

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2017

Bc. Jan Snížek

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav letadlové techniky



Název Diplomové práce:

***Pádový kontejner pro experimenty v podmínkách mili/mikrogravitace***

Autor diplomové práce: Bc. Jan Snížek

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Jaroslav Kousal Ph.D.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v závěru práce.

V Praze dne 2. srpna 2017

Podpis

## **Poděkování**

V první řadě bych rád poděkoval Ústavu letadlové techniky za projevenou důvěru a možnost uskutečnění tohoto výzkumného prototypu.

Obzvláště děkuji vedoucímu práce Mgr.Jaroslavu Kousalovi Ph.D., za poskytnutí této příležitosti a konzultace, vedoucí k úspěšnému řešení. Dále Ing.Janu Čenskému a Ing.Jaromírovi Kučerovi za pomoc a konzultace při vývoji technologie a následných zkouškách. V neposlední řadě také Ing. Ivaně Dejlové za pomoc s formátováním diplomové práce a psychickou podporu.

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Teorie gravitace .....	2
2.1	Co je to gravitace .....	2
2.2	Gravitační síla, gravitační zrychlení .....	2
2.3	Obecná teorie relativity .....	3
2.4	Gravitační pole .....	3
2.4.1	Intenzita gravitačního pole .....	4
2.4.2	Tíhové pole .....	4
2.5	Teorie snížené gravitace, mikrogravitace a stav nulové gravitace .....	5
2.6	Testování v mikrogravitaci .....	5
2.6.1	Možnosti testování v mikrogravitaci .....	5
2.6.2	ISS .....	6
2.6.3	Návratové družice .....	7
2.6.4	Sondážní rakety .....	8
2.6.5	Atmosférické balony .....	9
2.6.6	Parabolické lety .....	10
2.6.7	Pádové věže .....	11
3	Výzkum na Zemi .....	12
3.1	Proč testovat v prostředí mikrogravitace na Zemi .....	12
3.2	Dnešní pádové věže .....	13
3.2.1	ZARM .....	13
3.2.2	NASA Glenn Research - The Zero Gravity Research Facility .....	15
3.2.3	NASA Glenn Research – 2.2s .....	17
3.2.4	Tower Facility of National Microgravity Laboratory of China .....	18
3.2.5	Pádová věž Dryden – Portland State UNIVERSITY .....	19
3.2.6	Queensland University of Technology (QUT) .....	20
3.2.7	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan .....	21
3.2.8	IDR/UPM, Universidad Politécnica de Madrid .....	22
4	Myšlenka vlastní pádové věže na ČVUT .....	24
4.1	Idea .....	24
4.2	Možnosti realizace na ČVUT .....	24
4.2.1	Umístění a podpora .....	24

4.2.2	Provedení.....	24
4.2.3	Spojení s centrifugou.....	25
5	Teoretický návrh.....	26
5.1	Provozní požadavky .....	26
5.2	Kapsle.....	26
5.2.1	Koncepce .....	26
5.2.2	Rozložení sloupů .....	26
5.2.3	Sektory.....	28
5.2.4	Konstrukční návrh .....	30
5.3	Aerodynamický štít .....	35
5.3.1	Koncepce .....	35
5.3.2	Použitá metoda .....	35
5.3.3	CFD simulace tvaru krytu .....	36
5.3.4	Konstrukční rozvaha.....	42
5.3.5	Rozhodovací proces.....	43
5.3.6	Výpočet délky štítu.....	43
5.3.7	Konstrukční provedení .....	46
5.4	Vypouštěcí mechanismus .....	47
5.4.1	Varianty provedení .....	47
5.4.2	Rozhodovací proces.....	47
5.4.3	Úchyt .....	48
5.5	Dopadový mechanismus.....	50
5.5.1	Varianty provedení .....	50
6	Výroba.....	52
6.1	Kapsle.....	52
7	Finální prototyp .....	54
7.1	Montáž sestavy .....	54
7.2	Elektronika .....	54
8	Závěr.....	57
	Informační zdroje .....	58
	Přílohy .....	59
	Přílohy na CD.....	59

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Princip gravitační síly .....	2
Obrázek 2 – Síly působící na těleso[2].....	4
Obrázek 3 – ISS[3].....	7
Obrázek 4 – Družice po návratu na Zem[4] .....	7
Obrázek 5 – Sondážní raketa[5] .....	8
Obrázek 6 – Atmosférický balón[6].....	9
Obrázek 7 – Letoun pro parabolické lety[7].....	10
Obrázek 8 – Stav beztlíže během parabolického letu[8] .....	10
Obrázek 9 – Pádová věž v Brémách – ZARM[9].....	14
Obrázek 10 – Zero-G vypouštěcí mechanismus[10].....	16
Obrázek 11 – 2,2s Drop Tower[10].....	17
Obrázek 12 – Pádová věž v Pekingu .....	18
Obrázek 13 – Pohled do pádové věže[12].....	19
Obrázek 14 – Kapsle pádové věže QUT[13].....	20
Obrázek 15 – Hodnota gravitace během experimentu v QUT[13].....	20
Obrázek 16 – Pádová věž v Japonsku[14].....	21
Obrázek 17 – Skica pádové věže IDR/UPM: .....	22
Obrázek 18 – Náhled na systémy platformy .....	23
Obrázek 19 – Komín na nádvoří ČVUT[16].....	24
Obrázek 20 – Centrifuga .....	25
Obrázek 21 – Skica profilu sloupu .....	27
Obrázek 22 – Verze se 4 sloupy .....	27
Obrázek 23 – Verze se 3 sloupy .....	28
Obrázek 24 – Police sendvičové konstrukce .....	29
Obrázek 25 – Dřevěná police .....	29
Obrázek 26 – Hliníková police.....	29
Obrázek 27 – Statická analýza police.....	30
Obrázek 28 – Velikost deformací z MKP analýzy (bez výztuhy) .....	31
Obrázek 29 - Velikost deformací z MKP analýzy (s výztuhou).....	31
Obrázek 30 – Vyztužená konstrukce horní a spodní desky .....	32
Obrázek 31 – Rozměry kapsle.....	32
Obrázek 32 – Schéma vyvažování .....	33
Obrázek 33 – Rozložení tlaku u kužele 60° .....	36
Obrázek 34 – Zobrazení proudnic u kužele 60° .....	37
Obrázek 35 - Rozložení tlaku u kužele 90° .....	37
Obrázek 36 – Vzduchové víry při obtékání kužele 90° .....	38
Obrázek 37 - Zobrazení proudnic u kužele 90°.....	38
Obrázek 38 – Rozložení tlaku u kulové špičky štítu .....	39
Obrázek 39 – Zobrazení proudnic u kulové špičky štítu .....	39
Obrázek 40 – Geometrie komolého kuželu .....	40
Obrázek 41 – Rozložení tlaku u komolého kuželu.....	40
Obrázek 42 – Zobrazení proudnic na špičce komolého kuželu.....	40



Obrázek 43 – Zobrazení proudnic u komolého kuželu.....	41
Obrázek 44 – Rozložení tlaku u válcové špičky štítu.....	41
Obrázek 45 – Tvorba silných vírů u válcové špičky štítu .....	42
Obrázek 46 – Zobrazení proudnic u válcové špičky štítu .....	42
Obrázek 47 – Pohyb kapsle uvnitř štítu – adaptováno z [15].....	44
Obrázek 48 – Uražená vzdálenost jednotlivých součástí - adaptováno z [15] .....	45
Obrázek 49 – 3D render aerodynamického štítu .....	46
Obrázek 50 – Elektronika s permanentním elektromagnetem.....	48
Obrázek 51 – Úchyt pro kompozitové desky .....	48
Obrázek 52 – Úchyt s vnitřním závitem.....	49
Obrázek 53 – Feromagnetická koncovka .....	49
Obrázek 54 – Laserový výpalek hliníkové police .....	52
Obrázek 55 – Svařené desky s žebrem.....	52
Obrázek 56 – Tvar profilu .....	53
Obrázek 57 – Sestava kapsle .....	53
Obrázek 58 – Prototyp bez aerodynamického obalu .....	54
Obrázek 59 – Primární baterie.....	55
Obrázek 60 – MyRIO[17] .....	55
Obrázek 61 – Online kamera Edimax[18].....	56
Obrázek 62 – Xiaomi YI Sport[19].....	56

## Seznam tabulek

Tab. 1 – Výběr z dnešních pádových věží.....	13
Tab. 2 – Technické parametry - ZARM .....	15
Tab. 3 – Technické parametry – Zero-G .....	16
Tab. 4 – Technické parametry – 2,2s Drop Tower .....	18
Tab. 5 – Technické parametry – Portland State University.....	19
Tab. 6 – Technické parametry - QUT .....	21
Tab. 7 – Technické parametry – IDR/UPM .....	23
Tab. 8 – Technické parametry centrifugy.....	25
Tab. 9 – Výsledky CFD simulace .....	36
Tab. 10 – Hodnocení variant aerodynamického štítu.....	43
Tab. 11 – Hodnocení variant dopadového mechanismu.....	51

## Seznam grafů

Graf 1 - Schéma možných způsobů testování .....	6
-------------------------------------------------	---

## Seznam symbolů

Symbol	Význam
$F_g$	Síla působící mezi dvěma hmotnými tělesy
$m_1$	Hmotnost prvního tělesa
$m_2$	Hmotnost druhého tělesa
$r$	Vzdálenost mezi tělesy
$\kappa$	Gravitační konstanta
$G$	Tíha tělesa
$R_z$	Poloměr Země
$g_0$	Gravitační zrychlení na hladině moře
$g_h$	Gravitační zrychlení ve výšce $h$
$E$	Intenzita gravitačního pole
$\omega_z$	Úhlová rychlost Země
$g_p$	Gravitační zrychlení na polech
$g_r$	Gravitační zrychlení na rovníku
$\Delta v$	Rozdíl mezi počáteční rychlostí a konečnou
$v_e$	Výtoková rychlost spalin
$m_0$	Počáteční hmotnost
$m_1$	Hmotnost po spotřebování paliva
$e$	Eulerova číslo
$y$	Výška komínu
$t$	Doba pádu
$l$	Rameno závaží
$a_t$	Tečné zrychlení
$a$	Celkové zrychlení
$a_d$	Odstředivé zrychlení
$\varphi$	Úhlová rychlost
$s$	Délka oblouku
$r_p$	Poloměr průvodiče
$\omega$	Úhlové zrychlení kapsle
$\rho$	Hustota vzduchu
$v$	Rychlost kapsle
$S$	Čelní plocha štítu
$C_D$	Součinitel odporu
$v_m$	Mezní rychlost štítu
$S_d$	Dráha pádu štítu
$S_e$	Dráha pádu kapsle
$h_0$	Rezerva kapsle

## Seznam příloh

- I. Výkres sestavy kapsle
- II. Výrobní výkres horní/spodní desky kapsle
- III. Výrobní výkres police
- IV. Výrobní výkres úchytu
- V. Výrobní výkres feromagnetické koncovky

## Přílohy na CD

- I. 3D model kapsle
- II. 3D schematický model štítu

## Seznam použitých programů

- I. Solidworks 2014
- II. Matlab R2015a
- III. Ansys Fluent
- IV. MS Office 2010
- V. AutoCAD 2014

## Anotace

Název práce: Vývoj pádové věže

Autor: Bc. Jan Snížek

Vedoucí práce: Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D.  
Ing. Jaromír Kučera

Akademický rok: 2016/2017

Ústav: Ú 12122 – ústav letadlové techniky

Rozsah: stran  
tabulek  
obrázků  
grafy  
CD s přílohami

Anotace: Cílem této práce bylo vyvinout a vyrobit výzkumné měřicí středisko sloužící k výzkumu a měření chování látek a procesů během jejich výskytu v mikrogravitaci. Práce zahrnuje vývoj měřicí kapsle, zvedacího zařízení a systému zachycení a jejich výroba a testování v praxi.

Klíčová slova: Pádová věž, mikrogravitace, gravitace, záchytný systém

## Annotation

Title: Development of drop tower

Author: Bc. Jan Snížek

Supervisor: Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D  
Ing. Jaromír Kučera

Akademic year: 2016/2017

Department: D 12122 – Department of aerospace engineering

Size: 25 pages  
19 tables  
18 pictures  
4 Graphs  
CD containing annexes

Annotation: The aim of this study was to develop and build a research center used for measuring research and measurement behavior of materials and processes during their occurrence in microgravity. Work includes the development of measuring capsule, lifting equipment and restraint system and their manufacture and testing in practice.

Key words: Drop tower, micro-gravity, gravity, restraint system



# 1 Úvod

Cílem této práce bylo vyvinout a vyrobit technologii ke zkoumání chování látek a procesů během jejich výskytu v oblasti změněné gravitace na půdě ČVUT – pádovou věž. Díky tomuto zařízení bude možné provádět výzkumné experimenty v oblasti mechaniky tekutin, biomechaniky, materiálového inženýrství, procesu spalování, elektrických výbojů a v neposlední řadě také učit studenty, jak správně připravit experiment a následně zhodnotit jeho výsledky tak, aby bylo možné jejich použití pro praktické využití ve vesmíru nebo v jiných odborných vědeckých sektorech. Vedle akademického významu by také měla být věž schopna nabídnout komerční využití pro české i zahraniční společnosti jako levná alternativa pádových věží v Evropě a zbytku světa.

Požadavkem bylo navrhnout provedení pádové věže a jejích subsystémů tak, aby bylo možné provádět testy v prostředí snížené gravitace. Testovací kapsle musí být dimenzována pro použití na centrifuze s přetížením 10g tak i k měření během letu v pádové věži. Pádová věž musí disponovat vypouštěcím zařízením a zařízením sloužícím k zachycení letící kapsle. Tyto jednotky jsou částečně také součástí této práce. Dále proběhne prvotní zkoušení všech subsystémů k ověření jejich funkcí a následné budoucí instalaci do samotné věže, což již není náplní této práce.

V této práci budu popisovat základní princip celé metody a již existující řešení z celého světa. Dále postupný vývoj a výrobu jednotlivých subsystémů, které na základě počítačových a praktických analýz budu optimalizovat až k finální verzi prototypu, který vyrobím pro možnost výzkumu a využití v budoucnosti. Sloužící k pozdějším vylepšením a zdokonalením v souladu s větším rozpočtem a počtem studentů, kteří toto téma budou řešit a posunou celý projekt vývojově dál tak, aby byl schopný konkurovat ostatním zařízením tohoto typu, zejména univerzitním, a velikosti v Evropě i ve světě.

## 2 Teorie gravitace

### 2.1 Co je to gravitace

Gravitace je přírodní jev, který všechny objekty o nenulové hmotnosti navzájem přitahuje k sobě, tato síla má nekonečný dosah a vždy působí jako síla kladná – přitažlivá. Vzhledem k faktu, že energie a hmota jsou ekvivalentní, pak všechny formy energie, včetně světla, vytvářejí kolem sebe gravitační sílu a zároveň jsou pod vlivem ostatních sil ve vesmíru.

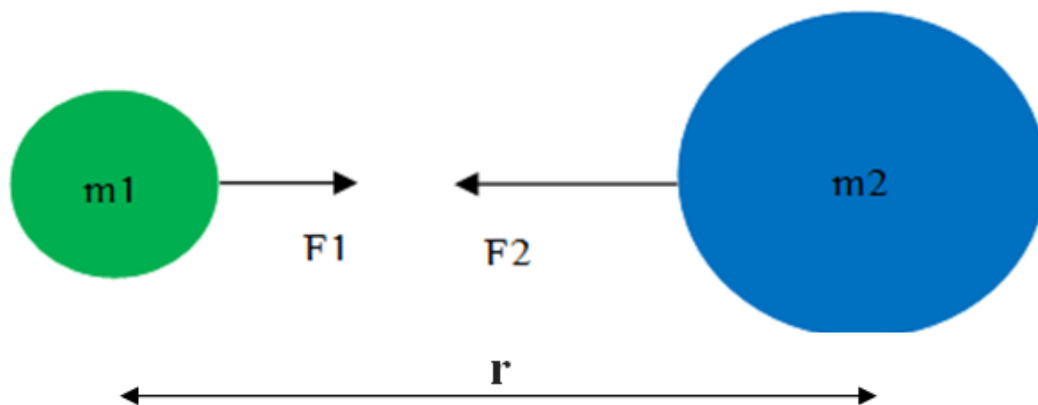
Hmotnost, stejně jako ostatní základní jednotky (délka, čas) je pouze fyzikální pojem a nemůže být definována žádnou jinou fyzikální veličinou. Hmotnost je ve své podstatě množství hmoty a jednoduše si ji lze představit jako těleso s určitou setrvačností. Čím větší má těleso hmotnost, tím více síly je potřeba k vychýlení jeho kurzu. S rostoucí hmotností roste setrvačnost a tím větší odolnost tělesa ke změně svého stavu, k uvedení do pohybu, změně směru nebo naopak k zastavení.

### 2.2 Gravitační síla, gravitační zrychlení

Gravitační síla jako taková je přímo úměrná gravitační konstantě a hmotě dvou těles, mezi kterými chceme gravitační sílu stanovit a nepřímo úměrná jejich vzdálenosti. Jelikož vzdálenost mezi tělesy je ve vesmíru obrovská avšak reálná, dosahuje gravitační síla nuly pouze limitně v nekonečnu. Jak je patrné ze základního Newtonova vzorce:

$$F_g = F_{1,2} = \kappa \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1)$$

- $F_g$  je síla působící mezi dvěma hmotnými tělesy
- $m_1$  je hmotnost prvního tělesa
- $m_2$  je hmotnost druhého tělesa
- $r$  je vzdálenost mezi tělesy
- $\kappa$  je gravitační konstanta, která se rovná přibližně:  $\kappa = 6.6742 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$



Obrázek 1 – Princip gravitační síly

Působení tělesa o veliké hmotnosti na těleso o miniaturních rozměrech v poměru k prvnímu tělesu nazýváme tíha a značíme ji  $G$ . Pokud hmotnost velkého tělesa značíme  $M$  a hmotnost tělesa malého  $m$  potom je tíha malého tělesa počítána podle vzorce:

$$G = \kappa \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = m \cdot \left( \frac{\kappa \cdot M}{r^2} \right) \quad (2)$$

Nebo

$$G = m \cdot g \quad (3)$$

Kde

$$g = \frac{\kappa \cdot M}{r^2} \quad (4)$$

Jednotka  $g$  je tzv. gravitační zrychlení a má jednotky  $(\text{m/s}^2)$ . Pokud gravitace planety je jediná síla působící na těleso, potom se těleso nachází ve stavu volného pádu. To je stav, kdy je těleso přitahováno do středu většího tělesa se zrychlením  $g$ .

Při dosazení poloměru země a její hmotnosti do rovnice (4) dostaneme gravitační zrychlení na hladině moře.

$$g_0 = \frac{\kappa \cdot M}{R_z^2} = \frac{6.6742 \times 10^{-11} \cdot 5.972 \times 10^{24}}{6378000^2} \quad (5)$$

$$g_0 = 9.807 \text{ m/s}^2$$

Pro určení velikosti gravitačního zrychlení v nadmořské výšce  $h$  použijeme vzorec:

$$g_h = \kappa \frac{M_z}{(R_z + h)^2} \quad (6)$$

### 2.3 Obecná teorie relativity

Gravitace je nejlépe popsána pomocí obecné teorie relativity. Teorii zveřejnil v roce 1915 německý fyzik Albert Einstein a do dnešní doby se jí nepodařilo vyvrátit. Stala se jedním ze základních pilířů moderní fyziky. Tato teorie zjednodušuje teorii speciální relativity Newtonovské mechaniky. Uvádí v souvislosti gravitaci a geometrické vlastnosti prostoru a času, které říkáme jedním slovem časoprostor. Opravuje nepřesnosti Newtonské mechaniky ve vysokých rychlostech blížících se rychlosti světla. Tuto teorii používáme ovšem pro velká gravitační pole a pro menší využíváme Newtonovu teorii gravitace. Obě metody ve slabých polích udávají stejné hodnoty, avšak Newtonova metoda je mnohonásobně jednodušší a pro výpočty týkajících se padací věže naprosto dostačující.

### 2.4 Gravitační pole

Vliv gravitačních sil a jejich působení lze v Newtonově gravitační teorii určovat ne jen jako sílu, ale také jako intenzitu gravitačního pole, případně velikost gravitačního zrychlení. Každé těleso vyskytující se v gravitačním poli druhého tělesa získává určitou potenciální energii. Tato energie je označována jako gravitační potenciální energie  $E_p$ .

### 2.4.1 Intenzita gravitačního pole

Tato veličina není samostatná jako například hmotnost nebo čas, ale je jen jiným vyjádření velikosti gravitační síly nebo hodnoty gravitačního zrychlení v gravitačním poli tělesa.

$$E = \frac{F_g}{m} \quad (7)$$

Přitom podíl síly působící na hmotný bod je z 2. Newtonova zákona jako zrychlení tělesa. Po dosazení gravitační síly v daném bodě, kde se nachází těleso o určité hmotnosti, nám rovnice říká, že intenzita gravitačního pole je totožná jako gravitační zrychlení. Z toho plyne, že intenzita gravitačního pole v konkrétním místě se rovná gravitačnímu zrychlení, které v daném místě uděluje tělesu gravitační síla tedy:

$$E = g \Rightarrow \left[ \frac{N}{kg} \right] = \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (8)$$

Intenzita gravitačního pole, jako taková, je pouze jiný druh zápisu, který může být v určitých případech užitečný.

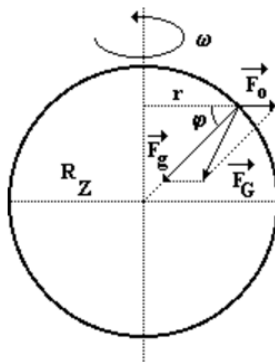
### 2.4.2 Tíhové pole

Toto pole je dáno vektorovým součtem gravitační síly a síly odstředivé, která je vyvolaná rotací tělesa (Země) [2].

$$G = F_G = m \cdot g = F_g + F_o \quad (9)$$

$$F_o = m \cdot \omega_z^2 \cdot r = m \cdot \omega_z^2 \cdot R_z \cdot \cos \varphi \quad (10)$$

Kde  $r$  je vzdálenost od osy rotace,  $R_z$  je poloměr Země,  $\varphi$  je zeměpisná šířka a  $\omega$  je  $7,29 \times 10^{-5}$  rad/s.



Obrázek 2 – Síly působící na těleso[2]

Tíhové zrychlení se tedy mění v závislosti na zeměpisné šířce, nesymetričnosti a zploštění Země. Díky odstředivé síle je tíhová síla na rovníku menší než na zeměpisných pólech.

Na pólech

$$g_p = 9.83\text{m/s}^2$$

Na rovníku

$$g_r = 9.79\text{m/s}^2$$

Normální tíhové pole

$$g_0 = 9.80665\text{m/s}^2$$

## 2.5 Teorie snížené gravitace, mikrogravitace a stav nulové gravitace

Stav nulové gravitace by byl takový stav, ve kterém na těleso nepůsobí žádná tíha. Dle Newtonova vzorce gravitačního zákona neexistuje nic jako dokonalý „stav nulové gravitace“.

Tělesa ve vesmíru na sebe totiž působí i při obrovské vzdálenosti, kdy vzdálenost  $r$  dosahuje nekonečně velké vzdálenosti. Tyto síly jsou teoreticky nekonečně malé, ale jejich existence vylučuje naprostý stav beztlíže. Ten by nastal, pokud by se těleso pohybovalo ve stejném směru, se stejným zrychlením rovnému lokálnímu gravitačnímu zrychlení pak by byla výsledná hodnota tíhy nula. Protože, ale na těleso působí v praxi vždy i nějaké další síly, ( tlak záření, odpor atmosféry, zdánlivé síly od rotací) je přesnější mluvit o stavu snížené gravitace respektive mikrogravitace (pro tíhové zrychlení  $g < 1 \times 10^{-6}$ )

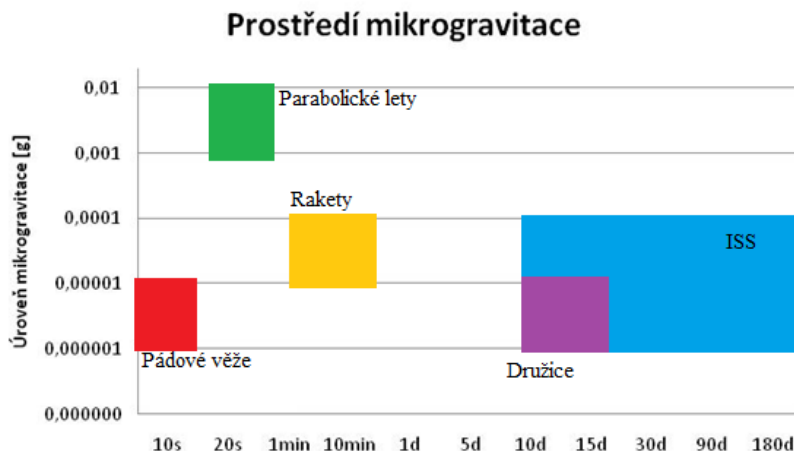
## 2.6 Testování v mikrogravitaci

### 2.6.1 Možnosti testování v mikrogravitaci

V prostředí mikrogravitace je možné testovat na různých úrovních. Volba metody testování v mikrogravitaci je závislá na následujících aspektech:

- Kvalita mikrogravitace
- Potřebná doba k provedení experimentu
- Počet potřebných opakování experimentu
- Náročnost obsluhy experimentu
- Hmotnost experimentu
- Cenová náročnost

Tyto aspekty je nutné zvážit a na základě rozhodovacího procesu vybrat vhodnou metodu testování. Základní rozdělení je zobrazeno v grafu.



Graf 1 - Schéma možných způsobů testování

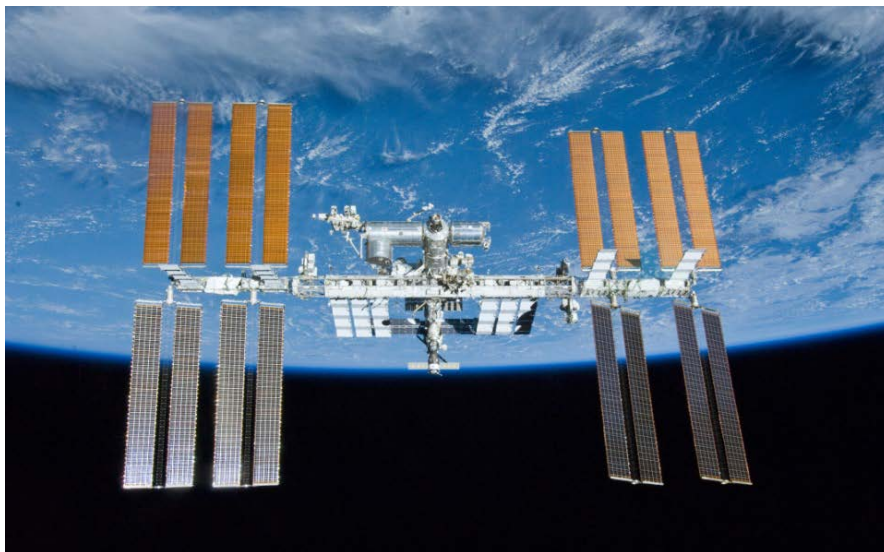
### 2.6.2 ISS

Mezinárodní vesmírná stanice [3] je projekt, na kterém spolupracuje 5 kosmických organizací.

- NASA (USA)
- Roskosmos (Rusko)
- ESA ( Evropská kosmická agentura )
- JAXA (Japonsko)
- Kanadská kosmická agentura

Skládá se z původně plánovaných samostatných modulů jednotlivých organizací, které byly upraveny, tak aby spolu vytvořili vesmírnou stanici. První modul byl vynesena 20. 11. 1998 a 2. 11. 2000 vstoupila na palubu první posádka. Od té doby je stanice trvale osídlena.

Stanice slouží k upevnění mezinárodních vztahů a zlepšení spolupráce mezi organizacemi. Hlavním přínosem je výzkum prováděný v prostředí mikrogravitace přímo na palubě stanice. Zkoumá se vliv mikrogravitace na biologické procesy (medicína, biotechnologie), fyzikální děje, jako je mechanika kapalin a plynů, kvantová fyzika, astrologie a vliv prostředí při dlouhodobém pobytu člověka. Lidskému tělu zde hrozí odvápnění kostí, zhoršená schopnost regenerace, svalová atrofie a fungování oběhového systému a dalších tekutin v těle. Dále se prověřují účinky radiace a kosmického záření na materiály a na člověka. Tyto výzkumy jsou nutné pro další objevování vesmíru během pilotovaných misí například na Mars nebo vybudování stanice na Měsíci. Zkoumá se také jak mikroby, rostliny a ostatní živočichové reagují na prostředí snížené gravitace. Plno biologických procesů je závislých na gravitačním poli, díky kterému se orientují (kořeny rostlin). Ve speciálním alfa-částicovém spektrometru probíhá dlouhodobý výzkum antihmoty a na palubě byly také prováděny pokusy s 3D tiskárnou, která představuje vhodnou alternativu pro budoucí výrobu náhradních dílů přímo na palubě stanice. Další zkoumanou problematikou je vylepšení komunikace mezi Zemí a stanicí pomocí laserů.



Obrázek 3 – ISS[3]

Výzkum na Mezinárodní vesmírné stanici je vhodný především pro dlouhodobé experimenty nebo experimenty vyžadující prostředí kvalitní mikrogravitace. Jeho hlavní nevýhodou jsou vysoké náklady, a proto je výhodnější provádět jednodušší nebo méně časově náročné experimenty, které nepotřebují tak kvalitní mikrogravitaci náhradním způsobem.

### 2.6.3 Návrátové družice

Tyto družice jsou vynášeny na oběžnou dráhu pomocí raket a jejich hlavní výhodou je delší možnost provádění experimentu ve vysoké výšce, než je tomu u sondážních raket. Doba experimentu může trvat od několika hodin po dny a déle. Následně se upraví její dráha tak, aby se družice postupně dostala na zemský povrch. Družice jsou silně automatizované, disponují 3 osou stabilizací a brzdícím motorem (družice Zenit, SRE-1) Tyto družice nyní nejvíce využívá Čína a Indie. Ostatní agentury využívají k experimentům převážně stanici ISS, ale ne bezpodmínečně. Návrátovou družici BION-M2[4] dnes připravuje Ruská akademie věd, která hodlá testovat kosmickou biologii a medicínu.



Obrázek 4 – Družice po návratu na Zem[4]

### 2.6.4 Sondážní rakety

Sondážní rakety nebo též průzkumné rakety jsou využívány vědci k provádění experimentů a výzkumné činnosti během sub-orbitálního letu ve výškách od 50km do 1500km. Nečastěji rakety dosahují prostoru mezi atmosférickými balony (40km) a družicemi (150km). Určité rakety jsou schopny dosáhnout apogea ve výšce až 1500km, například raketa Black Brant X [5] a XII.

Mise je uskutečněna pomocí raket na pevné palivo, které vynesou náklad o užité hmotnosti od desítek kilogramů po 450kg do požadované výšky. Let probíhá vysokou rychlostí a při vysokých otáčkách celé rakety. Tyto otáčky slouží k její stabilizaci. Po spotřebování pevného paliva v prvním stupni nebo dosažení potřebné výšky je odhozen motor a v případě více stupňových raket zažehnut druhý, případně třetí, stupeň. Pro rakety nesoucí těžší náklad nebo dosahující větších výšek je vícestupňová konstrukce výhodnější z hlediska efektivity, jak je patrné z Ciolkovského rovnice. Tato rovnice bere v úvahu podíl počáteční hmotnosti rakety vůči hmotnosti bez paliva. Využitím více motorů a menších nádrží a jejich postupném odhazování dosáhneme vyšší efektivity motorů a spotřebě méně paliva což se opět projeví v Ciolkovského rovnici jako počáteční hmotnost.

$$\Delta v = v_e \cdot \ln \frac{m_0}{m_1} \Rightarrow m_1 = m_0 \cdot e^{-\Delta v / v_e} \quad (11)$$

- $\Delta v$  je rozdíl mezi počáteční rychlostí a konečnou
- $v_e$  je výtoková rychlost spalín
- $m_0$  je počáteční hmotnost
- $m_1$  je hmotnost po spotřebování paliva
- $e$  je Eulerova čísla

Následuje tzv. de-spin, který disipuje rotační energii rakety a zastaví otáčky užitečného nákladu. Náklad pokračuje po eliptické dráze, která v perigeu prochází zemským povrchem, do svého apogea a následně začne padat zpět na Zem a na padáku přistane. Celý průběh letu je monitorovaný kamerami a GPS.



Obrázek 5 – Sondážní raketa[5]



Hlavní výhodou sondážních raket pro vědce je jejich nízká cenová náročnost, krátká doba přípravy a schopnost výzkumu v místech, kde nemohou operovat atmosférické balony ani družice. Další využití raket je testování přístrojů a vybavení, která mají být použita během mnohem nákladnějších a více riskantních misí. Malá velikost těchto raket také ulehčuje možnost a variabilitu k jejich vypouštění z různých základen po celém světě, včetně odpalovacích ramp na vojenských lodích. ESA také poskytuje studentům raketu REXUS k uskutečnění jejich diplomových a disertačních prací.

### 2.6.5 Atmosférické balony

Tato metoda představuje levný způsob jak zkoumat mikrogravitaci bez budování speciálních výzkumných budov nebo zařízení. Moderní balony jsou schopny dosáhnout výšky kolem 35km, případně až 50km. Zde vypustí komoru s experimentem, ve které se po dobu několika vteřin vytvoří prostředí snížené gravitace. Vlivem houstnoucí hustoty vzduchu a větru se nepodaří docílit tak kvalitní mikrogravitace jako v předchozích uvedených metodách přibližně kolem  $3 \times 10^{-3}g$ . K nafouknutí balónu objemu 532000m<sup>3</sup> [6] se nejčastěji využívá hélium, vodík a velmi vzácně také metan. Nejčastěji využívají balóny meteorologové ke zkoumání teploty, proudění vzduchu, tlaku a vlhkosti v atmosféře. Vědci měří za použití stratosférických balónů magnetické pole, složení vzduchu, ozonové vrstvy a radiaci přicházející z vesmíru. Moderní balóny jsou schopné absolvovat mise dlouhé i několik měsíců.



Obrázek 6 – Atmosférický balón[6]

Nespornou výhodou je možnost využití balonu pro více rozdílných experimentů najednou a rychlá příprava ke startu (týdny). Nevýhodou ovšem je nemožnost ovládat dráhu balónu a tudíž nutnost monitorovat polohu a určit konečné místo dopadu zařízení na zem.

### 2.6.6 Parabolické lety

Parabolické lety za využití speciálně upraveného letadla [7] nabízejí možnost tréninku pro astronauty [8], provádění výzkumu pro vědce a další možnosti například pro filmové štáby. Let probíhá po parabolické dráze, která zahrnuje 3 různá stádia.



Obrázek 7 – Letoun pro parabolické lety[7]

První část kdy letadlo vystoupá do výše 24.000 stop (7300m). V této výšce pilot přitáhne nos na úhel  $45^\circ$  a stoupá. V této fázi letu posádka cítí přetížení 1.8g. Pilot stoupá, dokud nedosáhne výšky přibližně 32.000 stop (9700m).

Zde potlačí a do pozice kde posádka i přístroje zažívají stav mikrogravitace po přibližně 20-30 sekund. V této fázi letadlo letí po dráze kopírující vršek paraboly. Ačkoliv se pasažérům zdá, že zažívají stav beztíže, ve skutečnosti se jejich pohyb dá popsat jako volný pád s tím rozdílem, že letadlo letí ve stejné trajektorii, po které padají pasažéři. Jde o případ šikmého vrhu.

Ve třetí fázi pilot skloní nos letadla pod úhlem  $20^\circ$  dolů a klesá na původní výšku 24.000 stop (7300m). Během tohoto klesání se naopak přetížení zvýší opět na 1.8g. Celý proces se opakuje většinou 15x dokola.



Obrázek 8 – Stav beztíže během parabolického letu[8]

Během těchto opakování je k dispozici 7-8 minut mikrogravitace, při které je možné provádět experimenty. Tento systém je výhodný pro svou jednoduchou opakovatelnost a pro možnost prožití mikrogravitace vědce a kosmonauty bez nutnosti cesty do vesmíru. Výcvik kosmonautů a výzkum fyzikálních principů, přípravě experimentů a vývoji nástrojů pro použití ve volném vesmíru.

### **2.6.7 Pádové věže**

Pádové věže pro vědce představují levný a jednoduchý způsob provádění experimentů v prostředí mikrogravitace. V těchto zařízeních nebo budovách se využívají aerodynamické štíty nebo vakuový prostor ke snížení odporu vzduchu a tím ke zlepšení výsledné mikrogravitace během experimentu.

V dnešní době se využívají pádové věže s dobou trvání mikrogravitace mezi 2 až 5 vteřinami, v případě využití katapultu až 9,3 vteřin. To poskytuje dostatečnou dobu na zkoumání fyzikálních procesů jako je spalování, mechanika tekutin a plynů. Tyto experimenty jsou důležité pro vývoj kosmických lodí, přípravu dlouhodobých experimentů na oběžné dráze nebo jako náhrada testování v prostředí mikrogravitace, které se díky dostatečným podmínkám nemusí realizovat na ISS nebo družicích.

## 3 Výzkum na Zemi

### 3.1 Proč testovat v prostředí mikrogravitace na Zemi

Testování ve stavu mikrogravitace je nezbytné k rychlému vývoji a zlepšování technologií používaných ve vesmíru, jejich nasazení do základního vybavení a bezpečnosti. Provádět veškeré testování na oběžné dráze by bylo velice časově náročné a finančně nezvládnutelné. Velké množství experimentů by nebylo vůbec uskutečněno a tím by se celý proces významně zpomalil. Testování na Zemi je výhodné z hlediska časové náročnosti a možnosti levného, opakovatelného testování. V případě dalšího testování, které si bude vyžadovat dlouhý pobyt v mikrogravitaci, je možné využít pádové věže k přípravě experimentu a snížení nákladů v případě neúspěšném návrhu měřicí metodiky. Testování je tedy vhodné i jako prevence k odhalení chyb v inženýrských experimentech.

Výzkum nevyžadující vysoké náklady je navíc přístupný i studentům vysokých škol. Studenti ze základních a středních škol se mohou také účastnit projektů spojených s výzkumem mikrogravitace na Zemi, jejich počet ovšem není takový. ESA se momentálně snaží zvýšit zájem dětí o vesmír již během povinné základní docházky a slibuje si větší přísun studentů zaměřených právě na kosmonautiku a výzkum s ní spojený, kteří se zařadí do skupiny odborníků podílejících se na vesmírných misích.

Vytvoření dostatečného množství výzkumných pracovišť přístupných vědcům a studentů z celého světa je důležitým krokem k lepšímu prozkoumání fyzikálních jevů a zrychlení objevování vesmíru. Jako vedlejším produktem výzkumu jsou zkušenější pracovníci a vzdělanější studenti, kteří v praxi zvládnou fungovat efektivněji a vymyslet inovátorské metody měření a testování.

Vlastní univerzitní pádová věž je možnost pro studenty zadarmo využívat možnosti k provádění experimentů v oblasti mikrogravitace a vznikne tak nové vědecké pracoviště a rozšíří se nabídka oborů k vyučování, témat bakalářských, diplomových a disertačních prací.

### 3.2 Dnešní pádové věže

t[s]	h[m]	g/g <sub>0</sub>	Provedení	Záchytný systém	Instituce
4.7	120	10 <sup>-6</sup>	Vakuová komora	Polystyrenové kuličky	ZARM, Bremen
5.2	132	10 <sup>-5</sup>	Vakuová komora	Polystyrenové kuličky	NASA Glenn Research Center, The Zero gravity, Cleveland, Ohio
2.2	24	10 <sup>-5</sup>	Aerodynamický štít	Airbag	NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio
3.6	83	10 <sup>-5</sup>	Vakuová kapsle se štítem	Sít' s lanovým systémem	Drop Tower Facility of National Microgravity Laboratory of China, Beijing
2.1	22.2	10 <sup>-3</sup>	Aerodynamický štít	Permanentní magnet a indukovaný proud	Dryden drop tower, Portland State University
2.0	23.2	10 <sup>-5</sup>	Aerodynamický štít	Airbag	Queensland University of Technology
1.4	10	10 <sup>-3</sup>	Aerodynamický štít	Elektromagnet	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Sukubab, Japan
1.6	13	10 <sup>-3</sup>	Aerodynamický štít	Zapichovací hrot	IDR/UPM, Universidad Politécnica de Madrid

Tab. 1 – Výběr z dnešních pádových věží

#### 3.2.1 ZARM

Pádová věž v Brémách je hlavní laboratoří ZARM ( Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation ) [9] a jediná laboratoř tohoto druhu v Evropě. Základní kámen budovy byl položen v roce 1988 a v roce 2004 byl otevřen katapult. Věž je 146m vysoká a pro experimenty zde lze využít volný pád z výšky 120m. Z této pozice trvá let 4,74s. Po instalaci katapultu, který byl vyvinutý v ZARM, se prodloužila doba trvání experimentu na 9,3s, což je nesrovnatelný čas s jakýmkoliv jiným zařízením podobného typu na světě. Pneumatický systém urychlí kapsli za 0,25s na 168Km/h. Přesnou sílu potřebou k danému zrychlení určí technici konkrétně pro každý experiment vlastním výpočtem, aby se co nejlépe využil potenciál věže a doba letu byla co nejdelší. Po několika sekundách se do míst, kam má kapsle spadnout přesune zpomalovací/zachytávací jednotka a kapsli bezpečně zachytí. Experimenty jsou prováděny v hermeticky uzavřené kapsli o průměru 800mm.



Obrázek 9 – Pádová věž v Brémách – ZARM[9]

Díky vakuové komoře dosahuje pádová věž vynikající prostředí mikrogravitace, přibližně  $10^{-6}g$ . O vytvoření tohoto prostředí se stará 18 vysoce výkonných čerpadel, které zaručí pokles vzduchu na hodnotu 0,0001 normálního tlaku. Díky vakuu je odpor tak nízký, že v Brémách mohou poskytovat jednu z nejkvalitnějších mikrogravitací na Zemi – v některých aspektech lepší než na ISS. Díky těmto vlastnostem a je zařízení ZARM ekonomickou a snadnou alternativou k provádění výzkumu ve vesmíru. Vědci a vývojáři z celého světa přicházejí do Brém, aby vytvářeli experimenty v různých oblastech výzkumu, jako je astrofyzika, biologie, chemie, spalování, dynamika tekutin, základy fyziky a vědy o materiálech, jakož i průběh technologických zkoušek. Dále se připravuje hardware pro budoucí vesmírné mise.

<b>ZARM</b>			
<b>Typ kapsle</b>	<b>Krátký</b>	<b>Dlouhý</b>	<b>Katapult</b>
<b>Trvání mikrogravitace – volný pád</b>	4.74s	4.74s	-
<b>Trvání mikrogravitace - katapult</b>	-	-	9.3s
<b>Délka volného pádu</b>	120m	120m	120m
<b>Úroveň mikrogravitace</b>	0.000001g	0.000001g	0.000001g
<b>Maximální přetížení - brzdění</b>	50g	50g	50g
<b>Maximální přetížení - katapult</b>	35g	-	35g
<b>Délka vakuové komory</b>	146m	146m	146m
<b>Parametry kapsle</b>			
<b>Průměr kapsle</b>	814mm	814mm	814mm
<b>Výška kapsle</b>	1341mm	2107mm	1341mm
<b>Celková hmotnost nákladu</b>	274kg	234kg	161.5kg

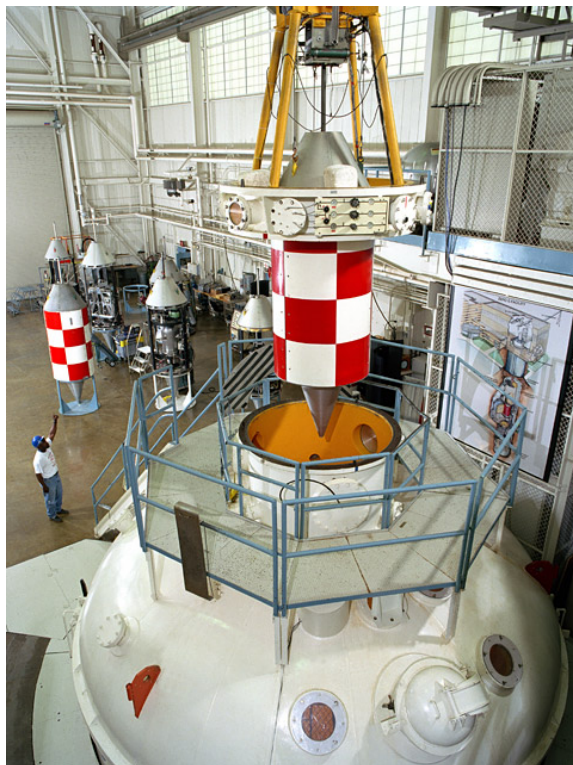
Tab. 2 – Technické parametry - ZARM

### 3.2.2 NASA Glenn Research - The Zero Gravity Research Facility

Zero Gravity [10] je zařízení pro pozemní výzkum mikrogravitace a největším zařízením svého druhu na světě. Zero-G je jedním ze dvou pádových věží, které se nacházejí v Brook Park, Ohio. Pádová věž Zero-G je v provozu od roku 1966. Původně byla navržena a postavena v období vesmírných závodů v 60. letech 20. století na podporu výzkumu a vývoje komponent k realizaci vesmírných letů a systémů pracujících s tekutinami v prostředí mikrogravitace. Zařízení je v současné době používáno výzkumnými pracovníky NASA, kteří studují účinky mikrogravitace na fyzikální jevy, jako je spalování a mechanika tekutin, snaží se rozvíjet a demonstrovat nové technologie pro budoucí vesmírné mise, a vyvíjet a testovat experimentální hardware určen k letu palubě raketoplánu nebo Mezinárodní vesmírné stanici (ISS).

Zero-G poskytuje vědcům stav mikrogravitace po dobu 5,18 sekund. NASA provádí experimenty v prostředí mikrogravitace na Zemi pomocí dvou pádových věží, raket a letadel létajících po parabolických drahách. Konstrukce zařízení Zero-G dovoluje využívat prostředí mikrogravitace po dobu volného pádu z výšky 132m, což je 432 stop.

Volný pád se provádí uvnitř 142 m vysoké ocelové vakuové komory. Kruhová komora o průměru 6,1m je umístěna uvnitř 8,7 m široké betonové šachty, která se rozkládá 155 m pod úrovní země. Ke snížení tlaku v komoře na tlak 0,05 torr (760 Pa = standardní atmosférický tlak) se používá 5 stupňová vakuová pumpa. Evakuování komory na tento tlak snižuje aerodynamický odpor na volně padající experiment uvnitř kapsle na méně než 0,00001 g. Pro umístění experimentu je používán mostový jeřáb a uvolňovací mechanismus v horní části vakuové komory. Jakmile je v poloze, připojí se kapsle k řídicí místnosti přes přívodní kabel. Tento kabel umožňuje monitorování experimentu a řízení z velína, než se odstartuje proces uvolnění. Evakuování komory trvá přibližně jednu hodinu. Poté, co se z komory odebere dostatečné množství vzduchu se zahájí proces uvolnění. Speciálně navržený šroub umožní experimentu zahájit svůj 132 metrů volný pád. Během letu experiment funguje autonomně s vlastním zdrojem napájení, sběr dat a kontrolní funkce jsou umístěny uvnitř kapsle společně s experimentem.



Obrázek 10 – Zero-G vypouštěcí mechanismus[10]

Po pádu o době více než 5 sekund je experiment zastaven ve zpomalovacím vozíku, který se nachází ve spodní části komory. Zpomalovací vozík je 3,3 m široký v průměru a téměř 6,1 m hluboký. Je naplněn expandovanými polystyrénovými kuličkami o průměru 3mm. Tyto kuličky pohltí kinetickou energii experimentu, který cestuje rychlostí přibližně 50,5 m/s při vstupu do zpomalovače. Experiment zastaví během 4,6 m s maximálním přetížením dosahujícím 65g.

Kapsle experimentu slouží jako nosná konstrukce a chrání experiment a hardware před rázovým zatížením, ke kterému dochází během zpomalování. Typická kapsle má válcový tvar o průměru 1m průměr a délce 4,0 m. Celková hmotnost je omezena na maximálně 2500 liber neboli 1130 kg.

Zero Gravity	
<b>Trvání mikrogravitace</b>	5.18s
<b>Délka volného pádu</b>	132m
<b>Úroveň mikrogravitace</b>	0.00001g
<b>Maximální přetížení</b>	65g
<b>Úroveň vakua</b>	0.01torr
<b>Délka vakuové komory</b>	143m
<b>Průměr vakuové komory</b>	6m
Parametry kapsle	
<b>Průměr kapsle</b>	Do 1000mm
<b>Výška kapsle</b>	Do 1600mm
<b>Celková hmotnost nákladu</b>	Do 455kg

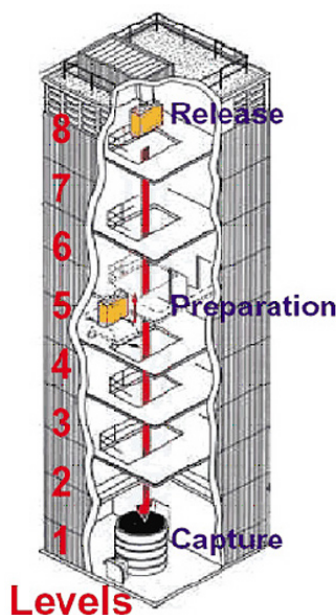
Tab. 3 – Technické parametry – Zero-G



### 3.2.3 NASA Glenn Research – 2.2s

Pádová věž NASA Glenn 2.2s [10] je druhou věží nacházející se Brook parku, Ohio. Věž byla na začátku 100 stop vysoké destilační zařízení. Nyní je používána po téměř 50 let pro výzkumné pracovníky z celého světa, kteří studují účinky mikrogravitace na fyzikální jevy, jako je spalování a dynamika

2,2s pádová věž je „vstupní branou do vesmíru“ pro mnohé z pokusů prováděných na raketoplánu a mezinárodní kosmické stanici (ISS), protože tyto pokusy často začínají na zemi právě při průzkumném testování v pádové věži. Toto testování může být následováno dalšími zkouškami k ověření nebo optimalizování konstrukce hardwaru a určení nejlepších zkušebních podmínek pro testování ve vesmíru k získání co nejdůvěryhodnějších výsledků.



Obrázek 11 – 2,2s Drop Tower[10]

Mikrogravitace v této věži je vytvořena tak, že se experiment vypustí z výšky 24 m. Pádová věž využívá štítový systém k minimalizování aerodynamického odporu při volném pádu. Experimenty jsou poskládány v obdélníkovém hliníkovém rámu, který je uzavřen v aerodynamicky tvarovaném štítu. Tento balíček je zvednut do horní části věže (v osmém patře), kde je spojen s monitorovacím zařízením (například vysokorychlostní videokamerou a palubním počítačem) předtím, než je vypuštěn. Prostředí snížené gravitace je vytvořeno pádem z osmého patra do 1 patra což odpovídá 24 m. Experiment je izolován od aerodynamického odporu tak, že není připojen ke štítu. Během pádu celého balíku padá experiment o 19 cm uvnitř rámu. Pád končí pádem do airbagu, který se nachází ve spodní části věže.

2.2s	
<b>Trvání mikrogravitace</b>	2.2s
<b>Délka volného pádu</b>	24m
<b>Úroveň mikrogravitace</b>	0.001g
<b>Maximální přetížení</b>	30g
<b>Úroveň vakua</b>	0.01 torr
Parametry kapsle	
<b>Rozměry kapsle</b>	Do 960mm x 400mm
<b>Výška kapsle</b>	Do 840mm
<b>Celková hmotnost nákladu</b>	159kg

Tab. 4 – Technické parametry – 2,2s Drop Tower

### 3.2.4 Tower Facility of National Microgravity Laboratory of China

Pádová věž v Pekingu [11] byla založena v roce 1995 jako národní laboratoř mikrogravitace. Laboratoř se obdobně jako ostatní pádové věže zaměřuje na pochopení základních principů a zdůvodnění mechaniky tekutin v prostředí mikrogravitace. Dále se snaží podporovat inter-disiplinární studii materiálů a zkoumání života ve vesmíru. Byl zde vyvíjen například systém požární bezpečnosti a řízení tekutin, což je vysoce potřebné pro pilotované i nepilotované lety do vesmíru a celý vesmírný program.



Obrázek 12 – Pádová věž v Pekingu

Aktuálně se centrum věnuje výzkumu v oblasti mechaniky tekutin (konvekce a mezifázové jevy komplexní tekutiny), spalování (proces spalování, požární bezpečnost v pilotované kosmické lodi), materiálům (tuhnutí látek, růst krystalů), biomechanice a nano-biotechnologii (molekulární a buněčná mechanika, nano-biooptika, vesmírná biotechnika a kosmické vědy o životě).

Cílem laboratoře v Číně je posílení výzkumné základny a poskytnout technickou podporu pro Čínský vesmírný program. Věž využívá vakuum pro snížení aerodynamického odporu kapsle a k zachycení je zde použita kombinace sítě, která kapsli brzdí, zavěšené na lanovém systému.

### 3.2.5 Pádová věž Dryden – Portland State UNIVERSITY

The Dryden Drop Tower (DDT) [12] je laboratorní zařízení na Portlandské univerzitě, ve kterém se provádí základní a aplikovaný výzkum v prostředí blízkém beztlíže. Pádová věž je volně přístupná komerčním aktivitám, široké veřejnosti a dalším institucím, které jsou vítány a dále rozšiřují možnosti padací věže a zvyšují její dostupnost a využití pro další odvětví. Hlavním účelem je ale studijní využití.



Obrázek 13 – Pohled do pádové věže[12]

Krátká 2s mikrogravitace poskytuje dostatek času na zkoumání chování kapalin, spalování a dalších vědních oborů. Díky tomuto zařízení se studenti naučí využívat a připravovat experimenty tak, aby poskytly v praxi důvěryhodné výsledky a výsledky jejich analýz mohly být použity například na skutečné kosmické lodi. Pro vzdělávací účely je to dokonalé zařízení, které představuje studentům pojmy jako je gravitace, zrychlení, aerodynamický odpor, a širokou škálu jevů během experimentů.

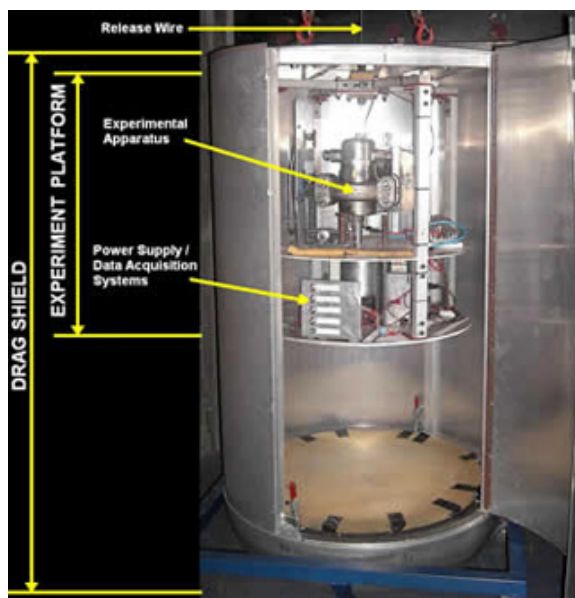
DDT	
<b>Výška věže</b>	31.1m
<b>Délka volného pádu</b>	22m
<b>Trvání mikrogravitace</b>	2,1s
<b>Úroveň mikrogravitace</b>	0.001g
<b>Délka zpomalení</b>	3.5m
<b>Hmotnost štítu</b>	115kg
<b>Maximální hmotnost experimentu</b>	Do 90kg
<b>Maximální přetížení</b>	15g
<b>Průměrné přetížení</b>	8.5g

Tab. 5 – Technické parametry – Portland State University

### 3.2.6 Queensland University of Technology (QUT)

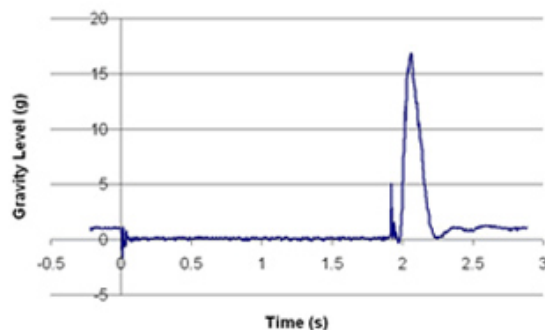
QUT je jedinou institucí na jižní polokouli, která se mohla pochlubit zařízením pro výuku a výzkum mikrogravitace. Patří mezi světové lídry ve výzkumu účinků a jevů v prostředí mikrogravitace. Pádová věž poskytuje pád v prostředí snížené gravitace v délce 20m a době okolo 2,1 sekundy, které je využíváno pro výzkum a testování v různých vědních oborech.

Testovací platforma (kapsle) [13] poskytuje prostor pro zkoušené experimenty prováděné na QUT. Tato kapsle je chráněna odporovým štítem, který před ní rozráží vzduch a tím snižuje odpor. Kapsle tedy padá nezávisle v uzavřeném prostoru s minimálním odporem. Jelikož vnitřní kapsle padá s menším odporem než štít, jeho výsledná rychlost je větší. Proto musí být venkovní štít delší tak aby k setkání obou částí došlo ideálně v okamžik dopadu do zachytávajícího zařízení.



Obrázek 14 – Kapsle pádové věže QUT[13]

Následující graf znázorňuje velikost gravitace před, během a po ukončení klasického testu. Malý vrchol na konci části s redukovanou gravitací znázorňuje kontakt vnitřní kapsle se štítem. Velký je náraz do vzduchového pytle.



Obrázek 15 – Hodnota gravitace během experimentu v QUT[13]

QUT	
Trvání mikrogravitace	2.1s
Délka volného pádu	20m
Úroveň mikrogravitace	0.00001g
Maximální přetížení	20g
Parametry kapsle	
Průměr kapsle	Do 900mm
Výška kapsle	Do 700mm
Celková hmotnost nákladu	Do 150kg

Tab. 6 – Technické parametry - QUT

Na QUT se zabývají například výzkumem:

- Mechanikou proudění kapalin ve snížené gravitaci
- Xerogel (nanomateriál) – formování ve snížené gravitaci
- Vytváření uhlíkových nanotrubiček ve snížené gravitaci
- Reakce svalů ve snížené gravitaci

### 3.2.7 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan

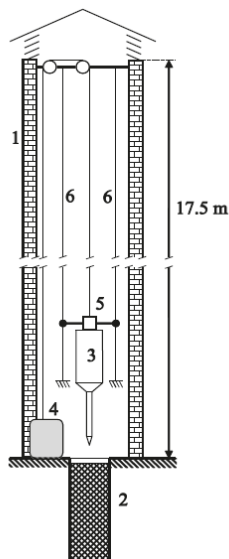
Jeden z největších veřejných výzkumných center v Japonsku. Zaměřuje se na vytváření a praktickou realizaci, která je dále prospěšná pro japonský průmysl a lid. Institut disponuje pouze 10m pádovou věží [14], ve které je možné získat informace například o krystalizaci materiálů.



Obrázek 16 – Pádová věž v Japonsku[14]

### 3.2.8 IDR/UPM, Universidad Politécnic de Madrid

Pádová věž, která se nachází v IDR/UPM [15], byla postavena s využitím starého větracího komínu. Tento komín je 17.5 m vysoký a jeho užitná délka je 13.15 m. Z konstrukčního provedení jsou potřeba 2m na vypouštěcí a 2.35 m na brzdící zařízení.



Obrázek 17 – Skica pádové věže IDR/UPM: (1) Komín, (2) Písková nádrž, (3) Kapsle, (4) Výtahový systém, (5) Vypouštěcí systém, (6) Lanové vedení. [15]

Jak je zobrazeno na obrázku, pádová věž se skládá z komína, jehož průřez je kruhový s průměrem 1 m, pískové nádrže, výtahového a vypouštěcího systému. Komín je vybaven několika různými kamerami, pro umožnění vizualizace zařízení během pokusu a osvětlením. Výtahový systém se skládá z elektromotoru s potřebným ovládacím příslušenstvím, kladkového mechanismu a vypouštěcího mechanismu. Tento mechanismus je vybaven zámkem s magnetickou cívkou, která při pokynu k vypuštění celého zařízení vytáhne zámek z aretace. Lano kladkového mechanismu slouží zároveň jako napájecí kabel pro vypouštěcí mechanismus.

S využitím tohoto vybavení lze kapsli vytáhnout do požadované výšky mezi  $h=0$  m až  $h=13$  m. Tímto je kontrolována doba trvání experimentu. K měření výšky je věž vybavena laserovým měřícím systémem. Kapsli tvoří 2 primární části. Aerodynamický štít a Platformu. Platforma experimentu má kruhový průřez o průměru 250 mm a výšce 600 mm a je schopná pojmout experimenty a celkové hmotnosti až 15kg. Všechny součásti přimontované na tuto platformu se během experimentu ocitají v prostředí snížené gravitace. Během experimentu chrání aerodynamický štít platformu před odporem vzduchu, který by bránil v zrychlení platformy.

Konstrukce platformy je navržena ze 4 hlavních sloupů, mezi kterými jsou umístěny, se stejnými rozestupy, 4 desky tvořící 3 oddělené prostory pro experimenty a elektroniku.



Obrázek 18 – Náhled na systémy platformy: (1) nezávislá CCD kamera, (2) Osvětlení,  
(3) Skloněné zrcadlo, (4) experiment [15]

Štít je složen z válcového pláště z hliníku o tloušťce 0.5 mm, komolého kuželu a vyrobeného také z hliníku a z ocelového hrotu, který slouží ke zpomalení celého užitečného nákladu.

IDR/UPM	
Trvání mikrogravitace	1.6 s
Délka volného pádu	13m
Úroveň mikrogravitace	0.001g
Maximální přetížení	22g
Parametry kapsle	
Průměr kapsle	250 mm
Výška kapsle	600 mm
Celková hmotnost nákladu	15 kg

Tab. 7 – Technické parametry – IDR/UPM

Tato pádová věž je svým provedením a parametry velice podobná pádové věži zamýšlenou na ČVUT. Inspiroval jsem se jejím provedením a snažil jsem se vylepšit určité části tak, aby jejich funkce byla jednodušší, praktičtější a méně ovlivňovala průběh experimentu a kvalitu prostředí snížené gravitace.

## 4 Myšlenka vlastní pádové věže na ČVUT

### 4.1 Idea

V podstatě zatím neexistuje ve světě zařízení, kde by bylo možné s minimálními změnami otestovat snadno jeden experiment v podmínkách mikrogravitace i hypergravitace. Vybudování takového sdruženého testovacího zařízení by nejen studentům ČVUT poskytlo unikátní zkušenosti s podmínkami změněné tíže.

Mikrogravitační část zařízení vychází z podobných pádových věží nacházejících se v různých státech světa ve výzkumných institutech nebo na univerzitní půdě. Nejpodobnější pádová věž se nachází ve španělském Madridu na tamní univerzitě - Universidad Politécnica de Madrid.

### 4.2 Možnosti realizace na ČVUT

#### 4.2.1 Umístění a podpora

V prostorách ČVUT na Karlově náměstí existují potenciálně vhodné prostory adaptovatelné pro potřeby pádové věže. Jako nejlepší řešení se jeví nevyužívaný komín na nádvoří vedle bývalé kotelny[16].



Obrázek 19 – Komín na nádvoří ČVUT[16]

Komín s výškou 28m a vnitřním průměrem 1.2 m až 1.5 m je ideální objekt k přestavbě na výzkumné pracoviště.

Základní verze zařízení je možno realizovat v rámci studentských prací, jako je tato. V době dokončování této práce nabíhá grantová podpora.

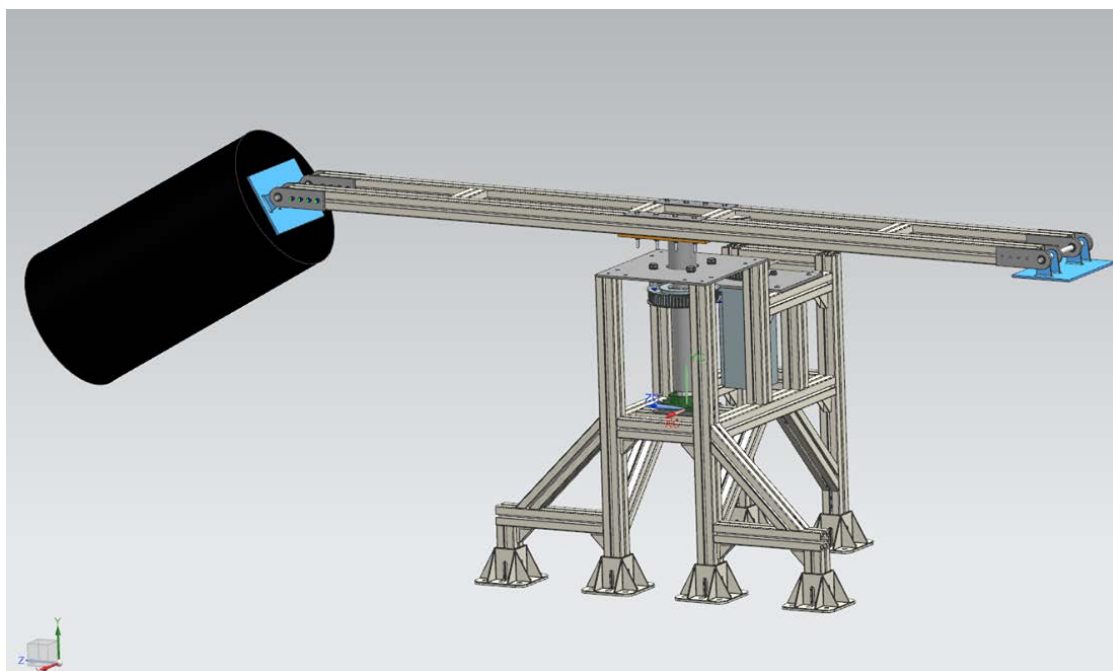
#### 4.2.2 Provedení

Při instalaci zachytného systému a vypouštěcího systému nám z celkové délky zůstane přibližně 22m na volný pád, při kterém se experiment ocitne v prostředí mikrogravitace. Zvedací systém se skládá ze lanové trasy poháněné ručním navijákem. Vypouštěcí zařízení a zachytávací systém bude podroben pečlivější studii a na základě rozhodovacího procesu bude zvolena optimální varianta pro oba systémy. Základním kritériem je cena, náročnost výroby, spolehlivost, jednoduchost a výsledný účinek systému na průběh experimentu.



### 4.2.3 Spojení s centrifugou

Paralelně je na ČVUT vyvíjena centrifuga k provádění experimentů a výzkumu při přetížení až 10g. Pro větší synergický efekt těchto zařízení byl zadán požadavek na společnou platformu (kapsli) experimentu. Kapsle musí být schopna vydržet dlouhodobé přetížení při provádění experimentů na centrifuze a poskytnout dostatečné aerodynamické krytí proti odporu vzduchu. Zároveň musí být schopna snést vysoké krátkodobé přetížení při zachycení po pádu z padací věže. Dalším požadavkem je samostatně fungující napájení, sběr dat a kamerový systém uvnitř kapsle. Tento systém musí být schopen pracovat nezávisle na experimentu a je součástí návrhu kapsle.



Obrázek 20 – Centrifuga

Technické parametry	
<b>Maximální výška/šířka/délka</b>	875mm/645mm/850mm
<b>Rozpětí ramen</b>	2000mm
<b>Otáčky pro 10g</b>	1,567rps
<b>Maximální otáčky</b>	2rps
<b>Motor</b>	ESMH 34220 - Liadshine
<b>Maximální Mk</b>	21Nm

Tab. 8 – Technické parametry centrifugy

## 5 Teoretický návrh

### 5.1 Provozní požadavky

Požadavky na provedení jsou dány rozměrem komína o celkové výšce 28 m. Tato výška nemůže být využita v celé délce z důvodu instalace vypouštěcího a zachytného zařízení. Pro tyto subsystemy vyčleníme celkově 6 m. Po této úvaze nám jako funkční délka (dráha letu kapsle) odpovídá 22 m.

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{2 * 22}{9,81}} \approx 2,1s \quad (12)$$

Při této délce počítáme s pádem dlouhým 2.1s při snížené gravitaci o hodnotě  $g/g_0 = 10^{-3}$ . Maximální celková hmotnost kapsle s experimentem, včetně elektroniky a napájení je až 15kg. Vnitřní průměr komínu 1.2 v horní části a 1.5 u paty komína stanovuje vnitřní prostor, ve kterém se bude realizovat experiment. Pro tento prostor stanovujeme velikost aerodynamického štítu válcového tvaru o průměru  $D = 500$  mm. Délka štítu bude určena ze součinitele odporu.

Rozměry kapsle jsou určeny velikostí kapsle a požadavky na velikost experimentů. Maximální průměr kapsle dosahuje 340mm a její funkční délka 600mm.

Na základě srovnání s porovnatelnými zařízeními bylo stanoveno nárazové zatížení při dopadu alespoň 20g. Na toto přetížení bude dimenzována kapsle a zachycovací zařízení by mělo být schopno toto přetížení nepřesáhnout. Pro lepší možnosti využití při křehcích experimentech by zachytávací zařízení mělo být schopno nastavení k zabrzdění s nižším přetížením.

### 5.2 Kapsle

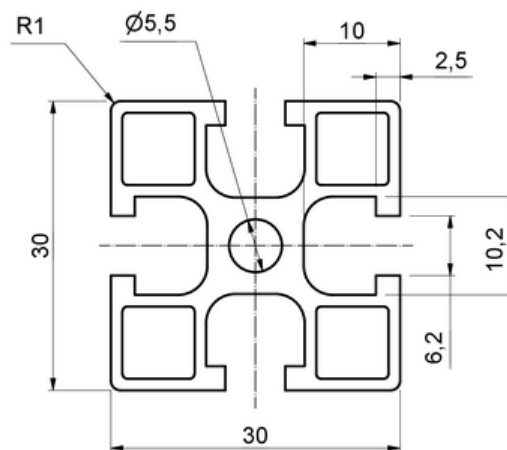
#### 5.2.1 Koncepce

Tvar kapsle se odvíjí z praktického využití. Při použití komínu s kruhovým průřezem se automaticky nabízí kapsle o kruhovém půdorysném profilu. Proto během návrhu nebudeme uvažovat žádný jiný tvar.

Kapsle musí mít vlastní zdroj energie pro vnitřní systémy, vlastní sběrnici dat a kamerový systém. Je nutné, aby kapsle byla rozdělena na více sektorů pro oddělení experimentů a samostatný sektor pro vlastní hardware. Konstrukce musí být hmotnostně vyvážená a s co nejmenší celkovou hmotností. Tato hmotnost bude ovlivňovat maximální dovolenou hmotnost experimentů. Kapsle musí obsahovat vyvažovací systém, který bude korigovat nesymetričnost prováděných experimentů. Je nutné dostat těžiště kapsle s experimentem co nejbližší ose kapsle. Konstrukční provedení musí být navrženo tak, aby kapsle byla schopna přenést provozní zatížení při provozu v pádové věži i na centrifuze. Trvalé osově zatížení 10g a nárazové přetížení až 22g při nárazu po pádu v pádové věži.

#### 5.2.2 Rozložení sloupů

Rozložení sloupů ovlivňuje maximální rozměry možné umístit do vnitřního prostoru platformy. Při návrhu sloupů je nutné uvažovat přenášené zatížení, tuhost a také jejich hmotnost. Sloupy byly zvoleny hliníkové profily o velikosti 30x30 mm a délce 600 mm. Hmotnost jednoho sloupu je 550g



Obrázek 21 – Skica profilu sloupu

Volbou provedení se 4 sloupy získáme vyšší tuhost celé sestavy. Nevýhodou je však vysoká hmotnost, která nám výrazně snižuje možnost provádění těžších experimentů. Další nevýhodou je malý prostor mezi sloupy, který nám zabraňuje instalaci větších experimentů. Pouhých 145mm.



Obrázek 22 – Verze se 4 sloupy

Při použití 3 sloupů nám klesne tuhost sestavy. Tato tuhost je však dostačující. Odstraněním jednoho sloupu jsme základní konstrukci odlehčili o 550g a instalační prostor se nám zvětšil na 193mm.



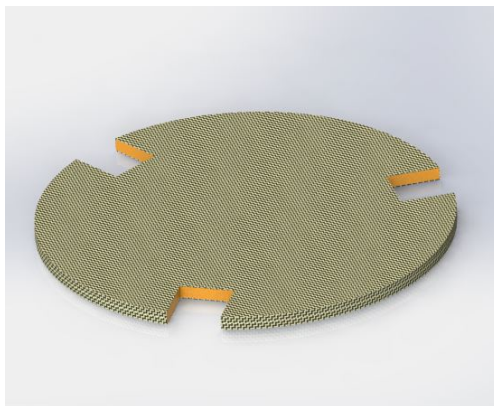
Obrázek 23 – Verze se 3 sloupy

### 5.2.3 Sektory

Vodorovné horní a spodní dno, společně s policemi je možné vyrobit několika technologiemi.

- Kompozitové sendvičové desky s inserty
- Překližka
- Hliníkový plech

Kompozitní dna a police mají velikou nevýhodu ve složitější výrobě než je tomu u ostatních dvou variant. Při velikosti plochy a nutné tloušťce desky (5mm z důvodu dostatečné pevnosti) se zde neprojeví ani nízká hmotnost kompozitových součástí. Jedna kompozitová deska váží přibližně 380g. Další nevýhodou je vyšší cenová náročnost na výrobu jednoho dílu, nutné technologické pauzy a nutnost znát předem umístění insertů.



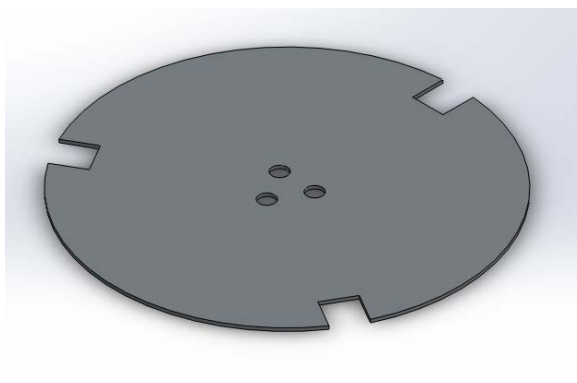
Obrázek 24 – Police sendvičové konstrukce

Využití letecké překližky na jednotlivé elementy je nejlevnější variantou a také výrobně nejméně složitou. Výhodou překližky je její relativně nízká hmotnost, pouhých 500g. Další možnou výhodou je její nevodivost elektrického proudu, která může být výhodná při určitých typech experimentů.



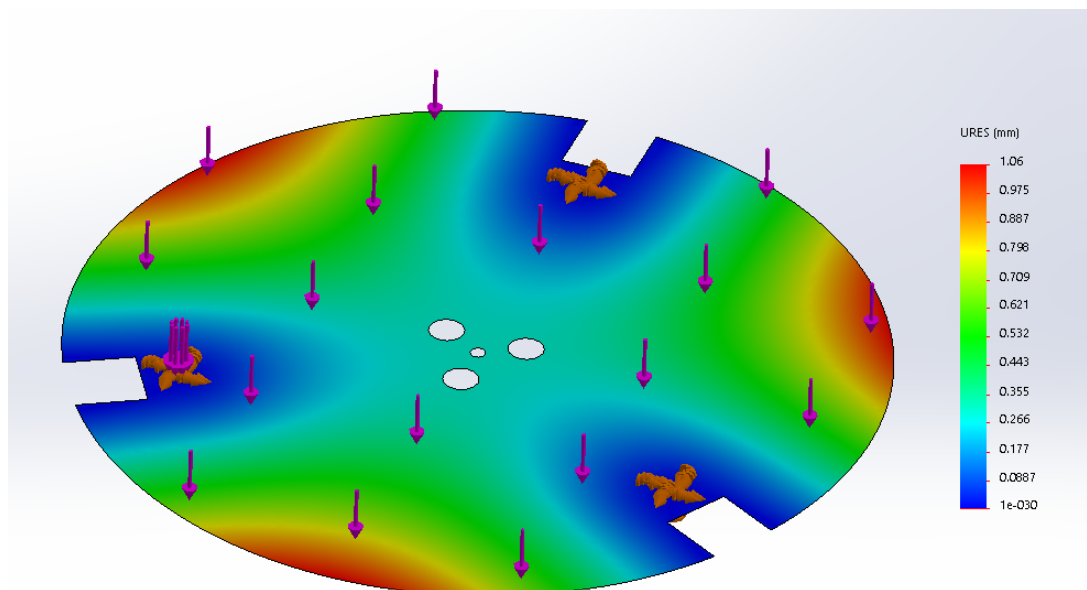
Obrázek 25 – Dřevěná police

Výroba polic vyřezáním laserem z hliníkového plechu poskytuje rychlou a také levnou alternativu. Plech je díky svým parametrům tenký a tak jedna deska váží přibližně 650g. Výroba desek z plechů poskytuje možnost navařit na police upínací prvky a celkově nejjednodušší obsluhu a úpravu pro jednotlivé experimenty.



Obrázek 26 – Hliníková police

Tato hliníková police bude vystavena největšímu zatížení během provozu na centrifuze. Za předpokladu, že hmotnost jednoho experimentu 6kg byla provedena statická analýza pevnosti police.



Obrázek 27 – Statická analýza police

Po provedení této analýzy vyšlo výsledné maximální prohnutí police na krajích 1mm. Tato deformace je zanedbatelná a hluboko pod mezí elasticity. Police je tedy dostačující pro bezpečné používání a provádění experimentů.

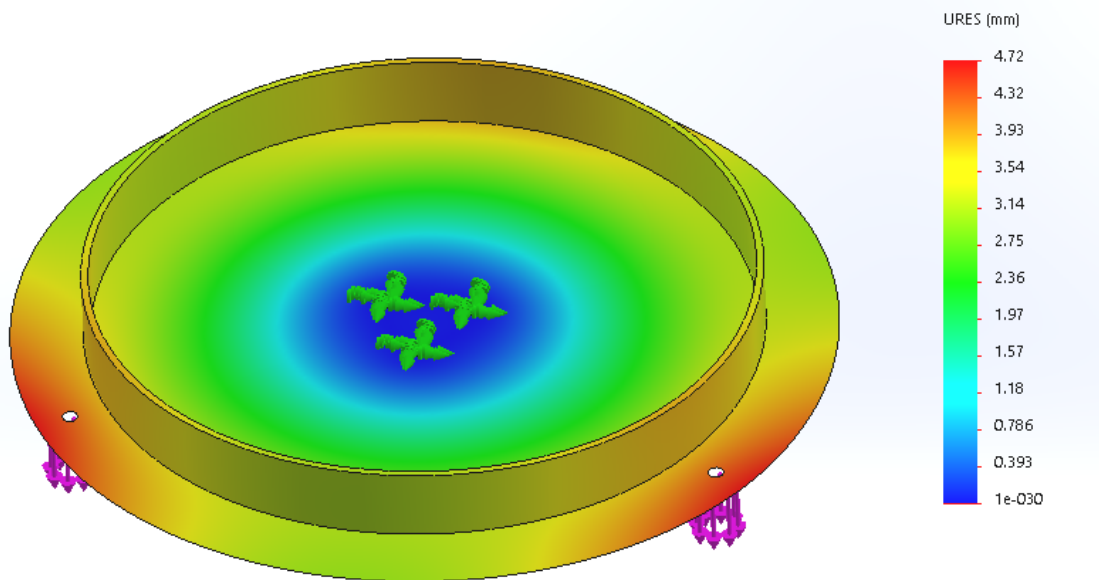
## 5.2.4 Konstrukční návrh

### 5.2.4.1 Konstrukce platformy

Po inženýrské rozvaze byly, pro prototyp kapsle, vybrány vodorovné desky z hliníkového plechu. Plechy byly podrobeny simulaci zatížení během provozu na centrifuze. Při simulaci zatížení  $F = 2000\text{N}$  na samotný plech bez vyztužení došlo k deformaci horní a spodní desky v bodech spojení se sloupy o  $\pm 10\text{mm}$ . Jelikož je zařízení vystaveno vysokému zatížení bylo nutné vyztužit horní a spodní desku kruhovým žebrem z plechu o tloušťce 3mm a výšce 30mm.



Obrázek 28 – Velikost deformací z MKP analýzy (bez výztuhy)



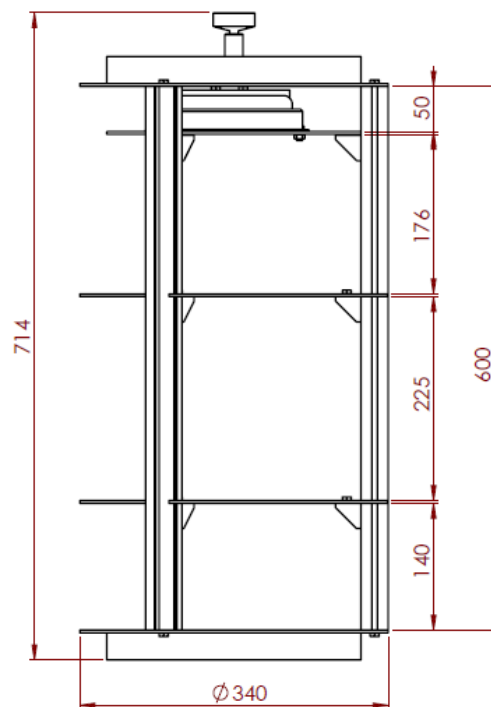
Obrázek 29 - Velikost deformací z MKP analýzy (s výztuhou)

Ze simulace je patrné, že po vyztužení je horní a spodní deska schopna přenášet zatížení s bezpečností  $k = 1,3$ . Při testování by neměly být překročeny maximální návrhové zatížení.



Obrázek 30 – Vyztužená konstrukce horní a spodní desky

Pro vypouštěcí mechanismus byla vybrána hliníková příruba se závitem a magnetická koncovka, která lépe splňuje bezpečnostní požadavky, má nižší hmotnost a její použití je univerzálnější pro obě zařízení. Primární konstrukce je spojena šrouby M6 s pojistnou maticí. Police, rozdělující kapsli na sektory, jsou upevněny na hliníkové profily pomocí úhelníků.



Obrázek 31 – Rozměry kapsle



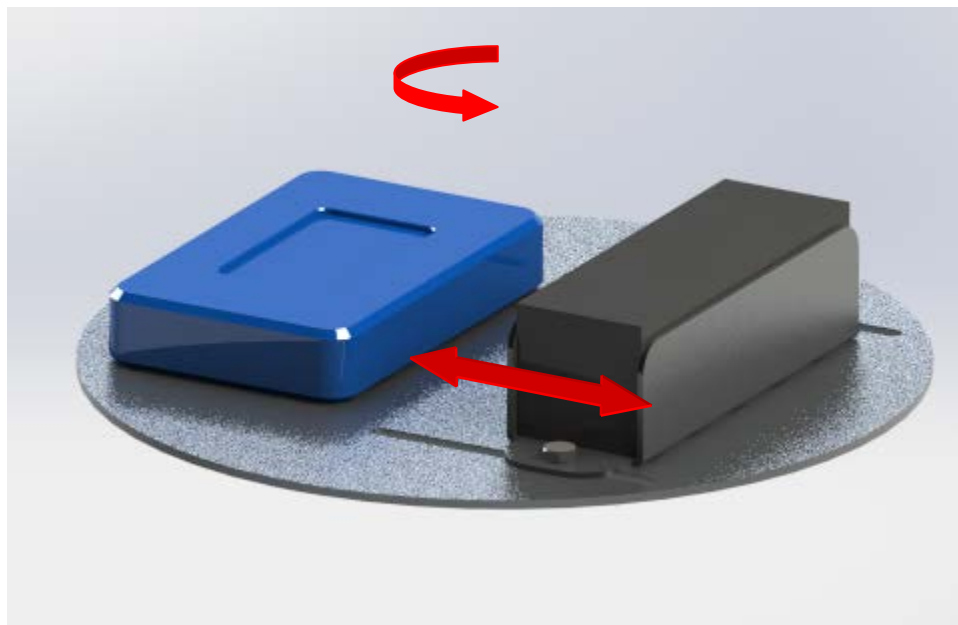
#### 5.2.4.2 Rozložení hmoty

Pro úspěšné provedení experimentu a vytvoření co možná nejlepšího prostředí mikrogravitace je nutné mít těžiště celé kapsle co možná nejbližší ose kapsle. Z tohoto důvodu je konstrukce kapsle rovnoměrně a symetricky rozložena tak, aby samo o sobě co nejméně ovlivňovala polohu těžiště. Jakákoliv odchylka od osy tělesa se projeví jako přidavný moment, který generuje rotační zrychlení ve směru jeho působení. To zhoršuje prostředí mikrogravitace a znehodnocuje výsledky experimentu.

#### 5.2.4.3 Vyvažování

Jelikož není možné, aby experiment a následně celá kapsle byly vyváženy tak, aby bylo těžiště v ose, je nutné vytvořit integrovaný vyvažovací systém. Jako závaží vyvažovacího systému je vytvořeno baterií, která poskytuje energii vnitřnímu prostoru kapsle. Tato baterie je umístěna v kompozitovém držáku, který je možné posouvat ve vedení blíže a dále od středu kapsle. Zároveň je možné celou deskou otáčet tak, aby bylo možné posouvat těžiště v libovolném směru. Při hmotnosti baterie 529 g a rozsahu posunu od 0 mm do 100 mm, je možné vyvážit maximální moment o hodnotě.

$$M_{max} = m * g * l = 0,529 * 9,81 * 0,1 = 0,52Nm \quad (13)$$



Obrázek 32 – Schéma vyvažování

#### 5.2.4.4 Zbytkové momenty a vibrace

Vyvážení celé sestavy kapsle je více než důležité. Pro vytvoření kvalitního prostředí mikrogravitace je potřeba posunout těžiště tak, aby maximální moment otáčení kolem těžiště nabýval hodnoty 0,1Nm. Tato hodnota a lepší by měla zajistit dostatečně malé zrychlení otáčení celé kapsle.

Pro zachování kvalitního prostředí mikrogravitace, v našem případě  $a_r/g_0 = 10^{-3}$ , je nutné stanovit maximální rotační zrychlení celé kapsle během pádu. Toto rotační zrychlení je vyvoláno nevyvážením celé platformy, což generuje otáčecí moment udělující zrychlení kapsle s experimentem uvnitř.

$$\frac{a_t}{g_0} \leq 0,001 \Rightarrow a_t = 0,00981 \sim 0,01 m/s = 10 mm/s \quad (14)$$

Při dodržení tohoto tečného zrychlení bude zaručeno dostatečně dobré prostředí mikrogravitace. Ačkoliv celkové zrychlení je dáno vzorcem:

$$a = \sqrt{a_d^2 + a_t^2} = 10 mm/s \quad (15)$$

Odstředivé zrychlení je při této hodnotě tečného zrychlení minimální. Nebudeme ho tedy uvažovat.

Úhlová dráha  $\varphi$  je úhel, který urazí průvodič bodu během pohybu po kružnici.

$$\varphi = \frac{s}{r_p} = \frac{10}{300} = 0,0333 = \omega * t \Rightarrow \omega = \frac{0,0333}{2,1} = 0,01586 \text{ rad/s} \quad (16)$$

Po dosazení nám vychází maximální úhlová rychlost, která je nezávislá na velikosti průvodiče. Tato úhlová rychlost je maximální úhlová rychlost, kterou je možné akceptovat pro zachování kvalitního prostředí snížené gravitace.

Velikost úhlového zrychlení bude během pokusu sledována akcelerometry. V případě překročení maximálního zrychlení bude nutné celý pokus dovážít lépe vyvážit.

## 5.3 Aerodynamický štít

### 5.3.1 Koncepce

Jelikož, z ekonomických a konstrukčních možností, není možné využít vakuovou komoru, která sníží odpor padající kapsle natolik, že není nutné použít aerodynamický štít, musíme zvolit variantu se štítem. Aerodynamický štít slouží k ochraně kapsle před aerodynamickým odporem atmosféry. V našem případě je důležité vybrat ideální tvar krytu v závislosti na výrobní složitosti, nákladech a odporovému součiniteli  $C_d$ , který nám ovlivňuje celkovou délku krytu a tím i konstrukci, zvolený materiál a hmotnost.

Pro koncepční návrh jsme si stanovili různé tvary čela krytu.

- Kužel  $60^\circ$
- Kužel  $90^\circ$
- Polokoule
- Komolý kužel
- Válec

Pro tyto tvary čela aerodynamického štítu vypočítáme, za použití softwaru AnsysFluent, součinitel odporu  $C_d$ . Průměr štítu je zvolen  $D=500\text{m}$ . Délka štítu je volena orientačně, neboť bude následně upravena tak, aby její délka odpovídala rozdílům rychlostí štítu a kapsle a jejich drah za dobu letu.

### 5.3.2 Použitá metoda

Problém byl řešen jako problém 2Daxisymetrické proudění v sw AnsysFluent. Pro všechny případy byl zvolen turbulentní model SST  $k-\omega$ , který lépe řeší separaci proudění blízko stěn. Jako diskretizační numerické schéma byl zvolen UPWIND 2. řádu (Second Order UPWIND), který se vyznačuje zvýšenou přesností, ale také horší stabilitou, které byla v tomto případě zachována. Výpočetní čas byl ale delší.

Sít' byla pro všechny případy vytvořena z trojúhelníkových elementů (triangular). Samozřejmostí bylo zjemnění sítě v mezní vrstvě, která byla složena z 12 vrstev obdélníkových elementů. Dále byla sít' zjemněna v místech potenciálního nepříznivého tlakového gradientu (např. místa odhadované separace proudění). Dále byla sít' vylepšena pro dostatečnou ortogonální kvalitu a šikmost elementů.

Okrajové podmínky byly následující: Na vstupu byla rychlostní okrajová podmínka ( $30,66\text{ m/s}$ ), výstup byl tvořen tlakovou okrajovou podmínkou ( $\Delta p=0\text{ [Pa]}$ ), stěna komínu byla nastavena jako wall se specifickým třením (specifiedshear =0) a obálka kapsle jako wall (no slip). Nakonec byla nastavena podmínka axis pro simulaci rotační symetrie.

Bylo důležité také porovnání výsledných koeficientů odporu, proto musela být metodika výpočtu stejná pro každý případ. Případy se lišily pouze počtem elementů sítě, který byl dán velikostí kapsle nikoliv referenční velikostí elementů, která byla nastavena u všech případů stejně. Dalším důvodem bylo zjemnění sítě v místech, které byly specifické pro jednotlivé případy (někde ano někde nebylo potřeba). To se týkalo zejména komolého kužele a případu válce.

Koeficienty odporu těchto základních těles se liší od koeficientů odporu těch samých těles ve volném prostředí. Tato diference je způsobena stěnou komína, která má za následek zvýšení koeficientů odporu.

Tento výpočet je pouze přibližný což může znamenat chybu. Chyba je způsobena diskretizací a zjednodušením celého modelu na 2D problém s využitím axisymetrické podmínky.

Výsledky:

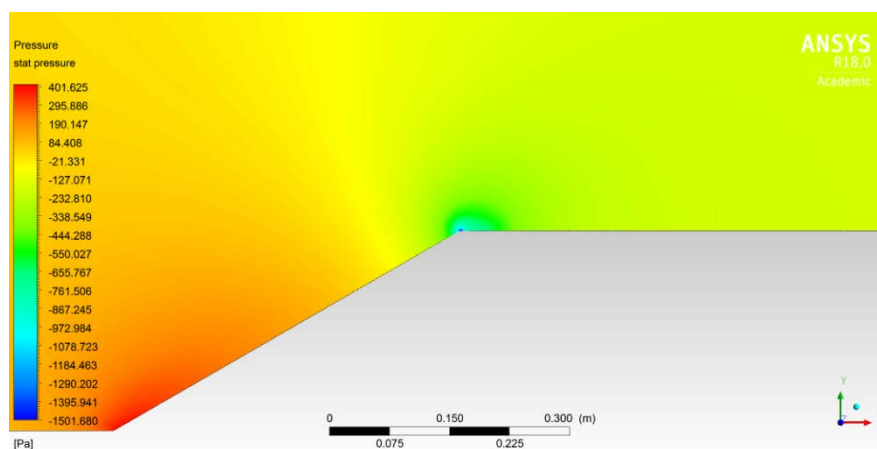
Případ	Iterace [1]	Cd [-]
<b>Kužel 60°</b>	1520	0,38216
<b>Kužel 90°</b>	1552	0,62085
<b>Polokoule</b>	1328	0,33175
<b>Komolý kužel</b>	1637	0,37692
<b>Válec</b>	2652	1,23680

Tab. 9 – Výsledky CFD simulace

### 5.3.3 CFD simulace tvaru krytu

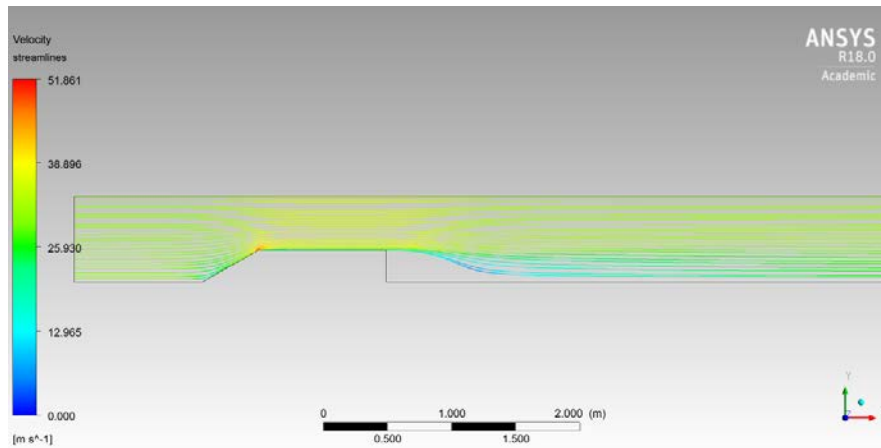
#### 5.3.3.1 Kužel 60°

Při použití čela ve tvaru kužele s vrcholovým úhlem 60° pozorujeme nárůst tlaku u vrcholu kužele a urychlení proudění na hraně kužele a válcové plochy štítu. Výsledný odpor Cd se rovná 0,38216. To je třetí nejnižší součinitel odporu, který nám vyšel z CFD simulací.



Obrázek 33 – Rozložení tlaku u kužele 60°

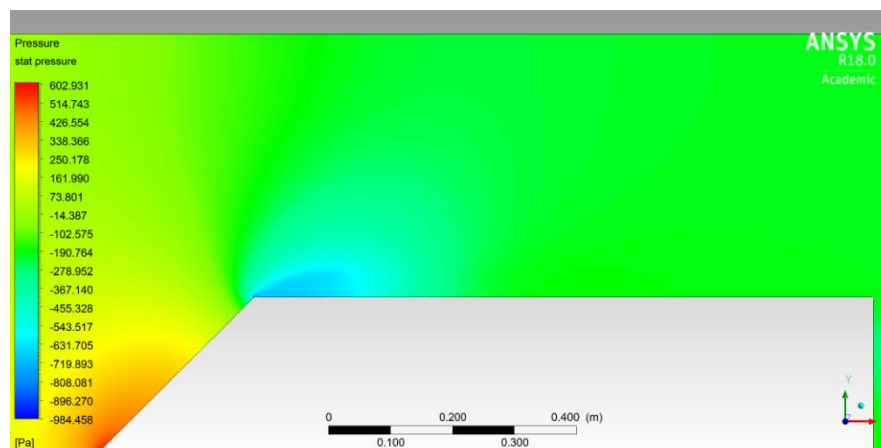
Při zobrazení proudění jako stream lines vidíme, že v oblasti za kuželem dochází k poměrně velkému úplavu. Ten je tvořen výrem za rohem válcové plochy. Tento výr dále řešit nebudeme, neboť přímo neovlivňuje vnitřní prostředí, ve kterém se pohybuje kapsle s experimentem. Jeho existence má účinek na celkový součinitel odporu Cd, ale nebude předmětem dalšího zkoumání.



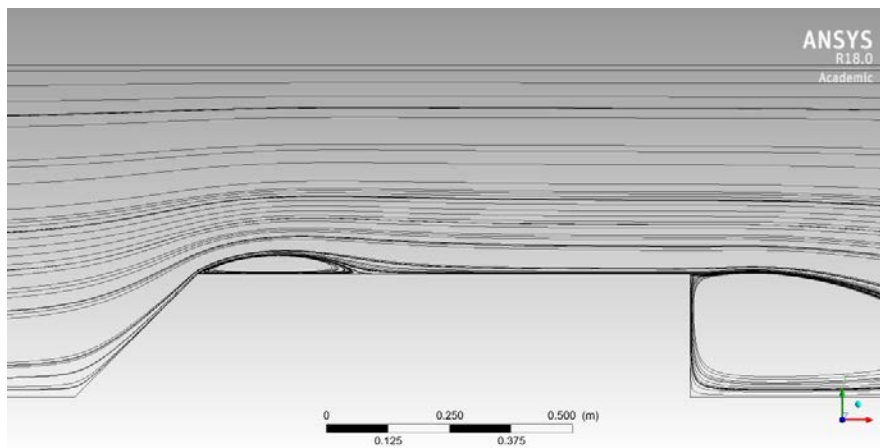
Obrázek 34 – Zobrazení proudnic u kužele 60°

### 5.3.3.2 Kužel 90°

Při změně vrcholového úhlu na 90° vzroste součinitel odporu  $C_d$  na hodnotu 0,62085. Zvýšení tohoto součinitele je zapříčiněno ostřejším úhlem na přechodu mezi kuželovou a válcovou částí štítu. Díky tupějšímu úhlu zde dojde k odtržení proudnic a k vytvoření vzduchového víru, jak je zobrazeno na následujícím obrázku.

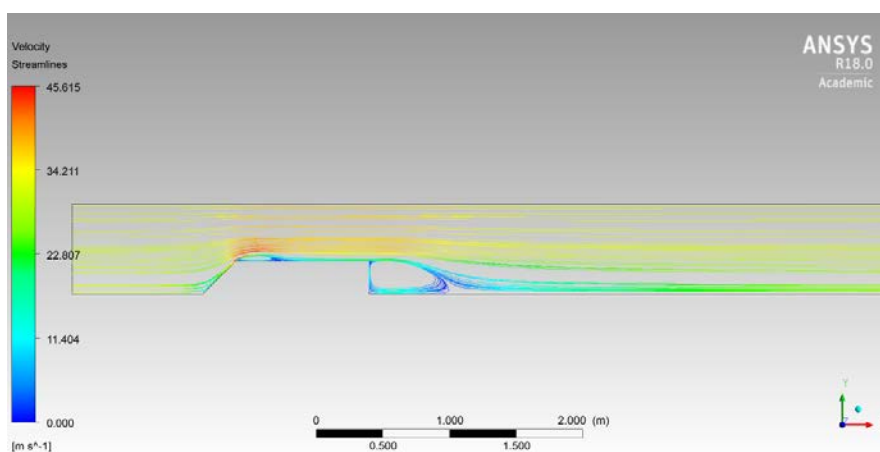


Obrázek 35 - Rozložení tlaku u kužele 90°



Obrázek 36 – Vzduchové víry při obtékání kužele 90°

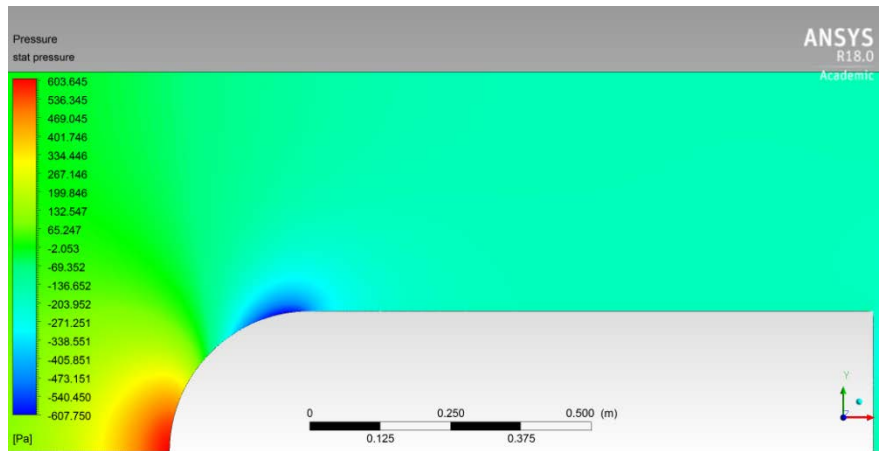
Při zobrazení proudnic na celém modelu vidíme, že v místě, kde navazuje kuželová plocha na válcovou, se tvoří výrazný vír oproti kuželu s úhlem 60°. Vír za aerodynamickým štítem zůstává téměř stejný jako v předchozím případě. Jeho ovlivnění vrcholovým úhlem je minimální.



Obrázek 37 - Zobrazení proudnic u kužele 90°

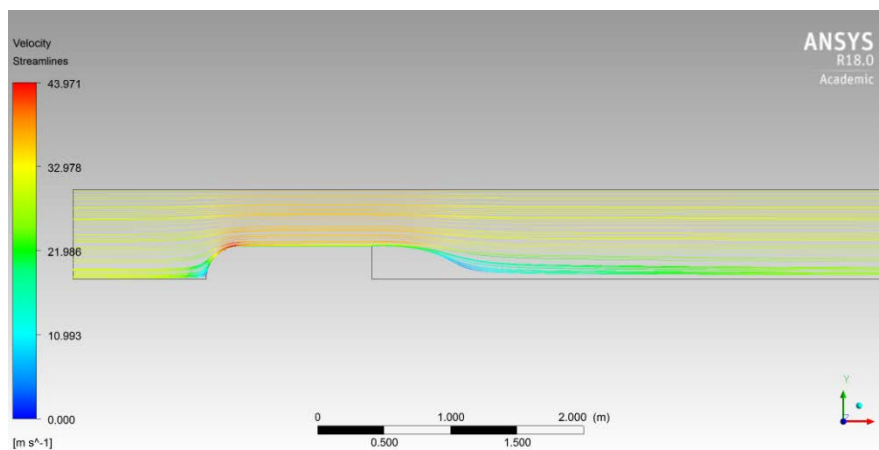
### 5.3.3.3 Polokoule

Při kulovém tvaru čela aerodynamického krytu o poloměru  $R = 250\text{mm}$  byl simulací zjištěn součinitel odporu  $C_d$  rovný 0,33175. Kulový tvar čela má tedy nejnižší součinitel odporu ze zvolených tvarů. Na obrázku s tlakovým rozložením vidíme, že vzduch na špičce velmi zpomalí avšak u přechodu mezi kulovou a válcovou plochou nenastává odtržení proudnic, ale naopak k plynulému urychlení proudu vzduchu.



Obrázek 38 – Rozložení tlaku u kulové špičky štítu

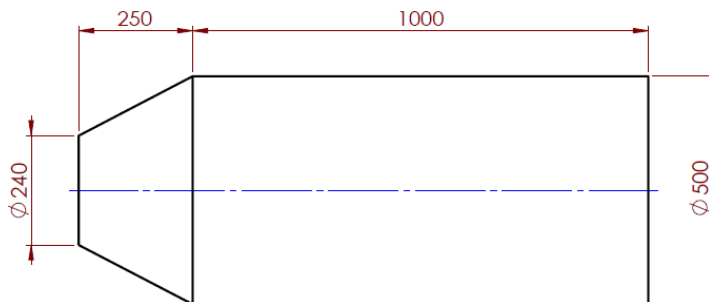
Při pohledu na celkové obtékání štítu s kulovým čelem vidíme hladký průběh zakončený úplavem, který opět není nijak dále řešen.



Obrázek 39 – Zobrazení proudnic u kulové špičky štítu

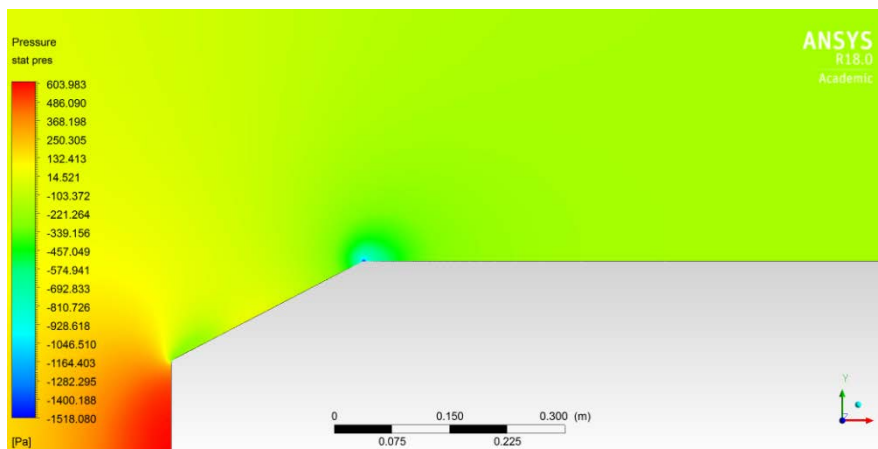
#### 5.3.3.4 *Komolý kužel*

Rozměry komolého kuželu na obrázku byly modifikovány tak aby bylo dosaženo co nejnižší hodnoty odporového součinitele  $C_d = 0,37692$ .

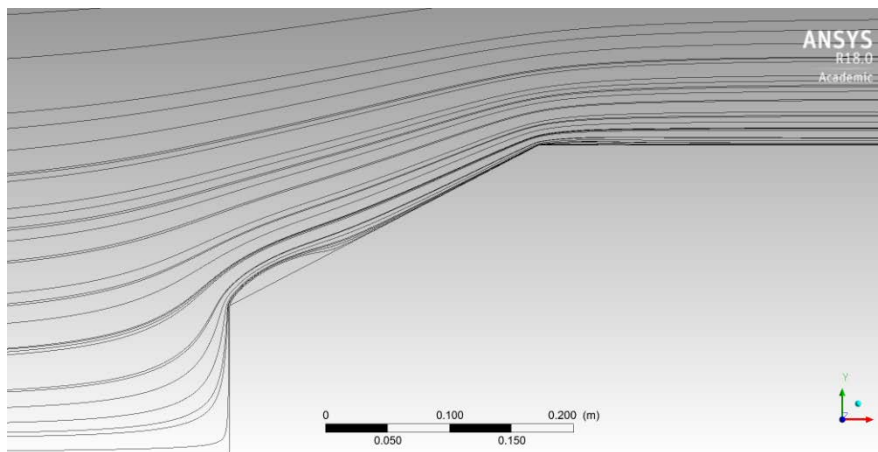


Obrázek 40 – Geometrie komolého kuželu

Z rozložení tlaku je patrný velký brzdný odpor čela, tím že před sebou tlačí vzduch. Tento vzduch ale vytvoří před plochou vzduchový vír, který je následně obtékán a tvoří aerodynamickou špičku štítu. Následné obtékání kuželové části je ovlivněno pomalým vzduchem tlačícím se z čelní strany, což způsobí malý vír v přední části. To má za následek lepší obtékání v části, kde se mění kuželová část na válcovou.



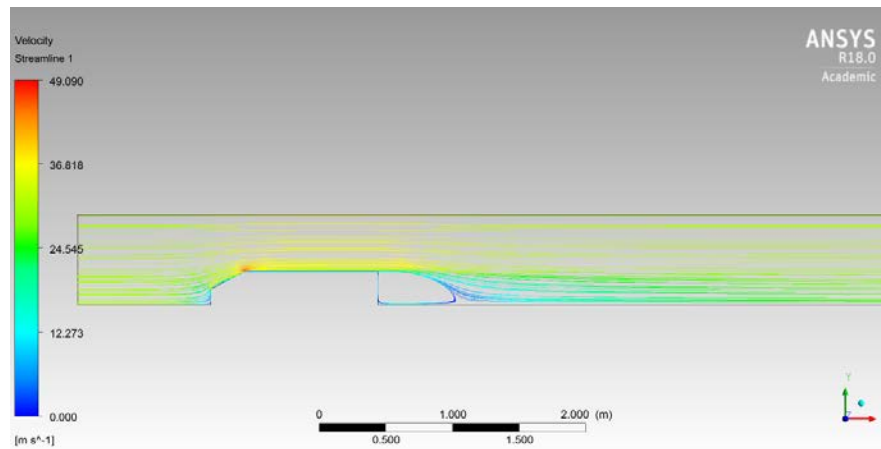
Obrázek 41 – Rozložení tlaku u komolého kuželu



Obrázek 42 – Zobrazení proudnic na špičce komolého kuželu



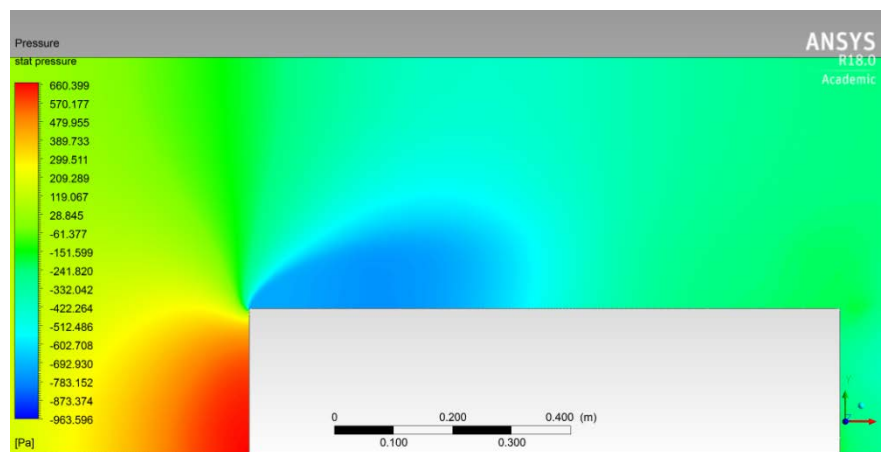
Na následujícím obrázku je opět zobrazeno proudění kolem celé geometrie štítu. Je zde patrný stojící vzduch u čela štítu a klasický úplav na konci štítu.



Obrázek 43 – Zobrazení proudnic u komolého kuželu

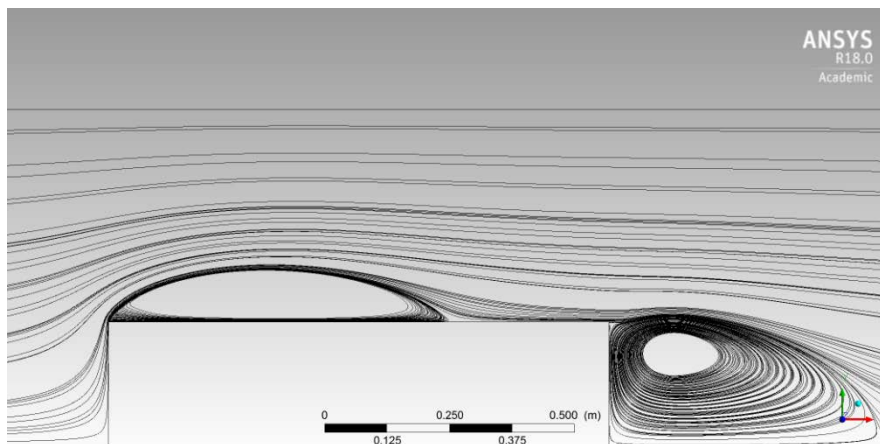
#### 5.3.3.5 Válec

Pro úplnost byl simulací otestován také tvar válce. Odporový součinitel, v tomto případě, nabývá hodnoty  $C_d = 1,2368$ . Což je téměř 4x větší hodnota než u kulového čela.



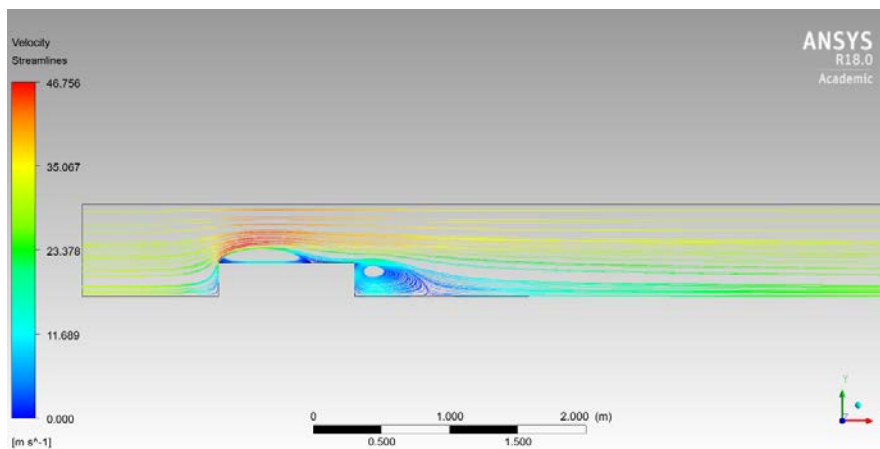
Obrázek 44 – Rozložení tlaku u válcové špičky štítu

Plochý tvar čela má za následek mohutný vír téměř po celé délce válcové plochy, kde začíná úplav.



Obrázek 45 – Tvorba silných vírů u válcové špičky štítu

Při zobrazení proudění okolo celého tvaru je dobře patrný neaerodynamický tvar válce spolu se špatným obtékáním čela štítu



Obrázek 46 – Zobrazení proudnic u válcové špičky štítu

### 5.3.4 Konstrukční rozvaha

Z hlediska konstrukčního provedení je možné celý štít vyrábět několika metodami.

- Kompozitní štít
- Hliníkový svarek nebo sestava
- Plastový svarek nebo sestava
- Kombinace

Štít musí splňovat základní požadavky na tuhost, tvarovou stálost a hmotnost. Dále je nutné, aby byl štít pečlivě vyvážený. Při velkém nevyvážení by mohlo dojít k jeho přetočení a případné kolizi s vnitřní kapslí. Dále je nutné, aby výroba štítu bylo co možná nejjednodušší, finančně a časově nenáročná. Při volbě kompozitního štítu jsme schopni docílit nízké hmotnosti při vysoké tuhosti ale poměrně vysokých nákladech. Pro výrobu kvalitního kompozitového štítu je nutné pořídit drahou formu, která ovšem dovoluje jednoduchou výrobu i složitějších tvarů.

Při volbě plastových nebo hliníkových štítů je nutné uvažovat jejich jednoduché zpracování, cenovou i materiální dostupnost. Další výhodou je jejich jednoduché zpracování bez nutnosti velkých technologických přestávek.

### 5.3.5 Rozhodovací proces

Na základě kritérií a jejich obodování zvolíme nejvýhodnější tvar štítu. Koeficient odporu totiž není jediné kritérium, na kterém závisí výběr konečného tvaru. Další roli hraje náročnost výroby, tvar štítu, cena a celková délka štítu, která nám ovlivňuje manipulaci a hmotnost.

Kritéria jsou bodována od 1 do 10 podle důležitosti. Následně jsou ohodnoceny varianty od 1 do 5, kde 1 je nejhorší a 5 nejlepší.

varianta/kritérium	Cd	cena	složitost výroby	výhoda tvaru	délka	$\Sigma$	pořadí
kužel 60°	3	2	2	1	4	2.35	5
kužel 90°	2	3	3	2	2	2.44	4
polokoule	5	1	1	3	5	2.88	3
<b>komolý kužel</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3.85</b>	<b>1</b>
válec	1	5	5	5	1	3.47	2

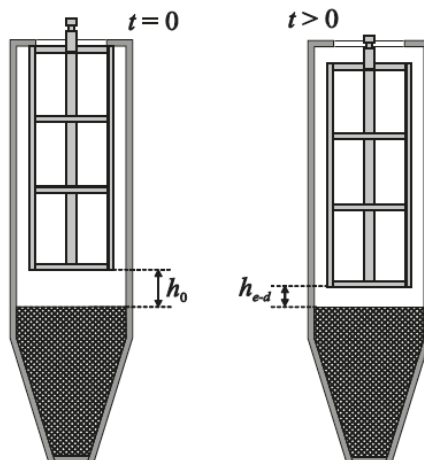
expert/kritérium	K1	K2	K3	K4	K5	$\Sigma$
E1	8	6	9	6	5	34
váha kritéria	0.24	0.18	0.26	0.18	0.15	1

Tab. 10 – Hodnocení variant aerodynamického štítu

Z rozhodovacího procesu nám vychází nejlépe Komolý kužel. Hlavními důvody byl jeho jednoduchý tvar, který nedosahuje takových rozměrů jako jednoduchý kužel a navíc se dá využít k jednoduchému postavení štítu na jeho čelo. Při poměrně nízkém součiniteli odporu a nesrovnatelně jednodušší výrobě než v případě polokoule byl zvolen jako finální tvar komolý kužel s rozměry uvedenými na obrázku XY.

### 5.3.6 Výpočet délky štítu

Platforma experimentu (kapsle) během pádu není brzděna aerodynamický odporem vzduchu. Před tím ji chrání právě aerodynamický štít. Tento odpor brzdí aerodynamický štít, který padá pomaleji než vnitřní kapsle. Z toho vyplývá, že aerodynamický štít musí být delší než kapsle o hodnotu  $h_0$ , danou rozdílem zrychlení, průběžnou rychlostí a uraženou vzdáleností za dobu pádu  $t = 2.1$ s. Právě rozdíl vzdáleností je námi požadovaná hodnota  $h_0$ .



Obrázek 47 – Pohyb kapsle uvnitř štítu – adaptováno z [15]

Na základě předchozí úvahy, je zrychlení aerodynamického štítu  $a_s$  dáno gravitačním zrychlením v místě pádové věže  $g$  a zpomalením od aerodynamického odporu.

$$ma = mg - \frac{1}{2} \rho v^2 S c_D \quad (17)$$

Kde  $m=15\text{kg}$  je hmotnost aerodynamického štítu,  $\rho=1,225\text{kg/m}^3$  je hustota vzduchu v komíně,  $S=0,196\text{m}^2$  je čelní plocha štítu a  $c_D$  je součinitel odporu tvaru štítu. Dle rovnice (18), aerodynamický odpor zpomaluje štít během celého pádu do dosažení maximální rychlosti, které je dosaženo ve chvíli kdy se stane akcelerace štítu nulovou.

$$v_m = \sqrt{\frac{2mg}{\rho S c_D}} = \sqrt{\frac{g}{k}} \Rightarrow k = \frac{\rho S c_D}{2m} = \frac{1,225 * 0,196 * 0,37692}{2 * 15} \quad (18)$$

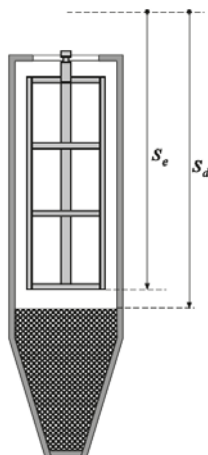
$$= 0,00302$$

Pokud  $k = \rho S c_D / 2m$ , můžeme výpočet vertikální rychlosti štítu počítat jako funkci času přímo z integrace předchozí rovnice, kterou upravíme do tvaru:

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{\rho S c_D}{2m} v^2 = g - kv^2 \quad (19)$$

a následně

$$v = \sqrt{\frac{g}{k}} \tanh \sqrt{gkt} = v_m \tanh \frac{gt}{v_m} \quad (20)$$



Obrázek 48 – Uražená vzdálenost jednotlivých součástí - adaptováno z [15]

Po dosazení do rovnice (25) získáme vzdálenost uraženou aerodynamickým štítem za 2.1s.

$$S_d = \frac{1}{k} \ln \cosh \sqrt{gkt} \quad (21)$$

Ačkoliv se kapsle uvnitř štítu pohybuje také skrze vzduch, tato odporová síla je zanedbatelná a proto uvažujeme vertikální vzdálenost uraženou kapslí během pádu pouze za funkci gravitačního zrychlení

$$S_e = \frac{1}{2} gt^2 \quad (22)$$

Z uvedených rovnic můžeme říct, že  $S_e = S_d + h_0$ . Obě tělesa se tedy setkají ve vzdálenosti

$$\frac{1}{2} gt^2 = h_0 + \frac{1}{k} \ln \cosh \sqrt{gkt} \quad (23)$$

Po dosazení získáváme:

$$S_e = \frac{1}{2} gt^2 = \frac{1}{2} * 9,81 * 2,1^2 = 21,63m \quad (24)$$

$$S_d = \frac{1}{k} \ln \cosh \sqrt{gkt} = \quad (25)$$

$$\frac{1}{0,00302} * \ln \cosh \sqrt{9,81 * 0,00302 * 2,1} = 21,176m \quad (26)$$

Z rozdílů těchto dvou uražených vzdáleností dostaneme potřebnou vůli mezi štítem a kapslí.

$$h_0 = S_e - S_d = 21,63 - 21,176 = 0,455m \quad (27)$$

Tato hodnota je ovlivněna chybou danou CFD výpočtem. JE tedy nutné tuto hodnotu opravit o určitou bezpečnost, která bude eliminovat chyby výpočtu. Dále tato bezpečnost zajistí že kapsle nenarazí do štítu dříve než v zachytávacím zařízení.

### 5.3.7 Konstrukční provedení

Konstrukce aerodynamického štítu musí splňovat požadavky na tvar, tuhost a hmotnost. Z tohoto důvodu jsem zvolil vyrobit komolý kužel z hliníkového plechu o tloušťce 2 mm vyrobený ze 3 svařovaných částí. Čelo, kužel a horní límec. Válcová část aerodynamického štítu je vyrobena z průsvitného plastu vyztuženého vlepenými hliníkovými obručemi pro zachování tvaru. Válcová část je do špičky vlepena. Celé konstrukce aerodynamického štítu váží přibližně 15kg. Špička konstrukce je vyplněna polystyrenovými kuličkami pro zmenšení nárazu při doražení kapsle na aerodynamický štít.



Obrázek 49 – 3D render aerodynamického štítu

## 5.4 Vypouštěcí mechanismus

### 5.4.1 Varianty provedení

Způsobů jak vypustit kapsli společně s aerodynamickým krytem je mnoho. V rámci této diplomové práce budu uvažovat nad třemi různými variantami:

- Nylonový vlasec s odporovým drátem
- Čep ovládaný magnetickým spínačem
- Permanentní elektromagnet

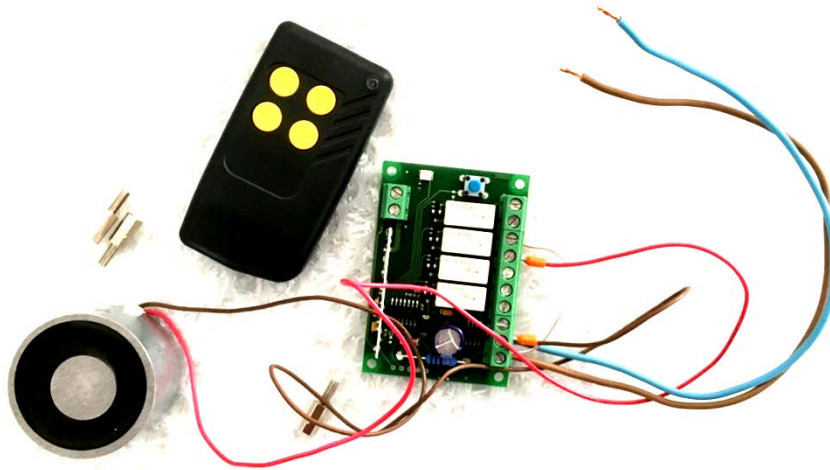
Nylonový vlasec je používán také například při vypouštění Foucaultova kyvadla, kde je nutné zabránit nechtěným pohybům kyvadla do stran. Při této konfiguraci by zvedací a vypouštěcí systém obsahoval 2 různé části. Část mechanickou, která by držela úchyt kapsle a vytáhla za něj celý balíček nahoru, kde by se otevřela a kapsle s aerodynamickým štítem by zůstala vyset pouze na vlasci. Vlasec by byl následně přetaven odporovým drátem, kolem kterého by byl namotán. Tato varianta poskytuje vypuštění s minimálním zanesením rušivých sil a vibrací do kapsle. Je však konstrukčně složitější z důvodu zaručení bezpečného vytažení a většímu počtu pohyblivých mechanických částí.

Čep ovládaný magnetickým spínačem pracuje na jednoduchém principu. Při sepnutí obvodu vytáhne magnetická cívka čep ze zámku úchytu a kapsle společně s aerodynamickým krytem začne padat. Tato metoda však může do celého experimentu vnášet vibrace, které zhoršují výslednou kvalitu prostředí mikrogravitace. Tento vypouštěcí mechanismus používá i pádová věž v Madridu.

Při využití permanentního elektromagnetu je zabezpečena bezpečnost během celé doby přípravy experimentu. Při jeho vytahování do horní pozice visí celý balíček pomocí magnetické síly na vytahovacím zařízení a není závislý na žádné mechanické pojistce ani elektrické energii. Až při zkontrolování všech nastavení a měřících senzorů je možné vyslat impulz pomocí dálkového ovládání, který aktivuje cívku uvnitř permanentního magnetu, která vyruší magnetické pole magnetu a uvolní tak celý experiment. Během této operace nedojde k žádnému mechanickému pohybu, který by mohl vnést do experimentu boční síly nebo vibrace.

### 5.4.2 Rozhodovací proces

Z těchto 3 variant byla zvolena varianta třetí. Permanentní elektromagnet se zdá být konstrukčně nejjednodušší, bezpečný a inovativní způsob jakým lze vyřešit problém vypouštěcího zařízení. Vybraný permanentní elektromagnet je dimenzovaný na zátěž do 400N, je napájen 24VDC. Rozměry tohoto elektromagnetu jsou Ø40x29mm.

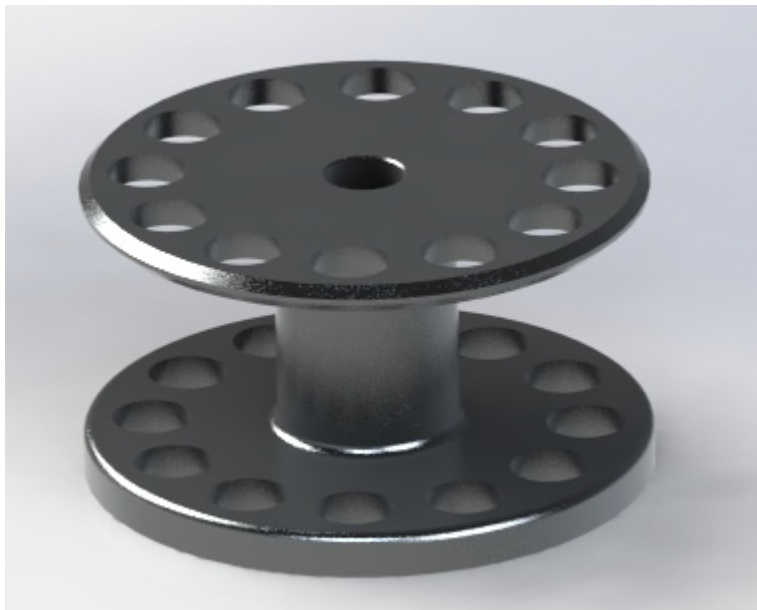


Obrázek 50 – Elektronika s permanentním elektromagnetem

Elektromagnet je doplněn o elektroniku a dálkové ovládání. Elektronika je schopna ovládat další 3 zařízení nebo kontrolní senzory. Například aktuální výšku, kalibrování myRIO sběrnice nebo měření vibrací kapsle.

### 5.4.3 Úchyt

Typ úchytu záleží na návrhu vypouštěcího zařízení a volbě provedení horní desky kapsle. V případě laminátové desky je nutné vlamínovat do desky rozsáhlý insert, který by převedl zatížení do celé desky. Jinak by došlo k vytrhnutí insertu ze skladby a destrukci cele desky a kapsle při testech na centrifuze.



Obrázek 51 – Úchyt pro kompozitové desky



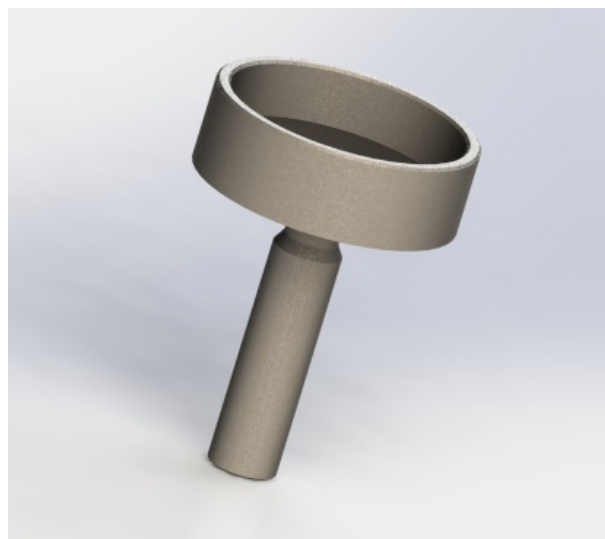
Jelikož je tento insert těžký, laminátová deska by ztratila smysl a je proto nevhodná pro naše další uvažování. Tento insert navíc uvažuje použití mechanického vypouštěcího systému, který není tak bezpečný a je složitější než systém využívající permanentní elektromagnet.

Pro zvolený vypouštěcí systém s permanentním elektromagnetem byla zvolena příruba s vnitřním závitem, která je s horní deskou spojena pomocí 3 šroubových spojů. Pro snížení rizika ovlivnění experimentů umělým magnetickým polem je příruba vyrobena z hliníkové slitiny. Jelikož hliník není feromagnetický materiál, příruba nebude přenášet magnetické vlastnosti do kapsle a experimenty by tak měly být minimálně ovlivněny umělým magnetickým polem.



Obrázek 52 – Úchyt s vnitřním závitem

Úchyt, přidělaný k horní desce, je nutné doplnit feromagnetickou koncovkou. Tato koncovka bude sloužit při použití na pádové věži. Při využívání kapsle na centrifuze bude do úchytu zašroubován koncový šroub ramene centrifugy.



Obrázek 53 – Feromagnetická koncovka

## 5.5 Dopadový mechanismus

### 5.5.1 Varianty provedení

#### 5.5.1.1 *Polystyrénové kuličky*

Řešení dopadového systému pomocí nádoby s polystyrénovými kuličkami je časté řešení, využívané například u pádové věže v Brémách. Toto řešení je vhodné spíše pro vyšší pádové věže. Nádoby s polystyrénem jsou však poměrně dlouhé a zabíraly by zbytečně moc velkou část komínu a tím zkracovaly dobu trvání experimentu.

#### 5.5.1.2 *Airbag*

Využití nafukovacího airbagu má hlavní výhodu oproti polystyrénovým kuličkám v čistotě celého procesu. Po zastavení kapsle se štítem není nutné její následné očišťování a samotné vyjmutí platformy je méně náročné. Zahrnuje ovšem vyšší finanční náklady na koupi pytle a vzduchotechniky k němu potřebné.

#### 5.5.1.3 *Zapichovací hrot*

Zapichovací hrot nelze využít pro vysoké pádové věže nebo pro těžké experimenty. Energie, kterou je potřeba disipovat dosahuje moc vysokých hodnot a zapichovací hrot do písku by znamenal moc vysoké přetížení během zpomalování. Pro menší experimenty však zapichovací hrot poskytuje jednoduché řešení s vysokou efektivitou. Problémem u zapichovacího hrotu je ovládání přetížení při nárazu, které je možné upravovat pouze tvarem hrotu bez možnosti počátečního přesnějšího výpočtu.

#### 5.5.1.4 *Sít'*

Sít' vyžaduje poměrně velký prostor na instalaci v pádové věži. Její hlavní výhodou je však možnost upravování přetížení při provádění experimentů. Při zavěšení sítě an výklopná ramena brzděna pneumatickým nebo hydraulickým tlumičem, případně pružinou, můžeme zde nastavit tuhost celé soustavy a tím ovlivnit výsledné přetížení při brzdění experimentu. Další výhodou je její čistý provoz a žádné další mechanické součásti přidělané ke štítu.

#### 5.5.1.5 *Deformační prvek*

Deformační prvek, například z extrudovaného polystyrénu, je jednoduchý a funkční díl. Nevýhodou je však jeho rozbití při každém pokusu a nutnost vyrábět stále nové deformační prvky. Hlavní výhodou deformačního prvku je jednoduchost. Není nutné budovat žádnou další konstrukci nebo dopadový prostor. Uplatnění by tedy našel v pádových věžích, kde není možné instalovat například pískovou šachtu nebo kontejner s polystyrénovými kuličkami z důvodu jeho rozměrů.

5.5.1.6 *Rozhodovací proces*

Každá varianta poskytuje určitou výhodu v použití. Opět zařadíme do procesu výběru bodovací tabulku. Stanovíme základní kritéria, které chceme, aby tento systém plnil, a určíme jejich důležitost od 1 do 10. Následně hodnotíme varianty od 1 do 5 a získáme pro nás nejvýhodnější dopadový/zachycovací systém.

varianta/kritérium	Cena	Náročnost obsluhy	Složitost výroby	Přetížení	Délka	$\Sigma$	pořadí
Polystyrénové k.	2	1	5	3	1	2.38	5
Airbag	1	2	1	4	2	2.41	4
deformační prvek	3	4	4	1	5	3.47	3
Sít	4	3	2	5	4	4.21	1
Zapichovací hrot	5	5	5	2	3	4.09	2

expert/kritérium	K1	K2	K3	K4	K5	$\Sigma$
E1	8	7	4	10	8	37
váha kritéria	0.24	0.21	0.12	0.29	0.24	1.09

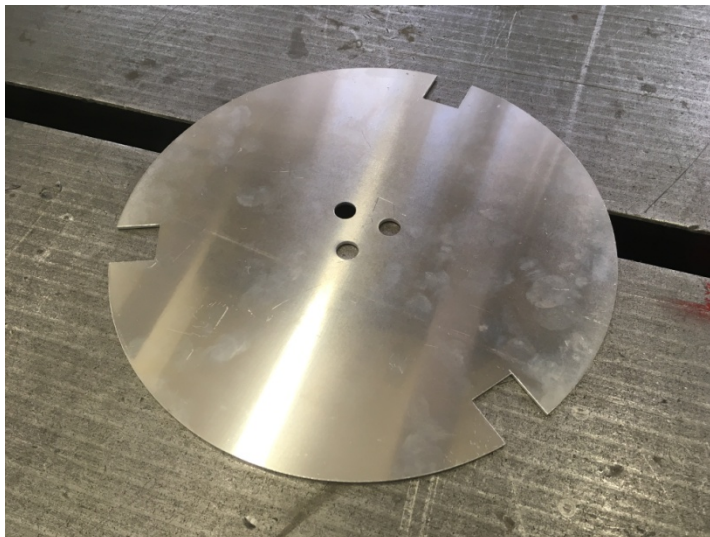
Tab. 11 – Hodnocení variant dopadového mechanismu

Po obodování hodnot kritérií a přiřazením pořadí jednotlivým variantám, vychází jako optimální řešení použití sítě ke kontrolovanému zpomalení kapsle i se štítem. Zároveň tato metoda předchází zničení kapsle a štítu a tím, i přes vyšší počáteční náklady, vychází celkově ekonomicky lépe.

## 6 Výroba

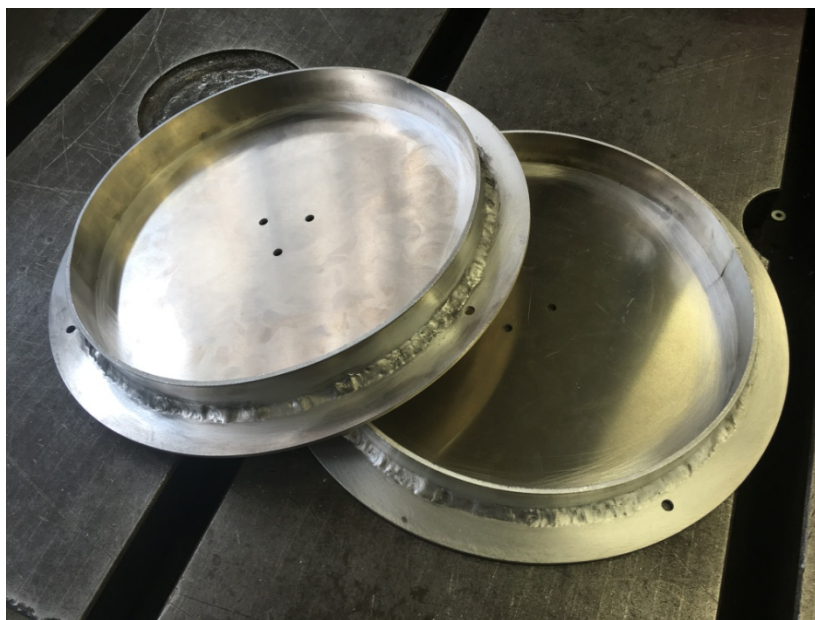
### 6.1 Kapsle

Při výrobě kapsle bylo nutné dodržet určité požadavky na přesnost a vyvážení. Z toho důvodu byly hliníkové plechy vyřezány pomocí laseru.



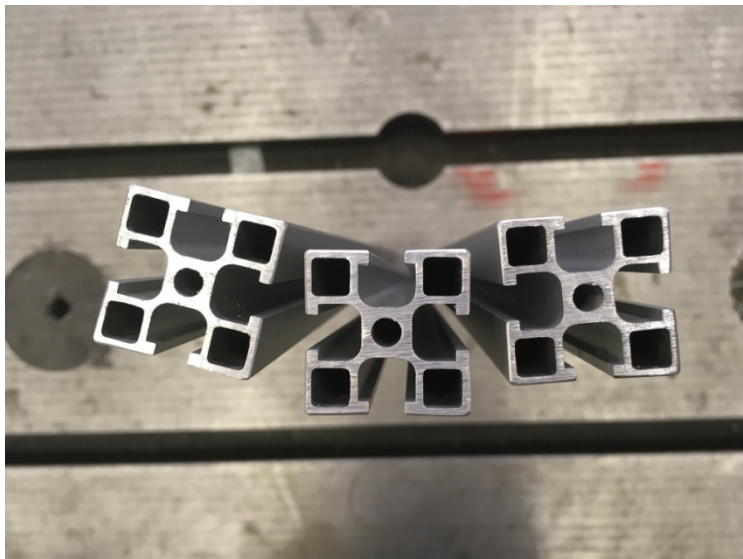
Obrázek 54 – Laserový výpalek hliníkové police

Horní a spodní desku bylo již z návrhu nutné vyztužit pomocí kruhového žebra navařeného na vnější stranu. Žebra byla ohnuta na ruční ohýbačce za pomoci postupného ohýbání a ohřevu pro snížení vnitřního pnutí.



Obrázek 55 – Svařené desky s žebrem

Svisle nosníky byly nařezány na pásové pile, ručně začištěny a následně byly z obou stran vyříznuty závity M6 v délce 50mm.



Obrázek 56 – Tvar profilu

Celá kapsle byla následně sestavena a na horní desku byl přidělán úchyt pomocí tří šroubů M6 s pojistnou maticí.



Obrázek 57 – Sestava kapsle

## 7 Finální prototyp

### 7.1 Montáž sestavy

Finální prototyp se skládá z primární konstrukce, vypouštěcí koncovky, zdroje napětí a elektroniky. V případě použití kapsle na centrifuze je nutné přidělat na kapsli aerodynamický obal, který chrání experiment před proudícím vzduchem a zároveň celou kapsli stabilizuje eliminováním nesymetrického proudění vzduchu skrz kapsli.



Obrázek 58 – Prototyp bez aerodynamického obalu

### 7.2 Elektronika

Kapsle je vybavena vlastní elektronikou, která slouží k napájení, kontrole a sběru dat během celého experimentu. Zdrojem elektrické energie je Lipol baterie Turnigy 4S 5000mAh 20C 14.8V HARDCASE o hmotnosti 528g.



Obrázek 59 – Primární baterie

Tato baterie primárně napájí hlavní datascběrnou jednotku myRIO. Jednotka MyRIO [17] byla vybrána jako vhodná jednotka pro řízení experimentů a sběru dat, která umožňuje implementovat více experimentů s použitím jen jedné měřící jednotky o hmotnosti 193g. Zařízení myRIO je vybaveno I/O na obou stranách zařízení s konektory MXP a MSP. Obsahuje analogové vstupy a výstupy, digitální I/O diody, tlačítko, palubní akcelerometr, Xilinx FPGA a dvoujádrový procesor ARM Cortex-A9. Některé modely také obsahují podporu WiFi. Program myRIO - Student Embedded Device můžete naprogramovat pomocí LabVIEW nebo C. Dále bude na palubě nainstalovaný Datalogger pro měření vibrací CEM DT-178A.



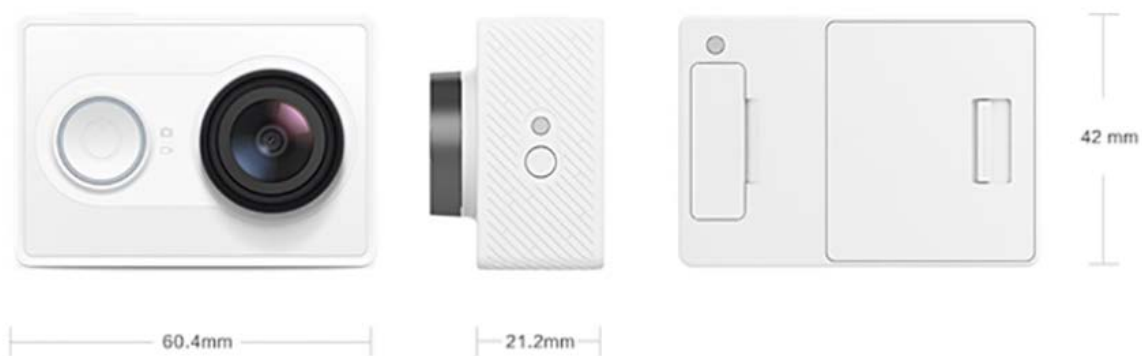
Obrázek 60 – MyRIO[17]

Digitální obrazový záznam bude pořízen pomoc online IP kamerou Edimax IC-3110 [18].



Obrázek 61 – Online kamera Edimax[18]

Celý experiment bude také natáčen vysokofrekvenční kamerou Xiaomi Yi Sport (1080(30/60fps); 720(120fps); 480 (240fps) [19] o hmotnosti 72g.



Obrázek 62 – Xiaomi YI Sport[19]



## 8 Závěr

Předmětem této diplomové práce bylo zobrazit různé možnosti testování v mikro gravitaci na Zemi i v kosmu, a to jak její historický vývoj, tak současnou situaci. Hlavní částí práce však bylo postavit koncepční prototyp kapsle, platformy, pádové věže a centrifugy, který by měl v budoucnu sloužit k provádění experimentů v prostředí se sníženou gravitací a přetížením. Během postupného návrhu bylo uvedeno vždy pro každou oblast, které bylo nutné věnovat zvýšenou pozornost, více variant, z kterých se následně vybrala optimální varianta pro použití v prostorách ČVUT. Výsledný design splňuje všechny požadavky dané pádovou věží tak centrifugou. Tyto požadavky na rozměr, hmotnost, pevnost a aerodynamický tvar byly testovány buď prakticky nebo pomocí počítačových CFD či MKP simulací. Konstrukci platformy je možné, po zavedení do provozu, upravit tak, aby splňovala přísnější kritéria daná praktickým použitím. V budoucnu je možné změnit konstrukci tak, aby její výsledná hmotnost a rozměry lépe vyhovovaly požadavkům experimentu, případně vyrábět kapsle přímo na míru pro daný experiment.

Prototyp kapsle i její vypouštěcí systém byl prakticky otestován, aby byla prokázána jeho funkčnost a uživatelsky jednoduché používání. Pro zlepšení výsledného prostředí mikrogravitace by bylo v budoucnu možné použít vakuový aerodynamický štít, který by ještě zlepšil výslednou hodnotu mikrogravitace.

## Informační zdroje

### Knižní zdroje

CURTIS, Howard, *Orbital Mechanics for Engineering Student.*, ELSEVIER, 2013.

### Elektronické zdroje

- [1] Earth Observatory, NASA, Dostupné z: <https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=3666>
- [2] Gravitační a tíhová síla (resp. zrychlení) Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/60-gravitacni-a-tihova-sila-resp-zrychleni>
- [3] NASA, Astronomy Picture of the Day, Dostupné z: [https://apod.nasa.gov/apod/image/1604/ISS02\\_NASA\\_4288.jpg](https://apod.nasa.gov/apod/image/1604/ISS02_NASA_4288.jpg)
- [4] [www.kosmonautix.cz](http://www.kosmonautix.cz), Přistání návratového pouzdra Bion, Dostupné z: <https://i1.wp.com/www.kosmonautix.cz/wp-content/uploads/P%C5%99ist%C3%A1n%C3%AD-n%C3%A1vratov%C3%A9ho-pouzdra-Bion-M1-zdroj-DLR.jpg?fit=600%2C400>
- [5] Canadian Space Agency, Black Brant Sounding Rocket, Dostupné z: <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/search/images/watch.asp?id=217>
- [6] NASA, NASA's Balloon Program Returns to Wanaka, New Zealand Dostupné z: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/hasp\\_balloon\\_inflated\\_2.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/hasp_balloon_inflated_2.jpg)
- [7] DLR, [www.dlr.de](http://www.dlr.de), Dostupné z: [http://www.dlr.de/dlr/en/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal\\_2012\\_5/ILA\\_zero\\_g.jpg](http://www.dlr.de/dlr/en/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_5/ILA_zero_g.jpg)
- [8] <http://www.airzerog.com>, Dostupné z: <http://www.airzerog.com/images/upload/banniere/homepage/generated/01.jpg>
- [9] <http://www.unoosa.org>, Fellowship Programme for "Drop Tower Experiment Series" (DropTES), Dostupné z: <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/hsti/capacity-building/droptes.html>
- [10] NASA, Drop Tower Facility, Dostupné z: <https://facilities.grc.nasa.gov/index.html>
- [11] Seven easy ways, Dostupné z : <https://thafcc.wordpress.com/2016/05/09/seven-easy-ways-scientists-get-rid-of-gravity-for-experimentation/>
- [12] Portland State University, Dostupné z: <https://www.pdx.edu/dryden-drop-tower/>
- [13] Microgravity Drop Tower, Dostupné z: <https://www.qut.edu.au/research-all/research-projects/microgravity-drop-tower>
- [14] <http://www.aist.go.jp/>, Dostupné z: [https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource\\_images/aist\\_e/aist\\_today/2001\\_01/2001\\_01\\_p27\\_31.pdf](https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_e/aist_today/2001_01/2001_01_p27_31.pdf)
- [15] IDR/UPM, Universidad Politécnica de Madrid, 2014 Meseguer y otros EJP, <http://www.idr.upm.es/novedades/2014%20Meseguer%20y%20otros%20EJP.pdf>
- [16] Restav spol.s r.o., Dostupné z: <http://www.restav-praha.cz/fotogalerie>
- [17] National Instruments, Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/shop/select/myrio-student-embedded-device?modelId=125751>
- [18] [www.edimax.com](http://www.edimax.com), Dostupné z: [http://www.edimax.com/edimax/merchandise/merchandise\\_detail/data/edimax/global/home\\_legacy\\_ip\\_cameras\\_network\\_cameras/ic-3110/](http://www.edimax.com/edimax/merchandise/merchandise_detail/data/edimax/global/home_legacy_ip_cameras_network_cameras/ic-3110/)
- [19] Xiaomi, Dostupné z: <https://xiaomi-store.cz/cs/akcni-kamery/72-xiaomi-yi-sports-camera-6926930100136.html>

## **Přílohy**

- I. Výkres sestavy kapsle
- II. Výrobní výkres horní/spodní desky kapsle
- III. Výrobní výkres police
- IV. Výrobní výkres úchytu
- V. Výrobní výkres feromagnetické koncovky

## **Přílohy na CD**

- I. 3D model kapsle (.stp)
- II. 3D schematický model štítu (.stp)