



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav letadlové techniky**

**Návrh motorového lože UL letounu s motorem B25
Engine mount design of UL aircraft with B25 engine**

Diplomová práce

Marek Havlík

Studijní obor: Letadlová a kosmická technika

Vedoucí práce: Ing. Martin Helmich

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havlík** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **408893**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh motorového lože UL letounu s motorem B25

Název diplomové práce anglicky:

Engine mount design of UL aircraft with B25 engine

Pokyny pro vypracování:

Náplní práce je návrh konstrukce motorového lože pro zástavbu motoru B25 firmy MW Fly do konkrétního letounu kategorie UL.

Zásady pro vypracování:

- rešerše používaných motorových loží pro instalaci čtyřtákních motorů na UL letoun
- hmotnostní analýza pohonného agregátu a souvisejících komponentů
- stanovení zatížení motorového lože dle stavebního předpisu LAA ČR (UL-2), LTF-UL a ASTM 2245
- rozbor zatížení konstrukce a výběr kritických případů
- konstrukční návrh a 3D model motorového lože
- pevnostní kontrola konstrukce motorového lože
- hmotový rozbor a stanovení polohy těžiště motorového lože, systémový výkres
- návrh motorových krytů

Seznam doporučené literatury:

Literatura:

- Letecká amatérská asociace: Předpis UL 2 -část I. (Požadavky letové způsobilosti SLZ. Ultralehké letouny řízené aerodynamicky), ČR, 2002
- DFS Deutsche Flugsicherung: Bekanntmachung von Lufttüchtigkeitsforderungen für aerodynamisch gesteuerte Ultraleichtflugzeuge, LTF-UL, 2003
- ASTM 2245 – 15 Standard Specification for Design and Performance of a Light Sport Airplane
- B25 Aeropower Manual A INSTALLATION, revize 1.0, MW Fly, 2013
- B25 Aeropower Manual B OPERATIONS MANUAL, revize 1.3, MW Fly, 2015
- Mikula, J.: Konstrukce a projektování letadel II, skripta ČVUT, Praha, 2005

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Martin Helmich, ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce:



Ing. Martin Helmich
podpis vedoucí(ho) práce



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



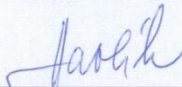
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30. 4. 2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 2.8.2019

Marek Havlík

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce panu Ing. Martinovi Helmichovi za odborné vedení a cenné připomínky, které mi pomohly při zpracování této práce.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
SEZNAM PŘÍLOH	10
SEZNAM POUŽITÝCH PROGRAMŮ.....	11
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	11
SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	12
ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE:	15
1. ÚVOD.....	16
2. ANALÝZA AGREGÁTU	17
2.1 ZÁKLADNÍ SPECIFIKACE MOTORU	17
2.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY MOTORU	18
2.3 HMOTNOSTNÍ CHARAKTERISTIKY MOTORU.....	18
2.4 ÚCHYTNÉ BODY MOTORU.....	19
2.5 VRTULE.....	21
3. REŠERŠE POUŽÍVANÝCH MOTOROVÝCH LOŽÍ	23
3.1 DĚLENÍ MOTOROVÝCH LOŽÍCH.....	23
3.2 PŘÍKLADY KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ.....	24
3.2.1 <i>Letoun Bushcaddy R80 – motor B25G-L-140 HP.....</i>	<i>24</i>
3.2.2 <i>Letoun ZLIN Savage Cub/Classic – motor B22G-L-135/122 HP.....</i>	<i>25</i>
3.2.3 <i>Letoun DYNAERO MCR100 – motor B25G-R-155 HP</i>	<i>26</i>
3.2.4 <i>Letoun Zenith STOL CH 701 – Rotax 912.....</i>	<i>27</i>
3.2.5 <i>Letoun Zenith STOL CH 750 – Jabiru 3300</i>	<i>27</i>
4. STUDIUM STAVEBNÍCH PŘEDPISŮ	28
4.1 UL 2.....	28
4.2 LTF-UL.....	30
4.3 F2245.....	31
5. ROZBOR ZATÍŽENÍ.....	32
5.1 LETOVÁ OBÁLKA PROVOZNÍCH NÁSOBKŮ	32
5.2 NÁVRHOVÉ ZATÍŽENÍ.....	32
5.2.1 <i>Návrhové zatížení č. 1 (§ 361, bod 1.).....</i>	<i>32</i>

5.2.2	Návrhové zatížení č. 2 (§ 361, bod 2.).....	33
5.2.3	Boční zatížení (§ 363 a 5.2.10).....	34
5.3	ZATÍŽENÍ SETRVAČNÝMI SÍLAMI (§ 597).....	34
5.3.1	Letové případy.....	34
5.3.2	Pozemní.....	35
5.4	ROZLOŽENÍ ZATÍŽENÍ DO SOUŘADNÉHO SYSTÉMU LETOUNU.....	35
5.5	VÝSLEDNÉ POČETNÍ ZATÍŽENÍ.....	36
6.	KONSTRUKČNÍ NÁVRH MOTOROVÉHO LOŽE.....	37
6.1	PODKLADY OD VÝROBCE LETOUNU.....	37
6.2	VLASTNÍ NÁVRH.....	37
6.2.1	Detail spojení prut-závěs.....	38
6.2.2	Dimenzionální návrh částí lože.....	40
6.2.3	Volba materiálu lože.....	40
6.2.4	Uchycení lože k motorové přepážce.....	40
6.2.5	Uchycení lože k motoru.....	42
7.	MKP ANALÝZA.....	43
7.1	URČENÍ PŮSOBIŠŤ NAMÁHÁNÍ.....	43
7.1.1	Působíště setrvačných sil.....	43
7.1.2	Působíště sil a momentů od vrtule.....	44
7.2	1D ANALÝZA.....	44
7.2.1	Stanovení výpočtového modelu.....	44
7.2.2	Výsledná napětí při provozním zatížení.....	46
7.2.3	Výsledná napětí při početním zatížení.....	47
7.3	3D ANALÝZA.....	48
7.3.1	Stanovení výpočtového modelu.....	48
7.3.2	Výsledná provozní napětí.....	50
7.3.3	Výsledná početní napětí.....	51
7.4	VÝBĚR ZATÍŽENÍ PRO PEVNOSTNÍ ZKOUŠKU.....	53
8.	PEVNOSTNÍ KONTROLA.....	54
8.1	KONTROLA PRUTŮ.....	54
8.1.1	Kontrola na kombinované namáhání.....	54
8.1.2	Kontrola na vzpěr.....	55
8.2	ŠROUBOVÉ SPOJENÍ LOŽE S MOTOROVOU PŘEPÁŽKOU.....	57
8.2.1	Rozbor zatížení šroubu.....	57
8.2.2	Předpětí ve spoji.....	59
8.2.3	Tuhost šroubu a přírub.....	60

8.2.4	Utahovací moment	62
8.2.5	Výpočet předpětí spoje	62
8.2.6	Namáhání šroubu	63
8.3	ŠROUBOVÉ SPOJENÍ LOŽE S MOTOREM.....	64
8.3.1	Výpočet předpětí spoje	65
8.3.2	Namáhání šroubu	67
8.4	KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ	68
9.	HMOTOVÝ ROZBOR	69
10.	NÁVRH MOTOROVÝCH KRYTŮ.....	71
11.	ZÁVĚR.....	73
12.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
13.	PŘÍLOHY.....	76
13.1	AXIÁLNÍ SÍLY V PRUTECH.....	76
13.2	REAKCE V ULOŽENÍCH NA PŘEPÁŽCE	76
13.3	NAPĚTÍ ŠROUBŮ NA PŘEPÁŽCE.....	77
13.4	REAKCE V MOTOROVÝCH ÚCHYTECH.....	78
13.5	NAPĚTÍ ŠROUBŮ V MOT. ÚCHYTECH	79
13.6	DEFORMACE KONCOVÝCH UZLŮ LOŽE	79
13.7	VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE	81

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Model mot. (pohled zepředu).....	17
Obrázek 2 – Model mot. (pohled zezadu)	17
Obrázek 3 – Typický detail příruby mot.	20
Obrázek 4 – Typický detail příruby mot.	20
Obrázek 5 – Umístění spodních úchytných bodů motoru [14].....	20
Obrázek 6 - Umístění zadních úchytných bodů motoru [14]	21
Obrázek 7 – Vrtule Woodcomp SR3000/3N [15]	21
Obrázek 8 – Dělení motorových loží [1]	24
Obrázek 9 – Motorové lože. [3].....	25
Obrázek 10 – Motorové lože. [4].....	25
Obrázek 11 – Motorové lože. [5].....	26
Obrázek 12 – Motorové lože. [6].....	26
Obrázek 13 – Motorové lože. [7].....	27
Obrázek 14 – Motorové lože. [8].....	27
Obrázek 15 – Letová obálka provozních násobků.....	29
Obrázek 16 – Souřadný systém letounu [18].....	35
Obrázek 17 – Model podkladu od výrobce	37
Obrázek 18 – Model podkladu od výr.	37
Obrázek 19 – Návrh mot. lože (názorný pohled proti směru letu)	38
Obrázek 20 – Detail spojení závěsu a prutu na úchytném bodě M3	39
Obrázek 21 – Detail blízkosti prutů s tlumičem výfuku.....	39
Obrázek 22 – Uchycení lože na mot. přep. (pohled proti směru letu).....	41
Obrázek 23 –Detail spodní výztuhy mot. přep. (pohled po směru letu).....	41
Obrázek 24 – Detail horní výztuhy (pohled po směru letu)	41
Obrázek 25 – Detail 1 uchycení lože k mot.....	42
Obrázek 26 – Detail 2 uchycení lože k mot.....	42
Obrázek 27 – Poloha a orientace souřadného systému motoru [14]	43
Obrázek 28 – 1D model motorového lože.....	45
Obrázek 29 – Výsledná provozní zatížení v bodě C letové obálky.....	47
Obrázek 30 - Výsledná početní zatížení v bodě C letové obálky	48

Obrázek 31 – Výpočtový 3D model lože	49
Obrázek 32 – Detail sítě kolem uzlu bodu P4	50
Obrázek 33 – Detail spojení prutu 6 se závěsem bodu P4 (provozní zatížení)	51
Obrázek 34 – Detail spojení prutu 6 se závěsem bodu P4 (početní zatížení).....	52
Obrázek 35 – Schéma zatížení šroubu ve spoji lože s přepážkou	58
Obrázek 36 – Aplikace diagramu předepjatého spoje pro provozní sílu $\pm F_P$ [20]	60
Obrázek 37 – Schéma pro výpočet tuhosti šroubu [20]	60
Obrázek 38 – Výpočet tuhosti přírub s průběžným šroubem [20]	61
Obrázek 39 – Schéma zatížení šroubu ve spoji lože s motorem (bod M2)	65
Obrázek 40 – Detail max. napětí ve spoji prutu 6 a závěsu lože (bod C).....	68
Obrázek 41 – Očekávané provedení svaru ve spoji prutu se závěsem lože [4].....	68
Obrázek 42 – Těžiště lože (červeně) a výsledné těžiště soustavy (modře)	70
Obrázek 43 – Zobrazení návrhu ploch pro motorový kryt	71
Obrázek 44 – Bočný pohled návrhu plochy pro kryt motoru	72
Obrázek 45 – Půdorysný pohled návrhu plochy pro kryt motoru	72

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Základní parametry motoru [12]	18
Tabulka 2 – Základní výkonové parametry motoru [12] [13]	18
Tabulka 3 – Hmotnosti doplňků [14]	19
Tabulka 4 – Základní parametry vrtule [16, kromě *]	22
Tabulka 5 – Letová obálka provozních násobků při m_{\min}	32
Tabulka 6 – Provozní zatížení v letových případech.....	35
Tabulka 7 – Provozní zatížení motorového lože	36
Tabulka 8 – Početní zatížení motorového lože.....	36
Tabulka 9 – Materiálové vlastnosti EN 25CrMo4.6	40
Tabulka 10 – Poloha těžiště motoru [14]	43
Tabulka 11 – Poloha těžiště vrtule	44
Tabulka 12 – Poloha těžiště soustavy motor a vrtule	44
Tabulka 13 – Výsledná napětí z 1D analýzy při provozním zatížení.....	46
Tabulka 14 – Výsledná napětí z 1D analýzy při početním zatížení	47

Tabulka 15 – Výsledná provozní napětí z 3D výpočtu MKP	50
Tabulka 16 – Výsledná početní napětí z 3D výpočtu MKP	51
Tabulka 17 – Výsledné hodnoty jistot kombinovaného namáhání prutů lože	55
Tabulka 18 – Parametry prutů pro určení namáhání na vzpěr.....	56
Tabulka 19 – Výsledné kritické namáhání prutů na vzpěr	56
Tabulka 20 – Jistoty na vzpěr při provozním zatížení.....	57
Tabulka 21 – Jistoty na vzpěr při početním zatížení	57
Tabulka 22 - Vlastnosti šroubu M8 použitého pro spojení lože s motorem.....	57
Tabulka 23 – Parametry spojovacích přírub.....	61
Tabulka 24 – Výsledné tuhosti šroubů a přírub.....	62
Tabulka 25 - Hodnoty jistot v bodě C obálky šroubů spoje lože-přepážka.....	64
Tabulka 26 – Vlastnosti šroubu M10 použitého pro spojení lože s motorem.....	65
Tabulka 27 – Tuhosti šroubů a přírub ve spoji motoru a lože.....	66
Tabulka 28 – Hodnoty jistot v bodě C obálky šroubů spoje lože-motor.....	67
Tabulka 29 – Hmotnost příslušenství lože	69
Tabulka 30 – Polohy těžišť v souř. sys. letounu.....	69
Tabulka 31 – Polohy těžišť v souř. sys. motoru	69

Seznam příloh

Axiální síly v prutech

Reakce v uloženích na přepážce

Napětí šroubů na přepážce

Reakce v motorových úchytech

Napětí šroubů v motorových úchytech

Deformace koncových uzlů lože

Výkresová dokumentace

Seznam použitých programů

Microsoft Word – Licence ČVUT

Microsoft Excel – Licence ČVUT

CATIA Version 5-6 Release 2017 – Studentská licence

Abaqus/CAE 6.14-5 – Výuková licence ČVUT

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Název
1D	Jednodimenzionální (jednorozměrný)
3D	Trojdimenzionální (trojrozměrný)
AISI	American Iron and Steel Institute („Americký institut železa a oceli“)
ASTM	American Society for Testing and Materials („Americká společnost pro testování a materiály“)
ČSN	Československá státní norma
DAeC	Deutsche Aero Club e.V. (Německý aeroklub)
EN	European Norm (Evropská norma)
F2245	Standard Specification for Design and Performance of a Light Sport Airplane (Standardní specifikace pro návrh a výkon lehkého sportovního letounu) – vydává ASTM
ISO	International Standard Organization (Mezinárodní standardizační organizace)
LAA ČR	Letecká amatérská asociace České republiky
LTF-UL	Lufttüchtigkeitsforderungen für aerodynamisch gesteuerte Ultraleichtflugzeuge (Požadavky na letovou způsobilost pro aerodynamicky řízená ultralehká letadla) – vydává DAeC
MKP	Metoda konečných prvků
STOL	Short take off and landing (krátký vzlet a přistání)

UL	Ultra lehký
UL2	Stavební předpis vydávaný LAA ČR

Seznam použitého značení

Symbol	Jednotka	Název
ΔF_m	[N]	Přírůstek osově síly
$\Delta F_{př}$	[N]	Změna síly v přírubách
ΔF_s	[N]	Změna síly ve šroubu
A_s	[mm ²]	Plocha šroubu
b	[mm]	Rameno ohybového momentu
$c_{př}$	[1]	Tuhost přírub
c_s	[1]	Tuhost šroubu
d	[mm]	Průměr závitu
d_2	[mm]	Střední průměr závitu
d_3	[mm]	Malý průměr závitu
D_d	[mm]	Průměr otvoru
D_{red}	[mm]	Redukovaný průměr
D_{sk}	[mm]	Funkční plocha pod šroubem (maticí)
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
$E_{př}$	[MPa]	Modul pružnosti v tahu přírub
E_s	[MPa]	Modul pružnosti v tahu šroubu
f	[1]	Součinitel smykového tření
F_{kr}	[N]	Kritická síla
F_0	[N]	Síla předpětí
F_b	[N]	Boční síla
F_{b_2245}	[N]	Boční zatížení dle předpisu F2245
F_{b_UL2}	[N]	Boční zatížení dle předpisu UL2
F_g	[N]	Tíhová síla
$F_{g_pozemní}$	[N]	Tíhová síla při pozemním zatížení
F_p	[N]	Provozní síla

$F_{poč}$	[N]	Početní síla
F_{prov}	[N]	Provozní síla
$F_{př}$	[N]	Síla v přírubách či přitlačná síla
$F_{př}'$	[N]	Tlaková síla působící v přírubách
F_s	[N]	Síla ve šroubu
F_s'	[N]	Tlaková síla působící na šroub
$F_{x, y, z}$	[N]	Síla ve směru osy x, y, z
f_z	[1]	Součinitel smykového tření v závitě
g	[m/s ²]	Gravitační zrychlení
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
h	[mm]	Rameno silové dvojice
i	[1]	Převodový poměr motor/vrtule
i	[1]	Počet chodů závitu
$j_{poč}$	[1]	Početní jistota
j_{prov}	[1]	Provozní jistota
J_{min}	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu
k	[mm]	Výška hlavy šroubu
k_{Mk}	[1]	Zvyšující součinitel krouticího momentu
l	[mm]	Délka
l_1, l_2	[mm]	Délkové rozměry šroubového spoje
l_p	[mm]	Tloušťka podložky
l_{zm}	[mm]	Délka zbývající závitové části
M_U	[N.m]	Utahovací moment
m_{mot}	[kg]	Hmotnost motoru
M_r	[N.m]	Reakční moment vrtule
M_{TZ}	[N.m]	Moment tření v závitě
$M_{x, y, z}$	[N.mm]	Moment ve směru osy x, y, z
n	[1]	Násobek tíhového zrychlení
n_p	[1]	Případ vzpěru
n_A	[1]	Násobek tíhového zrychlení v bodě A obálky násobků
P	[1]	Rozteč závitu
P_{max}	[kW, HP]	Maximální výkon

P_{max_trv}	[kW, HP]	Maximální trvalý výkon
P_{mot}	[kW, HP]	Výkon motoru
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R_p	[MPa]	Mez kluzu v tahu
S	[mm]	Plocha
S_{red}	[mm]	Redukovaná plocha
T	[N]	Tah od vrtule
v	[m/s], [km/h]	Rychlost
W_k	[mm ³]	Smykový modul
x_m	[mm]	Rameno momentu M_{xy}
α	[°]	Úhel náběhu
γ	[rad]	Úhel stoupání závitů
η_{vrt}	[1]	Účinnost vrtule
λ	[1]	Štíhlost prutu
λ_m	[1]	Mezní štíhlost
ν	[1]	Poissonovo číslo
ρ	[kg/m ³]	Hustota
σ_{Kd}	[MPa]	Mez kluzu v tlaku
σ_{red}	[MPa]	Redukované napětí
σ_T	[MPa]	Napětí podle Tetmajera
σ_u	[MPa]	Mez úměrnosti
σ_t	[MPa]	Tahové
τ_k	[MPa]	Smykové napětí
φ'	[rad]	Redukovaný třecí úhel
ψ	[rad]	Součinitel zbytkového předpětí

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE:

HAVLÍK, M.: Návrh motorového lože UL letounu s motorem B25: diplomová práce. Praha: ČVUT – České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2019, 81 s. Vedoucí práce: Helmich, M.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem konstrukce motorového lože ultralehkého letounu pro zástavbu motoru B25 značky MW Fly. První část práce je věnována analýze pohonné jednotky, řešení používaných motorových loží a studii požadavků leteckých předpisů pro tento typ konstrukce. Druhá část práce se zaměřuje na stanovení zatížení na základě požadavků předpisů, návrh konstrukce motorového lože a pevnostní analýzu. Závěrem práce je provedena pevnostní kontrola, hmotový rozbor a návrh krytu motoru.

ANNOTATION OF MASTER THESIS:

HAVLÍK, M.: Engine mount design of UL aircraft with B25 engine: Master Thesis. Prague: CTU – Czech Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Aerospace Engineering, 2019, 81 p. Thesis head: Helmich, M.

This master thesis deals with the design of the engine mount of an ultralight aircraft for installation the MW Fly B25 engine. The first part of thesis is devoted to the analysis of the power unit, research of used engine mounts and study of the requirements of aviation regulations for this type of construction. The second part of the thesis focuses on the determination of loads based on requirements of regulations, design of the engine mount and strength analysis. At the end of the thesis is carried out strength check, mass analysis and design of the engine hood.

1. Úvod

Výrobci ultralehkých letounů se v dnešní době snaží svým potenciálním zákazníkům vyjít co nejvíce vstříc. Jedním z takových vstřícných kroků je nabídnout ve svém letounu více typů motorů. V případě této diplomové práce se bude jednat o návrh motorového lože pro zástavbu motoru B25 poměrně nového hráče na trhu s leteckými motory, italskou společností MW Fly. Ten má konkurovat zvláště motorům rakouské společnosti Rotax řady 900 a nabídnout lepší výkon za nižší cenu spolu se snadnou obsluhou a montáží.

Hlavním požadavkem na konstrukci motorového lože je nízká hmotnost při zachování vysoké pevnosti, jelikož se jedná o značně zatěžovanou část konstrukce letounu. I přesto však musí být lože konstrukčně jednoduše řešené, aby umožňovalo snadnou montáž na letoun a zaručovalo dobrý přístup k motoru.

Cílem této práce je navrhnout konstrukci motorového lože tak, aby se co nejvíce přibližovala výše zmíněným požadavkům. K tomuto cíli vede následující postup. Nejdříve bude v teoretické části provedena analýza pohonné jednotky, prozkoumána již používaná konstrukční řešení motorových loží a prostudovány požadavky leteckých stavebních předpisů. Na jejich základě pak bude stanoveno zatížení, které musí konstrukce bezpečně přenést. Na to navazuje část praktická, která je již zaměřena na samotný návrh konstrukce, pevnostní analýzu a ověření navržené konstrukce.

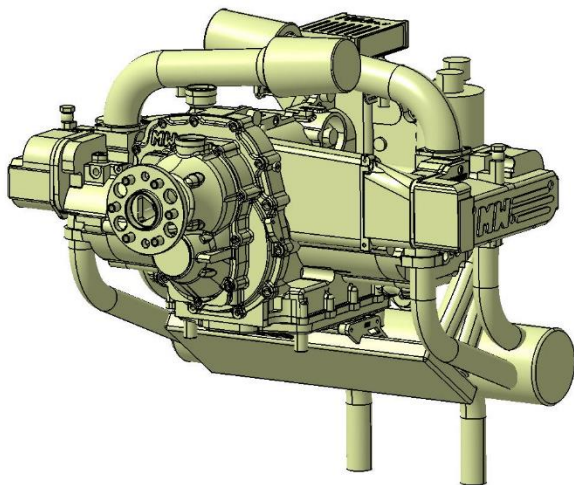
2. Analýza agregátu

2.1 Základní specifikace motoru

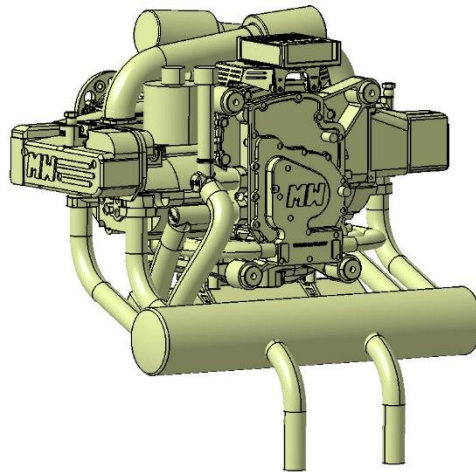
Pro letoun byl zvolen motor B25, který je vyráběn italskou společností MWfly. Motor se vyrábí ve dvou variantách, a to buď obsahující reduktor (B25G) nebo bez reduktoru (B25D). Varianta obsahující reduktor je nabízena s výkonem 140 koňských sil s reduktorem o převodovém poměru $1\div 1,731$ (typ A), nebo 155 koňských sil s reduktorem o poměru $1\div 1,958$ (typ B). Ve variantě bez reduktoru je motor nabízen se 115, nebo 155 koňskými silami. Motor je od výrobce dodáván v obou směrech otáčení (levotočivý i pravotočivý) dle přání zákazníka. [12]

Jedná se o čtyřtákní zážehový motor, obsahující čtyři válce na plocho s klikovou hřídelí uprostřed (boxer). Časování obstarávají dvě vačkové hřídele, kde každý válec má 2 ventily. Vačkové hřídele jsou s klikovou hřídelí spojeny přes dva převody, a to ozubeným a řetězovým převodem. Motor je plně vodou chlazený. [12] [14]

Pro náš konstrukční návrh byl na základě požadavků výrobce letounu zvolen motor B25G-L-155-B, tedy verze se 155 koňskými silami, reduktorem typu B a s levotočivým směrem otáčení vrtule (při pohledu zepředu).



Obrázek 1 – Model mot. (pohled zepředu)



Obrázek 2 – Model mot. (pohled zezadu)

2.2 Základní parametry motoru

V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry motoru:

Tabulka 1 – Základní parametry motoru [12]

Zdvihový objem [cm ³]	2545
Zdvih [mm]	81
Vrtání [mm]	100
Kompresní poměr	10,5:1

A v další tabulce základní výkonové parametry motoru:

Tabulka 2 – Základní výkonové parametry motoru [12] [13]

Maximální výkon [kW (HP)] při otáčkách [ot/min]	118,4 (159) @ 4700
Maximální trvalý výkon [kW (HP)]	95,4 (128) @ 4400
Krouticí moment při max. výkonu [N.m (kg.m)]	237 (24,2)
Krouticí moment při max. trv. výkonu [N.m (kg.m)]	243 (24,8)

2.3 Hmotnostní charakteristiky motoru

Nejprve bude uvedena základní výbava motoru dle instalačního manuálu výrobce, pro kterou je uváděna základní hmotnost motoru 83,6 kg. Všechny prvky základní výbavy jsou pevně spojené s motorem. Součástí základní výbavy je: [14]

- Vnitřní generátor
- Regulátor napětí
- Spouštěcí relé
- Termostat
- Expanzní nádoba na vodu
- Ovládání škrtecí klapky
- Kabelový svazek vstřikování paliva
- Řídicí jednotka motoru - 2x
- Gumové osazení

Dále výrobce nabízí volitelné doplňky k motoru. Zde již bylo nutné zvážit použití. Vzhledem k tomu, že většinu doplňků výrobce doporučuje a mají praktické použití (např. zjednodušení údržby motoru, zjednodušení montáže motoru, indikátory pro předletovou kontrolu), budou až na výjimky doplňky použity.

Tabulka 3 – Hmotnosti doplňků [14]

	Hmotnost [kg]	Pevně spojeno s motorem?	Bude použito?
Adaptér pro montáž "na lůžko"	0,37	ANO	NE
Výfukový systém	5,1	ANO	ANO
Souprava chladiče chladicí kapaliny	1,7	ANO	ANO
Pomocné palivové čerpadlo	0,66	NE	NE
Regulátor otáček vrtule	11,9	ANO	ANO
Vrtule s nábojem			
Ukazatel stavu motoru	N/A	NE	NE
Elektrický rozbočovač	0,98	NE	ANO
Modul pro dodávání paliva	2,9	NE	ANO

Uvedená hmotnost položek „Regulátor otáček vrtule“ a „Vrtule s nábojem“ vychází z následující kapitoly, věnující se volby vrtule.

Pro stanovení zatížení motorového lože jsou uvažovány jen hmoty pevně spojené s motorem. Jejich hmotnost bude:

$$m_{VOLITELNÉ} = 5,1 + 1,7 + 11,9 = 18,7 \text{ kg}$$

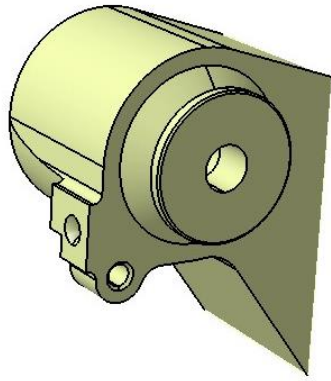
Dále je nutné k celkové hmotnosti motoru přičíst hmotnost provozních kapalin, která je udávána výrobcem na 3 kg a předpokládanou hmotnost motorového lože, která bude zvolena také 3 kg. Celková hmotnost motoru pak bude:

$$m_{mot} = m_{ZÁKLAD} + m_{VOLITELNÉ} + m_{PROV.KAP.} + m_{MOT.LOŽE}$$

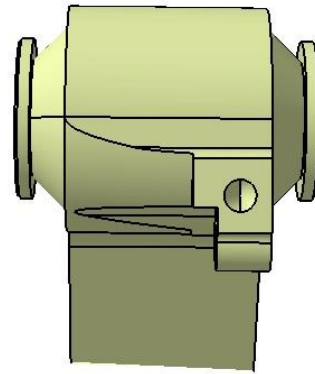
$$m = 83,6 + 18,7 + 3 + 3 = 108,3 \text{ kg}$$

2.4 Úchytné body motoru

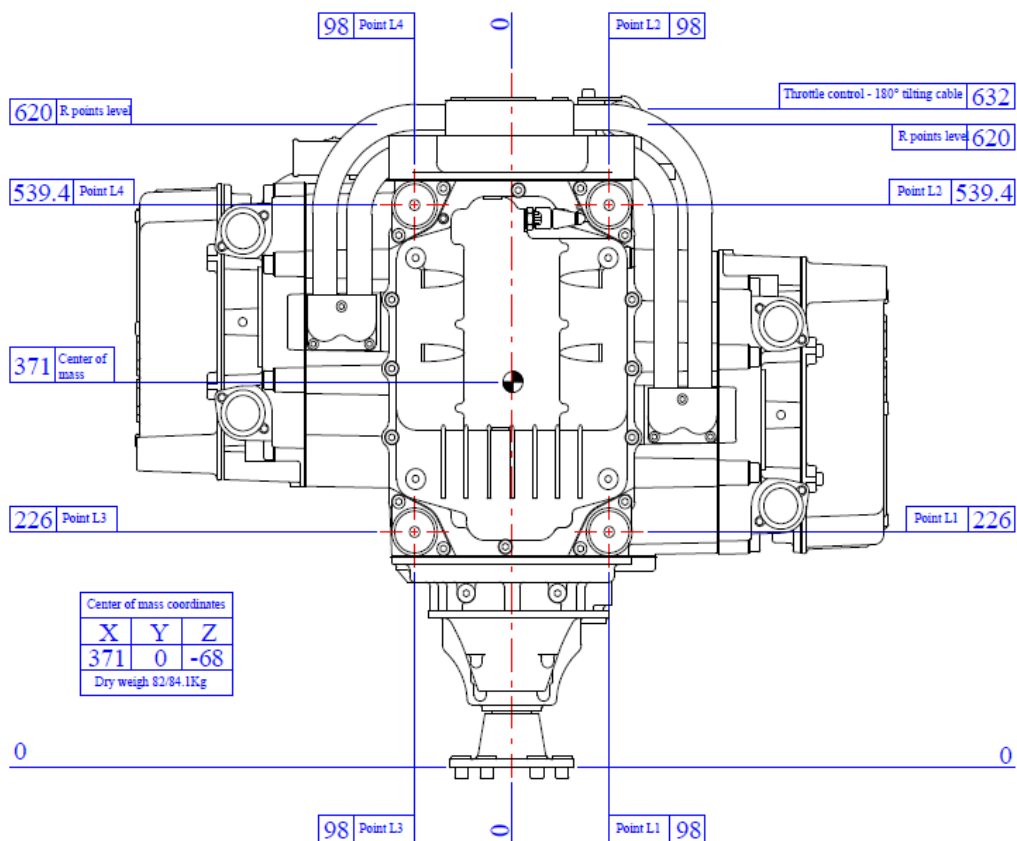
Motor disponuje celkem osmi úchytnými body, respektive přírubami, které jsou pevně spojeny s blokem motoru. Součástí příruby je i originální silentblok. Čtyři úchytné body (R1 – R4) jsou umístěny v zadní části motoru (směrem k motorové přepážce) a další čtyři body (L1 – L4) jsou zespod motoru (směrem k zemi). Na obr. 3 a 4 lze vidět typický detail příruby a na obr. 5 pak jejich pozice, včetně souřadnic (počátek souřadného systému motoru je ve středu příruby vrtule).



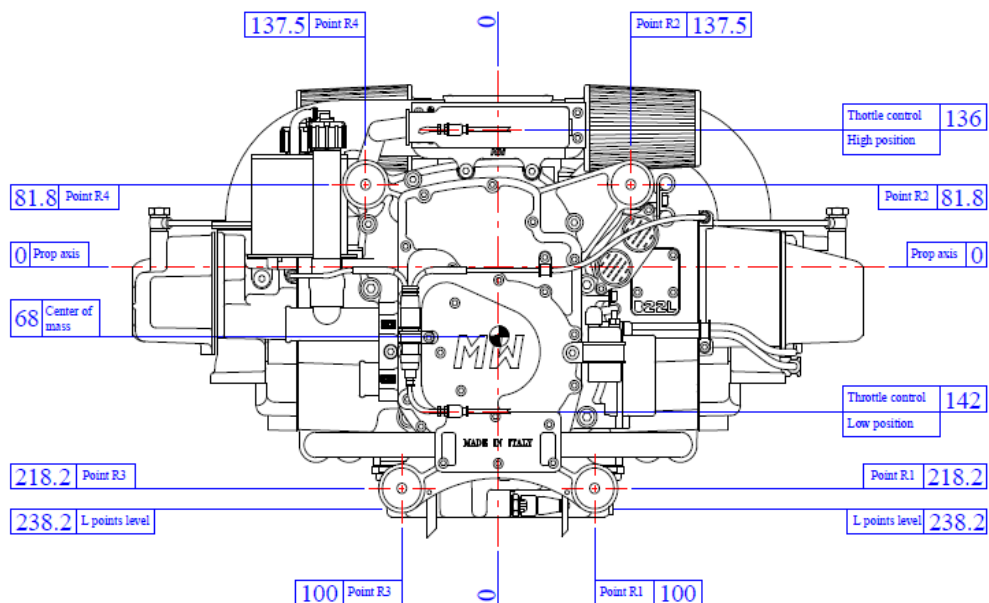
Obrázek 3 – Typický detail příruby mot.



Obrázek 4 – Typický detail příruby mot.



Obrázek 5 – Umístění spodních úchytných bodů motoru [14]



Obrázek 6 - Umístění zadních úchytných bodů motoru [14]

2.5 Vrtule

Pro pohon letounu byla zvolena elektricky stavitelná vrtule SR 3000/3N, jenž je vyráběna českou společností Woodcomp. Jedná se o třílistou vrtuli smíšené konstrukce. Úhel nastavení listů lze přestavovat pomocí servomotoru ručně z kabiny, nebo automaticky (režim konstantních otáček – „Constant speed“). [15]

Soustava vrtule se skládá z šesti hlavních konstrukčních celků, a to z listů, náboje, mechanického stavění, kužele a ovládací jednotky. Listy jsou vyrobeny z dřevěného kompozitu potažené výztužnými skleněnými, uhlíkovými nebo aramidovými laminy. Náboj je vyroben z duralu a vnější kužel je ze sklo-laminátu. Vrtule je vidět na obr. 7. [15] [16]



Obrázek 7 – Vrtule Woodcomp SR3000/3N [15]

Základní parametry vrtule jsou následující:

*Tabulka 4 – Základní parametry vrtule [16, kromě *]*

Hmotnost soustavy vrtule [kg]	11,9*
Maximální otáčky [ot/min]	2650
Průměr vrtule [mm]	1600/1700/1750
Maximální výkon motoru [HP]	115

Hmotnost soustavy vrtule byla dodána vedoucím práce. Vychází z komunikace s dodavatelem vrtule a výrobcem letounu, jelikož velikost, respektive tloušťka mezikusu (umístěn mezi nábojem vrtule a přírubou motoru) je volitelná a závisí na typu motoru a jeho kapotáži, kde vzdálenost kužele vrtule od kapoty motoru musí být zhruba 7–10 mm (dle [16]). Tloušťka mezikusu byla stanovena na 35 mm.

Maximální udávaný výkon motoru pro pohon vrtule je nižší než výkon námi zvoleného motoru. Tato skutečnost musí být zkontrolována s výrobcem vrtule. Vrtule patří ve své třídě mezi nejtěžší a pokud by nebylo povoleno její použití, je předpokládáno použití jiné, lehčí vrtule. Výpočet namáhání motorového lože se tedy bude pohybovat na straně bezpečnosti.

3. Rešerše používaných motorových loží

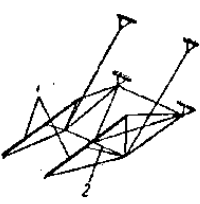
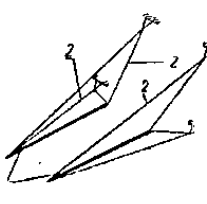
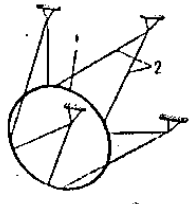
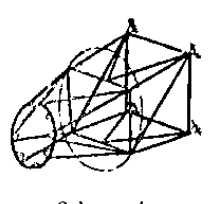
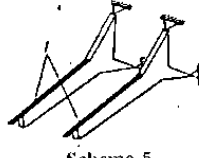
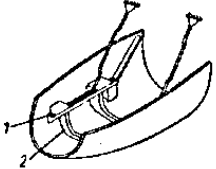
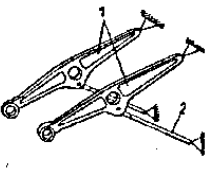
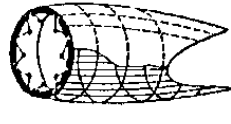
Motorové lože obecně slouží k uchycení motoru k draku letounu. Jedná se o značně zatíženou konstrukční část, jež je zatěžována setrvačnými silami, tahem motoru a reakčními a gyroskopickými momenty. Přestože musí být lože schopno přenášet velká zatížení, musí být zároveň i konstrukčně jednoduše řešené, aby bylo lehké, zaručovalo dobrý přístup k motoru a bylo možné motor snadno a rychle vyměnit. Dále musí být také pružné, aby nepřenášelo do konstrukce letounu škodlivé vibrace vznikající od motoru. K tomuto účelu slouží tzv. silentbloky, které se zabudovávají buďto na rozhraní motoru a lože, nebo lože a motorové přepážky. [1]

3.1 Dělení motorových ložích

Konstrukční řešení motorových loží lze rozřadit podle tvaru motoru na:

1. Příhradové (neboli prutové). Používají se zejména pro řadové pístové motory s kapaliným chlazením, nebo také pro motory hvězdicové. Podmnožinou prutových loží jsou lože s nebo bez příčného vyztužení. Příčně vyztužené lože se užívají pro motory s nosnou skříní, a nevyztužené lože pro motory s nosnou skříní. Lože jsou tvořena podmotorovými nosníky či prstencem, prostorovými pruty a případně příčnými výtuhami. [1]
2. Plnostěnné (neboli nosníkové). Toto lože je tvořeno dvěma samostatnými konsolovými nosníky. [1]
3. Plnostěnno-příhradové (neboli nosníkovo-příhradové). Tento typ je velmi používaný. Tvoří jej kombinace plných nosníků či rámu spolu s pruty, někdy také ve formě vzpěr. Často používané bývá řešení s převislým nosníkem s dvěma podporami (vzpěrami), viz „Schema 7“ z obr. 8. [1]

Schématu uvedených konstrukčních řešení znázorňuje obr. 8.

Nosné schema	Řadové motory		Hvězdicové motory	
	Lože s příčným vyztužením. Motory s nenosnou skříň	Lože bez příčného vyztužení. Motory s nosnou skříň	Jednoduchá příhradovina	Složitá příhradovina
Příhradové	 Schema 1	 Schema 2	 Schema 3	 Schema 4
Plnostěnné		 Schema 5		
Plnostěnno-příhradové	 Schema 6	 Schema 7	 Schema 8	

Obrázek 8 – Dělení motorových loží [1]

Jednotlivé články loží bývají nejčastěji zhotoveny z jakostních ocelí, méně často pak z hliníkových a hořčíkových slitin. Spojovány jsou nejčastěji svařováním a méně často nýtováním a šroubovými spoji. Nejčastěji se pruty vyskytují ve formě trubek. [1]

3.2 Příklady konstrukčních řešení

Níže budou uvedeny příklady konstrukčních řešení uchycení motorů MWfly a motorů přímých konkurentů k trupu letounů. Budou uvedeny příklady jak motoru MWfly B25, tak také B22, který má menší objem válců, avšak rozměry skříně motoru jsou totožné pro oba typy. Přímými konkurenty motorů MWfly jsou například rakouské ploché čtyřválcové motory Rotax 912/914/915 (100/115/141 HP). Ty mají stejně jako motory MWfly 4+4 úchytné body v zadní a spodní části motoru. Dalším konkurentem je australský plochý šestiválcový motor Jabiru 3300 (120 HP). Ten disponuje pouze čtyřmi úchytnými body v zadní části motoru.

3.2.1 Letoun Bushcaddy R80 – motor B25G-L-140 HP

Na obrázku 9 můžeme vidět první příklad konstrukčního řešení motorového lože. Motor je uchycen přes čtyři zadní úchytné body k čtyřhrannému rámu. Rám je pak k motorové přepážce letounu připevněn osmi pruty do pěti úchytných bodů. Každý rohový uzel rámu je tedy s přepážkou propojen dvěma pruty.



Obrázek 9 – Motorové lože. [3]

3.2.2 Letoun ZLIN Savage Cub/Classic – motor B22G-L-135/122 HP

Na obrázcích 10 a 11 můžeme vidět motorové lože, skládající se z celkem 7 prutů, které jsou přímou spojnici mezi úchytnými body motoru a motorovou přepážkou. Lože je s přepážkou uchyceno ve 4 bodech a s motorem přes zadní 4 úchytné body. Horní úchytné body motoru jsou s přepážkou spojeny vždy jedním prutem, levý spodní (při pohledu zepředu) dvěma pruty a pravý spodní pruty třemi.



Obrázek 10 – Motorové lože. [4]



Obrázek 11 – Motorové lože. [5]

3.2.3 Letoun DYNAERO MCR100 – motor B25G-R-155 HP

Na obrázku 12 je možné vidět lože o celkem osmi prutech, které je k motorové přepážce připojeno ve 4 bodech, stejně jako s motorem. Levý horní a spodní bod motoru (při pohledu zepředu) jsou s přepážkou připojeny dvěma pruty, pravý horní jedním prutem a pravý spodní třemi pruty.



Obrázek 12 – Motorové lože. [6]

3.2.4 Letoun Zenith STOL CH 701 – Rotax 912

Na obrázku 13 je možno vidět řešení uchycení přes čtyři body zespod motoru. Jedná se o rám, který je přichycen k motorové přepážce pomocí osmi prutů do pěti bodů.



Obrázek 13 – Motorové lože. [7]

3.2.5 Letoun Zenith STOL CH 750 – Jabiru 3300

Řešení na obrázku 14 je tvořeno celkem osmi pruty a jedním zalomeným prutem ve spodní části motoru. Lože je spojeno s motorem ve čtyřech bodech a s přepážkou v bodech pěti. Zalomený prut spojuje spodní dva body přepážky a přes krátká ramena je spojen se dvěma spodními body motoru. Na vrchní dva body motoru připadají čtyři pruty a spodní dva body pruty tři.



Obrázek 14 – Motorové lože. [8]

4. Studium stavebních předpisů

4.1 UL 2

Základním stavebním předpisem pro UL letouny (dále jen UL) v České republice je dokument *UL 2 – Část I.* vydávaný LAA ČR. Ten formuluje požadavky letové způsobilosti pro UL letouny řízené aerodynamicky s maximální vzletovou hmotností do 600 kg a minimální rychlostí v_{SO} (minimální pádová rychlost v přistávací konfiguraci) ne větší, než 83 km/h (kalibrovaná rychlost letu). Dokument je členěn do osmi hlav, resp. kapitol (Hlava A–J), které stanovují minimální požadavky letové způsobilosti. Ty je nutné splnit, aby použití UL letounu bylo bezproblémové a bezpečné. [9]

Pro účely naší práce, resp. Problematiku stanovení zatížení, je rozhodující kapitola Pevnost (Hlava C). Jednotlivé paragrafy této kapitoly budou nyní probrány.

Zatížení motorového lože je probíráno v paragrafech 361, 363 a 597 kapitoly Návrh a konstrukce. Paragraf 361 hovoří konkrétně o zatížení motorového lože:

UL 2 § 361 Zatížení motorového lože [9]

1. Motorové lože a jeho uchycení musí být dimenzováno na následující případy zatížení:

- a. provozní zatížení krouticím momentem od vrtule, které odpovídá vzletovému výkonu a příslušným otáčkám vrtule při současném působení 75 % provozního zatížení z případu A podle bodu UL 2 § 333.
- b. provozní zatížení krouticím momentem od vrtule, které odpovídá maximálnímu trvalému výkonu a příslušným otáčkám vrtule při současném působení provozního zatížení z případu A podle bodu UL 2 § 333.

2. Pro konvenční pístové motory s přímým („tvrdým“) náhonem vrtule se provozní krouticí moment od motoru, který se používá ve výše uvedeném odstavci 1., vypočte tak, že násobíme střední (průměrný) krouticí moment příslušným součinitelem podle následující tabulky:

	Dvoutaktní motor	Čtyřtaktní motor
1 válec	6,0	8,0
2 válce	3,0	4,0
3 válce	2,5	3,0
4 válce	1,5	2,0
5 a více válců	1,33	1,33

Poznámka:

Pojem „tvrdý“ přenos znamená přímý náhon, náhon ozubeným kolem nebo ozubeným řemenem. Pro ostatní druhy náhonu (např. odstředivá spojka) a nekonvenční motory musí být příslušný součinitel konzultován s odpovědným úřadem.

A dále paragraf 363 se zabývá bočním zatížením motorového lože:

UL 2 § 363 Boční zatížení motorového lože [9]

Motorové lože a jeho uchycení musí být navrženy na boční zatížení provozním násobkem ne menším než jedna třetina provozního násobku z bodu obálky A ($1/3 n_1$).

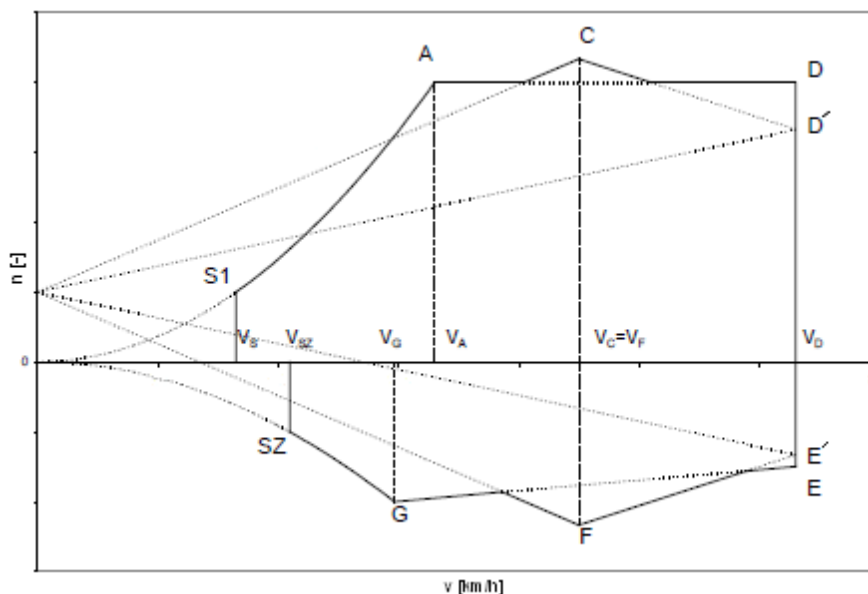
O zatížení osamělými hmotami, mezi něž motor bezpochyby patří, hovoří paragraf 597:

UL 2 § 597 Zatížení osamělými hmotami [9]

Upevnění všech osamělých hmot, které jsou součástí výbavy letounu (včetně nutné zátěže pro úpravu polohy těžiště), musí být navržena tak, aby snesla zatížení odpovídající maximálním návrhovým násobkům letových a pozemních zatížení včetně podmínek při nouzovém přistání podle bodu UL 2 § 561.

Ve třech výše zmíněných paragrafech jsou zmíněny dva typy zatížení, a to letové a pozemní (včetně podmínek nouzového přistání).

O letovém zatížení se hovoří v kapitolách II. a III. hlavy C. V podstatě se jedná o prokázání splnění požadavků pevnosti konstrukce pro všechny kombinace rychlostí letu a násobků zatížení, nacházející se na hraniční křivce a uvnitř obálky násobků (na obr. 15).



Obrázek 15 – Letová obálka provozních násobků

Pozemní zatížení specifikuje kapitola IX. hlavy C, kde je popsáno určení provozního násobku zatížení v těžišti letounu n_{pr} , na něž je nutné kontrolovat uchycení všech soustředěných hmot na letounu (motor, palivové nádrže, sedadla posádky).

O podmínkách nouzového přistání pojednává kapitola X. hlavy C, kde je například uvedeno, že letoun může být při nouzovém přistání poškozen, ale musí být navržen tak, že každá osoba na palubě musí být chráněna před účinky setrvačných sil. Jelikož motor je umístěn před pilotní kabinou, nemůže přímo ohrozit osoby na palubě, a tak není nutné dimenzovat lože pro podmínky nouzového přistání.

Důležité je také zmínit, že veškeré pevnostní požadavky uvedené v předpisu platí jako provozní zatížení (maximální očekávané zatížení v provozu), není-li uvedeno jinak. Početní zatížení je pak provozní zatížení násobené příslušným součinitelem bezpečnosti. Ve většině případů je použit součinitel bezpečnosti o hodnotě 1,5. Doplnkový součinitel (kterým se dále násobí součinitel bezpečnosti) se používá v případech, kdy existují nejistoty o výpočetním modelu či výrobním metodám, nebo u vysoce namáhaných dílů či dílů důležitých pro bezpečný provoz letounu.

4.2 LTF-UL

Vzhledem k faktu, že letoun provozovaný na území konkrétního státu musí splňovat místní předpisy, je pro podporu prodeje letounu vhodné certifikovat i podle dalších stavebních předpisů. Velkým trhem pro české výrobce je trh sousední, německý. Základním tamním dokumentem pro UL letouny je stavební předpis LTF-UL, jež vydává německý aeroklub DAeC. Jelikož český předpis UL 2 do značné míry vychází právě z německého LTF-UL, jsou si tyto předpisy obsahově velmi podobné.

Paragrafy týkající se zatížení motorového lože jsou ve svém znění totožné a shodují se i v číselném označení (361, 363, 597). Totožné znění mají rovněž paragrafy, na které se výchozí paragrafy (361, 363 a 597) odkazují.

4.3 F2245

Dalším velkým trhem, podle jehož požadavků je vhodné certifikovat, je trh americký. Ten má své požadavky formulované v dokumentu *F2245*, jež vydává americká společnost ASTM. Obsah předpisu F2245 je velmi podobný předpisům LTF-UL a UL2, avšak má jinou strukturu.

Paragrafu 361 předpisů LTF-UL a UL2 odpovídá bod 5.2.9 předpisu F2245. Paragrafu 363 pak odpovídá bod 5.2.10 s tím rozdílem, že návrhový provozní násobek pro boční zatížení je stanoven na 1,5. Poslednímu výše zmíněnému paragrafu 597 pak odpovídá bod 5.11.3. Všechny zmíněné paragrafy, až na 5.2.10, jsou obsahově shodné. To platí i pro paragrafy, které jsou zmíněné ve výchozích paragrafech.

5. Rozbor zatížení

Motorové lože je zatěžováno několika druhy namáhání, a to:

- setrvačnými silami,
- tahem od vrtule,
- reakčním momentem vrtule, a
- gyroskopickým momentem vrtule.

Všechna tato namáhání působí vždy společně. Působení gyroskopického momentu vrtule bude v této práci zanedbáno.

5.1 Letová obálka provozních násobků

Pro určení namáhání je nejprve nutné definovat letovou obálku provozních násobků, respektive její mezní body. Konkrétně se bude jednat o obálku v takové letové konfiguraci, při které budou na letoun působit největší násobky, tedy i největšího zatížení. Toho je dosaženo při minimální hmotnosti letounu, a to 356,1 kg. Mezní body obálky dosahují těchto hodnot a nastavení letounu:

Tabulka 5 – Letová obálka provozních násobků při m_{min}

Bod obálky	n [-]	v [m/s]	v [km/h]	α [°]
A	4,00	36,45	131	10,69
C	6,08	58,89	212	4,44
D	4,47	80,56	290	-0,61
E	-2,47	80,56	290	-5,49
F	-4,08	58,89	212	-8,97
G	-2,00	38,09	137	-9,84

5.2 Návrhové zatížení

Nejprve bude vypočítáno tzv. návrhové zatížení, jenž definuje paragraf 361. Dále bude určeno zatížení boční, které definuje paragraf 363.

5.2.1 Návrhové zatížení č. 1 (§ 361, bod 1.)

Nejprve bude určena setrvačná síla, která vznikne za působení 75% zatížení z případu A. Vstupy jsou hmotnost motoru, určená v kapitole 2.3, velikost násobku v bodě A dle kapitoly 4.1 a gravitační zrychlení ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$).

Síla se určí podle následujícího vztahu:

$$F_g = m_{mot} \cdot (0,75 \cdot n_A) \cdot g \quad (1)$$
$$F_g = 108,3 \cdot (0,75 \cdot 4) \cdot 9,80665$$
$$F_g = 3\,186\,N$$

Dále bude určena velikost tahové síly od vrtule, v tomto případě při vzletovém výkonu, resp. maximálním výkonu motoru. Vstupy jsou výkon motoru, účinnost vrtule (jenž bude volena rovna 1, což je maximální možná hodnota, které ovšem v reálném provozu nelze dosáhnout jsme tak na bezpečné straně) a rychlost letu v bodě A obálky. Tahová síla bude:

$$T = \frac{P_{mot_max} \cdot \eta_{vrt}}{v_A} \quad (2)$$
$$T = \frac{1184000 \cdot 1}{36,45}$$
$$T = 3\,249\,N$$

Jako poslední bude určena velikost reakčního momentu vrtule, jejímiž vstupy jsou krouticí moment motoru (zde pro vzletový výkon, tj. Maximální), zvyšující součinitel krouticího momentu (vycházející z předpisu) a převodový poměr mezi motorem a vrtulí. Výsledný moment bude:

$$M_r = M_{K_mot_max} \cdot k_{M_K} \cdot i \quad (3)$$
$$M_r = 237 \cdot 2 \cdot 1,958$$
$$M_r = 929\,N \cdot m$$

5.2.2 Návrhové zatížení č. 2 (§ 361, bod 2.)

Druhé návrhové zatížení bude určeno obdobnými vztahy jako návrhové zatížení č. 1 s tím rozdílem, že zde bude působit sto procent násobku z případu A obálky a motor bude v režimu maximálního trvalého výkonu. Setrvačná síla bude:

$$F_g = m_{mot} \cdot (1,0 \cdot n_A) \cdot g \quad (4)$$
$$F_g = 108,3 \cdot (1,0 \cdot 4) \cdot 9,80665$$
$$F_g = 4\,248\,N$$

Tahová síla bude:

$$T = \frac{P_{mot_max} \cdot \eta_{vrt}}{v_A} \quad (5)$$
$$T = \frac{95400 \cdot 1}{36,45} = 2\,618\,N$$

Reakční moment vrtule bude:

$$M_r = M_{K_mot_max} \cdot k_{M_K} \cdot i \quad (6)$$

$$M_r = 243 \cdot 2 \cdot 1,958$$

$$M_r = 952 \text{ N} \cdot \text{m}$$

5.2.3 Boční zatížení (§ 363 a 5.2.10)

Jak již bylo uvedeno výše, boční zatížení se podle předpisu určí nepatrně odlišně pro UL2, resp. LTF-UL a F2245, a to následovně:

$$F_{b_UL2} = \pm m_{mot} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot n_A\right) \cdot g \quad (7)$$

$$F_{b_F2245} = \pm m_{mot} \cdot 1,5 \cdot g \quad (8)$$

Znaménko +/- znamená, že bočné zatížení může působit na obě strany, resp. nabývat kladných i záporných hodnot.

Boční zatížení bude v prvním případě následující:

$$F_{b_UL2} = \pm 108,3 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 4\right) \cdot 9,80665$$

$$F_{b_UL2} = \pm 1\,416 \text{ N}$$

A v druhém případě:

$$F_{b_2245} = \pm 108,3 \cdot 1,5 \cdot 9,80665$$

$$F_{b_UL2} = \pm 1\,593 \text{ N}$$

5.3 Zatížení setrvačnými silami (§ 597)

Nyní budou určeny síly setrvačné, jenž určují jednotlivé mezní případy zatížení z obálky násobků spolu s hmotností motoru. Se setrvačnými silami budou v souladu s předešlým tvrzením působit i tahová síly od vrtule a reakční moment motoru. Budou určeny případy letové a pozemní.

5.3.1 Letové případy

Zatížení od letových případů se určí obdobnými vztahy jako (1) a (4). Jednotlivé násobky v mezních bodech obálky již byly uvedeny, a to v kapitole 5.1. Režimy nastavení výkonu motoru pro jednotlivé případy budou voleny podle odhadované fáze letu.

Výsledná zatížení budou nabývat následujících hodnot:

Tabulka 6 – Provozní zatížení v letových případech

Bod obálky	F_g [N]	T [N]	M_r [N·m]	Výkon motoru
A	4248	3249	929	P_max
C	6455	1620	952	P_max_trv
D	4751	1184	952	P_max_trv
E	-2627	1184	952	P_max_trv
F	-4311	1620	952	P_max_trv
G	-2124	3249	929	P_max

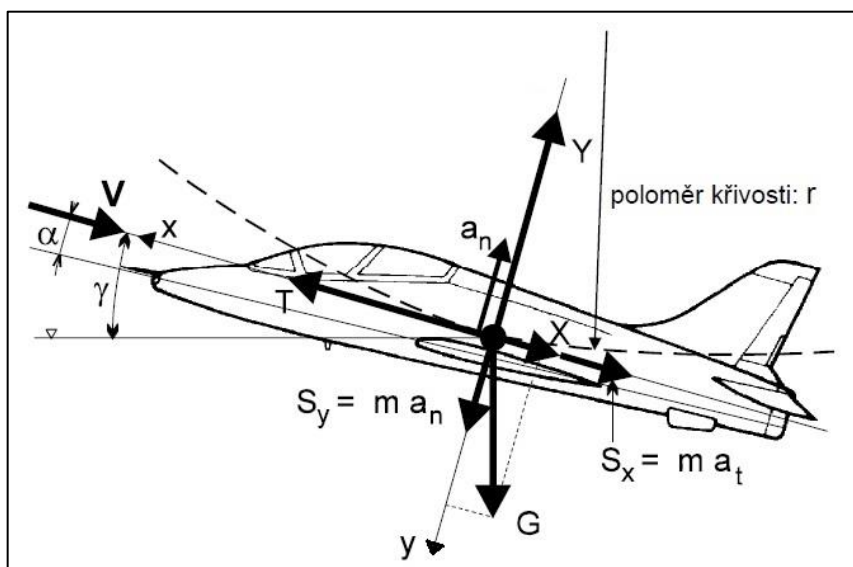
5.3.2 Pozemní

Pozemní zatížení se určí rovněž podle již uvedených vztahů (1) a (4). Násobek pozemního zatížení bude volen dle obvyklé meze, a to o velikosti 4. Zatížení bude následovné:

$$F_{g_pozemni} = 4 \cdot 131 \text{ N}$$

5.4 Rozložení zatížení do souřadného systému letounu

Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.1, letoun má v jednotlivých případech obálky různé úhly náběhu, které mají vliv na rozložení zatížení do souřadných os letounu. Orientace souřadného systému letounu je vyobrazena na obr. 16. Úhel náběhu má vliv na rozklad sil do os x a y . Zatížení v bočné ose z je na úhlu náběhu nezávislé. Natočení motoru pro výpočty vzhledem k malým hodnotám úhlů nebude uvažováno.



Obrázek 16 – Souřadný systém letounu [18]

Výsledná tabulka zatížení v jednotlivých směrech vypadá následovně:

Tabulka 7 – Provozní zatížení motorového lože

	F_g [N]	F_{gx} [N]	F_{gy} [N]	T [N]	M_r [N·m]	F_b [N]	Úhel náběhu [°]	Výkon motoru
Návrh. Zat. 1	3186	-591	3131	3249	929	0	10,69	P_max
Návrh. Zat. 2	4248	-788	4174	2618	952	0	10,69	P_max_tr
A	4248	-788	4174	3249	929	0	10,69	P_max
C	6455	-500	6436	1620	952	0	4,44	P_max_tr
D	4751	51	4750	1184	952	0	-0,61	P_max_tr
E	-2627	-251	-2615	1184	952	0	-5,49	P_max_tr
F	-4331	-676	-4278	1620	952	0	-8,97	P_max_tr
G	-2124	-363	-2093	3249	929	0	-9,84	P_max
Boční	0	0	0	0	0	1416	-	-
Boční F2245	0	0	0	0	0	1593	-	-
Pozemní	4248	0	4248	0	0	0	-	-

5.5 Výsledné početní zatížení

Jelikož výše spočtené zatížení je v souladu s předpisem zatížením provozním (viz kapitola 4), je nyní nutné ho přepočítat na zatížení početní. Součinitel bezpečnosti je dle předpisu roven 1,5. Přepočítané zatížení pak bude následující:

Tabulka 8 – Početní zatížení motorového lože

	F_g [N]	F_{gx} [N]	F_{gy} [N]	T [N]	M_r [N·m]	F_b [N]	Úhel náběhu [°]	Výkon motoru
Návrh. Zat. 1	4779	-887	4696	4873	1394	0	10,69	P_max
Návrh. Zat. 2	6372	-1182	6262	3926	1429	0	10,69	P_max_tr
A	6372	-1182	6262	4873	1394	0	10,69	P_max
C	9683	-750	9653	2430	1429	0	4,44	P_max_tr
D	7126	76	7126	1776	1429	0	-0,61	P_max_tr
E	-3940	-377	-3922	1776	1429	0	-5,49	P_max_tr
F	-6496	-1013	-6417	2430	1429	0	-8,97	P_max_tr
G	-3186	-545	-3139	4873	1394	0	-9,84	P_max
Boční	0	0	0	0	0	2124	-	-
Boční F2245	0	0	0	0	0	2390	-	-
Pozemní	6372	0	6372	0	0	0	-	-

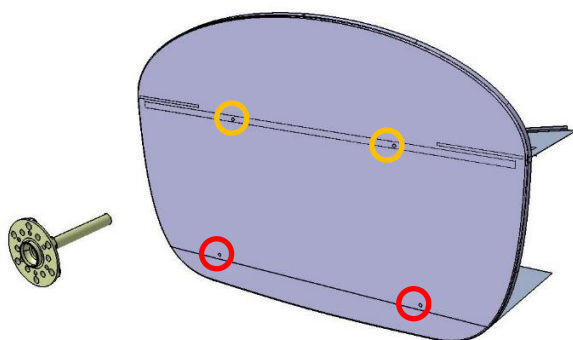
6. Konstrukční návrh motorového lože

V této kapitole bude popsán proces návrhu konstrukce motorového lože. Výsledkem bude 3D model lože, který bude konstruován v programu Catia.

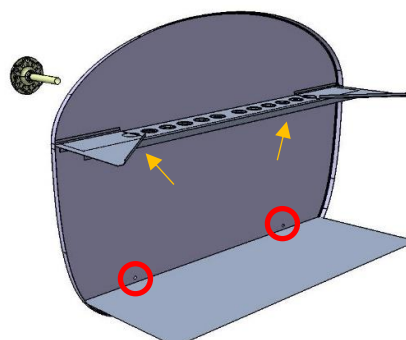
6.1 Podklady od výrobce letounu

Od výrobce letounu byly dodány následující podklady:

- Konstrukce motorové přepážky, včetně požadované pozice a průměru otvorů pro šrouby, kterými má být lože spojeno s motorovou přepážkou (viz obr. 17 a 18). Důvodem je zaměnitelnost s jinými motory. Otvory jsou pak záměrně umístěny v tuhých místech konstrukce, a to v rovině přístrojové desky a v rovině podlahy. Průměr otvorů je 8,4 mm a tloušťka plechové přepážky je 0,5 mm.
- Požadovaná poloha roviny příruby motoru (viz obr. 17 a 18).



Obrázek 17 – Model podkladu od výrobce



Obrázek 18 – Model podkladu od výr.

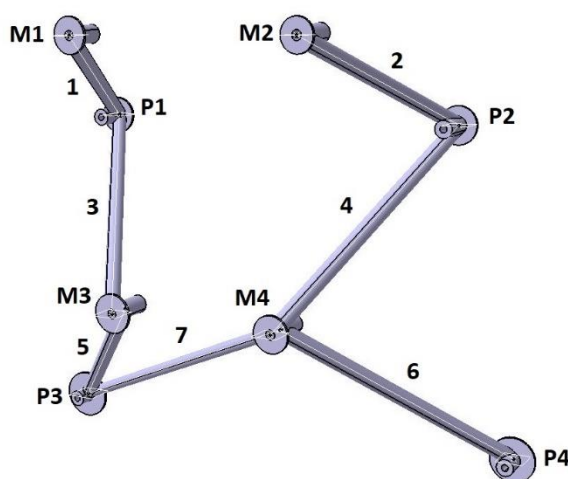
- Požadované natočení motoru 2° vpravo a -1° dolů (při pohledu ve směru letu). Natočení se používá pro eliminování škodlivých sil vznikajících působením vrtulového proudu na aerodynamické plochy letounu. Natočení se volí podle smyslu otáčení vrtule. Velikosti hodnot natočení jsou voleny po odzkoušení při provozu letounu.

6.2 Vlastní návrh

Pro vlastní konstrukční návrh motorového lože bude zvolena varianta svařované příhradové ocelové konstrukce, která bude s motorem spojena přes 4 zadní úchytné body motoru (viz. Kap. 2.4). Motor bude umístěn v přední části letounu před motorovou přepážkou. Lože bude s motorovou přepážkou spojeno rovněž ve 4 bodech.

Vzhledem k požadavkům na jednoduchost a nízkou hmotnost konstrukce byla pro konstrukční návrh zvolena varianta vycházející z řešeršní části práce, konkrétně kapitoly 3.2.2. Lože tedy bude tvořeno sedmi přímými pruty. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.4, silentbloky jsou již osazeny v úchytných bodech motoru, resp. přírubách motoru a nejsou tak součástí lože.

Schéma lože spolu s označením jednotlivých prutů a úchytných bodů ukazuje níže obr. 19. Pruty jsou označeny číslicemi 1 až 7, úchytné body motor-lože jsou značeny jako M1 až M4 a úchytné body lože-motorová přepážka jako P1 až P4.



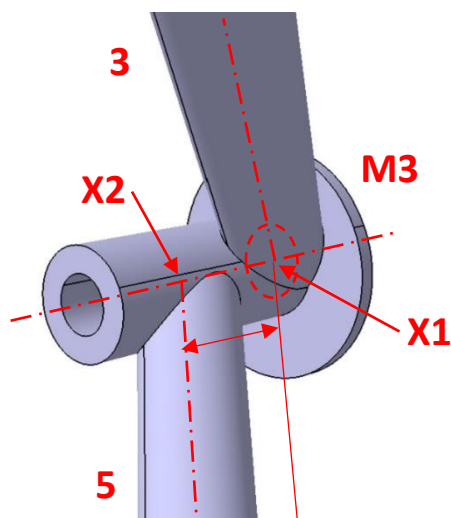
Obrázek 19 – Návrh mot. lože (názorný pohled proti směru letu)

Konstrukci tvoří dvě sady (trojice) prutů, které spojují přepážku s motorem vždy na své odpovídající straně a jeden diagonální prut, který obě sady propojuje a zvyšuje tak tuhost celé konstrukce. Konstrukce je dále tvořena celkem osmi závěsy, ve kterých se pruty sbíhají. Závěsy pak propojují lože s další konstrukcí. Typickým tvarem závěsu je válec s osazením. Osazení je umístěno vždy na rozhraní spoje a připojované konstrukce.

6.2.1 Detail spojení prut-závěs

Ideální konstrukční spojení prutu se závěsem je takové, kdy osa prutu protíná průsečík osy závěsu se středem vnějšího otvoru závěsu (bod X1 na obr. 20 níže). Právě takového spojení je z hlediska koncentrace napětí nejúnosnější. Ne vždy lze ale toto spojení použít.

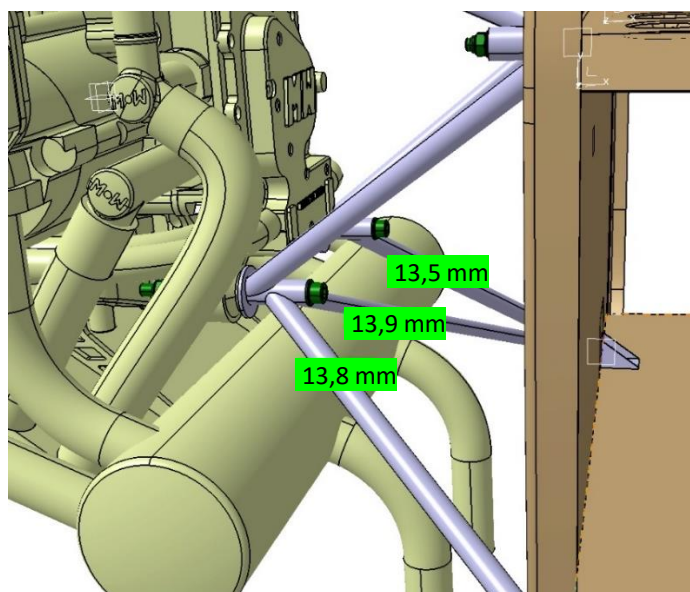
Překážkou pro provedení zmíněné ideální varianty spoje se v této práci stala přílišná blízkost prutů 5, 6 a 7 s tlumičem výfuku motoru, která ovlivnila spojení prutů se závěsy bodů M3 a M4 (viz. Obr. 21 na další stránce). Řešení je možné vidět na detailu spojení prutů 3 a 5 se závěsem úchytného bodu M3, které je vidět na obr. 20 níže.



Obrázek 20 – Detail spojení závěsu a prutu na úchytném bodě M3

Na obrázku je možné vidět ideální napojení prutu 3 (bod X1) a upravené napojení prutu 5, kde musel být průsečík osy prutu s osou závěsu (bod X2) posunut o 25 mm směrem od ideálního průsečíku (bodu X1). Obdobně bylo řešeno spojení prutů 6 a 7 se závěsem bodu M4. Zde byla osa prutu 6 posunuta o 20 mm a osa prutu 7 o 22 mm od ideálního průsečíku. V těchto napojeních bude větší koncentrace napětí, která bude následně zkontrolována v pevnostní analýze pomocí MKP.

Tato opatření docílila zvětšení vzdálenosti prutů od tlumiče výfuku na dostatečných cca 14 mm. I tak by ale mohlo dojít ke škodlivému přenosu tepla z tlumiče do prutů, a tak by tato oblast měla být opatřena dostatečně dlouhým pásem tepelné izolace. Situace je vidět níže na obr. 21.



Obrázek 21 – Detail blízkosti prutů s tlumičem výfuku

6.2.2 Dimenzionální návrh částí lože

Pruty 1 až 6 byly navrženy o průměru D 18 mm s tloušťkou stěny 1 mm. Prut 7 je o průměru D 14 mm a rovněž tloušťkou 1 mm.

Všech 8 závěsů má shodně průměr válcové části D 20 mm. Délka válcové části byla volena individuálně tak, aby vedle napojení prutu poskytovala i prostor pro svar, který bude prut se závěsem spojovat. Toto kritérium platí i pro volbu průměru osazení závěsu. Tloušťka osazení je pak u všech závěsů shodná, a to 3 mm.

6.2.3 Volba materiálu lože

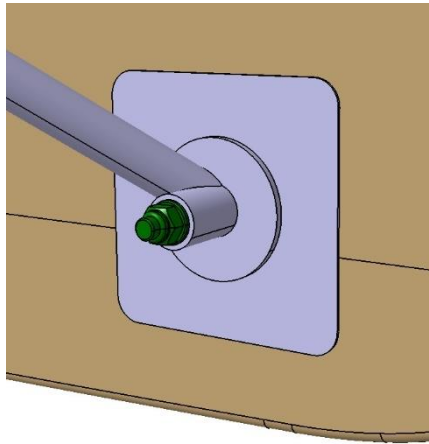
Materiál byl určen výrobcem letounu z důvodu jeho zkušeností s tímto typem a dále poměrem ceny ku pevnosti. Jedná se o materiál Ocel EN 25CrMo4 / AISI 4130, dříve značený L-CM3 (Poldi Kladno) nebo ČSN 15 130. Jeho nominální vlastnosti ve stavu 6 (zušlechtěno na dolní pevnost) jsou:

Tabulka 9 – Materiálové vlastnosti EN 25CrMo4.6

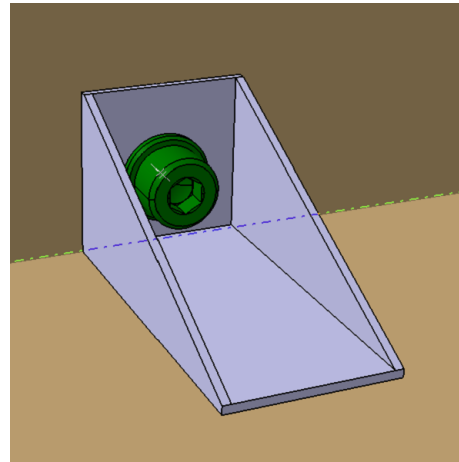
R_m [MPa]	R_p [MPa]	E [GPa]	G [GPa]	ρ [kg/m ³]
690	490	216	83	7 850

6.2.4 Uchycení lože k motorové přepážce

Detail uchycení lože k motorové přepážce je vidět na obr. 22, 23 a 24. Vlevo na obr. 22 je detail uchycení lože k motorové přepážce, kde je typicky mezi závěs lože a přepážku přidána čtvercová výztuha o hraně 100 mm a tloušťce 1 mm. Vpravo je pak navržena typická svařovaná výztuha o základnách 30x30 a 30x60 mm a tloušťce 1,5 mm, která propojuje plech přepážky a plech podlahy pilota a lépe tak distribuuje namáhání od lože.



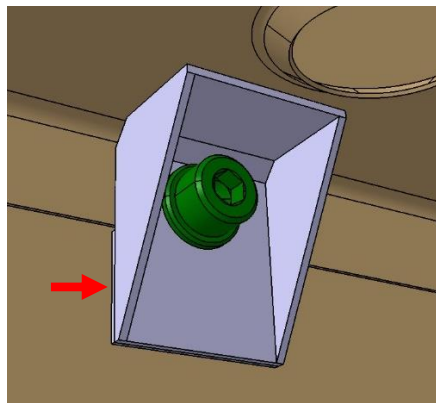
Obrázek 22 – Uchycení lože na mot. přep.
(pohled proti směru letu)



Obrázek 23 –Detail spodní výztuhy mot.
přep. (pohled po směru letu)

Na obr. 24 níže je pak vidět typický detail navržené svařované výztuhy v místech horních úchytných bodů. Výztuha je vesměs podobná výztuze dolních úchytných bodů. Zde je ale přidáno z důvodu přítomnosti radiusu v plechu palubní desky sražení a délky hran jsou přizpůsobeny odlehčovacím otvorům v plechu palubní desky. Jako poslední pak byla z důvodu osazení plechu palubní desky přidána pod výztuhu vyrovnávací podložka o tloušťce 1 mm (vedle červené šipky). Základny výztuhy jsou 30x20 a 35x30 mm.

Pro spoj pak byly typicky použity šrouby M8 ISO 4762 odpovídajících délek, 2 podložky 8 ISO 7090 a samojistná matice M8 ISO 7040.

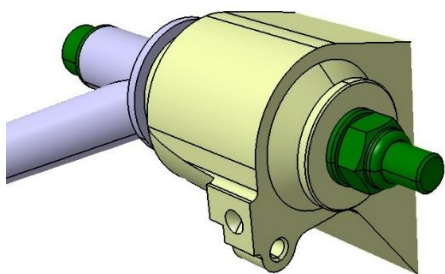


Obrázek 24 – Detail horní výztuhy (pohled po směru letu)

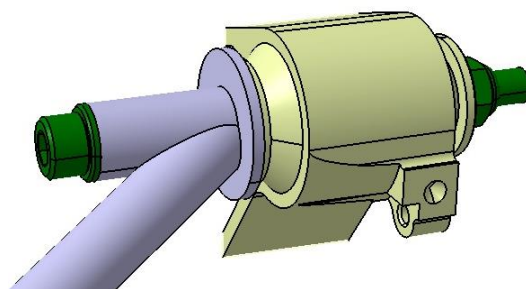
6.2.5 Uchycení lože k motoru

Detail uchycení lože k motoru je možné vidět na obr. 25 a 26. Závěs lože dosedá na čelní desku silentbloku, který je vsazen do domečku motoru. Dostatečné vůle zamezují kontaktu závěsu lože s domečkem motoru.

Velikost spojovacích prvků je dána výrobcem motoru díky předvyrobeným čelním deskám silentbloků. Průměr otvorů v deskách je 10,5 mm, jímž odpovídají šrouby M10. Typ spojovacích prvků je zvolen stejný, jako u spojení lože s přepážkou.



Obrázek 25 – Detail 1 uchycení lože k mot.



Obrázek 26 – Detail 2 uchycení lože k mot.

7. MKP analýza

Pro analýzu vnitřních silových účinků v motorovém loži byla zvolena metoda konečných prvků (MKP). Nejprve bude provedena analýza pomocí 1D nosíkových prvků, která poskytne prvotní náhled na namáhání motorového lože. Následně bude provedena analýza pomocí 3D prvků, která již poskytne detailní pohled na konstrukci lože. Od této metody je očekáváno detailnější zobrazení namáhání uzlů, kde je očekávána největší koncentrace napětí. Jedná se o místa, kde se pruty lože spojují se závěsy lože. Výsledkem obou těchto analýz bude stanovení kritických namáhání motorového lože. Analýza bude probíhat v programu Abaqus.

V obou výpočtech bude výchozí materiál modelu definován jako elastický, homogenní a izotropní. Youngův modul pružnosti v tahu bude $E = 210\,000$ MPa a Poissonovo číslo $\nu = 0,3$. Úlohy budou řešeny jako statické a lineární.

7.1 Určení působišť namáhání

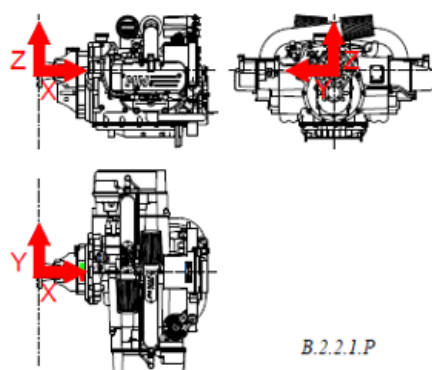
7.1.1 Působišť setrvačných sil

Poloha působišť setrvačných sil bude určena pomocí statických momentů. Polohu budou ovlivňovat dvě tělesa, motor a vrtule. Polohu těžiště motoru (včetně standardního chladicího a výfukového systému) udává výrobce a je následující:

Tabulka 10 – Poloha těžiště motoru [14]

x [mm]	375
y [mm]	0
z [mm]	-64

Poloha a orientace souřadného systému motoru je vidět na obr. 27.



Obrázek 27 – Poloha a orientace souřadného systému motoru [14]

Poloha těžiště vrtule byla dodána výrobcem vrtule a je následující:

Tabulka 11 – Poloha těžiště vrtule

x [mm]	-80
y [mm]	0
z [mm]	0

Poznámka: Hodnoty jsou udávány v souřadném systému motoru.

Společné těžiště se určí podle vztahů:

$$x_T = \frac{\sum x_{T_i} \cdot m_i}{m}$$
$$y_T = \frac{\sum y_{T_i} \cdot m_i}{m}$$

Poloha výsledného těžiště soustavy motoru a vrtule vychází následovně:

Tabulka 12 – Poloha těžiště soustavy motor a vrtule

x [mm]	324
y [mm]	0
z [mm]	-57

7.1.2 Působíště sil a momentů od vrtule

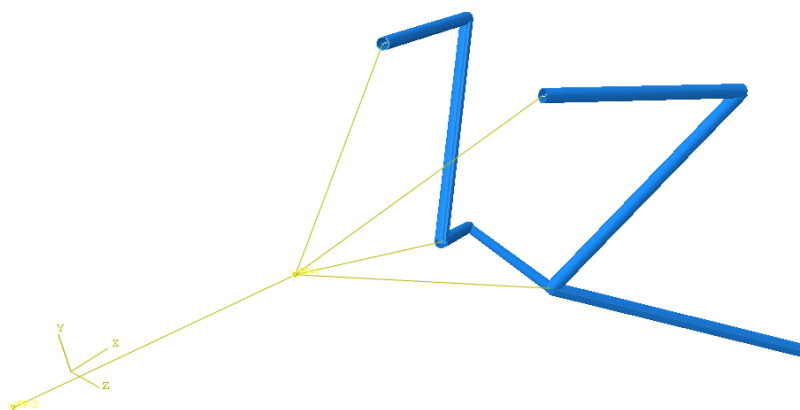
Tah a reakční moment vrtule budou v rámci zjednodušení působit v ose vrtule. Z důvodu nedostupnosti modelu vrtule bude poloha působíště uvažována v místě těžiště dílu vrtule (tab. 11).

7.2 1D analýza

7.2.1 Stanovení výpočtového modelu

Podkladem pro tvorbu 1D analýzy bude zjednodušený model prutové konstrukce. Reálné pruty budou nahrazeny úsečkami, respektive spojnicemi dvou bodů. Jedním bodem budou středy otvorů v motorové přepážce směrem k motoru. Druhým bodem budou středy otvorů v čelních deskách silentbloků motoru směrem k motorové přepážce. Model zohledňuje celkový počet prutů a jejich umístění. Geometrie modelu vyplývá ze zadané pozice motoru a motorové přepážky. Model byl vytvořen v programu Catia a následně vyexportován do formátu IGES (.igs), který byl nahrán do výpočtového programu. V něm již budou stanoveny jednotlivé podmínky výpočtu.

Jako první byly jednotlivé úsečky modelu nadefinovány jako nosníkové prvky s odpovídajícími materiálovými a průřezovými charakteristikami. Dále byly pomocí interakční vazby Coupling zavedeny okrajové podmínky a zatížení do příslušných částí lože, zde konkrétně do 4 koncových bodů úseček ze strany motoru. V našem případě byl použit typ „Kinematická funkce Coupling“, která svazuje všechny stupně volnosti. Touto funkcí se motor nahrazuje tak, aby pouze distribuoval namáhání do lože a svázal všechny stupně volnosti úchytných bodů na loži. Toto zjednodušení lze použít, jelikož tuhost motoru je mnohonásobně vyšší než tuhost lože. Výsledek předchozích dvou kroků je možné vidět na obr. 28.



Obrázek 28 – 1D model motorového lože

V dalším kroku pak byly úchytné body ze strany motorové přepážky nadefinovány jako vetknuté. Tím dochází k dalšímu zjednodušení, kde motorovou přepážku uvažujeme jako absolutně tuhou. Toto zjednodušení lze rovněž použít, nýbrž tuhost motorové přepážky a jejího spojení s navazující konstrukcí letounu bude výrazně vyšší, než je tuhost lože.

Nyní je možné přistoupit k vysíťování modelu lože. Použity byly lineární dvouuzlové nosníkové (beam) elementy. Tyto elementy disponují šesti stupni volnosti a umožňují tak přenášet kombinované namáhání (tah/tlak, ohyb a krut). Globální velikost elementů byla zvolena 5 mm. Celkový počet elementů je pak 507. Posledním krokem bylo samotné zavedení sil a momentů do příslušných působišť v souladu s kapitolou 7.1. Velikosti sil a momentů byly použity z kapitoly 5 této práce.

7.2.2 Výsledná napětí při provozním zatížení

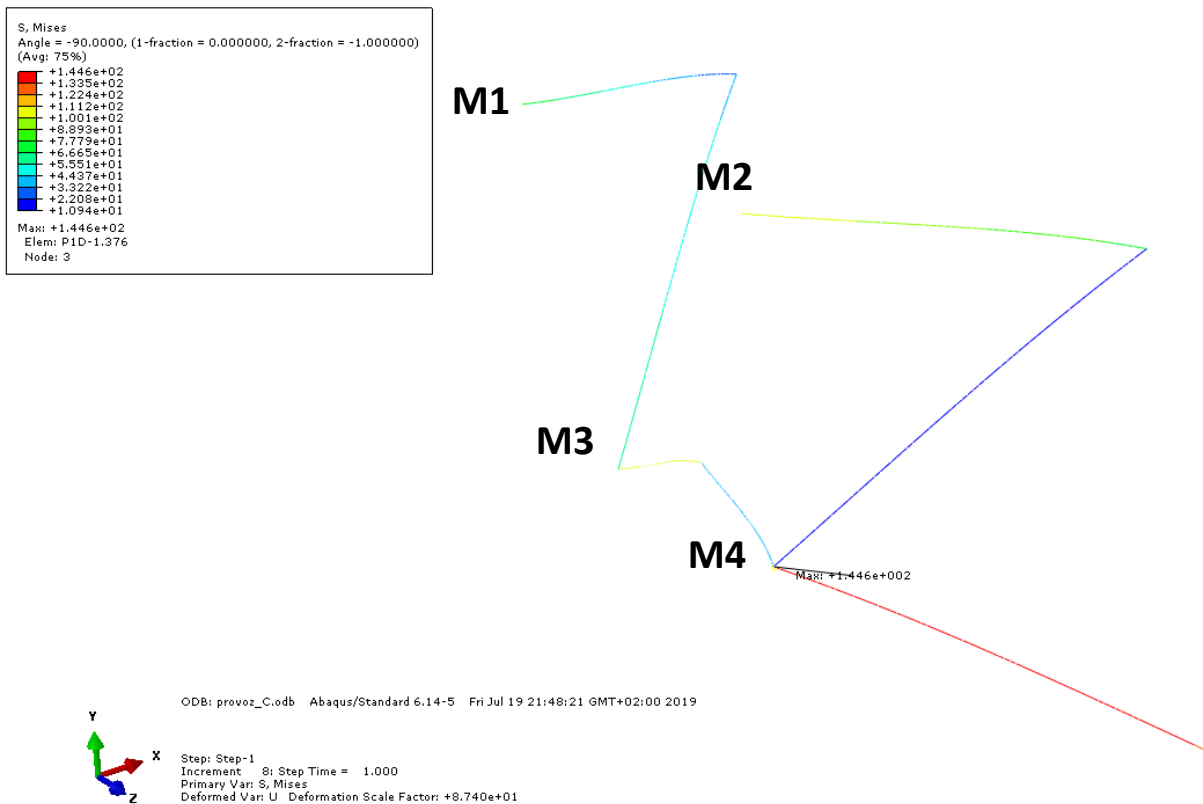
Výsledná redukovaná napětí jsou uvedena v tabulce níže.

Tabulka 13 – Výsledná napětí z 1D analýzy při provozním zatížení

Napětí [MPa]	Prut 1	Prut 2	Prut 3	Prut 4	Prut 5	Prut 6	Prut 7
Návrh. Zat. 1	6,7	30,98	12,42	6,29	53,53	69,94	8,02
Návrh. Zat. 2	59,56	79,02	48,64	14,98	70,74	94,75	28,01
A	65,97	83,04	52,48	15,92	72,03	94,61	30,06
C	73,4	109,39	64,91	21,21	107,32	144,65	37,57
D	57,62	82,36	50,53	16,67	77,98	105,6	28,68
E	15,02	34,62	18,09	6,95	44,01	57,96	10,77
F	30,03	59,71	33,23	12,5	70,92	93,97	19,19
G	10,19	13,75	10,48	2,52	36,88	49,16	2,02
Boční UL2	22,66	21,16	17,83	15,84	13,78	9,86	5,46
Boční ASTM	25,49	23,8	20,06	17,82	15,5	11,1	6,15
Pozemní	40,42	66,76	38,46	13,2	70,87	94,81	22,34

Poznámka k tabulce: Uvedené napětí při bočním zatížení platí pro působení bočné síly v kladném směru osy z. Při působení síly v opačném (záporném směru osy z) dojde k vyvolání stejných hodnot napětí, jako při působení ve směru kladném.

Maximální hodnota napětí nastává v prutu 6 při zatížení v bodě C letové obálky, konkrétně v bodě M4. Maximální hodnoty složek deformací jsou dosaženy rovněž při zatížení v bodě C letové obálky, a to 0,25 mm v záporném směru osy x (bod M2) a 0,3 mm v záporném směru osy y (bod M1). Hodnoty složek deformací ve směru osy z jsou menší než 0,1 mm. Výstup z výpočtu v bodě C obálky je vidět na obr. 29 níže.



Obrázek 29 – Výsledná provozní zatížení v bodě C letové obálky

7.2.3 Výsledná napětí při početním zatížení

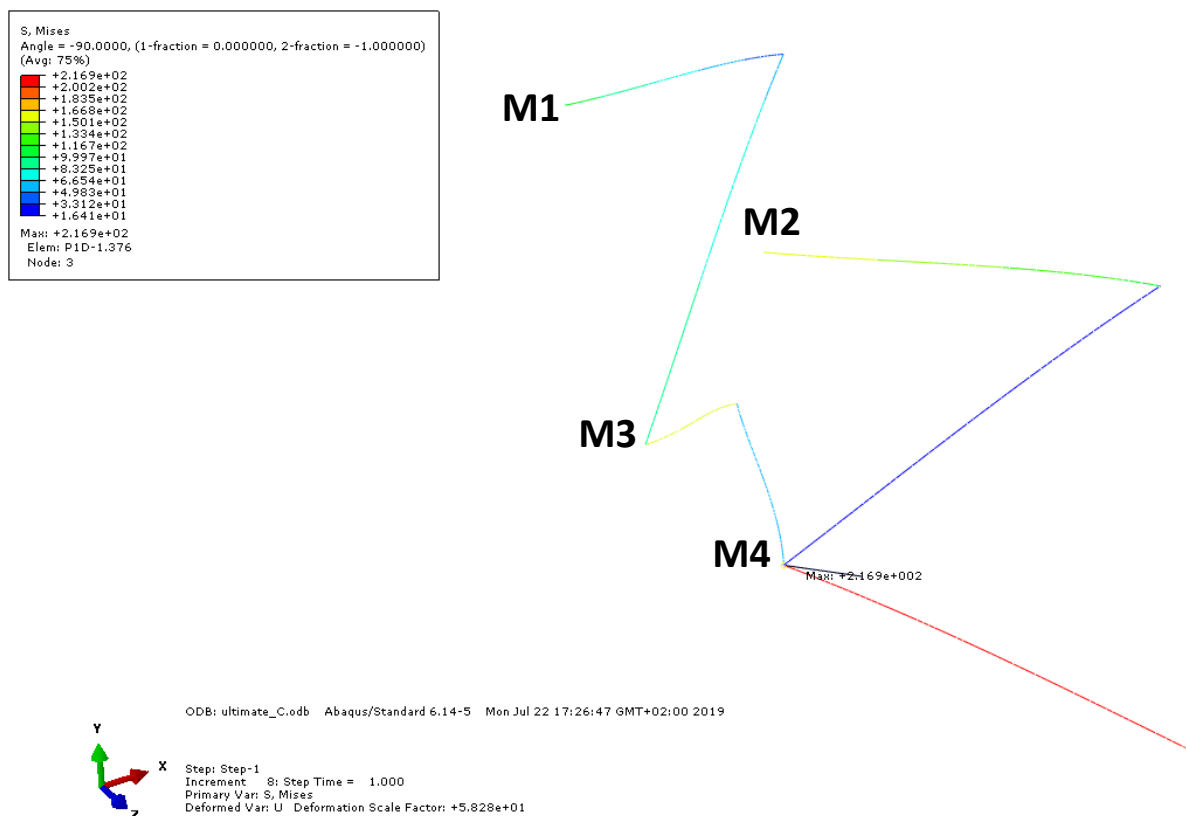
Výsledná redukovaná napětí při početním zatížení ukazuje tabulka níže.

Tabulka 14 – Výsledná napětí z 1D analýzy při početním zatížení

Napětí [MPa]	Prut 1	Prut 2	Prut 3	Prut 4	Prut 5	Prut 6	Prut 7
Návrh. Zat. 1	86,57	101,16	66,44	19,74	83,5	106,15	38,4
Návrh. Zat. 2	89,34	118,55	72,97	22,47	106,13	142,15	42,03
A	98,96	124,58	78,72	23,89	108,05	141,94	45,11
C	110,09	164,07	97,36	31,81	160,97	216,95	56,35
D	86,44	123,55	75,81	25,01	117	158,36	43,02
E	22,54	51,93	27,14	10,42	66,01	86,93	16,15
F	45,05	89,56	49,84	18,75	106,38	140,96	28,79
G	15,28	20,63	15,71	3,78	55,31	73,73	3,04
Boční UL2	33,98	31,75	26,75	23,76	20,68	14,8	8,19
Boční ASTM	38,24	35,72	30,1	26,74	23,26	16,65	9,22
Pozemní	60,63	100,15	57,69	19,8	106,3	142,2	33,51

Poznámka k tabulce: Platí stejná skutečnost jako z poznámky k tabulce 13

Maximální hodnoty napětí je dle očekávání dosaženo stejně jako při provozním zatížení v bodě C letové obálky v prutu 6 a místě M4. Maximální hodnoty složek deformací jsou dosaženy také ve stejných bodech, jako při provozním zatížení, a to v bodě C obálky a o velikostech 0,37 mm v záporném směru osy x (bod M1) a 0,45 mm v záporném směru osy y (bod M2). Hodnoty deformací ve směru osy z jsou opět menší než 0,1 mm. Výstup z výpočtu je možno vidět na obr. 30 níže.



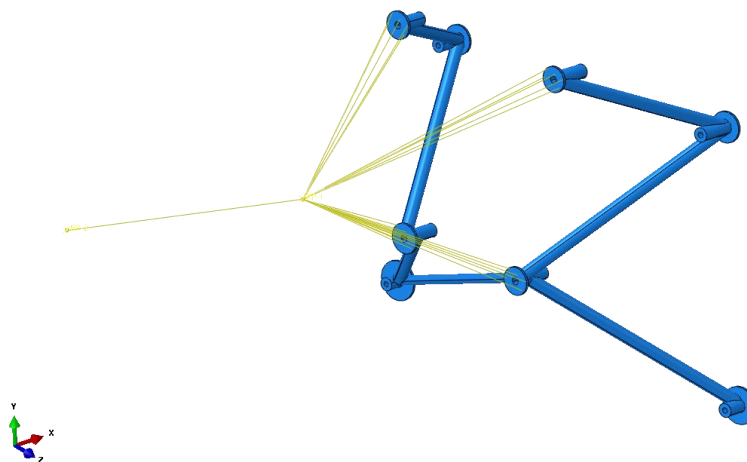
Obrázek 30 - Výsledná početní zatížení v bodě C letové obálky

7.3 3D analýza

7.3.1 Stanovení výpočtového modelu

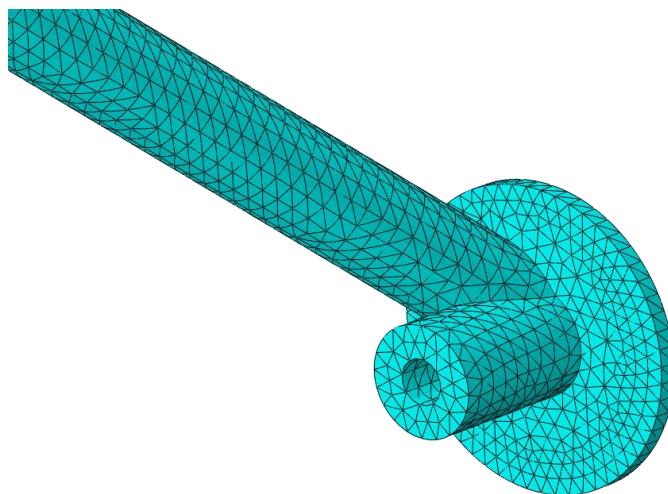
Jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, 3D analýza již počítá s reálným modelem konstrukce. Ten byl vytvořen dle kapitoly 6 této práce. V modelu nejsou uvažovány svary, které však svou přítomností v důsledku přidaného materiálu zvyšují únosnost spoje a výpočet se tak bude pohybovat na bezpečné straně. Dále je předpokládán vznik nízkých vnitřních napětí vlivem tepelného působení. Model byl následně vyexportován do formátu STEP (.stp) a nahrán stejně jako v případě 1D analýzy do výpočtového programu.

Postup stanovení podmínek výpočtu je obdobný jako u 1D modelu. Jako první byly svázány působíště namáhání s ložem. Zde oproti 1D modelu byla vazba Coupling (distribuuující namáhání a svazující všechny stupně volnosti) svázána ne s body, ale se čtyřmi čelními plochami závěsů lože směrem k motoru, kde je i lože fakticky spojeno se silentbloky motoru. Použitelnost tohoto zjednodušení byla již odůvodněna v kapitole 7.2.1. V dalším kroku pak byly vetknuty čtyři čelní plochy závěsů směrem k motorové přepážce, což má reprezentovat upevnění lože k motorové přepážce. Tento krok byl rovněž odůvodněn v kapitole 7.2.1. Tímto jsou okrajové podmínky definovány a výsledek je možné vidět na obr. 31.



Obrázek 31 – Výpočtový 3D model lože

Model byl dále vysítován pomocí prostorových elementů. Použity byly kvadratické desetiuzlové čtyřstěny. Globální velikost elementů byla zvolena 3 mm. Volba menší velikosti nebyla možná, jelikož výuková licence programu je omezena. Síť tvoří 112 369 elementů. Analýzou sítě programu Abaqus bylo zjištěno 0 chyb a 272 varování (0,24 procent z celkového počtu elementů), které upozorňovali na ne-rovnoramennost čtyřstěňů. Tyto elementy se však nacházejí mimo kritické oblasti. Detail sítě kolem uzlu bodu P4 je na obr. 32 níže.



Obrázek 32 – Detail sítě kolem uzlu bodu P4

7.3.2 Výsledná provozní napětí

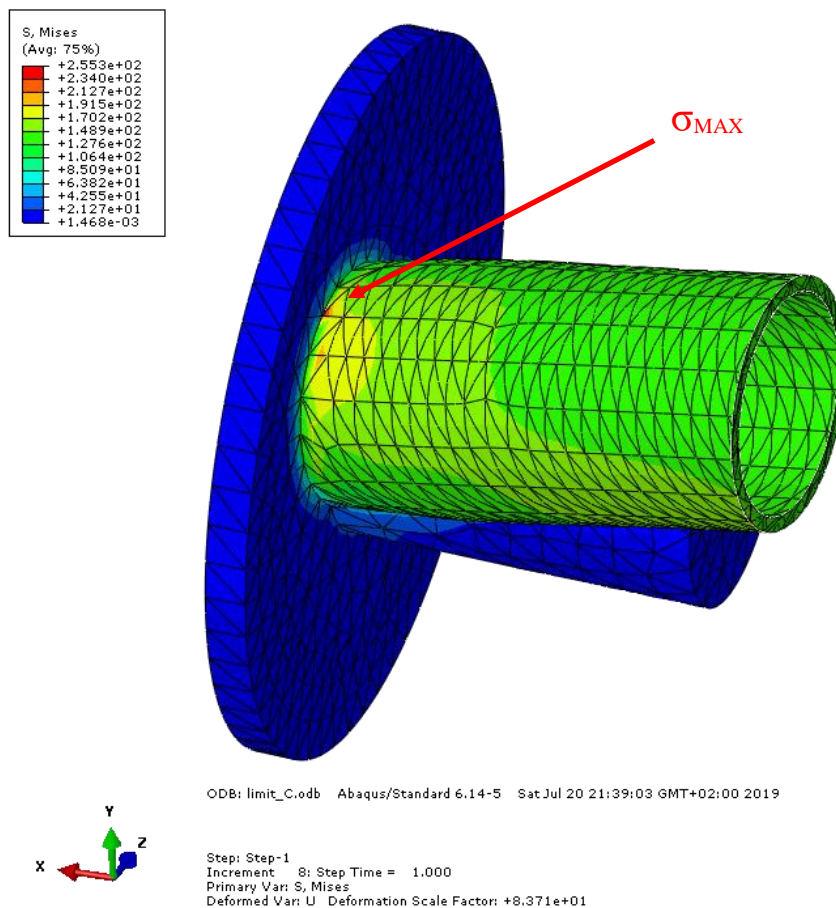
Výsledná redukovaná napětí při působení provozního zatížení jsou uvedena v tabulce níže. Oproti výsledkům z 1D modelu zde nejsou uvedeny maximální napětí v jednotlivých prutech, ale bude zde uvedeno maximální napětí vzniklé v rámci celé konstrukce lože spolu s místem, kde toto napětí vzniklo. Důvodem je již zmiňovaná komplexnost, kterou poskytuje 3D model oproti 1D.

Výsledná provozní napětí jsou:

Tabulka 15 – Výsledná provozní napětí z 3D výpočtu MKP

	Napětí [MPa]	Místo
Návrh. Zat. 1	108,7	Spojení prutu 2 a závěsu M2
Návrh. Zat. 2	165,3	Spojení prutu 6 a závěsu P4
A	164,2	Spojení prutu 6 a závěsu P4
C	255,3	Spojení prutu 6 a závěsu P4
D	186,1	Spojení prutu 6 a závěsu P4
E	107,3	Spojení prutu 6 a závěsu P4
F	169,1	Spojení prutu 6 a závěsu P4
G	78,0	Spojení prutů 5 a 7
Boční UL2	35,9	Spojení prutu 1 a závěsu M1
Boční ASTM	40,4	Spojení prutu 1 a závěsu M1
Pozemní	168,6	Spojení prutu 6 a závěsu P4

Maximální redukované napětí působí podle očekávání při zatížení v bodě C letové obálky v místě spojení prutu 6 se závěsem bodu P4. Detail tohoto místa je vidět na obr. 33 níže.



Obrázek 33 – Detail spojení prutu 6 se závěsem bodu P4 (provozní zatížení)

Maximální hodnoty složek deformací jsou dosaženy také při zatížení v bodě C letové obálky, a to 0,24 mm v záporném směru osy x (bod M2) a 0,29 mm v záporném směru osy y (bod M1). Hodnoty složek deformací ve směru osy z jsou menší než 0,1 mm.

7.3.3 Výsledná početní napětí

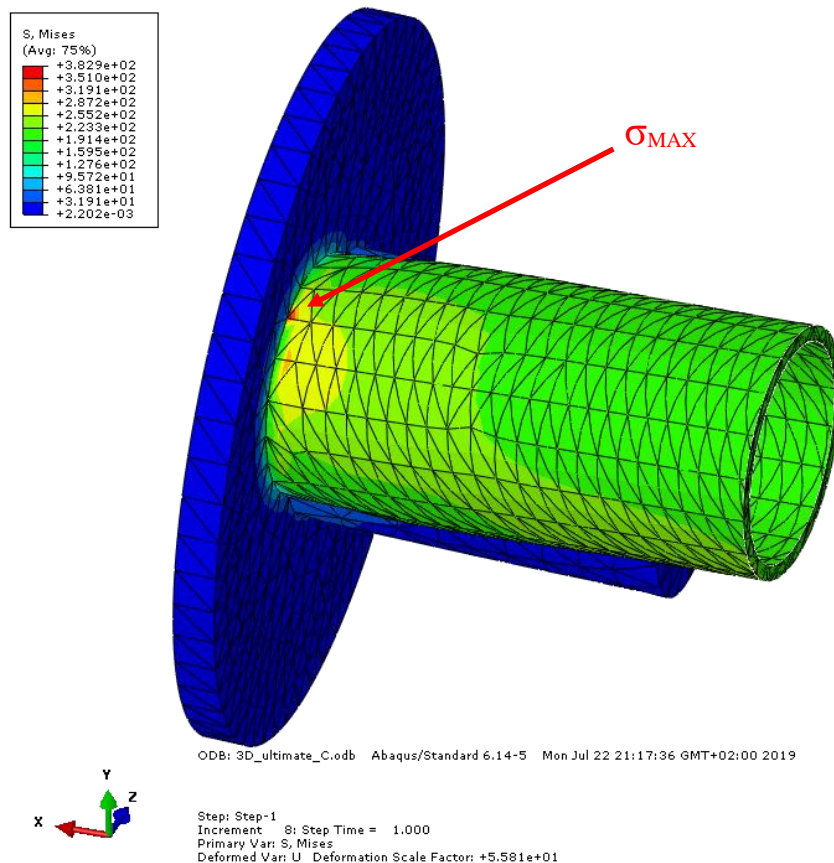
Maximální vzniklá redukovaná početní napětí včetně míst, kde působí jsou uvedena v tabulce níže.

Tabulka 16 – Výsledná početní napětí z 3D výpočtu MKP

	Napětí [MPa]	Místo
Návrh. Zat. 1	163,0	Spojení prutu 2 a závěsu M2
Návrh. Zat. 2	249,0	Spojení prutu 6 a závěsu P4
A	246,3	Spojení prutu 6 a závěsu P4
C	382,9	Spojení prutu 6 a závěsu P4
D	279,2	Spojení prutu 6 a závěsu P4
E	156,9	Spojení prutu 6 a závěsu P4

F	255,8	Spojení prutu 6 a závěsu P4
G	112,4	Spojení prutů 5 a 7
Boční UL2	53,9	Spojení prutu 1 a závěsu M1
Boční ASTM	60,6	Spojení prutu 1 a závěsu M1
Pozemní	253,0	Spojení prutu 6 a závěsu P4

Maximální redukované napětí působí stejně jako v případě provozního zatížení v bodě C letové obálky v místě spojení prutu 6 se závěsem bodu P4. Detail tohoto místa je vidět na obr. 34 níže.



Obrázek 34 – Detail spojení prutu 6 se závěsem bodu P4 (početní zatížení)

Maximální hodnoty složek deformací jsou dosaženy rovněž při zatížení v bodě C letové obálky, a to 0,37 mm v záporném směru osy x (bod M2) a 0,43 mm v záporném směru osy y (bod M1). Hodnoty složek deformací ve směru osy z se pohybují těsně okolo 0,1 mm.

7.4 Výběr zatížení pro pevnostní zkoušku

Na základě výsledků z 1D a 3D výpočtů je možné vyvodit určité závěry. Velikosti maximálních hodnot redukovaných napětí při jednotlivých případech namáhání ukazují, že počet relevantních případů lze zúžit z jedenácti na tři. Tyto tři případy obsáhnou hodnotami maximálních napětí a deformací zbylé případy, které jsou tak jejich podmnožinou. Toto zúžení je vhodné provést vzhledem k časové náročnosti realizace pevnostní zkoušky pro větší počet případů namáhání.

Vybrané tři případy pro pevnostní zkoušku jsou tedy následující:

- Příklad C letové obálky (který je nadmnožinou bodů A a D obálky, návrhových zatížení 1 a 2 a pozemního zatížení),
- Příklad F letové obálky (který je nadmnožinou bodů E a G),
- Příklad bočního zatížení dle ASTM (který je nadmnožinou bočního zatížení dle UL2/LTF-UL).

Tyto případy budou dále využity pro pevnostní kontrolu konstrukce.

8. Pevnostní kontrola

V rámci této kapitoly bude provedena pevnostní kontrola prutů motorového lože, kontrola šroubových spojení lože a kontrola svarů. Vstupními hodnotami pro kontrolní výpočty jsou data z MKP analýzy lože.

8.1 Kontrola prutů

8.1.1 Kontrola na kombinované namáhání

Pro hodnocení napjatosti těles se v pružnosti a pevnosti používají tzv. teorie pevnosti. Hlavním principem teorií pevnosti je redukce obecné napjatosti (dvojosé/trojosé) na jednoosou napjatost. Výsledkem je tzv. redukované napětí. Toto napětí pak můžeme srovnat s výsledky tahové pevnostní zkoušky. Teorie se dále dělí podle typu materiálu, kde existují teorie pro materiály křehké a materiály houževnaté. [19]

V této práci je používán materiál ocel, který se řadí mezi materiály houževnaté. Bude použita tzv. Energetická teorie, jinak nazývaná H.M.H. (podle autorů pánů Hubera, Misese a Henckyho), nebo krátce Mises. Níže je uveden vztah, pomocí kterého se určuje redukované napětí teorie H.M.H:

$$\begin{aligned}\sigma_{red} &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot \tau_x^2 \cdot \tau_y^2 \cdot \tau_z^2}\end{aligned}\quad (9)$$

Výsledná napětí z pevnostních analýz v kapitole 7 jsou právě redukovaná napětí podle této teorie (lze si všimnout v legendě výstupů z výpočtového programu označení „Mises“).

Tato napětí budou nyní zkontrolována k mezním stavům materiálu. To bude vyjádřeno pomocí tzv. jistot. Jistoty jsou dvojího druhu, a to jistota provozní, určující poměr meze kluzu materiálu k provoznímu zatížení (vztah 10) a jistota početní, určující poměr meze pevnosti materiálu k početnímu zatížení (vztah 11). Výsledné hodnoty jistot musí být pro vyhovění konstrukce větší nebo rovny jedné.

$$j_{prov} = \frac{R_e}{\sigma_{prov}^{red}} \geq 1, \quad [1] \quad (10)$$

$$j_{poč} = \frac{R_m}{\sigma_{poč}^{red}} \geq 1, \quad [1] \quad (11)$$

Podkladem pro výpočet jsou maximální redukovaná napětí z 3D analýzy, jelikož tyto napětí dosahovaly vyšších hodnot než napětí z 1D analýzy. Jednotlivá maxima pak vznikala taktéž v prutech.

Níže už je uvedena tabulka ukazující výsledné hodnoty jistot při kombinovaném namáhání prutů motorového lože.

Tabulka 17 – Výsledné hodnoty jistot kombinovaného namáhání prutů lože

	$j_{\text{provozní}} [1]$	$j_{\text{početní}} [1]$
Návrh. Zat. 1	4,5	4,2
Návrh. Zat. 2	3,0	2,8
A	3,0	2,8
C	1,9	1,8
D	2,6	2,5
E	4,6	4,4
F	2,9	2,7
G	6,3	6,1
Boční UL2	13,6	12,8
Boční ASTM	12,1	11,4
Pozemní	2,9	2,7

8.1.2 Kontrola na vzpěr

Pruty jsou v některých případech namísto tahové osové síly namáhány tlakovou osovou silou, respektive na vzpěr. Takto namáhané pruty je nutné kontrolovat na ztrátu stability. Při překročení mezního napětí ztráty stability může dojít k vybočení prutu.

V základním řešení vzpěru rozlišujeme dvě oblasti, oblast Eulerovu (lineární oblast materiálu) a oblast Tetmajerovu (zjednodušené řešení za lineární oblastí materiálu). Do jaké z oblastí konkrétní řešený případ spadá se určí podle štíhlosti prutu λ . Pokud je štíhlost prutu větší, než je tzv. mezní štíhlost λ_m , řešíme vzpěr podle Eulera. Pokud je štíhlost prutu menší než mezní, řešíme vzpěr podle Tetmajera.

Štíhlost prutu se určí podle následujícího vztahu:

$$\lambda = l \sqrt{\frac{S}{J_{\min}}} \quad (12)$$

Kde l představuje délku prutu a J kvadratický moment průřezu. Délky prutů jsou vzaty z 1D modelu lože.

Mezní štíhlost pak podle vztahu:

$$\lambda_m = \sqrt{n_p \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} \quad (13)$$

Pro výpočet mezní štíhlosti je nutné určit tzv. mez úměrnosti materiálu (σ_u). Ta je pro oceli o vyšší pevnosti 260 MPa. Dále je nutné určit případ vzpěru, který je určen parametrem n [1]. V našem případě bude uvažován třetí případ vzpěru ($n_p=2$), pro který platí, že jeden konec prutu je uvažován jako vetknutý a druhý konec je uložen do posuvné kloubové vazby. Mezní štíhlost tedy bude:

$$\lambda_m = \sqrt{2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000}{260}} = 126,3 [1]$$

V následující tabulce jsou uvedeny parametry prutů:

Tabulka 18 – Parametry prutů pro určení namáhání na vzpěr

	Prut 1	Prut 2	Prut 3	Prut 4	Prut 5	Prut 6	Prut 7
I [mm ⁴]	294,4	289,1	347,2	336,0	381,5	364,4	526,7
S [mm ³]	53,4	53,4	53,4	53,4	53,4	53,4	40,8
J_{min} [mm ⁴]	1936	1936	1936	1936	1936	1936	868
λ [1]	49	48	58	56	63	61	114

Jelikož jsou štíhlosti všech prutů menší než mezní, bude kritické napětí prutů určeno podle Tetmajera. Kritické napětí podle Tetmajera se určí podle vztahu:

$$\sigma_T = \sigma_{Kd} - \frac{\sigma_{Kd} - \sigma_u}{\lambda_m} \cdot \lambda \quad (14)$$

Kde σ_{Kd} je mez kluzu v tlaku, která je vyšší než mez kluzu v tahu, nicméně v řešeném případě budeme uvažovat jejich rovnost (490 MPa). Mez úměrnosti σ_u budeme uvažovat o velikosti 260 MPa, která se obecně užívá pro oceli o vyšší pevnosti ($R_m > 500$ MPa).

V posledním kroku pak již určíme kritickou tlakovou sílu podle vztahu:

$$F_{kr} = \sigma_T \cdot S \quad (15)$$

Tabulka níže ukazuje velikosti kritických sil a napětí.

Tabulka 19 – Výsledné kritické namáhání prutů na vzpěr

	Prut 1	Prut 2	Prut 3	Prut 4	Prut 5	Prut 6	Prut 7
σ_T [MPa]	401	403	385	388	375	380	282
F_{kr} [MPa]	21410	21496	20557	20738	20003	20279	11505

Kritické síly budou nyní porovnány se silami působícími na pruty. Ty byly získány z 1D analýzy lože. Stejně jako v předchozí kapitole budou určeny dvě jistoty, a to podle vztahů:

$$j_{prov} = \frac{F_{kr}}{F_{prov}} \quad (16)$$

$$j_{poč} = \frac{F_{kr}}{F_{poč}} \quad (17)$$

Velikosti výsledných jistot jsou uvedeny v tabulkách níže. Prázdná buňka znamená, že na prut nepůsobí tlaková osová síla.

Tabulka 20 – Jistoty na vzpěr při provozním zatížení

Jistota $j_{provní}$	Prut 1	Prut 2	Prut 3	Prut 4	Prut 5	Prut 6	Prut 7
Bod C					3,5	2,6	7,5
Bod F	13,4	6,7	11,6	31,1			
Boční zatížení (ASTM)		16,9		21,8		34,3	46,0

Tabulka 21 – Jistoty na vzpěr při početním zatížení

Jistota $j_{početní}$	Prut 1	Prut 2	Prut 3	Prut 4	Prut 5	Prut 6	Prut 7
C					2,3	1,8	5,0
F	8,9	4,5	7,7	20,7			
Boční zatížení (ASTM)		11,3		14,5		22,9	30,6

8.2 Šroubové spojení lože s motorovou přepážkou

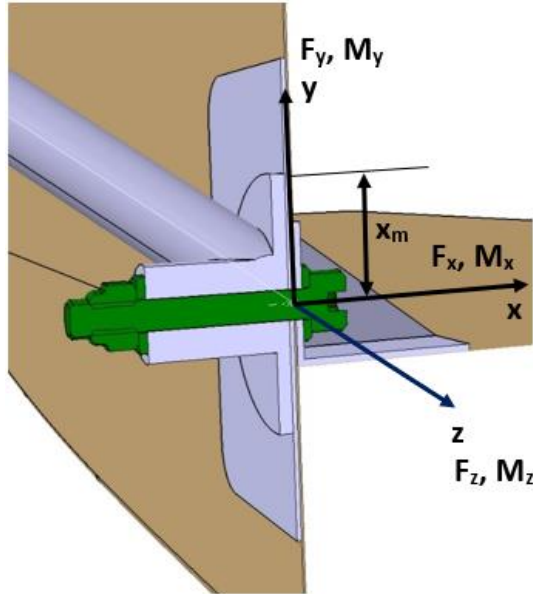
8.2.1 Rozbor zatížení šroubu

Šrouby spojující lože s přepážkou jsou stejně jako lože samotné zatěžovány kombinovaným namáháním. Jedná se o osovou sílu a moment (F_x, M_x) a síly a momenty kolmé na osu šroubu ($F_y, M_y; F_z, M_z$). Kromě těchto sil a momentů je šroub navíc přitěžován silou od předpětí ve spoji, promítající se do osového zatížení. Situace je znázorněna na obr. 35. Vstupními hodnotami pro určení namáhání jsou reakce získané z 1D analýzy.

Velikost šroubů je zadána výrobcem letounu (M8). Pevnostní třída šroubu bude zvolena 12.9, jejíž parametry jsou:

Tabulka 22 - Vlastnosti šroubu M8 použitého pro spojení lože s motorem

Šroub	Pevnostní třída	R_p [MPa]	R_m [MPa]
M8	12.9	1080	1200



Obrázek 35 – Schéma zatížení šroubu ve spoji lože s přepážkou

Do zatížení šroubu se nepřímo promítnout příčné síly F_y a F_z , které působí v rovině spoje. Výslednice těchto sil se určí vektorovým součtem, a to následovně:

$$F_{yz} = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} \quad (18)$$

Toto zatížení bude přenášeno třením mezi závěsem lože a přepážkou, respektive jejím výztužným plechem. Třecí síla vzniká od předpětí ve spoji. Musí platit, že po zatížení spoje maximální osovou tahovou silou bude zbytková přitlačná síla větší nebo rovna působící příčné síle. Platí:

$$F_T = F_{př} \cdot f \geq F_{yz} \Rightarrow F_{př} \geq \frac{F_{yz}}{f} \quad (19)$$

Minimální velikost příčné síly bude použita při návrhu předpětí spoje.

Dále bude určen převod ohybových momentů na přírůstek osové síly, který vychází z úvahy, že závěs lože se při působení ohybového moment M_{yz} opře o přepážku na rameni x_m a lze ho tak nahradit silou působící přes právě toto rameno (situace je vidět na obr. 35 výše). Výslednice momentů se určí vektorovým součtem momentů, a to následovně:

$$M_{yz} = \sqrt{M_y^2 + M_z^2} \quad (20)$$

Přírůstek osové síly se pak určí podle vztahu:

$$\Delta F_m = \frac{M_{yz}}{x_m} \quad (21)$$

Celková osová síla pak bude:

$$F_p = F_x + \Delta F_m \quad (22)$$

8.2.2 Předpětí ve spoji

Dalším krokem je určení potřebného předpětí pro bezpečné přenesení osových sil. Jako první budou určeny změny sil ve šroubu a v přírubách, které vycházejí z rovnosti deformací šroubu a přírub a tím pádem dochází k přerozdělení osového zatížení v poměru jejich tuhostí. Platí vztahy:

$$\Delta F_s = F_p \frac{c_s}{c_s + c_{př}} \quad (23)$$

$$\Delta F_{př} = F_p \frac{c_{př}}{c_s + c_{př}} \quad (24)$$

Změny sil se pak projeví jako přírůstek síly ve šroubu a úbytek síly v přírubách. Platí vztahy:

$$F_s = F_0 + \Delta F_s \quad (25)$$

$$F_{př} = F_0 - \Delta F_{př} \quad (26)$$

V případě zatížení tlakovou se osová síla přerozdělí opačně, a to úbytkem síly na šroubu a přírůstkem síly na přírubách. Platí vztahy:

$$F_s^I = F_0 - \Delta F_s \quad (27)$$

$$F_{př}^I = F_0 + \Delta F_{př} \quad (28)$$

Pro těsnost spoje musí platit, že síla na přírubách (resp. přítlačná síla) nesmí být menší než nula. Přítlačná síla se pak volí v závislosti na osově síle při žádané těsnosti spoje. To určuje součinitel zbytkového předpětí ψ , který se volí mezi 0,2 a 1,3. Platí vztahy:

$$F_{př} > 0$$

$$F_{př} = F_p \cdot \psi \quad (29)$$

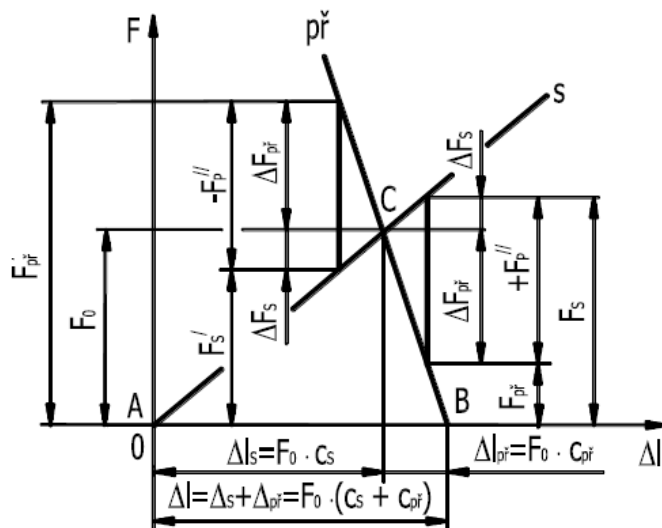
$$\psi = 0,2 \div 1,3$$

Potřebné předpětí ve šroubovém spoji se při zvolené těsnosti určí podle vztahu, který vychází z diagramu předepjatého spoje (na obr. 36):

$$F_0 = F_{př} + \Delta F_{př} \quad (30)$$

Respektive pro tlakové osově zatížení:

$$F_0 = F_{př} - \Delta F_{př} \quad (31)$$



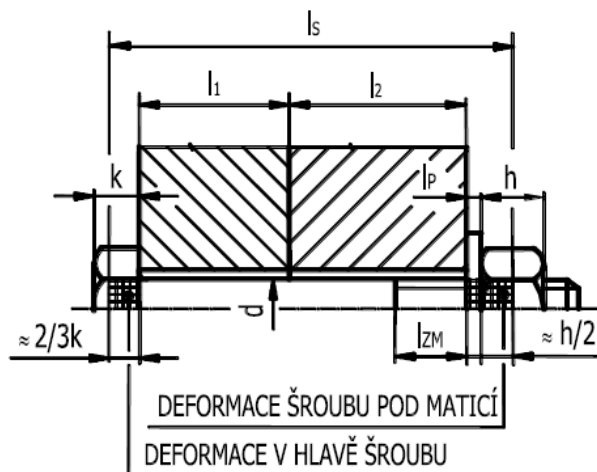
Obrázek 36 – Aplikace diagramu předepjatého spoje pro provozní sílu $\pm F_p$ [20]

8.2.3 Tuhost šroubu a přírub

Tuhost šroubu se určí podle experimentálního vztahu dle [20]:

$$\frac{1}{c_s} = \frac{1}{E_s} \left[\frac{2/3 \cdot k}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} + \frac{l_1 + l_2 - l_{z_M}}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} + \frac{l_{z_M} + l_p}{\pi \cdot \left(\frac{d_3}{2}\right)^2} + \frac{h/2}{\pi \cdot \left(\frac{d_2}{2}\right)^2} \right] \quad (32)$$

A podle následujícího schématu:



Obrázek 37 – Schéma pro výpočet tuhosti šroubu [20]

Spoj je realizován pomocí šroubu ISO 4762 M8, matice ISO 7040 a dvou podložek ISO 7090. Parametry spojovacích prvků ($d, d_2, d_3, b, k, l_p, h, d_{sk}$) zde nebudou uvedeny, jelikož vycházejí

z příslušných norem. Parametry závitu (i , P) vychází z normy ISO 724. Parametry spoje, respektive přírub jsou:

Tabulka 23 – Parametry spojovacích přírub

[mm]	P1	P2	P3	P4
l_1	4	4	3	3
l_2	40	50	25	30
l_{zm}	13,8	13,8	12,8	12,8
x_m	22	22	30	27

Tuhost přírub se určí podle vztahu [20]:

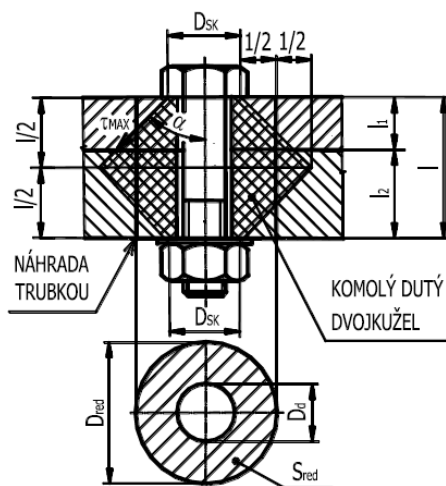
$$c_{př} = \frac{E_{př} \cdot S_{red}}{l} \quad (33)$$

Kde:

$$S_{red} = \frac{\pi}{4} (D_{red}^2 - D_d^2) \quad (34)$$

$$D_{red} = D_{SK} + \frac{l}{2} \tan \alpha \quad (35)$$

Tyto vztahy vycházejí ze zjednodušení, že oblast pružných deformací příruby je předpokládána ve tvaru dutého komolého dvojkružel a příruby se pak zjednodušují do tvaru trubky o průměrech D_{red} a D_d . Situaci znázorňuje obr. 38 níže.



Obrázek 38 – Výpočet tuhosti přírub s průběžným šroubem [20]

Spočtené tuhosti ukazuje tabulka níže.

Tabulka 24 – Výsledné tuhosti šroubů a přírub

	P1	P2	P3	P4
C_s [1]	159805	137754	216915	195659
$C_{př}$ [1]	3678415	3943884	3336092	3425594

8.2.4 Utahovací moment

Utahovací moment se určí dle vztahu:

$$M_U = M_{TZ} + M_{TM} \quad (36)$$

Kde M_{TZ} je moment tření v závitu a udává ho vztah:

$$M_{TZ} = F_0(\gamma + \varphi') \frac{d_2}{2} \quad (37)$$

Úhel stoupání závitu γ se určí podle vztahu:

$$\tan \gamma = \frac{i \cdot P}{\pi \cdot d_2} \quad (38)$$

Člen i značí počet chodů závitu a člen P rozteč závitu. Redukovaný třecí úhel φ' je pro metrický závit určen vztahem:

$$\tan \varphi' = 1,15 \cdot f_z \quad (39)$$

Součinitel smykového tření na metrickém závitu f_z je 0,15.

Moment tření pod hlavou šroubu a matice určuje vztah:

$$M_{TM} = F_0 \cdot f_M \left(\frac{D_d + D_{sk}}{4} \right) \quad (40)$$

8.2.5 Výpočet předpětí spoje

Jak již bylo uvedeno, příčná síla (síla působící v rovině spoje) se přenáší třením, které vzniká od předpětí ve spoji. Pro návrh předpětí je tedy důležitá maximální velikost příčné síly. Ta vzniká v bodě P3 při početním zatížení v bodě C obálky. Její velikost je:

$$F_{yz} = 8\,062\,N$$

Minimální přítláčná síla se určí jako podíl maximální příčné síly a koeficientu smykového tření mezi materiály. Vztah vypadá následovně:

$$F_{př} \geq \frac{F_{yz}}{f} \quad (41)$$

Standardní koeficient smykového tření mezi dvěma ocelovými díly je 0,15. Vzhledem k působení značné příčné síly bude ale nutné dosáhnout vyššího koeficientu tření, aby výsledné

minimální předpětí bylo vzhledem k velikosti šroubu únosné. Pokud by byl zachován běžný koeficient tření, bylo by nutné průměr šroubu zvětšit 2 stupně.

Koeficient bude navržen o velikosti 0,5, jehož lze dosáhnout povrchovou úpravou stykových ploch, například pískováním. [20]

Výsledná minimální velikost přítláčné síly pak bude:

$$F_{př} \geq \frac{8062}{0,76} = 16\,124\, N$$

Dále je potřeba určit maximální tahovou osovou sílu (včetně přírůstku od momentů). Ta působí v bodě P4 rovněž při početním zatížení v bodě C obálky. Její velikost je:

$$F_p = 7\,518\, N$$

Úbytek síly na přírubách se určí podle rovnice 24 a bude následující velikosti:

$$\Delta F_{př} = 7\,101\, N$$

Výsledná minimální velikost předpětí pak dle rovnice 30 bude:

$$F_0 = 16\,124 + 7\,101 = 23\,225\, N$$

Velikost předpětí F_0 tedy volíme 23 225 N, a to pro všechny šrouby. Toto předpětí bude vyvoláno utahovacím momentem, určeným dle rovnice 36:

$$M_U = 37\, N \cdot m$$

8.2.6 Namáhání šroubu

Kritický případ z hlediska namáhání šroubu je v místě působení maximální osové tahové síly (spoj bodu P4 při početním zatížení v bodě C obálky). Ta již byla stanovena v předchozí podkapitole. Pro výpočet síly působící na šroub je nejdříve potřeba určit přírůstek síly od působící osové síly, který dle rovnice 23 vychází následovně:

$$\Delta F_s = 417\, N$$

Výsledná síla ve šroubu se určí podle rovnice 25 a bude následující:

$$F_s = 23\,225 + 417 = 23\,643\, N$$

Napětí v tahu šroubu se určí podle známého vztahu a vychází:

$$\sigma_T = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F_s}{\pi \cdot \left(\frac{d_3}{2}\right)^2} \quad (42)$$

$$\sigma_T = 720\, MPa$$

Krouticí moment působící na šroub vyvolaný utažením matice se určí dle vztahu níže a je následovný:

$$\tau_K = \frac{M_K}{W_K} = \frac{F_Z \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi}{16} \cdot d_3^3} = \frac{F_0 \cdot (\gamma + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi}{16} \cdot d_3^3} \quad (43)$$

$$\tau_K = 362 \text{ MPa}$$

Redukované napětí podle Guesta se určí dle vztahu níže a dosahuje následující hodnoty:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4 \cdot \tau_k^2} \quad (44)$$

$$\sigma_{red} = 1021 \text{ MPa}$$

Jelikož výše spočtené redukované napětí bylo určeno pro početní zatížení, bude porovnáno s mezí pevnosti šroubu. Početní jistota tedy vychází:

$$j_{poč} = \frac{1\,200}{1\,021} = 1,1756$$

V následující tabulce jsou pro přehled uvedeny hodnoty početních a provozní jistot v bodě C obálky pro všechny šrouby ve spoji lože s motorem:

Tabulka 25 - Hodnoty jistot v bodě C obálky šroubů spoje lože-přepážka

	j_{prov} [1]	$j_{poč}$ [1]
P1	1,0722	1,1925
P2	1,0720	1,1927
P3	1,0615	1,1761
P4	1,0613	1,1756

Malý rozptyl velikostí jistot je způsoben zvoleným předpětím, které je stejné pro všechny šrouby. Dalším vlivem je dominantní přenos zatížení přírubami, které mají o řád vyšší tuhost.

8.3 Šroubové spojení lože s motorem

Šrouby spojující lože s motorem, respektive se silentbloky motoru, jsou stejně jako předešlý spoj namáhány kombinovaným zatížením. Postup výpočtu bude totožný s výpočtem z předchozí kapitoly.

Jak již bylo uvedeno v kapitole návrhu lože, průměr šroubů je dán výrobcem motoru. Dále musí být zvolena pevnostní třída šroubu, která je volena 12.9.

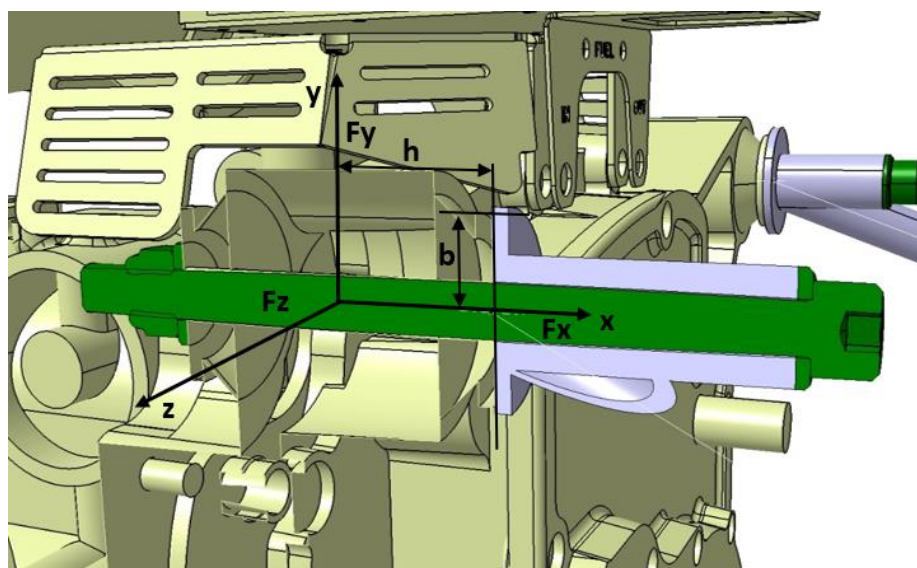
Vlastnosti šroubu jsou následující:

Tabulka 26 – Vlastnosti šroubu M10 použitého pro spojení lože s motorem

Šroub	Pevnostní třída	R _p [MPa]	R _m [MPa]
M10	12.9	1080	1200

8.3.1 Výpočet předpětí spoje

Podkladem pro určení potřebného předpětí ve spoji jsou reakční síly vznikající v úchytech motoru. Ty byly získány z rovnic statické rovnováhy. Spočtené předpětí spolu s přírůstkou od osových sil budou použity pro výpočet namáhání šroubu.



Obrázek 39 – Schéma zatížení šroubu ve spoji lože s motorem (bod M2)

Na šrouby působí osová síla F_x a síly kolmé na osu šroubu F_y a F_z . Výslednici kolmých sil získáme jejich vektorovým součtem, a to následovně:

$$F_{yz} = \sqrt{F_y^2 + F_z^2}$$

Účinkem této kolmé síly vzniká posouvající síla a silová dvojice na rameni h . Posouvající síla působí v rovině spoje a bude přenášena třením, které je vyvoláno od předpětí. Musí platit, že minimální přítláčná síla po zatížení spoje osovou tahovou silou bude větší nebo rovna působící příčné síle:

$$F_{př} \geq \frac{F_{yz}}{f}$$

Největší příčná síla vzniká v úchyty M2 při početním zatížení v bodě C obálky. Koeficient

smykového tření bude volen standardní (bez úprav povrchu), a to 0,15. Výsledná velikost a zároveň velikost minimální přitlačné síly je následující:

$$F_{př} \geq \frac{3972}{0,15} = 26\,481\, N$$

Silová dvojice, snažící se naklopit spojovanou část přes rameno b , vyvolá přírůstek tahové osové síly. Z momentové rovnováhy vyplývá:

$$\Delta F_M = \frac{F_{yz} \cdot h}{b}$$

Výsledná tahová osová síla tak bude:

$$F_P = F_x + \Delta F_M$$

Největší tahová osová síla a její přírůstek vzniká rovněž v úchytu M2 při početním zatížení v bodě C obálky. Její velikost je následující:

$$F_P = 5347 + 6951 = 12\,299\, N$$

Nyní bude určen přírůstek síly na přírubách. Pro jeho určení musí být známé tuhosti šroubů a přírub. Velikosti tuhostí včetně parametrů pro jejich určení ukazuje tabulka níže.

Tabulka 27 – Tuhosti šroubů a přírub ve spoji motoru a lože

	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_{zm} [mm]	c_s [1]	$c_{př}$ [1]
M1	40	63	7,2	133855	5977478
M2	50	63	7,2	123807	6282086
M3	50	63	7,2	123807	6282086
M4	50	63	7,2	123807	6282086

Úbytek síly v přírubách se určí dle vztahu 24 a bude:

$$\Delta F_{př} = 12\,061\, N$$

Minimální předpětí pak dle vztahu 30 bude o velikosti:

$$F_0 \geq 26\,481 + 12\,061 = 38\,542\, N$$

Velikost předpětí F_0 volíme 38 542 N pro všechny šrouby. Toto předpětí bude vyvoláno utahovacím momentem, určeným dle vztahu 36:

$$M_U = 77\, N \cdot m$$

8.3.2 Namáhání šroubu

Kritický případ z hlediska namáhání šroubu je v místě působení maximální osově tahové síly (úchyt M2 při početním zatížení v bodě C obálky). Ta již byla stanovena v předchozí podkapitole. Pro výpočet síly působící na šroub je dále potřeba určit přírůstek síly od osových sil, který dle vztahu 23 vychází následovně:

$$\Delta F_s = 238 \text{ N}$$

Výsledná síla ve šroubu se určí podle vztahu 25 a bude následující:

$$F_s = 38\,542 + 238 = 38\,780 \text{ N}$$

Napětí v tahu se určí podle vztahu 42 a vychází:

$$\sigma_T = 742 \text{ MPa}$$

Krouticí moment vyvolaný utažením matice je určen dle vztahu 43 a je následovný:

$$\tau_K = 371 \text{ MPa}$$

Redukované napětí podle Guesta pak dle vztahu 44 dosahuje následující hodnoty:

$$\sigma_{red} = 1049 \text{ MPa}$$

Jelikož redukované napětí bylo určeno pro početní zatížení, bude porovnáno s mezí pevnosti šroubu. Početní jistota tedy vychází:

$$j_{poč} = \frac{1200}{1049} = 1,144$$

V následující tabulce jsou pro přehled uvedeny hodnoty početních a provozní jistot v bodě C obálky pro všechny šrouby ve spoji lože s motorem:

Tabulka 28 – Hodnoty jistot v bodě C obálky šroubů spoje lože-motor

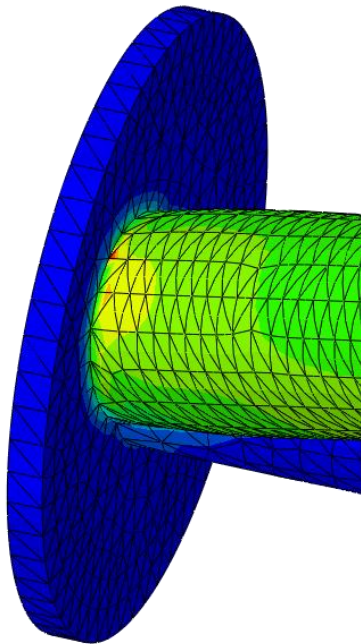
	j_{prov} [1]	$j_{poč}$ [1]
M1	1,0315	1,145
M2	1,0308	1,144
M3	1,0332	1,148
M4	1,0326	1,147

Malý rozptyl velikostí jistot je způsoben zvoleným předpětím, které je opět stejné pro všechny šrouby. Dalším vlivem je pak dominantní přenos zatížení přírubami, které mají o řád vyšší tuhost.

8.4 Kontrola svarových spojů

Pevnostní kontrola svarových spojů v této práci nebyla provedena. Důvodem je složitá geometrie svarů.

Jak již bylo uvedeno při tvorbě 3D modelu pro analýzu MKP, svar jakožto přidaný materiál sniží maximální napětí v místě spoje. Situaci výskytu zvýšeného napětí ve spoji ukazuje obr. 40 níže. Očekávané provedení spoje je pak vidět na obr. 41. Na něm je možné vidět značný návar až po kraj příruby závěsu právě v místě, kde se očekává výskyt zvýšeného napětí.



Obrázek 40 – Detail max. napětí ve spoji prutu 6 a závěsu lože (bod C)



Obrázek 41 – Očekávané provedení svaru ve spoji prutu se závěsem lože [4]

9. Hmotový rozbor

Hmotnost motorového lože byla určena pomocí programu Catia. Jedná se o hmotnost svařence, tedy finálního produktu, kde však nejsou uvažovány hmotnosti svarů. Hmotnost je:

$$m_{\text{lože}} = 1,806 \text{ kg}$$

Příslušenství, které se započítává do hmotnosti lože, tvoří šrouby, matice a podložky ve spojení lože s motorem. Tabulka níže udává hmotnost příslušenství:

Tabulka 29 – Hmotnost příslušenství lože

Položka	Počet kusů	Hmotnost [kg]
M10x130	1	0,0926
M10x140	3	0,0997
Matice	4	0,0117
Podložka	8	0,0036
Celkem	-	0,4670

Celková hmotnost sestavy tedy bude:

$$m = m_{\text{lože}} + m_{\text{přísl}} = 1,806 + 0,467 = 2,273 \text{ kg}$$

Poloha těžiště lože byla určena rovněž programem Catia. V kapitole 7.1 již byly určeny polohy těžišť motoru, vrtule a soustavy motoru s vrtulí. Lože posune těžiště soustavy nepatrně směrem proti směru letu. V tabulkách níže jsou uvedeny polohy jednotlivých těžišť dílů a celků v souřadném systému letounu a v souřadném systému motoru (viz. 7.1).

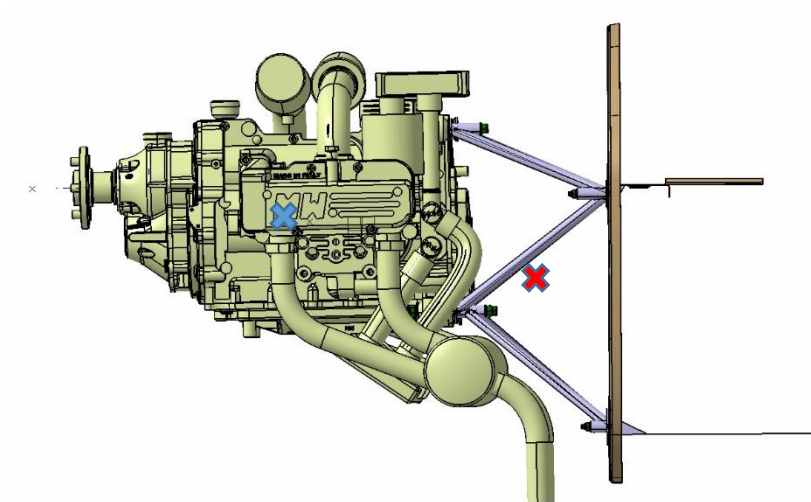
Tabulka 30 – Polohy těžišť v souř. sys. letounu

[mm]	x	y	z
Motor	2978,15	2942,55	13,14
Vrtule	2522,38	2998,61	-2,78
Mot+Vrt	2927,07	2948,66	11,36
Lože	3349,05	2850,44	3,92
Celek	2933,99	2947,05	11,23

Tabulka 31 – Polohy těžišť v souř. sys. motoru

[mm]	x	y	z
Motor	375	0	-64
Vrtule	-80	0	0
Mot+Vrt	324	0	-57
Lože	746,73	3,91	-149,56
Celek	331,67	11,22	-52,95

Polohy těžišť lože a výsledného celku ukazuje obr. 40 níže.

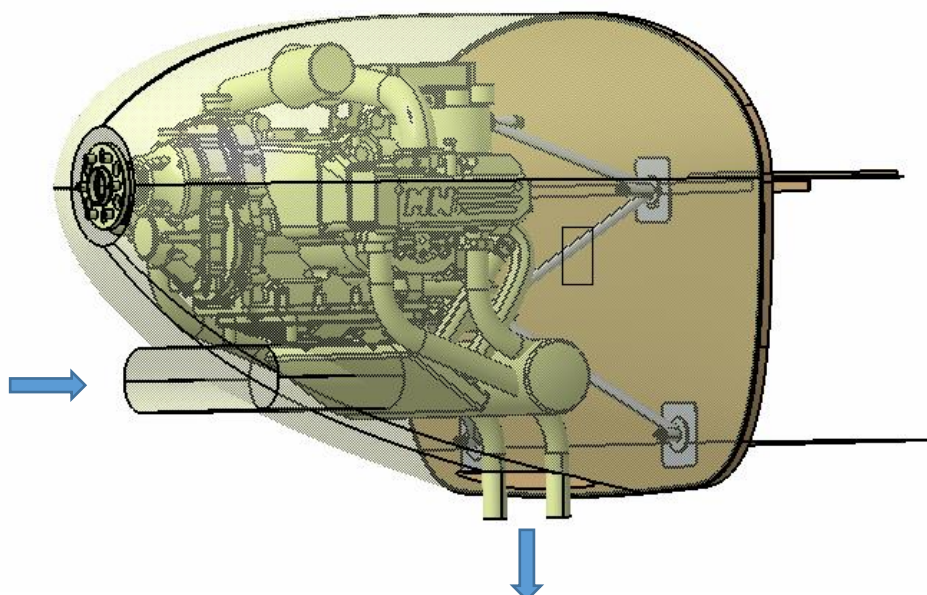


Obrázek 42 – Těžiště lože (červeně) a výsledné těžiště soustavy (modře)

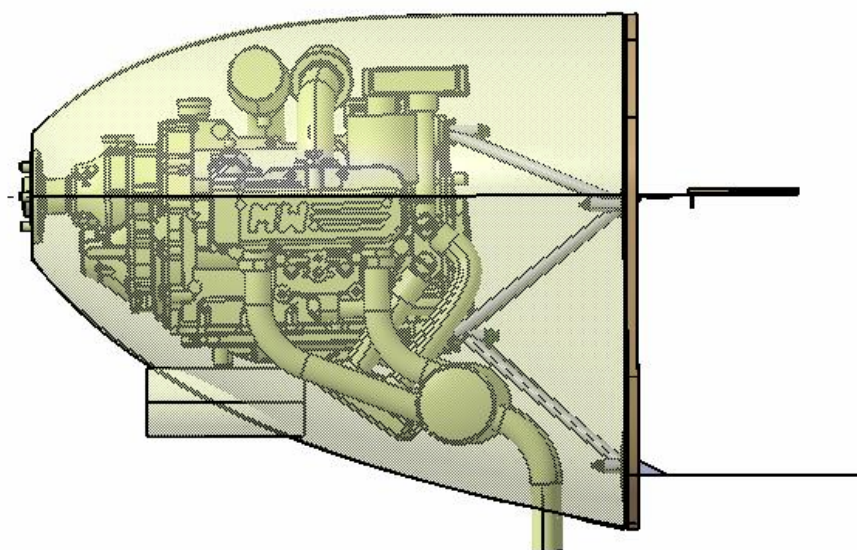
10. Návrh motorových krytů

V této kapitole byl proveden předběžný návrh vnějších obalových ploch pro motorový kryt. Požadavkem bylo zakrytí motoru, návrh průtoku vzduchu a vývod koncovek výfuků motoru. Dle zadání výrobce letounu má být kryt zakončen v rovině motorové příruby.

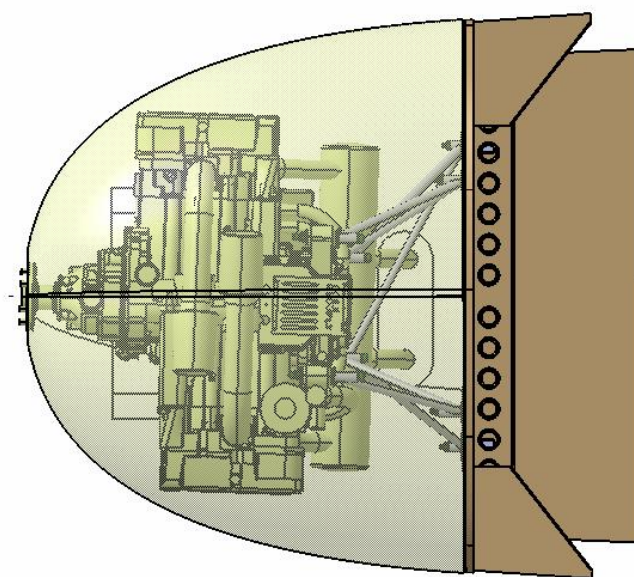
V návrhu byl také nastíněn tvar ledvinky pro vstup vzduchu, který má chladit chladicí kapalinu. Přejít ledvinky a obalové plochy nebyl z časových důvodů vymodelován. Výstup vzduchu je navržen otvorem ve spodní části krytu. Tento otvor je použit i pro výstup koncovek výfuků motoru. Výsledný návrh je vidět na obrázcích níže.



Obrázek 43 – Zobrazení návrhu ploch pro motorový kryt



Obrázek 44 – Bočný pohled návrhu plochy pro kryt motoru



Obrázek 45 – Půdorysný pohled návrhu plochy pro kryt motoru

11. Závěr

Úvodem práce byla provedena analýza pohonné jednotky, z které byla určena hmotnost celé soustavy pohonné jednotky. Dále byla provedena rešerše používaných motorových loží, kde bylo ukázáno několik fungujících konstrukčních řešení. Závěrem teoretické části práce bylo na základě stavebních předpisů UL-2, LTF-UL a ASTM 2245 stanoveno provozní a početní zatížení pro celkem 11 případů namáhání.

V další části práce byla navržena konstrukce motorového lože ve formě svařované příhradové konstrukce. Ta je tvořena ocelovými trubkami a válcovými závěsy. Konkrétní koncepční řešení vycházelo z jednoho z používaných řešení z rešeršní části práce. Byly také navrženy šroubové spoje, spojující lože s okolní konstrukcí.

Pro pevnostní analýzu konstrukce byla vybrána metoda konečných prvků. Byly stanoveny dva výpočtové modely, 1D a 3D. Pomocí těchto modelů byly ve výpočtovém programu Abaqus provedeny výpočty namáhání v jednotlivých případech zatížení. Na základě analýzy výsledků byly následně vybrány kritické případy namáhání.

V závěru práce byla provedena pevnostní kontrola konstrukce. Namáhání prutů kombinovaným namáháním a na vzpěr je konstrukce schopna s dostatečnou jistotou přenést. Dále byla provedena pevnostní kontrola šroubových spojů. Ve spojení lože s motorovou přepážkou se působící síly ukázaly být při neprovedení úpravy stykových ploch spoje pro šrouby M8 neúnosné. Z toho důvodu byla navržena úprava stykových ploch spoje pro odlehčení namáhání šroubů a docílení bezpečného přenosu zatížení s jistotou vyšší než 1. Ve spojení lože s motorem šrouby s dostatečnou jistotou vyhověly bez nutnosti provedení úpravy povrchů spoje. Dále bylo zdůvodněno neprovedení kontroly svarových spojů.

V poslední části práce byl proveden hmotový rozbor, kde výsledná hmotnost soustavy lože činila 2,3 kg. Byly také určeny polohy těžišť jednotlivých dílů a soustav. Jako poslední byl proveden předběžný návrh vnější plochy krytů motoru.

Závěrem lze konstatovat, že byl proveden konstrukční návrh motorového lože, který dle pevnostní kontroly vyhovuje předepsaným zatížením. Pro průkaz konstrukce by musela být provedena pevnostní zkouška, pro kterou byly navrženy kritické případy namáhání. Na základě výsledků pevnostní zkoušky by také bylo možné ověřit přesnost spočtených napětí pomocí MKP. Porovnání výsledků by bylo zajímavým námětem pro rozšíření stávající práce.

12. Seznam použitých zdrojů

- [1] ŠULŽENKO, Michail Nikolajevič. *Konstrukce letadel*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953. Knižnice kovoprůmyslu (Státní nakladatelství technické literatury). ISBN Konstrukce letadel.
- [2] MWfly Applications. *MWfly* [online]. Passirana di Rho: MWfly, c2003-2019 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <http://www.mwfly.it/mwfly%20applications.html>
- [3] [MWfly Engine Mount Bushcaddy R80]. In: <https://www.facebook.com/mwfly.it/> [online]. [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: https://scontent.fprg1-1.fna.fbcdn.net/v/t31.0-8/27624851_1828345033843032_8068770995962435497_o.jpg?_nc_cat=104&_nc_ht=scontent.fprg1-1.fna&oh=67b4209466cb9e39bfd78e5187a9d979&oe=5D38ADAA
- [4] [MWfly Engine Mount ZLIN Savage Cub]. In: <https://www.facebook.com/mwfly.it/> [online]. [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: https://scontent.fprg1-1.fna.fbcdn.net/v/t1.0-9/10985409_1031545866856290_5406962898359325898_n.jpg?_nc_cat=109&_nc_ht=scontent.fprg1-1.fna&oh=fac1100d56130d2429fc0c2715979086&oe=5D9A8538
- [5] [MWfly Engine Mount ZLIN Savage Classic]. In: <https://www.facebook.com/mwfly.it/> [online]. [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: https://scontent.fprg1-1.fna.fbcdn.net/v/t31.0-8/18839622_1545453368798868_6266007016152636038_o.jpg?_nc_cat=109&_nc_ht=scontent.fprg1-1.fna&oh=de43191e38fad1dd92b7be71014c4259&oe=5D80E138
- [6] [MWfly Engine Mount DYNAERO MCR100]. In: <https://www.facebook.com/mwfly.it/> [online]. [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: https://scontent.fprg1-1.fna.fbcdn.net/v/t1.0-9/11826036_1019339854743558_5228502773741062984_n.jpg?_nc_cat=105&_nc_ht=scontent.fprg1-1.fna&oh=18a957152cdab1c12c6a33de5c2f49b4&oe=5D9291F0
- [7] Rotax 912 bed mount on the STOL CH 701. In: <http://www.zenith.aero> [online]. [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: http://storage.ning.com/topology/rest/1.0/file/get/2089260092?profile=RESIZE_930x&width=737
- [8] Jabiru 3300 on the STOL CH 750. In: <http://www.zenithair.com> [online]. [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <http://www.zenithair.com/stolch750/images/jab3300-1.jpg>
- [9] *UL 2 – Část I.: Požadavky letové způsobilosti SLZ. Ultralehké letouny řízené aerodynamicky*. [online]. Praha: Letecká amatérská asociace ČR, 2019 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2%20%C4%8D%C3%A1st%20I_26.3.2019.pdf

- [10] *LTF-UL: Lufttüchtigkeitsforderungen für aerodynamisch gesteuerte Ultraleichtflugzeuge* [online]. Braunschweig: Deutscher Aero Club, 2019 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: https://www.daec.de/fileadmin/user_upload/files/2019/Luftsportgeraete_Buero/LTF/LTF-UL_2019.pdf
- [11] *ASTM F2245-18: Standard Specification for Design and Performance of a Light Sport Airplane*. West Conshohocken: ASTM International, 2018.
- [12] *Data Sheet B25G-155-B* [online]. V17.3. Passirana di Rho: MWfly, 2017 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: http://www.mwfly.it/data-sheet_B25G%20V17.3.pdf
- [13] *Power Curve B25G-155-B* [online]. V17.3. Passirana di Rho: MWfly, 2017 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <http://www.mwfly.it/power%20curve%20B25G%20155HP%20v17.3.pdf>
- [14] *Manual A: INSTALLATION* [online]. Passirana di Rho: MWfly, 2013 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <http://www.mwfly.it/ITA%20-%20Manual%20A%20Installation.pdf>
- [15] *In Flight Adjustable Propellers. Woodcomp - wooden propellers* [online]. Odolena Voda: Woodcomp, c2016 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <http://www.woodcomp.cz/in-flight-adjustable-propellers/>
- [16] *SR3000/3N: Electric variable pitch propeller constant speed* [online]. Odolena Voda: Woodcomp, 2016 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <http://www.woodcomp.cz/wp-content/uploads/2016/09/sr-3000-3n-leaflet.pdf>
- [17] *SR 3000: UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA* [online]. Rev. H. Odolena Voda: Woodcomp, 2016 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <http://www.woodcomp.cz/wp-content/uploads/2016/09/sr3000rev.h-cz.pdf>
- [18] SLAVÍK, Svatomír. *Stavba letadel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1671-4.
- [19] ŘEZNÍČEK, Jan. *Pevnost letadel a motorů* [online]. Třetí vydání. Praha: ČVUT v Praze, 2015 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: http://pruznost.unas.cz/PLM_15_16_600.pdf
- [20] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů: Části spojovací* [online]. Ver. 3. Ostrava: VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: E-Learning systém VŠB TU Ostrava

13. Přílohy

13.1 Axiální síly v prutech

Axiální síly pro výpočet vzpěru v kapitole 8.1.2.

- Provozní zatížení

F_{ax} [N]	Prut 1	Prut 2	Prut 3	Prut 4	Prut 5	Prut 6	Prut 7
Bod C	3918	5843	3464	1133	-5730	-7725	-1532
Bod F	-1603	-3189	-1773	-668	3787	5019	783
Boční_ASTM	1360	-1271	1071	-951	827	-591	-250

- Početní zatížení

F_{ax} [N]	Prut 1	Prut 2	Prut 3	Prut 4	Prut 5	Prut 6	Prut 7
Bod C	5876	8763	5196	1699	-8595	-11587	-2298
Bod F	-2405	-4783	-2659	-1001	5681	7528	1174
Boční_ASTM	2041	-1907	1607	-1428	1241	-887	-376

13.2 Reakce v uloženích na přepážce

Velikosti reakčních sil v uloženích na motorové přepážce, použité pro výpočet namáhání šroubů v kapitole 8.2.1.

- Provozní zatížení

Bod C	RF1 [N]	RF2 [N]	RF3[N]	RM1 [N.mm]	RM2 [N.mm]	RM3 [N.mm]
P1	4652	721	-2471	-2343	729	-10615
P2	5662	-1236	1675	2275	-2171	-8068
P3	-4206	3238	4290	-2798	-4081	-1153
P4	-4987	3713	-3494	38	680	-104

Bod F	RF1 [N]	RF2 [N]	RF3[N]	RM1 [N.mm]	RM2 [N.mm]	RM3 [N.mm]
P1	-1988	-418	1089	1464	1790	6183
P2	-2975	605	-868	-1426	2963	5433
P3	2580	-1985	-2556	1973	3177	230
P4	3327	-2480	2335	171	-59	347

Boční ASTM	RF1 [N]	RF2 [N]	RF3[N]	RM1 [N.mm]	RM2 [N.mm]	RM3 [N.mm]
P1	1579	149	-798	-26	3061	-533
P2	-1577	-141	-510	5	2618	709
P3	243	-183	-122	302	988	-878
P4	-244	176	-163	283	698	776

- Početni zatížení

Bod C	RF1 [N]	RF2 [N]	RF3[N]	RM1 [N.mm]	RM2 [N.mm]	RM3 [N.mm]
P1	6977	1081	-3706	-3514	1093	-15921
P2	8491	-1854	2512	3412	-3256	-12100
P3	-6309	4857	6435	-4196	-6120	-1730
P4	-7480	5569	-5241	58	1020	-156

Bod F	RF1 [N]	RF2 [N]	RF3[N]	RM1 [N.mm]	RM2 [N.mm]	RM3 [N.mm]
P1	-2981	-627	1633	2197	2687	9275
P2	-4463	907	-1302	-2139	4445	8149
P3	3870	-2977	-3834	2959	4766	344
P4	4990	-3720	3503	256	-89	520

Boční ASTM	RF1 [N]	RF2 [N]	RF3[N]	RM1 [N.mm]	RM2 [N.mm]	RM3 [N.mm]
P1	2368	222	-1197	-39	4592	-799
P2	-2367	-212	-764	7	3927	1063
P3	364	-274	-183	453	1481	-1317
P4	-366	264	-244	423	1047	1164

13.3 Napětí šroubů na přepážce

Spočtená napětí šroubů na přepážce podle výpočtů v kapitole 8.2.

- Provozní

	F_0 [N]	ΔF_s [N]	F_s [N]	σ_t [MPa]	τ_k [MPa]	σ_{red} [MPa]	j_{prov} [1]
P1	23225	214	23011	701	362	1007	1,0722
P2	23225	204	23021	701	362	1007	1,0720
P3	23225	265	23490	715	362	1017	1,0615
P4	23225	271	23496	716	362	1018	1,0613

- Početní

	F_0 [N]	ΔF_s [N]	F_s [N]	σ_t [MPa]	τ_k [MPa]	σ_{red} [MPa]	j_{prov} [1]
P1	23225	260	22965	699	362	1006	1,1925
P2	23225	267	22958	699	362	1006	1,1927
P3	23225	398	23623	719	362	1020	1,1761
P4	23225	417	23643	720	362	1021	1,1756

13.4 Reakce v motorových úchytech

Reakce v bodech motorových úchyťů, kde je lože připojeno k motoru, použité pro výpočet namáhání šroubů v kapitole 8.3.

- Provozní

Bod C	Rx [N]	Ry [N]	Rz [N]
M1	3565	723	-886
M2	3565	2495	-886
M3	-3005	723	886
M4	-3005	2495	886

Bod F	Rx [N]	Ry [N]	Rz [N]
M1	-1660	-1955	-886
M2	-1660	-184	-886
M3	2132	-1955	886
M4	2132	-184	886

Boční ASTM	Rx [N]	Ry [N]	Rz [N]
M1	865	0	-380
M2	-865	0	-380
M3	865	0	-328
M4	-865	0	-328

- Početní

Bod C	Rx [N]	Ry [N]	Rz [N]
M1	5347	1084	-1330
M2	5347	3743	-1330
M3	-4507	1084	1330
M4	-4507	3743	1330

Bod F	Rx [N]	Ry [N]	Rz [N]
M1	-1660	-1955	-886
M2	-1660	-184	-886
M3	2132	-1955	886
M4	2132	-184	886

Boční ASTM	Rx [N]	Ry [N]	Rz [N]
M1	865	0	-380
M2	-865	0	-380
M3	865	0	-328
M4	-865	0	-328

13.5 Napětí šroubů v mot. úchytech

Spočtená napětí šroubů na přepážce podle výpočtů v kapitole 8.3.

- Provozní

	F_0 [N]	ΔF_s [N]	F_s [N]	σ_t [MPa]	τ_k [MPa]	σ_{red} [MPa]	j_{prov} [1]
M1	38542	104	38646	739	371	1047	1,0315
M2	38542	158	38700	740	371	1048	1,0308
M3	38542	26	38516	736	371	1045	1,0332
M4	38542	23	38565	737	371	1046	1,0326

- Početní

	F_0 [N]	ΔF_s [N]	F_s [N]	σ_t [MPa]	τ_k [MPa]	σ_{red} [MPa]	j_{prov} [1]
M1	38542	156	38698	740	371	1048	1,145
M2	38542	238	38780	742	371	1049	1,144
M3	38542	40	38502	736	371	1045	1,148
M4	38542	34	38576	738	371	1046	1,147

13.6 Deformace koncových uzlů lože

Výsledné deformace koncových uzlů lože (u motoru) z 1D analýzy MKP.

- Provozní

Bod C	U1 [mm]	U2 [mm]	U3 [mm]
M1	-0,22	-0,3	-0,01
M2	-0,25	-0,24	-0,01
M3	0,13	-0,28	0,06
M4	0,11	-0,24	0,06

Bod F	U1 [mm]	U2 [mm]	U3 [mm]
M1	0,10	0,18	-0,03
M2	0,15	0,15	-0,03
M3	-0,10	0,17	-0,06
M4	-0,07	0,15	-0,06

Boční ASTM	U1 [mm]	U2 [mm]	U3 [mm]
M1	-0,05	-0,01	-0,03
M2	0,04	0,02	-0,03
M3	-0,04	-0,01	-0,01
M4	0,03	0,01	-0,01

- Početní

Bod C	U1 [mm]	U2 [mm]	U3 [mm]
M1	-0,33	-0,45	-0,02
M2	-0,37	-0,36	-0,02
M3	0,19	-0,42	0,10
M4	0,16	-0,36	0,09

Bod F	U1 [mm]	U2 [mm]	U3 [mm]
M1	0,15	0,26	-0,04
M2	0,22	0,23	-0,04
M3	-0,16	0,25	-0,09
M4	-0,1	0,23	-0,08

Boční ASTM	U1 [mm]	U2 [mm]	U3 [mm]
M1	-0,08	-0,02	-0,05
M2	0,07	0,02	-0,05
M3	-0,06	-0,01	-0,01
M4	0,04	0,02	-0,01

13.7 Výkresová dokumentace

Seznam příložených výkresů.

Číslo výkresu	Popis
DP12122-01-S	Systémový výkres motorového lože
DP12122-01-01	Závěs bodu M1
DP12122-01-02	Závěs bodu P1
DP12122-01-BOM	Kusovník motorového lože