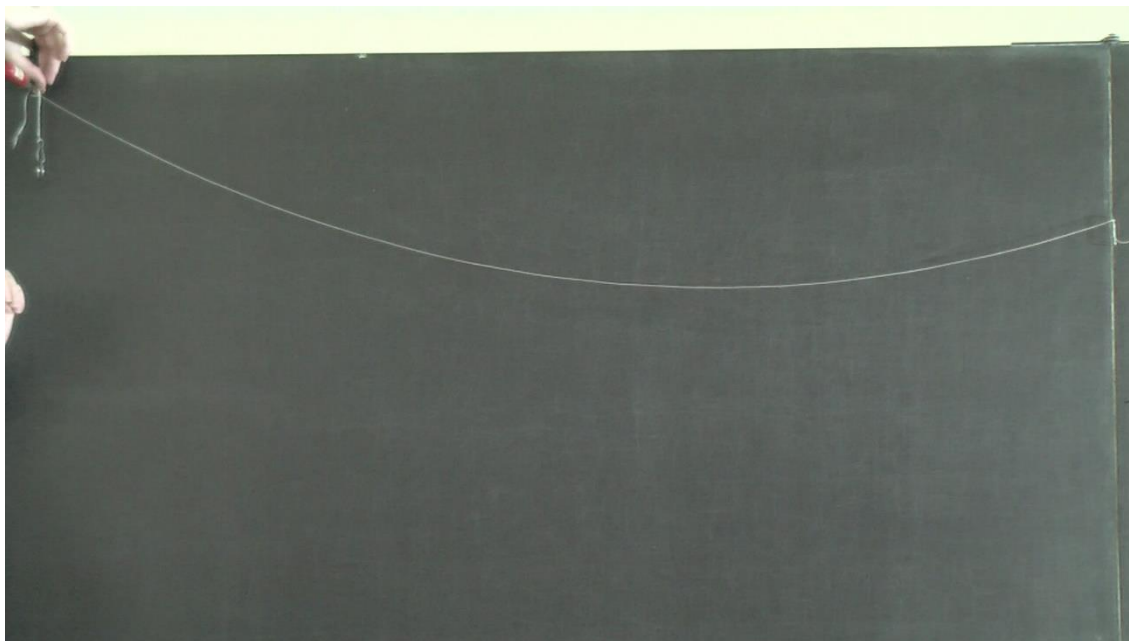
Obr. 7.4 Fotografie provázku a obrázek modelu pro zjištění ohybové tuhosti

8. Experimentální lanový skluz

Pro vytvoření modelu lanového skluzu, byl použit provázek z umělých vláken průměru 0,8mm, dále kladka z mosazi s průměrem 14 mm a pomocí drátku byla vytvořena konstrukce okolo kladky, aby se na ni dalo pověsit závaží a aby nedocházelo k překlopení kladky na provázku při pojezdu.

8.1. Videozáznam experimentu

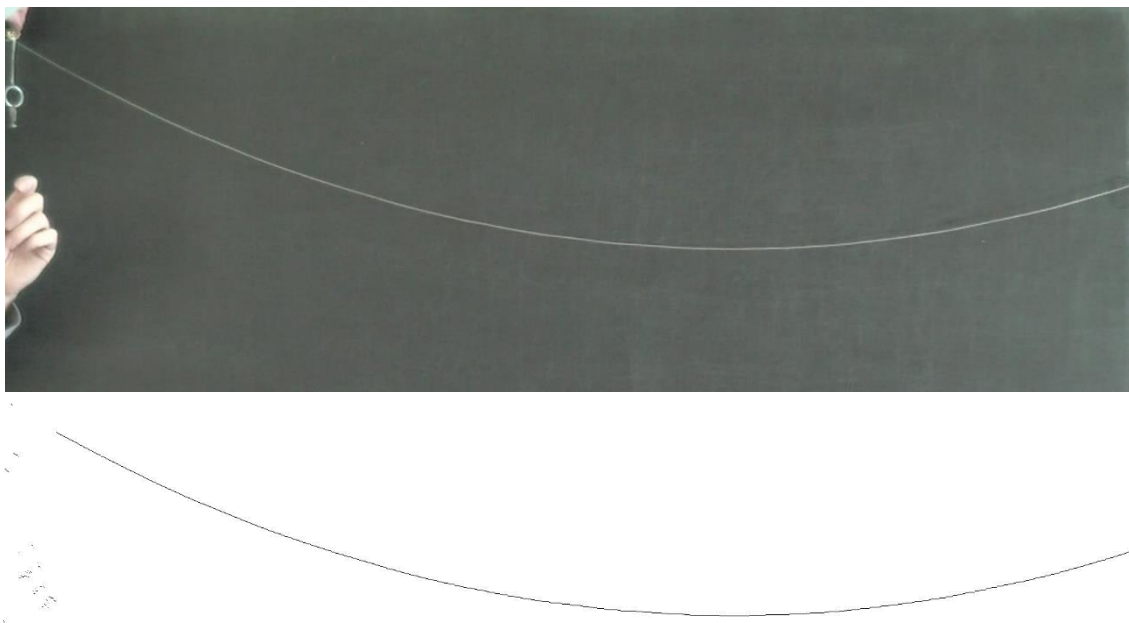
Natáčení pojezdu kladky, bylo uskutečněno před tabulí, aby bylo za provázkem co nejvíce jednotné prostředí. Model byl sestaven pomocí svorek, které byly připevněny na tabuli. Byla odměřena vzdálenost 1500 mm mezi svorkami a výškový rozdíl mezi nimi byl nastaven na 200 mm. Na takto upevněné svorky byl přivázán provázek délky 1571 mm. Následně byla připravena kamera na stativu. Natáčení probíhalo v rozlišení full HD, což je 1920x1080 pixelů. Dále bylo potřeba nasvítit tabuli, aby nevznikaly stíny, které by vadily lepšímu rozpoznání provázku na fotce. Poté se několikrát spouštěla kladka se závažím po provázku. Bylo zkoušeno spouštění s posazením kladky přímo na provázek, čímž vznikne počáteční stav s protaženým lanem, a také bylo vyzkoušeno několik pojezdů s puštěním kladky na nedeformovaný počáteční stav provázku, který vzniká pouze vlastní tíhou provázku.



Obr. 8.1 Lanový skluz

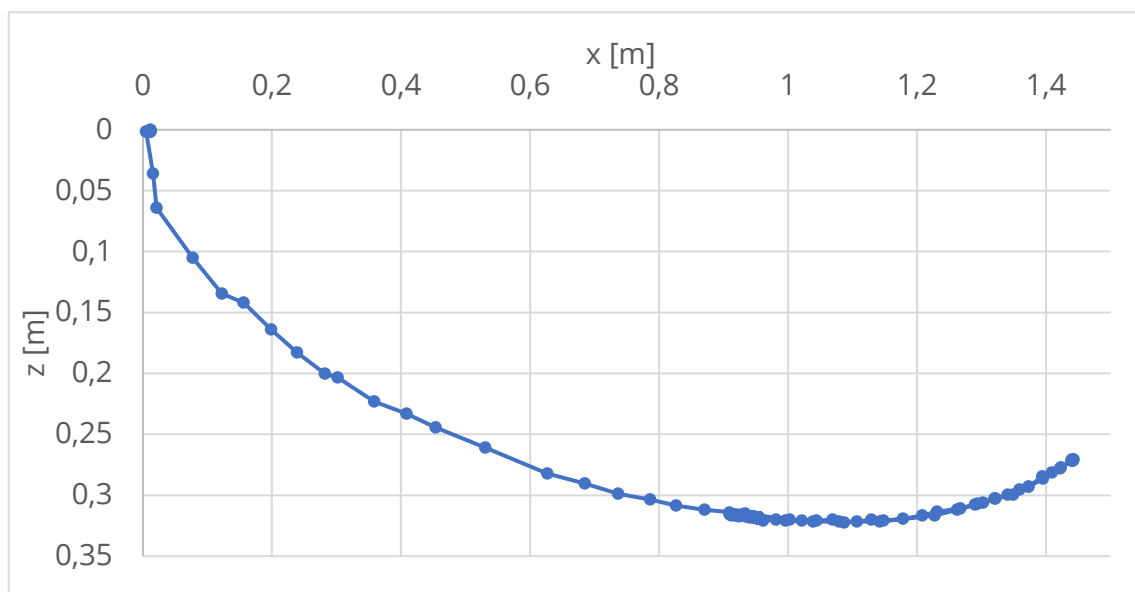
8.2. Převod videa

Video bylo rozloženo na jednotlivé snímky pomocí programu Avidemux. Následně byly snímky ořezány a byl nalezen nejsvětlejší pixel v každém sloupci pixelů. Z toho vznikla zvýrazněná poloha provázku v každém okamžiku vyfocení pojezdu kladky.



Obr. 8.2 Průhybová křivka lana před a po zvýraznění

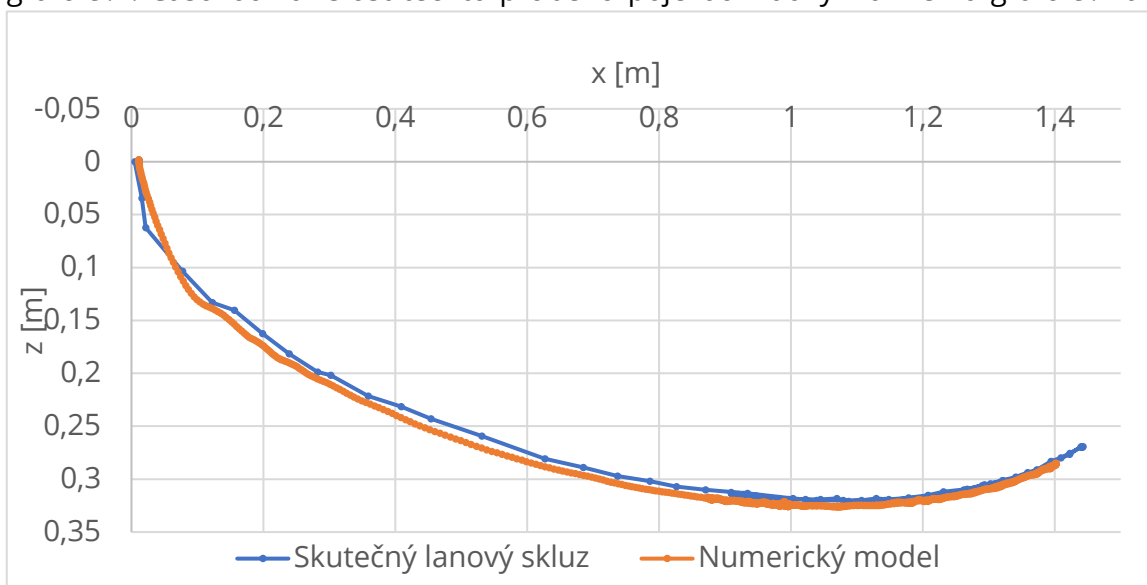
Dále byly zjištěny polohy kladky na každé fotografii. A to přímo ručním zvýrazněním polohy kladky na fotografiích a následným určením souřadnic pixelů pomocí programu a převedením do grafu.



Obr. 8.1 Graf polohy kladky při pojezdu

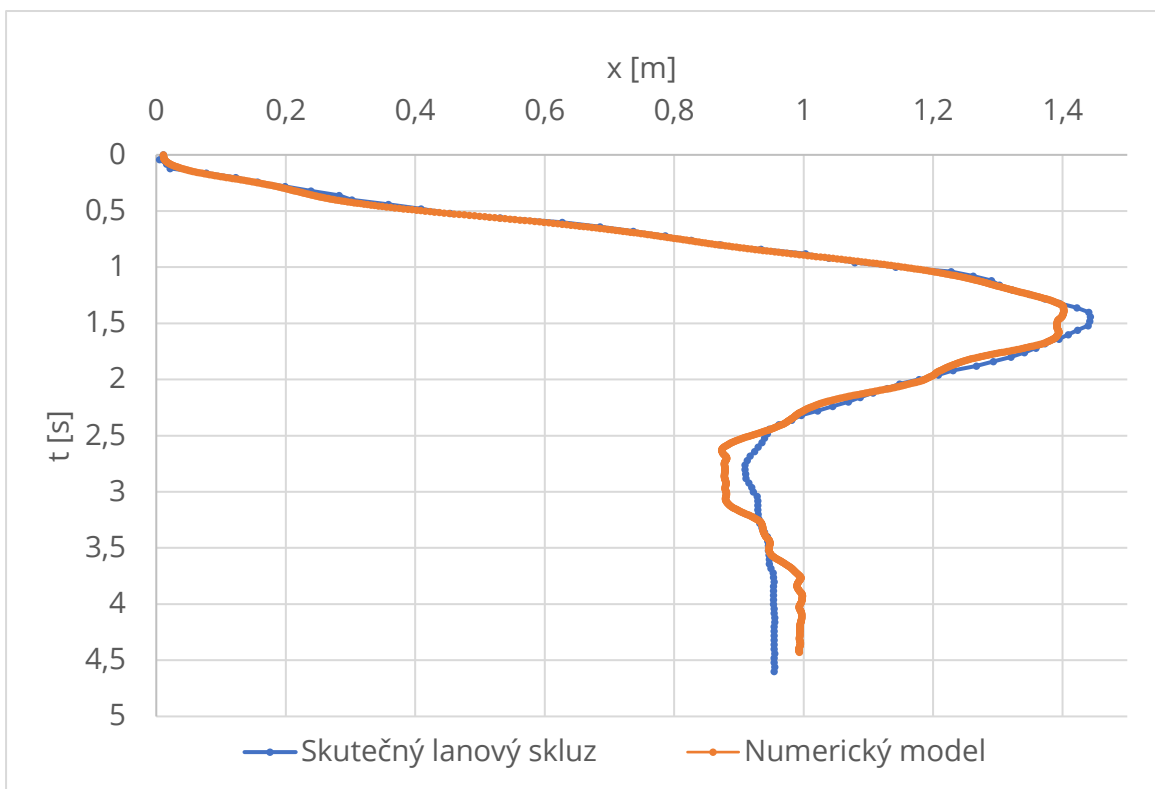
9. Srovnání lanového skluzu s numerickým modelem

Srovnání poloh kladky lanového skluzu a v numerickém modelu můžeme vidět na grafu 9.1. Časovou závislost těchto průběhů pojezdů kladky vidíme na grafu 9.2 a

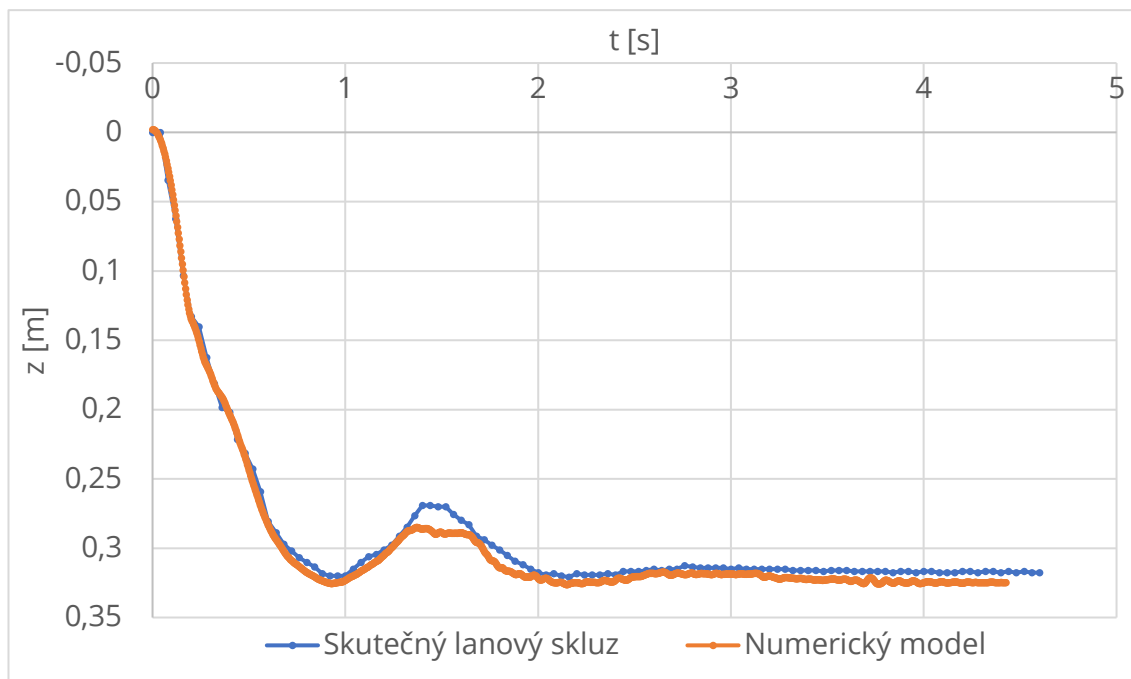


9.3.

Obr. 9.1 Graf srovnání poloh kladky

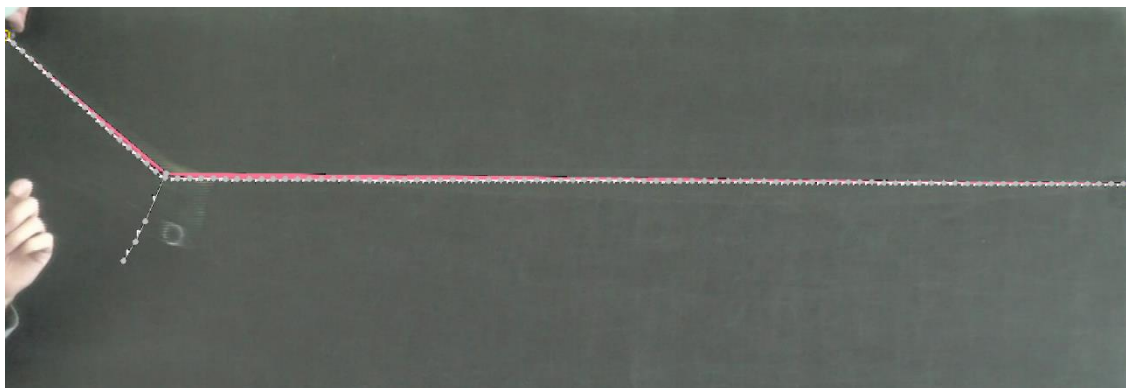


Obr. 9.2 Graf srovnání časové závislosti poloh kladky v ose x

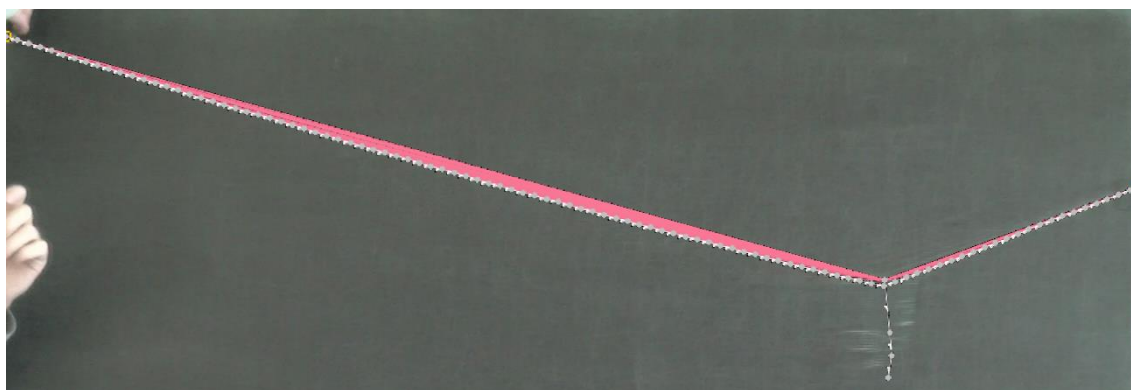


Obr. 9.3 Graf srovnání časové závislosti poloh kladky v ose z

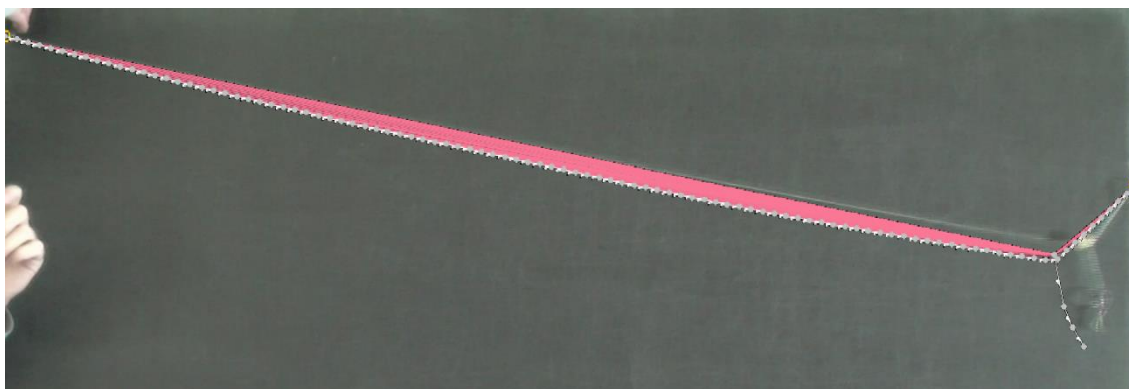
Dále bylo provedeno srovnání tvaru a polohy celého modelu s lanovým skluzem, a to v několika určitých časech pojezdu kladky lanového skluzu.



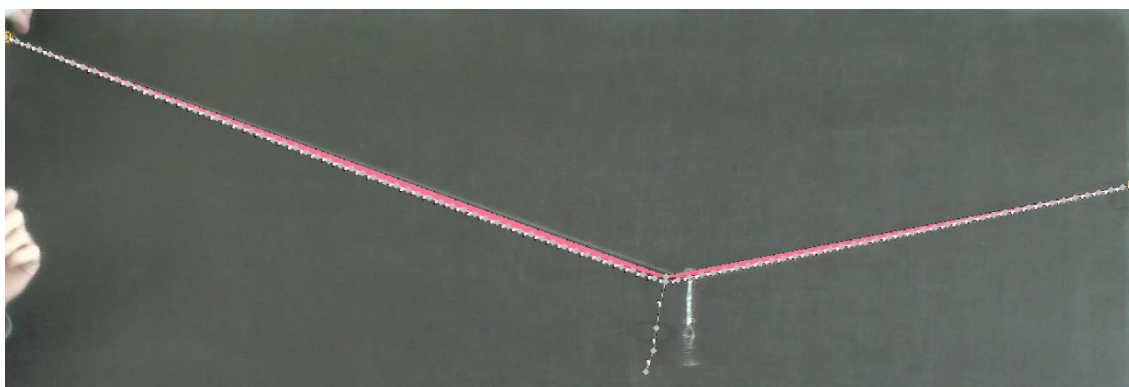
Obr. 9.4 Poloha numerického modelu a lanového skluzu v čase 0,32 s



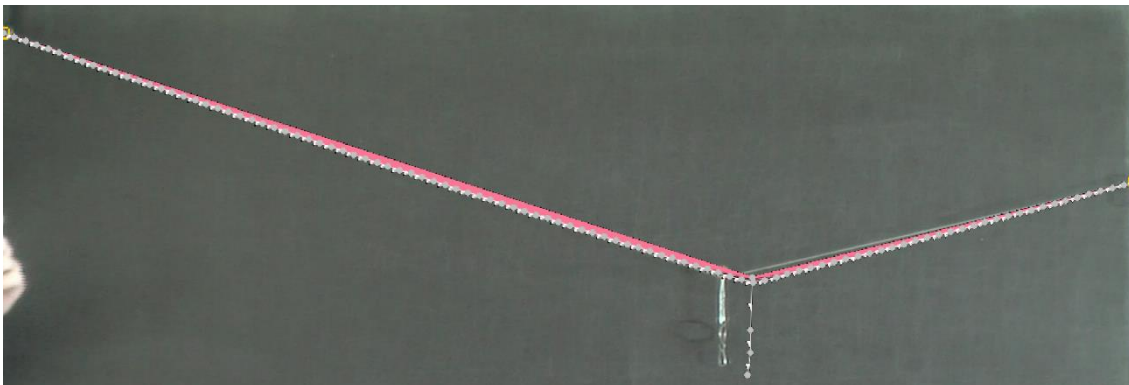
Obr. 9.5 Poloha numerického modelu a lanového skluzu v čase 1,00 s



Obr. 9.6 Poloha numerického modelu a lanového skluzu v čase 1,52 s



Obr. 9.7 Poloha numerického modelu a lanového skluzu v čase 2,76 s



Obr. 9.8 Poloha numerického modelu a lanového skluzu v čase 4,12 s

10. Závěr

V diplomové práci byla zkoumána konstrukce lanového skluzu a pohyb kladky po lanovém skluzu. Nejprve byly zkouškami zjištěny parametry součástí, z kterých byl vytvořen lanový skluz. Následně byl lanový skluz zkonstruován, a to před jednotným pozadím. Jednotné pozadí bylo potřeba pro lepší analýzu výsledného záznamu pojezdu kladky po laně. Ze záznamu byl získán časový průběh polohy kladky při jejím pohybu.

Poté byl vytvořen numerický model, ve kterém se použily předem zjištěné hodnoty tuhostí lana, hmotností a délek všech součástí. Následně se numerický model nastavoval pomocí hodnot lineárního a kvadratického viskózního tlumení hmotných bodů a translačních pružin, aby polohový a časový průběh pojezdu kladky odpovídal skutečnému lanovému skluzu.

Výsledné porovnání obou pojezdů kladky dopadlo ve velké části průběhu velmi dobře. V oblastech větších rychlostí kladky se časová závislost průběhů na poloze ve směru osy x a také směru osy z velice blíží. V oblastech zpomalení, zastavení a znovu rozjetí kladky se tyto průběhy časově závislé polohy mírně odlišují. Také zde dochází k chvilkovým kolísáním rychlosti hmotného bodu modelu kladky, které způsobují změny v chování kladky. Jeden z důvodů je houpání složeného závaží na kladce, což je patrné i v případě experimentálního skluzu tak i u numerickém modelu. Druhým z důvodů je, že model kladky je představován jedním hmotným bodem, a to zapříčiňuje pohyb, při kterém se kladka netočí po modelu lana a dále, že lano je v modelu tvořeno polygonem translačních pružin. Řešením by mohlo být vytvoření modelu kladky z několika hmotných bodů do kruhového tvaru a vytvořit tak model schopný se pohybovat točivým pohybem po modelu lana.

11. Literatura

- [1] KADLČÁK, Jaroslav a Jiří KYTÝR. Statika stavebních konstrukcí. 3. vyd. Brno: Vutium, 2007. ISBN 978-80-214-3419-6.
- [2] OTTO, Jan. *Ottův slovník naučný: ilustrovaná encyklopedie obecných vědomostí*. Praha, 1900. ISBN 80-7185-200-7.
- [3] BREPTA, Rudolf, František TUREK a Ladislav PŮST. *Mechanické kmitání*. Praha: Sobotáles, 1994. Česká matice technická (Sobotáles). ISBN 80-901-6848-5.
- [4] TEYSSLER, KOTYŠKA, Václav, ed. *Technický slovník naučný: ilustrovaná encyklopedie věd technických*. [1. vyd.]. Praha: Nakladatelé Borský a Šulc, 1931.
- [5] KOLOUŠEK, Vladimír. Dynamika stavebních konstrukcí I. obecná část. 2. vydání. Brno: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1967.
- [6] DOBROVOLNÝ, Tomáš. *Srovnání geometrie kleneb historických staveb s výpočtovým modelem*. Brno, 2017. 43 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.
- [7] FRANTÍK, Petr. *DISKRÉTNÍ MODEL FYDIK2D* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <http://www.kitnarf.cz/publications/2009/2009.05.mm.cl1/2009.05.mm.cl1.pdf>
- [8] WIKIPEDIE. *Drátěné lano*. [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Drátěné_lano
- [9] Reflex. *Ve Spojených arabských emirátech vznikl šílený lanový skluz. Nejdelší a nejrychlejší na světě* [online]. [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: <https://www.reflex.cz/clanek/zajimavosti/84984/ve-spojenych-arabskych-emiratech-vznikl-sileny-lanovy-skluz-nejdelsi-a-nejrychlejsi-na-svete.html>
- [10] WIKIPEDIE. *Lanový skluz*. [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lanový_skluz
- [11] WIKIPEDIE. *Lano*. [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Lano>
- [12] WIKIPEDIE. *Textilní lano*. [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Textilní_lano
- [13] SADÍLEK, Václav. *Program v jazyce python*. [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <http://khub.stm.fce.vutbr.cz:8000>

12.Seznam ilustrací:

Obr. 1.1 Lanový skluz	1
Obr. 2.1 Stáčené konopné lano	3
Obr. 2.2 Duté lano	4
Obr. 2.3 Jednoprarmenná lana	4
Obr. 2.4 Standartní lana	5
Obr. 2.5 Lana typu SEAL	5
Obr. 2.6 Lana typu Herkules	5
Obr. 2.7 Lana typu Warrington	5
Obr. 4.1 Vláknoový polygon	6
Obr. 4.2 Parabolická řetězovka	9
Obr. 4.3 Tížná řetězovka	11
Obr. 5.1 Kmitání struny	13
Obr. 5.2 Vlastní tvary kmitu	14
Obr. 5.3 Struna s osamělou hmotou	15
Obr. 6.1 Modelové prvky pro model skluzu	17
Obr. 6.2 Model kladky	17
Obr. 6.3 Interakční funkce	18
Obr. 7.1 Příklad fotky provázku v lisu	21
Obr. 7.2 Příklad převedení fotky	22
Obr. 7.3 Graf průběhu síly a poměrného přetvoření	23
Obr. 7.4 Fotografie provázku a obrázek modelu pro zjištění ohybové tuhosti	24
Obr. 8.1 Lanový skluz	25
Obr. 8.2 Průhybová křivka lana před a po zvýraznění	26
Obr. 8.3 Poloha kladky při pojezdu	26

Obr. 9.1 Graf srovnání poloh kladky	27
Obr. 9.2 Graf srovnání časové závislosti poloh kladky v ose x	28
Obr. 9.3 Graf srovnání časové závislosti poloh kladky v ose z	28
Obr. 9.4 Poloha numerického modelu a lanového skluzu v čase 0,32 s	28
Obr. 9.5 Poloha numerického modelu a lanového skluzu v čase 1,00 s	28
Obr. 9.6 Poloha numerického modelu a lanového skluzu v čase 1,52 s	29
Obr. 9.7 Poloha numerického modelu a lanového skluzu v čase 2,76 s	29
Obr. 9.8 Poloha numerického modelu a lanového skluzu v čase 4,12 s	29

13.Seznam tabulek:

Tab. 7.1 Normálové tuhosti provázku	19
Tab. 6.1 Tlumení jednotlivých prvků numerického modelu	23

14. Seznam příloh:

Digitální příloha: Numerický model lanového skluzu