



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Návrh univerzálního boxu pro experimenty
ve změněné tíži**

**Design of the universal box for experiments
in modified gravity conditions**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Martin KADLEC

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem

Vedoucí práce: Mgr. Kousal Jaroslav Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kadlec** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **437342**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh univerzálního boxu pro experimenty ve změněné tíži

Název bakalářské práce anglicky:

Design of the universal box for experiments in modified gravity conditions

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Navrhněte box/komoru pro realizaci experimentů ve snížené (0g-1g) či zvýšené tíži (>15g) použitelnou pro centrifugu, klinostat i pádovou kapsli (vč. brzdícího rázu).
- 2) Při návrhu respektujte: Vnitřní objem přibližně 5 l, hmotnost nákladu >1 kg. Experimentálnímu nákladu má box zajistit základní napájení, sledování podmínek, videosledování, montážní body a přenos dat. U těchto systémů řešte jen umístění. Počítejte s možností hermetizace, odvakování (<1 Pa) a teploty boxu.
- 3) Proveďte pevnostní analýzu pro trvalých 0g až 15g podélně i bočně, nárazových 100g/100ms podélně a pro vnitřní podtlak 1 bar.

Seznam doporučené literatury:

Vincent L. Pisacane: The space environment and its effects on space systems, AIAA, 2008, ISBN 978-1-56347-926-7
Malcolm Macdonald, Viorel Badescu (ed.): The International Handbook of Space Technology, Springer, 2014, ISBN 978-3-642-41101-4
+ další literatura dle doporučení vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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


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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce:


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


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na vypracoval samostatně, s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím na konci bakalářské práce v seznamu použité literatury. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části.

V Praze dne

Podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu Mgr. Jaroslavovi Kousalovi, Ph. D. za pomoc a vedení při vypracování této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat mojí rodině za podporu při studiu.

Anotační list

Jméno autora	Martin Kadlec
Název	Návrh univerzálního boxu pro experimenty ve změněné tíži
Anglický název	Design of the universal box for experiments in modified gravity conditions
Rok zpracování	2020
Ústav	Ústav letadlové techniky
Vedoucí BP	Mgr. Kousal Jaroslav Ph.D.
Bibliografické údaje	Počet stran: 38 Počet obrázků: 46 Počet tabulek: 1 Počet příloh: 8
Klíčová slova	Gravitace, mikrogravitace, pádová věž, centrifuga, klinostat, parabolické lety, vakuum, hermetizace
Keywords	Gravity, microgravity, drop tower, centrifuge, clinostat, parabolic flight, vacuum, hermetization

Anotace

V této práci je popsán návrh univerzální kapsle pro různé způsoby provádění experimentů při změněné tíhové síle. Také jsou zde analýzy navržené kapsle a možné následující úpravy.

Abstrakt

This work contains design of universal box for different ways of experimenting in modified gravity conditions. There are also analysis of designed box and possible following adjustments.

Obsah

1. Úvod	2
2. Teoretická část	3
2.1. Gravitace	3
2.2. Intenzita gravitačního pole	3
2.3. Tíhové pole	4
2.4. Mikrogravitace a zvýšená gravitace	4
2.5. Pádová věž	4
2.6. Centrifuga	5
2.7. Klinostat	5
2.8. Parabolické lety	6
2.9. Vakuum	7
3. Praktická část	7
3.1. Koncept	7
3.2. Rozměrové požadavky	8
3.3. Materiál	8
3.4. Plášť	9
3.5. Příruby	11
3.6. Závitové tyče	15
3.7. Sloupky	16
3.8. Uložení experimentu	18
3.9. Hermetizace	20
3.10. Dodatečný prostor	22
3.11. Postup montáže	24
3.12. Virtuální únik	27
3.13. Vyvažování pomocí baterie	29
3.14. Vnitřní vybavení	30
3.15. Zobrazení kapsle	32
4. Závěr	36
5. Seznam obrázků	37
Zdroje	38

1. Úvod

Cílem této práce je navržení boxu pro experimenty prováděné při zvýšené nebo snížené tíži a možností hermetického uzavření. Vzhledem k náročnosti a ceně pro dosažení skutečných podmínek pro vybrané experimenty, například poslání experimentu na oběžnou dráhu, se používají různé způsoby simulace požadovaných podmínek. Součástí úspěšného experimentu je tedy i správné poskládání daného experimentu do nosiče použité simulace. Pokud je navíc potřeba provést experiment při použití více způsobů simulace, musí se většinou uložení experimentu upravit nebo zcela změnit pro správný průběh při jiné simulaci. To přidává na složitosti provedení a časové náročnosti. Za použití univerzálního boxu navrženého v této práci by ale tato dodatečná úprava zabrala jen několik minut menších úprav nebo by i v některých případech kompletně odpadla. Tento box bude navržen hlavně pro použití v pádové věži, klinostatu, centrifuze a při parabolickém letu v dronu. Další důležitá součást je poměrně jednoduchá skládatelná konstrukce při udržení vlastností pro opakovatelné použití.

2. Teoretická část

2.1. Gravitace

Gravitace se od ostatních základních silových interakcí liší hned několika vlastnostmi. Je to nejslabší silová interakce, která ale působí na všechny hmotné části vesmíru. Na rozdíl od ostatních má nekonečný dosah a je vždy kladná, tedy přitažlivá. Její působení se ale snižuje se zvyšující se vzdáleností na sebe působících hmot.

Pro získání gravitační síly je možné použít Newtonův gravitační zákon. Podle kterého závisí velikost této síly na hmotnostech těles, která na sebe působí, a na jejich vzdálenosti. Tento zákon je popsán následující rovnicí:

$$F_g = \kappa \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Kde:

F_g - Gravitační síla [N]

κ - Univerzální gravitační konstanta = $6,674 \times 10^{-11}$ [Nm²kg⁻²]

$m_{1,2}$ - Hmotnosti působících těles [kg]

r - Vzdálenost mezi působícími tělesy [m]

[1]

2.2. Intenzita gravitačního pole

Kolem každého tělesa existuje prostor, který se nazývá gravitační pole. Pro popsání působení tohoto pole se používá veličina zvaná intenzita gravitačního pole. Vztah této veličiny je:

$$\vec{K} = \frac{\vec{F}_g}{m}$$

Kde:

K - Intenzita gravitačního pole [N kg⁻¹]

F_g - Gravitační síla [N]

m - Hmotnost tělesa [kg]

Zde je také vidět, že intenzita gravitačního pole se rovná gravitačnímu zrychlení, podle 2. Newtonova zákona, kde:

$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{a}_g$$

Kde:

a_g - Gravitační zrychlení [m s⁻²]

Tohle ale úplně neplatí, pokud jde například o zrychlení při povrchu Země, či jiné planety. Planety se totiž otáčejí kolem své osy určitou úhlovou rychlostí a tím zde dochází ke vzniku odstředivé síly F_o [N]. [2]

2.3. Tíhové pole

Výsledná síla, která působí na tělesa při povrchu Země, je tedy součet gravitační a odstředivé síly:

$$\vec{F}_G = \vec{F}_g + \vec{F}_o$$

Kde:

F_G - Tíhová síla [N]

F_g - Gravitační síla [N]

F_o - Odstředivá síla [N]

Výsledná tíhová síla je ještě ovlivněna tím, že Země není homogenní těleso a není dokonalá koule. Proto hodnota tíhové síly závisí i na zeměpisné šířce. Na pólech je přibližně $g = 9,83 \text{ m s}^{-2}$ a na rovníku $g = 9,78 \text{ m s}^{-2}$. Uznávaná a všeobecně používaná hodnota tíhového zrychlení je $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$. [1]

2.4. Mikrogravitace a zvýšená gravitace

Mikrogravitace je pojem, který je většina lidí zná pod názvem „nulová gravitace“. Gravitace jako taková ale nemůže být nulová, jen může dosahovat nezměřitelně malých hodnot. Těleso, na které působí síla menší než 1 G je ve stavu snížené gravitace, za stav mikrogravitace se považuje působící síla řádově menší než 10^{-6} G.

Vzhledem k tomu, že ani na oběžné dráze není nulová gravitace, tak ani na vesmírné stanici není stav beztlíže. Ačkoliv to tak může vypadat, v těchto případech dochází k volnému pádu. Družice a vesmírné stanice mají dostatečně velkou oběžnou rychlost a díky tomu, společně se zakřivením země, jsou schopné udržet se na orbitu. [3]

Hypergravitace je stav, kdy je na těleso působící síla větší než 1 G. Pro získání hypergravitace lze použít například odstředivku nebo centrifugu. Tento stav se využívá v lékařství, ve výzkumu jeho působení na živé organismy a také například pro získání kvalitních slitin materiálů. [4]

2.5. Pádová věž

Jedním ze způsobů získání volného pádu na Zemi pro vědecké experimenty je použití pádové věže. Princip těchto zařízení je snadné poznat už z názvu. Jde o věže vysoké až přes 100 m, ve kterých se experiment nechá volně padat v pádové kapsli. Při tomto pádu dojde k několika sekundám mikrogravitace. Navíc je i možné v některých pádových věžích vytvořit vakuum, které s pomocí pádové kapsle snižují odpor vzduchu, čímž lze dosáhnout lepších podmínek pro experimenty. Také existují pádové věže s katapulty, které místo puštění kapsle s experimentem, kapsle katapultují k vrcholku věže, a tím dosáhnou dvounásobku délky experimentu. [5] Může se zdát, že pár sekund není

příliš, ale pádové věže mají výhody v relativně malé ceně, počet možných experimentů za den a vysokou kvalitu získané mikrogravitace. [6]

2.6. Centrifuga

Další způsob, kterým je možné simulovat různou tíži, je použití centrifugy. Tyto přístroje pracují na principu rotace kolem jedné pevné osy a tím mohou vytvořit vysokou odstředivou sílu, která dodává experimentům zrychlení větší než 1 G. Velikost působícího zrychlení závisí na úhlové rychlosti centrifugy a na délce otáčejícího se ramena. Centrifugy se používají nejenom pro výzkum souvisejícím se změnou tíži, ale také v lékařství, v různých druzích průmyslu a také se stejný princip považuje teoreticky za možnost vytváření umělé gravitace pro vesmírné lety. Na obrázku č. 1 je možné vidět centrifugu, která je v ESA ve městě Noordwijk. [7]



Obrázek 1: Centrifuga v ESA výzkumném centru

2.7. Klinostat

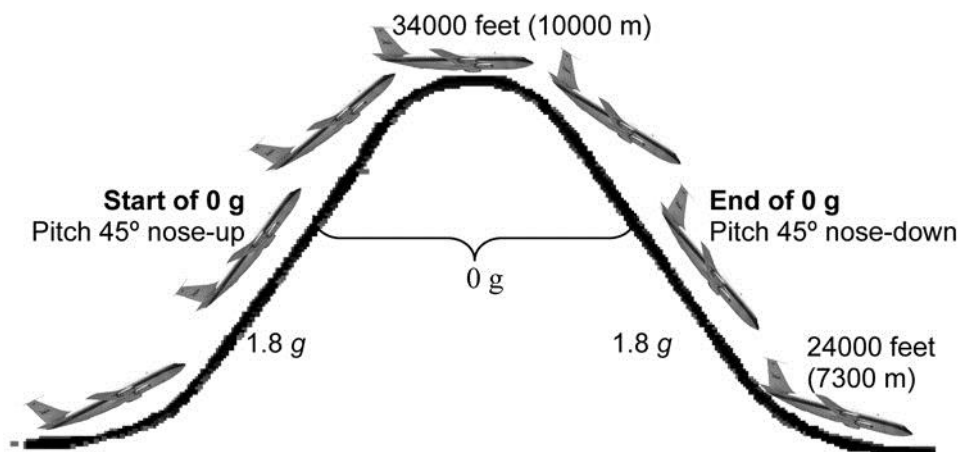
Pro dlouhodobé simulace působení mikrogravitace se používají přístroje nazývané klinostaty. Existuje mnoho druhů klinostatů, ale jejich nejjednodušší dělení je na 2-D klinostaty a 3-D klinostaty. 2-D klinostaty pracují na principu rotace kolem jedné osy, která je kolmá k vektoru gravitace. 3-D klinostaty mají 2 osy rotace, které jsou kolmé navzájem k sobě. Tyto jsou také často nazývané „random positioning machine“, neboli RPM. Důležitý parametr pro získání kvalitních podmínek mikrogravitace je rychlost otáčení. Nejčastější použití klinostatu je pro výzkum rostlin a buněčných kultur. Na obrázku č. 2 je vidět rychle rotující 2D klinostat. [4]



Obrázek 2: Rychle rotační klinostat

2.8. Parabolické lety

K získání volného pádu se dají použít i letadla a drony a to při takzvaném parabolickém letu. Použité letadlo se při tomto letu pohybuje po parabolické dráze, jak je patrné z názvu. Na začátku simulace letadlo stoupá vzhůru pod úhlem 45° , kdy ze začátku působí až $1,8\text{ g}$. Po určité době se pohon přestane používat ke zrychlení, ale jenom jako kompenzace odporu. V této chvíli se letadlo pohybuje po parabole a je ve stavu volného pádu po dobu kolem 20 sekund. Poté se let letadla vyrovná a je možné tento manévr opakovat. Jeden let se skládá většinou z 30 až 60 těchto manévrů. Parabolické lety se používají k výcviku astronautů, k simulování experimentů, při kterých je důležitá opakovatelnost nebo možnost úpravy parametrů mezi parabolami a také ve filmovém průmyslu. [8]



Obrázek 3: Trajektorie parabolického letu

2.9. Vakuum

Pokud je v daném prostoru menší než atmosférický tlak, tak se stav tohoto prostoru označuje jako vakuum. Dokonalé vakuum by znamenalo, že by daný prostor byl úplně prázdný, což je nedosažitelné. S tím souvisí jiná definice vakua a ta je podle počtu částic v soustavě. Vakuum se dělí převážně na 4 typy, hrubé, jemné, vysoké, ultra vysoké a extrémně vysoké vakuum. V tabulce č. 1 je možné vidět základní hodnoty tohoto rozdělení. Vakuum má široké využití v průmyslu, lze ho využívat pro chemicky inertní prostředí a také například ve výzkumu v urychlovačích částic. [9]

Označení vakua	Tlak [hPa]	Počet molekul na cm^3	Střední volná dráha částice
Hrubé	300 až 1	10^{19} až 10^{16}	0,1 až 100 μm
Jemné	1 až 10^{-3}	10^{16} až 10^{13}	0,1 až 100 mm
Vysoké	10^{-3} až 10^{-7}	10^{13} až 10^9	100 mm až 1 km
Ultra vysoké	10^{-7} až 10^{-12}	10^9 až 10^4	1 až 10^5 km
Extrémně vysoké	$< 10^{-12}$	$< 10^4$	$> 10^5$ km

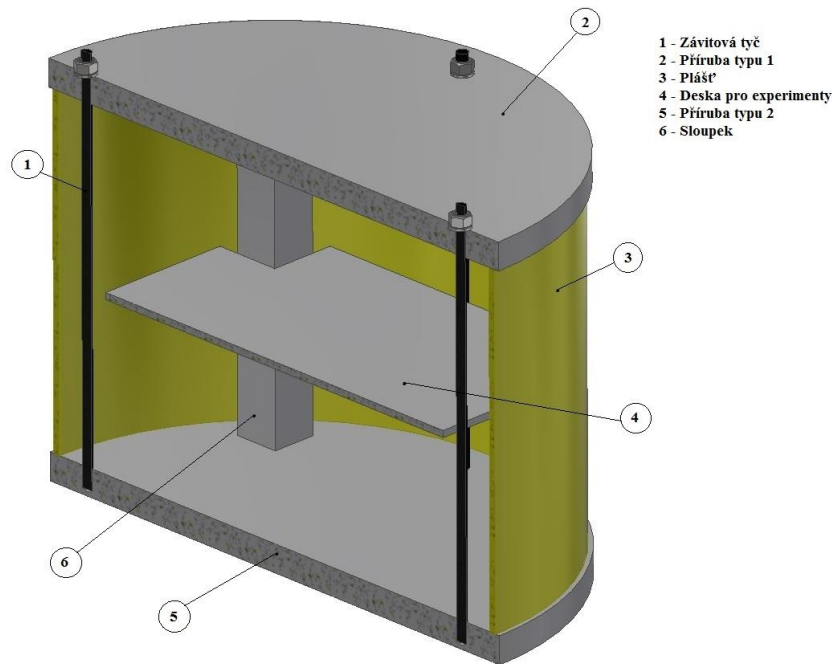
Tabulka 1: Rozdělení typů vakua

3. Praktická část

3.1. Koncept

Při tvorbě základního konceptu bylo přihlíženo na jednoduchost konstrukce a zachování použitelnosti kapsle pro více druhů zařízení pro experimenty. Na obrázku č. 4 je zobrazen tento koncept. Součást číslo 1 je závitová tyč, číslo 2 je příruba typu 1,

číslo 3 je plášť, číslo 4 je deska pro uložení experimentu, číslo 5 je příruba typu 2 a číslo 6 je sloupek. Rozdíl mezi přírubami je takový, že typ 1 je spojen se závitovými tyčemi pomocí matice a podložky. Pro získání více prostoru pro experimenty bylo zvoleno, že rozteč pro závitové tyče bude menší, než je průměr pláště. Z toho ale vyplývá problém z hermetizací, který je řešený dále v práci.



Obrázek 4: Řez konceptu kapsle

3.2. Rozměrové požadavky

Pro správnou funkci univerzálního boxu je potřeba splnit několik požadavků. První požadavky jsou rozměry boxu. Počáteční minimální délkové rozměry byly 100 x 100 x 100 mm. Maximální rozměry byly 400 x 400 x 400 mm. Pro jednoduchost konstrukce a lepší fyzikální vlastnosti byl určen tvar válcový tvar boxu. Maximální rozměry byly poté změněny pro možnost využití při parabolickém letu v dronu na největší možný průměr 240 mm a maximální délka na 200 mm.

3.3. Materiál

Jako hlavní materiál pro tuto kapsli byla vybrána hliníková slitina 2024 T6, neboli dural. Tato slitina obsahuje až 4,9 % mědi a 1,8 % hliníku. Vzhledem k funkci kapsle jsou důležité nejenom pevnostní vlastnosti materiálu, ale také jeho hustota. Vysoká hmotnost samotné kapsle je nežádoucí z několika důvodů, například vyšší namáhání vyvolané kapslí na centrifugu nebo potřeba udržení celkové hmotnosti boxu s experimentem pod limitem pro použití při parabolickém letu v dronu. Proto byla zvolená právě tato slitina, protože při hustotě 2,8 kg/m³ má vynikající pevnostní vlastnosti.

3.4. Plášť

Důležitá vlastnost tohoto boxu je také prostor, který je možný využít pro experimenty. S tím souvisí poloměr válcové stěny. Použitý poloměr musí být tedy kombinací pevnostních a konstrukčních podmínek. Z konstrukčního pohledu jde hlavně o dostupnost trubky s požadovanými rozměry a udržení dostatečné rezervy maximálního vnějšího rozměru pro případné spojení částí boxu nebo jeho uložení do simulačního aparátu.

Z pevnostního hlediska je velmi důležitá tloušťka stěny. K tomu byla použita upravená rovnice pro výpočet tloušťky stěny pro uzavřenou silnostěnnou nádobu:

$$r_2 \geq \sqrt{\frac{r_1^2}{1 - \frac{2p}{\sigma_D}}}$$

Kde:

r_1 - Vnitřní průměr nádoby [mm]

r_2 - Vnější průměr nádoby [mm]

p - Působící tlak [MPa]

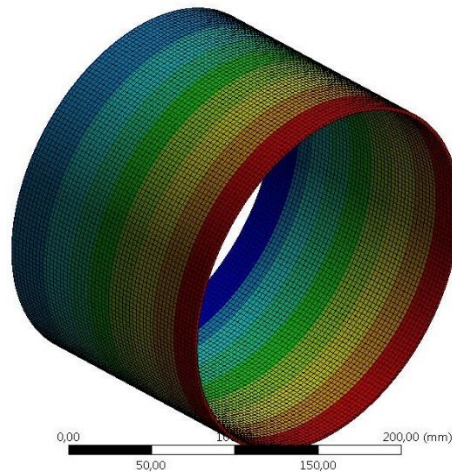
σ_D - Dovolené napětí [MPa]

S ohledem na maximální rozměry boxu byla zvolena hodnota vnitřního poloměru $r_1 = 110$ mm. Tlak působící na nádobu má velikost $p = 0,101325$ MPa, což je rozdíl mezi atmosférickým tlakem a vakuem a také tedy nejvyšší možná působící hodnota. Dovolené napětí $\sigma_D = 360$ MPa je hodnota, která závisí na použitém materiálu stěny. Po dosazení těchto hodnot byl získán minimální vnější poloměr nádoby $r_2 = 110,031$ mm. Z tohoto výsledku vyplývá, že není potřeba brát ohled na požadovanou tloušťku stěny v tomto ohledu a je možné zvolit výsledný vnější poloměr z jiných důvodů.

Další možnost je použití výpočetního softwaru, v tomto případě byl použit program Ansys. Na obrázku č. 5 je znázorněn plášť s tloušťkou 3 mm a délkou 154 mm při zvýšené tíži 30 G. Působení síly a zrychlení je při této analýze proti směru osy x.

Directional Deformation
Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 1
10.5.2020 22:23

0,0038852 Max
0,0034066
0,002928
0,0024495
0,0019709
0,0014923
0,0010137
0,00053514
5,656e-5
-0,00042202 Min

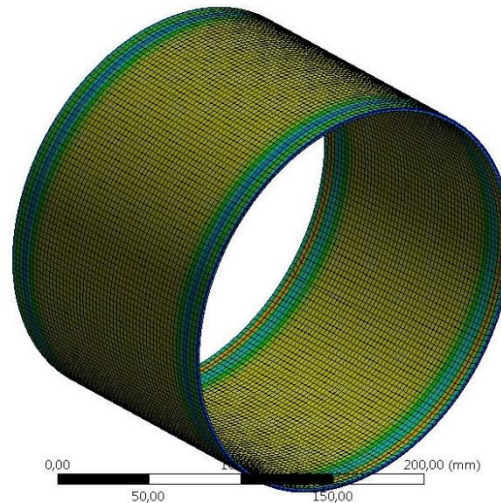


Obrázek 5: Analýza pláště při zvýšené tíži 30 G

Vzhledem k tomu, že tato kapsle by mohla být použita i pro experimenty v simulovaném prostředí vakua, je další obrázek analýza působení vnějšího tlaku 0,101325 MPa. Jak je na obrázku č. 6 vidět, při zvolené tloušťce 3 mm daného materiálu je výsledné působení tlaku minimální.

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
18.5.2020 22:24

6,8451 Max
6,1082
5,3713
4,6344
3,8975
3,1606
2,4237
1,6868
0,94995
0,21305 Min



Obrázek 6: Analýza působení atmosférického tlaku

Jiná možnost dimenzování tloušťky stěny je za použití výpočtu pro ztrátu stability při vzpěru. Pro tento výpočet je použit případ s nejhorsími podmínkami, kterému odpovídá vzorec:

$$F_{kr} = 0,25 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l^2}$$

Kde:

F_{kr} - Kritická působící síla [N]

E - Youngův modul [Pa]

J_{min} - Kvadratický moment [mm⁴]

l - Délka tělesa [m]

Hodnota Youngova modulu závisí na vlastnostech použitého materiálu, délka je 150 mm, ale kvadratický moment je potřeba vypočítat pomocí vzorce:

$$J_{min} = \frac{\pi \cdot d_2^4}{64} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4\right]$$

Kde:

J_{min} - Kvadratický moment [mm⁴]

d_1 - Vnitřní průměr [mm]

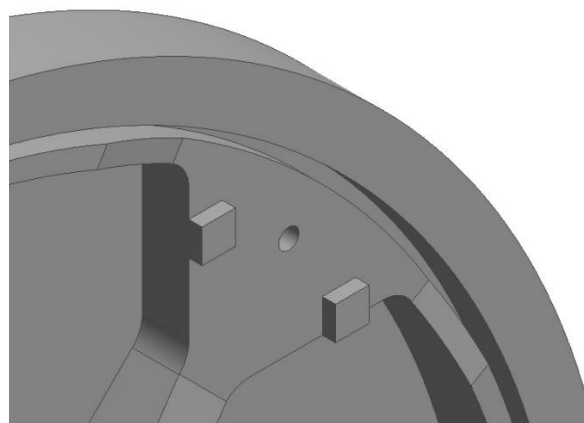
d_2 - Vnější průměr [mm]

V tomto vzorci byly použity předešlé hodnoty pro průměry, $d_1 = 220$ mm a $d_2 = 226$ mm. Při použití výsledného kvadratického momentu v předešlém vzorci je výsledná kritická síla $F_{kr} = 6,8796 \cdot 10^7$ N. Je velice nepravděpodobné, že bude tato síla dosažena, takže byla určena zvolná tloušťka pláště 3 mm jako dostačující.

3.5. Příruby

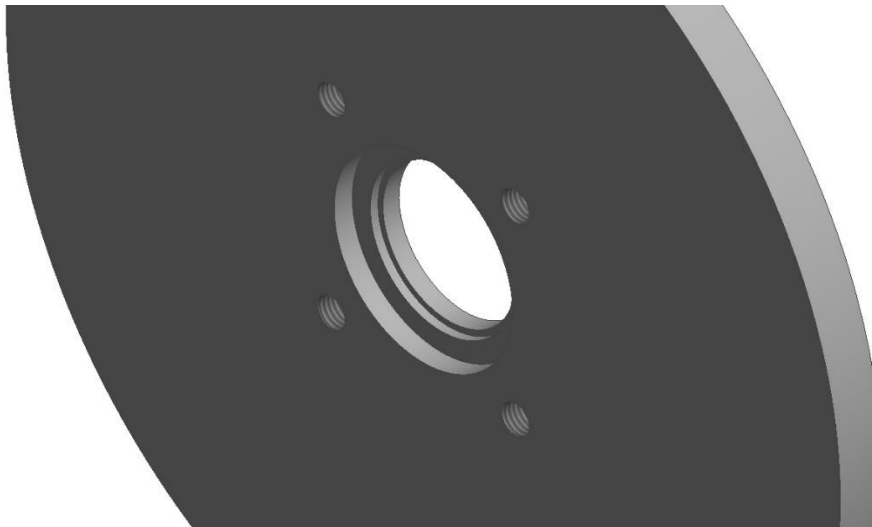
Jako základní část kapsle jsou použity 2 příruby. Pro tento účel byla vybrána příruha ISO200-K z materiálu dural 6061 - T6. Rozměry této příruby jsou 240 mm průměr a 12 mm tloušťka. Tato příruha dobře vyhovuje rozměrovým a pevnostním požadavkům.

Samozřejmě je potřeba tyto příruby nejdříve upravit. V těchto přírubách je vytvořena drážka pro umístění pláště. Příruby jsou také upraveny pro použití sloupků. Na obrázku č. 7 je ukázán detail této úpravy. Díra o průměru 3 mm je určena pro kolík, který slouží k centrování uložení sloupku, dodatečné obdélníkové plochy jsou určeny k zajištění správného otočení sloupku a pro případné opření sloupku při působení větších sil v jiném směru, než je směr hlavní osy kapsle.



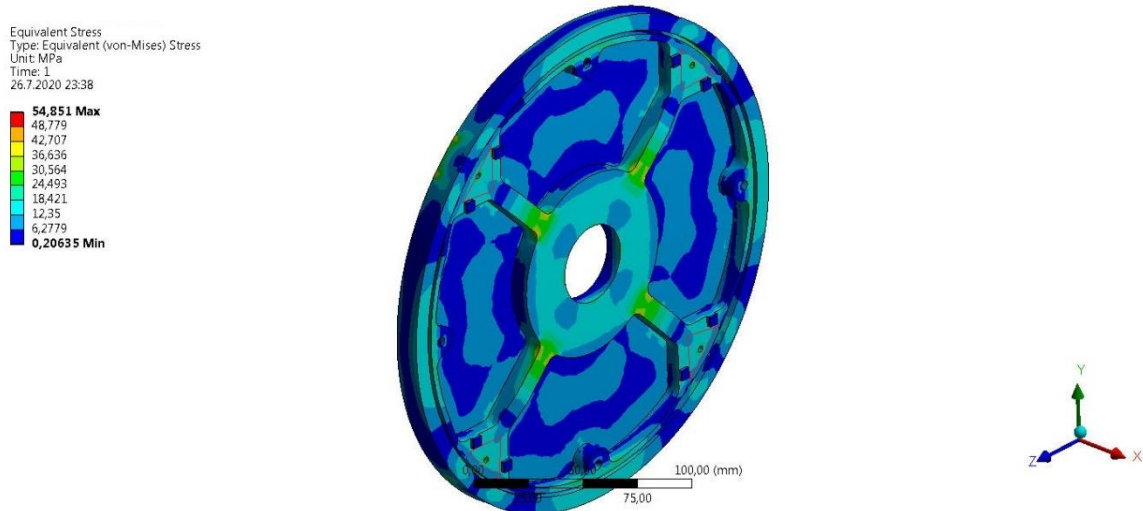
Obrázek 7: Detail pro umístění sloupků v přírubě

Pro umožnění odčerpání vzduchu v prostoru pro experimenty a vytvoření vakua je v ose příruby díra, která je znázorněna na obrázku č. 8. Kolem této díry jsou umístěny závity pro připojení menší příruby, pro tento účel byla uvažována příruba s označením KF-40. Pro hermetizaci tohoto spojení je také příruba upravena pro umístění centrovacího kroužku o shodné velikosti KF-40, o kroužek obsažený v tomto centrovacím kroužku splňuje požadavky na těsnění tohoto spojení.



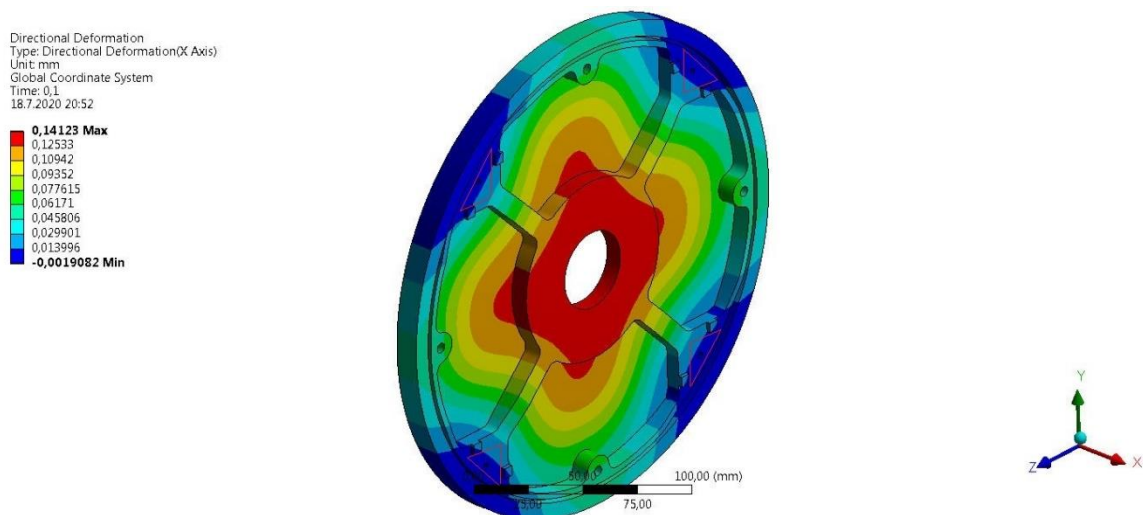
Obrázek 8: Díra v přírubě pro odčerpání vzduchu

Celou kapsli drží pohromadě 4 závitové tyče. Průměr rozteče umístění těchto tyčí je 206,5 mm a mezi sebou svírají úhel 90 stupňů. Dvě použité příruby se liší podle úpravy pro uložení těchto závitových tyčí. K jedné přírubě jsou připojeny pomocí matice, podložky a o kroužku. K druhé přírubě jsou připojeny pomocí neprůchozích děr se závitem, zde by mohl vzniknout problém zvaný virtuální únik, který je popsán dále v této práci. Poslední úpravy, oblasti s tloušťkou maximálně 3 mm, jsou kvůli snížení hmotnosti a tím zlepšení podmínek pro prováděné experimenty při parabolickém letu za použití dronu. Na obrázku č. 9 je ukázka analýzy působení sil při zvýšené tíži 30 G a při uvažovaném vakuu uvnitř kapsle. Červeně ohraničené plochy jsou zvýrazněné plochy, kde působí ostatní části kapsle. Maximální vyvolané napětí je podle této analýzy 54,851 MPa, což je několikrát menší než meze použitého materiálu.



Obrázek 9: Analýza příruby při zvýšené tíze 30 G

Na dalším obrázku č. 10 je zobrazena další analýza, tentokrát při zvýšené tíze 100 G. Při této analýze bylo uvažováno působení tlaku ve směru x a působení zatížení proti směru x, červeně označené trojúhelníky jsou označené plochy působení zatížení způsobené sloupky a zbytkem kapsle. Zde je možné vidět, že maximální deformace ve směru působení síly je 0,14 mm.



Obrázek 10: Analýza příruby při zvýšené tíze 100 G

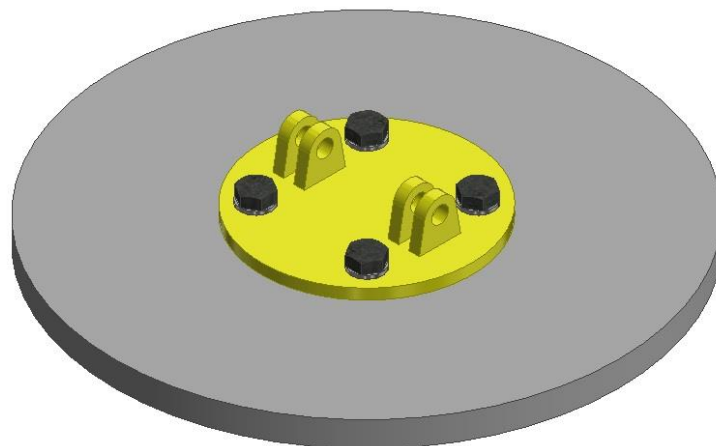
Důležitá vlastnost těchto přírub je možnost uchycení ke zkoušecím aparátům. Jeden ze způsobů je použití kamenů ISO-K 160, která je zobrazena na obrázku č. 11. Pro uvažované použití této kapsle by měli stačit 4 kameny, rozmístěné po 90 stupních na vnějším okraji příruby, ale v případě potřeby při vyšších hodnotách zatížení je možné použít více kamenů.

Pro zjištění, jestli tento způsob uchycení a pevnost upravené příruby vyhovuje, byly vytvořeny analýzy pomocí programu Ansys.

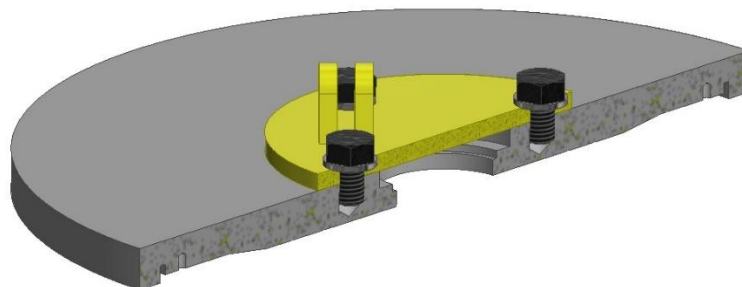


Obrázek 11: Kamen ISO 160-K

Další možnost je použití závitů, které jsou primárně určeny k připojení příruby s menším rozměrem. Zde lze použít klasické spojení pomocí šroubu a podložky, jak je znázorněno na obrázku č. 12. Také je ale možné použít stejné spojky, které jsou určeny pro připojení menší příruby.



Obrázek 12: Možné připojení ke zkoušecímu zařízení

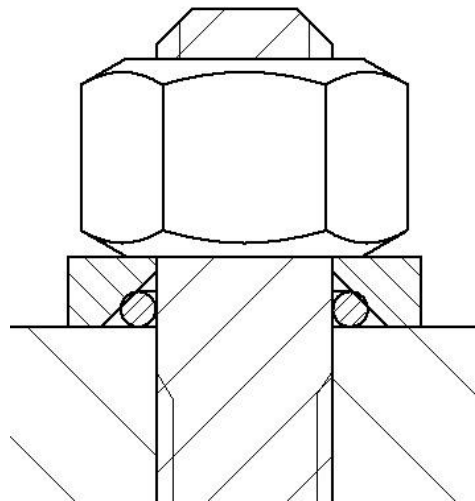


Obrázek 13: Řez připojení ke zkoušecímu zařízení

3.6. Závité tyče

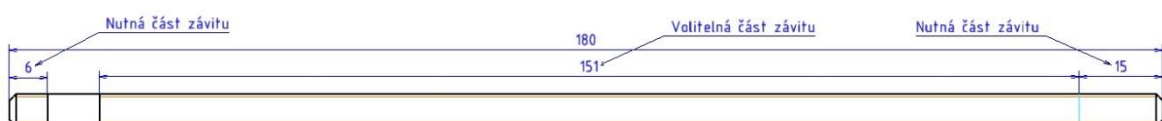
Hlavní spojení mezi dvěma spojenými přírubami je pomocí 4 závitových tyčí. Tyto tyče jsou z duralu a mají rozměry M5 a délku 180 mm. K jedné přírubě jsou spojeny pomocí vnitřního závitu. K druhé jsou připojeny pomocí matice, podložky a o kroužku. O kroužek je zde použit kvůli tomu, že rozteč umístění tyčí je menší než průměr pláště a je tedy zapotřebí pro hermetizaci a možné vytvoření vakua uvnitř kapsle. Kvůli závitu na tyči by ale samotný o kroužek nestačil, proto je zapotřebí, aby část závitových tyčí v oblasti o kroužků neměla závit.

Také je potřeba použít podložku, která má na vnitřním průměru zkosenou hranu, pro vytvoření plochy, která přitlačí použitý o kroužek a tím zajistí jeho správnou funkci. Poté už není s hermetizací žádný problém. Toto spojení je viditelné na obrázku č. 14.



Obrázek 14: Detail závitu na konci závitové tyče

Jak bylo zmíněno výše, je potřeba, aby část závitové tyče neměla závit. Na obrázku č. 15 je ukázka celé závitové tyče, která byla použita při konstrukci modelu. Základní koncept kapsle ale požaduje pouze krátké závity na koncích tyče. Na obrázku č. 15 jsou vidět požadované délky závitů na koncích tyče a také volitelné prodloužení konce závitu. Tato volitelná část by mohla být použita k dodatečnému upevnění desek pro experimenty nebo dodatečných zařízení.

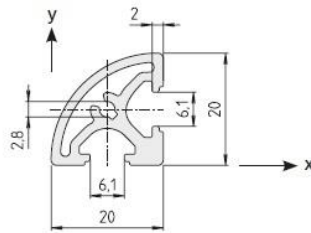


Obrázek 15: Znázornění délek závitů u tyče

3.7. Sloupky

Důležitá součást vnitřní struktury jsou sloupky. Pro nejmenší ztrátu volného prostoru a pevnostní vlastnosti byl vybrán hliníkový profil M - Blocan F - R 20 o délce 154 mm. Přesnější informace jsou k vidění na obrázku č. 16. Při zvolené délce je hmotnost jednoho sloupku 62 g. Pro nejlepší rozložení působících sil jsou použity 4 sloupky, jak je zobrazené na obrázku č. 17. S tímto provedením je k dispozici pro experimenty volný prostor o velikosti 5,5 l.

F-R 20

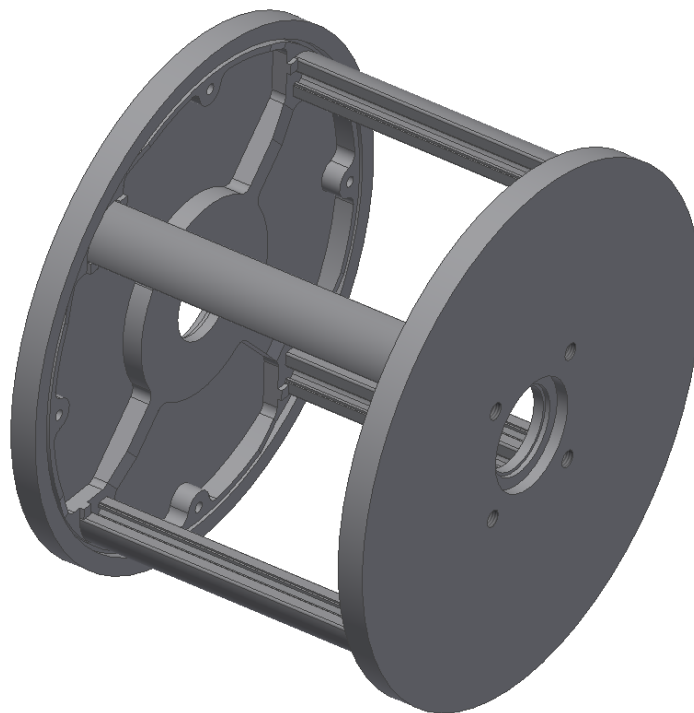


Area	154.50	mm ²
I_x	0.54	cm ⁴
W_x	0.63	cm ³
W_y	0.48	cm ³
Weight	416	g/m

Code No. Profile F-R 20			Anodised
E02000BBA	Cut to size	max. 3000 mm	Clear
E02000BBC	Bar	3000 mm	Clear

Connection	To slot geom.	Flange bracket kit	lot sizes	Code No.
 long. + transverse	20	F-R 20	10, 20, 30... pcs	E02007AAE
	30	Adapter	-	E07009AAE
	40	Adapter	-	E07012AAE

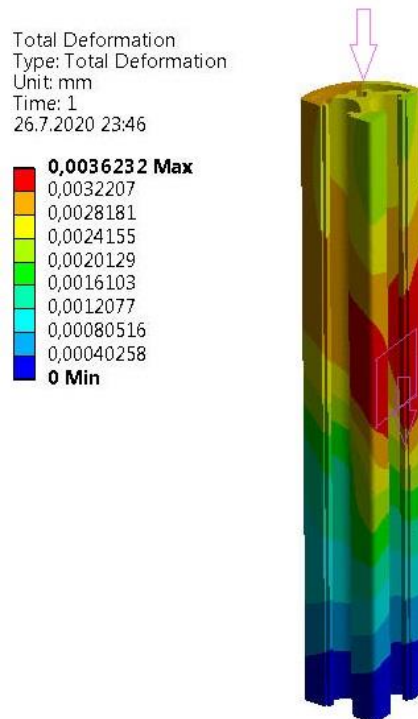
Obrázek 16: Parametry zvoleného sloupku



Obrázek 17: Spojení sloupků s přírubami

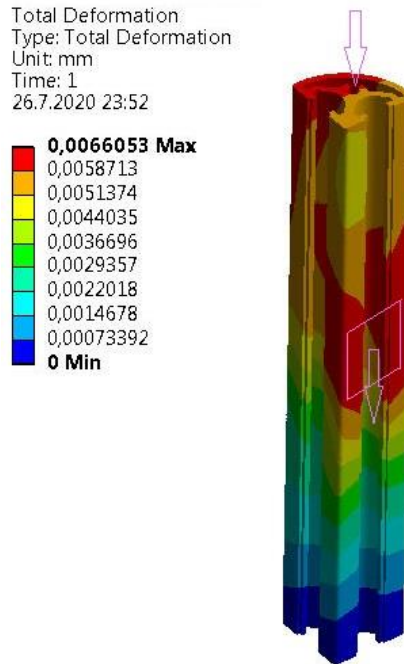
Pro správné uchycení a centrování je potřeba dodatečně upravit konce sloupků pro použití kolíků. Je potřeba rozšířit díry v ose sloupků na průměr 3 mm o hloubce 6 mm.

Na obrázku č. 18 je zobrazena analýza působení sil na sloupky při zvýšené tíze 30 G a hmotnosti experimentu 1 kg. Je zde zvýrazněné působení příruby na konci sloupku a oblast, na kterou působí experiment. Je zde vidět, že maximální deformace sloupků při tomto zatížení je 0,00325 mm. Tyto vybrané sloupky jsou tedy více než dostatečné pro plánovaná použití.



Obrázek 18: Analýza sloupku při zvýšené tíze 30 G

Na následujícím obrázku je zobrazeno působení zvýšené tíhy 100 G na sloupek a její maximální způsobená deformace 0,0066 mm. Zvýrazněné oblasti jsou stejné jako na předchozím obrázku.

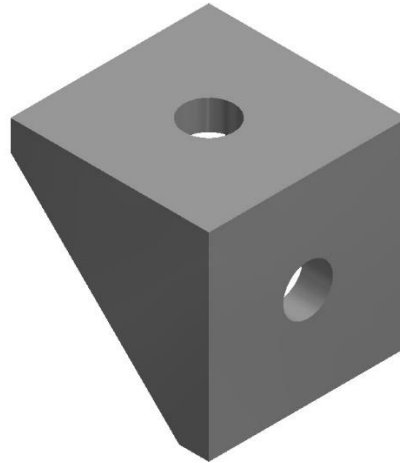


Obrázek 19: Analýza sloupku při zvýšené tíze 100 G

3.8. Uložení experimentu

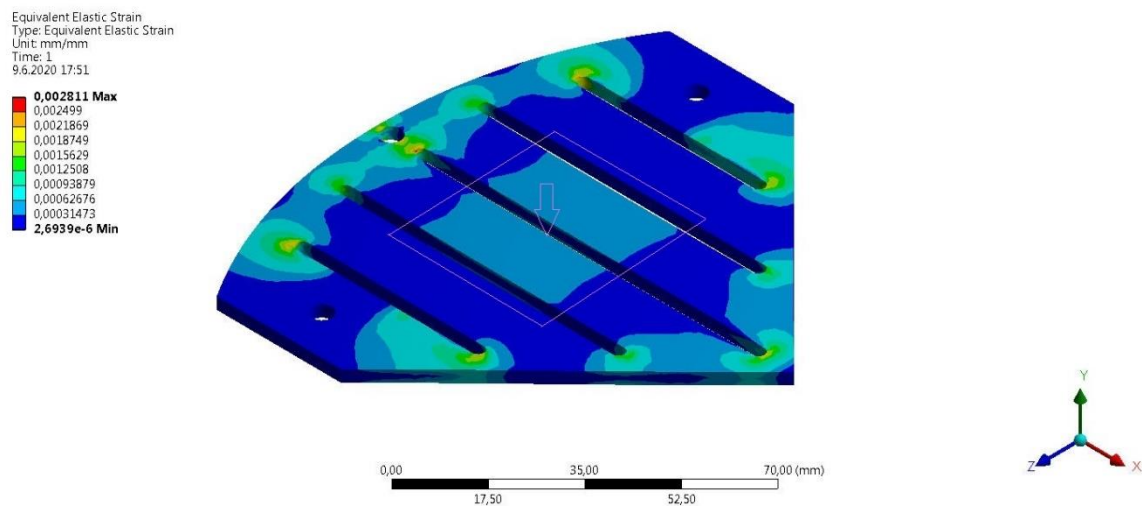
Pro uložení experimentů v této kapsli je použito několik druhů desek. Materiál vybraný, který je společný, pro tyto desky byl dural. Další společná vlastnost těchto desek je jejich tloušťka, která je 3 mm, což je více než dostačující pro plánované použití. Pro zvýšenou univerzalitu jsou některé typy desek navrženy tak, aby bylo možné spojením několika desek vytvořit požadovanou oblast pro experimenty a zároveň nezbytně nezvyšovat celkovou hmotnost kapsle nebo zaplnit vnitřní obsah kapsle. Pro připojení experimentu a dalšího vybavení lze použít šrouby M3.

Pro připojení desek pro experimenty byly zvoleny podpěry tvaru L, které jsou vidět na obrázku č. 20. Ke spojení desek s těmito podpěrami je použité klasické spojení pomocí šroubu velikosti M5 a pro spojení těchto podpor ke sloupkům jsou použity SLOT kameny.



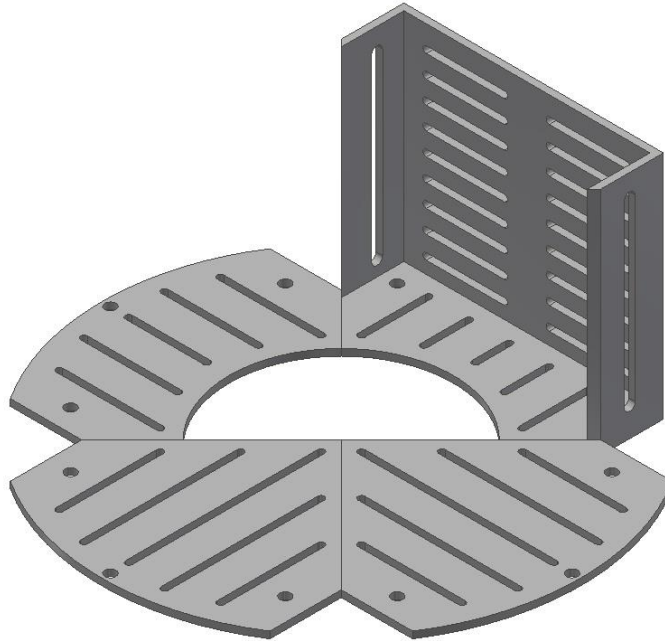
Obrázek 20: Podpěra pro desky

Na obrázku č. 21 je zobrazena analýza v programu Ansys jednoho typu desek. Pro tuto analýzu bylo uvažované tíhové zrychlení 30 G. Jako zatížení byl použita síla působící na oblast o rozměrech 50 x 50 mm, která je vyznačená na obrázku, a byla vyvolaná 1 kg při normálním tíhovém zrychlení. Jak je na tomto obrázku vidět, maximální hodnoty působeného napětí jsou o několik řádů menší, než je limit použitého materiálu.



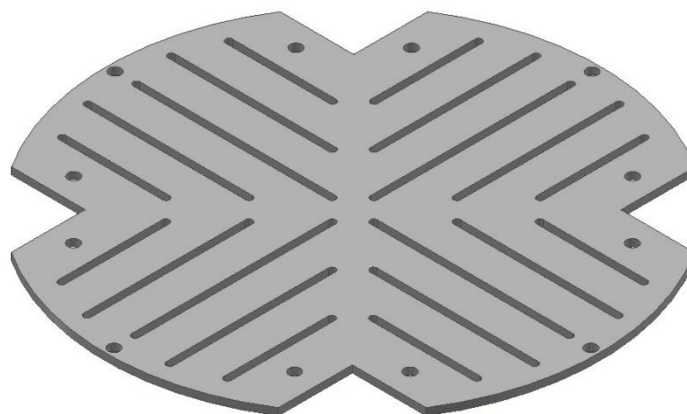
Obrázek 21: Analýza desky pro zvýšenou tíhu 30 G

Jak bylo zmíněno dříve, pro uložení v této kapsli lze použít několik typů desek, celkem byly navrženy 4 typy. Tři z těchto typů lze použít v kapsli pro horizontální uložení a jeden typ lze použít pro vertikální uložení. Na obrázku č. 22 je zobrazena možná konfigurace při použití všech typů desek.



Obrázek 22: Sestava desek pro uložení experimentů

Pro uložení experimentu samozřejmě nemusí být použita soustava více desek, ale lze použít jednu desku rozměrově ekvivalentní soustavě malých desek. Příklad této desky je ukázán na obrázku č. 23. Navíc soustava malých desek ekvivalentní jedné desce má horší vlastnosti, takže pokud má tato soustava uspokojivé výsledky při zatížení, není potřeba řešit působení stejného zatížení pro uložení pomocí jedné velké desky.



Obrázek 23: Velká deska pro uložení experimentu

3.9. Hermetizace

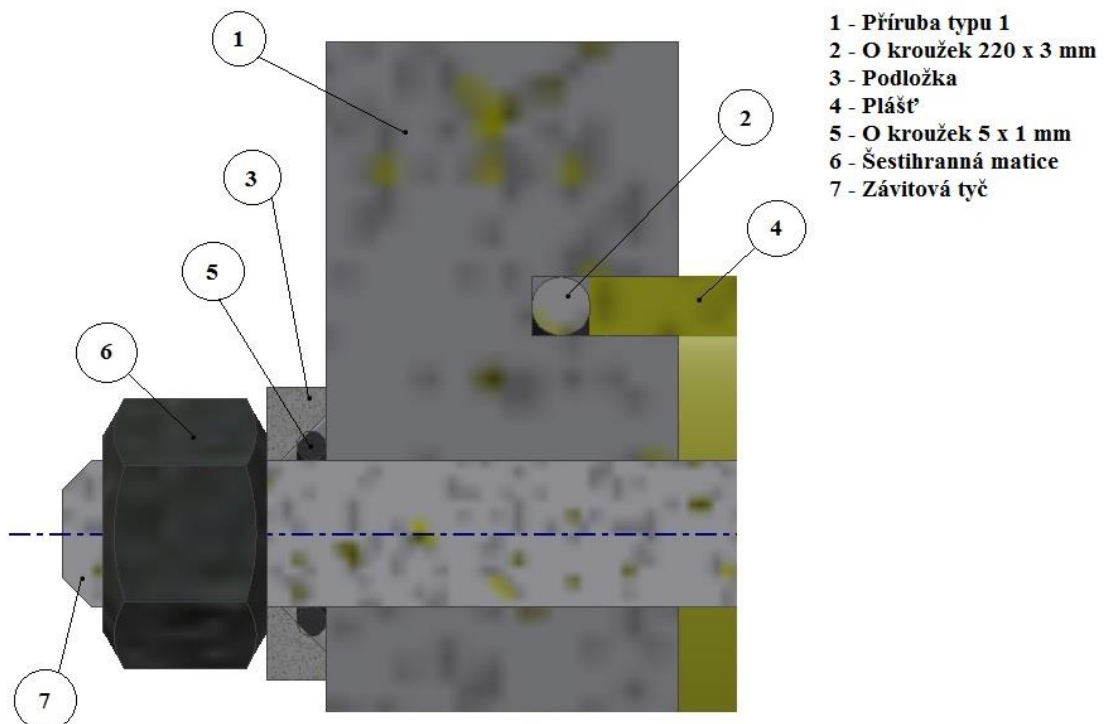
Pro možnost simulace vakua v prostoru pro experimenty je nutné, aby kapsle mohla být hermeticky uzavíratelná. V tomto případě je toto dosaženo pomocí o kroužků. O kroužek je prstencové těsnění s kruhovým, čtvercovým profilem nebo s profilem X-ového tvaru umístěné v drážce s těsnící protiplochou. Je možné je použít pro statické i dynamické

těsnění, v případě použití v této práci jde pouze o statické těsnění. Jako materiál jsou použity různé druhy syntetických kaučuků, na materiálu závisí výsledné vlastnosti o kroužku, jako například tvrdost nebo provozní teplota. Na obrázku č. 24 je ukázka funkce o kroužku. O kroužek je nejdříve stlačen v drážce pomocí protiplochy a poté je působením tlaku posunut směrem ke straně s nižším tlakem, kde poté utěsní díru.



Obrázek 24: Funkce o kroužku [10]

V této práci je použito několik typů o kroužků. Jsou použity 2 silikonové o kroužky o rozměrech 220 x 2 mm a 4 o kroužky o rozměrech 5 x 1 mm. Také je použitý o kroužek kombinovaný s centrovacím kroužkem KF-40. Ten je použit pro snadné připojení normalizovaných přírub a k vakuování. Na obrázku č. 25 je znázorněné použití o kroužku 5 x 1 mm, označeném číslem 5, ve spojení se závitovou tyčí, označenou číslem 7, šestihrannou maticí, označenou číslem 6, a podložkou, označenou číslem 3. Také je zde příruba označená číslem 1, o kroužek 220 x 3 mm označený číslem 2 a také plášť označený číslem 4.



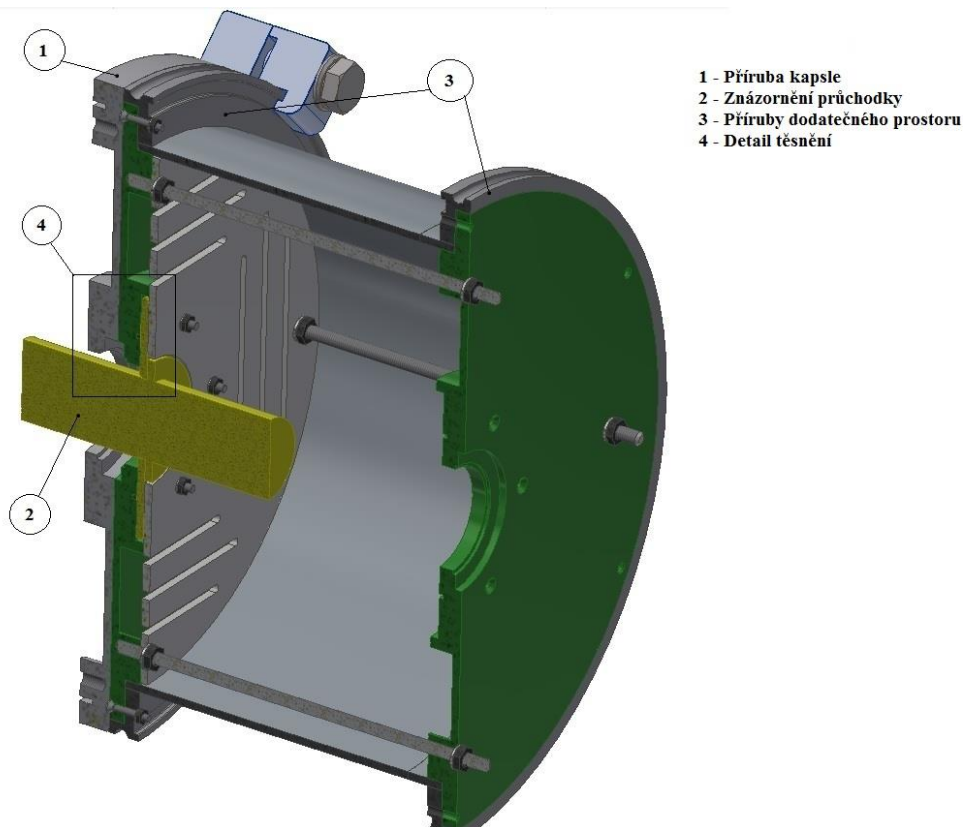
Obrázek 25: Detail těsnění závitové tyče

O kroužky jsou také potřeba při použití dodatečného prostoru. Zde je použit o kroužek typu 60 x 1,5 mm a také znovu centrovací o kroužek KF-40.

3.10. Dodatečný prostor

Je také možné, že pro některé typy experimentů nebude objem vnitřního prostoru kapsle dostatečně velký, například by se mohlo stát, že po umístění experimentu do kapsle by nezbyl dostatek prostoru pro umístění zdroje nebo přístroje pro sběr dat. Pro tyto případy je možné použít dodatečný prostor, který je zobrazen na obrázku č. 26.

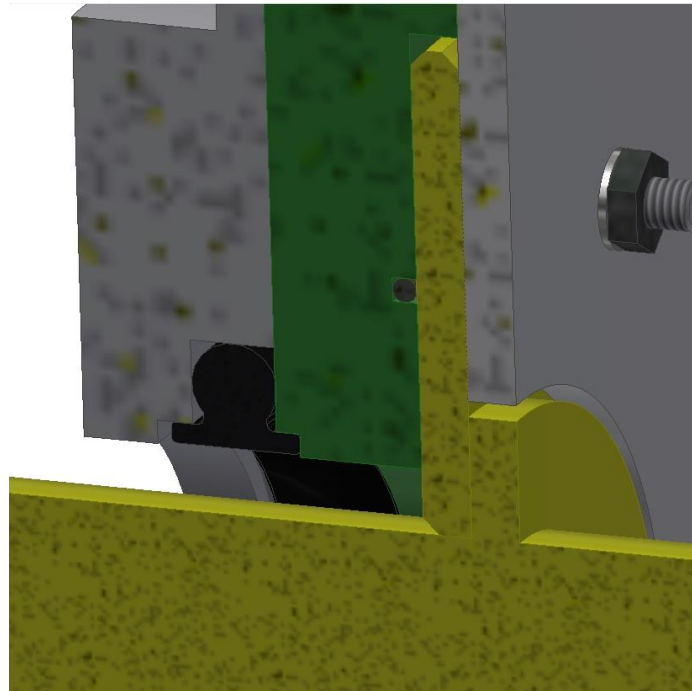
Na tomto obrázku je označena číslem 1 příruba kapsle, pro znázornění spojení kapsle s dodatečným prostorem. Součást označená číslem 2 je modelové znázornění průchodky, zde lze použít průchodku nebo jinou součást podle potřeby. Pokud ale není potřeba dodržet hermetické uzavření kapsle, nemusí zde průchodka vůbec být. Číslem 3 jsou označené koncové příruby dodatečného prostoru.



Obrázek 26: Model dodatečného prostoru

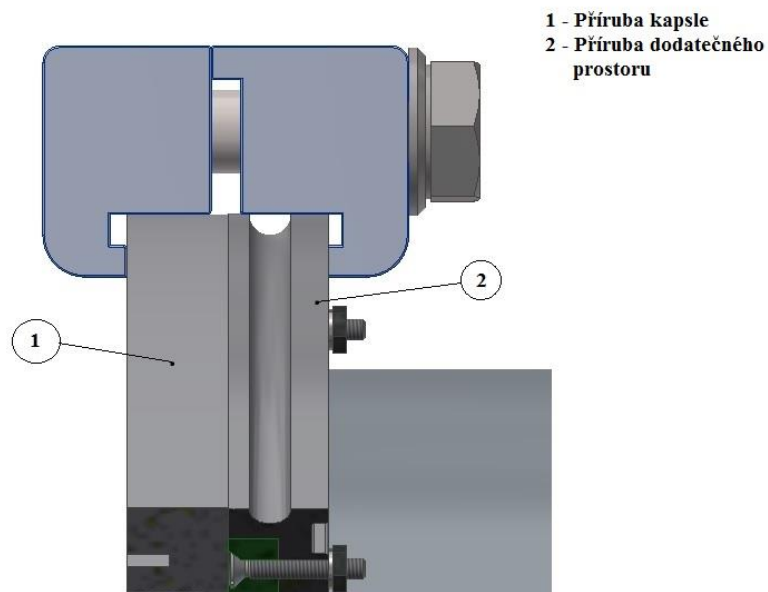
V tomto prostoru je možné uložit požadované součásti stejným způsobem jako v kapsli a je možné použít více desek podle potřeby. Zároveň ale není tento prostor hermeticky uzavřený, takže zde není možnost vytvoření vakua, což ale není problém, vzhledem k tomu, že samotné experimenty by probíhali pouze v kapsli, kde je možnost vakua zaručena. Aby bylo možné použít tento dodatečný prostor pro experimenty, při kterých je v kapsli udržované vakuum, tak je potřeba zajistit dostatečné těsnění spojení

mezi kapslí a dodatečném prostoru. Použití průchodek je součástí tohoto oddělení prostoru. V dalších místech spojení, ve kterých je potřeba zajistit těsnění, jsou použity o kroužky. Detail tohoto těsnění, který je označen na obrázku č. 27 pod číslem 4, je možné vidět na obrázku č. 26.



Obrázek 27: Detail hermetického spojení dodatečného prostoru a kapsle

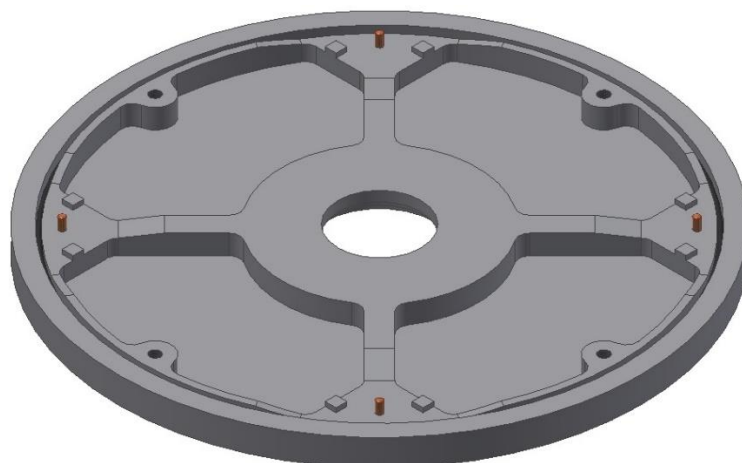
Také je samozřejmě zapotřebí spojit kapsli s tímto dodatečným prostorem. K tomu jsou použity stejné kameny ISO-K 160 už použité jako možnost připojení ke zkoušecím přístrojům. Konstrukce kapsle a dodatečného prostoru navíc už zahrnují potřebné úpravy pro zajištění hermeticky uzavřený prostor kapsle pro experimenty, takže není potřeba dodatečných úprav pro těsnění. Na obrázku č. 28 je zobrazeno spojení kapsle s dodatečným prostorem. Označená příruba číslo 1 je součástí kapsle, číslo 2 je část dodatečného prostoru.



Obrázek 28: Ukázka spojení kapsle a dodatečného prostoru

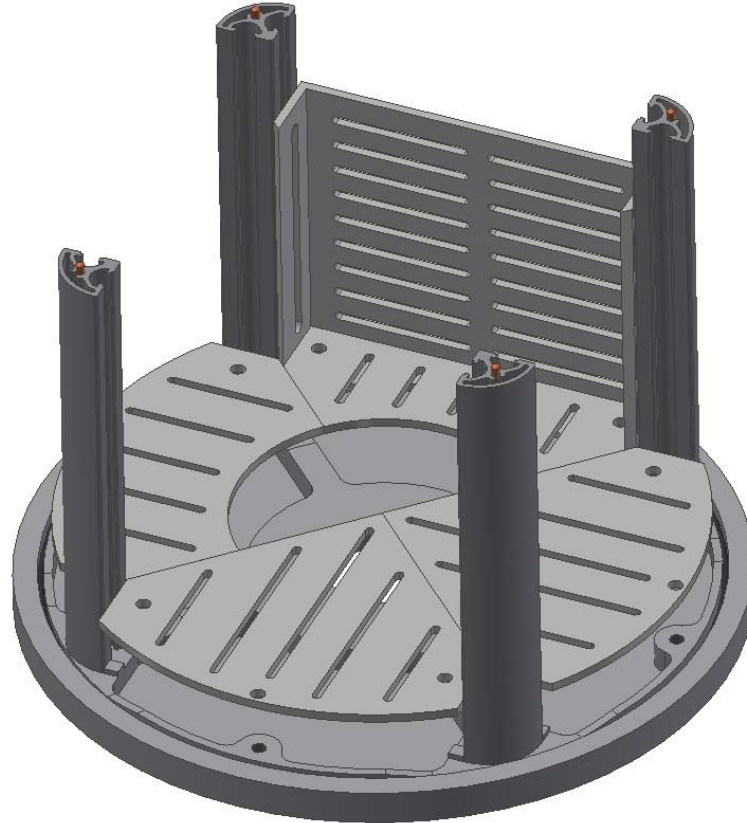
3.11. Postup montáže

Univerzalita použití kapsle by byla zbytečná, pokud by její sestavení bylo příliš složité a trvalo by delší čas. Proto byla jednoduchost montáže kapsle brána v potaz při jejím návrhu. To je jedním z důvodů, proč jsou použity dva typy přírub. Příruba typu dvě, která je spojena se závitovými tyčemi neprůchozím závitem, slouží jako spodní část kapsle a díky tomu je možné položit a sestavit kapsli v podstatě na jakémkoliv rovném povrchu. Na obrázku č. 29 je znázorněn první krok pro sestavení a to je vložení o kroužku typu 220 x 3 mm spolu se čtyřmi kolíky pro spojení příruby se sloupky.



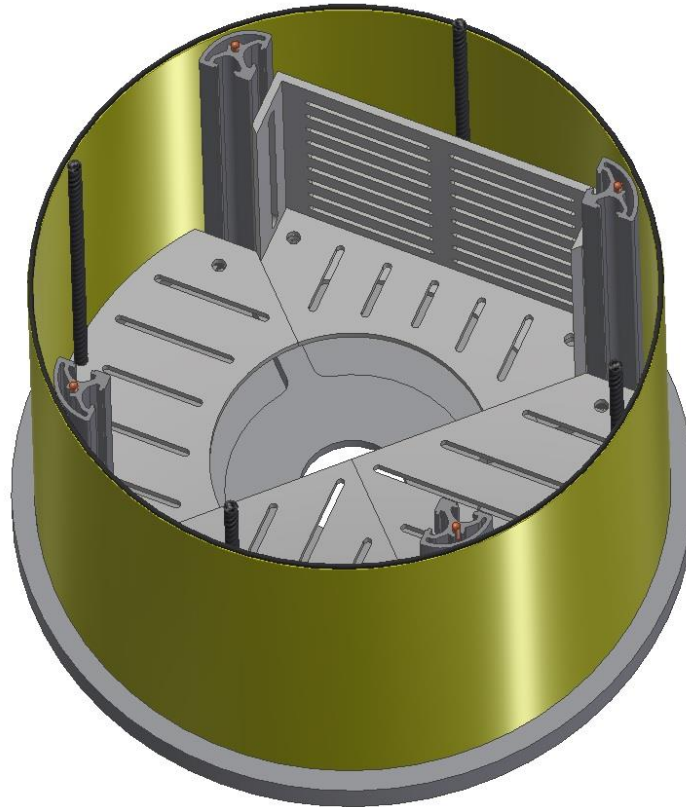
Obrázek 29: Postup montáže 1

Poté se vloží sloupky do této příruby. K těmto sloupkům se poté připojí desky pro uložení experimentu, případně jiný libovolný způsob pro uložení experimentu. Je také možné nejdříve připravit spojení sloupků s experimentem a až poté toto spojení celé vložit do příruby. Možný výsledek tohoto spojení je vidět na obrázku č. 30.



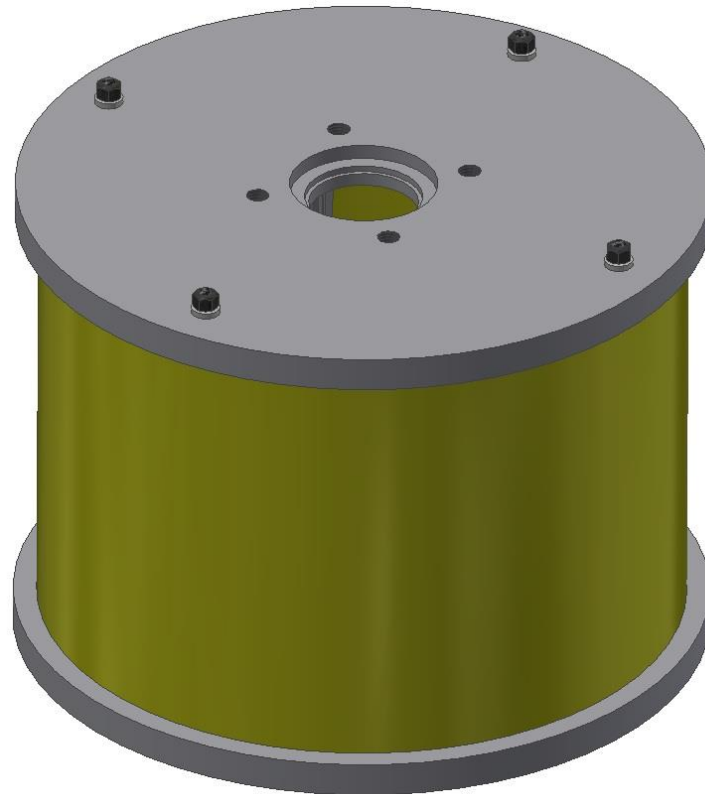
Obrázek 30: Postup montáže 2

Ke spojení přírub a tedy celé kapsle slouží čtyři závitové tyče. Ty je možné zašroubovat do příruby typu dva před vložením desek pro experimenty nebo až po jejich vložením. Po připravení experimentu a vložením závitových tyčí se vloží plášť, který slouží k oddělení prostoru pro experimenty od okolí. Také je možné žádný plášť nepoužít, pokud to dovoluje daný experiment. Tento krok je zobrazen na obrázku č. 31. Před vložením příruby je také potřeba vložit druhý o kroužek typu 220 x 3 mm.



Obrázek 31: Vložení pláště

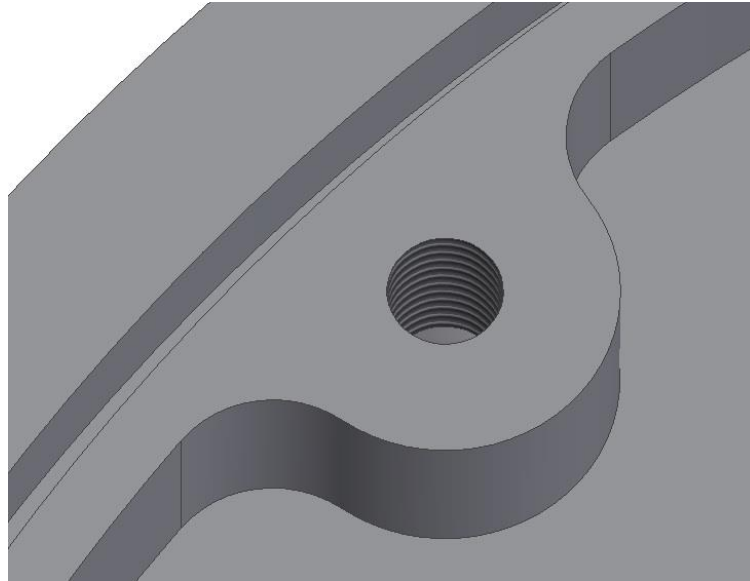
Po vložení pláště a druhého o kroužku je potřeba jen připojit druhou přírubu. Ta je spojena pomocí kolíků se sloupky stejným způsobem jako první příruba. Rozdíl spojení je ve způsobu připojení závitových tyčí. Zde je potřeba použít malé o kroužky typu 5 x 1 mm pro experimenty, které požadují vytvoření vakua uvnitř kapsle. Tyto závitové tyče se spojí s přírubou pomocí klasického maticového spojení. Výsledná sestavená kapsle je vidět na obrázku č. 32.



Obrázek 32: Sestavená kapsle

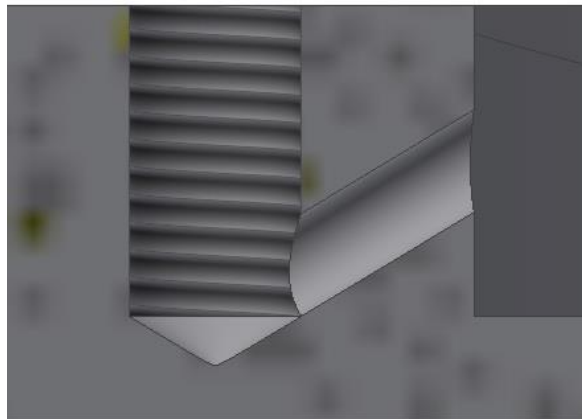
3.12. Virtuální únik

Kvalita vakua v prostoru pro experimenty nezávisí jenom na správném těsnění. Další věc, která může zhoršit kvalitu vakua, se nazývá virtuální únik. K tomu dochází, když je v prostoru pro vakuum místo, kde může zůstat plyn při odčerpání vzduchu. Odtud se plyny velmi pomalu šíří do prostoru pro experimenty. V případě této kapsle k tomuto úniku může docházet kvůli závitovým dířům pro závitové tyče, které jsou vidět na obrázku č. 33. Pro plánované použití této kapsle by tento virtuální únik ale neměl být problém.

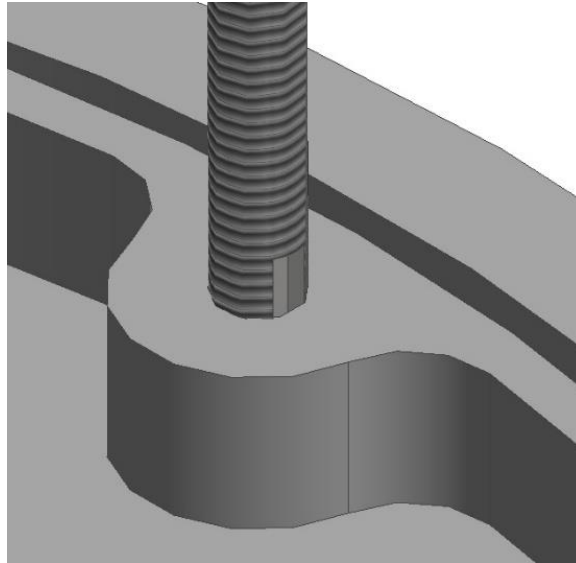


Obrázek 33: Díra pro uložení závitové tyče v přírubě

Kdyby ale bylo potřeba tento únik eliminovat, existuje několik řešení. Nejjednodušší řešení je zvýšení času odčerpávání. Další způsob je zajištění, aby po spojení závitové tyče s přírubou nevznikl oddělený prostor. To je možné třeba vytvořením průchodu v přírubě k oblasti, kde by byl zachycen plyn. Tento způsob je znázorněn na obrázku č. 34. Jiný způsob je vyvrtání díry do konce závitové tyče, který je spojený k přírubě. Tím se vytvoří průchod a nebude docházet k virtuálnímu úniku.



Obrázek 34: Průchod pro řešení virtuálního úniku



Obrázek 35: Jiný způsob možného řešení virtuálního úniku

3.13. Vyvažování pomocí baterie

Pro správný průběh experimentu je zapotřebí, aby těžiště kapsle bylo umístěno v ose. Baterie, které jsou použité jako zdroj energie, je také možné použít pro vyvažování. Pro určení působení baterií byl použit vzorec pro výpočet momentu:

$$M_{Max} = m \cdot g \cdot l$$

Kde:

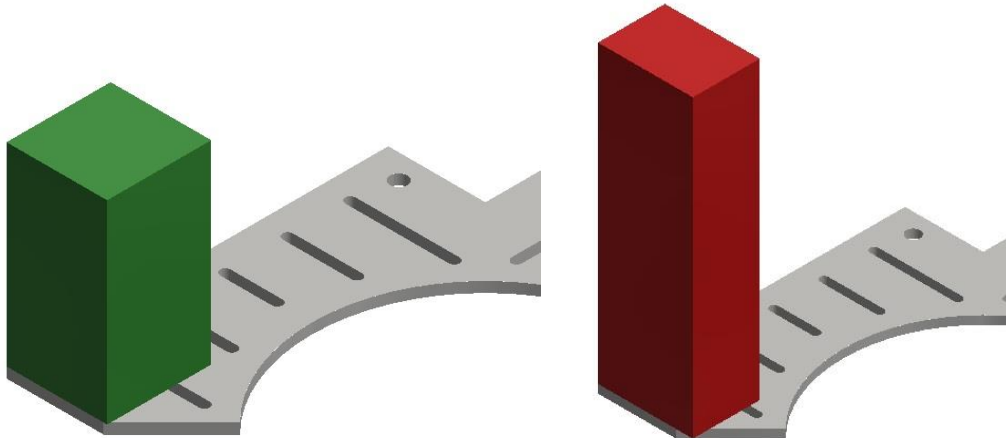
M_{Max} - Moment vyvolaný baterií [Nm]

m - Hmotnost baterie [kg]

g - Tíhová síla [m/s^2]

l - Maximální vzdálenost od osy [m]

Maximální vzdálenost těžiště zdroje energie od osy kapsle je 0,074 m. Pro tuto kapsli byly zvoleny dvě možnosti zdroje energie, jedna větší baterie nebo 2 menší baterie použité společně. Tyto možnosti se pro tento případ od sebe liší hmotností. Větší baterie má hmotnost 0,184 kg a po dosazení do vzorce je získán maximální moment 0,1336 Nm. Verze s dvěma bateriemi má hmotnost 0,0984 kg a získaný maximální moment je tedy 0,0714 Nm. Na následujících obrázcích jsou zjednodušeně znázorněny umístěné baterie.



Obrázek 36: Ukázka možného uložení zdroje energie

Také byla zvážena možnost vytvoření speciální verze desky pro uchycení zdroje energie, která by měla část s umožněnou rotací pro přesnější a snadnější úpravy polohy zdroje energie, ale vzhledem k rozměrům kapsle a k hmotnostním požadavkům je klasické uchycení zdroje dostačující.

3.14. Vnitřní vybavení

Součástí kapsle je také napájení a možný kamerový záznam. Pro zdroj energie byla vybrána baterie Gens Ace LiPo 11.1 V 1300 mAh 3S1P s vybíjecím proudem 25C. Rozměry této baterie jsou délka 72 mm, šířka 35 mm a výška 24 mm. Hmotnost je 184 g. Tato baterie je zobrazena na obrázku č. 37.



Obrázek 37: Baterie Gens Ace LiPo 11.1 V 1300 mAh 3S1P

Navíc byla pro zdroj energie zvolena možnost použití dvou menších baterií. Pro tento účel byla vybrána baterie typu LiPol Gens Ace 800mAh 7.4V 2S1P s vyšším vybíjecím proudem 40C. Tato baterie má následující rozměry, délka je 56 mm, šířka je 29 mm a výška je 15 mm. Hmotnost je 49,2g. Dva různé typy pro zdroj energie byly zvoleny z části kvůli rozměrům a z části pro jejich různou hmotnost, protože je možné tyto baterie používat pro vyvažování. Na obrázku č. 38 je tato menší baterie.



Obrázek 38: Baterie LiPol Gens Ace 800mAh 7.4V 2S1P

Pro video záznam byla vybrána kamera Eken w9. S touto kamerou je možné nahrávat videa s rozlišením videa 1080p (1920 * 1080) při 30 snímcích za sekundu a 720p (1280 * 720) při 60 snímcích za sekundu s dobou nahrávání a do 70 minut. Hmotnost této kamery je 61 g.



Obrázek 39: Kamera Eken w9

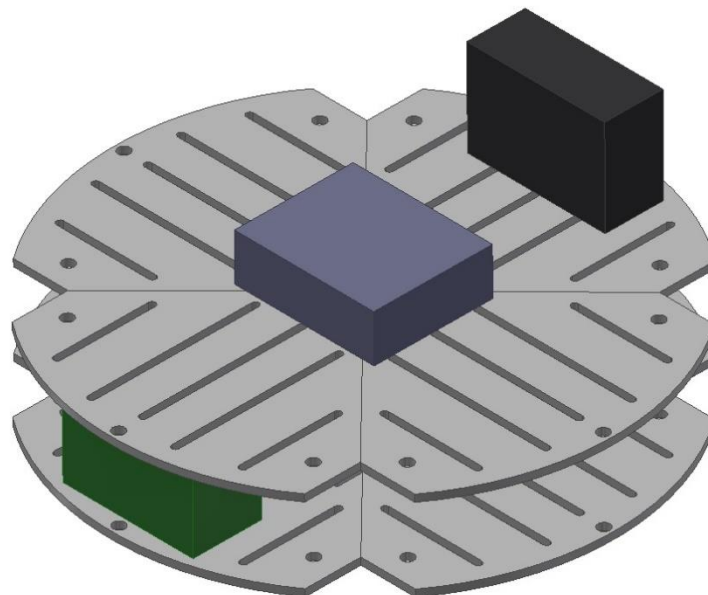
Pro sběr dat byl vybrán USB-6008 8 AI (12-Bit, 10 kS/s), 2 AO (150 Hz), 12 DIO USB multifunkční I/O zařízení. Tato jednotka má analogová a digitální I/O. Rozměry této jednotky jsou 63,5 mm x 85,1 mm x 23,2 mm. Hmotnost je 84 gramů.



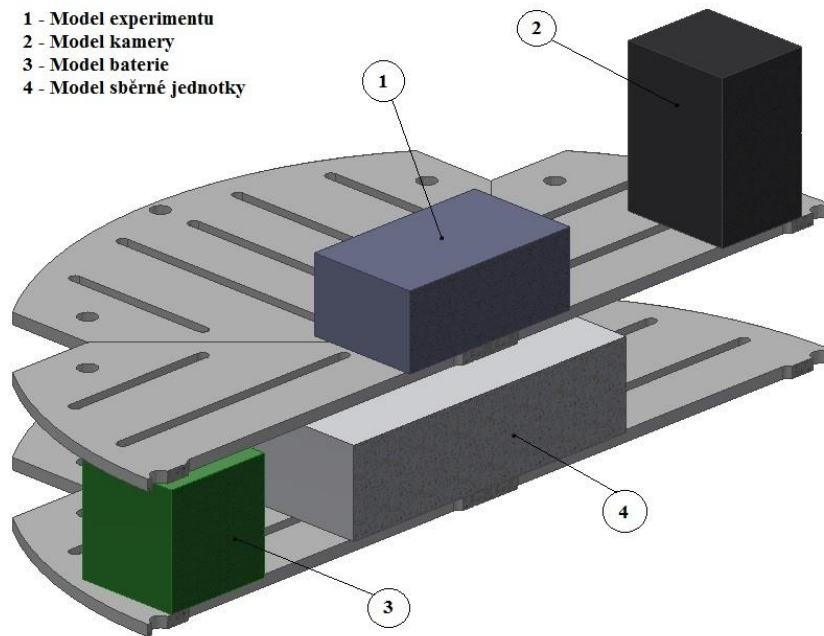
Obrázek 40: Sběrná jednotka USB-6008

3.15. Zobrazení kapsle

Na obrázku č. 41 je znázorněné uložení experimentu a sledovacích zařízení. Na řezu, který je vidět na obrázku č. 42, je toto uložení popsáno. Číslo 1 odkazuje na model experimentu, číslo 2 je model kamery, číslo 3 je model baterie a číslo 4 je znázornění sběrné jednotky.

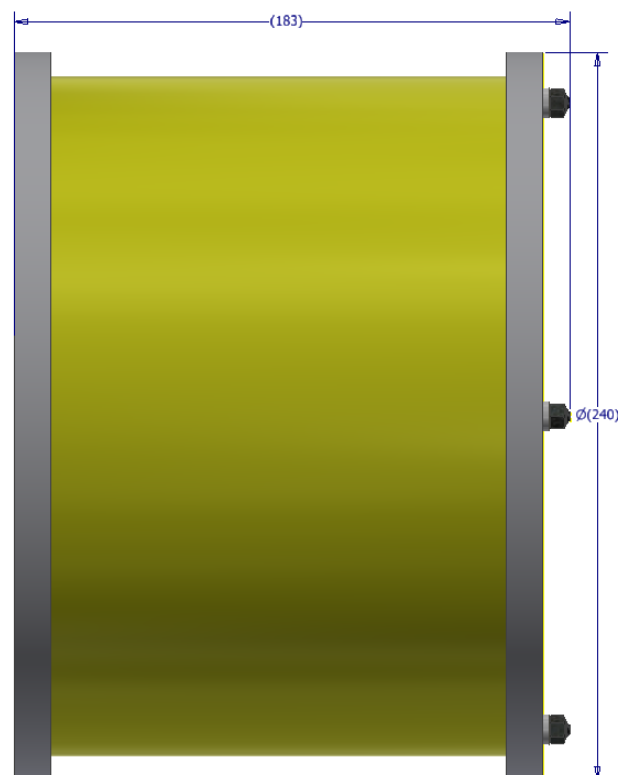


Obrázek 41: Uložení experimentu

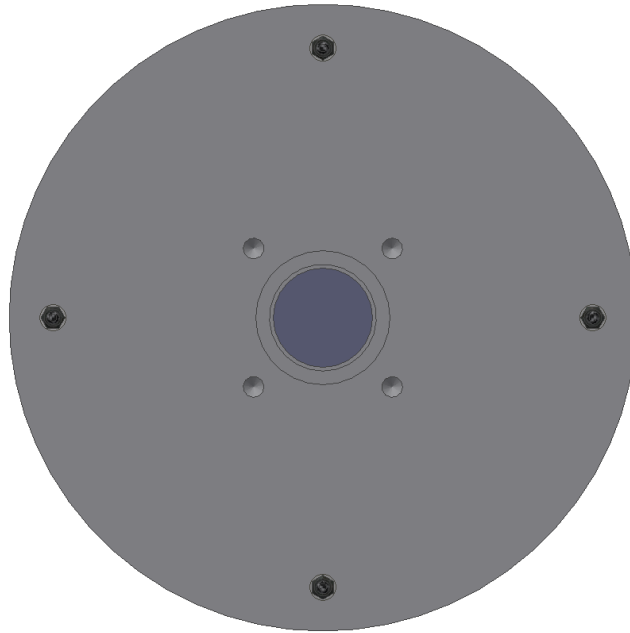


Obrázek 42: Řez uložení experimentu

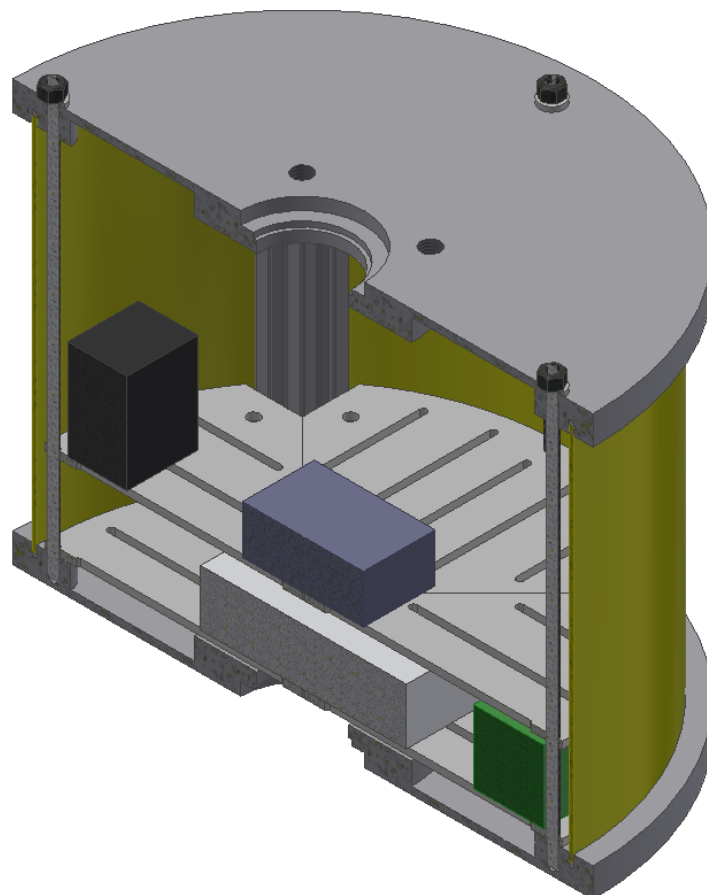
Dále následují obrázky kapsle kompletně s uloženým experimentem. Na obrázku č. 43 jsou vidět krajní rozměry kapsle. Další obrázky jsou různé pohledy kapsle. Pro obrázek č. 46 byla vypnuta viditelnost pláště, pro ukázkou vnitřního prostoru kapsle.



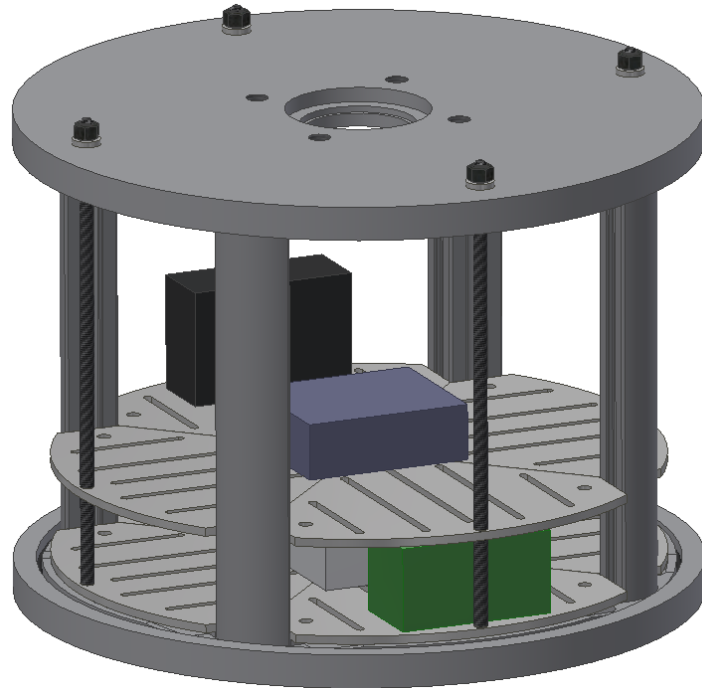
Obrázek 43: Boční pohled kapsle



Obrázek 44: Přední pohled kapsle



Obrázek 45: Řez kapsle s experimentem



Obrázek 46: Kapsle bez pláště

4. Závěr

Při této práci mělo dojít k vytvoření kapsle pro univerzální použití pro více způsobů provedení experimentu. V této práci byli nejdříve představeny různé typy zařízení a způsobů pro provádění experimentů se změněnou tíhou. Poté byl pomocí výpočtu určen základní rozměr, podle kterého byla kapsle navržena.

Při návrhu kapsle byl brán potaz hlavně na výsledek výpočtu, požadovaný prostor pro experimenty, hmotnost kapsle a relativní jednoduchost konstrukce při zachování univerzálního použití. Z velké části byly použity upravené normalizované díly.

Navržený model byl poté použit pro analýzy při různých předpokládaných použití kapsle. Při vybraném materiálu a navržených dílech byly splněné limity bezpečnosti.

Součástí této práce také byl návrh možného dodatečného prostoru pro umístění zdroje energie a jednotek pro sběr dat. Tento návrh není konečné řešení, pouze základní model pro ukázkou možného způsobu návrhu dodatečného prostoru.

Je také možná úprava navržené kapsle pro lepší průběh experimentu. Nejjednodušší úprava je návrh desek přesněji vyhovující danému experimentu. Je také možné například vyměnit materiál pláště za průhledný materiál, což by umožnilo vnější pozorování průběhu experimentu.

5. Seznam obrázků

Obrázek 1: Centrifuga v ESA výzkumném centru	5
Obrázek 2: Rychle rotační klinostat	6
Obrázek 3: Trajektorie parabolického letu	7
Obrázek 4: Řez konceptu kapsle	8
Obrázek 5: Analýza pláště při zvýšené tíži 30 G	10
Obrázek 6: Analýza působení atmosférického tlaku	10
Obrázek 7: Detail pro umístění sloupků v přírubě	11
Obrázek 8: Díra v přírubě pro odčerpání vzduchu	12
Obrázek 9: Analýza příruby při zvýšené tíži 30 G	13
Obrázek 10: Analýza příruby při zvýšené tíži 100 G	13
Obrázek 11: Kamen ISO 160-K	14
Obrázek 12: Možné připojení ke zkoušecímu zařízení	14
Obrázek 13: Řez připojení ke zkoušecímu zařízení	14
Obrázek 14: Detail závitu na konci závitové tyče	15
Obrázek 15: Znázornění délek závitů u tyče	15
Obrázek 16: Parametry zvoleného sloupku	16
Obrázek 17: Spojení sloupků s přírubami	16
Obrázek 18: Analýza sloupku při zvýšené tíži 30 G	17
Obrázek 19: Analýza sloupku při zvýšené tíži 100 G	18
Obrázek 20: Podpěra pro desky	19
Obrázek 21: Analýza desky pro zvýšenou tíhu 30 G	19
Obrázek 22: Sestava desek pro uložení experimentů	20
Obrázek 23: Velká deska pro uložení experimentu	20
Obrázek 24: Funkce o kroužku [10]	21
Obrázek 25: Detail těsnění závitové tyče	21
Obrázek 26: Model dodatečného prostoru	22
Obrázek 27: Detail hermetického spojení dodatečného prostoru a kapsle	23
Obrázek 28: Ukázka spojení kapsle a dodatečného prostoru	24
Obrázek 29: Postup montáže 1	24
Obrázek 30: Postup montáže 2	25
Obrázek 31: Vložení pláště	26
Obrázek 32: Sestavená kapsle	27
Obrázek 33: Díra pro uložení závitové tyče v přírubě	28
Obrázek 34: Průchod pro řešení virtuálního úniku	28
Obrázek 35: Jiný způsob možného řešení virtuálního úniku	29
Obrázek 36: Ukázka možného uložení zdroje energie	30
Obrázek 37: Baterie Gens Ace LiPo 11.1 V 1300 mAh 3S1P	30
Obrázek 38: Baterie LiPol Gens Ace 800mAh 7.4V 2S1P	31
Obrázek 39: Kamera Eken w9	31
Obrázek 40: Sběrná jednotka USB-6008	32
Obrázek 41: Uložení experimentu	32
Obrázek 42: Řez uložení experimentu	33
Obrázek 43: Boční pohled kapsle	33
Obrázek 44: Přední pohled kapsle	34
Obrázek 45: Řez kapsle s experimentem	34
Obrázek 46: Kapsle bez pláště	35

ZDROJE

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN isbn80-214-1869-9.
- [2] Formulace Newtonova gravitačního zákona :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 18.03.2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/55-formulace-newtonova-gravitacniho-zakona>
- [3] HOWELL, Elizabeth. Weightlessness and Its Effect on Astronauts [online]. December 16, 2017 [cit. 2019-11-20]
- [4] UNOOSA [online] The Teacher's Guide to Plant Experiments in Microgravity. Copyright © [cit. 11.07.2020]. Dostupné z: https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2013/stspace/stspace63_0_html/st_space_63E.pdf
- [5] ZARM What is the catapult system? [online]. Dostupné z: <https://www.zarm.uni-bremen.de/en/drop-tower/general-information/what-is-the-catapult-system.html>
- [6] Zhang, Xiaoqian & Yuan, Longgen & Wu, Wendong & Tian, Lanqiao & Yao, Kangzhuang. (2005). Some key technics of drop tower experiment device of National Microgravity Laboratory (China) (NMLC). Science in China Series E Technological Sciences. 48. 305-316. 10.1360/102004-21.
- [7] Students will test unique mechanism at European Space Agency | Science | science.muni.cz. Magazín M: Zprávy z MUNI | em.muni.cz [online]. Dostupné z: <https://www.em.muni.cz/en/science/3098-students-will-test-unique-mechanism-at-european-space-agency>
- [8] The dynamics of parabolic flight: flight characteristics and passenger percepts. National Center for Biotechnology Information [online]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2598414/>
- [9] Informace o vakuu | ACTIVAIR. Vakuová technika, vývěvy, dmychadla, kompresory, vzduchové nože a filtry | ACTIVAIR [online]. Dostupné z: <https://www.activair.cz/cz/technicke-informace/informace-o-vakuu>
- [10] The Seal Man's O-Ring Handbook [online]. Copyright © [cit. 23.07.2020]. Dostupné z : https://dynamix-cdn.s3.amazonaws.com/epmcom/epmcom_483403490.pdf