



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav letadlové techniky**

**Návrh startovací rampy pro výkonnou  
modelovou raketu**

**Design of launch pad for high power  
model rocket**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2020**

**Petr HÝBNER**

**Studijní program:** B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

**Studijní obor:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Vedoucí práce:** Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hýbner** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **458781**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh startovací rampy pro výkonnou modelovou raketu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of launch pad for high power model rocket**

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Navrhněte rozebiratelnou a snadno přepravitelnou startovní rampu pro modelovou raketu kategorie HPR-EX (High Power Rocketry - EXperimental). Předpokládejte startovní hmotnost rakety 10-20 kg a startovní poměr tah:hmotnost 4:1 až 7:1.
- 2) Proveďte pevnostní analýzu rampy při startu takovéto rakety.
- 3) Proveďte kontrolu stability rampy s ohledem na dynamiku startu a případné přípustné meze povětrnostních podmínek.

Seznam doporučené literatury:

Mark Canepa, Modern High-power Rocketry, vol. 2, Trafford Publishing, 2005, ISBN 1412058104  
+ další literatura dle doporučení vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D., ústav letadlové techniky FS**


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce:

  
Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
Ing. Robert Theiner, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh startovací rampy pro výkonnou modelovou raketu“ vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Jaroslava Kousala, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

*V Praze dne .....*

.....

*Podpis autora*

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Mgr. Jaroslavu Kousalovi, Ph.D. za pomocné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce.

Svým rodičům za neustálou podporu při studiu.

Daniele Hýbnerové za grafické zpracování výpočtových modelů.

Jméno autora: Petr Hýbner  
Název BP: Návrh startovací rampy pro výkonnou modelovou raketu  
Anglický název: Design of launch pad for high power model rocket  
Rok: 2020  
Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství  
Obor studia: 2301R000 Studijní program je bezoborový  
Ústav: Ústav letadlové techniky  
Vedoucí BP: Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D.  
Konzultant:  
Bibliografické údaje: počet stran 45  
počet obrázků 26  
počet tabulek 1  
počet příloh 8  
Klíčová slova: Vysoce výkonná modelová raketa, startovací rampa  
Keywords: High power model rocket, launch pad

## **Anotace**

Cílem této práce je návrh rozebíratelné startovací rampy pro experimentální modelovou raketu. Zpracoval jsem rešerši různých typů startovacích ramp a z těch vybral ten nejvhodnější. Součástí práce je kontrola stability a maximálního napětí vznikajícího při startu rakety.

## **Abstract**

The goal of this thesis is to design a foldable launch pad for experimental model rocket. I researched commonly used types of model launch pads and out of those chose the most suitable one. Part of this thesis is focused on determining the overall stability of ramp and inspecting the maximum tension created during launch.

# Obsah

1.	ÚVOD .....	- 1 -
2.	TEORETICKÁ ČÁST .....	- 1 -
2.1.	MODELOVÉ RAKETY .....	- 1 -
2.2.	VYSOCE VÝKONNÉ MODELOVÉ RAKETY.....	- 2 -
2.3.	EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÉ RAKETY.....	- 3 -
2.4.	SHRNUTÍ.....	- 3 -
2.5.	VODÍCÍ RAMPY .....	- 5 -
2.5.1.	TYČOVÉ RAMPY .....	- 5 -
2.5.2.	KOLEJNICOVÉ RAMPY .....	- 5 -
2.6.	DOTYKOVÉ RAMPY .....	- 6 -
2.7.	POROVNÁNÍ .....	- 7 -
2.8.	METODY VÝPOČTU .....	- 8 -
3.	PRAKTICKÁ ČÁST .....	- 9 -
3.1.	DEFINOVÁNÍ PARAMETRŮ RAKETY .....	- 9 -
3.2.	POTŘEBNÁ DÉLKA RAMPY .....	- 9 -
3.3.	DOVOLENÝ PRŮHYB .....	- 10 -
3.3.1.	KOLEJNICOVÁ RAMPA .....	- 10 -
3.3.2.	TYČOVÁ RAMPA.....	- 14 -
3.3.3.	DOTYKOVÁ RAMPA .....	- 16 -
3.3.4.	VÝBĚR.....	- 18 -
3.4.	NÁVRH KONSTRUKCE .....	- 19 -
3.5.	DIMENZOVNÍ ROZMĚRŮ KOLEJNICOVÉ RAMPY.....	- 23 -
3.5.1.	PRŮHYB.....	- 23 -
3.5.2.	NAPĚTÍ.....	- 23 -
3.5.3.	VZPĚR .....	- 25 -
3.5.4.	KONTROLA STABILITY .....	- 25 -
3.6.	POVĚTRNOSTNÍ PODMÍNKY.....	- 27 -
3.7.	PŘEPRAVA .....	- 28 -
3.8.	DYNAMIKA .....	- 29 -
4.	ZÁVĚR .....	- 34 -
5.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	- 35 -
6.	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	- 36 -
7.	SEZNAM TABULEK.....	- 37 -
8.	SEZNAM PŘÍLOH .....	- 38 -

# 1. Úvod

Startovací rampy jsou nezbytné pro start modelových raket. Jejich hlavní funkcí je držet raketu ve vzpřímené poloze během příprav ke startu a po zažehnutí motoru udržovat její směr, než raketa dosáhne rychlosti, při které začnou fungovat aerodynamické stabilizátory. Startovací rampa proto musí mít tak dlouhou vodící tyč, aby raketa opustila rampu s dostatečnou rychlostí a nevychýlila se z požadovaného směru. Dále je potřeba zajistit tuhost celé soustavy a stabilní ukotvení. Nedostatečná tuhost může způsobit vychýlení rakety ze směru a tím zvýšit tření vodítka o rampu, což může způsobit i zaseknutí modelu v rampě. Z tohoto důvodu je potřeba i stabilní ukotvení na zemi, aby se rampa nepřevrátila při nepovedeném startu. [1]

Aktuálně existují tři základní typy startovacích ramp. Tyčové, kolejnicové a dotykové. Nejjednodušší typ je rampa tyčová, následně kolejnicová a konstrukčně nejsložitější je rampa dotyková. Jednotlivé typy startovacích ramp, jejich výhody a nevýhody, jsou rozebrány v teoretické části této práce.

Cílem této bakalářské práce je návrh startovací rampy pro experimentální modelovou raketu. Jedná se o rozebíratelnou a tím pádem i přenosnou, startovací rampu. V teoretické části se budu zabývat rozdíly mezi běžnými modelovými raketami a vysoce výkonnými modelovými raketami. Porovnáám zde výhody a nevýhody jednotlivých typů startovacích ramp a také způsob, kterým vedou modelovou raketu. V praktické části se budu věnovat výběru nejhodnější rampy z výše uvedených typů. Následně provedu pevnostní analýzu rampy, a poté kontrolu stability při startu.

## 2. Teoretická část

Než se pustím do problematiky jednotlivých typů startovacích ramp a jejich výhod či nevýhod, bylo by dobré se seznámit s modelem, pro který bude rampa navržena. Nebude se totiž jednat o běžně dostupný model rakety, ale o experimentální model s motorem vlastní výroby. Nejprve tedy představím jednotlivé stupně výkonnosti modelových raket, a poté shrnu hlavní body, v nichž se od sebe výkonnostní stupně odlišují.

### 2.1. Modelové rakety

Takto se označují rakety, které si může každý koupit v obchodě bez potřeby certifikace. Jsou omezeny pouze věkem, podobně jako zábavní pyrotechnika. Můžeme se setkat jak s modely, které jsou připraveny k letu ihned nebo s modely vyžadující minimální montáž. Ty jsou vhodné pro někoho, kdo chce s nízkou námahou získat funkční raketu. Motorčky jsou vyráběny profesionální firmou (například Estes), proto jsou lehce dostupné a pokaždé podávají stejný maximální tah a průběh tahu. Díky této produkci motorů si můžeme vyrobit vlastní model rakety doma a dokoupit pouze motor s vhodnými specifikacemi.

Tyto modely nepřesahují hmotnost 1 500 g a nemohou obsahovat nosné kovové součásti. Jsou také omezeny výkonem motoru, který můžeme pro tyto rakety použít. Motory jsou rozděleny do tříd podle specifického impulzu a označeny podle abecedy od nejslabších po nejvýkonnější. V tabulce 1 na konci kapitoly navíc vidíme rozdělení motorů na málo výkonné a středně výkonné.





Obrázek 1: Modelová raketa [2]

## 2.2. Vysoce výkonné modelové rakety

Pro rakety této klasifikace, respektive pro motory, které se dají koupit v této třídě, je již potřeba certifikace. Z již zmíněné tabulky na konci kapitoly vidíme, že se navíc dělí do tří úrovní. Pro získání certifikace existují různé požadavky, nicméně dělení je opět podle maximálního impulzu. Kromě výkonu jednoho motoru, model rakety přejde ve vysoce výkonný model, pokud celkový impulz všech motorů překročí  $320 \text{ N}\cdot\text{s}$  nebo používá hybridní motor, má více než 125 g paliva, či překročí hmotnost 1 500 g. U těchto modelů již může být použit kov pro stavbu draku. Tyto modely už nejsou omezeny v podstatě ničím a mohou být libovolných rozměrů a hmotností. [3]

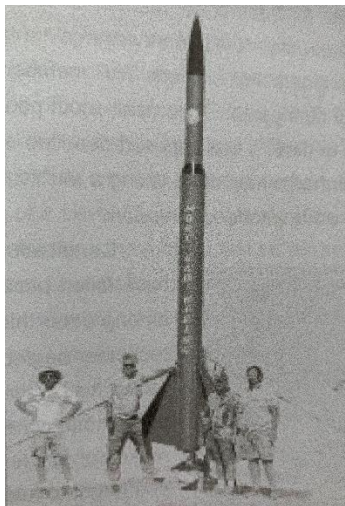


Obrázek 2: Start výkonné modelové rakety [3]

## 2.3. Experimentální modelové rakety

Rakety v této kategorii patří na vrchol modelářských raket a dosahují značných rozměrů, což je patrné z obrázku 3. Pro rakety v této kategorii je nutné si vyvinout a postavit vlastní motor. Může se jednat o motor na tuhá paliva, ale častěji bývá použit motor hybridní. V této kategorii jde tedy spíše o samotný návrh a stavbu rakety, jelikož dosažení požadovaných parametrů motoru je časově náročné a složité. U vlastnoručně vyrobeného motoru je nutností zajistit jeho bezpečný provoz a výrobu. Dále si musíme být jisti, že podá pokaždé stejný výkon. Potřebujeme zjistit, jak velký tah produkuje a jaký má průběh tahu, abychom věděli, na jakou raketu ho můžeme použít.

Se stavbou vlastního motoru souvisí i vlastní konstrukce návratového zařízení. U zakoupených motorů pro modelové rakety i pro vysoce výkonné modelové rakety je součástí motoru také vymetací nálož. Ta je oddělena od paliva časovacím zrnem a po dohoření motoru rozdělí raketu na dvě, nebo více částí a vypustí padák. Stejným způsobem můžeme vyřešit vypuštění návratového zařízení u vlastního motoru na tuhá paliva. Ovšem pokud bude použit motor hybridní, je nutné zajistit vypuštění padáku jiným způsobem. I u těchto raket se nejčastěji používá vymetací nálož, která je však odpálena elektronicky v závislosti na výšce, nebo čase. Nutností je tedy použití avioniky, která bude měřit výšku a následně ve vhodný moment vypustí padák. [4]



Obrázek 3: Experimentální raketa "More Bad Wiring" [5, str. 277]

## 2.4. Shrnutí

Běžné modelové rakety od vysoce výkonných odděluje třída zakoupeného motoru, tedy třída A-G pro modelové rakety a třídy H-O pro vysoce výkonné modelové rakety. Do vyšší kategorie se ovšem můžeme dostat i při použití méně výkonných motorů, jejichž celkový maximální impuls přesahuje danou mez. Do experimentální kategorie patří všechny rakety s motorem, který není komerčně dostupný. Může to být námi navržený a vyrobený motor, nebo i zakoupený motor od zkušeného modeláře, který ale nemá certifikaci. V tabulce 1 na následující stránce je podrobný přehled rozdělení motorů podle maximálního impulsu a na obrázku 4 porovnání velikostí různě výkonných motorů od třídy C až po G.

Tabulka 1: Klasifikace raketových motorů na tuhé palivo [6]

<b>Rozdělení raketových motorů na tuhé palivo podle maximálního impulzu</b>			
Klasifikace	Rozsah impulzu	Maximální impulz [N*s]	Kategorie
Modelové rakety	A	2,5	Málo výkonné
	B	5	
	C	10	
	D	20	
	E	40	Středně výkonné
	F	80	
	G	160	
Vysoce výkonné modelové rakety (High power rocketry)	H	320	Úroveň 1
	I	640	Úroveň 2
	J	1 280	
	K	2 560	
	L	5 120	Úroveň 3
	M	10 240	
	N	20 480	
	O	40 960	



Obrázek 4: Porovnání velikostí motorů na tuhá paliva [7]

## 2.5. Vodící rampy

Do této kategorie jsem zařadil rampy s jedním hlavním stožárem, po kterém je raketa vedena. U lehčích modelů může být jako rampa použita jednoduchá tyč zasazená do země, ale můžeme najít i rampy s křížovou podstavou pro start z míst, kde je ukotvení do země nemožné. Vodící rampy můžeme rozdělit na dva základní typy, a to tyčové a kolejnicové.

### 2.5.1. Tyčové rampy

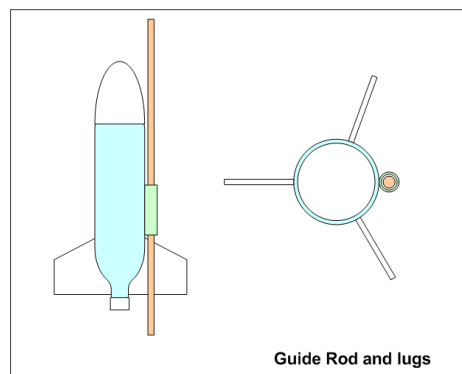
Tyčové rampy jsou ty nejjednodušší startovací rampy, které si můžeme představit. Může se jednat o již zmíněnou tyč zapíchnutou do země, nebo upevněnou na pevné podložce s podstavou pro zajištění stability. Způsob uchycení rakety a její vedení je zajištěno vodítkem, které je napevno uchyceno na boku rakety, jak je vidět na obrázku 5. U některých modelů se můžeme setkat i s vodítkem umístěným uvnitř rakety vedle motorového lože, pro lepší aerodynamické vlastnosti modelu. Právě díky své jednoduchosti jsou tyčové rampy rozšířené a oblíbené mezi modeláři. [8]

#### Výhody

Jak již bylo řečeno, hlavní výhodou těchto ramp je jejich jednoduchá konstrukce, která umožňuje snadné a velmi rychle sestavení. Navíc jsou lehké a dobře přepravitelné. Tu stejnou rampu také můžeme jednoduše použít na rakety různých velikostí, stačí nám pouze správné vodící oko.

#### Nevýhody

U tyčových ramp je velkou nevýhodou, že s narůstající velikostí rakety nám rychle roste průměr tyče potřebné k zajištění dostatečné pevnosti. Jelikož se vodící oko pohybuje po vnější stěně tyče, lze zvýšit pevnost pouze zvětšením průměru tyče a s tím roste i průměr vodícího oka. Vodítko pak může způsobovat aerodynamické problémy a nestabilitu modelu. Určitého zlepšení sice můžeme dosáhnout použitím jiného materiálu, ale pro delší rampy nám ani to nemusí být dostačující.



Obrázek 5: Tyčová rampa [9]

### 2.5.2. Kolejnicové rampy

Tyto rampy, stejně jako tyčové rampy, mají pouze jeden hlavní stožár, po kterém je raketa vedena. Jak název napovídá, vodící tyč má v sobě lištu, do které se zasune vodící jezdec pevně uchycený na boku rakety. Na obrázku 6 je při pohledu shora vidět, jakým způsobem je vodítko v kolejnici uchyceno. Jedná se v podstatě o stejný princip jako u ramp tyčových. Rozdíl je právě u jezdců, který je u kolejnicových ramp veden vnitřkem stožáru. To nám umožní zvýšit tuhost

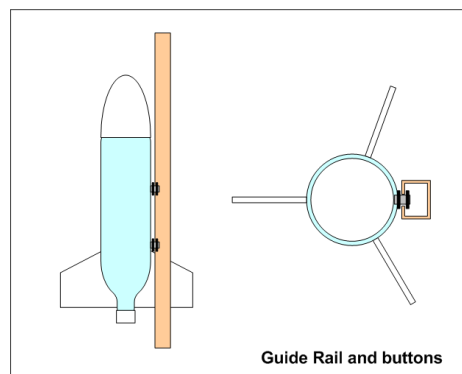
stožáru a podepřít ho zvnějšku. Z tohoto důvodu můžeme kolejnicové rampy najít u startu středních a velkých modelových raket. [5]

### Výhody

Tyto rampy se řadí svou složitostí mezi rampy tyčové a dotykové, jelikož mohou začínat jednoduchostí, stejně jako rampy tyčové, lištou upevněnou v zemi, do které se zasune jezdec rakety. Zároveň pro větší a výkonnější rakety je tato rampa výhodná možností zvýšit její tuhost vnějšími podpěrami. Záleží tedy na návrhu, jak složitá, těžká a skladná tato rampa bude. Jako u tyčových ramp, tak i kolejnicové rampy můžeme použít na modelové rakety různých velikostí, aniž bychom upravovali samotnou rampu. Pokud je úprava nutná, většinou postačí přidat vnější podpěru.

### Nevýhody

Zde bych jako největší nevýhodu viděl nutnost jezdcu upevněného na raketě. To, že jezdec zůstane na raketě, změní aerodynamické vlastnosti modelu. Tím tedy i snižujeme jeho výkonnost. Je zde i riziko, že se jezdec zasekne v kolejnici a konstrukce musí i s tímto případem počítat. Také špatné navržení nebo upevnění jezdcu na raketě může způsobovat zvýšené tření v kolejnici, které pak sníží výkonnost rakety.



Obrázek 6: Kolejnicová rampa [9]

## 2.6. Dotykové rampy

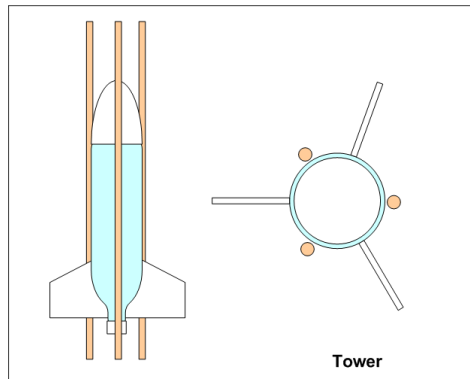
Dotykové rampy vedou raketu bez použití jezdcu. Jsou zkonstruovány s podstavou, na kterou se přichytí tři, nebo více stožárů (podle typu rakety) a ty vytvoří „klec“ s vnitřním rozměrem stanoveným tak, aby se mezi ně raketa bezpečně vešla a zároveň nevznikalo zbytečně velké tření mezi raketou a rampou (obrázek 6). Zbavením se jezdcu získá raketa vyšší výkonnost, díky lepším aerodynamickým vlastnostem. Navíc díky tomu, že se raketa dotýká rampy na vnitřní straně, můžeme tuhost a pevnost startovací rampy jednoduše zajistit podpěrami zvenčí. Tato rampa se nejčastěji používá při soutěžích, kdy je jakkoli malé snížení aerodynamického odporu důležité.

### Výhody

Dotykové rampy vynikají svou tuhostí, jelikož máme nejméně tři vodící tyče, které můžeme podepřít. Jak již bylo zmíněno, z rakety odpadá jezdec, nebo vodící oko, které by na raketě muselo být při použití jiné rampy. Tím se tedy zvýší výkonnost rakety a také se nemůže stát, že by se jezdec vzpříčil v kolejnici a nebezpečně zpomalil raketu, nebo se dokonce zasekl. Vyšší hmotnost nám může pomoci při ukotvení rampy k zemi a zvyšuje stabilitu.

## Nevýhody

Tyto rampy mají i v té nejjednodušší podobě nevýhodu složitosti konstrukce. Komplikovaná konstrukce těchto ramp také vede k jejich vyšší hmotnosti hned od začátku, a to ztěžuje manipulaci a převoz. Pokud bychom navíc chtěli tuto rampu používat na různé velikosti raket, musíme ji dopředu navrhnout s možností posunu vodících tyčí. To samotné může snížit tuhost celé konstrukce a vyžádat si potřebu vnějších podpěr.



Obrázek 7: Dotyková rampa [9]

## 2.7. Porovnání

Jako první k porovnání se nabízí tyčová rampa, jelikož je nejjednodušší na konstrukci, stavbu a díky malému počtu součástí je velmi skladná a lehce přenosná. Ačkoliv nižší hmotnost přináší výhodu snadnější manipulace a převozu, může při startu způsobit komplikace z důvodu nižší stability. Průměr vodící tyče by také mohl z důvodu vyšší hmotnosti rakety narůst na nepoužitelné rozměry, protože vodítko musí mít větší průměr než vodící tyč. Příliš velké vodítko by mohlo ovlivnit aerodynamiku rakety a destabilizovat ji. Velkou výhodou ale je, že na stejnou rampu můžeme jednoduše použít více raket různých rozměrů.

Kolejnicové rampy jsou složitější než tyčové, ale přináší s sebou nemalé výhody. Stejně jako u tyčových ramp můžeme použít více druhů raket, protože jezdec je veden vnitřkem vodící lišty. Tu můžeme jednoduše podepřít zvenku, čímž zvýšíme tuhost rampy, bez úpravy vlastní lišty. Hlavní výhodou je tedy jednoduché zpevnění konstrukce a tím pádem možnost startu těžších a výkonnějších raket. Oproti tyčovým rampám je zde nevýhoda složitější konstrukce.

Dotykové rampy jsou nejsložitější konstrukce. Proto mají oproti kolejnicovým a tyčovým rampám vyšší hmotnost. Jelikož je raketa vedena z vnějšku, je repertoár raket, které z dané rampy mohou startovat, omezen vnějším průměrem. Výhodou je, že u této konstrukce není potřeba žádného vodítka na raketě. Tudíž se zlepšují aerodynamické vlastnosti modelu, a tím i maximální dosažitelná výška.



## 2.8. Metody výpočtu

Pro výběr jednoho typu rampy použiji jako měřítko jejich hmotnost. Rampy zatížím stejně velkou boční silou na vypouštěcím konci rampy a budu je dimenzovat na stejně velký průhyb. Sílu působící na rampu jsem definoval jako 10 % celkového tahu rakety, což odpovídá vychýlení o necelých  $6^\circ$  od svislé osy. Jako výpočetní model použiji u všech ramp vetknutý nosník s přidávanými podpěrami pro kolejnicovou rampu. Podle vypočítaných rozměrů pak určím jejich hmotnost a rozhodnu, který typ rampy použiji.

Pro kontrolu stability budu opět vycházet ze statiky. V předchozím kroku zvolenou rampu opět zatížím boční silou na horním okraji rampy, tentokrát však působící ve směru nejjednoduššího převrácení rampy. Z momentové rovnováhy pak určím hmotnost závaží nutného pro zachování stability.

Povětrnostní podmínky budu opět řešit ze statiky, ale jako zatížení rampy použiji boční aerodynamický odpor rakety společně se silou od tahu rakety. S celkovou silou pak zkontroluji maximální napětí v rampě.

V poslední části se budu zabývat dynamikou startu. Pomocí rovnic průhybových čar budu zjišťovat, jak se rampa prohýbá v různých fázích startu.



### 3. Praktická část

V praktické části nejprve definuji rozměry rakety, které jsou potřeba k dimenzování rozměrů dotykové rampy. Následně ze základních pohybových rovnic vypočítám minimální délku rampy, a pak přejdu na výpočet průhybu. Po návrhu všech typů ramp na stejný průhyb z nich porovnáním jejich hmotností vyberu jeden typ, se kterým budu pokračovat v konečném návrhu. Poté provedu kontrolu stability rampy a zjistím maximální napětí způsobené bočním větrem. V poslední části vypočítám a zobrazím v grafu průhyby rampy v různých časech se silou posouvající se k vrcholu rampy. Pro veškeré výpočty a vykreslování grafů využiji výpočetního softwaru Matlab.

#### 3.1. Definování parametrů rakety

Rozměry rakety budu potřebovat pouze k zjištění velikosti odporové síly působící z boku na raketu a pro určení maximálního průhybu u dotykové rampy. Budu tedy vycházet z rozměrů určených při konzultaci s vedoucím. Předpokládaná délka rakety je 3 200 mm a vnější průměr 280 mm. Celkovou hmotnost rakety použiji ze zadání a z té i výpočtem získám maximální tah rakety.

#### 3.2. Potřebná délka rampy

Pro zajištění dostatečné rychlosti rakety při vypuštění je potřeba zajistit správnou délku rampy. Jako dostatečnou rychlost při opuštění rampy jsem po konzultaci s vedoucím zvolil  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Nejprve je potřeba zjistit zrychlení, jakým bude raketa disponovat. K tomu použiji Druhý Newtonův pohybový zákon, který nám říká, že zrychlení tělesa je přímo úměrné síle působící na těleso a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa. Síla působící na raketu se vypočítá jako rozdíl tahu motoru  $T$  a tíhy rakety  $G$ . Tah motoru  $T$  získám ze zadaného poměru tahu ku hmotnosti  $TWR$ . Pro zjištění minimální délky rampy použiji  $TWR = 4$  jelikož tato konfigurace má nejnižší zrychlení.

$$a = \frac{F}{m} = \frac{T - G}{m} = \frac{TWR * m * g}{m} - \frac{m * g}{m} = 4g - g = 3g = 3 * 9,81 = \mathbf{29,43 \text{ m} * \text{s}^{-1}}$$

Potom z pohybové rovnice pro rovnoměrně zrychlený pohyb zjistím čas  $t$ , za který raketa dosáhne rychlosti  $v_1 = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Předpokládám zde rovnoměrné zrychlení, jelikož se jedná o krátký časový úsek a změna hmotnosti je zde zanedbatelná.

$$v_1 = a * t \rightarrow t = \frac{v_1}{a} = \frac{15}{29,43} = \mathbf{0,510 \text{ s}}$$

Pak získaný čas dosadím do rovnice pro dráhu a zjistím potřebnou délku rampy.

$$s = \frac{1}{2} * a * t^2 = \frac{1}{2} * 29,43 * 0,51^2 = 3,827 \text{ m} \rightarrow \mathbf{3,8 \text{ m}}$$

Získanou délku jsem z praktických důvodů zaokrouhlil dolů, a proto musím zkontrolovat, jestli je nová délka dostatečná. Navrhovanou délku dosadím do rovnice pro dráhu, ze které jsem si vyjádřil čas.

$$t = \sqrt{\frac{2 * s}{a}} = \sqrt{\frac{2 * 3,8}{29,43}} = \mathbf{0,508}$$



Vypočítaný čas dosadím do rovnice pro rychlost a získám tak rychlost rakety při opouštění rampy.

$$v_2 = a * t = 29,43 * 0,508 = \mathbf{14,956 \text{ m} * \text{s}^{-1}}$$

$$\Delta = \frac{v_1 - v_2}{v_1} = \frac{15 - 14,956}{15} = \mathbf{0,296 \%}$$

Nakonec vypočítám procentuální odchylku od požadované rychlosti. Ta je necelých 0,3 %, což je zanedbatelný rozdíl. Délka rampy bude tedy  $l = 3,8 \text{ m}$ .

### 3.3. Dovolený průhyb

Abych zjistil průhyb na konci rampy, musím nejprve vypočítat nejvyšší možný tah rakety. Ten opět získám z  $TWR$ , ale tentokrát od tahu nebudu odečítat tíhu rakety a zvolím výkonnější konfiguraci rakety s  $TWR = 7$ .

$$TWR = \frac{T}{G} = \frac{T}{m * g} \rightarrow T = TWR * m * g = 7 * 20 * 9,81 = \mathbf{1373,4 \text{ N}}$$

Boční sílu pak získám jako určité procento celkového tahu. Zvolil jsem sílu o velikosti 10 % celkového tahu, což odpovídá odklonění rakety o necelých  $6^\circ$ .

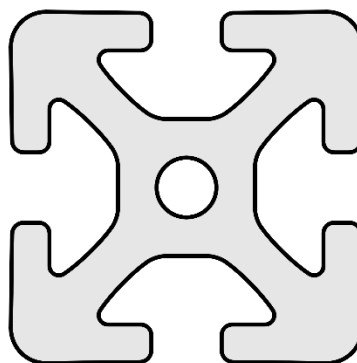
$$F = 0,1 * T = 0,1 * 1373,4 \sim \mathbf{140 \text{ N}}$$

Všechny rampy tedy budu dimenzovat na stejný průhyb na konci rampy a porovnávat výsledné hmotnosti.

#### 3.3.1. Kolejnicová rampa

Jako první vypočítám průhyb u kolejnicové rampy, jelikož má nejsložitější průřez a obtížně by se hledal profil na potřebný kvadratický moment průřezu. Vyberu tedy jeden profil, u kterého vypočítám průhyb na konci rampy, a na ten budu dimenzovat zbylé rampy.

Zvolil jsem profil od firmy Haberkorn velikosti 12 s rozměry 60x60 mm s kvadratickým momentem průřezu  $J_z = 70,5 \text{ cm}^4$  a hmotností  $m_k = 5,55 \text{ kg/m}$ . (Obrázek 8) [10]

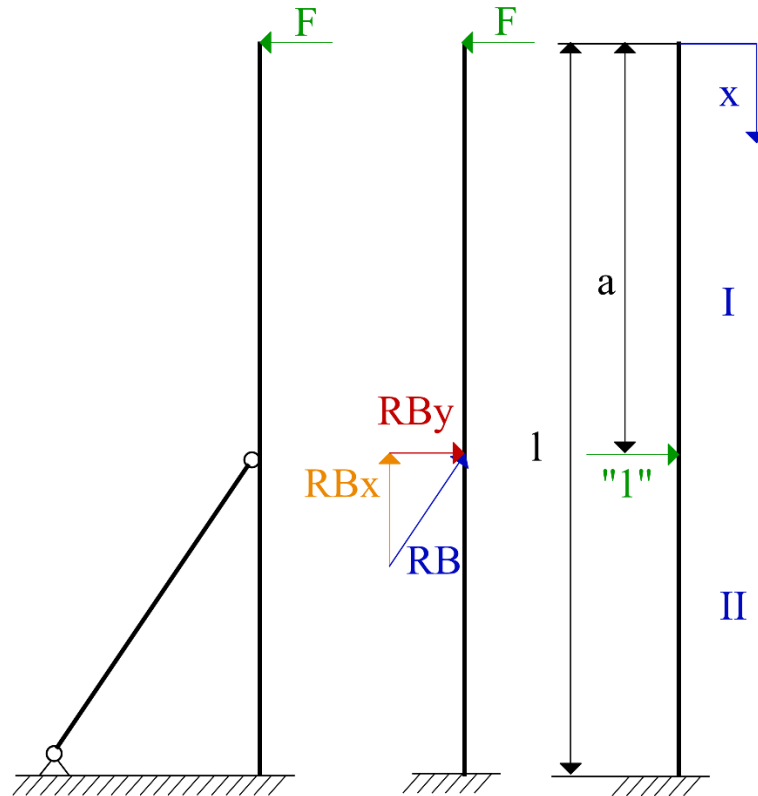


Obrázek 8: Průřez profilu 12-60x60

Podpěry jsou z ploché hliníkové tyče o rozměrech 50x12 mm a hmotnosti  $m_{kp} = 1,64 \text{ kg/m}$ .

Jelikož tato rampa bude mít podpěry, zvolil jsem diferenciální rovnici průhybové čáry jako metodu výpočtu. Díky tomu získám průhyb v každém místě rampy a zjistím, jak se mění například při posouvání podpěr.

Jako první však musím vypočítat velikost reakce od podpěr. Tu vypočítám pomocí Mohrova integrálu s jednotkovou silou umístěnou v místě podpěr a podmínkou, že posuv  $v_B$  je v tomto bodě roven nule. Směr působící síly a souřadnice použity při výpočtu jsou znázorněny na obrázku 9.



Obrázek 9: Výpočtový model kolejnicové rampy

Vlevo je zjednodušený model rampy zatížený silou  $F$ . Uprostřed je stejný model s rozloženou reakcí  $RB$ , která nahrazuje podpěru. Vpravo je model zatížený jednotkovou silou s vyznačenými rozměry, oblastmi **I** a **II** a zobrazeným počátkem souřadnice  $x$ .

Rampu jsem rozdělil na oblasti **I** a **II** a v každé jsem vyjádřil ohybový moment od síly  $F$  a od fiktivní jednotkové síly. Poté jsem vše dosadil do Mohrova integrálu, který jsem položil rovný nule, a vyjádřil velikost síly  $RB_y$ .

$$M_{oI}(x) = -F * x$$

$$m_{oI}(x) = 0$$

$$M_{oII}(x) = -F * x + RB_y * (x - a)$$

$$m_{oII}(x) = "1" * (x - a)$$

$$v_i = \frac{1}{E} * \int_{(I)} \frac{M_o(x)}{J_z(x)} * m_{oi}(x) * dx \quad [11, \text{str. 234}]$$

Jelikož se průřez nemění se souřadnicí  $x$ , mohu vytknout kvadratický moment průřezu před integrál, a protože je ohybový moment od síly "1" v **I** oblasti nulový, tak integruji pouze v oblasti **II**.



$$v_B = \frac{1}{E * J_z} * \int_a^l [((-F * x) + RBy * (x - a)) * (x - a)] * dx = 0$$

$$RBy = F * \frac{2 * (l^3 - a^3) - 3 * a * (l^2 - a^2)}{2 * (l^3 - a^3) - 6 * a * (l^2 - a^2) + 6 * a^2 * (a - l)} = 408 \text{ N}$$

Se silou  $RBy$  už mohu sestavit diferenciální rovnici průhybové čáry postupným integrováním následujícího vztahu.

$$v''_i(x) = -\frac{M_{oi}(x)}{E * J_z(x)} \quad [11, \text{str. 228}]$$

První oblast:

$$v''_I(x) = \frac{F * x}{E * J_z}$$

$$v'_I(x) = \frac{F}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} + C1$$

$$v_I(x) = \frac{F}{E * J_z} * \frac{x^3}{6} + C1 * x + C2$$

Druhá oblast:

$$v''_{II}(x) = \frac{F * x - RBy * (x - a)}{E * J_z}$$

$$v'_{II}(x) = \frac{F}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} - \frac{RBy}{E * J_z} * \left(\frac{x^2}{2} - a * x\right) + C3$$

$$v_{II}(x) = \frac{F}{E * J_z} * \frac{x^3}{6} - \frac{RBy}{E * J_z} * \left(\frac{x^3}{6} - a * \frac{x^2}{2}\right) + C3 * x + C4$$

Při integraci mi vznikly čtyři integrační konstanty, které si musím vyjádřit pomocí čtyř okrajových podmínek, které znám. Víím, že natočení v souřadnici  $l$ , tedy ve vetknutí, je nulové. Rovněž posun je v tomto bodě nulový. A zbylé dvě podmínky získám z logiky, že natočení a posun musí být stejný pro obě oblasti v souřadnici  $a$ , tedy v místě, kde je přechod mezi oblastmi.

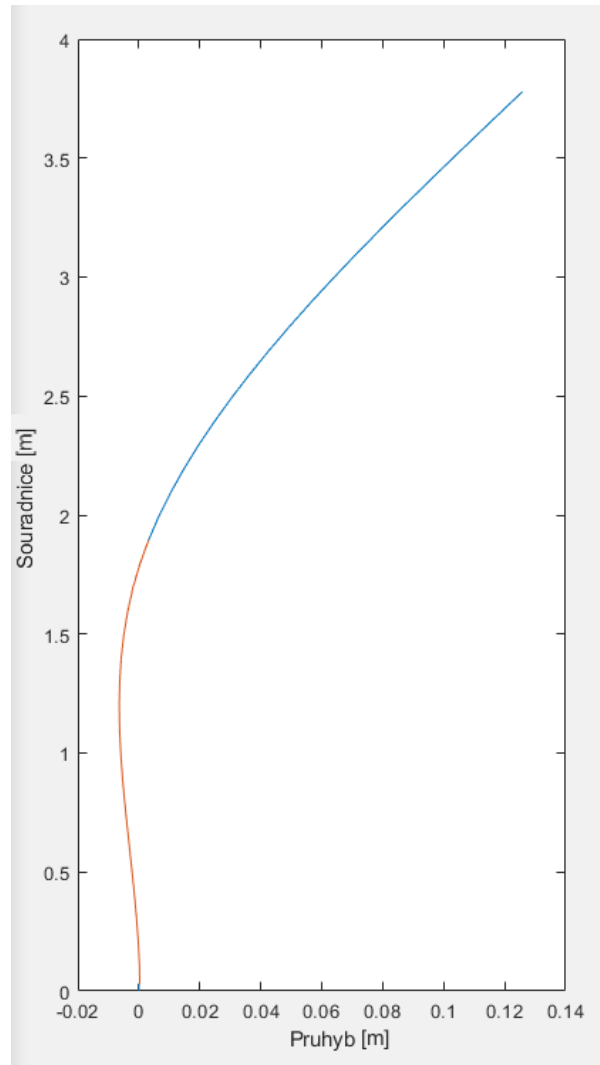
$$v_{II}(l) = 0$$

$$v'_{II}(l) = 0$$

$$v'_I(a) = v'_{II}(a)$$

$$v_I(a) = v_{II}(a)$$

Po získání integračních konstant jsem je dosadil do rovnic pro průhyb pro jednotlivé oblasti a spojil je do jednoho grafu zobrazeného na obrázku 10. Tento graf je řešen pro  $a = 2 \text{ m}$  a průhyb v nejvyšším bodě je  $v_A = 126,7 \text{ mm}$ . Na tento průhyb budu dimenzovat zbylé rampy.



Obrázek 10: Průhyb kolejnicové rampy

*Barevný přechod se nachází v místě podpěr a je zde nulový průhyb.*

Hmotnost této rampy jsem počítal včetně podpěr, které jsou pro tento případ dlouhé  $f = 2,6 \text{ m}$ . Podstavu jsem do těchto počtů nezahrnoval, jelikož je ve všech případech velice podobná.

$$m_k = m_{mk} * l + m_{mp} * 2 * f = 5,55 * 3,8 + 1,64 * 2 * 2,6 = \mathbf{29,6 \text{ kg}}$$

### 3.3.2. Tyčová rampa

Jelikož se tady jedná jen o vetknutý nosník, tak použiji pouze Mohrův integrál pro průhyb na konci rampy. Protože je zde pouze jedna oblast, lze vyjádřit průběh momentu jednou rovnicí, a tedy jedním integrálem.

$$M_{oI}(x) = F * x$$

$$m_{oI}(x) = "1" * x$$

$$v_A = \frac{1}{E * J_Z} * \int_0^l [(F * x) * ("1" * x)] * dx$$

$$v_A = \frac{F * l^3}{3 * E * J_Z}$$

Po integraci jsem získal jednoduchý vztah, ze kterého jsem vyjádřil kvadratický moment průřezu  $J_Z$  a dosadil Youngův modul pružnosti pro ocel  $E = 210 \text{ GPa}$  a vypočítaný průhyb  $v_A = 126,7 \text{ mm}$ .

$$J_Z = \frac{F * l^3}{3 * E * v_A} = \frac{140 * 3,8^3}{3 * 210 * 0,1267} = 96 \text{ 241 mm}^4$$

Pro tyčovou rampu jsem zvolil kruhový průřez, pro který se kvadratický moment průřezu vypočítá podle následujícího vztahu, ze kterého si vyjádřím hledaný rozměr  $D$ .

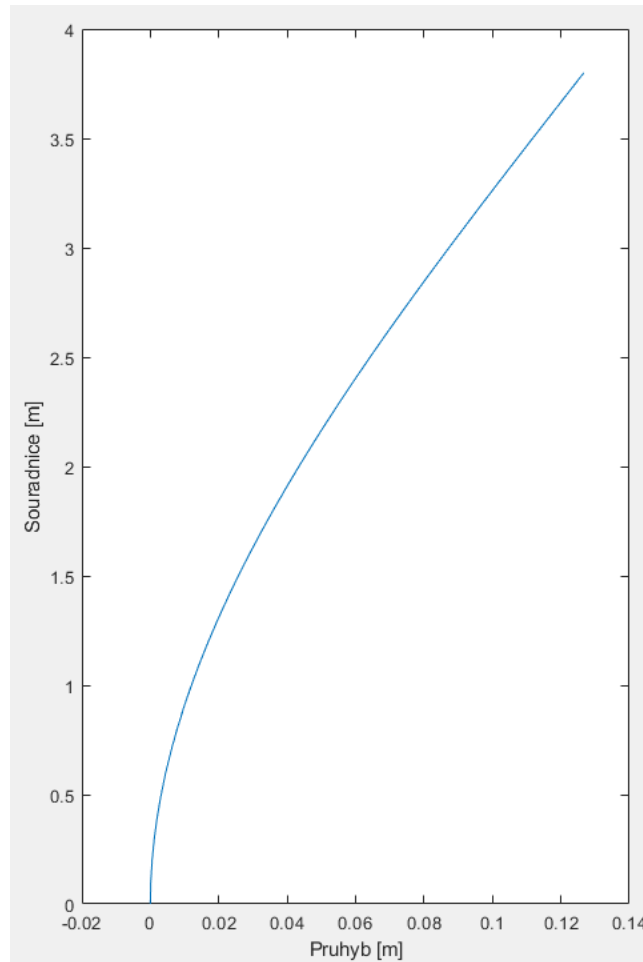
$$J_Z = \frac{\pi * D^4}{64}$$

$$D = \sqrt[4]{\frac{64 * J_Z}{\pi}} = \sqrt[4]{\frac{64 * 96 \text{ 241}}{\pi}} = 37,42 \text{ mm}$$

Nejbližší vyšší rozměr pro ocelové kruhové tyče je 38 mm a hmotnost na jeden metr je  $m_t = 8,9 \text{ kg/m}$ . [12]

$$m_t = m_{mt} * l = 8,9 * 3,8 = 33,82 \text{ kg}$$

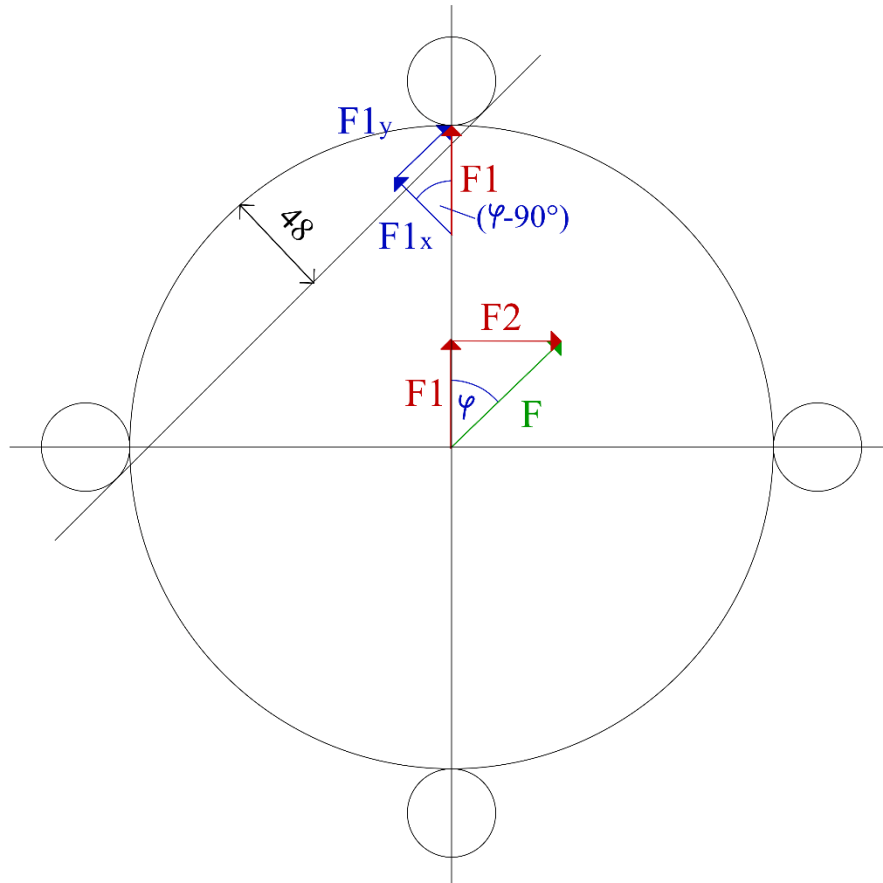
Hmotnost tyčové rampy by tedy vycházela vyšší o necelé 4 kilogramy, což není značný rozdíl. Nicméně u kolejnicové rampy lze jednodušeji zvýšit tuhost posunutím podpěr blíže k vrcholu rampy, kdežto zde by se musel zvětšit průměr. Kolejnicová rampa je tedy vhodnější i z dlouhodobého hlediska, jelikož ji můžeme využít na víc modelů. Na obrázku na následující stránce je v grafu zobrazen průhyb celé tyče.



Obrázek 11: Průhyb tyčové rampy

### 3.3.3. Dotyková rampa

U dotykové rampy jde o stejný případ jako u rampy tyčové. Musí se ale zajistit, aby raketa nemohla proletět mezi tyčemi rampy, jelikož k nim není nijak přichycena. Na následujícím obrázku je naznačeno, o jakou vzdálenost se musí prohnout vodící tyče, aby došlo ke ztrátě kontroly. Vodící tyče jsem volil stejného průměru jako u tyčové rampy, a tím pádem je hledaný průhyb  $v_d = 48 \text{ mm}$ .



Obrázek 12: Rozložení sil v dotykové rampě.

*Síla  $F$  prochází středem mezi vodícími tyčemi a hledaná síla  $F1x$  působí ve směru vypočítaného posuvu.*

V tomto případě tedy znovu použijí diferenciální rovnici průhybové čáry, abych z grafu zjistil, ve kterém bodě by došlo ke ztrátě kontroly. Nejprve si však vyjádřím velikost síly působící na jednu tyč ve směru posuvu. Zobrazená rampa má čtyři vodící tyče, a proto je  $\varphi = 45^\circ$ .

$$F1 = F * \cos\varphi = 140 * \cos(45^\circ) = \mathbf{98,995 \text{ N}}$$

$$F1x = F1 * \cos(90^\circ - \varphi) = 98,995 * \cos(45^\circ) = \mathbf{70 \text{ N}}$$

Je zde pouze jedna integrační oblast, a proto je pouze jedna rovnice průhybu pro celý nosník. Z již zmíněného vzorce získám následující rovnici, kterou budu dvakrát integrovat.

$$v''(x) = \frac{F * x}{E * J_z}$$

$$v'(x) = \frac{F}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} + C1$$

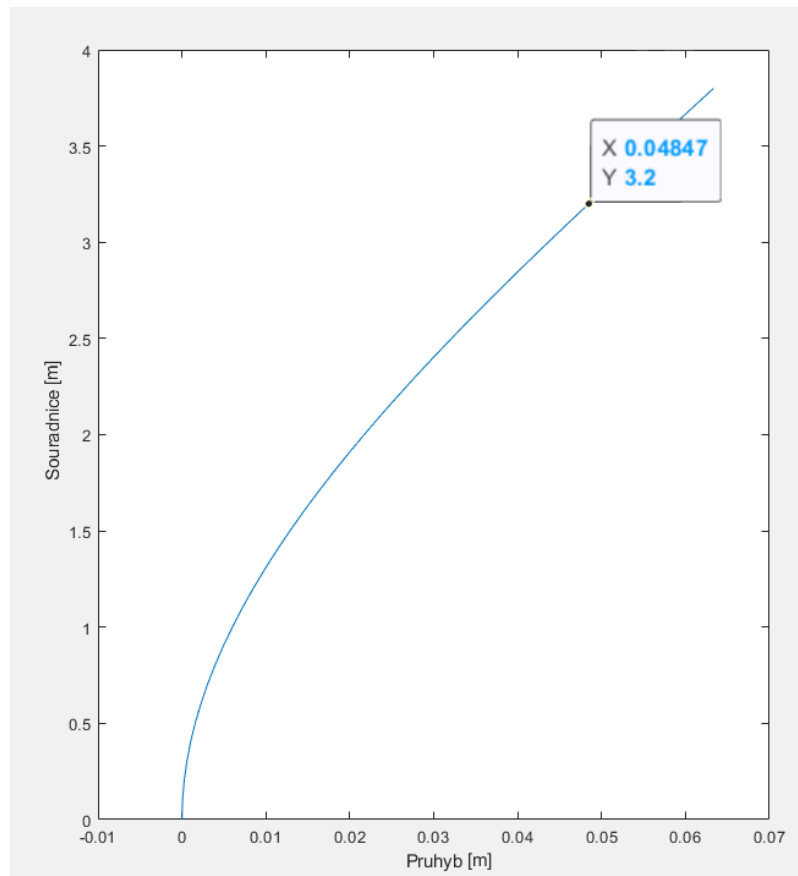
$$v(x) = \frac{F}{E * J_z} * \frac{x^3}{6} + C1 * x + C2$$

Tentokrát postačí dvě okrajové podmínky. Jedna je pro průhyb v místě vetknutí a druhá pro natočení v místě vetknutí.

$$v(l) = 0$$

$$v'(l) = 0$$

Z obrázku 13 je vidět, že průhyb 48 mm se přesáhne ve výšce 3,2 m. Tím pádem by musely být použity tyče o větším průměru než 38 mm. Tím se ovšem nebudu zabývat, jelikož i při použití původního rozměru je hmotnost této rampy příliš vysoká.



Obrázek 13: Průhyb tyče dotykové rampy pro zatížení podle předchozího obrázku

Hmotnost jedné tyče o průměru 38 mm je

$$m_d = m_{md} * l = 8,9 * 3,8 = \mathbf{33,82 \text{ kg}}$$

A pro celou rampu je výsledná hmotnost

$$m_{4d} = 4 * m_d = 4 * 33,82 = \mathbf{135,28 \text{ kg}}$$

Tato rampa je tedy nejtěžší ze všech tří.



### 3.3.4. Výběr

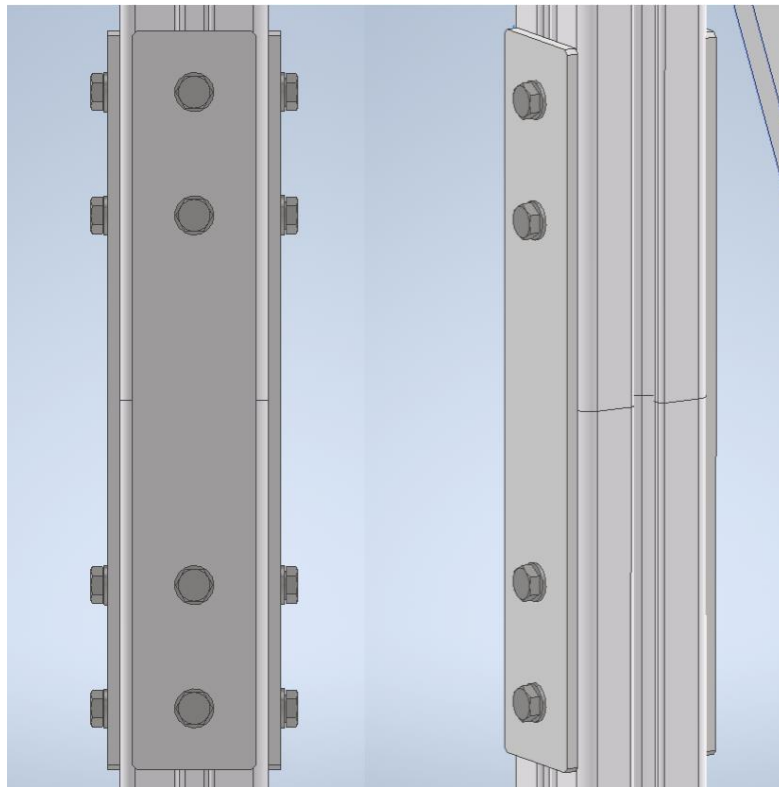
Jako nejtěžší varianta ze všech tří je dotyková rampa, která je zároveň nejsložitější na konstrukci. Z těchto důvodů ji také vyřazují. Tyčová rampa vychází z hlediska hmotnosti velice podobně jako rampa kolejnicová. Kolejnicová má však velkou výhodu při použití raket s různými hmotnostmi a tahy. U tyčové rampy by se pro raketu s vyšším tahem musela vyměnit vodící tyč. Jelikož můžeme na kolejnicové rampě podpěry posunovat nebo i přidávat další, není nutné měnit hlavní profil, a proto budu s tímto návrhem pokračovat dál.

### 3.4. Návrh konstrukce

Vybraný návrh kolejnicové rampy budu ještě rozměrově upravovat ve snaze získat menší průhyb na konci rampy. Jelikož musí být rampa přenosná, stanovil jsem si největší délku jednotlivých dílů na dva metry. Tento rozměr budou mít tři nohy hliníkového profilu 10 - 50x50 mm uspořádané do Y. Úhel mezi nohama, které budou opatřeny podpěrami jsem stanovil na 90°, aby při startu nepřekážely stabilizátorům rakety. Zbylé dva úhly jsou shodné o velikosti 135°. Jako spojovací prvek všech profilů jsem zvolil desku trojúhelníkového tvaru se základnou o délce 600 mm, výšce 900 mm a tloušťce 5 mm. Vrcholy jsou zkosené a v každém se připojuje jedna noha pomocí dvou drážkových matic a šroubů.

Podpěry jsem z hmotnostních důvodů navrhl ze dvou hliníkových plochých tyčí spojených šrouby. Konec druhé tyče, která bude přichycena k hlavnímu profilu, je ohnutý o 45°, aby plochou dosedal k profilu. Spodní část podpěr je uchycena drážkovou maticí a šroubem na konci noh.

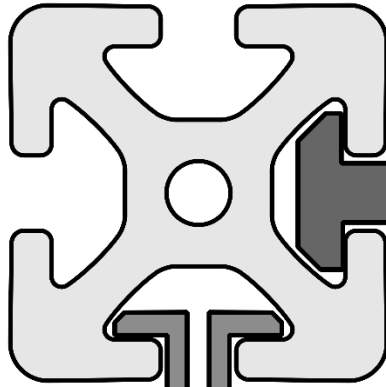
Jak jsem již zmínil, maximální délka součástí je omezena na 2 m, a proto i vodící profil musí být rozdělen. Spoj jsem navrhl v polovině, tedy každý díl bude mít délku 1,9 m a budou spojeny třemi deskami a drážkovými maticemi. Vodící profil bude o velikosti 12 - 60x60 mm. Spoj je znázorněn na obrázku 14. Při napojení obou profilů je důležité zajistit hladký přechod mezi polovinami. Při špatném napojení může vzniknout na přechodu výstupek, o který by se mohlo vodítko zaseknout.



Obrázek 14: Detail spojení hlavního profilu

Vodítka mohou být různých tvarů a velikostí. Na obrázku 15 je vidět hlavní profil a 2 typy vodítek. Důležité je, aby mělo vodítko dostatečnou vůli ve všech směrech a zároveň se nemohlo z drážky vyvlíknout. Zkosit přední část vodítka je výhodné, jak kvůli aerodynamickým

vlastnostem, tak i pro lepší vedení vodítka v rampě. Například při přechodu mezi špatně napojenými profily to může znamenat rozdíl mezi úspěšným a nepovedeným startem.



Obrázek 15: Vodítka

Hlavní profil je přichycen pomocí pantu, díky kterému je možné vodící profil sklopit a jednoduše do něj zasunout vodítka rakety. Po následném vyzdvihnutí profilu do svislé polohy se pomocí průchozích šroubů přichytí k připraveným spojovacím úhelníkům. Ty jsou k desce uchyceny dvojicí šroubů a matic. Podpěry jsou k hlavnímu profilu upevněny pomocí šroubu procházejícího předvrtanou dírou skrz profil.

Celkový vzhled konstrukce je znázorněn na obrázku 16 a detaily připojení hlavního profilu na obrázcích následujících. V příloze 8 je na výkresu sestava ve dvou pohledech v měřítku 1:10 s detaily v měřítku 1:5 a 1:2.

Na zbývajících výkresech jsou zobrazeny jednotlivé součásti rampy. Na výkresu 1 je spodní díl podpěry, který je stejný pro obě strany. Na levém okraji je díra pro uchycení k noze a zkosení pod úhlem  $41^\circ$ , aby nedošlo ke kontaktu se zemí. Na pravé straně jsou dvě díry pro připojení horního dílu podpěry.

Na výkresu 2 a 3 jsou horní díly podpěr, které jsou zrcadlově symetrické. Na spodní části jsou dvě díry pro napojení ke spodní podpěře, na horním konci jsou ohnuty o  $45^\circ$  kvůli správnému napojení k hlavnímu profilu. Aby nezasahovaly do dráhy rakety jsou na ohnutém konci zkosené.

Výkres 4 zobrazuje spojovací úhelník připojující hlavní profil a desku. V obou rovinách jsou dvě díry pro šrouby.

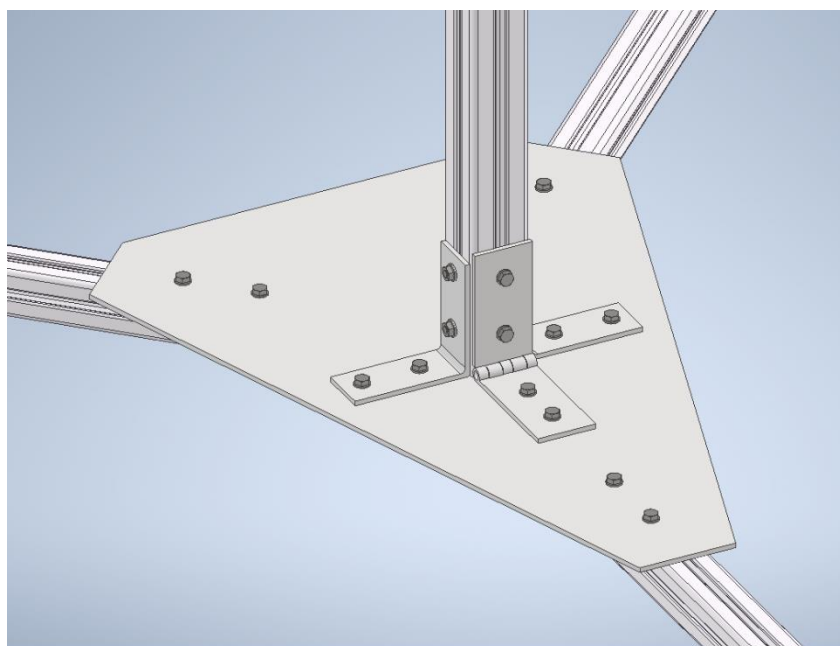
V měřítku 1:2 je na výkresu 5 zobrazena spojovací deska spojující poloviny hlavního profilu. Na obou koncích jsou dvě díry pro šrouby.

Na výkresu 6 je hlavní deska v měřítku 1:5. Čárkovaně jsou zobrazeny zkosené rohy trojúhelníku. Rohy napojující nohy s podpěrami jsou zkoseny pod úhlem  $45^\circ$  a vzájemně jsou na sebe kolmé. V každém rohu jsou dvě díry na připojení nohou a uprostřed desky jsou díry pro uchycení spojovacích úhelníků a pantu.

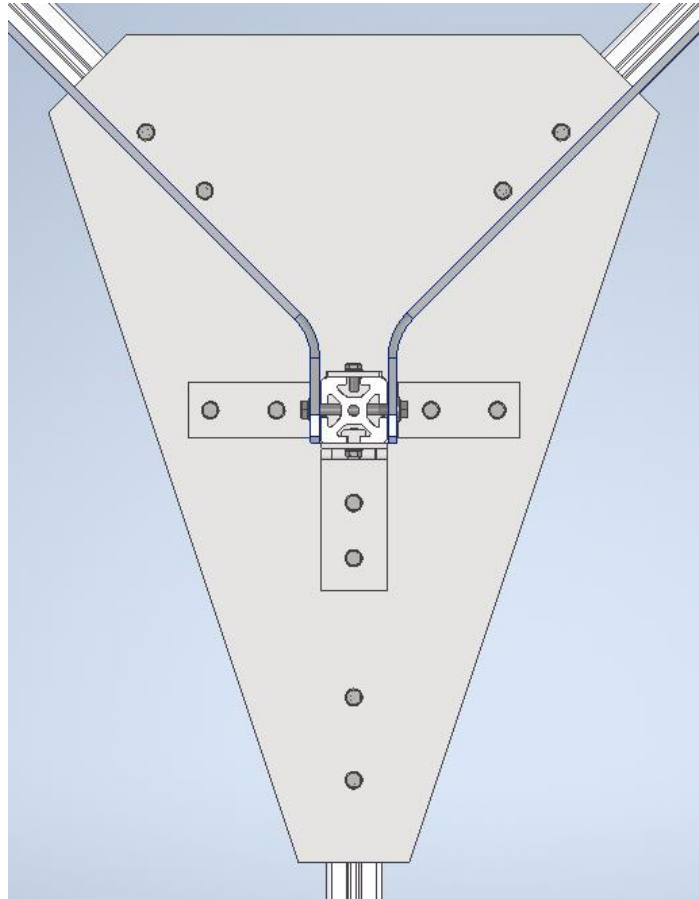
Kruhá tyč na závaží je na výkresu 7. Na horním konci je zkosení pro jednodušší nasazení kotoučů a ze spodního konce vystupuje závit M8 pro přichycení k profilu drážkovou maticí.



Obrázek 16: Konstrukce kolejnicové rampy

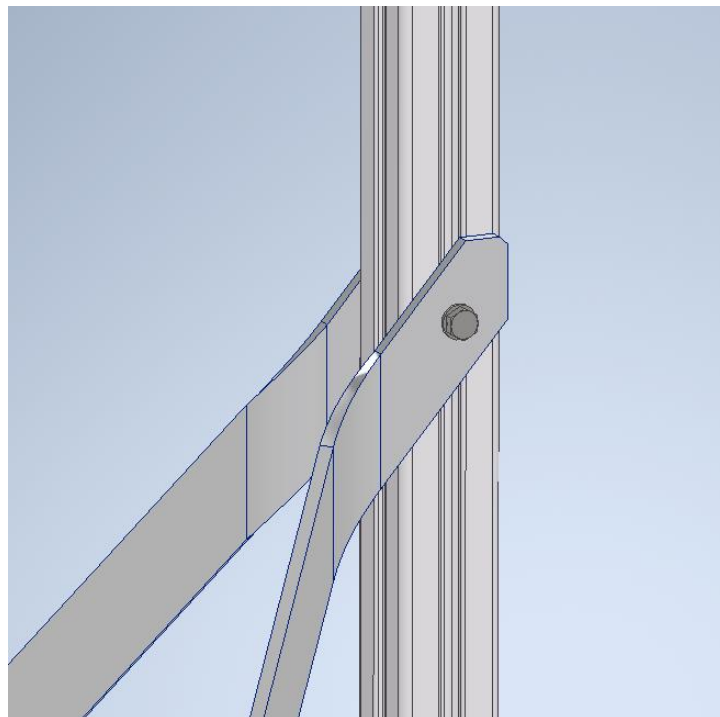


Obrázek 17: Detail připojení hlavního profilu ke spojovací desce



Obrázek 18: Pohled shora na spojovací desku

Z horních rohů vystupují podpěry, které jsou uprostřed obrázku připojeny k hlavnímu profilu.



Obrázek 19: Detail připojení podpěr k hlavnímu profilu

### 3.5. Dimenzování rozměrů kolejnicové rampy

V následující části vypočítám průhyb rampy při posunutí podpěr blíže k vrcholu rampy. Pro nový návrh provedu kontrolu podpěr na vzpěr, zkontroluji stabilitu celé rampy a případně vypočítám hmotnost potřebného závaží.

#### 3.5.1. Průhyb

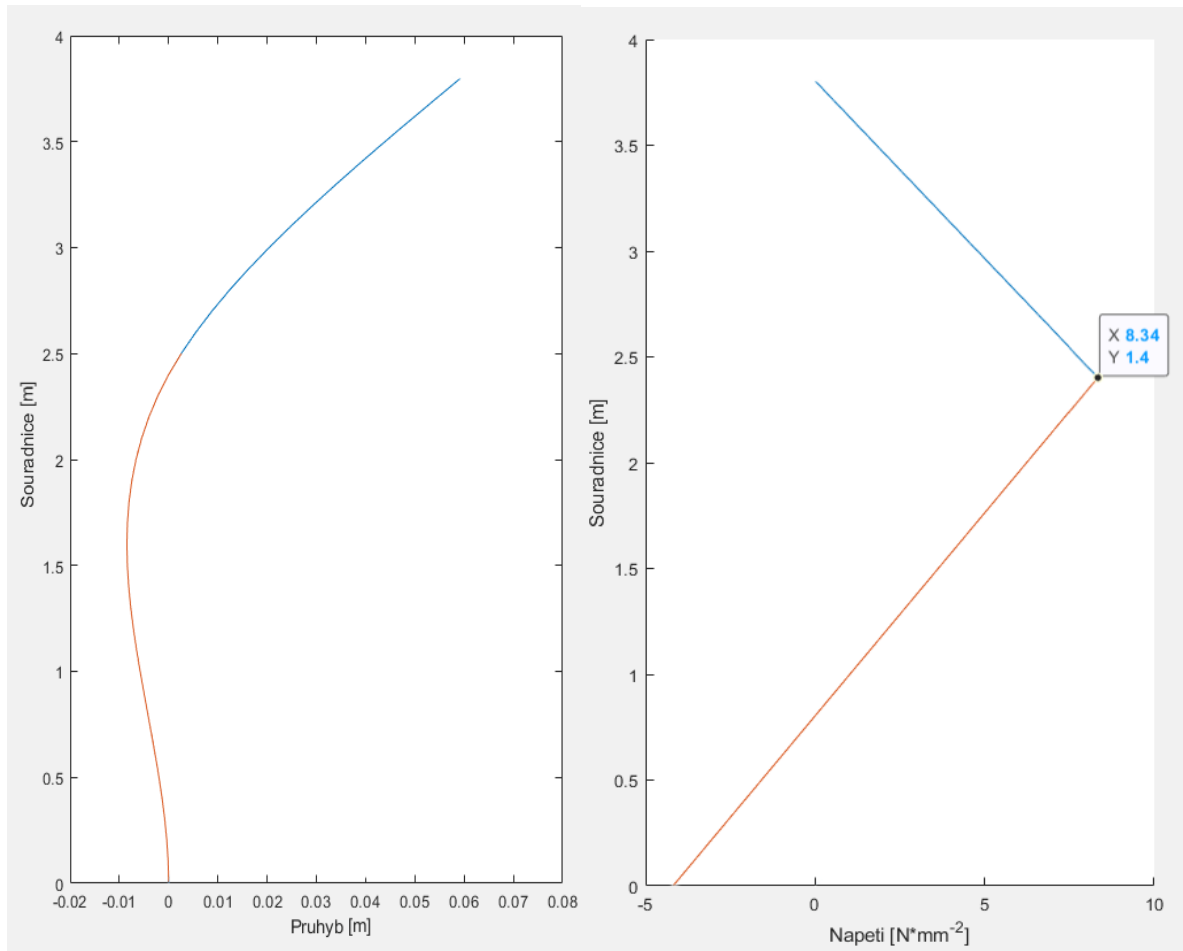
Pro výpočet průhybu finálního návrhu rampy využiji stejné diferenciální rovnice průhybové čáry jako v kapitole 3.3.1. Jediné, co jsem změnil od původního návrhu a co má vliv na tvar průhybové čáry, je vzdálenost podpěr od vrchního konce rampy. Ta se snížila z  $a = 2 \text{ m}$  na  $a = 1,4 \text{ m}$ , a tím pádem se přesunul bod nulového průhybu. Z grafu na obrázku 20 je vidět, že posunutí podpěr blíže k vrcholu snížilo průhyb na konci rampy z  $v_A = 126,7 \text{ mm}$  na  $v_A = 59,3 \text{ mm}$ , což je snížení více než o polovinu.

#### 3.5.2. Napětí

Dalším důležitým parametrem je maximální napětí. Ve vodícím profilu je hlavní namáhání ohybem a pro napětí z ohybu existuje jednoduchý vztah.

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o}$$

Kde  $M_o$  je ohybový moment v daném místě a  $W_o$  je modul průřezu v ohybu, který je dán výrobcem  $W_o = 23,5 \text{ cm}^3$ . Ohybový moment jsem si již vyjádřil v kapitole 3.3.1., stačí tedy pouze dosadit za souřadnici  $x$  a vykreslit graf.



Obrázek 20: Průhyb a napětí finální rampy

Na levém obrázku je znázorněn průhyb finálního návrhu rampy. V barevném přechodu jsou umístěny podpěry a průhyb je v tomto místě nulový. Napravo je zobrazen průběh napětí, které je maximální v místě podpěr.

Z obrázku 20 je vidět, že maximální napětí je v místě podpěr a má velikost  $\sigma_{MAX} = 8,34 \text{ N*mm}^{-2}$ . Výrobce daná mez kluzu  $Rp_{0,2} = 195 \text{ N*mm}^{-2}$  je více než dvacetkrát větší než vypočítané napětí, a proto nehrozí narušení profilu.

Při použití rakety ze zadání tato konfigurace zajišťuje velmi malý průhyb. Pokud by nám však větší vychýlení nevyhovovalo, můžeme ji použít i na výkonnější modely.

### 3.5.3. Vzpěr

Přestože podpěry mohou snést napětí, které v nich vznikne při startu, je nutné je vzhledem k jejich štíhlosti zkontrolovat na vzpěr. Ke kontrole na vzpěr využiji Eulerova vzorce pro výpočet kritické síly. Z té si vyjádřím minimální kvadratický moment průřezu a za kritickou sílu dosadím velikost reakce **RB**. Za **n** dosadím 1, což představuje kloubové uchycení na obou koncích tyče.

$$F_{KR} = n * \frac{\pi^2 * E * J_{min}}{l^2}$$
$$J_{min} = \frac{RB * l^2}{\pi^2 * E} = \frac{477,362 * 3,124^2}{\pi^2 * 70} \mathbf{1\ 978\ mm^4}$$

Podpěry budou obdélníkového profilu s delší stranou o velikosti **b = 50 mm**. Ze vzorce pro výpočet kvadratického momentu průřezu pro obdélník si vyjádřím výšku **h** a dosadím vypočítaný kvadratický moment průřezu **J<sub>min</sub>** a šířku **b**.

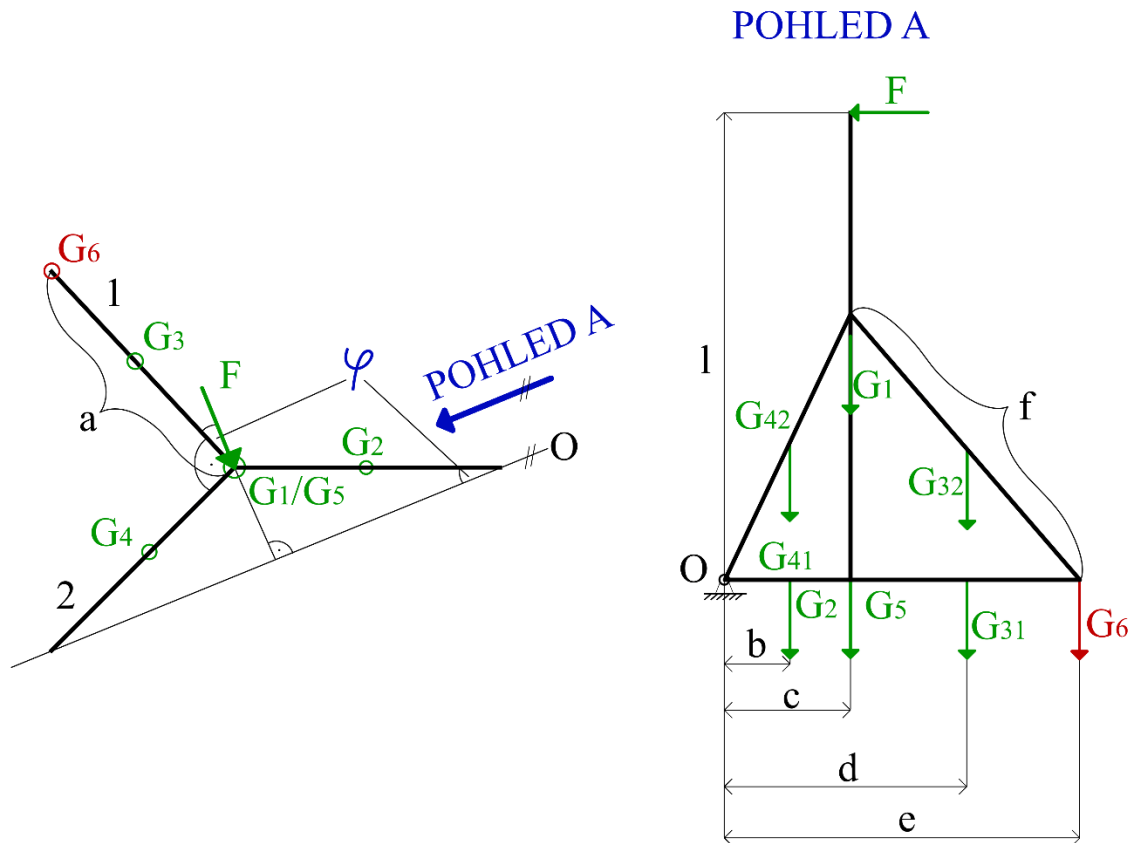
$$J = \frac{b * h^3}{12}$$
$$h = \sqrt[3]{\frac{12 * J}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 * 1\ 978}{50}} = \mathbf{7,8\ mm}$$

Vypočítanou výšku zaokrouhlím na vyšší rozměr. Vybral jsem ploché hliníkové tyče o rozměru **50x8 mm** a hmotnosti **1,084 kg/m**. Relativně malý rozměr tyčí byl zvolen z důvodu přenosnosti celé rampy, navíc jde o lehce zaměnitelnou součást bez zásahu do celkové konstrukce. Pokud by se ukázalo že jsou nedostatečně tuhé, dají se jednoduše vyměnit za profil s vyšší tuhostí.

### 3.5.4. Kontrola stability

Pro stanovené rozměry je potřeba zjistit, jestli bude rampa stabilní při boční síle. Proto jsem si nakreslil zjednodušený model zobrazený na následujícím obrázku. Délka nohou je **a = 2 m** a výšku jsem zaokrouhlil na **l = 3,9 m**. Všechny rozměry vychází z geometrie a v tíhách **G3** a **G4** jsou zahrnuty i hmotnosti podpěr. Jelikož vedou od kraje nohou až do středu, mají těžiště umístěné nad těžištěm nohou a působí na stejném rameni.





Obrázek 21: Model na kontrolu stability

Nalevo je vidět pohled shora. Síla  $F$  působí kolmo na osu  $O$ . Zeleně označené síly  $G$  jsou tíhy působící svisle v těžišti jednotlivých součástí. Červená síla  $G_6$  je hledaná tíha závaží. Napravo je pohled rovnoběžně s osou  $O$ , kolem které se model otáčí. Rozměry  $b$ ,  $c$ ,  $d$  a  $e$  jsou vzdálenosti těžišť od osy  $O$ .

Velikost úhlu  $\varphi$  vychází z geometrie naznačeného trojúhelníku na obrázku 21 a je rovna  $22,5^\circ$ . Pomocí něho si pak jednoduše zjistím ramena, na kterých působí jednotlivé tíhy.

$$c = a * \sin(\varphi) = 2 * \sin(22,5^\circ) = \mathbf{0,765 \text{ m}}$$

$$b = \frac{c}{2} = \frac{0,765}{2} = \mathbf{0,383 \text{ m}}$$

$$d = c + \frac{a}{2} * \cos(\varphi) = 0,765 + 2 * \cos(22,5^\circ) = \mathbf{1,69 \text{ m}}$$

$$e = c + a * \cos(\varphi) = 0,765 + 2 * \cos(22,5^\circ) = \mathbf{2,613 \text{ m}}$$

$$G_1 = m_{mk} * l * g = 5,55 * 3,8 * 9,81 = \mathbf{206,893 \text{ N}}$$

$$G_2 = m_{mk2} * a * g = 2,47 * 2 * 9,81 = \mathbf{70,436 \text{ N}}$$

$$G_3 = G_2 + m_{mk3} * f * g = 70,436 + 1,084 * 2 * 9,81 = \mathbf{103,658 \text{ N}}$$

$$G_4 = G_3 = \mathbf{103,658 \text{ N}}$$

$$G_5 = m_{desky} * g = 7 * 9,81 = \mathbf{68,67 \text{ N}}$$

Nakonec jsem z momentové rovnice okolo osy **O** vyjádřil velikost tíhy **G<sub>6</sub>** a z toho pak hmotnost závaží potřebného k zajištění stability rampy.

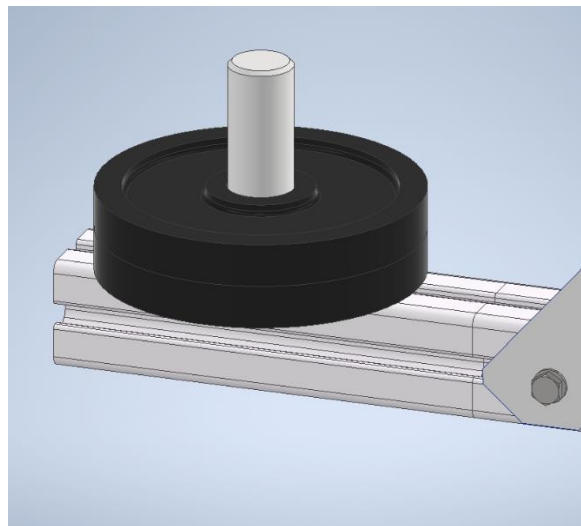
$$G_6 = \frac{l * F - b * (G_2 + G_4) - c * (G_1 + G_5) - d * G_3}{e}$$

$$= \frac{3,9 * 140 - 0,383 * (70,436 + 103,658) - 0,765 * (206,893 + 68,67) - 1,69 * 103,658}{2,613}$$

$$= \mathbf{35,73\ N}$$

$$m_6 = \frac{G_6}{g} = \frac{35,73}{9,81} = \mathbf{3,64\ kg}$$

Na nohy **1** a **2** umístím odmontovatelný profil o délce 100 mm, ke kterému drážkovou maticí přišroubuji kruhovou tyč o průměru 30 mm. Jako závaží použiji 2 kotouče, každý o hmotnosti 2 kg, které se nasunou na kruhovou tyč (obrázek 22). Tuto metodu jsem zvolil kvůli možnému použití raket různých výkonů. Tímto způsobem můžeme jednoduše změnit hmotnost závaží podle rakety, která bude startovat.



Obrázek 22: Detail závaží

*Vpravo je vidět připojená podpěra a konec jedné z nohou. Na tu je připojen prodlužovací profil, do kterého je zašroubovaná kruhová tyč. Na tyč jsou nasunuty 2 závaží o celkové hmotnosti 4 kg.*

### 3.6. Povětrnostní podmínky

Jako poslední ze statických výpočtů je doplňkové napětí vznikající v rampě při startu za maximální dovolené rychlosti větru. Síla opět působí na vrcholu rampy a sčítá se se silou působící od rakety. Hustotu vzduchu jsem použil při teplotě 20°C a standardním atmosférickém tlaku 101,345 kPa. Za těchto podmínek je hustota vzduchu  $\rho = 1,204\ kg * m^{-3}$ . Dále je pro výpočet nezbytný součinitel odporu vzduchu, který jsem odhadl na  $C_x = 1,2$  a plochu kolmého průřezu určil z rozměrů rakety na  $S = 1,3\ m$ . Velikost stabilizátorů jsem přitom stanovil jako dva obdélníky o rozměrech 300x400 mm.

Pak už zbývá jen maximální rychlost větru pro start rakety. Podle stanov „National Association of Rocketry“ je jako limitní rychlost větru pro start modelové rakety dána rychlost 20 mil za hodinu. Po převedení na metry za sekundu to odpovídá necelým 9 metrům za sekundu. [13]

Poté už jen dosadím do rovnice pro aerodynamický odpor a získám velikost odporové síly  $F_v$ .

$$F_v = \frac{1}{2} * C_x * \rho * S * v^2$$

$$F_v = \frac{1}{2} * 1,2 * 1,204 * 1,3 * 9^2 = 76,3 \text{ N}$$

Pro výpočet napětí musíme znát ohybový moment vznikající v nosníku z odporové síly. Ohybový moment pro tento případ jsem už vyjádřil v kapitole 3.3.1. a protože vím, že maximální napětí vzniká v podpěrách, dosadím za  $x$  vzdálenost  $a = 1,4 \text{ m}$ . Protože odporová síla působí ve stejném místě jako síla od tahu rakety, stačí ji k ní přičíst. Tím získám následující vztah pro maximální ohybový moment.

$$M_{Omax} = (F + F_v) * a = (140 + 76,3) * 1,4 = 302,8 \text{ N} * \text{m}$$

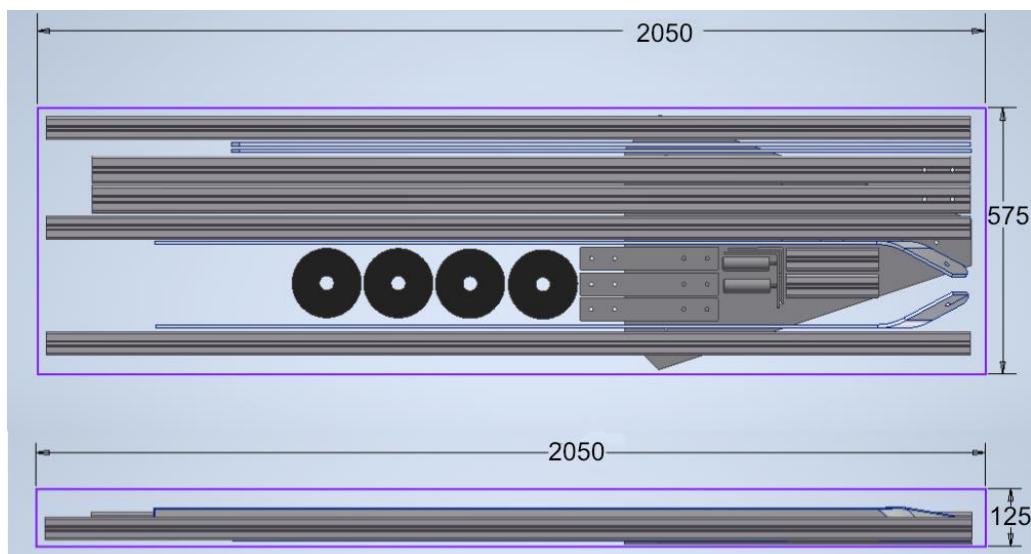
Napětí vypočítám podle stejného vztahu jako v kapitole 3.5.2. za použití stejného modulu průřezu v ohybu.

$$\sigma_{Omax} = \frac{M_{Omax}}{W_O} = \frac{302,8}{23,5} = 12,8 \text{ N} * \text{mm}^{-2}$$

Odporová síla vzniklá rychlostí větru zvýšila hodnotu maximálního napětí z  $8,34 \text{ N} * \text{mm}^{-2}$  na  $12,8 \text{ N} * \text{mm}^{-2}$ . To je stále vzhledem k mezi kluzu zanedbatelná hodnota, ale jedná se o zvýšení maximálního napětí o téměř 55 %. Takové zvýšení síly by mohlo ohrozit stabilitu rampy. Například pokud by foukal vítr o rychlost  $9 \text{ m} * \text{s}^{-1}$  ve směru nejmenší stability rampy a ve stejném směru by působila síla od tahu rakety, bylo by potřeba závaží o hmotnosti 16 kg na udržení stability. Z tohoto důvodu je důležité připravit rampu ke startu s ohledem na rychlost a směr větru.

### 3.7. Přeprava

V tento moment jsou již všechny součásti rampy určeny a na obrázku 23 je vidět, že přepravní prostor o délce 2 050 mm, šířce 575 mm a výšce 125 mm je více než dostačující. Celková hmotnost rampy je necelých 36 kg.

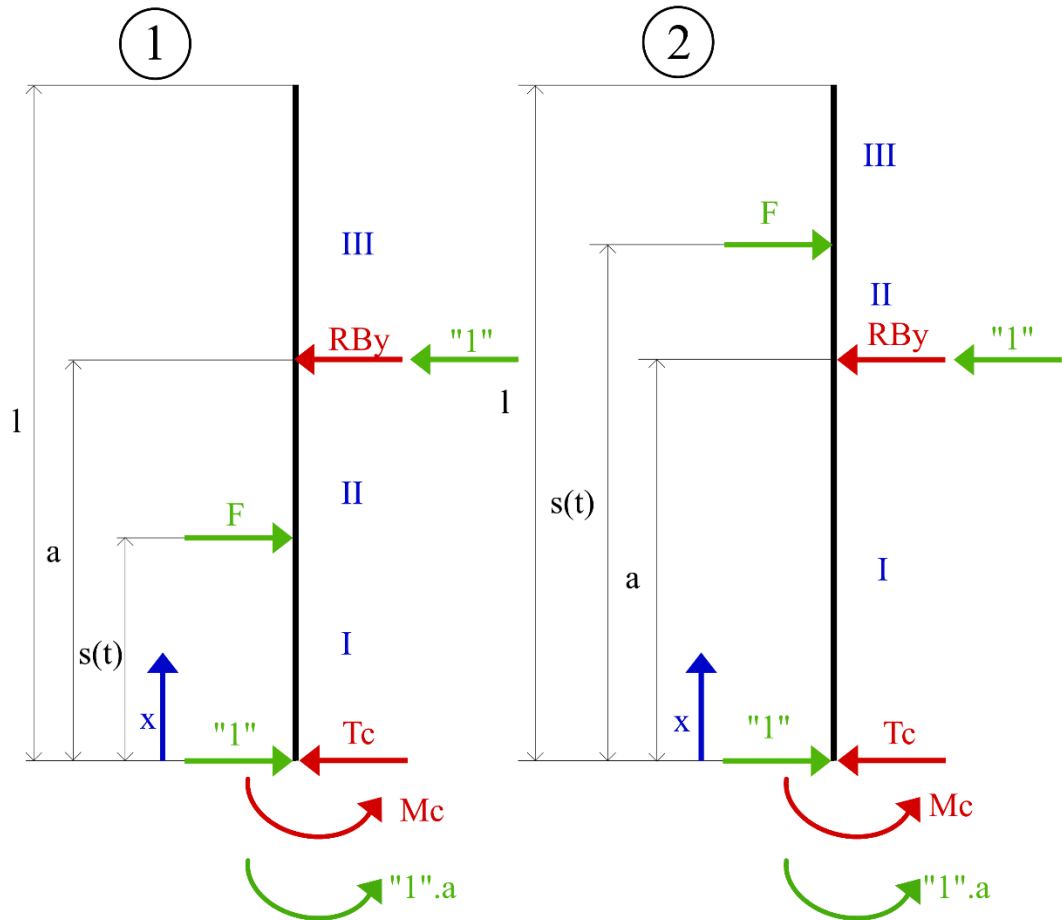


Obrázek 23: Přeprava rozložené rampy

### 3.8. Dynamika

Protože se při startu rakety síla působící na rampu posouvá, je potřeba zjistit, jak se bude rampa prohýbat v různých částech startu. Jelikož podpěry udržují nulový posuv ve všech směrech, bude se rampa prohýbat na obě strany, podle polohy působící síly.

Pro výpočet a zobrazení průhybu jsem opět využil diferenciální rovnice průhybové čáry. Tentokrát jsem však musel vypočítat dvě rovnice se třemi oblastmi. Jednu pro sílu působící mezi vetknutím a podpěrami a druhou pro sílu působící nad podpěrami. Souřadnice a působící síly použité pro výpočet jsou zobrazeny na obrázku 24.



Obrázek 24: Modely pro výpočet průhybu

Vlevo je model pro výpočet první z rovnic. Síla  $F$  zde působí mezi počátkem a podpěrami. Ve vetknutí jsou zobrazeny reakce  $T_c$  a  $M_c$  a reakce od jednotkové síly  $"1"$  a  $"1" \cdot a$ . Souřadnice  $x$  má počátek ve vetknutí a síly  $F$  a  $R_{By}$  rozdělují nosník na oblasti I, II a III. Vpravo je ten stejný obrázek až na polohu síly  $F$ , která ve druhém případě působí nad podpěrami.

Jelikož je úloha staticky neurčitá, nejprve si pomocí Mohrova integrálu vyjádřím reakci  $R_{By}$ .

$$\begin{aligned}
 M_{oI}(x) &= M_c - T_c \cdot x \\
 m_{oI}(x) &= -"1" \cdot a + "1" \cdot x \\
 M_{oII}(x) &= M_c - T_c \cdot x + F \cdot (x - s) \\
 m_{oII}(x) &= -"1" \cdot a + "1" \cdot x
 \end{aligned}$$



$$M_{oIII}(x) = M_C - T_C * x + F * (x - s) - RBy * (x - a)$$

$$m_{oII}(x) = -"1" * a + "1" * x - "1" * (x - a) = 0$$

Po dosažení vyjádřených momentů do Mohrova integrálu si vyjádřím vztah pro reakci **RBy**.

$$v_B = \frac{1}{E * J_z} * \left\{ \int_0^s [(M_C - T_C * x) * (x - a)] * dx + \int_s^a [(M_C - T_C * x + F * (x - s)) * (x - a)] dx \right\} = 0$$

$$RBy = F * \frac{3 * s^2 * a - s^3}{2 * a^3}$$

S vyjádřenou reakcí **RBy** už mohu sestavit první rovnici průhybové čáry pro všechny oblasti.

První oblast:

$$v''_I(x) = \frac{T_C * x - M_C}{E * J_z}$$

$$v'_I(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} - \frac{M_C}{E * J_z} * x + C1$$

$$v_I(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^3}{6} - \frac{M_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} + C1 * x + C2$$

Druhá oblast:

$$v''_{II}(x) = \frac{T_C * x - M_C - F * (x - s)}{E * J_z}$$

$$v'_{II}(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} - \frac{M_C}{E * J_z} * x - F * \left( \frac{x^2}{2} - s * x \right) + C3$$

$$v_{II}(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^3}{6} - \frac{M_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} - F * \left( \frac{x^3}{6} - s * \frac{x^2}{2} \right) + C3 * x + C4$$

Třetí oblast:

$$v''_{III}(x) = \frac{T_C * x - M_C - F * (x - s) + RBy * (x - a)}{E * J_z}$$

$$v'_{III}(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} - \frac{M_C}{E * J_z} * x - F * \left( \frac{x^2}{2} - s * x \right) + RBy * \left( \frac{x^2}{2} - a * x \right) + C5$$

$$v_{III}(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^3}{6} - \frac{M_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} - F * \left( \frac{x^3}{6} - s * \frac{x^2}{2} \right) + RBy * \left( \frac{x^3}{6} - a * \frac{x^2}{2} \right) + C5 * x + C6$$

Okrajové podmínky jsou v tomto případě nulový posun a nulové natočení ve vetknutí, tedy v souřadnici **0** a stejné natočení a posuv při přechodu mezi oblastmi.

$$v_I(0) = 0 \rightarrow C1 = 0$$

$$v'_I(0) = 0 \rightarrow C2 = 0$$

$$v'_I(s) = v'_{II}(s) \rightarrow C3$$

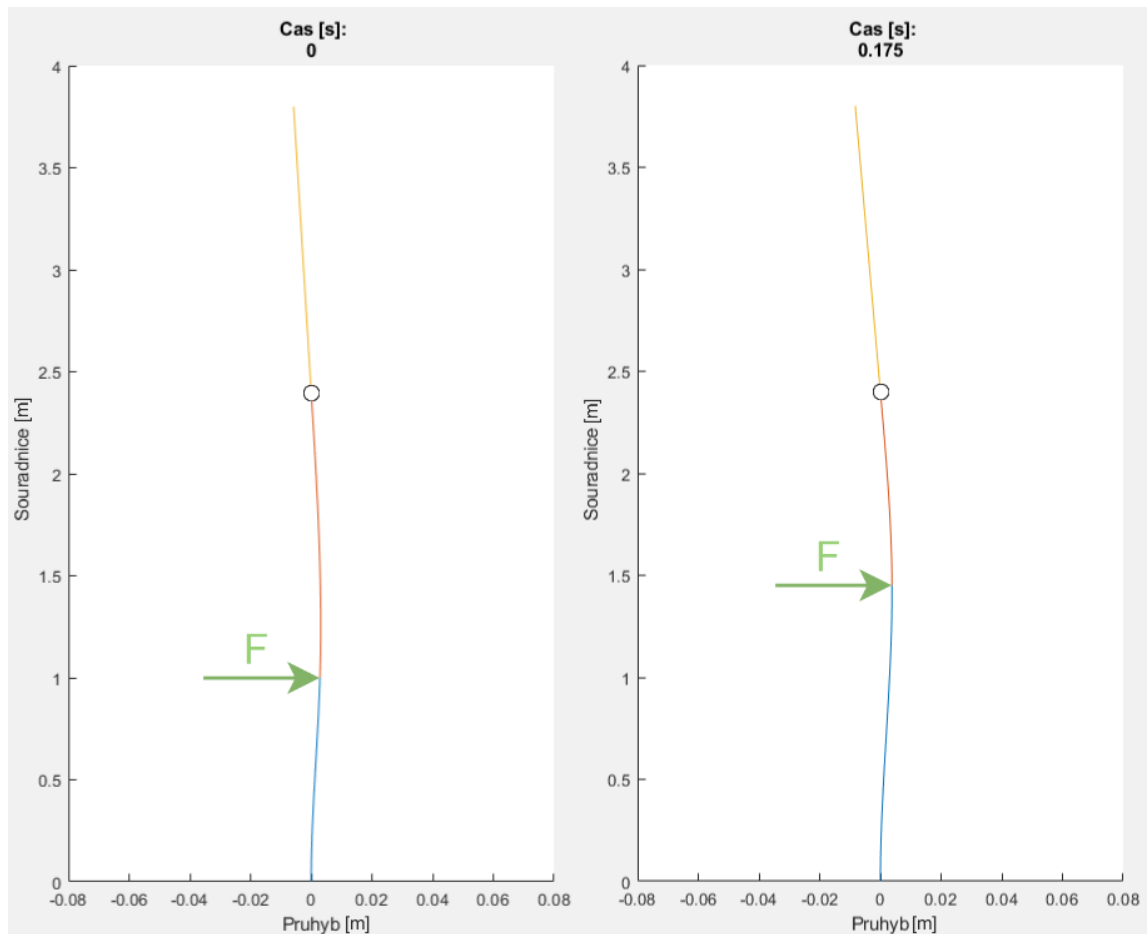
$$v_I(s) = v_{II}(s) \rightarrow C4$$

$$v'_{II}(a) = v'_{III}(a) \rightarrow C5$$

$$v_{II}(a) = v_{III}(a) \rightarrow C6$$

Souřadnici  $s(t)$  již znám z pohybové rovnice, tím pádem znám již všechny neznámé a stačí pouze dosazovat za čas  $t$ . Jelikož souřadnice  $s(t)$  vyjadřuje působíště síly  $F$ , které je v polovině mezi vodítky na raketě, bude souřadnice  $s(t)$  začínat ve výšce 1 m.

Tato rovnice průhybu platí pro případ, kdy je působící síla v části pod podpěrami, dále označovaná jako první část rampy. Jak je vidět z následujícího obrázku, celá rampa se prohýbá dvěma směry. Mezi vetknutím a podpěrami se prohýbá ve směru působící síly a nad podpěrami už ve směru opačném.



Obrázek 25: Zatížení v první části rampy

Síla  $F$  působí pod podpěrami a zobrazený kroužek značí polohu podpěr. Nahoře je vidět čas od startu v sekundách.

Pro získání průhybu ve druhé části rampy, tedy nad podpěrami, použijí stejného postupu jako v části první. Jediné, co se změní jsou oblasti integrace, protože dráha  $s$  je větší než vzdálenost  $a$ .

$$M_{oI}(x) = M_C - T_C * x$$



$$m_{oI}(x) = -1 * a + 1 * x$$

$$M_{oII}(x) = M_C - T_C * x - RBy * (x - a)$$

$$m_{oII}(x) = -1 * a + 1 * x - 1 * (x - a) = 0$$

$$M_{oIII}(x) = M_C - T_C * x - RBy * (x - a) + F * (x - s)$$

$$m_{oIII}(x) = -1 * a + 1 * x - 1 * (x - a) = 0$$

Po dosazení vyjádřených momentů do Mohrova integrálu si vyjádřím vztah pro reakci **RBy**.

$$v_B = \frac{1}{E * J_z} * \int_0^s [(M_C - T_C * x) * (x - a)] * dx = 0$$

$$RBy = F * \frac{3 * s * a^2 - a^3}{2 * a^3}$$

S vyjádřenou reakcí **RBy** už mohu sestavit druhou rovnici průhybové čáry.

První oblast:

$$v''_I(x) = \frac{T_C * x - M_C}{E * J_z}$$

$$v'_I(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} - \frac{M_C}{E * J_z} * x + C1$$

$$v_I(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^3}{6} - \frac{M_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} + C1 * x + C2$$

Druhá oblast:

$$v''_{II}(x) = \frac{T_C * x - M_C + RBy * (x - a)}{E * J_z}$$

$$v'_{II}(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} - \frac{M_C}{E * J_z} * x + RBy * \left( \frac{x^2}{2} - a * x \right) + C3$$

$$v_{II}(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^3}{6} - \frac{M_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} + RBy * \left( \frac{x^3}{6} - a * \frac{x^2}{2} \right) + C3 * x + C4$$

Třetí oblast:

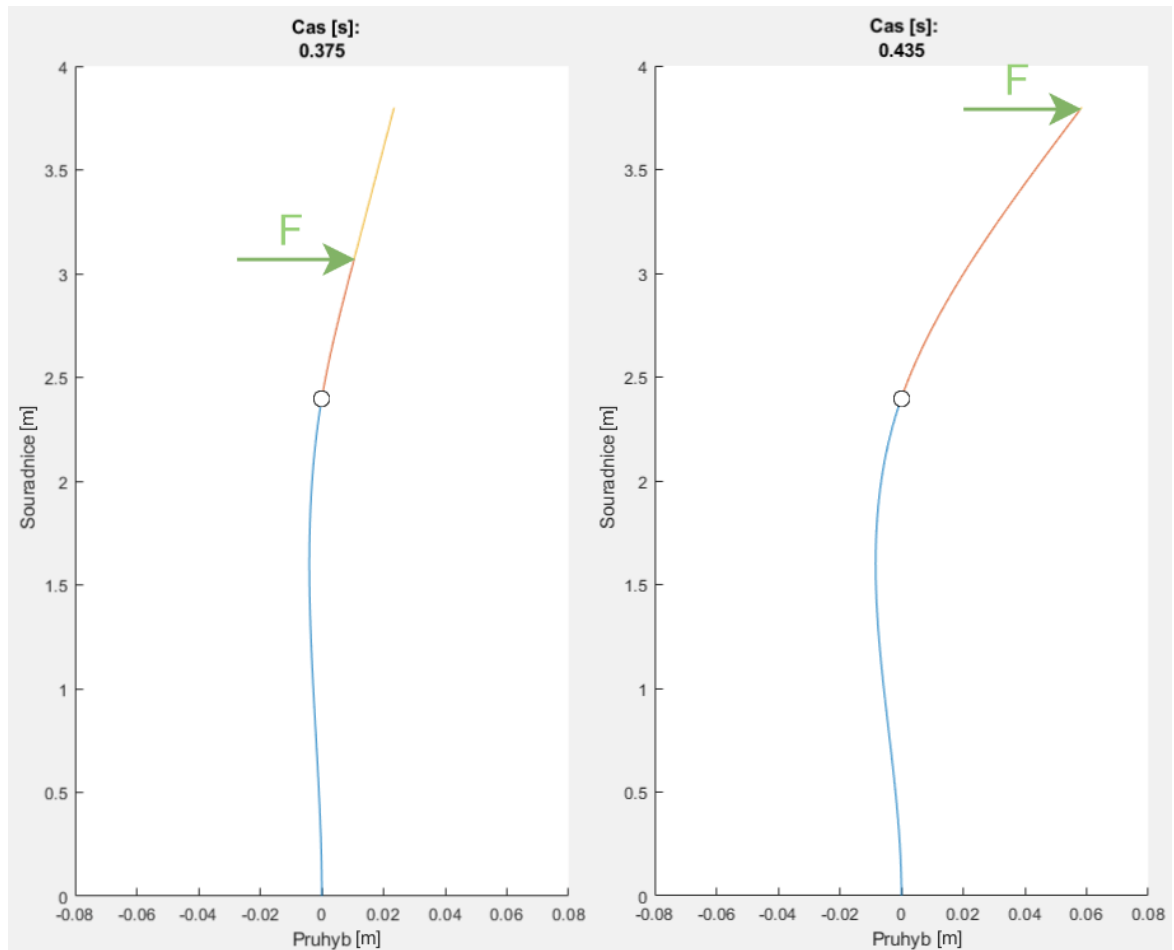
$$v''_{III}(x) = \frac{T_C * x - M_C - F * (x - s) + RBy * (x - a)}{E * J_z}$$

$$v'_{III}(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} - \frac{M_C}{E * J_z} * x - F * \left( \frac{x^2}{2} - s * x \right) + RBy * \left( \frac{x^2}{2} - a * x \right) + C5$$

$$v_{III}(x) = \frac{T_C}{E * J_z} * \frac{x^3}{6} - \frac{M_C}{E * J_z} * \frac{x^2}{2} - F * \left( \frac{x^3}{6} - s * \frac{x^2}{2} \right) + RBy * \left( \frac{x^3}{6} - a * \frac{x^2}{2} \right) + C5 * x + C6$$

Okrajové podmínky jsou stejné jako u prvních rovnic.

Ted' už mám vše potřebné pro zobrazení průhybu rampy pro všechny polohy síly  $F$ . Z obrázků 25 a 26 je vidět, že rampa se prohýbá ve dvou směrech s uzlem v místě podpěr a vetknutí. Největší průhyb v první části startu, kdy síla působí ještě pod podpěrami, jsou necelé 4 mm, vrchol se však vychýlí o 8 mm ve druhém směru. Po přechodu síly přes podpěry se směr průhybu otočí a jak je vidět z posledního obrázku, při opuštění rampy dosáhne návrhového maximálního průhybu.



Obrázek 26: Zatížení v druhé části rampy.

*Síla  $F$  působí nad podpěrami, jejichž poloha je zobrazena kroužkem.*

V těchto výpočtech byl zanedbán vliv setrvačnosti rampy, která by jistě ovlivnila velikost průhybu. Při vychýlení rampy jedním směrem jsou to právě setrvačné síly, působící proti silám měnící směr pohybu.



## 4. Závěr

Cílem bakalářské práce byl návrh rozebíratelné a přenosné startovací rampy pro výkonnou modelovou raketu. Nejprve jsem v teoretické části rozebral, jaký je rozdíl mezi běžnou modelovou raketou a vysoce výkonnou modelovou raketou. V druhé části jsem nastínil, proč jsou startovací rampy pro modelové rakety důležité a jaké úkoly plní. Na konci teoretické části jsem porovnal tři běžné typy startovacích ramp a jejich výhody a nevýhody.

V praktické části jsem nejprve zjistil, jak dlouhá musí startovací rampa být, aby zajistila dostatečnou rychlost rakety. Potom jsem dimenzoval všechny tři typy startovacích ramp na stejný průhyb a porovnával jejich hmotnost a funkčnost. Z porovnávaných typů jsem vybral rampu kolejnicovou, jelikož vycházela s nejnižší hmotností a je univerzálnější než zbylé typy.

Po výběru jednoho typu rampy jsem navrhl rozměry a uspořádání jednotlivých součástí, které jsem v následující části dimenzoval na průhyb, vzpěr a stabilitu. Hlavní profil je z hliníkového profilu 12 - 60x60 mm a celkové délce 3,8 m. V polovině je rozdělen na dvě části, kde je spojen spojovacími deskami. Ukotven na hlavní desku je pomocí dvou spojovacích úhelníků a pantu, který je zde kvůli sklopení rampy. K hlavní desce jsou pomocí drážkových matic a šroubů připojeny tři nohy do tvaru Y s úhly 90° a dvakrát 135°. Na konci nohou 1 a 2 jsou upevněny podpěry z plochých hliníkových tyčí o rozměru 50x8 mm, které jsou rozděleny na dvě části a uchyceny z boku hlavního profilu ve výšce 2,4 m. Kvůli stabilitě jsou na konci nohou 1 a 2 umístěna závaží o celkové hmotnosti 4 kg na jednu nohu.

Jako poslední jsem kontroloval průhyby rampy při síle posunující se po hlavním profilu. Zanedbal jsem zde setrvačné síly, ale i přesto tento výpočet poskytl důležité informace o způsobu, jakým se rampa bude prohýbat při startu rakety.

Navržená rampa vyhovuje svými rozměry zadaným hodnotám a při použití nejvýkonnější rakety ze zadání dosáhne maximální průhyb hodnoty 59,3 mm. To je pro účel této rampy dostatečně malý průhyb.

## 5. Seznam použité literatury

- [1] JEŘÁBEK, Karel, Jan ČEREPJUK a Ivan IVANČO. *Raketové modely*. Praha : Naše vojsko, 1983.
- [2] STEFAN JONES. *Portable model rocket launch pad* [online] [cit. 16. července 2020]. Dostupné z: <https://makezine.com/projects/portable-model-rocket-launch-pad/>.
- [3] NATIONAL ASSOCIATION OF ROCKETRY. *High power rocketry* [online]. 2020 [cit. 12. července 2020]. Dostupné z: [https://www.nar.org/high-power-rocketry-info/?fbclid=IwAR1WcdvF\\_FKoQrjs73qC\\_rOhX\\_YLvYAHKCuSmc0MVtFoyTiNmJ4bv7Eods](https://www.nar.org/high-power-rocketry-info/?fbclid=IwAR1WcdvF_FKoQrjs73qC_rOhX_YLvYAHKCuSmc0MVtFoyTiNmJ4bv7Eods).
- [4] RICHARD NAKKA. *Experimental rocketry* [online]. 8. července 2020 [cit. 16. července 2020]. Dostupné z: <http://www.nakka-rocketry.net/>.
- [5] MARK CANEPA. *Modern high-power rocketry 2*. 2nd ed. Victoria, B.C. : Trafford, 2005. 978-1-4120-5810-0.
- [6] NATIONAL ASSOCIATION OF ROCKETRY. *Standard motor codes* [online] [cit. 8. července 2020]. Dostupné z: <https://www.nar.org/standards-and-testing-committee/standard-motor-codes/?fbclid=IwAR1QBAHWBhEkP3ZoxTnI6lk7pooKvbTmcTxeMBCnr0LdnmMsKzfpILSRBdk>.
- [7] APOGEE ROCKETS. *Size comparison* [online] [cit. 16. července 2020]. Dostupné z: [https://www.apogeerockets.com/Rocket\\_Motors/AeroTech\\_Motors/29mm\\_Motors\\_Single\\_Use/Aerotech\\_29mm\\_Motor\\_G80T-13](https://www.apogeerockets.com/Rocket_Motors/AeroTech_Motors/29mm_Motors_Single_Use/Aerotech_29mm_Motor_G80T-13).
- [8] ALOIS ROSENBERG. *Raketové modelářství. Stavba raket, modelů a raketoplánů*. Brno : Computer Press, 2006. 80-251-0684-5.
- [9] AIR COMMAND WATER ROCKETS. *Building a water rocket launcher* [online]. 26. listopadu 2019 [cit. 13. června 2020].
- [10] HABERKORN. *Profile 12 60x60* [online] [cit. 22. července 2020]. Dostupné z: <https://cz-product.item24.com/cs/detaily-produktu/products/line-12-construction-profiles-1001042800/profile-12-60x60-natural-111/>.
- [11] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. Praha : České vysoké učení technické, 2010. 978-80-01-04224-3.
- [12] FERONA. *Tyč ocelová kruhová válcovaná za tepla* [online] [cit. 22. července 2020]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/detail/23443/tyc-ocelova-kruhova-valcovana-za-tepla-en-10060-prumer-38>.
- [13] NATIONAL ASSOCIATION OF ROCKETRY. *Model rocket safety code* [online] [cit. 25. července 2020]. Dostupné z: <https://www.nar.org/safety-information/model-rocket-safety-code/>.

## 6. Seznam obrázků

Obrázek 1: Modelová raketa [2] .....	- 2 -
Obrázek 2: Start výkonné modelové rakety [3] .....	- 2 -
Obrázek 3: Experimentální raketa "More Bad Wiring" [5, str. 277] .....	- 3 -
Obrázek 4: Porovnání velikostí motorů na tuhá paliva [7] .....	- 4 -
Obrázek 5: Tyčová rampa [9] .....	- 5 -
Obrázek 6: Kolejnicová rampa [9] .....	- 6 -
Obrázek 7: Dotyková rampa [9] .....	- 7 -
Obrázek 8: Průřez profilu 12-60x60 .....	- 10 -
Obrázek 9: Výpočtový model kolejnicové rampy .....	- 11 -
Obrázek 10: Průhyb kolejnicové rampy .....	- 13 -
Obrázek 11: Průhyb tyčové rampy .....	- 15 -
Obrázek 12: Rozložení sil v dotykové rampě. ....	- 16 -
Obrázek 13: Průhyb tyče dotykové rampy pro zatížení podle předchozího obrázku	- 17 -
Obrázek 14: Detail spojení hlavního profilu .....	- 19 -
Obrázek 15: Vodítka .....	- 20 -
Obrázek 16: Konstrukce kolejnicové rampy .....	- 21 -
Obrázek 17: Detail připojení hlavního profilu ke spojovací desce .....	- 21 -
Obrázek 18: Pohled shora na spojovací desku .....	- 22 -
Obrázek 19: Detail připojení podpěr k hlavnímu profilu .....	- 22 -
Obrázek 20: Průhyb a napětí finální rampy .....	- 24 -
Obrázek 21: Model na kontrolu stability .....	- 26 -
Obrázek 22: Detail závaží .....	- 27 -
Obrázek 23: Přeprava rozložené rampy .....	- 28 -
Obrázek 24: Modely pro výpočet průhybu .....	- 29 -
Obrázek 25: Zatížení v první části rampy .....	- 31 -
Obrázek 26: Zatížení v druhé části rampy. ....	- 33 -



## 7. Seznam tabulek

Tabulka 1: Klasifikace raketových motorů na tuhé palivo [6]..... - 4 -



## 8. Seznam příloh

Výkres 1: Podpěra 1

Výkres 2: Podpěra 21

Výkres 3: Podpěra 22

Výkres 4: Spojovací úhelník

Výkres 5: Spojovací deska

Výkres 6: Deska

Výkres 7: Tyč na závaží

Výkres 8: Sestava kolejnicové rampy