



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta strojní  
Ústav letadlové techniky

Diplomová práce

# Návrh motorového lože UL letounu s motorem Rotax 912

Engine mount design of UL engine with Rotax 912  
engine

Marek Brabec

Praha 2018

Vedoucí práce:	Ing. Martin Helmich
Studijní program:	Letectví a kosmonautika
Studijní obor:	Letadlová a kosmická technika

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Brabec** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **419952**  
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 Rotax 912**

Název diplomové práce anglicky:

**Engine mount design of UL engine with Rotax 912 engine**

Pokyny pro vypracování:

Zásady pro vypracování:

- rešerše používaných motorových loží pro instalaci motoru Rotax 912 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

Seznam doporučené literatury:

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 2245-14 Standard Specification for Design and Performance of a Light Sport Airplane

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: **30.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **13.08.2018**

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.

27.4.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Návrh motorového lože UL letounu s motorem Rotax 912“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Helmicha a veškeré použité literární zdroje a prameny jsou uvedeny v seznamu zdrojů na konci této práce.

V Praze dne 7.8.2018

.....

Marek Brabec

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce panu Ing. Martinovi Helmichovi za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování věnoval.

# Obsah

Seznam obrázků .....	7
Seznam tabulek .....	8
Seznam grafů .....	9
Seznam příloh .....	9
Seznam použitých programů .....	9
Seznam použitých zkratk .....	10
Seznam použitých symbolů .....	10
Abstrakt .....	12
1 Úvod .....	13
2 Technický popis letounu .....	14
2.1 Specifikace letounu .....	14
2.2 Specifikace motoru .....	15
2.2.1 Parametry motoru .....	15
2.2.2 Hmotnostní charakteristiky motoru .....	16
2.2.3 Vrtule .....	17
2.2.4 Úchytné body motoru .....	17
3 Konstrukce motorového lože .....	19
3.1 Obecné dělení motorových loží .....	19
3.2 Konstrukční řešení motorového lože .....	20
3.2.1 Příruby na motoru .....	22
3.2.2 Uchycení lože na přepážku .....	23
3.2.3 Číslování prvků motorového lože .....	25
4 Zatížení motorového lože .....	26
4.1 Požadavky předpisů .....	26
4.1.1 Návrhové případy zatížení .....	26
4.1.2 Boční zatížení motorového lože .....	27
4.1.3 Podmínky havarijního přistání .....	27
4.1.4 Početní zatížení .....	27
4.2 Stanovení zatížení .....	28
4.2.1 Zatížení v návrhových případech .....	28
4.2.2 Boční zatížení .....	30
4.2.3 Zatížení od letových případů .....	30

4.2.4 Pozemní zatížení.....	31
4.2.5 Výsledná provozní zatížení pro uvažované případy .....	31
4.2.6 Výsledná početní zatížení pro uvažované případy .....	32
5 Vnitřní silové účinky .....	33
5.1 1D model .....	33
5.1.1 Výsledná napětí pro provozní zatížení .....	34
5.1.2 Výsledná napětí pro početní zatížení .....	36
5.1.3 Výběr zatížení pro pevnostní zkoušku.....	37
5.2 3D model .....	39
5.2.1 Výsledná napětí pro provozní zatížení .....	40
5.2.2 Výsledná napětí pro početní zatížení .....	41
5.2.3 Zatížení pro pevnostní zkoušku .....	42
5.2.4 Volba materiálu motorového lože .....	42
6 Pevnostní kontrola .....	43
6.1 Pevnostní kontrola prutů .....	43
6.2 Pevnostní kontrola šroubů na přepážce .....	48
6.2.1 Výpočet potřebného předpětí šroubů .....	48
6.2.2 Namáhání šroubů .....	52
6.3 Pevnostní kontrola šroubů na motoru .....	54
6.3.1 Výpočet potřebného předpětí šroubů .....	54
6.3.2 Namáhání šroubů .....	56
6.4 Pevnostní kontrola svarů.....	58
7 Hmotový rozbor.....	59
8 Závěr .....	61
9 Použité zdroje.....	62
10 Přílohy.....	63
10.1 Axiální síly v prutech.....	63
10.2 Reakce v uloženích na přepážce.....	64
10.3 Celková napětí šroubů na přepážce .....	66
10.4 Reakce v motorových úchytech .....	66
10.5 Celková napětí šroubů v motorových úchytech.....	66
10.6 Výkresová dokumentace .....	67

# Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma letounu STOL Cruiser [1] .....	14
Obr. 2 Motor Rotax 912 ULS/S [2] .....	15
Obr. 3 Vrtule Woodcomp SR3000/3N [4] .....	17
Obr. 4 Úchytné body motoru a jejich pozice [3] .....	17
Obr. 5 Varianta uložení č.1 [5] .....	18
Obr. 6 Varianta uložení č.2 [6] .....	18
Obr. 7 Varianta uložení č.3 [7] .....	18
Obr. 8 Druhy motorových loží [8] .....	19
Obr. 9 Pohled (proti směru letu) na uspořádání motorového lože podle varianty č. 1 .....	20
Obr. 10 Pohled (proti směru letu) na uspořádání varianty lože č.2 .....	20
Obr. 11 Pohled (proti směru letu) na variantu č.3 .....	21
Obr. 12 Dosedací plocha R2 pro přírubu na bloku motoru .....	22
Obr. 13 Příruba na motor zobrazená v řezu .....	22
Obr. 14 Schéma použitého silentbloku .....	23
Obr. 15 Domeček silentbloku zobrazený v řezu .....	23
Obr. 16 Podložka pod silentblok .....	24
Obr. 17 Výztuha přepážky .....	24
Obr. 18 Systém číslování motorového lože (pohled zepředu) .....	25
Obr. 19 Obálka provozních násobků .....	26
Obr. 20 Letadlový souřadný systém .....	28
Obr. 21 Schéma rozkladu setrvačných sil do souřadných os letounu .....	31
Obr. 22 1D model motorového lože, ve kterém zelené kružnice symbolizují jednotlivé elementy s nadefinovanými geometrickými vlastnostmi a červené šipky značí zavedené síly a momenty .....	34
Obr. 23 Napětí v prutech lože při zatížení provozními silami podle bodu C letové obálky. Maximální hodnota je zvýrazněna .....	35
Obr. 24 Napětí v prutech lože při zatížení početními silami podle bodu C letové obálky. Maximální hodnota je zvýrazněna .....	37
Obr. 25 Detail vysíťovaného domečku silentbloku P2 spolu s výztuhou V2 a připojených prutů 2, 4, 7 a 9 .....	39
Obr. 26 3D model, ve kterém červené šipky značí zavedené síly a momenty. Modré prvky v bodech P1 až P4 značí pevnou vazbu lože na přepážku .....	40
Obr. 27 Detail úchytu M3 ve výsledku MKP výpočtu pro provozní zatížení v bodě F .....	41
Obr. 28 Detail úchytu M3 ve výsledku MKP výpočtu pro početní zatížení v bodě F .....	42
Obr. 29 Graf řešení vzpěru .....	45
Obr. 30 Schéma zatížení bodu P4 motorového lože s vyznačenými vzdálenostmi použitými pro přepočet silových účinků .....	48
Obr. 31 Znázornění délek užitých pro stanovení tuhosti šroubu [13] .....	50
Obr. 32 Schéma pro výpočet tuhosti spojovaných částí [13] .....	50
Obr. 33 Diagram předepjatého spoje [12] .....	51

Obr. 34 Schéma zatížení bodu M4 motorového lože s vyznačenými vzdálenostmi pro výpočet silových účinků. ....	54
Obr. 35 Porovnání MKP modelu úchytu M3 a modelu reálného úchytu se svary.....	58
Obr. 36 Porovnání MKP modelu výztuhy V2 a modelu reálné výztuhy se svary .....	58
Obr. 37 Těžiště motorového lože (bod 2) a celé soustavy motoru + vrtule + lože (bod 1) .....	60

## Seznam tabulek

Tab. 1 Základní parametry pohonné jednotky .....	15
Tab. 2 Hmotnosti motoru a příslušenství. Zeleně zvýrazněné položky jsou na motoru použity, červeně zvýrazněné položky nejsou použity a modře zvýrazněné položky jsou uchyceny na přepážce, tudíž svojí hmotností nezatěžují motorové lože .....	16
Tab. 3 Hodnota součinitele pro vynásobení kroutícího momentu dle odstavce b).....	27
Tab. 4 Body obálky provozních násobků .....	28
Tab. 5 Zatížení motorového lože v návrhových případech .....	30
Tab. 6 Boční zatížení motorového lože pro vybrané předpisy.....	30
Tab. 7 Zatížení motorového lože pro letové případy ve vybraných bodech obálky .....	30
Tab. 8 Pozemní zatížení motorového lože .....	31
Tab. 9 Výsledná provozní zatížení motorového lože .....	32
Tab. 10 Výsledná početní zatížení motorového lože .....	32
Tab. 11 Výsledná celková napětí pro případy zatížení z Tab. 9.....	34
Tab. 12 Hodnoty pro stanovení spodní rozteče úchytů motorového lože .....	35
Tab. 13 Výsledná celková napětí pro případy zatížení z Tab. 10.....	36
Tab. 14 Hodnoty provozního zatížení v bodě C zvětšené o 5 % svých původních hodnot .....	37
Tab. 15 Výsledná provozní napětí pro případ C+5% .....	38
Tab. 16 Napětí při provozním zatížení pro případy určené k laboratorním zkouškám .....	38
Tab. 17 Napětí při početním zatížení pro případy určené k laboratorním zkouškám .....	38
Tab. 18 Výsledná celková napětí pro provozní zatížení .....	40
Tab. 19 Výsledná celková napětí pro početní zatížení .....	41
Tab. 20 Napětí při provozním a početním zatížení pro případy určené k laboratorním zkouškám.....	42
Tab. 21 Vlastnosti zvažovaných ocelí pro výrobu motorového lože.....	42
Tab. 22 Hodnoty bezpečnosti při provozním a početním zatížení konstrukce motorového lože .....	44
Tab. 23 Výchozí hodnoty pro kontrolu vzpěru prutů při zatížení .....	46
Tab. 24 Hodnoty bezpečnosti prutů na vzpěr pro axiální sílu při provozním zatížení.....	46
Tab. 25 Hodnoty bezpečnosti prutů na vzpěr pro axiální sílu při početním zatížení.....	47
Tab. 26 Vlastnosti šroubů použitých na přepážce.....	48
Tab. 27 Hodnoty jednotlivých přírůstků axiální síly a výsledná hodnota této síly.....	49
Tab. 28 Hodnoty tuhostí jednotlivých šroubů na přepážce .....	50
Tab. 29 Tuhosti spojovaných částí a jejich výsledná celková tuhost .....	51
Tab. 30 Výsledné hodnoty sil působících na šroubový spoj.....	52
Tab. 31 Potřebný utahovací moment.....	52



Tab. 32 Bezpečnost šroubů při provozním zatížení .....	53
Tab. 33 Bezpečnost šroubů při početním zatížení .....	53
Tab. 34 Vlastnosti šroubů použitých pro spojení motoru s ložem.....	54
Tab. 35 Dílčí hodnoty axiální síly a její výsledná hodnota .....	55
Tab. 36 Tuhosti šroubů v motorových úchytech.....	55
Tab. 37 Tuhost spojovaných částí .....	55
Tab. 38 Výsledné hodnoty sil působících na šroubový spoj.....	56
Tab. 39 Potřebný utahovací moment pro šrouby .....	56
Tab. 40 Bezpečnost šroubů při provozním zatížení .....	57
Tab. 41 Bezpečnost šroubů při početním zatížení .....	57
Tab. 42 Hmotnosti prutů a výztuh .....	59
Tab. 43 Výsledná hmotnost svařované konstrukce .....	59
Tab. 44 Počty a hmotnosti příslušenství k motorovému loži.....	60
Tab. 45 Těžiště motoru spolu s vrtulí a motorovým ložem.....	60
Tab. 46 Axiální síly v prutech při provozním a početním zatížení.....	63
Tab. 47 Silové reakce v uloženích na přepážce při provozním a početním zatížení .....	64
Tab. 48 Momentové reakce v uloženích na přepážce při provozním a početním zatížení.....	65
Tab. 49 Celková napětí šroubů na přepážce pro provozní a početní zatížení .....	66
Tab. 50 Reakce v motorových úchytech pro provozní a početní zatížení.....	66
Tab. 51 Celková napětí šroubů v motorových úchytech pro provozní a početní zatížení.....	66
Tab. 52 Seznam příložených výkresů .....	67

## Seznam grafů

Graf 1 Stanovení horní rozteče úchytů lože .....	21
Graf 2 Stanovení spodní rozteče úchytů lože.....	36

## Seznam příloh

Axiální síly v prutech  
 Reakce v uloženích na přepážce  
 Celková napětí šroubů na přepážce  
 Reakce v motorových úchytech  
 Celková napětí šroubů v motorových úchytech  
 Výkresová dokumentace

## Seznam použitých programů

Microsoft Word  
 Microsoft Excel  
 Siemens NX 11

## Seznam použitých zkratek

ASTM	American Society for Testing and Materials
DC	Direct Current
HD	Heavy Duty
LTF-UL	LuftTüchtigkeitsForderungen für aerodynamisch gesteuerte UltraLeichtflugzeuge
MKP	Metoda Konečných Prvků
OHV	Over Head Valve
STOL	Short Take Off and Landing
UL	Ultra Lehký

## Seznam použitých symbolů

$D_1, D_2$	[mm]	Vnitřní a vnější průměr prutu
$d, d_1, d_3$	[mm]	Průměr šroubu
$d_w$	[mm]	Průměr dosedací plochy hlavy a matice šroubu
$E$	[MPa]	Youngův modul
$F_{ax}$	[N]	Vnější axiální síla působící na šroub
$F_{ax}^s, F_{ax}^m$	[N]	Složka vnější síly působící na šroub a na spojované části
$F_b$	[N]	Setrvačná síla od bočního zatížení
$F_g$	[N]	Setrvačná síla
$F_{gx}, F_{gy}$	[N]	Složka setrvačné síly ve směru osy x a osy y
$F_i$	[N]	Síla předpětí
$F_{kr}$	[N]	Kritická síla vzpěru
$F_s, F_m$	[N]	Výsledná síla působící na šroub a spojované části
$F_x, F_y, F_z$	[N]	Síla ve směru osy x, osy y a osy z
$F_{yz}$	[N]	Výslednice sil $F_y$ a $F_z$
$\Delta F_{ax}^f, \Delta F_{ax}^m$	[N]	Přírůstek axiální síly od síly $F_{yz}$ a momentu $M_{yz}$
$f$	[-]	Součinitel bezpečnosti
$f_t$	[-]	Součinitel smykového tření
$g$	[ms <sup>-2</sup> ]	Tíhové zrychlení
$G$	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
$i$	[-]	Převodový poměr
$i_\lambda$	[mm]	Poloměr setrvačnosti průřezu
$i_m$	[-]	Součinitel kroutícího momentu motoru
$J$	[mm <sup>4</sup> ]	Kvadratický moment průřezu
$j_1$	[-]	Bezpečnost provozní
$j_2$	[-]	Bezpečnost početní
$k_s, k_m$	[N/mm]	Tuhost šroubu a spojovaných částí
$l, l_s, l_t$	[mm]	Délka
$L$	[N]	Vztlak
$M$	[Nmm]	Výsledný utahovací moment šroubu
$M_k$	[Nmm]	Kroutící moment

$M_o$	[Nmm]	Ohybový moment
$M_r$	[Nm]	Reakční moment motoru
$M_x, M_y, M_z$	[Nmm]	Moment ve směru osy x, osy y a osy z
$M_{xy}$	[Nmm]	Výslednice momentů $M_x$ a $M_y$
$M_{yz}^f$	[Nmm]	Moment od síly $F_{yz}$
$M_z, M_h$	[Nmm]	Potřebný moment pro překonání tření v závitu a pod hlavou šroubu
$m$	[mm]	Výška matice
$m_{mot}$	[kg]	Hmotnost motoru
$n$	[-]	Násobek tíhového zrychlení
$n_{mot}$	[1/min]	Otáčky motoru
$T$	[N]	Tah
$P$	[MPa]	Tlak v závitě šroubu
$P_h$	[mm]	Stoupání závitu šroubu
$P_{mot}$	[W]	Výkon motoru
$P_{trval}$	[W]	Trvalý výkon motoru
$P_{vzlet}$	[W]	Vzletový výkon motoru
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
$R_p$	[MPa]	Mez kluzu
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha
$t$	[mm]	Tloušťka spojovaných částí
$v$	[m/s]	Rychlost letu
$W_o$	[mm <sup>3</sup> ]	Modul průřezu v ohybu
$W_k$	[mm <sup>3</sup> ]	Modul průřezu v krutu
$x_f$	[mm]	Vzdálenost působíště radiální síly od hlavy šroubu
$x_m$	[mm]	Rameno momentu $M_{xy}$
$\alpha$	[°]	Úhel náběhu
$\alpha_m$	[°]	Úhel profilu závitu šroubu
$\alpha_\sigma$	[-]	Součinitel pružnosti a pevnosti
$\eta$	[-]	Účinnost vrtule
$\lambda$	[-]	Štíhlost
$\lambda_m$	[-]	Mezní štíhlost
$\mu$	[-]	Poissonova konstanta
$\sigma_o$	[MPa]	Ohybové napětí
$\sigma_{kr}$	[MPa]	Kritické napětí vzpěru
$\sigma_{red}$	[MPa]	Redukované napětí
$\sigma_T$	[MPa]	Tahové napětí
$\sigma_u$	[MPa]	Mez úměrnosti
$\tau_s$	[MPa]	Napětí ve smyku
$\tau_k$	[MPa]	Napětí v krutu

## Abstrakt

Brabec, M.: Návrh motorového lože UL letounu s motorem Rotax 912: diplomová práce. Praha: ČVUT – České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2018, 67 s. Vedoucí práce: Helmich, M.

Tato práce je zaměřena na návrh konstrukce motorového lože pro zástavbu motoru Rotax řady 912 do letounu kategorie UL výrobce Direct Fly. Nejprve je navržena nejvhodnější podoba podle požadavků výrobce. Při návrhu jsou respektovány české stavební předpisy UL-2, německé LTF-UL a americké ASTM. Podle těchto předpisů je stanoveno zatížení a následně provedena pevnostní kontrola motorového lože a spojovacích prvků. Nakonec je proveden hmotový rozbor konstrukce a určeno těžiště celé soustavy motoru, vrtule a lože.

**Klíčová slova:** motor, motorové lože, Rotax, ultralight, STOL, pevnostní analýza

## Abstract

Brabec, M.: Engine mount design of UL engine with Rotax 912 engine: Master Thesis. Prag: CTU – Czech Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Aerospace Engineering, 2018, 67 p. Thesis head: Helmich, M.

This thesis is focused on proposal of an engine mount for the installation of Rotax type 912 into the ultralight category airplane made by Direct Fly. At first, the most suitable form is proposed according to producer's requirements. The structure is designed in accordance with Czech regulations UL-2, German LTF-UL and US ASTM. On the basis of these regulations, load on the engine mount is defined. After that, the strength analysis of the construction and the connecting elements is performed. Finally, the mass of the mount is calculated and gravity center of the whole system is defined.

**Key words:** engine, engine mount, Rotax, ultralight, STOL, strength analysis

# 1 Úvod

Jednou z mnoha českých firem, které se zabývají návrhem a výrobou ultralehkých letadel, je i společnost Direct Fly sídlící v Brně. Tato firma nyní pracuje na návrhu letounu kategorie UL s charakteristikami STOL, tedy krátký vzlet a přistání. S těmito vlastnostmi má letoun dobré šance uchytit se na trhu.

Jedním z konstrukčních úkolů, které je nutno při vývoji nového letounu vyřešit, je i zástavba pohonné jednotky. Výrobce pro model zvolil motor rakouské firmy Rotax, konkrétně řady 912.

Hlavními požadavky, které jsou na konstrukci kladeny, jsou dostatečná pevnost ve všech bodech letové obálky a nízká hmotnost při zachování dostatečné tuhosti. Rovněž je brán ohled na náročnost výroby a montáže motorového lože do letounu. Samotné lože však nesmí nijak ovlivňovat fungování nejen motoru, ale i letounu jako celku.

Cílem této práce je návrh, a především ověření zvoleného řešení konstrukce motorového lože. Jelikož společnost Direct Fly necílí jen na český trh, ale míří i na zahraniční zákazníky, byla práce koncipována nejen podle stavebních předpisů české Letecké amatérské asociace (UL-2), ale i předpisů platných v Německu (LTF-UL) a Spojených státech (ASTM).

## 2 Technický popis letounu

### 2.1 Specifikace letounu

Letoun, označovaný jako STOL Cruiser, je navrhovaný pro schopnost krátkého vzletu a přistání. Jedná se o hornoplošník se samonosným křídlem bez vnějších vzpěr pro snížení odporu. Křídlo je lichoběžníkového typu vybavené vztakovými klapkami. Konstrukce trupu je navržena s ohledem na výhled pilota při vyšších úhlech náběhu. Ocasní plochy jsou klasického typu. Podvozek je zvolen jako ostruhový, řízen pomocí brždění hlavních kol [1].



*Obr. 1 Schéma letounu STOL Cruiser [1]*

## 2.2 Specifikace motoru

Letoun je vybaven motorem značky Rotax. V konstrukčním návrhu jsou uvažovány obě varianty motoru řady 912. Jde o varianty s výkonem 80 koní (certifikovaná verze A/F a necertifikovaná verze UL) a s výkonem 100 koní (certifikovaná verze S a necertifikovaná verze ULS) lišící se mimo výkon také hmotností.

Jedná se o zážehový čtyřtákní motor s kapalinou chlazenými hlavami válců a vzduchem chlazenými válci v protilehlém uspořádání. Motor je vybaven dvěma karburátory a je rovněž vybaven reduktorem s převodovým poměrem  $i = 2,27 [-]$  pro verzi s výkonem 80 koní a  $i = 2,43 [-]$  pro verzi s výkonem 100 koní. Rozvody jsou řízeny systémem OHV.



Obr. 2 Motor Rotax 912 ULS/S [2]

### 2.2.1 Parametry motoru

V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry motorů 912 UL/A/F a 912 ULS/S.

Typ	UL, A, F	ULS, S
Max. vzletový výkon [kw] (hp)	59,6 (80) @ 5 800/min	73,5 (100) @ 5 800/min
Max. trvalý výkon [kw] (hp)	58 (79) @ 5 500/min	69 (95) @ 5 500/min
Max. kroutící moment [Nm]	103 @ 4 800/min	128 @ 5 100/min
Max. otáčky [1/min]	5 800	5 800
Volnoběžné otáčky [1/min]	1 400	1 400
Zdvihový objem [cm <sup>3</sup> ]	1 211	1 352
Vrtání [mm]	79,5	84
Zdvih [mm]	61	61
Kompresní poměr [-]	9,0:1	10,5:1
Výkon generátoru [W]	250 DC @ 5 500/min	250 DC @ 5 500/min
Napětí [V]	13,5	13,5

Tab. 1 Základní parametry pohonné jednotky

## 2.2.2 Hmotnostní charakteristiky motoru

V této tabulce jsou uvedeny jak hmotnosti motoru samotného, tak i jednotlivých příslušenství spolu s hmotnostmi náplní. Hmotnost lože byla předběžně odhadnuta na 3 kg. Výsledná hmotnost motoru spolu s příslušenstvím byla následně použita pro výpočet zatížení motorového lože. Hmotnosti jednotlivých komponent byly získány od výrobce letounu a z instalačního manuálu určeného pro tento typ motoru [3]. Výchozí hmotnost motoru pro obě výkonnostní varianty odpovídá provedení motoru č. 3, tj. provedení připravené pro použití vrtule constant speed.

Typ	UL, A, F	ULS, S
Motor s reduktorem v.3 [kg]	59,8	61
Lože motoru [kg]	3	3
HD-Startér [kg]	0,43	0,43
Chladič oleje [kg]	0,6	0,6
Olej [kg]	3	3
Chladič [kg]	0,88	0,88
Chladicí kapalina [kg]	3	3
Airbox [kg]	0,794	0,794
Vzduchovod [kg]	0,415	0,415
Vzduchový filtr [kg]	0,3	0,3
Výfukové svody [kg]	1,558	1,558
Úchyty výf. Svodů [kg]	0,152	0,152
Tlumič výfuku [kg]	2,065	2,065
Výměník [kg]	0,652	0,652
Hadice a kabeláž [kg]	2	2
Palivové čerp. s ocel potrub. [kg]	0,2	0,2
Vrtule a příslušenství [kg]	11,9	11,9
Pomocné lože motoru [kg]	2	2
Kryt rozvodu chlaz. Vzduch. [kg]	0,8	0,8
Tepelný deflektor [kg]	0,347	0,347
Vakuová pumpa [kg]	0,8	0,8
Hydraulický generátor [kg]	2,7	2,7
Externí gener. 40A/12V DC [kg]	3	3
Pomocné lože motoru [kg]	2	2
Přístroj FLYDAT [kg]	0,5	0,5
Přístroj RDAT [kg]	1	1
Relé startéru [kg]	0,145	0,145
EL. usměrňovač [kg]	0,3	0,3
Hmotnost použitých komponent [kg]	30,946	30,946
Hmotnost motoru a komponent [kg]	90,746	91,946

Tab. 2 Hmotnosti motoru a příslušenství. Zeleně zvýrazněné položky jsou na motoru použity, červeně zvýrazněné položky nejsou použity a modře zvýrazněné položky jsou uchyceny na přepážce, tudíž svojí hmotností nezatěžují motorové lože

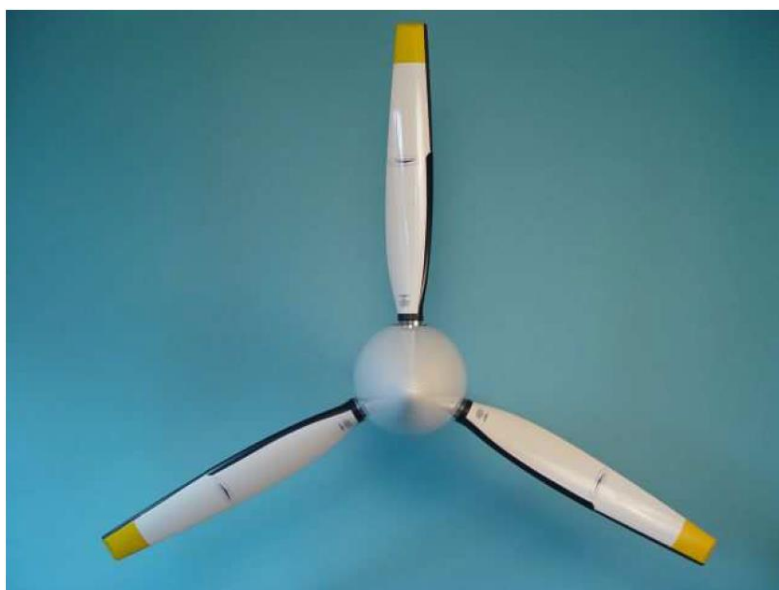


### 2.2.3 Vrtule

Pro pohon letounu je použita vrtule českého výrobce Woodcomp. Jedná se o třílistou vrtuli typu constant speed, konkrétně jde o model SR3000/3N. Průměr vrtule je 1720 mm a listy jsou stavěny elektricky.

Listy vrtule jsou vyrobeny z vrstev dřeva lepených epoxidovým lepidlem a jejich kořenová část je osazena duralovým nábojem. Pro vyšší odolnost prostředí jsou listy ještě navíc potaženy 2 vrstvami skelné nebo uhlíkové tkaniny. Kužel o průměru 240 mm je vyroben ze sklolaminátu.

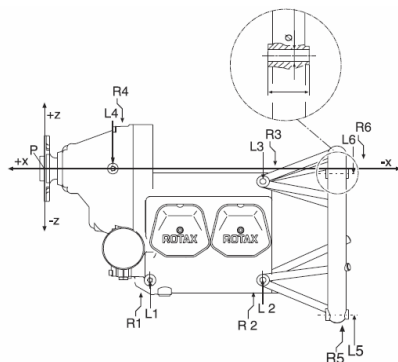
Maximální výkon motoru, který je vrtule schopna pojmout je 85,76 kW a maximální otáčky jsou 2 650 1/min.



Obr. 3 Vrtule Woodcomp SR3000/3N [4]

### 2.2.4 Úchytné body motoru

Úchytné body na bloku motoru jsou stejné pro obě varianty řady 912. Jejich pozice jsou definovány souřadnicemi v lokálním souřadném systému, jehož počátek je ve středu příruby pro vrtule (viz obr. 4) [3].

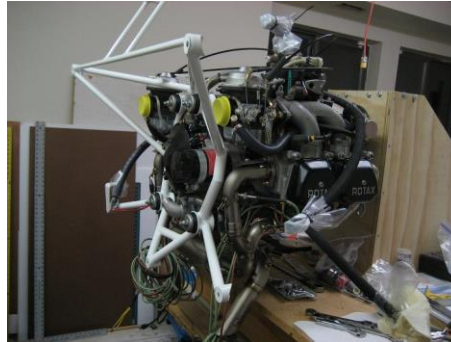


attachement point	Axes		
	x axis mm	y axis mm	z axis mm
L1	-200,8	71,0	-211,0
R1	-200,8	-71,0	-211,0
L2	-414,3	71,0	-211,0
R2	-414,3	-71,0	-211,0
L3	-414,3	75,0	-22,0
R3	-414,3	-75,0	-22,0
L4	-128,3	87,0	0
R4	-128,3	-87,0	0
L5	-564,0	105,0	-277,0
R5	-564,0	-105,0	-277,0
L6	-564,0	105,0	-7,0
R6	-564,0	-105,0	-7,0

Obr. 4 Úchytné body motoru a jejich pozice [3]

V kategorii ultra lehkých letadel bývá pro uchycení motoru Rotax řady 912 využíváno různých kombinací úchytných bodů. Jedná se nejčastěji o tyto varianty:

1. Lože je k motoru připevněno přes body na zadní stěně motoru, tj. body L3, R3 a R2, L2.



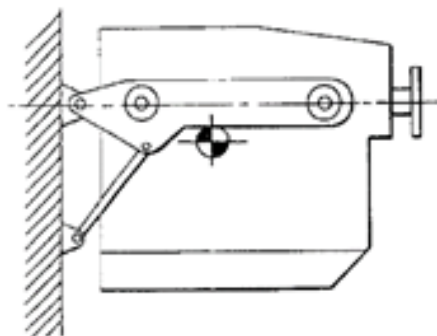
Obr. 5 Varianta uložení č.1 [5]

2. Motor je uchycen přes spodní body L1, R1 a L2, R2 a jedná se tedy o tzv. flat-bed engine mount.



Obr. 6 Varianta uložení č.2 [6]

3. Motor je zavěšen pomocí dvou nosníků, které jsou připojeny na body L3, R3 a L4, R4.



Obr. 7 Varianta uložení č.3 [7]

4. Kombinace předešlých variant uložení.

### 3 Konstrukce motorového lože


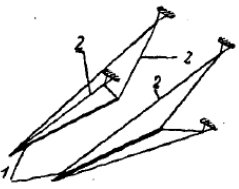
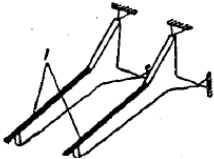
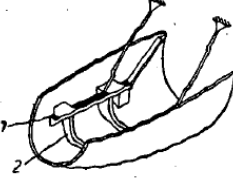
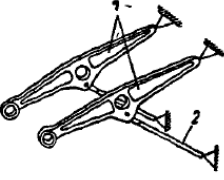
Jako motorové lože lze označit konstrukci, která slouží ke spojení pohonné jednotky s drakem letounu. Jedná se o značně zatíženou část letounu, sestavovanou většinou z trubek a nosníků z oceli nebo lehkých slitin. Musí splňovat následující požadavky:

- Kompaktní umístění pohonné jednotky se snadným přístupem při montáži, provozu a opravě.
- Nejmenší hmotnost při dostatečné pevnosti a tuhosti.
- Jednoduchá zástavba motoru umožňující snadnou výměnu.
- Pružné připevnění motoru k loži nebo lože k letounu, pohlcující vibrace.

#### 3.1 Obecné dělení motorových loží

Motorová lože pístových řadových motorů lze rozdělit do několika kategorií podle uspořádání nosných prvků (viz obr. 8) [8]:

1. Příhradová motorová lože, která bývají tvořena několika prostorovými prvky (pruty) spojenými s motorem a přepážkou. Pro motory, jejichž skříň nejsou uzpůsobeny na přenos bočního zatížení obsahují navíc příčné vyztužení.
2. Nosníková motorová lože, jenž tvoří obvykle dva konsolové nosníky upevněné ke křídlu nebo trupu (pravý a levý).
3. Nosníko-příhradová lože, která se skládají jak z nosníků, tak z příhradových prutů. Nosníky bývají často převislé s dvěma podporami.

Nosné schema	Řadové motory	
	Lože s příčným vyztužením. Motory s nenosnou skříní	Lože bez příčného vyztužení. Motory s nosnou skříní
Příhradové	 Schema 1	 Schema 2
Nosníkové		 Schema 5
Nosníko-příhradové	 Schema 6	 Schema 7

Obr. 8 Druhy motorových loží [8]

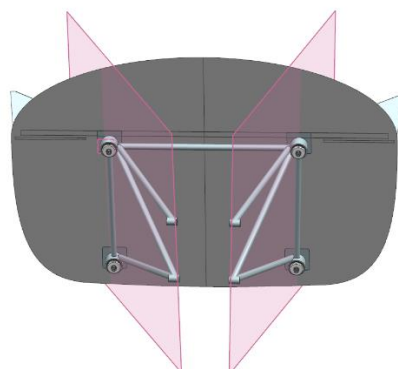
## 3.2 Konstrukční řešení motorového lože

V rámci této diplomové práce bylo hlavním cílem maximální snížení hmotnosti konstrukce při zachování požadovaných pevnostních vlastností. Rovněž byl kladen důraz na jednoduchost samotné konstrukce z hlediska výroby. Byla tedy zvolena varianta svařované příhradové konstrukce, ve které je lože k motoru připevněno přes zadní úchytné body motoru. Pro omezení přenosu vibrací a rázů z motoru přes lože do draku letounu jsou použity silentbloky, které se nachází ve spojení lože a motorové přepážky před pilotní kabinou. Svojí konstrukcí snižují tuhost lože a tím snižují i jeho vlastní frekvence tak, aby byly dostatečně nízko pod provozními otáčkami motoru. Takto se zamezí rezonanci, a tedy možnému porušení lože.

Pro zvýšení tuhosti celé konstrukce jsou navíc přidány výztuhy. Nacházejí se ve spojení jednotlivých prutů s domečky silentbloků. Jsou vyrobeny z plechu tloušťky 1 mm s odlehčovacím otvorem a lemem pro vyšší tuhost samotné výztuhy.

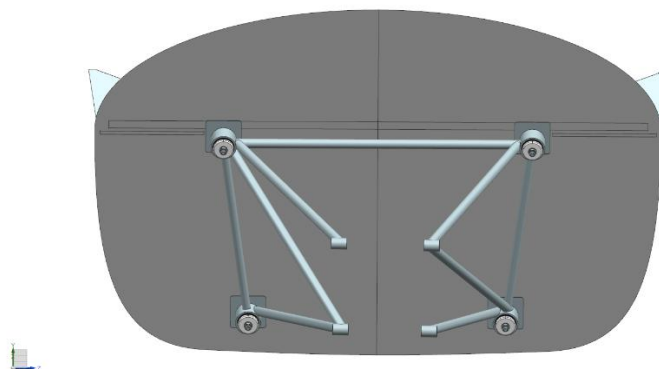
Zpočátku byly uvažovány tři návrhy konfigurace motorového lože:

1. Varianta, ve které jsou pruty na každé straně umístěny v jedné svislé rovině (viz obr. 9).



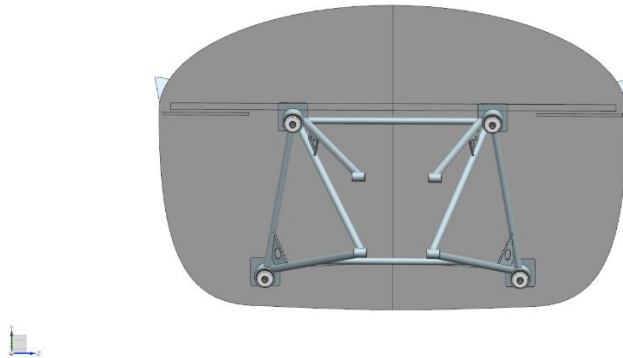
Obr. 9 Pohled (proti směru letu) na uspořádání motorového lože podle varianty č. 1

2. Varianta s širší roztečí horních trupových úchytlů a diagonálně zrcadlovým uspořádáním prutů.



Obr. 10 Pohled (proti směru letu) na uspořádání varianty lože č.2

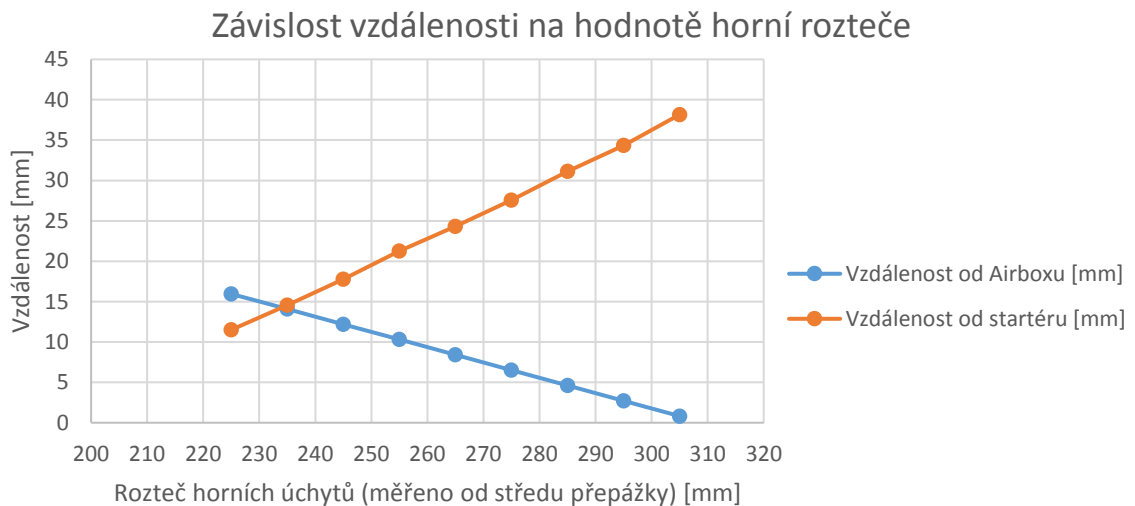
### 3. Klasická koncepce, kdy se rozteče úchytů lože rozšiřují směrem dolů.



Obr. 11 Pohled (proti směru letu) na variantu č.3

Z výše uvedených tří variant bylo od prvních dvou upuštěno z důvodu velmi malé (řádově jednotky mm) vzdálenosti mezi pruty lože a airboxem motoru. Při provozu by pak z důvodu vibrací a možných výrobních nepřesností mohlo dojít ke kontaktu těchto dvou prvků a jejich poškození.

Hodnota rozteče horních úchytů lože na přepážce byla následně definována vztahem dvou parametrů. Jedná se o vzdálenost prutů od airboxu a elektrického startéru motoru. V následujícím grafu je patrná hodnota, při které jsou obě vzdálenosti přibližně stejné. Jedná se o hodnotu rozteče 235 mm na obě strany od středu přepážky. Rozteč spodních úchytů byla zvolena 300 mm. Její hodnota byla limitována pouze umístěním podvozkové nohy ve středu přepážky a vnějším potahem letounu.



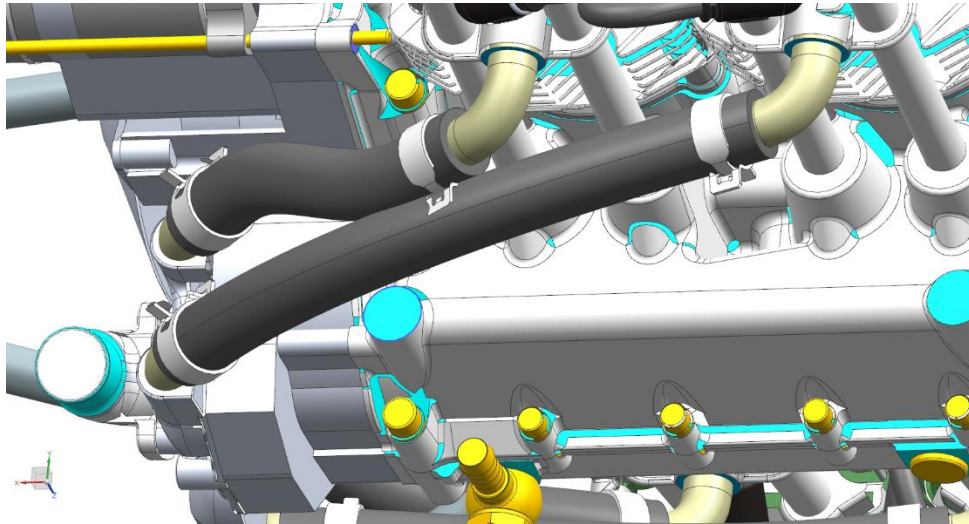
Graf 1 Stanovení horní rozteče úchytů lože

Svislá vzdálenost úchytů lože byla dána konstrukcí vodorovné přepážky a podlahy samotného letounu, na které bylo z důvodu distribuce napětí potřeba umístit výtuhy motorové přepážky. Její hodnota je 383,22 mm.

Pro eliminaci sil, vznikajících působením vrtulového proudu na letoun, je motor v loži vychýlen o  $-2^\circ$  podle osy y a  $+1^\circ$  podle osy z.

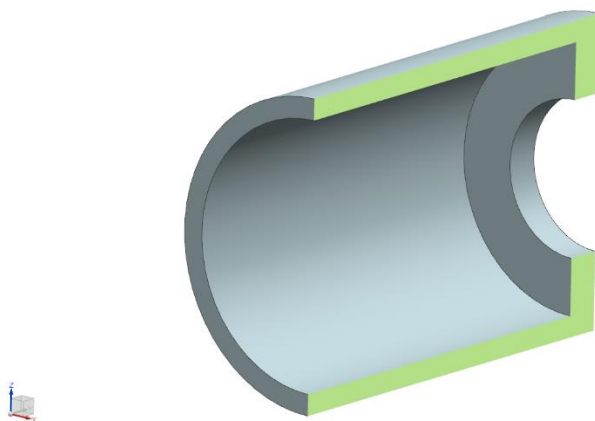
### 3.2.1 Příruby na motoru

Konstrukce úchytů, přes které je motor připevněn k loži, je dána dvěma parametry. Těmi jsou šrouby určené výrobcem pro připevnění motoru a zároveň plocha na bloku motoru, na kterou úchyt dosedá.



Obr. 12 Dosedací plocha R2 pro přírubu na bloku motoru

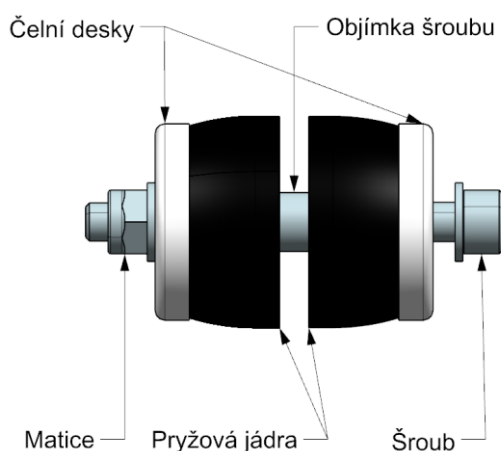
Všechny dosedací plochy, použité pro uchycení konstrukce lože, jsou kruhového tvaru s průměrem 22 mm. Průměr díry pro šroub je dán samotným šroubem, který je opět předepsán výrobcem, a to konkrétně jako M10. Průměr otvoru je tedy 11 mm. Maximální délka závitu v bloku motoru je 25 mm. Tloušťka stěny příruby byla zvolena s ohledem na pevnost a hmotnost 1,5 mm a 2,5 mm pod hlavou šroubu. Pro zvolenou konstrukci příruby vychází použití šroubu s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem.



Obr. 13 Příruba na motor zobrazená v řezu

### 3.2.2 Uchycení lože na přepážku

Jak již bylo uvedeno, lože je k přepážce připevněno pomocí šroubů, a ke snížení přenosu vibrací jsou použity silentbloky. Ty jsou spojeny s ložem pomocí tzv. domečků. Konstrukční řešení těchto prvků bylo dáno převážně tvarem silentbloků. Důležité při návrhu bylo, aby vlivem vibrací a provozních deformací nedošlo ke kontaktu šroubu nebo čelní desky silentbloku s domečkem lože, čímž by se ztratila tlumící schopnost tohoto prvku. Pryžové jádro je dvoudílné, domeček silentbloku tedy nemusí být dělený, ale stačí pouze otvor pro šroub a jeho objímku. Pryžová jádra, čelní desky i objímku šroubu silentbloku dodává např. polská firma Faston. Šroub je konkrétně závit M8 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem.



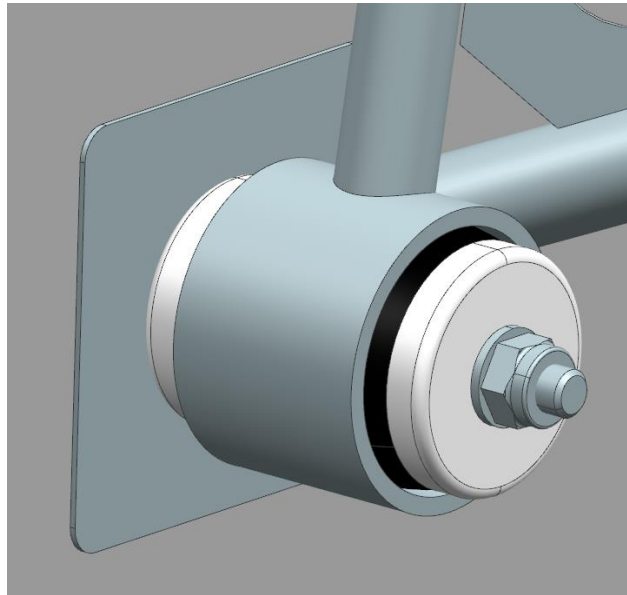
Obr. 14 Schéma použitého silentbloku

Tloušťka obvodové stěny domečku byla zvolena 3 mm a tloušťka vnitřní přepážky 6 mm. Délka domečku vychází ze vzdálenosti čelních desek a byla zvolena 36 mm. Tedy tak, aby nedošlo ke vzájemnému kontaktu. Hodnota průměru vnitřního otvoru pro šroub s objímkou je 17 mm. Při vnějším průměru objímky 12 mm tak zbývá dostatečná rezerva, která zabezpečuje, že nedojde k dotyku domečku a objímky šroubu.



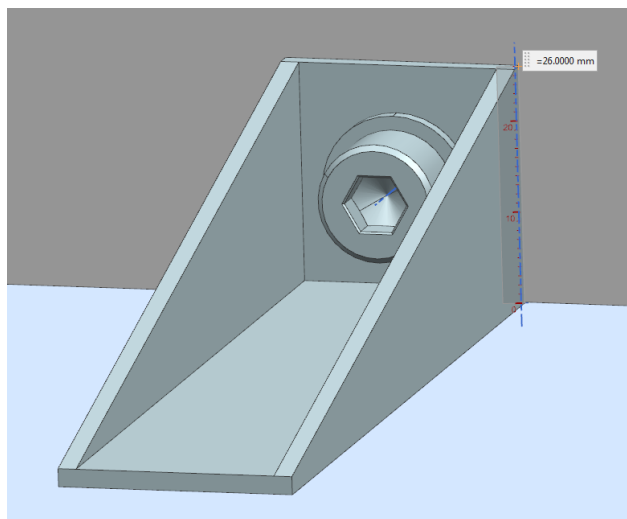
Obr. 15 Domeček silentbloku zobrazený v řezu

Aby nedocházelo k deformaci přepážky v místech připojení motorového lože, byly mezi čelní desky silentbloků a samotnou přepážku přidány čtvercové podložky o straně 70 mm a tloušťce 1 mm.



Obr. 16 Podložka pod silentblok

Rovněž pro vhodnější distribuci napětí byly přidány trojúhelníkové výztuhy přepážky z vnitřní strany kabiny. Spodní dvě jsou uchyceny k podlaze letounu a horní dvě slouží zároveň jako podpora vodorovné přepážky. Tloušťka stěn těchto výztuh je 2 mm. Výška i šířka činí 26 mm.



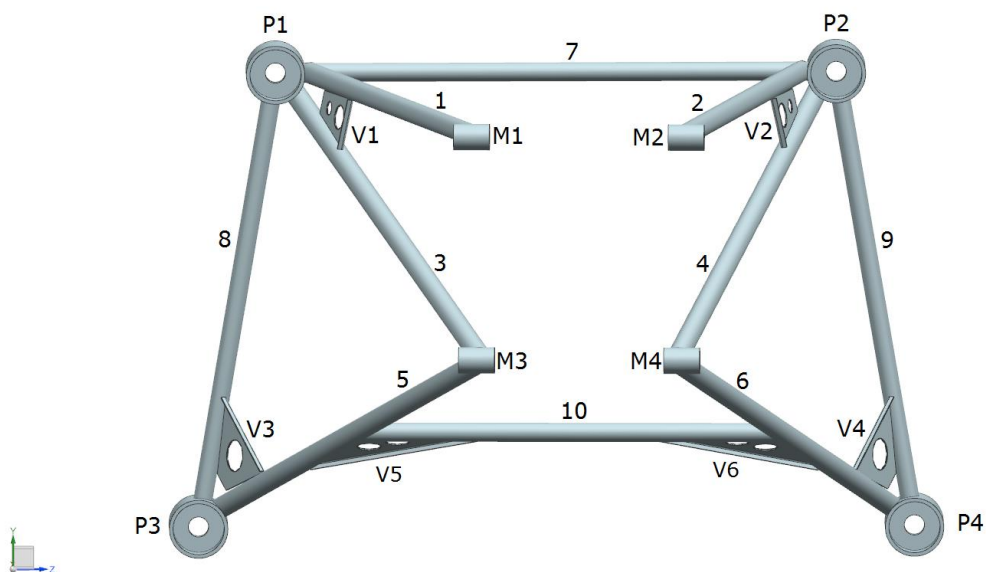
Obr. 17 Výztuha přepážky



### 3.2.3 Číslování prvků motorového lože

Pro jasnou orientaci v konstrukci lože a následně ve výsledcích pevnostních výpočtů byl zaveden systém číslování konstrukčních prvků lože. Toto značení je dodržováno v celé práci.

- Pruty jsou označeny číslicemi 1 až 10.
- Body, ve kterých je lože uchyceno přes silentbloky k přepážce, jsou označeny P1 až P4.
- Místa, kde se lože připojuje k motoru, jsou označeny M1 až M4.
- Výztuhy konstrukce pro zvýšení její tuhosti jsou označeny V1 až V6.



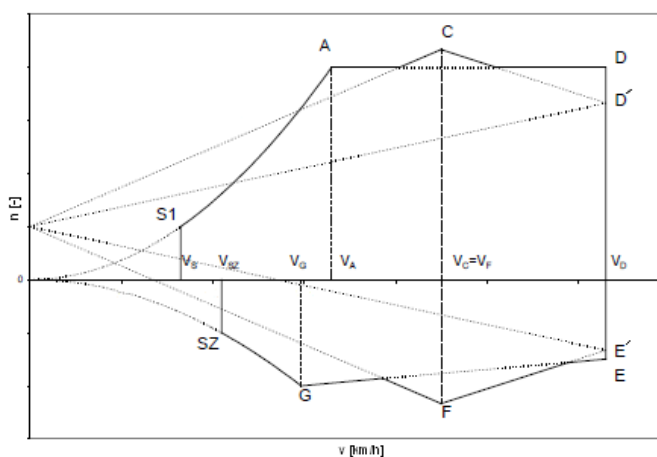
Obr. 18 Systém číslování motorového lože (pohled zepředu)

## 4 Zatížení motorového lože

### 4.1 Požadavky předpisů

Aby letoun mohl být legálně provozován na území konkrétního státu, musí splňovat všechna kritéria tamních předpisů. Tyto předpisy zajišťují, že použití letounu pro stanovený účel bylo bezpečné a nebyl ohrožen letový provoz. V této práci budou brány v potaz požadavky nejen stavebního předpisu UL-2 [9] platného v České republice, ale i předpisu LTF-UL [10] platného pro Německo a ASTM [11] pro USA.

Všechny jmenované předpisy stanovují, že se konstrukce letounu při provozním zatížení nesmí nijak trvale deformovat ani poškodit a veškeré nastalé deformace nesmí omezit bezpečný provoz. Pevnost konstrukce se tedy musí prokázat pro všechny body obálky provozních násobků, ve které se může letoun pohybovat.



Obr. 19 Obálka provozních násobků

Při početním zatížení pak konstrukce musí odolat nejméně 3 vteřiny, než dojde k její poruše. Početní zatížení se určuje jako provozní zatížení násobené součinitelem bezpečnosti, který je standardně volen  $f= 1,5$  [-].

#### 4.1.1 Návrhové případy zatížení

Následující případy zatížení odpovídají předpisům UL-2, LTF-UL i ASTM.

- a) Motorové lože a jeho zavěšení musí být navrženo na následující případy zatížení:
  - 1) Zatížení provozním kroutícím momentem od motoru, které odpovídá vzletovému výkonu a příslušným otáčkám vrtule, který působí spolu se 75 % provozního zatížení podle provozních podmínek v bodě A letové obálky [9].
  - 2) Zatížení provozním kroutícím momentem od motoru, které odpovídá maximálnímu trvalému výkonu a příslušným otáčkám vrtule, který působí spolu s provozním zatížením podle provozních podmínek z případu A letové obálky [9].

- b) Pro konvenční pístové motory s přímým pohonem vrtule se provozní kroutící moment od motoru, který se používá ve výše uvedeném bodu (a), vypočte tak, že násobíme střední (průměrný) kroutící moment příslušným součinitelem  $i_m$  podle následující tabulky [9]:

Počet válců	Dvoutaktní motor	Čtyřtaktní motor
1	4	8
2	3	4
3	2,5	3
4	1,5	<b>2</b>
5 a více	1,33	1,33

Tab. 3 Hodnota součinitele pro vynásobení kroutícího momentu dle odstavce b).  
Použitá hodnota je zvýrazněna

#### 4.1.2 Boční zatížení motorového lože

Motorové lože a konstrukce, na níž je zavěšeno musí být navrženy na provozní obrátový násobek zatížení v bočním směru:

- Ne menším než jedna třetina provozního násobku obratu pro případ "A" obálky obrátů [9], [10].
- Ne menším než 1,5 [-] [11].

#### 4.1.3 Podmínky havarijního přistání

Jelikož se na letounu nachází motor i lože před pilotní kabinou, není nutné dimenzovat na předpisem stanovené násobky vznikající při nouzovém přistání.

#### 4.1.4 Početní zatížení

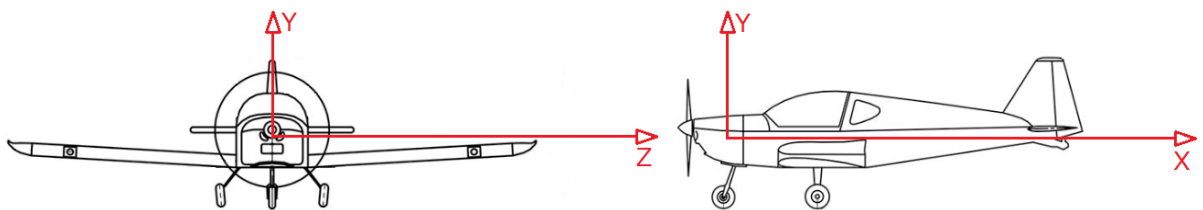
Podle všech předpisů, které jsou v této práci použity, je početní zatížení definováno jako provozní zatížení vynásobené součinitelem bezpečnosti. Ten, pokud není uvedeno jinak, musí být  $f= 1,5$  [-]. Pro šrouby je jeho hodnota předepsána vyšší, konkrétně  $f= 1,5 \cdot 2= 3$  [-]. Ostatní případy zvýšené hodnoty součinitele bezpečnosti nejsou pro tuto práci relevantní.

## 4.2 Stanovení zatížení

Během letu na motorové lože působí:

- 1) Setrvačné síly vznikající při pohybu letounu.
- 2) Tahová síla vytvářená vrtulí.
- 3) Reakční moment motoru.

Všechny tyto síly a momenty, které působí na lože od motoru jsou rozloženy do lokálního souřadného systému (viz obr. 20), který má počátek v těžišti motoru a jeho osa  $x$  je rovnoběžná s podélnou osou letounu. Dle směru rotace vrtule je kladný směr reakčního momentu stejný jako kladný směr osy  $x$ . Účinek gyroskopického momentu na motorové lože nebude uvažován.



Obr. 20 Letadlový souřadný systém

### 4.2.1 Zatížení v návrhových případech

Zatížení v návrhových případech vychází z hodnot letové obálky. Ta dosahuje nejvyšších násobků  $n$  [-] od poryvu pro konfiguraci letounu s nejmenší hmotností tj. 356,1 kg. Byla tedy zvolena tato obálka a její body jsou popsány v následující tabulce:

bod obálky	$n$ [-]	$v$ [m/s]
A	4,00	36,45
C	6,08	58,89
D	4,47	80,56
E	-2,47	80,56
F	-4,08	58,89
G	-2,00	38,09

Tab. 4 Body obálky provozních násobků

- 1) Setrvačné síly jsou dány násobkem v bodě A letové obálky a hmotností motoru s příslušenstvím, která byla stanovena v kapitole 2.2.2.

$$F_g = m_{mot} \cdot n \cdot g \text{ [N]} \quad (1)$$

- 2) Tahová síla, která působí na motorové lože, se určí pomocí výkonu a rychlosti v bodě A a účinnosti vrtule. Účinnost vrtule byla stanovena jako  $\eta = 1$  [-], čímž se zvyšuje bezpečnost při následném dimenzování.

$$P_{mot} \cdot \eta = T \cdot v \text{ [W]} \quad (2)$$

Hodnota tahu se pak vypočítá převedením vztahu (2) do formy:

$$T = \frac{P_{mot} \cdot \eta}{v} [N] \quad (3)$$

- 3) Reakční moment motoru se vypočítá pomocí výkonu a otáček motoru v daném bodě, převodu reduktoru a součinitele z tabulky č. 3.

$$M_r = 2 \cdot \frac{P_{mot} \cdot i \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_{mot}} [Nm] \quad (4)$$

Pro potřeby výpočtů byly hodnoty hmotností a výkonů brány podle varianty motoru ULS/S, jelikož zatížení vznikající pro variantu UL/A/F je menší, tedy tvoří podmnožinu zatížení varianty ULS/S.

Pro případ zatížení v bodě 1) předpisu [9], [10] v kapitole 4.1.1 a) tedy bude zatížení motorového lože následující:

$$P_{vzlet} = 73,5 \text{ [kW]}; n_{mot} = 5\,800 \text{ [1/min]}; n = 4 \text{ [-]}; m_{mot} = 91,946 \text{ [kg]}$$

Setrvačná síla:

$$F_g = m_{mot} \cdot 0,75 \cdot n \cdot g [N] \quad (5)$$

$$F_g = 91,946 \cdot 0,75 \cdot 4 \cdot 9,81 [N] \quad (6)$$

$$F_g = 2\,705 [N] \quad (7)$$

Tahová síla:

$$T = \frac{73500 \cdot 1}{36,45} [N] \quad (8)$$

$$T = 2\,017 [N] \quad (9)$$

Reakční moment:

$$M_r = 2 \cdot \frac{73500 \cdot 2,43 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 5800} [Nm] \quad (10)$$

$$M_r = 587,8 [Nm] \quad (11)$$

Pro případ zatížení v bodě 2) předpisu [9], [10] v kapitole 4.1.1 a) pak bude zatížení motorového lože rovno:

$$P_{trval} = 69 \text{ [kW]}; n_{mot} = 5\,500 \text{ [1/min]}; n = 4 \text{ [-]}; m_{mot} = 91,946 \text{ [kg]}$$

Setrvačná síla:

$$F_g = 91,946 \cdot 4 \cdot 9,81 [N] \quad (12)$$

$$F_g = 3\,607 [N] \quad (13)$$

Tahová síla:

$$T = \frac{69000 \cdot 1}{36,45} [N] \quad (14)$$

$$T = 1\,893 [N] \quad (15)$$

Reakční moment:

$$M_r = 2 \cdot \frac{69000 \cdot 2,43 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 5500} \text{ [Nm]} \quad (16)$$

$$M_r = 581,9 \text{ [Nm]} \quad (17)$$

Výsledné hodnoty pro návrhové případy jsou uvedeny v následující tabulce:

Případ zatížení	n [-]	F <sub>g</sub> [N]	T [N]	Mr [Nm]	úhel náběhu α [°]
Předpis 1. (A)	4	2 705	2 017	587,8	10,69
Předpis 2. (A)	4	3 607	1 893	581,9	10,69

Tab. 5 Zatížení motorového lože v návrhových případech

#### 4.2.2 Boční zatížení

Zde se jedná o boční zatížení podle předpisů [9], [10] a [11]. Lože musí odolat síle působící na obě strany, proto je před rovnicemi i výslednou hodnotou znaménko ±.

Boční zatížení dle [9] a [10]:

$$F_b = \pm \frac{1}{3} \cdot n \cdot m_{mot} \cdot g \text{ [N]} \quad (18)$$

$$F_b = \pm \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 91,946 \cdot 9,81 \text{ [N]} \quad (19)$$

$$F_b = \pm 1 202 \text{ [N]} \quad (20)$$

Boční zatížení dle [11]:

$$F_b = \pm 1,5 \cdot m_{mot} \cdot g \text{ [N]} \quad (21)$$

$$F_b = \pm 1,5 \cdot 91,946 \cdot 9,81 \text{ [N]} \quad (22)$$

$$F_b = \pm 1 352 \text{ [N]} \quad (23)$$

Případ zatížení	n [-]	F <sub>b</sub> [N]	T [N]	Mr [Nm]	úhel náběhu α [°]
Boční zatížení [9], [10]	1/3·n	±1 202	-	-	-
Boční zatížení [11]	1,5	±1 352	-	-	-

Tab. 6 Boční zatížení motorového lože pro vybrané předpisy

#### 4.2.3 Zatížení od letových případů

Obdobným způsobem, jaký byl použit v rovnicích (1), (3) a (4), byly stanoveny hodnoty setrvačné síly, tahu a reakčního momentu působící na motorové lože v ostatních významných bodech obálky provozních násobků. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Případ zatížení	n [-]	F <sub>g</sub> [N]	T [N]	Mr [Nm]	úhel náběhu α [°]
A (vzletový výk.)	4	3 607	2 017	587,8	10,69
C	6,08	5 480	1 172	581,9	4,44
D	4,47	4 033	857	581,9	-0,61
E	-2,47	-2 230	857	581,9	-5,49
F	-4,08	-3 677	1 172	581,9	-8,97
G	-2	-1 803	1 930	581,9	-9,84

Tab. 7 Zatížení motorového lože pro letové případy ve vybraných bodech obálky

#### 4.2.4 Pozemní zatížení

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.1.3, není pro toto konstrukční řešení motorového lože nutné uvažovat havarijní přistání. Je ovšem vhodné uvést zatížení vznikající při přistání sice nehavarijním, ovšem s větším násobkem při dosednutí. Výpočet je opět shodný s rovnicí (1), ovšem bez hodnoty tahu a reakčního momentu motoru, tj. rovnice (3) a (4).

Pozemní zatížení je počítáno na násobek  $n = 4$  [-] působící směrem dolů:

$$F_g = -m_{mot} \cdot n \cdot g \text{ [N]} \quad (24)$$

$$F_g = -91,946 \cdot 4 \cdot 9,81 \text{ [N]} \quad (25)$$

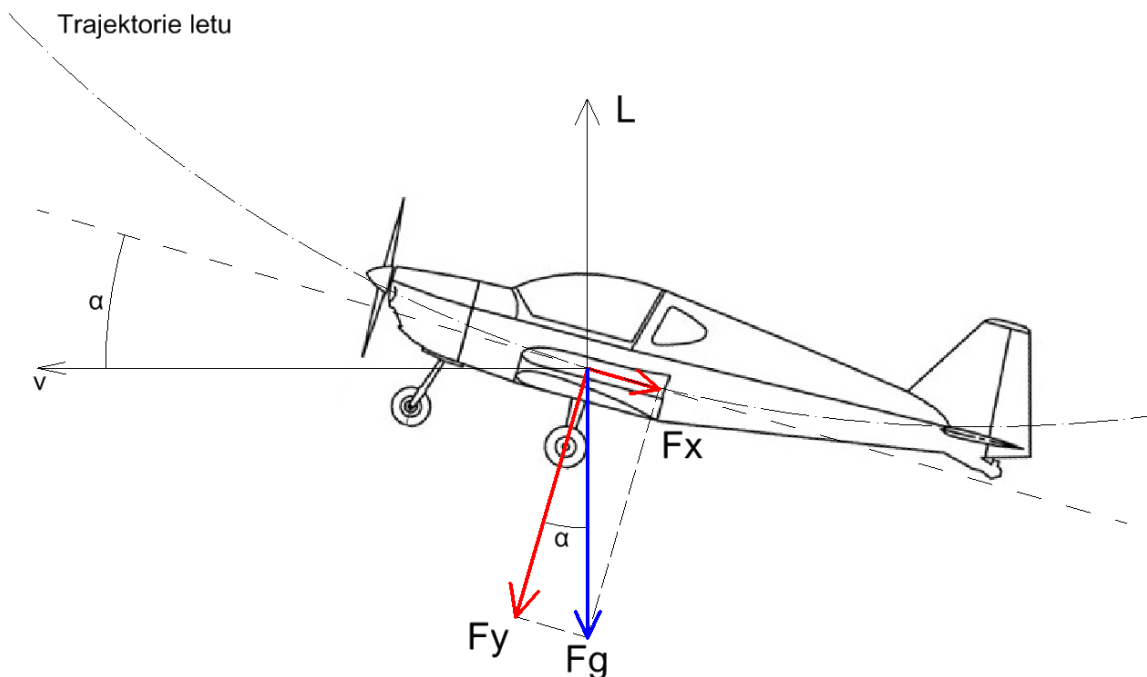
$$F_g = -3\,606,72 \text{ [N]} \quad (26)$$

Případ zatížení	n [-]	$F_g$ [N]	T [N]	Mr [Nm]	úhel náběhu $\alpha$ [°]
Pozemní zatížení	4	-3 607	-	-	-

Tab. 8 Pozemní zatížení motorového lože

#### 4.2.5 Výsledná provozní zatížení pro uvažované případy

Protože se při pohybu letounu v letové obálce mění jeho úhel náběhu, je proto nutné zatížení, která vznikají v uvažovaných případech, následně rozložit do jednotlivých souřadných os letounu. Jedná se převážně o odstředivé síly, které se rozkládají do směru osy  $x$  a  $y$ . Boční i tahová síla působí ve směru os letounu nezávisle na jeho poloze. Natočení motoru bylo pro svoji malou hodnotu ( $2^\circ$  doprava a  $1^\circ$  dolů) zanedbáno. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty již transformovaných sil.



Obr. 21 Schéma rozkladu setrvačných sil do souřadných os letounu

Případ zatížení	F <sub>g</sub> [N]	T [N]	F <sub>gx</sub> [N]	F <sub>gy</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	Mr [Nm]
Předpis 1. (A)	2 705	2 017	502	-2 658	-	587,8
Předpis 2. (A)	3 607	1 893	669	-3 544	-	581,9
A (vzletový výk.)	3 607	2 017	669	-3 544	-	587,8
C	5 480	1 172	424	-5 464	-	581,9
D	4 033	857	-43	-4 033	-	581,9
E	-2 230	857	213	2 220	-	581,9
F	-3 677	1 172	574	3 632	-	581,9
G	-1 803	1 930	308	1 777	-	581,9
Boční zatížení [9], [10]	-	-	-	-	±1 202	-
Boční zatížení [11]	-	-	-	-	±1 352	-
Pozemní zatížení	-3 607	-	-	-3 607	-	-

Tab. 9 Výsledná provozní zatížení motorového lože

#### 4.2.6 Výsledná početní zatížení pro uvažované případy

Obdobně jako v kapitole 4.2.5 jsou i setrvačné síly pro početní zatížení přepočítány do jednotlivých souřadných os letounu. V tabulce č. 10 jsou uvedeny výsledné hodnoty provozního zatížení vynásobené součinitelem bezpečnosti  $f=1,5$  [-] a odpovídajících setrvačných sil rozložených do směrů osy  $x$  a  $y$ .

Případ zatížení	F <sub>g</sub> [N]	T [N]	F <sub>gx</sub> [N]	F <sub>gy</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	Mr [Nm]
Předpis 1. (A)	4 058	3 025	753	-3987	-	881,7
Předpis 2. (A)	5 410	2 840	1 004	-5 316	-	872,8
A (vzletový výk.)	5 410	3 025	1 004	-5 316	-	881,7
C	8 220	1 758	637	-8 196	-	872,8
D	6 050	1 285	-65	-6 050	-	872,8
E	-3 345	1 285	320	3 330	-	872,8
F	-5 515	1 758	860	5 448	-	872,8
G	-2 705	2 894	462	2 665	-	872,8
Boční zatížení [9], [10]	-	-	-	-	±1 803	-
Boční zatížení [11]	-	-	-	-	±2 023	-
Pozemní zatížení	-5 410	-	-	-5 410	-	-

Tab. 10 Výsledná početní zatížení motorového lože



## 5 Vnitřní silové účinky

Pro pevnostní analýzu konstrukce lože za působení sil od motoru v jednotlivých případech zatížení byla zvolena metoda konečných prvků, konkrétně řešič NASTRAN, který je součástí programu Siemens NX (verze 11). Mimo model motoru byl v programu NX vytvořen model konstrukce lože, silentbloků i přepážky letounu. Nejprve byl vytvořen 1D model a následně také 3D model lože.

### 5.1 1D model

Pro prvotní náhled na vlastnosti konstrukce byl nejprve proveden výpočet pomocí metody konečných prvků (MKP) na 1D modelu soustavy. V modelu konstrukce lože byly pruty nejprve nahrazeny přímkami a ty byly následně vysíťovány pomocí 1D prvků typu CBEAM o velikosti 5 mm. V místech, kde jsou pruty přivařeny k domečku silentbloku, byly zadefinovány vetknutí nosníků, tudíž zde byly nosníkům odebrány všechny stupně volnosti. Výztuhy nebyly modelovány z důvodu zjednodušení modelu. Rovněž se tím výsledek výpočtu posouvá více na stranu bezpečnosti.

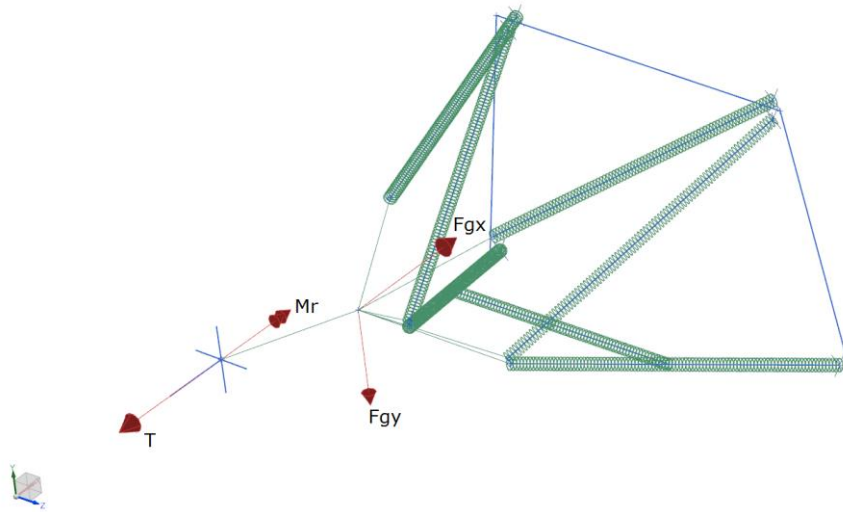
Model motoru byl nahrazen zjednodušeným modelem tvořeným prvky typu RBAR. Těm není ve výpočtu přiřazena žádná hmotnost ani geometrická vlastnost, představují však dokonale tuhé nosníky. Toto zjednodušení lze akceptovat z toho důvodu, že tuhost motoru je mnohem vyšší, než tuhost samotného lože a motor se tedy nebude v uvažovaných případech deformovat více než prvky lože. Na průběhu zatěžování se bude motor podílet tak, že bude síly působící v jeho těžišti pouze distribuovat do úchytných bodů, do kterých jsou zavedeny jednotlivé pruty.

Jednotlivým prvkům prutů byly zadány geometrické charakteristiky a byl jim přiřazen i materiál. Tj. vnější průměr táhel vedoucích k motoru je 18 mm, tloušťka stěny 1 mm. Příčné táhlo, sloužící jako výztuha, má vnější průměr 16 mm a tloušťku opět 1 mm. Materiálové vlastnosti oceli použité pro model jsou:

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ [MPa]}$$

$$\mu = 0,3 \text{ [-]}$$

Jednotlivé případy zatížení pak byly definovány podle zatížení dle tabulky č. 9 a 10. Složky odstředivých sil byly zavedeny v těžišti motoru a tah spolu s reakčním momentem byl zaveden ve středu vrtule směrem v její ose.



Obr. 22 1D model motorového lože, ve kterém zelené kružnice symbolizují jednotlivé elementy s nadefinovanými geometrickými vlastnostmi a červené šipky značí zavedené síly a momenty

### 5.1.1 Výsledná napětí pro provozní zatížení

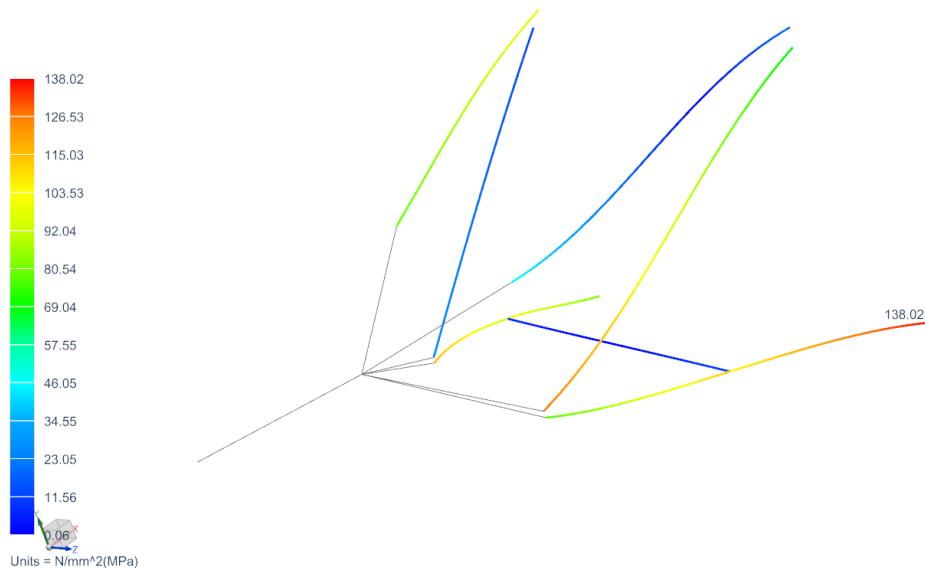
V následující tabulce jsou uvedena výsledná celková napětí vznikající v prutech pro jednotlivé případy provozního zatížení.

Napětí [MPa] Von-Mises	Pruty						
	1	2	3	4	5	6	10
Předpis 1. (A)	101,25	32,78	63,08	103,54	72,76	82,54	13,33
Předpis 2. (A)	100,03	31,11	51,50	109,53	86,38	100,20	12,94
A (vzletový výk.)	102,16	31,92	52,52	109,97	87,02	100,20	13,18
C	99,09	47,22	27,35	126,08	114,85	138,02	12,74
D	95,78	32,97	43,92	116,84	90,78	109,62	12,94
E	77,45	79,35	120,12	71,90	77,69	59,76	14,79
F	74,26	87,96	137,94	60,64	106,35	83,58	15,70
G	89,63	63,51	115,68	70,95	65,56	49,49	15,77
Boční zatížení [9], [10]	17,63	17,49	7,10	7,99	26,01	25,29	4,81
Boční zatížení [11]	19,83	19,68	7,99	8,98	29,27	28,45	5,41
Pozemní zatížení	34,14	39,17	43,78	25,97	74,97	69,00	2,67

Tab. 11 Výsledná celková napětí pro případy zatížení z Tab. 9

Maximální hodnota napětí je dosažena v prutu č. 6 pro případ zatížení v bodě C letové obálky. Jedná se konkrétně o bod vetknutí P4 prutu do přepážky. K největší deformaci lože pak dochází v případě zatížení podle bodu F a to ve styku s motorem v bodě M1, hodnota činí 0,822 mm. Údaj je to však vzhledem k uvažovaným ideálním tuhostem přepážky a úchytů pouze orientační. Pruty 7, 8 a 9 nejsou ve výsledcích zahrnuty, protože jejich napětí je vzhledem ke konstrukčnímu řešení zanedbatelné.

Výsledná napětí pro oba případy bočního zatížení jsou uváděna pouze pro variantu boční síly působící v kladném směru osy z. Síla o stejné velikosti působící v záporném směru osy z vyvolá v konstrukci lože stejná napětí jako síla působící v kladném směru.



Obr. 23 Napětí v prutech lože při zatížení provozními silami podle bodu C letové obálky. Maximální hodnota je zvýrazněna

Jelikož v kapitole 3.2 nebyla nalezena prokazatelná geometrická vazba vzdálenosti rozteče spodních úchytů lože k přepážce na konkrétním parametru, byly provedeny tyto MKP výpočty 1D modelu navíc pro různé hodnoty této rozteče. Konkrétně byl zvolen krok 30 mm na obě strany od hodnoty zvolené v kapitole 3.2 (tj.  $300 \pm 30$  mm). Mezi těmito výsledky byly hledány závislosti napětí na velikosti rozteče. Mimo hodnoty výsledných celkových napětí, byly také použity velikosti axiálních sil v jednotlivých prutech.

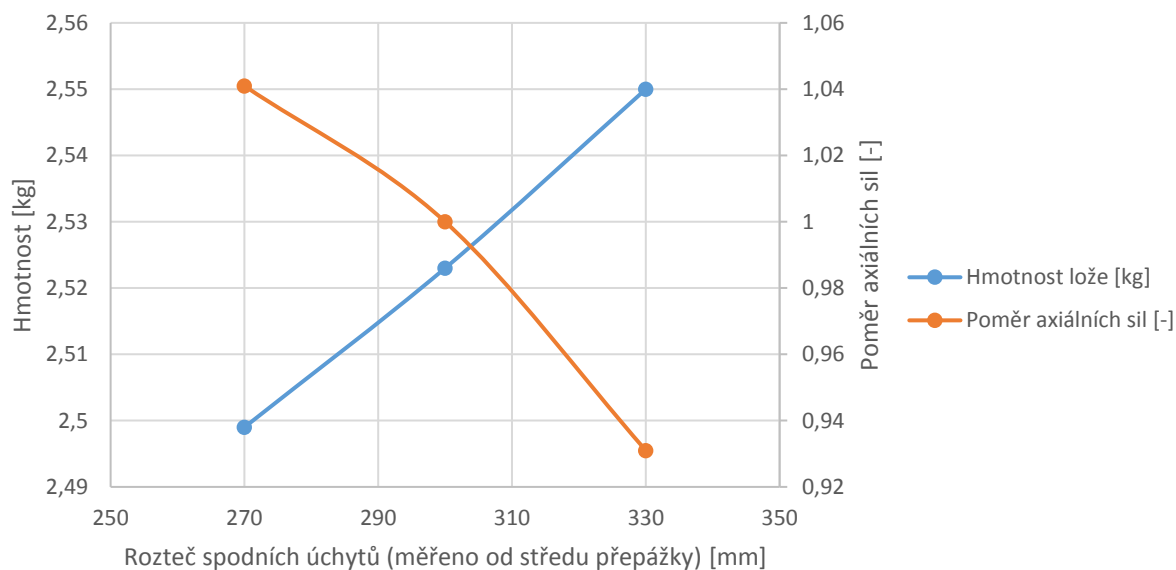
Po analýze získaných dat však bylo zjištěno, že samotné napětí požadovanou závislost neposkytuje. Jeho hodnoty se sice se změnou rozteče mění, ale nemění se podle žádné závislosti. V některých prutech napětí klesá a v jiných naopak stoupá bez ohledu na měnící se spodní rozteč. Proto byla do analýzy zahrnuta i hmotnost lože, určená pro potřeby výpočtu podle hustoty, která je programem NX použita jako výchozí pro ocel. Pro snazší zpracování byly hodnoty axiální síly z jednotlivých případů převedeny do poměru k silám, jež v prutech nastanou pro výchozí hodnotu spodní rozteče. Následně byl z těchto hodnot vytvořen průměr viz následující tabulka.

Spodní rozteč [mm]	270	300	330
Hmotnost lože [kg]	2,49	2,52	2,55
Poměr průměrných axiálních sil [-]	1,04	1	0,93

Tab. 12 Hodnoty pro stanovení spodní rozteče úchytů motorového lože

Pro určení nejvhodnější velikosti spodní rozteče byly hodnoty z tabulky č. 12 vloženy do grafu. Z něj je patrné, že s rostoucí roztečí spodních úchyťů sice klesají axiální síly v prutech, roste však hmotnost lože. To je ale v rozporu s jedním z hlavních požadavků na lože, tj. nízká hmotnost (viz kapitola 3). Z grafu tedy vyplývá, že ideální hodnota spodní rozteče je přibližně 305 mm. Při této hodnotě jsou v rovnováze parametry hmotnosti a velikosti axiálních sil v prutech. Dříve zvolená vzdálenost spodních úchyťů 300 mm je tedy téměř ideální a není ji proto potřeba měnit.

Závislost hmotnosti a axiálních sil na hodnotě spodní rozteče



Graf 2 Stanovení spodní rozteče úchyťů lože

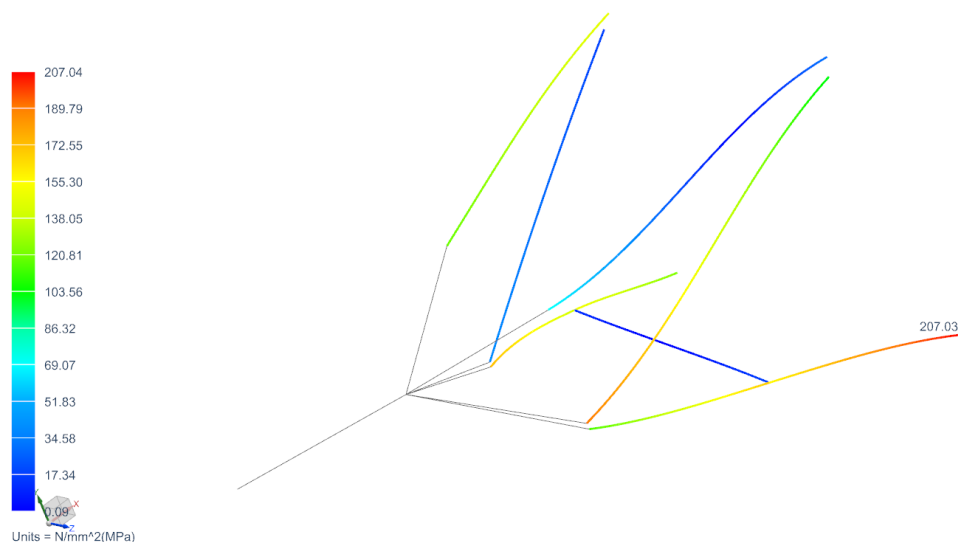
### 5.1.2 Výsledná napětí pro početní zatížení

Výsledná napětí v konstrukci pro početní zatížení jsou uvedena v tabulce č.13. Obdobně jako v tabulce č. 11 jsou uváděny hodnoty napětí pro boční zatížení směřující pouze ve směru osy z. Boční zatížení směřující v opačném směru vyvolá stejná napětí.

Napětí [MPa] Von-Mises	Pruty						
	1	2	3	4	5	6	10
Předpis 1. (A)	151,87	49,17	94,62	155,30	109,15	123,81	19,99
Předpis 2. (A)	150,04	46,67	77,24	164,30	129,57	150,31	19,41
A (vzletový výk.)	153,23	47,88	78,78	164,96	130,53	150,29	19,76
C	148,64	70,82	41,02	189,11	172,27	207,04	19,10
D	143,70	49,42	65,88	175,25	136,17	164,41	19,42
E	116,17	119,03	180,19	107,86	116,54	89,64	22,19
F	111,39	131,94	206,91	90,95	159,53	125,37	23,55
G	134,45	95,26	173,52	106,43	98,33	74,23	23,66
Boční zatížení [9], [10]	26,44	26,24	10,65	11,98	39,02	37,94	7,21
Boční zatížení [11]	29,75	29,52	11,98	13,48	43,90	42,68	8,12
Pozemní zatížení	51,21	58,76	65,67	38,95	112,45	103,49	4,00

Tab. 13 Výsledná celková napětí pro případy zatížení z Tab. 10

Stejně jako ve výsledcích pro provozní zatížení v tabulce č.11 je i zde maximální hodnota napětí dosažena v prutu č. 6 pro případ zatížení v bodě C letové obálky. Největší deformace nastane v bodě M1 spojení motorového lože a motoru pro případ zatížení v bodě F. Bod M1 se zde posune o 1,23 mm.



Obr. 24 Napětí v prutech lože při zatížení početními silami podle bodu C letové obálky. Maximální hodnota je zvýrazněna

### 5.1.3 Výběr zatížení pro pevnostní zkoušku

Při bližším pohledu na tabulky výsledných napětí je ovšem zřejmé, že případy zatížení motorového lože je vhodné rozdělit do tří kategorií:

- Režim letu s kladnými násobky (Předpis 1 a 2, body A, C, D).
- Režim letu se zápornými násobky (body E, F, G).
- Boční zatížení (dle předpisu [9] resp. [10] a [11]).

Pozemní zatížení tvoří svými hodnotami podmnožinu první skupiny, a proto nebude dále uvažováno. Z každé z těchto tří skupin je dále určen takový případ zatížení, při kterém v dané skupině vznikají největší napětí a zbylé případy tvoří podmnožinu těchto hodnot. Následně budou tyto vybrané případy otestovány v laboratoři na reálném modelu motorového lože za účelem ověření pevnosti konstrukce.

Z tohoto důvodu je doporučeno vytvořit nový zatěžovací případ, který by měl v první skupině případů jasnou převahu v dosažených napětích. Tímto případem je bod C letové obálky, nyní však se silami a momenty zvětšenými o 5 % svých původních hodnot. Hodnoty zatížení a výsledných napětí jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Případ zatížení	$F_g$ [N]	T [N]	$F_{gx}$ [N]	$F_{gy}$ [N]	$F_z$ [N]	Mr [Nm]
C + 5 %	5 754	1 230	445	-5 737	-	610,9

Tab. 14 Hodnoty provozního zatížení v bodě C zvětšené o 5 % svých původních hodnot

Napětí [MPa] Von-Mises	Pruty						
	1	2	3	4	5	6	10
C + 5 %	104,05	49,58	28,72	132,38	120,59	144,92	13,37

Tab. 15 Výsledná provozní napětí pro případ C+5%

Pro realizaci laboratorní zkoušky byly tedy určeny tyto tři případy zatížení a jim odpovídající provozní a početní zatížení:

- Bod C + 5%
- Bod F
- Boční zatížení podle předpisu [11]

Napětí [MPa] Von-Mises	Pruty						
	1	2	3	4	5	6	10
C + 5 %	104,05	49,58	28,72	132,38	120,59	144,92	13,37
F	74,26	87,96	137,94	60,64	106,35	83,58	15,70
Boční zatížení [11]	19,83	19,68	7,99	8,98	29,27	28,45	5,41

Tab. 16 Napětí při provozním zatížení pro případy určené k laboratorním zkouškám

Napětí [MPa] Von-Mises	Pruty						
	1	2	3	4	5	6	10
C + 5 %	156,07	74,37	43,07	198,57	180,88	217,39	20,06
F	111,39	131,94	206,91	90,95	159,53	125,37	23,55
Boční zatížení [11]	29,75	29,52	11,98	13,48	43,90	42,68	8,12

Tab. 17 Napětí při početním zatížení pro případy určené k laboratorním zkouškám

Napětí vznikající v prutech pro tyto tři případy zatížení jsou tudíž nejvyšší, jaká v prutech ze všech zatěžovacích případů vznikají. Jejich laboratorní zkouškou proto budou zastoupena všechna ostatní napětí pro zbylé případy.

## 5.2 3D model

Po provedení výpočtů na 1D modelu byl následně proveden výpočet pomocí MKP i na 3D modelu motorového lože. V tomto modelu jsou již všechny prvky konstrukce znázorněny tak, jak ve skutečnosti vypadají. Rovněž jsou v modelu zahrnuty i výztuhy lože. Oproti realitě modelovým výztuhám chybí pouze krajový lem zvyšující tuhost samotné výztuhy. MKP výpočtu se tím ale opět zvyšuje bezpečnost.

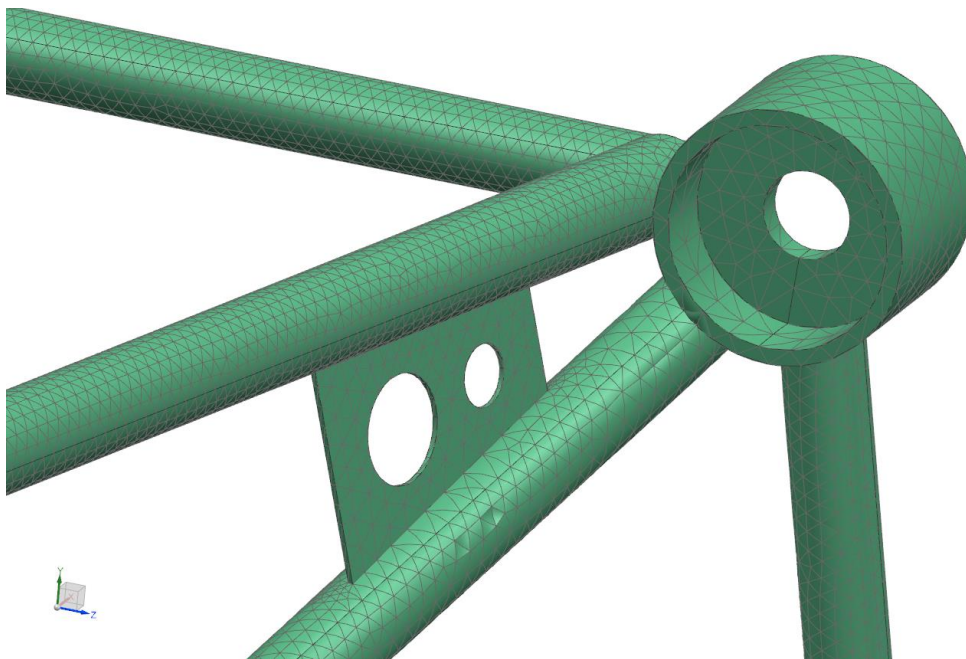
Motorové lože je tvořeno svařovanými trubkami, proto jsou všechna svarová spojení konstrukce modelována jako pevná pomocí příkazu *unite*. Do výpočtu tedy lože vstupuje jako jedno těleso. Síťování modelu bylo provedeno pomocí 3D prvků typu CTETRA(10) s velikostí 6,56 mm. Místa, kde je lože pomocí silentbloků uchyceno k přepážce, byla definována jako vetknutí. Konkrétně jde o plochy, kde se pryžová jádra dotýkají domečku silentbloku.

Model motoru byl opět jako v případě 1D modelu lože nahrazen nekonečně tuhými prvky typu RBAR. Tentokrát bylo ovšem nutné respektovat způsob, jakým je motor k loži připevněn. RBAR prvky tudíž těžiště modelu motoru spojují s ložem přes dosedací plochy motorových přírub. Ty se stejně jako v reálném případě nebudou vůči sobě pohybovat vůbec, nebo jen o zanedbatelné hodnoty.

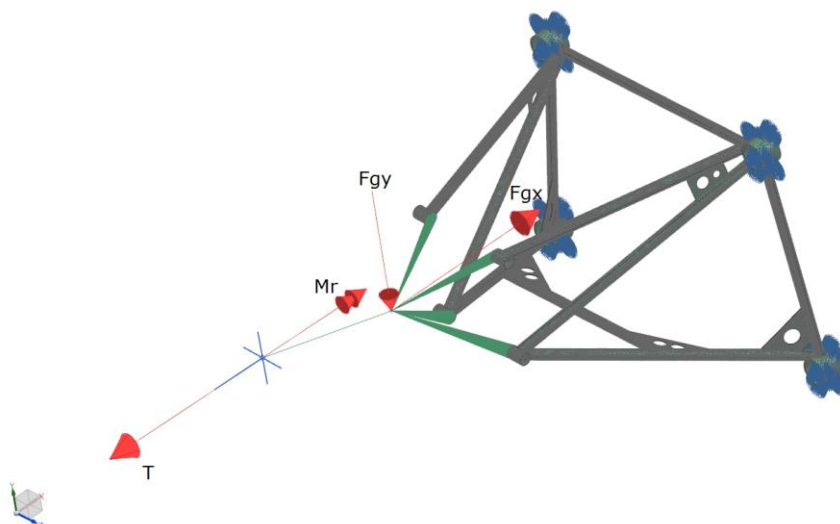
Materiál lože byl definován jako ocel s vlastnostmi:

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ [MPa]}$$

$$\mu = 0,3 \text{ [-]}$$



Obr. 25 Detail vysíťovaného domečku silentbloku P2 spolu s výztuhou V2 a připojených prutů 2, 4, 7 a 9



Obr. 26 3D model, ve kterém červené šipky značí zavedené síly a momenty. Modré prvky v bodech P1 až P4 značí pevnou vazbu lože na přepážku

### 5.2.1 Výsledná napětí pro provozní zatížení

V následující tabulce jsou uvedena maximální napětí, která vznikají v celé konstrukci lože spolu s výztuhami pro jednotlivé případy zatížení. Nyní již nejsou rozděleny na jednotlivé pruty, jelikož toto dělení není tak jednoznačné, jako v případě 1D modelu. Namísto toho je uvedeno, kde se konkrétní hodnota napětí nachází.

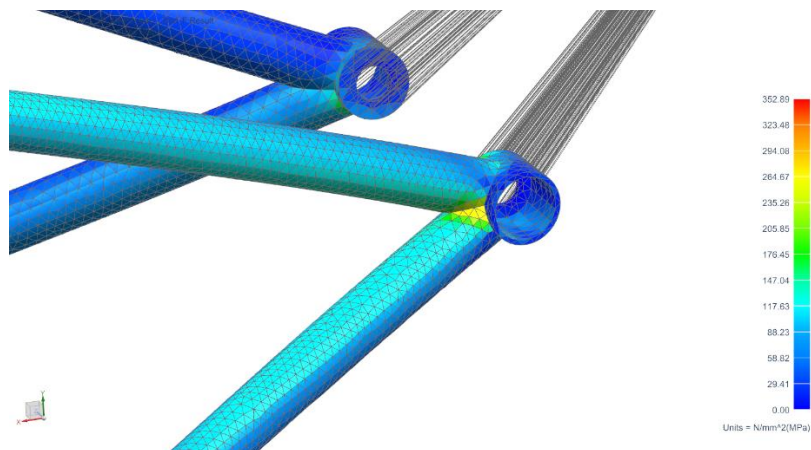
Případ	Napětí [MPa] Von Mises	Místo
Předpis 1. (A)	248,18	M4
Předpis 2. (A)	269,83	M4
A (vzletový výk.)	270,92	M4
C	322,19	M4
D	287,01	M4
E	295,10	M3
F	352,89	M3
G	274,11	M3
Boční zatížení [9], [10]	51,43	V2
Boční zatížení [11]	57,86	V2
Pozemní zatížení	148,26	M3

Tab. 18 Výsledná celková napětí pro provozní zatížení

Maximální napětí se objevuje při zatížení podle případu v bodě F letové obálky. Jedná se o úchyt lože k motoru M3, přesněji o bod, kde se pruty 3 a 5 připojují k přírubě M3. Největší deformace lože pak nastane v úchytnu M1 opět pro případ zatížení v bodě F. Tento úchyt se zde posune o 0,878 mm.

Mimo obou případů bočního zatížení, kdy maximální napětí vznikají v horní výztuze lože V2, jsou všechna maximální napětí pro jednotlivé případy zatížení vždy v jednom z úchytů lože k motoru.





Obr. 27 Detail úchytu M3 ve výsledku MKP výpočtu pro provozní zatížení v bodě F

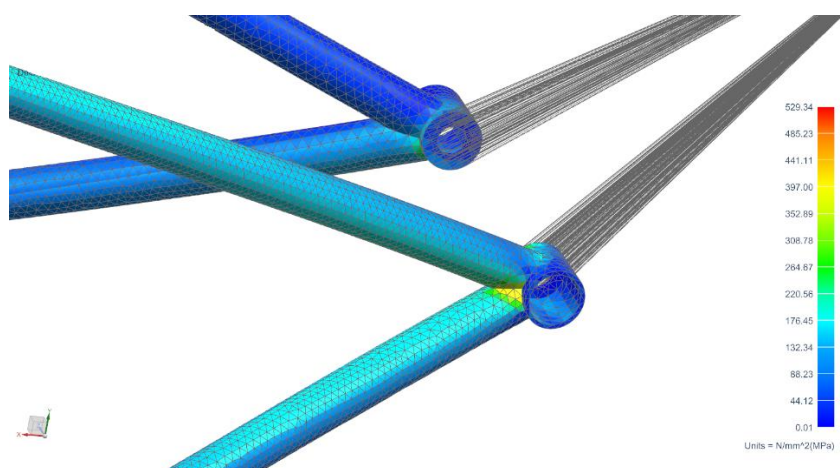
## 5.2.2 Výsledná napětí pro početní zatížení

Výsledky MKP výpočtů na 3D modelu pro početní zatížení motorového lože jsou uvedeny v tabulce. Obdobně jako v kapitole 5.2.1 nejsou výsledky rozděleny na konkrétní pruty, ale jsou uvedena místa, kde se konkrétní maximální napětí nachází.

Případ	Napětí [MPa] Von Mises	Místo
Předpis 1. (A)	372,26	M4
Předpis 2. (A)	404,74	M4
A (vzletový výk.)	406,38	M4
C	483,29	M4
D	430,51	M4
E	442,65	M3
F	529,34	M3
G	411,17	M3
Boční zatížení [9], [10]	77,15	V2
Boční zatížení [11]	86,79	V2
Pozemní zatížení	222,40	M3

Tab. 19 Výsledná celková napětí pro početní zatížení

Stejně jako pro provozní zatížení je maximální napětí při početním zatížení dosaženo pro případ F v místě M3 konstrukce motorového lože. Úchyt M1 se při tomto zatížení posune o 1,317 mm.



Obr. 28 Detail úchytu M3 ve výsledku MKP výpočtu pro početní zatížení v bodě F

### 5.2.3 Zatížení pro pevnostní zkoušku

Pro pevnostní zkoušku byly v kapitole 5.1.3 určeny tři případy zatížení. Jedním z nich je případ zatížení v bodě C letové obálky navýšený o 5 % svých původních hodnot. Tento případ byl rovněž spočítán na 3D modelu a jeho výsledky jsou, spolu s ostatními dvěma případy určenými pro laboratorní zkoušku, uvedeny v následující tabulce:

Případ	Provozní zatížení		Početní zatížení	
	Napětí [MPa] Von Mises	Místo	Napětí [MPa] Von Mises	Místo
Bod C + 5 %	338,30	M4	507,46	M4
F	352,89	M3	529,34	M3
Boční zatížení [11]	57,86	V2	86,789	V2

Tab. 20 Napětí při provozním a početním zatížení pro případy určené k laboratorním zkouškám

### 5.2.4 Volba materiálu motorového lože

Ve spolupráci s výrobcem letounu byly pro realizaci navrženy dva druhy oceli:

- Nízkolegovaná ušlechtilá Cr-Mo ocel k zušlechťování, označení 15 130 (ČSN 41 5130) v zušlechťeném stavu.
- Nízkouhlíková vysokopevnostní Cr-Mo-V ocel s označením 15CDV6 (1.7734).

Označení	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p</sub> [MPa]	E [GPa]	G [GPa]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]
15 130.6	690-830	490	216	83	7 850
15CDV6	980-1 180	790	206	76	7 850

Tab. 21 Vlastnosti zvažovaných ocelí pro výrobu motorového lože

Z výsledků výpočtů MKP na 1D i 3D modelu vyplývá, že pro konstrukci lože lze použít ocel typu 15 130.6. Mimo značnou finanční úsporu a lepší dostupnost je tento materiál také vhodný z toho důvodu, že je u výrobce již používán a výrobce s ním má zkušenosti.

## 6 Pevnostní kontrola

V této kapitole bude provedena pevnostní kontrola prutů motorového lože, šroubů pro upevnění lože k přepážce a šroubů pro upevnění motoru k loži. Výchozími hodnotami jsou výsledná celková napětí z MKP výpočtů 1D modelu lože, reakce v uloženích a axiální síly v prutech.

### 6.1 Pevnostní kontrola prutů

Jednotlivé pruty nejsou namáhány pouze tahovou silou, ale jsou podrobeny kombinovanému namáhání. Jde především o napětí vznikající z působení osově síly, síly kolmé na osu prutu, osověho momentu a momentu kolmého na osu prutu.

Jednotlivé účinky složek namáhání prutu lze spočítat samostatně a následně je sečíst do výsledného celkového namáhání. Obecný postup výpočtu je následující:

Nejprve se určí plocha průřezu prutu:

$$S = \frac{\pi \cdot (D_2^2 - D_1^2)}{4} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (27)$$

Kvadratický moment průřezu:

$$J = \frac{\pi \cdot D_2^4}{64} \cdot \left(1 - \frac{D_1^4}{D_2^4}\right) \text{ [mm}^4\text{]} \quad (28)$$

Modul průřezu v ohybu:

$$W_o = \frac{\pi \cdot D_2^3}{32} \cdot \left(1 - \frac{D_1^4}{D_2^4}\right) \text{ [mm}^3\text{]} \quad (29)$$

Modul průřezu v krutu:

$$W_k = \frac{\pi \cdot D_2^3}{16} \cdot \left(1 - \frac{D_1^4}{D_2^4}\right) \text{ [mm}^3\text{]} \quad (30)$$

Tahové napětí od axiální síly se pak vypočítá:

$$\sigma_T = \frac{F_{ax}}{S} \text{ [MPa]} \quad (31)$$

Ohybové napětí od momentu působícího kolmo na osu prutu:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \text{ [MPa]} \quad (32)$$

Napětí ve smyku od síly kolmé na osu prutu:

$$\tau_s = \frac{F_{yz}}{S} \text{ [MPa]} \quad (33)$$

Napětí v krutu od axiálního momentu:

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} \text{ [MPa]} \quad (34)$$

Pokud jsou již známy všechny složky napětí, které na prut působí, lze celkové napětí v prutu určit podle následujícího vzorce:

$$\sigma_{red (Von Mises)} = \sqrt{(\sigma_T + \sigma_o)^2 + \alpha_\sigma^2 \cdot (\tau_s + \tau_k)^2} [MPa] \quad (35)$$

Součinitel  $\alpha$  v rovnici 35 nabývá hodnot:

- $\alpha_\sigma = 2$  [-] pro teorii pružnosti a pevnosti  $\tau_{max}$
- $\alpha_\sigma = \sqrt{3}$  [-] pro teorii pružnosti a pevnosti H.M.H

Z vypočítaného výsledného celkového napětí se bezpečnost namáhání prutu určí poměrem k mezi kluzu ( $R_p$ ) pro provozní zatížení a k mezi pevnosti ( $R_m$ ) pro početní zatížení.

$$j_1 = \frac{R_p}{\sigma_{red (provozní)}} [-] \quad (36)$$

$$j_2 = \frac{R_m}{\sigma_{red (početní)}} [-] \quad (37)$$

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty bezpečnosti konstrukce motorového lože pro provozní a početní případy zatížení. Hodnoty napětí pro srovnávání s mezí kluzu a mezí pevnosti jsou vybrány z hodnot získaných při MKP výpočtu 3D modelu. Dosahují vyšších hodnot než v případě 1D modelu.

Bezpečnost	Provozní bezpečnost $j_1$ [-]	Početní bezpečnost $j_2$ [-]
Předpis 1. (A)	1,97	1,85
Předpis 2. (A)	1,82	1,70
A (vzletový výk.)	1,81	1,70
C	1,52	1,43
D	1,71	1,60
Bod C + 5 %	1,45	1,36
E	1,66	1,56
F	1,39	1,30
G	1,79	1,68
Boční zatížení [9], [10]	9,53	8,94
Boční zatížení [11]	8,47	7,95
Pozemní zatížení	3,30	3,10

Tab. 22 Hodnoty bezpečnosti při provozním a početním zatížení konstrukce motorového lože

Axiální síla v prutech však nezpůsobuje pouze tahová napětí. Při působení směrem do prutu vyvolává napětí tlakové. Toto napětí se vypočítá pomocí stejné rovnice, jako napětí tahové, tj. rovnice (31). Navíc je ale nutné prut zkontrolovat na vzpěr, zda nedojde k překročení kritického napětí a tím ke zvýšení rizika vybočení prutu.

Nejprve je nutné určit, o jaký typ vzpěru se jedná a tím i jakým způsobem se bude počítat kritická síla.

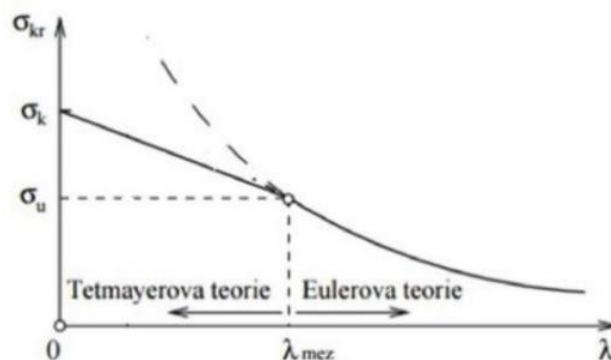
Štíhlost prutu se určí:

$$\lambda = \frac{l}{i_\lambda} [-] \quad (38)$$

Kde hodnota  $i_\lambda$  značí poloměr setrvačnosti průřezu a určuje se jako:

$$i_\lambda = \sqrt{\frac{J}{S}} [mm] \quad (39)$$

Pro určení, zda se vzpěr nachází v oblasti řešení podle Tetmajera nebo podle Eulera je dále potřeba vypočítat hodnotu mezní štíhlosti.



Obr. 29 Graf řešení vzpěru

Pro mezní štíhlost platí vztah:

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_u}} [-] \quad (40)$$

Pro případ vzpěru v oblasti podle Tetmajera platí pro výpočet kritického napětí následující rovnice [12]:

$$\sigma_{kr} = 589 - 3,82 \cdot \lambda [MPa] \quad (41)$$

Kritická síla se pak získá vynásobením kritického napětí plochou průřezu prutu:

$$F_{kr} = \sigma_{kr} \cdot S [N] \quad (42)$$

Pro výpočet kritické síly v oblasti vzpěru podle Eulera platí vztah, který je určen způsobem uložení prutu [12]. V tomto případě se jedná o prut, který je na jednom konci vetknutý (uložení na přepážce) a na druhém uloženy kloubově (úchyt na motoru se může natáčet spolu s motorem, nemůže se však libovolně posouvat).

$$F_{kr} = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot J}{l^2} [N] \quad (43)$$

Z následující tabulky vyplývá, že štíhlost prutů č.1, 2, 3, 4 a 10 je nižší než mezní štíhlost ( $\lambda < \lambda_m$ ). Jejich kritická síla se tedy bude počítat podle Tetmajerovy teorie (T). Naopak pruty č. 5 a 6 budou počítány podle Eulerovy teorie (E). Pruty 7, 8 a 9 nejsou ve výsledcích zahrnuty, jejich stabilita je zajištěna ukotvením obou krajních bodů do přepážky bez výrazného osového namáhání. Uváděny jsou rovněž pouze hodnoty u prutů, u nichž axiální síla způsobuje tlakové napětí.

Prut	1	2	3	4	5	6	10
Délka l [mm]	444	446	467	466	492	485	358
Plocha S [mm <sup>2</sup> ]	53	53	53	53	53	53	47
J [mm <sup>4</sup> ]	1 936	1 936	1 936	1 936	1 936	1 936	1 331
$i_\lambda$ [mm]	6	6	6	6	6	6	5
$\lambda$ [-]	74	74	78	77	82	81	67
$\lambda_m$ [-]	80	80	80	80	80	80	80
Oblast vzpěru	T	T	T	T	E	E	T
$\sigma_{kr}$ [MPa]	308	306	293	294	-	-	332
$F_{kr}$ [N]	16 424	16 337	15 639	15 683	34 170	35 127	15 624

Tab. 23 Výchozí hodnoty pro kontrolu vzpěru prutů při zatížení

Bezpečnost vzpěru je nakonec vyjádřena poměrem kritické síly a axiální síly působící na prut.

$$j_1 = \frac{F_{kr}}{\text{provozní síla}} \quad [-] \quad (44)$$

$$j_2 = \frac{F_{kr}}{\text{početní síla}} \quad [-] \quad (45)$$

Následující tabulky udávají bezpečnosti jednotlivých prutů na vzpěr při provozním a početním zatížení. Prázdná políčka se vyskytují u těch prutů, které nejsou tlakem zatíženy.

Bezpečnost $j_1$ [-]	Prut						
	1	2	3	4	5	6	10
Předpis 1. (A)	-	57,8	7,2	-	15,1	11,3	-
Předpis 2. (A)	-	-	9,3	-	11,0	8,8	-
A (vzletový výk.)	-	-	9,1	-	11,0	8,8	-
C	-	-	22,7	-	7,1	6,1	-
D	-	422,0	11,2	-	10,0	8,0	-
Bod C + 5 %	-	-	21,6	-	6,7	5,8	-
E	-	4,8	3,3	-	-	-	-
F	-	4,0	2,8	-	-	-	-
G	-	6,4	3,5	-	-	-	-
Boční zatížení [9], [10]	23,1	23,1	63,0	60,2	31,9	33,7	12 647,5
Boční zatížení [11]	20,6	20,5	56,0	53,5	28,4	29,9	11 242,0

Tab. 24 Hodnoty bezpečnosti prutů na vzpěr pro axiální sílu při provozním zatížení

Bezpečnost $j_2$ [-]	Prut						
	1	2	3	4	5	6	10
Předpis 1. (A)	-	38,6	4,8	-	10,1	7,5	-
Předpis 2. (A)	-	-	6,2	-	7,4	5,9	-
A (vzletový výk.)	-	-	6,1	-	7,3	5,9	-
C	-	-	15,1	-	4,7	4,0	-
D	-	281,3	7,5	-	6,7	5,3	-
Bod C + 5 %	-	-	14,4	-	4,5	3,9	-
E	-	3,2	2,2	-	-	-	-
F	-	2,7	1,9	-	-	-	-
G	-	4,2	2,4	-	-	-	-
Boční zatížení [9], [10]	15,4	15,4	42,0	40,1	21,3	22,4	8 431,7
Boční zatížení [11]	13,7	13,7	37,3	35,7	18,9	19,9	7 494,7

Tab. 25 Hodnoty bezpečnosti prutů na vzpěr pro axiální sílu při početním zatížení

## 6.2 Pevnostní kontrola šroubů na přepážce

Šrouby, které slouží k připevnění lože k přepážce, jsou namáhány podobně jako pruty kombinovaným zatížením. Působí na ně axiální síla, síla kolmá na osu šroubu, axiální moment a moment kolmý na osu. Mimo to zde navíc vystupuje ještě napětí, které vzniká z předpětí šroubu a zároveň způsobuje přerozdělení působící vnější síly dle tuhostí spojovaných částí a šroubu.

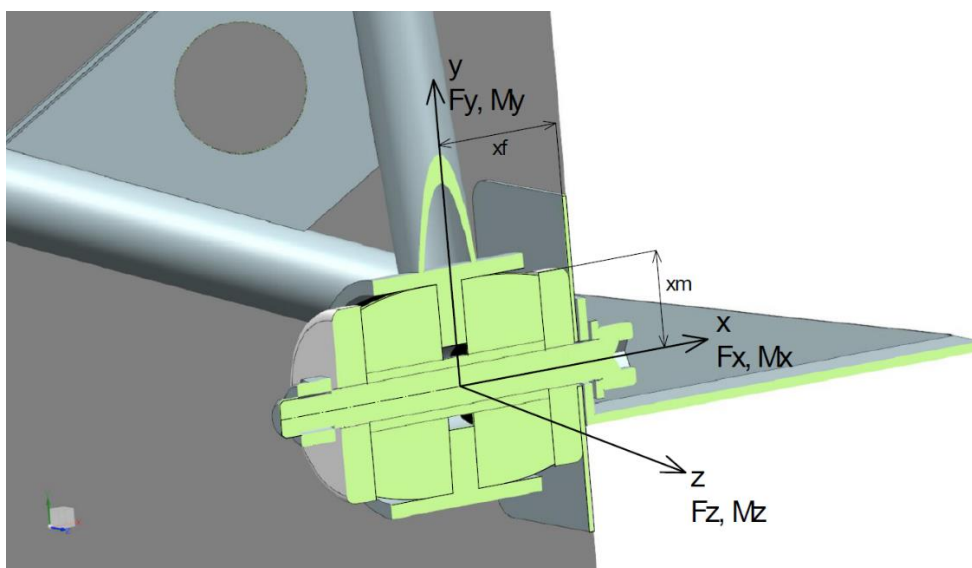
Pro realizaci byly vybrány šrouby pevnostní třídy 10.9. Jejich vlastnosti jsou popsány v tabulce níže.

Šroub	Pevnostní třída	$R_m$ [MPa]	$R_p$ [MPa]	Materiál
M8 x 0,5 x 75	10.9	1 000	900	ČSN 14 240

Tab. 26 Vlastnosti šroubů použitých na přepážce

### 6.2.1 Výpočet potřebného předpětí šroubů

Pro určení celkového napětí, které ve šroubu vzniká při jeho namáhání, je nutné znát i jeho potřebné montážní předpětí a s ním související utahovací moment, kterým se toto potřebné předpětí vyvolá. Pro předpětí je ale potřeba určit celkovou vnější axiální sílu působící na šroub. Mimo reakci ve směru osy šroubu v místě ukotvení lože, byly na axiální sílu převedeny i účinky ohybového momentu a síly kolmé na osu šroubu.



Obr. 30 Schéma zatížení bodu P4 motorového lože s vyznačenými vzdálenostmi použitými pro přepočet silových účinků

Ohybový moment  $M_{yz}$  způsobí, že se těleso silentbloku opře o hranu čelní desky na přepážce a přes takto vzniklé rameno  $x_m$  lze ohybový moment přepočítat na přírůstek axiální síly ve šroubu.



Výslednice momentu  $M_{yz}$  se vypočítá podle rovnice:

$$M_{yz} = \sqrt{M_y^2 + M_z^2} \text{ [Nmm]} \quad (46)$$

A přírůstek axiální síly se tedy určí podle vztahu:

$$\Delta F_{ax}^m = \frac{M_{yz}}{x_m} \text{ [N]} \quad (47)$$

Síla  $F_{yz}$  kolmá na osu šroubu se na přírůstek axiální síly přepočte podle podobné úvahy. Tato síla vyvolá nejprve ohybový moment na rameni  $x_f$ . Následně je tento moment převeden na axiální sílu podobně jako v rovnici (47).

Výslednice síly  $F_{yz}$  se vypočítá podle rovnice:

$$F_{yz} = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} \text{ [N]} \quad (48)$$

Tato síla působí ohybovým momentem:

$$M_{yz}^f = F_{yz} \cdot x_f \text{ [Nmm]} \quad (49)$$

Přírůstek axiální síly se nakonec určí podle vztahu:

$$\Delta F_{ax}^f = \frac{M_{yz}^f}{x_m} \text{ [N]} \quad (50)$$

Celková axiální síla působící na šroub se vypočítá součtem všech dílčích axiálních sil:

$$F_{ax} = F_x + \Delta F_{ax}^m + \Delta F_{ax}^f \text{ [N]} \quad (51)$$

Nejvyšší hodnoty jednotlivých přírůstků i výsledné axiální síly jsou pro zatěžovací případ bodu C + 5 % určeného pro laboratorní zkoušku, konkrétně pro šroub v bodě P2 motorového lože. Potřebné předpětí všech šroubů na přepážce bude tedy voleno podle této hodnoty.

Šroub	$F_x$ [N]	$\Delta F_{ax}^m$ [N]	$\Delta F_{ax}^f$ [N]	$F_{ax}$ [N]
P2	5 686	846	3 789	10 320

Tab. 27 Hodnoty jednotlivých přírůstků axiální síly a výsledná hodnota této síly

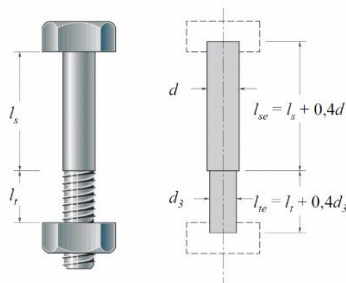
Se známou hodnotou zatěžovací síly již lze přikročit k výpočtu potřebného předpětí pro tento šroubový spoj. Nejprve se určí tuhost šroubu. Následující rovnice udává vztah pro výpočet tuhosti šroubu se zohledněním změny průměru dříku při přechodu z jeho hladké části na část se závitěm (viz obr. 31) [13]. Tuhost hladké části vychází z průměru  $d$  a tuhost závitové části z průměru  $d_3$ .

$$k_s = \frac{\pi \cdot E \cdot d_3^2 \cdot d^2}{4 \cdot (l_{se} \cdot d_3^2 + l_{te} \cdot d^2)} \text{ [N/mm]} \quad (52)$$

Hodnoty délek  $l_{se}$  a  $l_{te}$  vychází z rovnic:

$$l_{se} = l_s + 0,4 \cdot d \quad [mm] \quad (53)$$

$$l_{te} = l_t + 0,4 \cdot d_3 \quad [mm] \quad (54)$$



Obr. 31 Znárodnění délek užitých pro stanovení tuhosti šroubu [13]

Jednotlivé hodnoty pro výpočet tuhosti a výsledná tuhost šroubů na přepážce jsou uvedeny v tabulce.

Šroub	Závit	d [mm]	d <sub>3</sub> [mm]	l <sub>s</sub> [mm]	l <sub>t</sub> [mm]	l <sub>se</sub> [mm]	l <sub>te</sub> [mm]	E [MPa]	k <sub>s</sub> [N/mm]
P1	M8	8	7,387	55,2	1,5	58,4	4,5	210 000	165 906
P2	M8	8	7,387	55,2	1,5	58,4	4,5	210 000	165 906
P3	M8	8	7,387	55,2	1,5	58,4	4,5	210 000	165 906
P4	M8	8	7,387	55,2	1,5	58,4	4,5	210 000	165 906

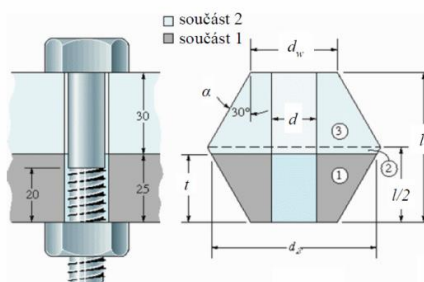
Tab. 28 Hodnoty tuhostí jednotlivých šroubů na přepážce

Tuhost spojovaných částí se určí podle následujícího postupu, kdy jsou určeny nejprve tuhosti obou čelních desek silentbloku a objímky šroubu a poté je z těchto hodnot stanovena výsledná tuhost spojovaných částí. Jednotlivé tuhosti vychází ze stejné rovnice [13], do které jsou ale dosazeny jiné hodnoty pro desky a pro objímku šroubu.

$$k_{mi} = \frac{\pi \cdot E \cdot d \cdot \tan(\alpha)}{\ln \frac{(2 \cdot t \cdot \tan(\alpha) + d_w - d) \cdot (d_w + d)}{(2 \cdot t \cdot \tan(\alpha) + d_w + d) \cdot (d_w - d)}} \quad [N/mm] \quad (55)$$

Hodnota  $t$  značí tloušťku spojované části,  $d$  průměr otvoru pro šroub,  $d_w$  dosedací průměr matice v případě čelních desek a vnější průměr pro objímku. Úhel  $\alpha$  je pro ocel, litinu a hliník roven 30°. Celková tuhost se poté vypočítá jako převrácená hodnota součtu jednotlivých tuhostí.

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_{m1}} + \frac{1}{k_{m2}} + \frac{1}{k_{m3}} \quad [mm/N] \quad (56)$$



Obr. 32 Schéma pro výpočet tuhosti spojovaných částí [13]

Hodnoty použité pro výpočet tuhostí spojovaných částí a jejich výsledná tuhost jsou v následující tabulce.

Člen	t [mm]	d [mm]	d <sub>w</sub> [mm]	α [°]	E [MPa]	k <sub>mi</sub> [N/mm]	k <sub>m</sub> [N/mm]
Čelní desky	7	8,2	13	30	210 000	4 701 853	1 152 874
Objímka šroubu	42,7	8	12	30	210 000	2 262 274	

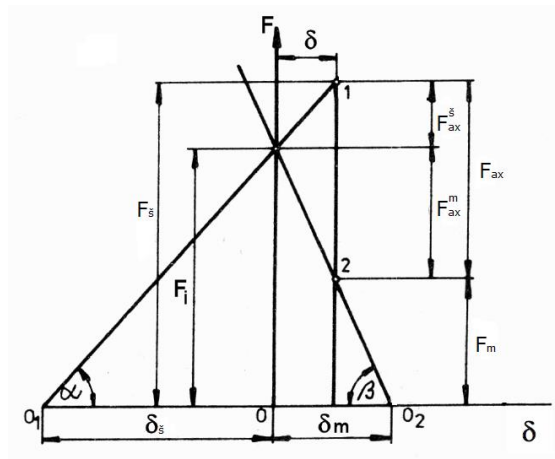
Tab. 29 Tuhosti spojovaných částí a jejich výsledná celková tuhost

Velikost potřebného předpětí pro trvalé spoje lze odvodit podle velikosti vnější síly, a to podle rovnice (57) [12].

$$F_i = F_{ax} \cdot \left(0,2 + \frac{k_m}{k_m + k_s}\right) [N] \quad (57)$$

$$F_i \approx 11\,100 [N] \quad (58)$$

Po utažení je šroub namáhán silou předpětí, která je stejně velká jako síla, kterou jsou k sobě přitlačovány spojované součásti. Po zatížení vnější silou dojde k nárůstu síly způsobující napětí ve šroubu, naopak ve spojovaných částech síla poklesne. Tato skutečnost vyplývá z diagramu předepjatého spoje na obr. 33.



Obr. 33 Diagram předepjatého spoje [12]

Působení vnější síly se přerozdělí podle výše zmíněných tuhostí. Na šroub se přenesou  $F_{ax}^s$  podle rovnice:

$$F_{ax}^s = \frac{k_s}{k_s + k_m} \cdot F_{ax} [N] \quad (59)$$

Na spojované části se tedy přenesou zbytek vnější síly:

$$F_{ax}^m = F_{ax} - F_{ax}^s [N] \quad (60)$$

Výsledná síla, která působí na šroub tedy je:

$$F_s = F_i + F_{ax}^s [N] \quad (61)$$

Na spojované části působí výsledná síla:

$$F_m = F_i - F_{ax}^m [N] \quad (62)$$

Síly zatěžující šroub i spojované části pro jednotlivé úchyty lože na přepážce jsou uvedeny v následující tabulce.

Šroub	$F_i$ [N]	$F_{ax}^s$ [N]	$F_{ax}^m$ [N]	$F_s$ [N]	$F_m$ [N]
P1	11 100	1 298	9 022	12 398	2078
P2	11 100	1 298	9 022	12 398	2078
P3	11 100	1 298	9 022	12 398	2078
P4	11 100	1 298	9 022	12 398	2078

Tab. 30 Výsledné hodnoty sil působících na šroubový spoj

Potřebný utahovací moment pro vyvození předpětí se stanoví z následujících vztahů:

$$M = M_Z + M_h \text{ [Nmm]} \quad (63)$$

Jednotlivé složky:

$$M_Z = \frac{F_i \cdot d_2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot f_t \cdot d_2 - P_h \cdot \cos\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)}{\pi \cdot d_2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha_m}{2}\right) + f_t \cdot P_h} \text{ [Nmm]} \quad (64)$$

$$M_h = \frac{F_i \cdot f_t}{2} \cdot \frac{d_w + d}{2} \text{ [Nmm]} \quad (65)$$

Člen  $d_2$  značí střední průměr závitu,  $P_h$  jeho stoupání a  $f_t$  je součinitel smykového tření; pro styk oceli s ocelí je jeho hodnota 0,15 [-]. Úhel  $\alpha_m$  vyjadřuje úhel profilu závitu a pro metrický závit je jeho hodnota 60°. Výsledné hodnoty potřebného utahovacího momentu jsou uvedeny v tabulce:

Šroub	$M_z$ [Nmm]	$M_h$ [Nmm]	$M$ [Nm]
P1	6 472	8 741	15,2
P2	6 472	8 741	15,2
P3	6 472	8 741	15,2
P4	6 472	8 741	15,2

Tab. 31 Potřebný utahovací moment

## 6.2.2 Namáhání šroubů

Pevnostní kontrola šroubů na přepážce je následně provedena podle stejného postupu, jaký je popsán pro získání celkového výsledného napětí při pevnostní kontrole prutů. Průřezové charakteristiky se stanoví podle rovnic:

$$S = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (66)$$

$$W_k = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (67)$$

Tahové napětí  $\sigma_T$  se stanoví podle rovnice (31), napětí ve stříhu  $\tau_s$  podle rovnice (33) a napětí v krutu  $\tau_k$  podle rovnice (34). Výsledné napětí se následně vypočítá podle rovnice:

$$\sigma_{red} = \sqrt{(\sigma_T)^2 + \alpha_\sigma \cdot (\tau_s + \tau_k)^2} \text{ [MPa]} \quad (68)$$

Součinitel  $\alpha$  pro výpočet předepjatého spoje má hodnotu  $\alpha_\sigma = \sqrt{3}$  [-].

Bezpečnost při zatěžování šroubů na přepážce se získá porovnáním provozního napětí s mezí kluzu a početního napětí s mezí pevnosti.

$$j_1 = \frac{R_p}{\sigma_{red}(\text{provozní})} [-] \quad (69)$$

$$j_2 = \frac{R_m}{\sigma_{red}(\text{početní})} [-] \quad (70)$$

Podle těchto dvou rovnic byly sestaveny dvě následující tabulky, v nichž jsou uvedeny hodnoty bezpečnosti šroubů sloužících k uchycení lože na přepážku:

Bezpečnost $j_1$ [-]	Šroub			
	P1	P2	P3	P4
Předpis 1. (A)	1,9	1,8	1,8	1,8
Předpis 2. (A)	1,8	1,8	1,8	1,7
A (vzletový výk.)	1,8	1,8	1,8	1,7
C	1,7	1,7	1,7	1,6
D	1,8	1,8	1,8	1,7
Bod C + 5 %	1,7	1,7	1,7	1,6
E	1,8	1,9	1,7	1,9
F	1,7	1,8	1,6	1,8
G	1,8	1,8	1,8	1,9
Boční zatížení [9], [10]	2,0	2,0	2,0	2,0
Boční zatížení [11]	2,0	2,0	1,9	1,9

Tab. 32 Bezpečnost šroubů při provozním zatížení

Bezpečnost $j_2$ [-]	Šroub			
	P1	P2	P3	P4
Předpis 1. (A)	1,6	1,5	1,6	1,4
Předpis 2. (A)	1,6	1,5	1,5	1,3
A (vzletový výk.)	1,6	1,5	1,5	1,3
C	1,4	1,3	1,3	1,1
D	1,5	1,5	1,5	1,3
Bod C + 5 %	1,4	1,3	1,3	1,1
E	1,5	1,6	1,4	1,8
F	1,3	1,6	1,2	1,6
G	1,6	1,6	1,4	1,8
Boční zatížení [9], [10]	1,9	2,0	1,8	1,9
Boční zatížení [11]	1,9	2,0	1,8	1,8

Tab. 33 Bezpečnost šroubů při početním zatížení

tlak v závitech se vypočítá podle vzorce:

$$P = \frac{4 \cdot F_{\xi}}{\frac{m}{P_h} \cdot \pi \cdot (d^2 - d_1^2)} [MPa] \quad (71)$$

Nejvyšší tlak, který se v závitu objeví má hodnotu 142,7 MPa pro početní zatížení v bodě C + 5 %. Dovolovaný tlak v závitech pro ocelové šrouby třídy 10.9 je 200 MPa.

## 6.3 Pevnostní kontrola šroubů na motoru

Šrouby, zajišťující spojení motoru a lože, jsou stejně jako šrouby pro upevnění lože na přepážku namáhány kombinovaným zatížením. Postup pevnostní kontroly je proto proveden podle stejného postupu jako v kapitole 6.2.

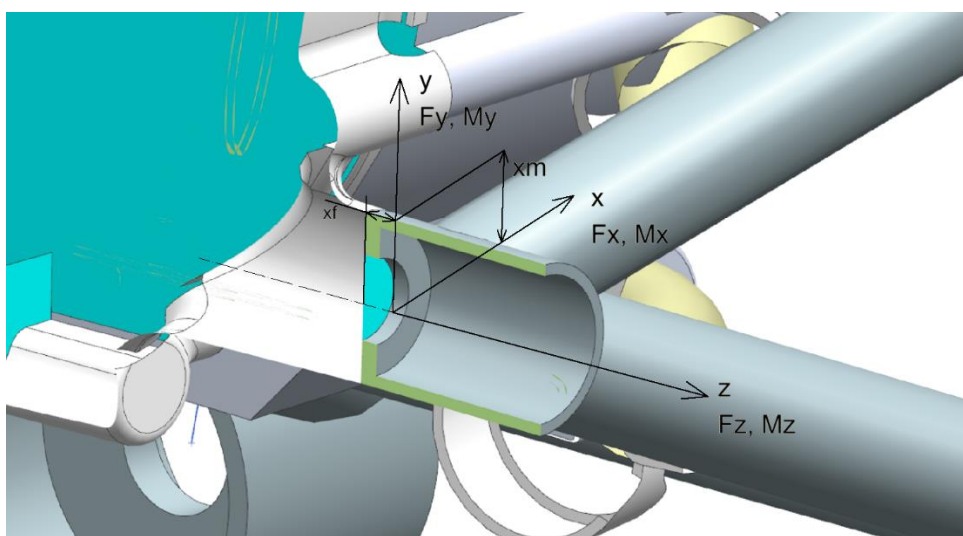
Výběr šroubu je dán již z výroby motoru, a to podle závitu v úchytných bodech motoru. Volena byla pouze pevnostní třída. Podle hodnot reakcí v jednotlivých bodech byla vybrána třída 10.9. Vlastnosti těchto šroubů jsou v následující tabulce.

Šroub	Pevnostní třída	$R_m$ [MPa]	$R_p$ [MPa]	Materiál
M10 x 1,25 x 25	10.9	1 000	900	ČSN 14 240

Tab. 34 Vlastnosti šroubů použitých pro spojení motoru s ložem

### 6.3.1 Výpočet potřebného předpětí šroubů

Z rovnic statické rovnováhy byly nejprve určeny reakční síly, které působí na šrouby v úchytech motoru. Z nich bylo následně spočítáno potřebné předpětí. S těmito silami bylo dále spočítáno celkové napětí ve šroubu a bezpečnost při provozním a početním namáhání.



Obr. 34 Schéma zatížení bodu M4 motorového lože s vyznačenými vzdálenostmi pro výpočet silových účinků.

Výslednice sil  $F_y$  a  $F_x$ , kolmých na osu šroubu, způsobuje na rameni  $x_f$  ohybový moment  $M_{yx}$ . Těleso příruby se opře o hranu ve vzdálenosti  $x_m$  od osy šroubu a přes toto rameno je moment  $M_{yx}$  přepočítán na přírůstek axiální síly.

Výslednice síly  $F_{yx}$ :

$$F_{yx} = \sqrt{F_y^2 + F_x^2} \text{ [N]} \quad (72)$$

Moment, který tato síla způsobuje:

$$M_{yx}^f = F_{yx} \cdot x_f \text{ [Nmm]} \quad (73)$$

Rovnice pro výpočet přírůstku axiální síly:

$$\Delta F_{ax}^f = \frac{M_{yx}^f}{x_m} [N] \quad (74)$$

Výsledná axiální síla působící na šroub se vypočítá součtem reakce  $F_z$  a přírůstku axiální síly z rovnice (74):

$$F_{ax} = F_z + \Delta F_{ax}^f [N] \quad (75)$$

Stejně jako pro výpočet potřebného předpětí pro šrouby na přepážce i zde platí, že nejvyšší hodnoty dosahuje axiální síla na šroub pro případ zatěžování podle bodu C + 5 % určeného pro laboratorní zkoušku. Jedná se o šroub v bodě M3. Potřebné předpětí těchto šroubů bude ale nyní vycházet z jiné úvahy.

Šroub	$F_z$ [N]	$\Delta F_{ax}^f$ [N]	$F_{ax}$ [N]
M3	901	945	1 846

Tab. 35 Dílčí hodnoty axiální síly a její výsledná hodnota

Pomocí rovnice (52) byla spočítána tuhost šroubu. Tato tuhost a ostatní veličiny potřebné pro její výpočet jsou uvedeny v tabulce.

Šroub	Závit	d [mm]	$d_3$ [mm]	$l_s$ [mm]	$l_t$ [mm]	$l_{se}$ [mm]	$l_{te}$ [mm]	E [Mpa]	$k_s$ [N/mm]
M1	M10	10	8,466	0	3,1	4	6,5	210 000	3 813 323
M2	M10	10	8,466	0	3,1	4	6,5	210 000	3 813 323
M3	M10	10	8,466	0	3,1	4	6,5	210 000	3 813 323
M4	M10	10	8,466	0	3,1	4	6,5	210 000	3 813 323

Tab. 36 Tuhosti šroubů v motorových úchytech

Podle rovnice (55) byla také spočítána tuhost spojovaných částí, v tomto případě přírub na motoru.

Člen	t [mm]	d [mm]	$d_w$ [mm]	$\alpha$ [°]	E [Mpa]	$k_m$ [N/mm]
Příruba	3.1	11	16	30	210 000	10 085 125

Tab. 37 Tuhost spojovaných částí

Velikost předpětí pro tyto šroubové spoje musí zaručit, že i za působení největší hodnoty radiální síly  $F_{yx}$  nedojde k vzájemnému pohybu šroubu a příruby motorového lože. Výsledná zbytková tlaková síla  $F_m$  na spojované části po předepnutí a zatížení šroubového spoje musí být větší nebo rovna maximální hodnotě radiální síly  $F_{yx}$  dělené součinitelem tření  $f_t$  mezi šroubem a přírubou.

$$F_m \geq \frac{F_{yx}}{f_t} [N] \quad (76)$$

Pro hodnotu maximální radiální síly  $F_{yx} = 3\,406$  N pro zatížení ve spoji M3 podle bodu C + 5 % a součinitele tření  $f_t = 0,15$  [-] je tedy výsledná zbytková síla rovna:

$$F_m \geq 22\,706 [N] \quad (77)$$

Takovéto výsledné zbytkové síly ve spojovaných částech je docíleno tehdy, je-li použito předpětí o minimální velikosti:

$$F_i = 24\,500 \text{ [N]} \quad (78)$$

Z rovnic (59) až (62) byly pro tuto hodnotu předpětí a výše zjištěné tuhosti vypočteny síly, které se přenáší na šroub a spojované části. Výsledky jsou uvedeny v tabulce.

Šroub	$F_i$ [N]	$F_{ax}^{\dot{s}}$ [N]	$F_{ax}^m$ [N]	$F_{\dot{s}}$ [N]	$F_m$ [N]
M1	24 500	506	1 339	24 506	23 161
M2	24 500	506	1 339	24 506	23 161
M3	24 500	506	1 339	24 506	23 161
M4	24 500	506	1 339	24 506	23 161

Tab. 38 Výsledné hodnoty sil působících na šroubový spoj

Utahovací moment potřebný pro vytvoření požadovaného předpětí se stanoví z rovnic (63), (64) a (65).

Šroub	$M_z$ [Nmm]	$M_h$ [Nmm]	$M$ [Nm]
M1	14 512	23 888	38,4
M2	14 512	23 888	38,4
M3	14 512	23 888	38,4
M4	14 512	23 888	38,4

Tab. 39 Potřebný utahovací moment pro šrouby

### 6.3.2 Namáhání šroubů

Pro pevnostní kontrolu jsou spočítána jednotlivá napětí. Jedná se o tahové napětí  $\sigma_T$  od axiální síly, napětí ve střihu  $\tau_S$  od síly kolmé na osu šroubu a napětí v krutu  $\tau_k$  od momentu, který se vyvodí při utažení spoje. Z nich je následně stanoveno celkové napětí  $\sigma_{red}$  podle rovnice (68). Bezpečnost při zatížení šroubů se poté vypočítá z rovnic:

$$j_1 = \frac{R_p}{\sigma_{red}(\text{provozní})} [-] \quad (79)$$

$$j_2 = \frac{R_m}{\sigma_{red}(\text{početní})} [-] \quad (80)$$

Výsledné bezpečnosti vypočítané podle rovnic (79) a (80) jsou pro jednotlivé případy zatěžování šroubů v úchytech lože k motoru uvedeny v tabulkách 40 a 41.



Bezpečnost $j_1$ [-]	Šroub			
	M1	M2	M3	M4
Předpis 1. (A)	1,2	1,2	1,2	1,2
Předpis 2. (A)	1,2	1,2	1,2	1,2
A (vzletový výk.)	1,2	1,2	1,2	1,2
C	1,2	1,1	1,2	1,1
D	1,2	1,2	1,2	1,2
Bod C + 5 %	1,1	1,2	1,1	1,2
E	1,2	1,2	1,2	1,2
F	1,2	1,2	1,2	1,2
G	1,2	1,3	1,2	1,2
Boční zatížení [9], [10]	1,2	1,2	1,2	1,2
Boční zatížení [11]	1,2	1,2	1,2	1,2

Tab. 40 Bezpečnost šroubů při provozním zatížení

Bezpečnost $j_2$ [-]	Šroub			
	M1	M2	M3	M4
Předpis 1. (A)	1,2	1,1	1,2	1,2
Předpis 2. (A)	1,1	1,1	1,2	1,1
A (vzletový výk.)	1,1	1,1	1,2	1,1
C	1,1	1,02	1,1	1,04
D	1,1	1,1	1,2	1,1
Bod C + 5 %	1,1	1,2	1,02	1,1
E	1,2	1,3	1,2	1,3
F	1,1	1,3	1,1	1,2
G	1,2	1,4	1,2	1,3
Boční zatížení [9], [10]	1,3	1,3	1,3	1,3
Boční zatížení [11]	1,3	1,3	1,3	1,3

Tab. 41 Bezpečnost šroubů při početním zatížení

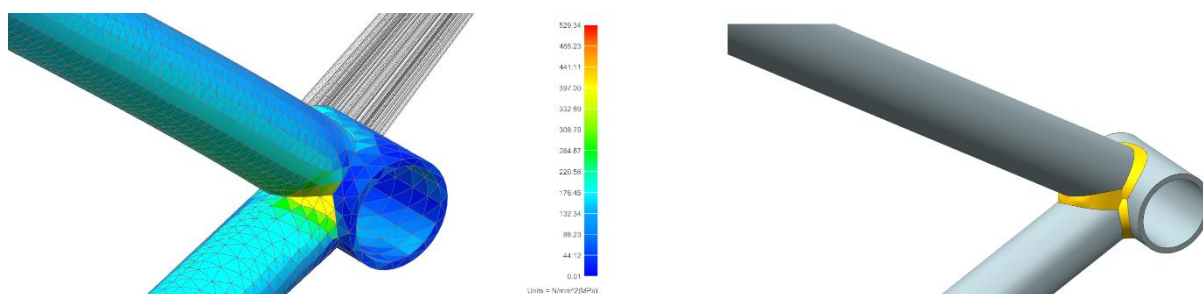
Hodnota tlaku v závitech P, která se vypočítá podle rovnice (71), je pro tento případ šroubového spoje nižší než v případě šroubů na přepážce. Nejvyšší tlak v závitech pro šrouby motorových úchytů je 74,9 MPa pro početní zatížení podle bodu C + 5 %. Nejvyšší dovolený tlak pro šrouby pevnostní třídy 10.9 je 200 MPa.

## 6.4 Pevnostní kontrola svarů

Samostatné výpočty pro kontrolu svarů nebyly v této práci provedeny z důvodu složité geometrie tvaru a vzájemných silových interakcí mezi jednotlivými pruty v místě spojení.

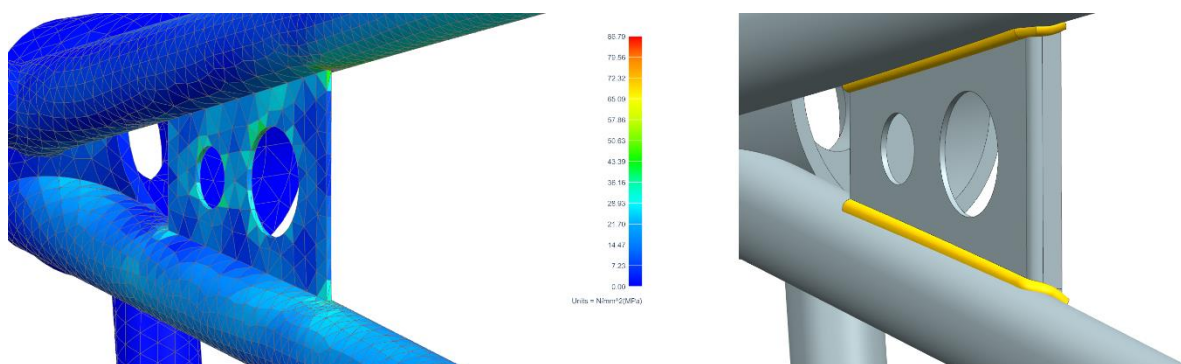
Napětí ve svaru však lze posoudit z výsledků MKP výpočtu 3D modelu motorového lože v kapitole 5.2. Oproti modelu, ve kterém svary zahrnutý nejsou, bude na skutečné konstrukci v místě svaru přidáný materiál. Takže skutečné napětí v místě svaru bude nižší, než je tomu v MKP výpočtu, kde i přesto napětí nedosahuje meze pevnosti.

Nejvyšší napětí se objevuje při početním zatížení podle bodu F letové obálky v motorovém úchytu M3 (viz obr. 35 vlevo). Skutečný motorový úchyt bude mít v daném místě po svařování přidáný materiál (viz obr. 35 vpravo).



Obr. 35 Porovnání MKP modelu úchytu M3 a modelu reálného úchytu se svary

Pro případy bočního zatížení [11] je maxima napětí dosaženo ve výztuze lože V2 (viz obr. 36 vlevo). Zde opět platí, že skutečná výztuha bude k prutu přivařena, takže v místě maxima napětí bude přidáný materiál (viz obr. 36 vpravo).



Obr. 36 Porovnání MKP modelu výztuhy V2 a modelu reálné výztuhy se svary

U ostatních svarů, které se na konstrukci motorového lože vyskytují, je situace obdobná.

## 7 Hmotový rozbor

Pomocí 3D modelu motorového lože byla spočítána hmotnost jednotlivých prvků lože a následně i lože jako celku. Rovněž bylo určeno těžiště. V následující tabulce jsou uvedeny hmotnosti prutů a výztuh lože.

Položka	m [kg]	Délka l [mm]	Σm [kg]
Prut 1	0,18	444	1,843
Prut 2	0,179	446	
Prut 3	0,196	467	
Prut 4	0,194	466	
Prut 5	0,207	492	
Prut 6	0,204	485	
Prut 7	0,156	421	
Prut 8	0,126	340	
Prut 9	0,126	340	
Prut 10	0,132	358	
Výztuha 1	0,014	-	
Výztuha 2	0,014	-	
Výztuha 3	0,022	-	
Výztuha 4	0,022	-	
Výztuha 5	0,035	-	
Výztuha 6	0,036	-	

Tab. 42 Hmotnosti prutů a výztuh

Pro získání výsledné hmotnosti celé svařované konstrukce, je k hmotnosti prutů a výztuh z tabulky č. 42 nutné připočítat ještě hmotnosti přírub na motoru a domečků silentbloků.

Položka	m [kg]
Pruty	1,7
Výztuhy	0,14
Příruby na motoru	0,11
Domečky silentbloků	0,72
<b>Celkem svařenec</b>	<b>2,67</b>

Tab. 43 Výsledná hmotnost svařované konstrukce

Dále jsou uvedeny počty a hmotnosti potřebných spojovacích prvků a součástí silentbloku. Mimo hmotnosti šroubu M10 a podložky M10 pro příruby motoru jsou ale hmotnosti těchto prvků zaneseny do přepážky a nezvyšují tak hmotnost samotného motoru.

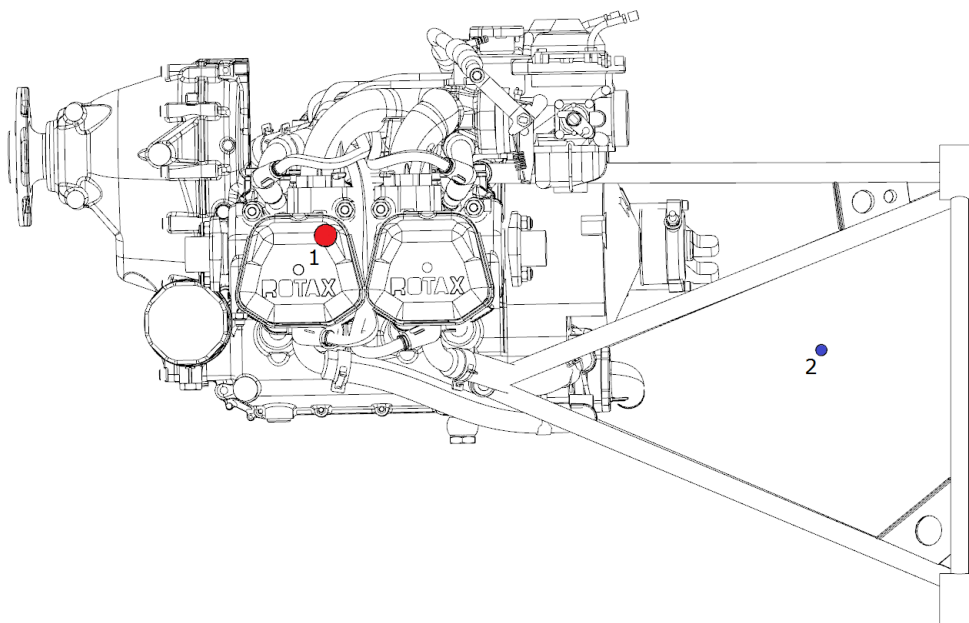
Položka	Počet	m (1ks) [kg]	m [kg]
Šroub M8	4	0,04	0,15
Maticice M8	4	0,01	0,02
Podložka M8	8	0,00	0,01
Pouzdro šroubu	4	0,02	0,08
Čelní desky	8	0,07	0,52
Jádro silentbloku	8	0,03	0,22
Šroub M10	4	0,03	0,10
Podložka M10	4	0,00	0,01

Tab. 44 Počty a hmotnosti příslušenství k motorovému loži

Těžiště samotného motoru je udáno v jeho instalačním manuálu [3]. Po připojení vrtule se těžiště posune směrem dopředu a po spojení s motorovým ložem má celá tato soustava těžiště posunutě směrem dozadu. Výsledné těžiště soustavy lože + motor + vrtule je uvedeno v tabulce č. 45 a znázorněno v obr. 37. Hodnoty souřadnic jsou vztaženy k souřadnému systému letadla, jehož počátek leží mimo letoun.

Soustava	Těžiště		
	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Motor	2 917,57	2 921,91	5,32
Lože	3 317,22	2 827,39	3,98
Motor + vrtule	2 861,20	2 932,97	3,49
Motor + vrtule + lože	2 874,43	2 929,69	3,07

Tab. 45 Těžiště motoru spolu s vrtulí a motorovým ložem



Obr. 37 Těžiště motorového lože (bod 2) a celé soustavy motoru + vrtule + lože (bod 1)

## 8 Závěr

V této práci bylo navrženo lože vhodné pro zástavbu motoru Rotax řady 912 do letounu STOL Cruiser brněnské firmy Direct Fly. Jeho konstrukce vyhovuje nejen českým stavebním předpisům UL-2, ale také německému předpisu LTF-UL a americké době ASTM.

Výsledná podoba lože byla zvolena jako svařovaná trubková konstrukce. Přínos této volby je nejen v nízké hmotnosti, ale také je zachována dostatečná tuhost a pevnost. Rovněž náročnost výroby a zástavby do letounu nebude nijak vysoká. Vůči motoru si lože zachovává dostatečnou vzdálenost i v těch nejbližších bodech.

Pevnost konstrukce byla ověřena pomocí výpočetního softwaru Siemens NX, jehož součástí je řešič MKP. Tím byl nejprve ověřen 1D model lože. Z jeho výsledků bylo stanoveno namáhání šroubů na přepážce a zjištěna jejich bezpečnost. Dále byla ověřena bezpečnost prutů na vzpěr a stanoveny reakce v motorových úchytech. Tyto reakce byly následně použity pro výpočet namáhání šroubů spojujících lože s motorem a jejich bezpečnosti. Poté byl proveden MKP výpočet zatížení na 3D modelu lože. Zde bylo zjištěno maximální napětí dosažené v konstrukci a stanoven materiál pro výrobu lože. Mimo toho byla zhodnocena i situace ve svarových spojích.

Z těchto analýz bylo zjištěno, že konstrukce vyhovuje všem požadavkům na bezpečnost při zatěžování. Následně byl proveden hmotový rozbor navržené konstrukce a stanoveno její těžiště. K práci jsou přiloženy rovněž výrobní výkresy a výkresy sestavy určené pro výrobu jednotlivých částí motorového lože a jeho následnou montáž.

## 9 Použité zdroje

- [1] Directfly. *STOL Cruiser* [online]. 2017. [cit. 2018-6-15]. Dostupné z WWW: [http://directfly.cz/?page\\_id=583](http://directfly.cz/?page_id=583).
- [2] Rotax. *Rotax 912 ULS/S* [online]. [cit. 2018-4-7]. Dostupné z WWW: <https://www.flyrotax.com/produkte/detail/rotax-912-uls-s.html>.
- [3] BRP-Rotax. *Návod k obsluze pro motory Rotax řady 912* [online]. 2016. [cit. 2018-4-12]. Dostupné z WWW: [https://teveso.cz/content/m\\_dokumentace/Navod\\_k\\_obsluze\\_912\\_vyd.4\\_r.0.pdf](https://teveso.cz/content/m_dokumentace/Navod_k_obsluze_912_vyd.4_r.0.pdf).
- [4] Woodcomp. *Uživatelská příručka elektricky stavitelné letecké vrtule SR3000* [online]. 2010-5-4. [cit. 2018-6-8]. Dostupné z WWW: <http://www.woodcomp.cz/wp-content/uploads/2016/09/sr3000rev.h-cz.pdf>.
- [5] Paul Kuntz. *Attach engine mount to engine* [online]. 2007-12-12. [cit. 2018-4-12]. Dostupné z WWW: [http://www.pipistrelbuilders.com/firewall\\_forward.html](http://www.pipistrelbuilders.com/firewall_forward.html).
- [6] Zenith Aircraft Company. *Engine bed mount plus accessories on the firewall* [online]. 2009-9-10. [cit. 2018-4-12]. Dostupné z WWW: <http://www.zenithair.com/zodiac/607/912slessengine.jpg>.
- [7] Mark Conrad Wilksch. Aircraft engine mounting. United States Patent. US 6,871,820 B2. 2005-3-29.
- [8] ŠULŽENKO, Nikolajevič M. *Konstrukce letadel*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. 418 s.
- [9] *UL 2 – I. část, požadavky letové způsobilosti, ultralehké letouny řízené aerodynamicky*. Letecká amatérská asociace ČR. 2002-10-17. Dostupné z WWW: <http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2-I.pdf>.
- [10] *LTF-UL, LuftTüchtigkeitsForderungen für aerodynamisch gesteuerte UltraLeichtflugzeuge*. Německo. 2003-1-30. Dostupné z WWW: [https://drive.google.com/file/d/0BzPJgI\\_0QQ4oR2hEV3hBaVFSOWs/view](https://drive.google.com/file/d/0BzPJgI_0QQ4oR2hEV3hBaVFSOWs/view).
- [11] *ASTM, Standard Specification for Design and Performance of a Light Sport Airplane*. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2014. Dostupné z WWW: [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [12] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [13] Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Ústav konstruování. *Předejpaté šroubové spoje* [online]. [cit. 2018-7-22]. Dostupné z WWW: [http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/5KS/\\_prednasky/prednaska6.pdf](http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/5KS/_prednasky/prednaska6.pdf).

# 10 Přílohy

## 10.1 Axiální síly v prutech

Axiální síly v prutech použité pro výpočet vzpěru v kapitole 6.1.

Provozní zatížení								
Axiální síla [N]	Případ I.	Případ II.	Bod A	Bod C	Bod D	1,05*C	Bod E	
Prut	1	4656,9	4800,4	4897,8	5177,3	4694,7	5436,2	2381,9
	2	-282,4	82,6	127,7	745,0	-38,7	782,3	-3392,3
	3	-2159,8	-1688,6	-1716,9	-690,4	-1398,7	-724,9	-4724,7
	4	4246,1	4516,5	4540,5	5236,8	4795,5	5498,6	2681,7
	5	-2261,1	-3099,2	-3111,8	-4840,7	-3421,8	-5082,8	2596,8
	6	-3117,0	-3979,5	-3978,6	-5786,8	-4381,3	-6076,1	1457,0
	10	0,8	0,6	0,6	0,1	0,4	0,1	1,6
Axiální síla [N]	Bod F	Bod G	Boční zatížení +Z [9], [10]	Boční zatížení -Z [9], [10]	Boční zatížení +Z [11]	Boční zatížení -Z [11]	Pozemní zatížení	
Prut	1	1906,7	3099,1	709,9	-709,9	798,7	-798,7	1271,6
	2	-4063,1	-2565,3	-708,6	708,6	-797,2	797,2	1887,6
	3	-5498,1	-4436,0	-248,4	248,4	-279,4	279,4	1898,1
	4	2167,4	2728,7	260,4	-260,4	293,0	-293,0	1215,6
	5	3912,0	2010,9	1071,2	-1071,2	1205,2	-1205,2	-3470,1
	6	2743,2	1088,5	-1043,5	1043,5	-1173,9	1173,9	-3392,4
	10	1,8	1,7	-1,2	1,2	-1,4	1,4	-0,7
Početní zatížení								
Axiální síla [N]	Případ I.	Případ II.	Bod A	Bod C	Bod D	1,05*C	Bod E	
Prut	1	6985,4	7200,7	7346,7	7766,0	7042,1	8154,2	3572,9
	2	-423,6	123,9	191,5	1117,5	-58,1	1173,4	-5088,5
	3	-3239,7	-2532,9	-2575,3	-1035,6	-2098,0	-1087,4	-7087,1
	4	6369,2	6774,7	6810,8	7855,1	7193,3	8247,9	4022,6
	5	-3391,6	-4648,9	-4667,7	-7261,1	-5132,7	-7624,2	3895,1
	6	-4675,5	-5969,2	-5968,0	-8680,2	-6572,0	-9114,2	2185,5
	10	1,2	0,8	0,9	0,1	0,7	0,1	2,3
Axiální síla [N]	Bod F	Bod G	Boční zatížení +Z [9], [10]	Boční zatížení -Z [9], [10]	Boční zatížení +Z [11]	Boční zatížení -Z [11]	Pozemní zatížení	
Prut	1	2860,1	4648,7	1064,9	-1064,9	1198,0	-1198,0	1907,4
	2	-6094,6	-3847,9	-1062,9	1062,9	-1195,8	1195,8	2831,4
	3	-8247,1	-6654,0	-372,6	372,6	-419,2	419,2	2847,1
	4	3251,1	4093,1	390,6	-390,6	439,5	-439,5	1823,4
	5	5868,0	3016,4	1606,8	-1606,8	1807,7	-1807,7	-5205,1
	6	4114,7	1632,7	-1565,2	1565,2	-1760,9	1760,9	-5088,6
	10	2,7	2,6	-1,9	1,9	-2,1	2,1	-1,0

Tab. 46 Axiální síly v prutech při provozním a početním zatížení

## 10.2 Reakce v uloženíh na přepážce

Silové reakce v uloženíh na přepážce použité pro výpočty namáhání šroubů v kapitole 6.2.

Provozní zatížení		Případ II.																		
		Případ I.			Případ II.			Bod A			Bod C									
Reakce [N]	Bod	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z
		P1		2532,8	-802,9	-775,8	2768,0	3081,8	-677,1	-969,2	3290,9	3149,9	-637,8	-989,6	3362,7	4314,4	-255,0	-1400,9	4543,3	
P2		3531,8	1576,3	997,9	3994,3	4127,8	1677,6	1155,8	4603,2	4193,0	1686,4	1173,4	4661,3	5414,9	1946,7	1501,8	5947,0			
P3		-1884,0	773,2	983,0	2261,3	-2582,4	1071,0	1338,0	3099,4	-2592,7	1075,1	1343,9	3111,9	-4033,1	1689,5	2076,6	4840,8			
P4		-2667,1	1142,6	-1139,3	3117,2	-3404,4	1451,8	-1462,8	3979,7	-3403,9	1451,6	-1461,9	3978,8	-4949,6	2100,7	-2139,4	5786,9			
Reakce [N]		1,05°C																		
Bod	Reakce [N]	Bod D			Bod E			Bod F			Bod G			Bod H			Bod I			
		x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z
P1		3234,5	-519,0	-1029,9	3433,9	4530,1	-267,8	-1470,9	4770,5	-1884,1	-1756,3	719,5	2674,4	-2043,9	1107,1	3806,7				
P2		4260,0	1781,9	1197,0	4770,3	5685,7	2044,0	1576,9	6244,3	-882,2	994,2	-173,2	1340,4	-1992,5	802,6	2199,1				
P3		-2851,0	1186,3	1474,4	3421,9	-4234,8	1774,0	2180,5	5082,8	2160,8	-948,7	-1084,3	2397,1	-1415,5	-1643,6	3912,3				
P4		-3747,4	1597,2	-1613,6	4381,5	-5197,1	2205,8	-2246,3	6076,3	1248,2	-495,6	566,0	1457,4	-957,0	1045,9	2743,3				
Reakce [N]		Početní zatížení																		
Bod	Reakce [N]	Bod G			Bod H			Bod I			Bod J			Bod K			Bod L			
		x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z
P1		-945,4	-1650,3	416,1	1946,9	445,3	-96,9	-180,5	490,2	501,0	-109,0	-203,1	551,5	0,0	0,0	0,0				
P2		-39,3	1010,5	47,3	1012,4	-444,8	101,1	-145,3	478,7	-500,4	113,7	-163,5	538,5	0,0	0,0	0,0				
P3		1674,1	-742,0	-832,2	2011,4	883,8	-381,4	-470,4	1071,4	994,2	-429,1	-529,3	1205,3	0,0	0,0	0,0				
P4		930,7	-365,2	431,7	1089,0	-884,3	377,3	-405,9	1043,6	-994,9	424,4	-456,7	1174,1	0,0	0,0	0,0				
Reakce [N]		1,05°C																		
Bod	Reakce [N]	Případ I.			Případ II.			Bod A			Bod C			Bod D			Bod E			
		x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z
P1		7598,4	-2408,7	-2327,4	8303,9	9245,5	-1881,2	-2907,5	9872,8	9449,7	-1913,3	-2968,8	10088,2	12943,2	-765,1	-4202,6	13629,8			
P2		10595,4	4729,0	2993,7	11982,8	12383,5	5032,8	3467,4	13809,5	12579,1	5059,1	3520,2	14007,9	16244,7	5840,2	4505,5	17840,9			
P3		-5651,9	2319,7	2949,0	6783,9	-7747,2	3213,1	4013,9	9298,1	-7778,2	3225,3	4031,6	9335,7	-12099,4	5068,5	6229,9	14522,3			
P4		-8001,3	3427,9	-3417,9	9351,6	-10213,3	4355,5	-4388,4	11999,0	-10211,8	4354,8	-4385,6	11936,5	-14848,8	6302,2	-6418,1	17360,8			
Reakce [N]		1,05°C																		
Bod	Reakce [N]	Bod D			Bod E			Bod F			Bod G			Bod H			Bod I			
		x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z
P1		9703,5	-1557,1	-3089,7	10301,8	13590,4	-803,3	-4412,7	14311,4	-5652,3	-5268,9	2158,5	8023,1	-9043,9	-6131,6	3321,3	11420,1			
P2		12780,0	5345,8	3591,0	14310,8	17057,0	6132,1	4730,8	18732,9	-2646,6	2982,7	-519,7	4021,3	-5977,4	2407,8	-1413,6	6597,4			
P3		-8553,1	3558,8	4423,2	10265,8	-12704,4	5322,0	6541,4	15248,5	6482,4	-2842,2	-3252,9	7791,2	9767,6	-4246,5	-4930,8	11736,8			
P4		-11242,2	4731,6	-4840,7	13144,5	-15593,2	6617,3	-6739,0	18228,8	3744,7	-1486,9	1697,9	4372,2	7045,9	-2871,0	3137,8	8230,0			
Reakce [N]		1,05°C																		
Bod	Reakce [N]	Bod G			Bod H			Bod I			Bod J			Bod K			Bod L			
		x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z	celkem	x	y	z
P1		-2836,2	-4950,8	1248,4	5840,6	1336,0	-290,7	-541,5	1470,6	1503,0	-327,0	-609,2	1654,5	3229,9	11357,0	0,0	11807,4			
P2		-117,9	3037,1	141,8	3037,1	-1334,3	303,2	-435,9	1436,1	-1501,1	341,1	-490,4	1615,6	-4494,4	-6763,4	0,0	8120,6			
P3		5022,2	-2226,1	-2496,6	6034,1	2651,3	-1144,3	-1411,3	3214,1	2982,7	-1287,3	-1587,8	3615,9	3521,7	-10177,1	0,0	10769,2			
P4		2792,1	-1095,5	1295,2	3267,0	-2652,9	1131,8	-1217,8	3130,8	-2984,6	1273,3	-1370,1	3522,3	4,2	-2,1	0,0	4,7			

Tab. 47 Silové reakce v uloženíh na přepážce při provozním a početním zatížení



Momentové reakce v uloženíh na přepážce použité pro výpočty namáhání šroubů v kapitole 6.2.

Provozní zatížení		Případ I.												Případ II.												Bod A												Bod B												Bod C											
		x				y				z				celkem				x				y				z				celkem				x				y				z				celkem															
Moment [Nmm]	Bod	P1	-1012,0	-5673,0	6207,4	8469,9	-1306,6	-5692,9	4644,5	7462,4	-1314,2	-5586,1	4777,3	7466,9	-2027,6	-5680,0	1495,0	6213,5	-1314,2	-5586,1	4777,3	7466,9	-2027,6	-5680,0	1495,0	6213,5	-1314,2	-5586,1	4777,3	7466,9	-2027,6	-5680,0	1495,0	6213,5	-1314,2	-5586,1	4777,3	7466,9	-2027,6	-5680,0	1495,0	6213,5																			
		P2	-512,4	-6267,4	-11533,7	13136,5	-138,6	-6333,4	-1246,1	13978,9	-192,1	-6257,6	-12492,5	13973,4	618,0	-6425,2	-14783,2	16131,0	-192,1	-6257,6	-12492,5	13973,4	618,0	-6425,2	-14783,2	16131,0	-192,1	-6257,6	-12492,5	13973,4	618,0	-6425,2	-14783,2	16131,0	-192,1	-6257,6	-12492,5	13973,4	618,0	-6425,2	-14783,2	16131,0																			
		P3	1471,5	2907,1	3679,0	4914,5	1158,0	2550,9	3122,9	4195,3	1211,3	2638,7	3171,7	4299,9	563,9	2007,6	1993,1	2884,6	1211,3	2638,7	3171,7	4299,9	563,9	2007,6	1993,1	2884,6	1211,3	2638,7	3171,7	4299,9	563,9	2007,6	1993,1	2884,6	1211,3	2638,7	3171,7	4299,9	563,9	2007,6	1993,1	2884,6																			
		P4	2005,3	4059,6	-5492,9	7118,5	2075,7	3903,7	-5793,9	7288,1	2108,0	4008,6	-5799,9	7358,7	2335,7	3766,9	-6598,9	7949,2	-5799,9	4008,6	-5799,9	7358,7	2335,7	3766,9	-6598,9	7949,2	-5799,9	4008,6	-5799,9	7358,7	2335,7	3766,9	-6598,9	7949,2	-5799,9	4008,6	-5799,9	7358,7	2335,7	3766,9	-6598,9	7949,2																			
Moment [Nmm]	Bod	P1	-1555,3	-6012,1	3765,5	7262,4	-2129,0	-5963,9	1569,7	6524,1	841,9	-8954,2	13523,5	16241,0	1419,1	-9603,5	15740,8	18493,6	-2129,0	-5963,9	1569,7	6524,1	841,9	-8954,2	13523,5	16241,0	1419,1	-9603,5	15740,8	18493,6	-2129,0	-5963,9	1569,7	6524,1	841,9	-8954,2	13523,5	16241,0	1419,1	-9603,5	15740,8	18493,6																			
		P2	152,5	-6590,7	-13358,3	14896,5	648,9	-6746,3	-15522,3	16937,4	-1616,8	-8685,9	-6926,6	11226,6	-2030,8	-9163,1	-5376,0	10816,1	-1616,8	-8685,9	-6926,6	11226,6	-2030,8	-9163,1	-5376,0	10816,1	-1616,8	-8685,9	-6926,6	11226,6	-2030,8	-9163,1	-5376,0	10816,1	-1616,8	-8685,9	-6926,6	11226,6	-2030,8	-9163,1	-5376,0	10816,1																			
		P3	949,4	2412,0	2805,3	3819,5	592,1	2108,0	2092,7	3028,8	2350,2	3380,0	6513,2	7705,2	2668,3	3557,5	7367,3	8605,4	2350,2	3380,0	6513,2	7705,2	2668,3	3557,5	7367,3	8605,4	2350,2	3380,0	6513,2	7705,2	2668,3	3557,5	7367,3	8605,4	2350,2	3380,0	6513,2	7705,2	2668,3	3557,5	7367,3	8605,4																			
		P4	2169,5	3789,8	-6180,5	7567,6	2452,5	3955,2	-6928,8	8346,6	1104,8	3178,6	-4341,6	5493,1	839,0	3026,4	-3873,9	4987,0	-6928,8	3178,6	-4341,6	5493,1	839,0	3026,4	-3873,9	4987,0	-6928,8	3178,6	-4341,6	5493,1	839,0	3026,4	-3873,9	4987,0	-6928,8	3178,6	-4341,6	5493,1	839,0	3026,4	-3873,9	4987,0																			
Moment [Nmm]	Bod	P1	624,9	-7201,8	13092,4	14955,6	1241,4	-8236,2	1448,2	8454,2	1396,6	-9266,0	1629,2	9511,2	-3942,7	-16758,2	4485,0	18640,6	1241,4	-8236,2	1448,2	8454,2	1396,6	-9266,0	1629,2	9511,2	-3942,7	-16758,2	4485,0	18640,6	-3942,7	-16758,2	4485,0	18640,6	-3942,7	-16758,2	4485,0	18640,6	-3942,7	-16758,2	4485,0	18640,6																			
		P2	-1855,2	-7253,2	-6833,7	10136,5	1117,8	-8028,5	-1498,4	8243,3	1257,5	-9032,3	-1685,8	9273,9	1853,9	-19275,5	-44349,7	48393,0	-1855,2	-7253,2	-6833,7	10136,5	1117,8	-8028,5	-1498,4	8243,3	1257,5	-9032,3	-1685,8	9273,9	1853,9	-19275,5	-44349,7	48393,0	-1855,2	-7253,2	-6833,7	10136,5	1117,8	-8028,5	-1498,4	8243,3	1257,5	-9032,3	-1685,8	9273,9															
		P3	2536,0	3764,8	6225,8	7704,9	-922,8	-2496,8	1358,6	2988,6	-1038,2	-2809,0	1528,4	3362,2	4414,5	8721,4	11037,0	14743,4	3473,9	7652,6	9388,7	12585,8	3633,8	7916,2	9515,0	12899,8	1691,7	6022,9	5979,2	8653,8	4414,5	8721,4	11037,0	14743,4	3473,9	7652,6	9388,7	12585,8	3633,8	7916,2	9515,0	12899,8																			
		P4	1311,7	3796,2	-4083,5	5727,7	-1062,1	-2615,7	-1322,6	3117,5	-1194,8	-2942,7	3507,3	3507,3	-1194,8	-2942,7	3507,3	3507,3	-1194,8	-2942,7	3507,3	3507,3	-1194,8	-2942,7	3507,3	3507,3	-1194,8	-2942,7	3507,3	3507,3	-1194,8	-2942,7	3507,3	3507,3	-1194,8	-2942,7	3507,3	3507,3	-1194,8	-2942,7	3507,3	3507,3																			
Moment [Nmm]	Bod	P1	-3035,9	-17018,9	18622,2	25409,6	-3919,9	-17078,7	13933,6	22387,3	-3942,7	-16758,2	14331,9	22400,6	-6082,7	-17039,9	4485,0	18640,6	-3919,9	-17078,7	13933,6	22387,3	-3942,7	-16758,2	14331,9	22400,6	-6082,7	-17039,9	4485,0	18640,6	-6082,7	-17039,9	4485,0	18640,6	-6082,7	-17039,9	4485,0	18640,6	-6082,7	-17039,9	4485,0	18640,6																			
		P2	-1537,2	-18802,3	-34601,0	39409,6	-415,9	-19000,3	-37383,3	41936,8	-576,4	-18772,7	-37477,5	41920,3	1853,9	-19275,5	-44349,7	48393,0	-415,9	-19000,3	-37383,3	41936,8	-576,4	-18772,7	-37477,5	41920,3	1853,9	-19275,5	-44349,7	48393,0	-415,9	-19000,3	-37383,3	41936,8	-576,4	-18772,7	-37477,5	41920,3	1853,9	-19275,5	-44349,7	48393,0																			
		P3	4414,5	8721,4	11037,0	14743,4	3473,9	7652,6	9388,7	12585,8	3633,8	7916,2	9515,0	12899,8	1691,7	6022,9	5979,2	8653,8	3633,8	7916,2	9515,0	12899,8	1691,7	6022,9	5979,2	8653,8	4414,5	8721,4	11037,0	14743,4	3473,9	7652,6	9388,7	12585,8	3633,8	7916,2	9515,0	12899,8	1691,7	6022,9	5979,2	8653,8																			
		P4	6015,8	12178,8	-16478,8	21355,6	6227,2	11711,1	-17381,7	21864,4	6323,9	12025,7	-17399,6	22076,1	7007,2	11300,6	-19796,6	23847,7	6227,2	11711,1	-17381,7	21864,4	6323,9	12025,7	-17399,6	22076,1	7007,2	11300,6	-19796,6	23847,7	6227,2	11711,1	-17381,7	21864,4	6323,9	12025,7	-17399,6	22076,1	7007,2	11300,6	-19796,6	23847,7																			
Moment [Nmm]	Bod	P1	-4665,8	-18036,2	11296,4	21787,3	-6386,9	-17891,6	4709,0	19572,4	2525,7	-26862,6	40570,4	48723,1	4257,3	-28810,4	47222,3	55480,7	-6386,9	-17891,6	4709,0	19572,4	2525,7	-26862,6	40570,4	48723,1	4257,3	-28810,4	47222,3	55480,7	-6386,9	-17891,6	4709,0	19572,4	2525,7	-26862,6	40570,4	48723,1	4257,3	-28810,4	47222,3	55480,7																			
		P2	457,4	-19772,0	-40074,9	44689,4	1946,7	-20239,0	-46567,0	50812,3	-4850,5	-26057,6	-20779,9	33679,8	-6092,5	-27489,2	-16128,1	32448,3	1946,7	-20239,0	-46567,0	50812,3	-4850,5	-26057,6	-20779,9	33679,8	-6092,5	-27489,2	-16128,1	32448,3	457,4	-19772,0	-40074,9	44689,4	1946,7	-20239,0	-46567,0	50812,3	-4850,5	-26057,6	-20779,9	33679,8																			
		P3	2848,2	7235,9	8415,9	11458,5	1776,2	6324,0	6278,1	9086,3	7050,7	10140,1	19539,5	23115,5	8004,9	10672,5	22101,8	25816,1	1776,2	6324,0	6278,1	9086,3	7050,7	10140,1	19539,5	23115,5	8004,9	10672,5	22101,8	25816,1	2848,2	7235,9	8415,9	11458,5	1776,2	6324,0	6278,1	9086,3	7050,7	10140,1	19539,5	23115,5																			
		P4	6508,4	11369,3	-18541,6	22702,7	7357,6	11865,6	-20786,3	25039,9	3314,3	9535,9	-13024,9	16479,3	2516,9	9079,3	-11621,6	14960,9	7357,6	11865,6	-20786,3	25039,9	3314,3	9535,9	-13024,9	16479,3	2516,9	9079,3	-11621,6	14960,9	6508,4	11369,3	-18541,6	22702,7	7357,6	11865,6	-20786,3	25039,9	3314,3	9535,9	-13024,9	16479,3																			
Moment [Nmm]	Bod	P1	1874,6	-21605,4	39277,3	44866,7	3724,3	-24708,7	4344,5	25362,7	4189,9	-27797,9	4887,7	28533,6	-27797,9	-5057,3	27821,7	44866,7	3724,3	-24708,7	4344,5	25362,7	4189,9	-27797,9	4887,7	28533,6	-27797,9	-5057,3	27821,7	1874,6	-21605,4	39277,3	44866,7	3724,3	-24708,7	4344,5	25362,7	4189,9	-27797,9	4887,7	28533,6																				
		P2	-5565,7	-21759,5	-20501,1	30409,6	3353,4	-24085,6	-4495,3	24730,0	3772,6	-27096,8	-5057,3	27821,7	3353,4	-24085,6	-4495,3	24730,0	3353,4	-24085,6	-4495,3	24730,0	3772,6	-27096,8	-5057,3	27821,7	3353,4	-24085,6	-4495,3	24730,0	-5565,7	-21759,5	-20501,1	30409,6	3353,4	-24085,6	-4495,3	24730,0	3772,6	-27096,8	-5057,3	27821,7																			
		P3	7608,0	11294,3	18677,4	23114,7	-2788,5	-7490,5	4075,7	8965,8	-3114,7	-8427,0	4585,3	10086,7	3935,2	-12250,4	17183,0	11388,5	18677,4	23114,7	-2788,5	-7490,5	4075,7	8965,8	-3114,7	-8427,0	4585,3	10086,7	3935,2	-12250,4	17183,0	7608,0	11294,3	18677,4	23114,7	-2788,5	-7490,5	4075,7	8965,8	-3114,7	-8427,0	4585,3																			
		P4	3935,2	11388,5	-12250,4	17183,0	-3186,2	-7847,1	-39677,7	9352,6	-3584,5	-8828,1	-4463,8	10521,9	9352,6	-3584,5	-8828,1	-4463,8																																											

## 10.3 Celková napětí šroubů na přepážce

Celková napětí šroubů na přepážce pro provozní a početní zatížení podle výpočtů v kapitole 6.2.

Provozní zatížení												
Celkové nap.[MPa]		Případ I.	Případ II.	Bod A	Bod C	Bod D	Bod C*1,05	Bod E	Bod F	Bod G	Boční [9], [10]	Boční [11]
Šroub	P1	484,1	491,7	492,7	516,5	496,4	521,3	502,9	528,0	493,1	452,3	456,1
	P2	504,0	504,4	506,1	530,7	508,9	536,2	486,0	489,0	491,7	447,6	450,8
	P3	490,0	500,1	501,3	522,3	502,3	527,5	519,8	554,4	510,6	461,1	466,1
	P4	512,4	529,3	529,9	567,5	538,4	575,2	470,4	491,2	466,9	458,8	463,5
Početní zatížení												
Celkové nap.[MPa]		Případ I.	Případ II.	Bod A	Bod C	Bod D	Bod C*1,05	Bod E	Bod F	Bod G	Boční [9], [10]	Boční [11]
Šroub	P1	612,8	636,2	639,5	713,4	651,0	728,5	676,3	757,9	644,0	515,2	527,2
	P2	673,6	674,1	679,4	755,3	688,0	772,3	622,6	634,0	640,0	501,1	511,4
	P3	636,9	669,4	673,4	741,4	676,6	758,3	726,7	834,6	698,3	542,3	557,9
	P4	709,3	764,2	766,1	887,9	793,9	912,7	571,2	635,3	560,8	536,8	551,9

Tab. 49 Celková napětí šroubů na přepážce pro provozní a početní zatížení

## 10.4 Reakce v motorových úchytech

Reakce v bodech, ve kterých je lože připojeno k motoru, použité pro výpočet namáhání šroubů v kapitole 6.3.

Provozní zatížení												
Reakce [N]	M1			M2			M3			M4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Předpis 1. (A)	1931,5	-157,9	-866,7	1931,5	1487,0	-866,7	-1174,1	-157,9	866,7	-1174,1	1487,0	866,7
Předpis 2. (A)	2133,3	87,0	-858,1	2133,3	1685,1	-858,1	-1521,3	87,0	858,1	-1521,3	1685,1	858,1
A (vzletový výk.)	2201,9	78,3	-866,7	2201,9	1693,7	-866,7	-1528,1	78,3	866,7	-1528,1	1693,7	866,7
C	2655,6	598,9	-858,1	2655,6	2133,0	-858,1	-2282,0	598,9	858,1	-2282,0	2133,0	858,1
D	2153,5	217,4	-858,1	2153,5	1799,1	-858,1	-1703,7	217,4	858,1	-1703,7	1799,1	858,1
Bod C + 5%	-1916,6	-2430,9	-901,0	-1916,6	-437,6	-901,0	2308,9	-2430,9	901,0	2308,9	-437,6	901,0
E	-552,8	-1450,0	-858,1	-552,8	340,2	-858,1	874,5	-1450,0	858,1	874,5	340,2	858,1
F	-1157,0	-1826,6	-858,1	-1157,0	10,6	-858,1	1456,1	-1826,6	858,1	1456,1	10,6	858,1
G	172,2	-1331,9	-858,1	172,2	443,5	-858,1	638,5	-1331,9	858,1	638,5	443,5	858,1
Boční zatížení [9], [10]	621,2	0,0	-442,1	-621,2	0,0	-442,1	621,2	0,0	-159,0	-621,2	0,0	-159,0
Boční zatížení [11]	698,8	0,0	-497,4	-698,8	0,0	-497,4	698,8	0,0	-178,9	-698,8	0,0	-178,9
Početní zatížení												
Reakce [N]	M1			M2			M3			M4		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Předpis 1. (A)	5794,6	-473,8	-2600,2	5794,6	4461,0	-2600,2	-3522,3	-473,8	2600,2	-3522,3	4461,0	2600,2
Předpis 2. (A)	6400,0	261,0	-2574,2	6400,0	5055,2	-2574,2	-4563,8	261,0	2574,2	-4563,8	5055,2	2574,2
A (vzletový výk.)	6605,8	235,0	-2600,2	6605,8	5081,2	-2600,2	-4584,4	235,0	2600,2	-4584,4	5081,2	2600,2
C	7966,9	1796,8	-2574,2	7966,9	6399,0	-2574,2	-6845,9	1796,8	2574,2	-6845,9	6399,0	2574,2
D	6460,6	652,2	-2574,2	6460,6	5397,4	-2574,2	-5111,2	652,2	2574,2	-5111,2	5397,4	2574,2
Bod C + 5%	-5749,7	-7292,6	-2702,9	-5749,7	-1312,9	-2702,9	6926,7	-7292,6	2702,9	6926,7	-1312,9	2702,9
E	-1658,5	-4350,0	-2574,2	-1658,5	1020,5	-2574,2	2623,4	-4350,0	2574,2	2623,4	1020,5	2574,2
F	-3470,9	-5479,8	-2574,2	-3470,9	31,9	-2574,2	4368,2	-5479,8	2574,2	4368,2	31,9	2574,2
G	516,5	-3995,7	-2574,2	516,5	1330,5	-2574,2	1915,5	-3995,7	2574,2	1915,5	1330,5	2574,2
Boční zatížení [9], [10]	1863,5	0,0	-1326,3	-1863,5	0,0	-1326,3	1863,5	0,0	-477,1	-1863,5	0,0	-477,1
Boční zatížení [11]	2096,4	0,0	-1492,1	-2096,4	0,0	-1492,1	2096,4	0,0	-536,7	-2096,4	0,0	-536,7

Tab. 50 Reakce v motorových úchytech pro provozní a početní zatížení

## 10.5 Celková napětí šroubů v motorových úchytech

Celková napětí šroubů ve spojeních lože a motoru vypočítaná v kapitole 6.3.

Provozní zatížení												
Celkové nap.[MPa]		Případ I.	Případ II.	Bod A	Bod C	Bod D	Bod C*1,05	Bod E	Bod F	Bod G	Boční [9], [10]	Boční [11]
Šroub	M1	754,9	760,0	761,8	775,4	760,8	785,1	744,9	760,7	739,5	722,2	724,1
	M2	767,9	775,3	776,8	793,4	777,6	755,5	721,7	734,7	717,3	722,2	724,1
	M3	740,4	749,1	749,3	770,6	754,1	796,7	753,4	770,0	747,9	723,1	725,0
	M4	758,6	768,3	768,6	790,6	773,7	770,5	734,1	747,3	730,0	723,1	725,0
Početní zatížení												
Celkové nap.[MPa]		Případ I.	Případ II.	Bod A	Bod C	Bod D	Bod C*1,05	Bod E	Bod F	Bod G	Boční [9], [10]	Boční [11]
Šroub	M1	853,7	869,9	875,4	918,5	872,3	949,4	822,3	872,1	805,5	751,7	757,3
	M2	894,8	918,2	923,1	975,8	925,5	855,7	750,4	790,6	736,8	751,7	757,3
	M3	806,7	833,4	834,0	900,8	848,9	983,1	847,0	898,9	829,7	754,0	759,9
	M4	863,2	893,6	894,5	963,8	910,5	900,4	787,3	828,1	774,8	754,0	759,9

Tab. 51 Celková napětí šroubů v motorových úchytech pro provozní a početní zatížení

## 10.6 Výkresová dokumentace

Dále jsou přiloženy výkresy jednotlivých vyráběných dílů a výsledné sestavy motorového lože. Značení výkresů viz tabulka č. 52.

<b>Číslo výkresu</b>	<b>Popis</b>
01-01-2018-0000 + kusovník	Vrcholová sestava motorového lože
01-01-2018-0001 + kusovník	Svařenec lože
01-01-2018-0002	Domeček silentbloku
01-01-2018-0003	Příruba motoru
01-01-2018-0004	Výztuha V3
01-01-2018-0005	Výztuha V4
01-01-2018-0006	Výztuha V1
01-01-2018-0007	Výztuha V2
01-01-2018-0008	Výztuha V5
01-01-2018-0009	Výztuha V6

*Tab. 52 Seznam přiložených výkresů*