



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Zástavba motoru Rotax 915 iS do malého sportovního
letounu**

**Installation of Rotax 915 iS A engine to a light sport
aircraft**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Michal COUFAL

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Kostroun



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Coufal** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **483243**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojínského inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zástavba motoru Rotax 915 iS do malého sportovního letounu

Název bakalářské práce anglicky:

Installation of Rotax 915 iS engine to a light sport aircraft

Pokyny pro vypracování:

- návrh zástavby pohonné jednotky
- hmotnostní analýza pohonné agregátu
- stanovení zatížení dle certifikačních specifikací
- pevnostní analýza motorového lože

Seznam doporučené literatury:

Podle pokynů vedoucího.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Kostroun, ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Tomáš Kostroun
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Zástavba motoru Rotax 915 iS A do malého sportovního letounu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Tomáše Kostrouna, s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Michal Coufal

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Kostrounovi za odborné vedení práce a za podporu a trpělivost při jejím vytváření. Současně bych chtěl poděkovat všem zaměstnancům firmy CARBON DESIGN za poskytnutí potřebných podkladů pro vypracování bakalářské práce a velmi přínosné konzultace. Nakonec bych rád poděkoval své rodině a všem přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili, a bez kterých bych tuto práci nemohl dokončit.

Anotační list

Jméno autora:	Michal COUFAL
Název BP:	Zástavba motoru Rotax 915 iS do malého sportovního letounu
Anglický název:	Installation of Rotax 915 iS engine to a light sport aircraft
Rok:	2021
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Kostroun
Bibliografické údaje:	

počet stran:	75
počet obrázků:	50
počet tabulek:	25
počet příloh:	2

Anotace

Cílem této práce je návrh zástavby motoru Rotax 915 iS do ultralehkého letounu FM250 Vampire II. Po krátké rešeršní části týkající se hmotového rozboru, druhů motorových loží a výběru vrtule byl proveden výpočet zatížení působících na motorové lože a návrh čtyř konceptů, jejichž pevnost byla ověřena pomocí 1D MKP analýzy. Dále byl vytvořen 3D model vybraného konceptu motorového lože a byla provedena MKP statická analýza a ověřena vzpěrová stabilita prutů.

Klíčová slova: Motorové lože, zástavba, Rotax 915 iS, MKP analýza, ultralehký letoun

Abstract

The aim of this work is to design the installation of the Rotax 915 iS engine in the ultralight aircraft FM250 Vampire II. After a short research part concerning the mass analysis, types of engine beds and propeller selection, the load acting on the engine bed was calculated and four concepts were designed, the strength of which was verified using 1D FEM analysis. Furthermore, a 3D model of a selected engine bed concept was created, and FEM static analysis and the buckling stability analysis were performed.

Keywords: Engine bed, Installation, Rotax 915 iS, FEM analysis, light sport aircraft

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Seznam příloh.....	12
Seznam použitých programů.....	12
Seznam použitých zkratk.....	12
Seznam použitých symbolů.....	13
1 Úvod	15
2 FM250 Vampire II.....	16
3 Rotax 915 iS.....	18
3.1 Hmotnostní rozbor motoru.....	19
3.1.1 Těžiště motoru	20
3.2 Úchyty motoru	21
3.2.1 Silentbloky	22
4 Výběr vhodné vrtule.....	23
4.1 Dělení vrtulí.....	23
4.1.1 Podle počtu listů.....	23
4.1.2 Podle materiálu	23
4.1.3 Podle úhlu nastavení	23
4.1.4 Podle smyslu otáčení.....	24
4.1.5 Podle polohy vůči motoru	24
4.2 Požadavky výrobce letounu na vrtuli	24
4.3 Vrtule MTV-34-1-A/175-200	25
5 Podvozková noha	26
6 Motorové lože	27
6.1 Typy motorových loží	27
6.1.1 Konické motorové lože.....	27
6.1.2 Dynafokální motorové lože	28
6.2 Konstrukční řešení motorového lože	29
6.2.1 Úchyty pro uchycení motoru.....	30
6.2.2 Uchycení lože na motorovou přepážku.....	31
6.2.3 Uložení předřového podvozku	33
7 Letová obálka	34

8	Výpočet zatížení	36
8.1	Definice souřadnicového systému	36
8.1.1	Výpočet těžiště sestavy motoru, vrtule a lože	37
8.2	Zatížení dle UL 2 § 361	39
8.2.1	Případ a.....	39
8.2.2	Případ b.	40
8.3	Zatížení dle UL 2 § 363	41
8.4	Letové případy.....	42
8.5	Přistávací případy	42
8.6	Rozklad vypočtených zatížení.....	43
8.7	Dodatečné podmínky zatížení předového podvozku.....	45
8.7.1	Zatížení působící dozadu	46
8.7.2	Zatížení působící dopředu	46
8.7.3	Boční zatížení.....	46
8.7.4	Shrnutí.....	46
8.8	Výpočet výsledných početních zatížení pro uvažované případy.....	47
9	Koncepční návrhy lože.....	49
9.1.1	Koncept 1	49
9.1.2	Koncept 2	50
9.1.3	Koncept 3	50
9.1.4	Koncept 4	51
10	Pevnostní analýza.....	52
10.1	Výpočet reakcí v pouzdrech podvozku.....	53
10.1.1	Výpočet reakcí od setrvačných sil	53
10.1.2	Výpočet reakcí od zatížení při přistání	55
10.1.3	Výpočet reakcí vznikajících při dodatečných podmínkách zatížení podvozku	56
10.2	1D MKP analýza.....	58
10.2.1	MKP analýza konceptu 1	58
10.2.2	MKP analýza konceptu 2	61
10.2.3	MKP analýza konceptu 3	63
10.2.4	MKP analýza konceptu 4	65
10.3	Výběr nejvhodnějšího konceptu lože.....	67
10.4	3D Model konceptu 2.....	68

10.4.1	MKP analýza 3D modelu.....	69
11	Závěr.....	72
12	Bibliografie	73

Seznam obrázků

Obr. 1 FM250 Vampire II [3]	17
Obr. 2 Kompletně osazený motor Rotax 915 iS A [7]	18
Obr. 3 Souřadnicový systém motoru, pohled zleva [8].....	20
Obr. 4 Souřadnicový systém motoru, pohled zepředu [8].....	20
Obr. 5 Poloha úchytných bodů [8]	21
Obr. 6 Sestava silentbloku	22
Obr. 7 Řez silentblokem	22
Obr. 8 Letecká vrtule [11]	23
Obr. 9 Vrtule MTV-34-1-A/175-200 na letounu Tecnam P92 [13].....	25
Obr. 10 Podvozková noha [15].....	26
Obr. 11 Konické motorové lože [18]	27
Obr. 12 Dynafokální motorové lože [19]	28
Obr. 13 Schéma nesouososti motoru vůči podélné ose letounu	29
Obr. 14 Řez úchytem motoru.....	30
Obr. 15 Úchyt motoru se silentblokem.....	30
Obr. 16 Úchyt lože k přepážce	31
Obr. 17 Výkres úchytu.....	31
Obr. 18 Motorová přepážka.....	32
Obr. 19 Pouzdro předového podvozku	33
Obr. 20 Výkres motorového lože pro Rotax 912 [15]	33
Obr. 21 Letová obálka letounu FM250 Vampire [21]	34
Obr. 22 Orientace souřadnicového systému	36
Obr. 23 Vzájemná poloha souřadnicových systémů.....	38
Obr. 24 Princip rozkladu setrvačných sil.....	43
Obr. 25 Koncept 1, pohled zepředu	49
Obr. 26 Koncept 1, volný pohled	49
Obr. 27 Koncept 2, pohled zepředu	50
Obr. 28 Koncept 2, volný pohled	50
Obr. 29 Koncept 3, pohled zepředu	50
Obr. 30 Koncept 3, volný pohled	50
Obr. 31 Koncept 4, pohled zepředu	51

Obr. 32 Koncept 4, volný pohled	51
Obr. 33 Idealizace motorového lože pomocí 1D prvků se zavedenými silovými účinky	52
Obr. 34 Skica pro výpočet reakcí.....	53
Obr. 35 Schéma pro výpočet reakcí při přistání.....	55
Obr. 36 Schéma pro výpočet reakcí od pouzder podvozku ve směru osy Z	56
Obr. 37 Napětí v loži při dodatečných podmínkách zatížení podvozku při bočním zatížení doprava konceptu 1	59
Obr. 38 Teoretický průběh ztráty stability prutu u případu přistání v loži konceptu 1	60
Obr. 39 Teoretický průběh ztráty stability prutu u případu přistání v loži konceptu 2	62
Obr. 40 Napětí v loži při případě přistání konceptu 2.....	62
Obr. 41 Napětí v loži při případě přistání konceptu 3.....	64
Obr. 42 Teoretický průběh ztráty stability prutu u případě přistání v loži konceptu 3	64
Obr. 43 Napětí v loži při případě dodatečných podmínkách zatížení podvozku směrem dopředu konceptu 4.....	66
Obr. 44 Teoretický průběh ztráty stability prutu u letového případu C v loži konceptu 4	66
Obr. 45 3D model lože s popisky.....	68
Obr. 46 3D model lože, pohled 1	68
Obr. 47 3D model lože, pohled 2	68
Obr. 48 Napětí z MKP analýzy pro početní zatížení při případě přistání	70
Obr. 49 Detail místa s největším napětím při případě přistání – maximální napětí je vyznačeno bílou šipkou	71
Obr. 50 Teoretický průběh ztráty stability prutu u případě přistání	71

Seznam tabulek

Tab. 1 Technické údaje letounu [2].....	16
Tab. 2 Technické údaje motoru Rotax 915 iS [6]	18
Tab. 3 Hmotnostní rozbor motoru [8; 9]	19
Tab. 4 Souřadnice těžiště motoru [8].....	20
Tab. 5 Souřadnice středů úchytných bodů v souřadnicovém systému motoru [8]	21
Tab. 6 Letová obálka letounu FM250 Vampire [21]	35
Tab. 7 Hmotnosti částí a jejich ramena v souřadnicovém systému pro výpočet těžiště	37
Tab. 8 Provozní zatížení dle UL 2 § 361.....	40
Tab. 9 Boční zatížení dle UL 2 § 363.....	41
Tab. 10 Zatížení motorového lože ve významných bodech obálky	42
Tab. 11 Zatížení při přistání [22]	42
Tab. 12 Rozklad provozních zatížení do směrů os souřadnicového systému	44
Tab. 13 Zatížení při dodatečných podmínkách zatížení předového podvozku.....	46
Tab. 14 Početní zatížení pro dodatečné podmínky zatížení předového podvozku	47
Tab. 15 Početní zatížení letových, návrhových a přistávacích případů	48
Tab. 16 Reakce, kterými uložení působí na podvozkovou nohu v letových případech	54
Tab. 17 Reakce, kterými pouzdra působí na podvozkovou nohu při bočním zatížení podle § 363 UL 2	55
Tab. 18 Reakce, kterými pouzdra působí na podvozkovou nohu při dotyku kola se zemí	56
Tab. 19 Reakce, kterými pouzdra působí na podvozkovou nohu při dodatečných podmínkách zatížení podvozku.....	57
Tab. 20 Výsledky analýzy konceptu 1 při početním zatížení.....	58
Tab. 21 Výsledky analýzy konceptu 2 při početním zatížení.....	61
Tab. 22 Výsledky analýzy konceptu 3 při početním zatížení.....	63
Tab. 23 Výsledky analýzy konceptu 4 při početním zatížení.....	65
Tab. 24 Porovnání konceptů motorového lože.....	67
Tab. 25 Výsledky MKP analýzy 3D modelu pro početní zatížení.....	69

Seznam příloh

Výkresová dokumentace

USB disk s 3D modely a MKP analýzou

Seznam použitých programů

Microsoft Word

Microsoft Excel

Autodesk Inventor

Autodesk Inventor Nastran

Dassault Systèmes Solidworks

Google Chrome

Seznam použitých zkratk

CAD	Computer-aided Design
ČR	Česká republika
EIGV	Eigenvalue
FEM	Finite Element Method
MKP	Metoda konečných prvků
MON	Motor Octane Number
MTOM	Maximum Takeoff Mass
PCV	Positive Crankcase Ventilation
RON	Research Octane Number
TBO	Time Between Overhauls
TIG	Tungsten Inert Gas

Seznam použitých symbolů

E	[MPa]	Youngův modul
F_b	[N]	Boční síla
F_d	[N]	Dopředná síla
F_g	[N]	Setrvačná síla
F_{gx}, F_{gy}, F_{gz}	[N]	Setrvačná síla ve směrech os x, y a z
F_n	[N]	Setrvačná síla podvozkové nohy
F_{nx}, F_{ny}, F_{nz}	[N]	Setrvačná síla podvozkové nohy ve směrech os x, y a z
F_o	[N]	Odporová síla
F_s	[N]	Svislá složka síly
F_t	[N]	Tahová síla
F_X	[N]	Síla ve směru osy x
F_Y	[N]	Síla ve směru osy y
i	[-]	Převodový poměr reduktoru
k_{km}	[-]	Součinitel pro výpočet kroutícího momentu
m_c	[kg]	Celková hmotnost motoru, lože a vrtule
M_r	[Nm]	Kroutící moment
n	[-]	Násobek tíhového zrychlení
n_{mot}	[1/min]	Otáčky motoru
P_{mot}	[W]	Výkon motoru
$R_{e_{min}}$	[MPa]	Minimální mez kluzu
$R_{m_{min}}$	[MPa]	Minimální mez pevnosti
R_x	[N]	Reakce ve směru x
R_y	[N]	Reakce ve směru y
R_z	[N]	Reakce ve směru z
R_{AX}, R_{AY}, R_{AZ}	[N]	Reakce v místě A ve směru os x, y a z
R_{BX}, R_{BY}, R_{BZ}	[N]	Reakce v místě B ve směru os x, y a z
s	[m]	Dráha
t	[s]	Čas

v	[m/s]	Rychlost
W	[m/s]	Práce
x_T	[mm]	Souřadnice těžiště ve směru x
y_T	[mm]	Souřadnice těžiště ve směru y
α	[°]	Úhel náběhu
η	[-]	Účinnost vrtule
ν	[-]	Poissonova konstanta

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je návrh zástavby motoru Rotax 915 iS A, včetně návrhu motorového lože, pro ultralehký letoun FM250 Vampire II. Práce probíhá ve spolupráci s výrobcem CARBON DESIGN s. r. o., sídlícím v Jaroměři, který vyrábí tento letoun již více než 15 let.

Zástavba nového výkonnějšího motoru se řeší zejména kvůli požadavkům zákazníků, kteří plánují používat tento letoun z velké části na vlečení kluzáků. FM250 Vampire II je již nyní vybaven motory Rotax řady 912 a proto byl jako vhodný motor zvolen momentálně nejvýkonnější agregát stejného výrobce.

V rámci práce bude nutné provést hmotnostní analýzu pohonného agregátu včetně vrtule, která musí být vhodně vybrána pro daný motor a způsob používání letounu. Dále bude nutné stanovit případy, pro které bude muset být provedena pevnostní analýza pro splnění požadavků předpisu UL 2 – Část I. / Vydání 1. 2019, podle kterého nyní probíhá certifikace letounu FM250 Vampire II na 600 kg MTOM. V našem případě bude potřeba uvažovat i požadavky související s předřadným podvozkem, jelikož je uchycen v motorovém loži.

Konstrukce lože dále musí umožňovat správnou funkci motoru ve všech režimech a jeho snadnou údržbu a jeho konstrukce musí být co nejlehčí a nenáročná na výrobu a montáž. Po návrhu konstrukce bude provedena pevnostní MKP analýza lože pro stanovení vyhovění požadavkům certifikačních specifikací.

2 FM250 Vampire II

FM 250 Vampire II (na Obr. 1) je ultralehký letoun vyráběný firmou CARBON DESIGN s. r. o. od roku 2005, který má typové certifikáty z České republiky, Německa, Francie a Čínské lidové republiky pro provoz při 472,5 kg MTOM. V této době také probíhá typová certifikace pro 600 kg MTOM a všechna nově vyráběná letadla už jsou pro nové požadavky modifikována. [1]

Jedná se o dvoumístný letoun celo-kompozitové dolnoplošné konstrukce se sedadly umístěnými vedle sebe. Křídlo je dvounosníkové a je osazeno účinnými vztlakovými klapkami pro snížení vzletové a přistávací rychlosti a pro zlepšení ovladatelnosti při nízkých rychlostech. Podvozek je pevný, příďového uspořádání s řízeným předním kolem a bržděnými hlavními koly.

Letoun je používán zejména k výcviku pilotů a k vlečení kluzáků, přičemž může vlekat kluzáky o maximální vzletové hmotnosti až 750 kg. Pro pohon jsou nyní používány čtyřválcové čtyřtaktní zážehové motory Rotax 912 UL a Rotax 912 ULS se vzletovým výkonem 80 resp. 100 koní. Další technické údaje jsou uvedeny v Tab. 1. [2]

Tab. 1 Technické údaje letounu [2]

Technické údaje letounu (pro 600 kg MTOM)	
Délka [m]	6,5
Rozpětí křídel [m]	7,9
Nosná plocha [m ²]	10,05
Prázdná hmotnost [kg]	~300
Maximální nepřekročitelná rychlost V_{ne} [km/h]	270
Cestovní rychlost [km/h]	190-220
Pádová rychlost v přistávací konfiguraci [km/h]	78



Obr. 1 FM250 Vampire II [3]

3 Rotax 915 iS

Rotax 915 iS (dále jen Rotax 915) je momentálně nejvýkonnějším motorem rakouského výrobce BRP-Rotax. Tato společnost byla založena v roce 1920 a specializuje se zejména na výrobu pohonných jednotek pro motokáry a letouny. [4; 5]

Rotax 915 vychází z koncepce motorů řady 912, jde o čtyřtákní čtyřválcový motor s horizontálně protilehlými válci chlazenými vzduchem. Hlavy válců jsou chlazeny kapalinou a mazání motoru je řešeno suchou skříní a nádrží na olej obvykle umístěnou v motorovém prostoru. Podobně jako Rotax 912 iS je Rotax 915 vybaven elektronicky řízeným vstřikováním paliva, oproti řadě 912 je ovšem Rotax 915 osazen turbodmychadlem a saním s mezichladičem (viz. Obr. 2), díky čemuž došlo k výraznému zvýšení maximálního vzletového i trvalého výkonu. Více technických údajů je uvedeno v Tab. 2. [6]

Tab. 2 Technické údaje motoru Rotax 915 iS [6]

Technické údaje motoru Rotax 915 iS	
Maximální vzletový výkon [kW]	104 @ 5 800 1/min
Maximální trvalý výkon [kW]	99 @ 5 500 1/min
Maximální otáčky [1/min]	5 800
Převod reduktoru [-]	2,54
Zdvihový objem [cm ³]	1 352
Vrtání [mm]	84
Zdvih [mm]	61
Praktický dostup [ft]	24 000
Palivo [-]	benzin, min. MON 85 / RON 95
TBO [h]	1 200



Obr. 2 Kompletně osazený motor Rotax 915 iS A [7]

3.1 Hmotnostní rozbor motoru

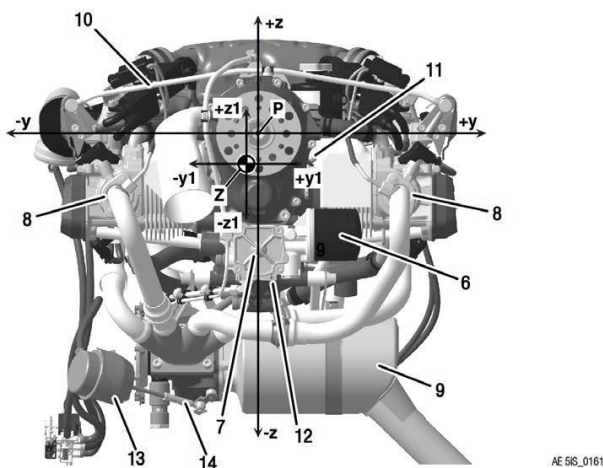
V následující tabulce je proveden hmotnostní rozbor motoru. V tabulce jsou uvedeny pouze komponenty, které budou s největší pravděpodobností uchyceny na motorovém loži. Komponenty, které jsou uchyceny na motorové přepážce, lože nezatěžují a nejsou tedy v tabulce uvedeny.

Tab. 3 Hmotnostní rozbor motoru [8; 9]

Komponenta motoru	Hmotnost [kg]
Motor s reduktorem	74,23
Pomocné lože	2
Výfukový systém	4,1
Airbox	1,3
Chladič vody	1,2
Chladič oleje	0,8
Mezichladič	1,65
Elektrické kabely	2,5
Hadice	2
Olejová nádrž	1,5
Náplně	5
Příruba s přetlakovým ventilem	0,78
Okolní senzory	0,06
PCV	0,35
Celkem	97,47

3.1.1 Těžiště motoru

Výrobce motoru udává těžiště motoru ve vlastním souřadnicovém systému (viz. Obr. 3 a Obr. 4). Do výpočtu těžiště jsou zahrnuty pouze komponenty s pevnou pozicí. Vzhledem k tomu, že neznáme přesné umístění komponent bez pevné pozice, bude s těmito komponenty počítáno, jako kdyby byla jejich hmotnost soustředěna v těžišti motoru. [8]



Obr. 4 Souřadnicový systém motoru, pohled zředu [8]

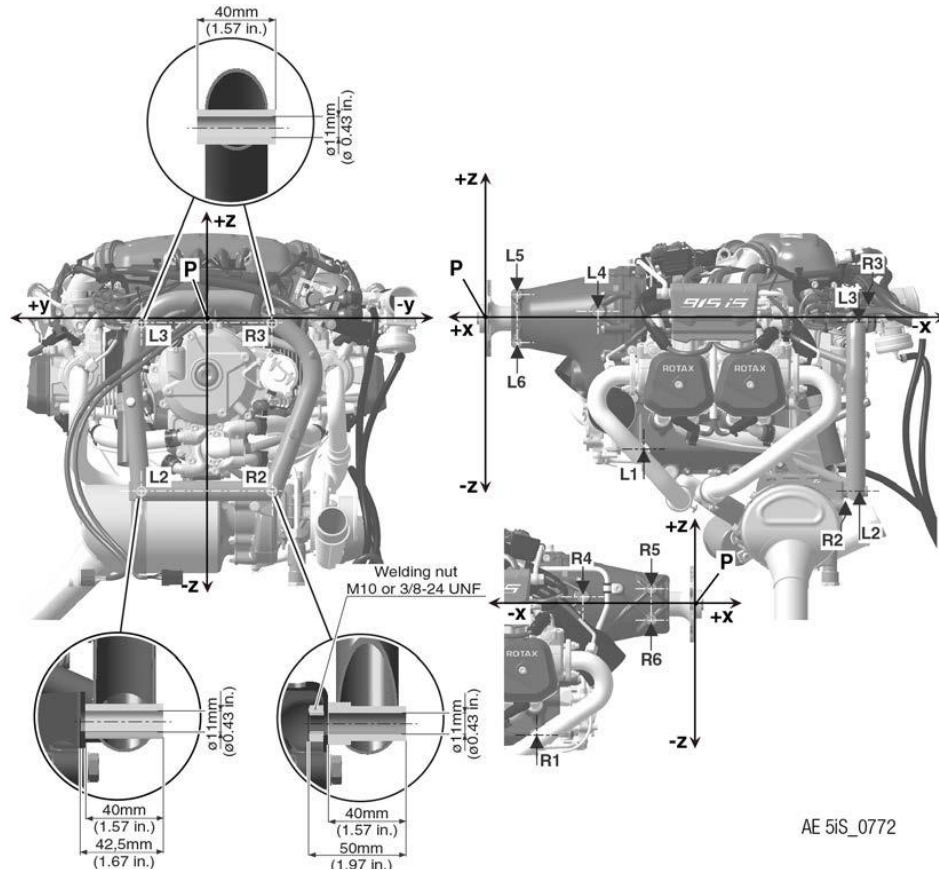
Poloha těžiště v souřadnicovém systému výrobce je zaznamenána v následující tabulce.

Tab. 4 Souřadnice těžiště motoru [8]

Osa	Souřadnice těžiště
X	- 376 mm
Y	- 15,9 mm
Z	- 115,9 mm

3.2 Úchyty motoru

Výrobce dodává pohonný agregát společně s pomocným ložem, pomocí kterého může být motor uchycen na motorové lože letounu, k dispozici jsou ale i další úchytné body. Poloha úchytných bodů je zřejmá z Obr. 5. [8]



Obr. 5 Poloha úchytných bodů [8]

K uchycení budou v našem případě použity právě úchytné body na pomocném motorovém loži, tedy body L2, R2, L3 a R3. Poloha středů těchto úchytných bodů je uvedena v Tab. 5.

Tab. 5 Souřadnice středů úchytných bodů v souřadnicovém systému motoru [8]

	Úchytný bod			
Osa	L2	R2	L3	R3
X	- 615 mm		- 615 mm	
Y	105 mm	- 105 mm	105 mm	- 105 mm
Z	- 277 mm		- 7 mm	

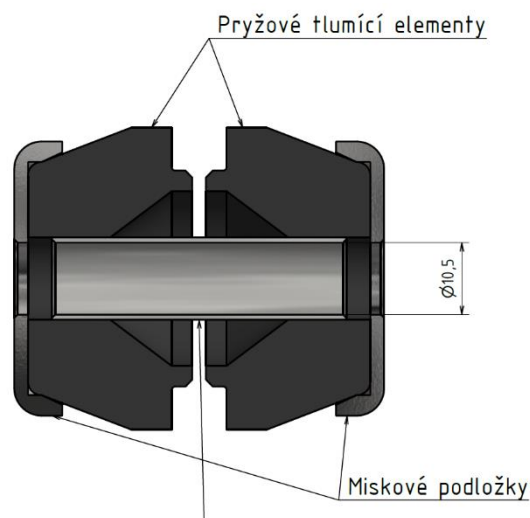
Jak je patrné z Obr. 5, v pomocném loži jsou vyvrtány díry o průměru 11 mm, což odpovídá rozměru střední řady díry pro šrouby se závitem M10. K uchycení bude tedy využito šroubů se šestihrannou hlavou se závitem M10 pevnostní třídy 10.9. Pro uchycení motoru Rotax 912 výrobce letounu používá stejný typ šroubů, jen s menším závitem M8, který je pro Rotax 912 díky nižší hmotnosti a menšímu výkonu dostatečný. U úchyťů L2 a R2 bude dle Obr. 5 použito navařovacích matic, pro úchyty L3 a R3 bude použita samojistná šestihranná matice a plochá kruhová podložka.

3.2.1 Silentbloky

Motor nemůže být k motorovému loži připevněn „natvrdo“, jelikož by docházelo k nadměrnému přenášení vibrací z motoru do draku, což by mohlo způsobit snížení životnosti některých komponent. Proto budou při montáži motoru na motorové lože použity dvoudílné silentbloky s pryžovým jádrem, které výrobce letounu používá pro montáž motoru Rotax 912, a které budou lehce přizpůsobeny pro větší průměr úchytného šroubu. Přizpůsobení bude spočívat ve vysoustružení rozpěrné trubky na větší vnitřní průměr – bude zvolena jemná řada děr pro šrouby se závitem M10, vnitřní průměr bude tedy 10,5 mm. Dále bude potřeba provést tu samou operaci i s „miskovými“ podložkami. Konstrukci silentbloků je možné vidět na Obr. 6 a Obr. 7.



Obr. 6 Sestava silentbloku



Obr. 7 Řez silentblokem

4 Výběr vhodné vrtule

Vrtule je část pohonné soustavy sloužící k přeměně mechanické energie vystupující z motoru na tah. [10]



Obr. 8 Letecká vrtule [11]

4.1 Dělení vrtulí

Vrtule se dělí podle mnoha hledisek, základními jsou počet listů vrtule, materiál, z kterého je vrtule vyrobena, úhlu nastavení listu, smyslu otáčení a podle polohy vzhledem k motoru. [10]

4.1.1 Podle počtu listů

Podle hlediska počtu listů se vrtule dělí na dvoulisté a vícelisté. Teoreticky se účinnost vrtule snižuje s rostoucím počtem listů, nejlepší by tedy byla jednolistá vrtule co největší délky. U takové vrtule by však bylo velmi obtížné její vyvážení a z konstrukčního hlediska je navíc omezena maximální délka listů. Proto se v praxi používají pro ultralehké letouny většinou vrtule dvoulisté nebo trojlisté. Trojlistá vrtule umožňuje přenést stejný výkon při menším průměru než vrtule dvoulistá a přináší klidnější chod. [10]

4.1.2 Podle materiálu

Podle materiálu se vrtule dělí na dřevěné, kovové, a kompozitní. Možná je také kombinace těchto materiálů. U ultralehkých letounů se nejčastěji můžeme setkat nejčastěji s vrtulami dřevěnými a kompozitními. Občas se také využívá vrtulí s dřevěným jádrem listů, které je potaženo několika vrstvami kompozitního materiálu. [10; 12]

4.1.3 Podle úhlu nastavení

Podle úhlu nastavení listu jsou vrtule děleny na vrtule pevné a stavitelné. U pevných vrtulí jsou listy nastaveny na úhel nastavení, který odpovídá určitému režimu letu a při

tomto režimu má vrtule největší účinnost. Z toho vyplývá, že při ostatních režimech letu má vrtule účinnost znatelně nižší a při výběru vrtule je tedy nutné uvažovat o tom, jak bude letadlo využíváno. Výhodou pevných vrtulí je jejich nízká hmotnost. Stavitelné vrtule jsou schopné měnit úhel nastavení listu vrtule, a tím účinnost vrtule ve všech režimech letu zůstává v blízkém okolí maximální účinnosti. Stavitelné vrtule se dále dělí na vrtule stavitelné na zemi a vrtule stavitelné z letu. Jak už název napovídá, tak u vrtule stavitelné na zemi lze úhel nastavení listů upravit pouze před letem na zemi. To znamená, že se vrtule za letu chová jako vrtule pevná, ale máme možnost před letem nastavit vhodný úhel nastavení pro zamýšlenou činnost. Vrtule stavitelné za letu mohou mít buď mechanické, elektrické nebo hydraulické stavění. Tyto mechanismy umožňují změnu úhlu nastavení vrtule kdykoliv během letu, díky čemuž může pilot nastavit nejlepší úhel nastavení vrtule pro daný letový režim. Speciálním druhem vrtulí stavitelných za letu jsou vrtule stálých otáček, tzv. constant-speed vrtule. Regulační systém těchto vrtulí automaticky udržuje požadované otáčky. Výhodou vrtulí stálých otáček je, že ve všech režimech letu udržuje nejvýhodnější úhel nastavení a díky tomu pracuje s nejvyšší možnou účinností v celém rozsahu rychlostí. [10; 12]

4.1.4 Podle smyslu otáčení

Dle smyslu otáčení se vrtule dělí na vrtule pravotočivé a levotočivé. Pravotočivá vrtule se z pohledu pilota otáčí ve směru hodinových ručiček. Levotočivá vrtule se naopak otáčí proti směru hodinových ručiček. U vrtule je potřeba vybrat správný smysl otáčení podle směru otáčení unašeče vrtule. [10]

4.1.5 Podle polohy vůči motoru

Podle tohoto hlediska se vrtule dělí na tažné a tlačné. Tažné vrtule jsou umístěny před motorem a během letu svým tahem „táhnou“ výstupní hřídel motoru z motoru ven. Oproti tomu jsou tlačné vrtule umístěny za motorem a svým tahem hřídel motoru „tlačí“ výstupní hřídel směrem dovnitř do motoru. [10]

4.2 Požadavky výrobce letounu na vrtuli

Výrobce letounu požaduje, aby vrtule byla stavitelná za letu, nejlépe aby se jednalo o vrtuli stálých otáček. Stavění vrtule je preferované hydraulicky, ale je možné i použití elektrického stavění. Vrtule by měla být dvoulístá, nebo trojlístá, její maximální průměr ale nesmí přesáhnout 1800 mm. Vzhledem ke konstrukci letounu musí být vrtule tažná, a pro motor Rotax 915 pravotočivá. Dalšími kritérii jsou samozřejmě i cena a hmotnost.

4.3 Vrtule MTV-34-1-A/175-200

Vrtule MTV-34-1-A/175-200 je třílistá hydraulická constant-speed vrtule od německého výrobce MT – Propeller. Vrtule tohoto výrobce byla uvážena na základě doporučení od výrobce letounu. Po vyplnění dotazníku byla tato vrtule vybrána firmou MT – Propeller jako nejvhodnější pro naše použití. [13]

Jádro vrtulového listu je vyrobeno ze dřeva a je potaženo sklolaminátem. Náběžná hrana listu je pro vyšší trvanlivost opatřena páskem z nerezové oceli. Průměr vrtule je 1750 mm a její hmotnost je 9,5 kg. Hmotnost hydraulického regulátoru je 1 kg a dále je pak nutné počítat s hmotností vrtulového kužele, která je přibližně 0,5 kg. Celkovou hmotnost 11 kg budeme během výpočtů zatížení uvažovat v průsečíku os listů, který může být od unašeče horizontálně vzdálen nejvíce 120 mm. [14]

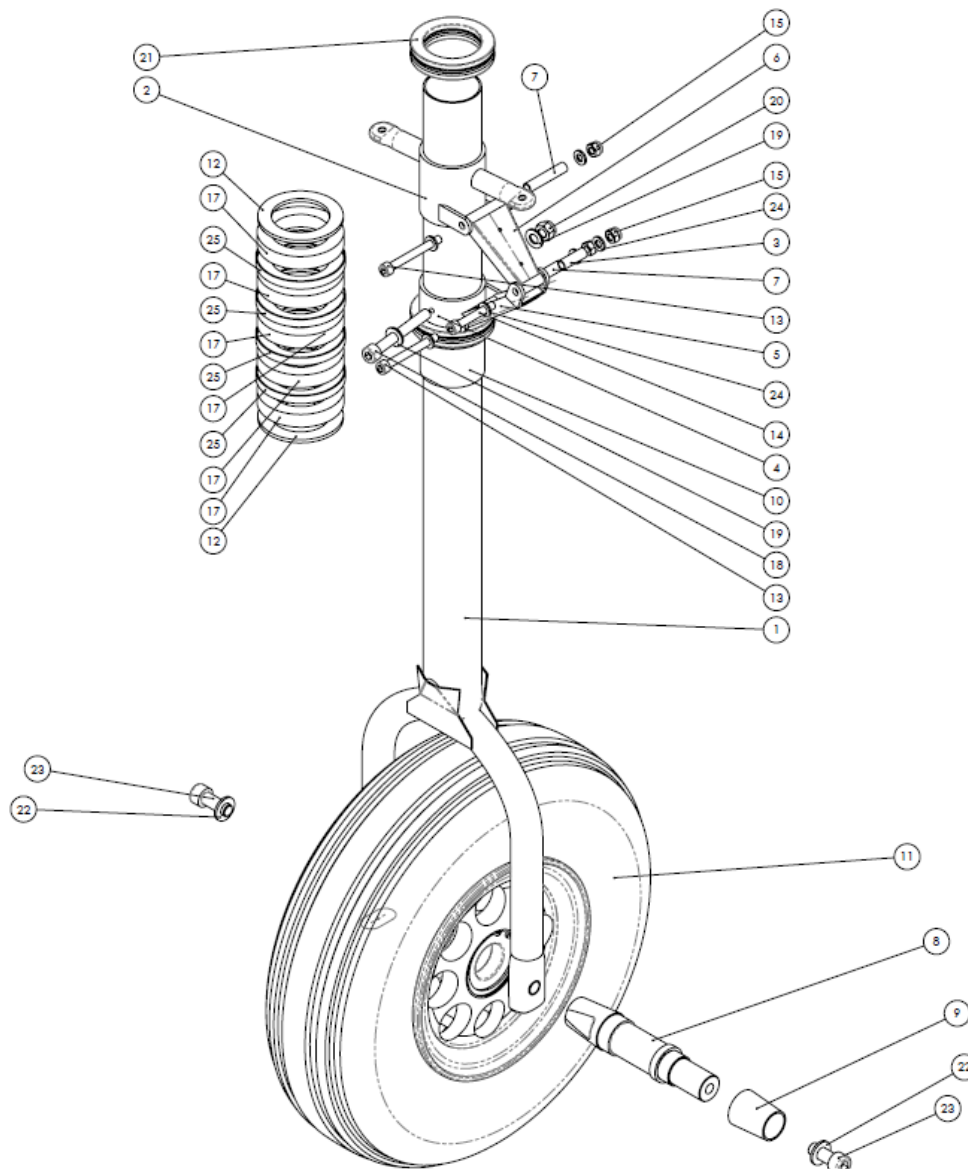
Společnost MT – Propeller byla zároveň požádána o vytvoření cenové nabídky, jež byla konzultována s výrobcem letounu, který s použitím této vrtule souhlasil.



Obr. 9 Vrtule MTV-34-1-A/175-200 na letounu Tecnam P92 [13]

5 Podvozková noha

Součástí motorového lože je i uchycení přední podvozkové nohy. Noha podvozku je svařenec, jehož hlavní částí je ocelová kruhová trubka 45x1,5. Příďový podvozek je říditelný a tlumení rázů je vyřešeno pomocí pryžových tlumících elementů a pneumatiky o průměru 350 mm. Vzhledem k tomu, že je podvozková noha uchycena k motorovému loži, bude potřeba brát při výpočtech zatížení ohled na její hmotnost a zároveň bude potřeba ověřit pevnost motorového lože i v případech pozemního zatížení podvozku. Celková hmotnost příďové podvozkové nohy včetně aerodynamického krytu je 6,2 kg a její těžiště se nachází 518 mm od středu jejího vrchního uchycení přibližně v její ose. Podoba příďové podvozkové nohy je patrna z následujícího obrázku.



Obr. 10 Podvozková noha [15]

6 Motorové lože

Motorové lože je komponenta letadla, jejíž hlavním úkolem je uchycení motoru a dalších komponent nezbytných pro jeho funkci. Dále musí motorové lože také přenášet setrvačné síly, tah a točivý moment motoru a tlumit jeho vibrace. Hlavními požadavky na motorové lože jsou co nejmenší hmotnost při zachování vysoké pevnosti a možnost provést snadnou montáž, opravu nebo výměnu motoru nebo jednotlivých částí zařízení. [10; 16]

6.1 Typy motorových loží

Motorové lože pro pístové motory se obecně dělí na lože příhradové a lože nosníkové. Pro ultralehké letouny se ve většině případů používají lože příhradová, která bývají svařená z trubek z chrom-molybdenové oceli. Dále už se budeme zabývat pouze příhradovou konstrukcí. [10]

6.1.1 Konické motorové lože

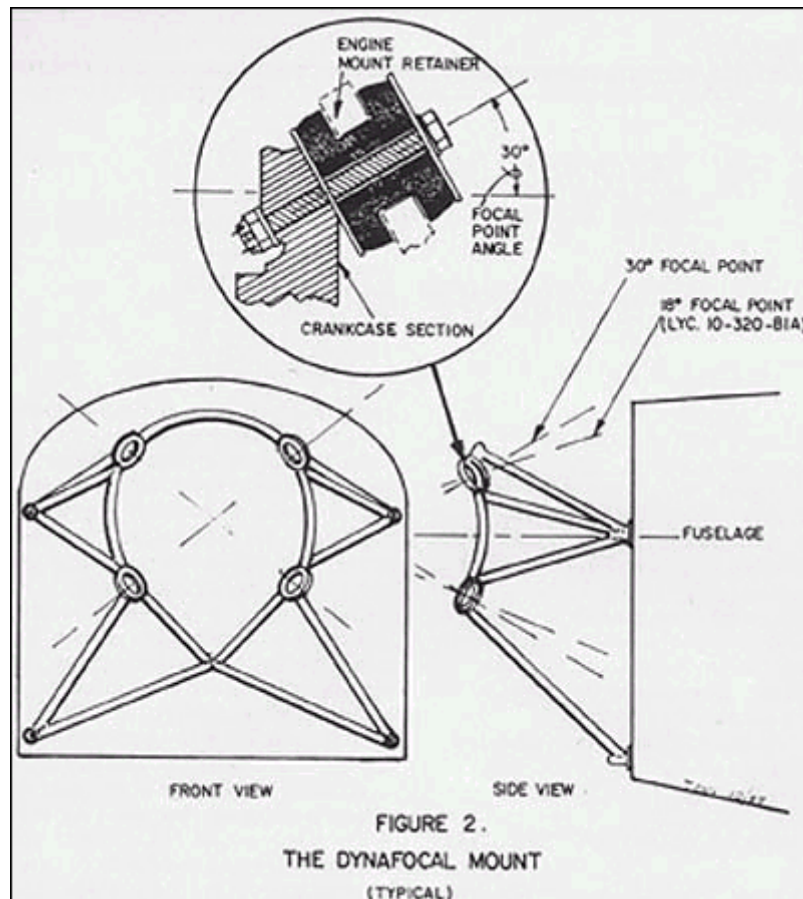
Konické lože je výrobně nejjednodušší typ motorového lože. Obvykle bývá motor připojen k tomuto loži pomocí 4 šroubů a lože je potom čtyřmi šrouby připevněno k motorové přepážce. Úchyty motoru jsou umístěny tak, že úchyty motoru leží v jedné rovině a osy úchytnů jsou na tuto rovinu kolmé (viz. Obr. 11). Díky tomu je umožněna snadná montáž motoru i výroba samotného lože. Nevýhodou tohoto typu je horší distribuce zatížení a horší tlumení vibrací. [17]



Obr. 11 Konické motorové lože [18]

6.1.2 Dynafokální motorové lože

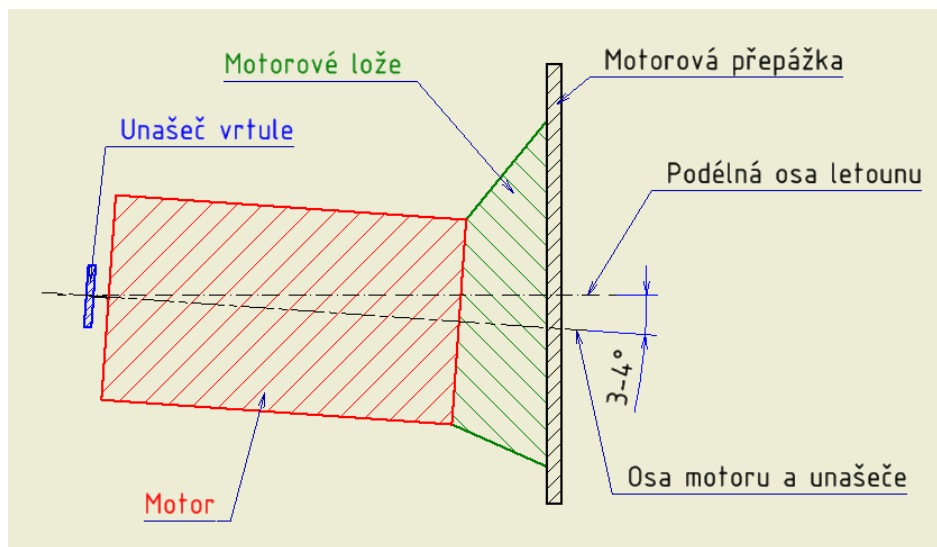
Dynafokální konstrukce je nejvýhodnější z hlediska přenosu zatížení a tlumení vibrací. Osy úchytů motoru se v tomto případě protínají v místě těžiště motoru, což znamená, že úchyty musí být natočeny o přesný úhel. Při nedodržení správného úhlu úchytů by nebylo možné motor k loži uchytit. Kvůli tomu, že kromě roztečí úchytů musí být při svařování dodržen i jejich úhel, se výroba dynafokálního lože stává složitější a nákladnější. [17]



Obr. 12 Dynafokální motorové lože [19]

6.2 Konstrukční řešení motorového lože

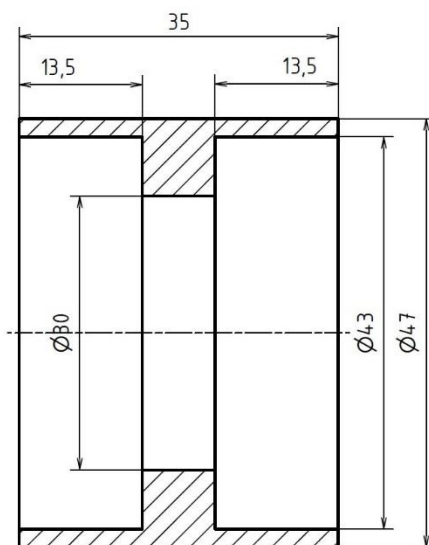
Motorové lože bude, vzhledem k použití pomocného lože od firmy Rotax, které je dodávané s pohonným agregátem, konického typu. Konstrukce lože bude mírně složitější, jelikož je k němu uchycen i předový podvozek. Součástí motorového lože budou tedy úchyty motoru, úchyty pro uchycení lože na motorovou přepážku a pouzdra předového podvozku. Tyto komponenty budou pospojovány přivařením bezešvých trubek z oceli 15 130.1 (25CrMo4) metodou TIG. Výrobce letounu jsou nyní používány tyto trubky o rozměrech 10x1, 14x1, 16x1 a 22x1, při konstrukci bude tedy použito trubek těchto rozměrů. Lože by mělo být konstruováno tak, aby byl motor z vrchního pohledu vyhnutý na pravou stranu o 3-4° vůči podélné ose letounu pro kompenzaci krouticího momentu vrtule, ale aby zároveň střed unašeče vrtule na této ose ležel (viz. Obr. 13). Vzhledem k tomu, že už samotná motorová přepážka je o 1° skloněna dolů, nebude potřeba motor ve vertikálním směru vyhýbat. Cílem konstrukce je, aby byla zachována poloha unašeče vrtule jako u zástavby Rotaxu 912 ve směrech os y a z motorového souřadnicového systému. Ve směru osy x je naopak žádoucí posunout motor co nejbližší motorové přepážce, jelikož by jinak vzhledem k výrazně vyšší hmotnosti Rotaxu 915 došlo k zásadní změně polohy těžiště letounu.



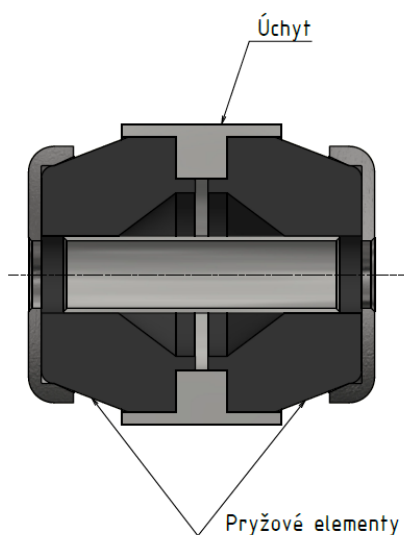
Obr. 13 Schéma nesouososti motoru vůči podélné ose letounu

6.2.1 Úchyty pro uchycení motoru

Úchyty pro uchycení motoru k motorovému loži budou vyrobeny z kruhových tyčí z oceli 11 523 (S355J0), což je stejný materiál, ze kterého jsou vyráběny nyní pro uchycení motoru Rotax 912. Řez úchytem společně s jeho rozměry je zachycen na Obr. 14. Úchyt je navrhnout tak, že se z každé strany do díry o průměru 43 mm napasuje pryžový tlumící element silentbloku pro tlumení vibrací (viz. Kapitola 3.2.1). Sestava úchytu se silentblokem je zobrazena na Obr. 15.



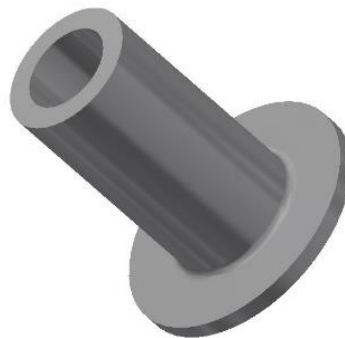
Obr. 14 Řez úchytem motoru



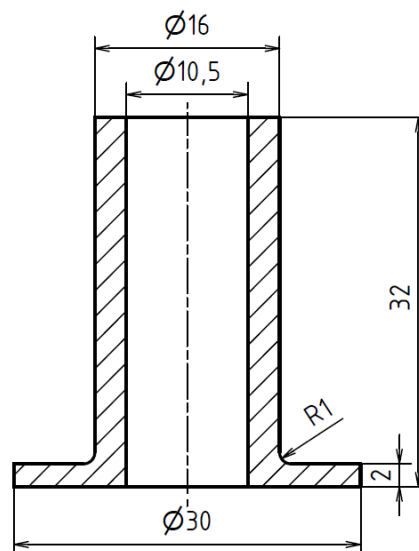
Obr. 15 Úchyt motoru se silentblokem

6.2.2 Uchycení lože na motorovou přepážku

Úchyty na motorovou přepážku (viz. Obr. 16) budou vyrobeny ze stejného materiálu jako úchyty motoru, tedy z oceli 11 523 (S355J0). Jelikož k tlumení vibrací dochází pomocí silentbloků na úchytech motoru, není již třeba vkládat tlumící element mezi lože a motorovou přepážku. Lože bude tedy na přepážku připevněno pomocí šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem se závitem M10 pevnostní třídy 10.9, kruhových podložek a samojistných šestihranných matic. Rozměry úchyty motorového lože na přepážku jsou patrné z výkresu úchyty na Obr. 17.

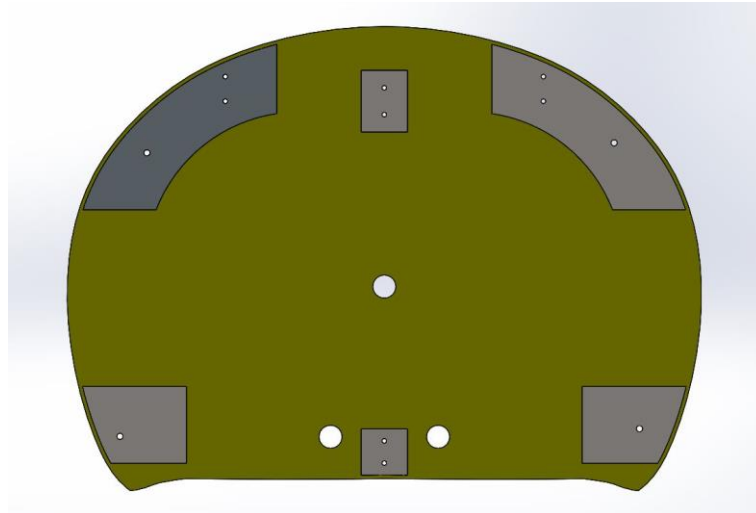


Obr. 16 Úchyt lože k přepážce



Obr. 17 Výkres úchyty

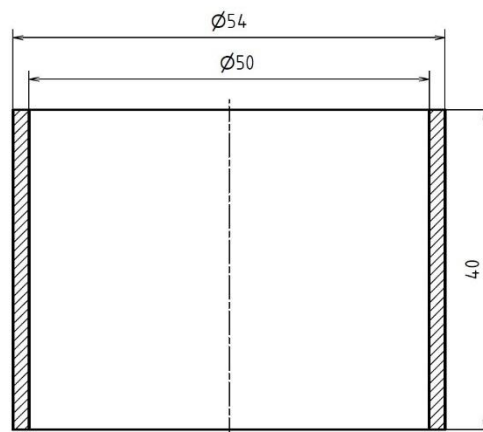
Motorová přepážka je vyrobena z pěny AIREX C70.55 potažené skelnými vlákny a v místech uchycení motorového lože a většího namáhání je vyztužena pomocí letecké překližky. Motorové lože tedy musí být navrženo tak, aby bylo k přepážce uchyceno v místech vyztužených překližkou. Vyztužení překližkou je patrné z Obr. 18, překližka je v tomto případě označena šedou barvou.



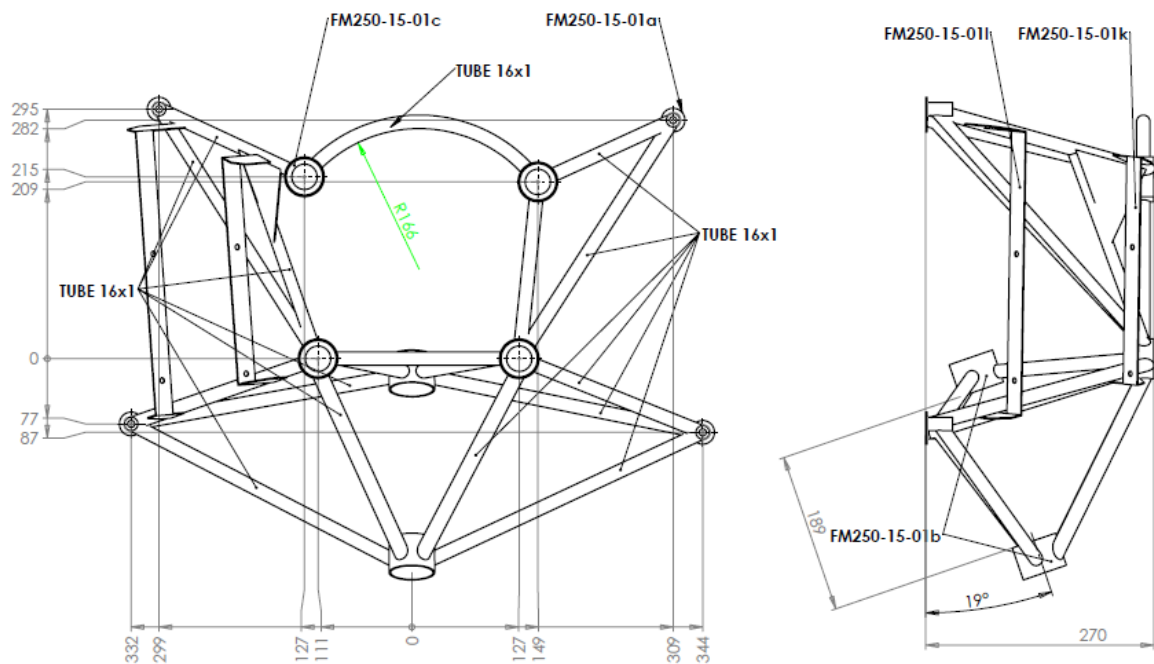
Obr. 18 Motorová přepážka

6.2.3 Uložení předového podvozku

Uložení předového podvozku bude řešeno stejně jako na loži pro Rotax 912. Součástí lože tedy budou dvě pouzdra podvozku (viz. Obr. 19), vyráběná z bezešvé kruhové trubky 55x5 z oceli 11 353.1. Motorové lože bude konstruováno tak, aby byl předový podvozek ve stejné poloze k motorové přepážce jako v případě lože letounů s Rotaxem 912. Výkres motorového lože pro motor Rotax 912 je uveden na Obr. 20. Poloha uchycení podvozku byla odečtena z tohoto výkresu a 3D CAD modelu dodaného výrobcem.



Obr. 19 Pouzdro předového podvozku



Obr. 20 Výkres motorového lože pro Rotax 912 [15]

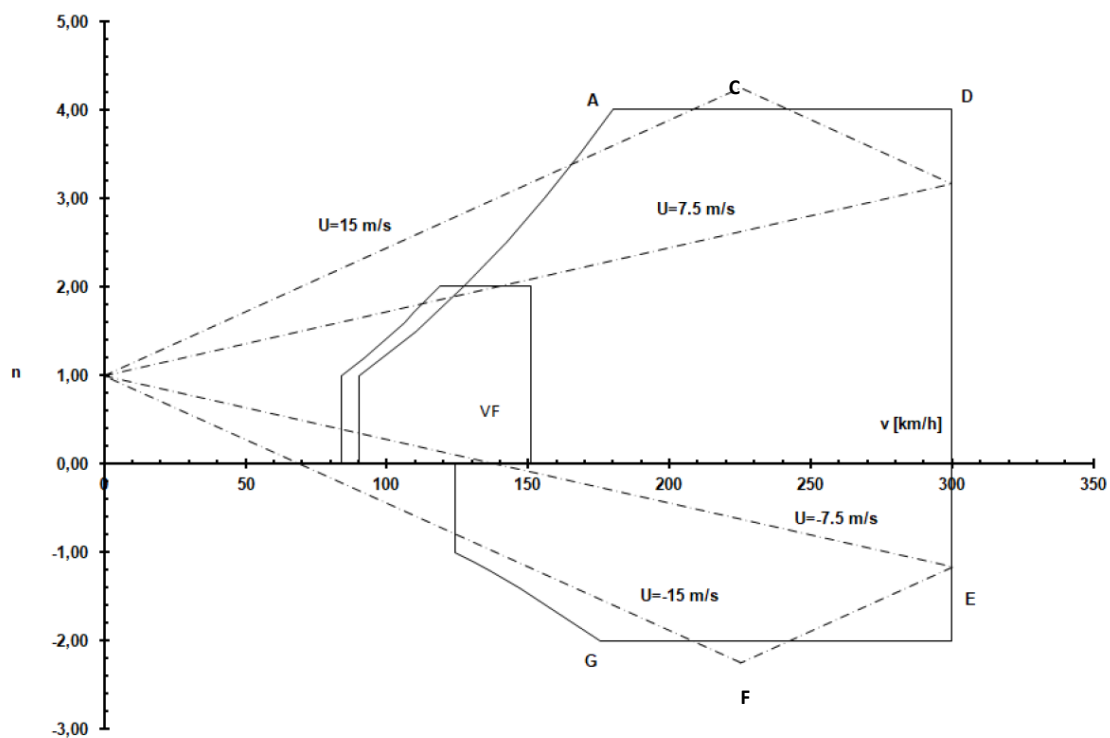
7 Letová obálka

Letová obálka vzniká kombinací obrátové a poryvové obálky a definuje rozsah povolených rychlostí a násobků letadla. Letadlo se musí za všech okolností pohybovat uvnitř této vymezené obálky, jinak může dojít k trvalým deformacím, či dokonce k jeho destrukci.

Obrátová obálka udává omezení provozních zatížení při obratech. Základní diagram obrátové obálky je vypracován pro cestovní konfiguraci, tj. pro let se zasunutými vztlakovými klapkami. Pro let s vysunutými vztlakovými klapkami bývají do diagramu křivky dokresleny, nebo je k dispozici několik diagramů pro různé režimy letu. V našem případě je v diagramu zanesena i obálka pro let s vysunutými vztlakovými klapkami. Podle předpisu UL 2 musí letoun snést kladný obrátový násobek 4 a záporný násobek -2. [20]

Poryvová obálka zahrnuje všechny povolené kombinace rychlostí a násobků při letu v turbulentním prostředí. Podle předpisu UL 2 musí být každý letoun konstruován tak, aby snesl kladný i záporný poryv o velikosti 15 m/s působící kolmo na dráhu letu až do rychlosti V_B . Při návrhové rychlosti musí letoun snést kladný i negativní poryv o velikosti 7,5 m/s. [20]

Obrátová o poryvová obálka jsou navrhovány pro maximální vzletovou hmotnost (pro náš případ 600 kg). Při nižších hmotnostech může být nejvyšší dosažený poryvový násobek větší. Letová obálka letounu FM250 Vampire je k vidění na Obr. 21. [10]



Obr. 21 Letová obálka letounu FM250 Vampire [21]

V letové obálce jsou vyznačené body A, C, D, E, F a G, které vyznačují významné rychlosti a násobky při těchto rychlostech. Bod A je průsečíkem křivky maximálního vztlaku

s křivkou maximálního obrátového násobku. Rychlost v tomto bodě se nazývá manévrovací neboli obrátová rychlost a jedná se o maximální rychlost, při které lze použít plných výchylek kormidel bez překročení maximálního násobku. Rychlost příslušící k bodu C se nazývá maximální rychlost v poryvu a jedná se o nejvyšší rychlost, pro kterou je letoun konstruován pro lety v poryvu kolmém na směr letu o rychlosti 15 m/s. Bod D je průsečíkem maximální návrhové rychlosti a maximálního obrátového násobku. Body E, F a G jsou definovány obdobně jako body předchozí, pouze s tím rozdílem, že násobky a poryvy v těchto bodech jsou záporné.

Při našich dalších výpočtech budeme vycházet z letové obálky poskytnuté výrobcem, jejíž shrnutí je uvedeno v Tab. 6. Uvedené hodnoty násobků neodpovídají hodnotám na Obr. 21, jelikož byly vzaty v úvahu i jiné hmotnostní konfigurace než maximální vzletová hmotnost, a jak je výše uvedeno, tak při nižších hmotnostech mohou být poryvové násobky větší. Dále jsou v tabulce uvedeny navíc body P+ a P-, které reprezentují násobek při kladném, respektive záporném poryvu při maximální návrhové rychlosti. Tyto body byly do tabulky doplněny z důvodu, že násobky v těchto bodech překračují výše uvedenou letovou obálku.

Tab. 6 Letová obálka letounu FM250 Vampire [21]

Bod obálky	n	Rychlost		úhel náběhu α
	[-]	[km/h]	[m/s]	[°]
A	4	180	50	15,3
C	5,62	225	62,5	9,6
D	4	300	83,3	3,9
E	-2	300	83,3	-5,6
F	-3,62*	225	62,5	-8,8
G	-2*	176	48,9	-8,2
P+	4,08*	300	83,3	1,6
P-	-2,08*	300	83,3	-4,5

*násobky vypočtené pro minimální vzletovou hmotnost 360 kg

8 Výpočet zatížení

Pro získání typového certifikátu ultralehkého letounu je nutné, aby byly splněny požadavky předpisů, kterým certifikace podléhá. V našem případě musí letoun splňovat požadavky předpisu UL 2, nad jehož plněním dohlíží Letecká amatérská asociace ČR. Případy a hodnoty zatížení budou stanoveny dle předpisu UL 2, část I vydaného v roce 2019.

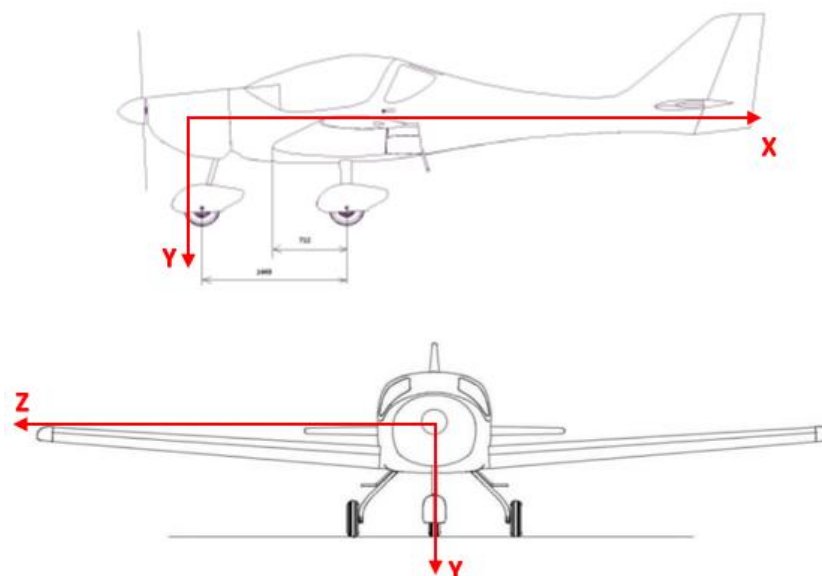
Tento stavební předpis stanovuje minimální požadavky pro aerodynamicky řízené letouny o maximální vzletové hmotnosti 600 kg, které je potřeba splnit pro získání letové způsobilosti. Požadavky tohoto předpisu mají zaručit bezpečný provoz letounu bez ohrožení bezpečnosti letového provozu a bezpečnosti třetích osob. [20]

Dle paragrafu 305 předpisu UL 2 musí být konstrukce schopná přenést provozní zatížení bez trvalých deformací a při početním zatížení nesmí dojít k poruše po dobu nejméně 3 sekundy. Dle paragrafu 303 zmíněného předpisu musí být pro všechny případy použit bezpečnostní koeficient 1,5, pokud není uvedena jiná hodnota. [20]

V následujících oddílech budou uvedeny všechny případy, které je potřeba při návrhu motorového lože uvažovat, a bude vypočítáno zatížení při těchto případech působící.

8.1 Definice souřadnicového systému

Za letu působí na motorové lože tahová síla, která je vytvářena vrtulí, kroučící moment motoru a setrvačné síly motoru a jeho příslušenství. Pro orientace ve vypočtených zatíženích je nutné zavést lokální souřadnicový systém. Tento lokální souřadnicový systém bude mít počátek v těžišti sestavy motoru, vrtule a motorového lože. Natočení motoru bude při výpočtech vzhledem k malému úhlu natočení 3° zanedbáno. Orientace souřadnicového systému je patrná z Obr. 22.



Obr. 22 Orientace souřadnicového systému

8.1.1 Výpočet těžiště sestavy motoru, vrtule a lože

Výpočet těžiště budeme provádět v ose x vůči motorové přepážce a v ose y vůči horním úchytům motoru na motorovém loži. Tento souřadnicový systém budeme nazývat souřadnicovým systémem pro výpočet těžiště. Budeme předpokládat, že těžiště leží v podélné ose letounu, a tudíž těžiště ve směru osy z počítat nebudeme. Hmotnost motorové lože a jeho těžiště nejsou přesně známy, jelikož nevíme, zda bude navrhnuté lože splňovat pevnostní požadavky dané předpisem. S jistotou ale můžeme říct, že lože nebude těžší než 5 kg a jeho těžiště můžeme zvolit v polovině jeho délky a výšky. Hmotnosti částí a jejich ramena k souřadnicovému systému pro výpočet těžiště jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 7 Hmotnosti částí a jejich ramena v souřadnicovém systému pro výpočet těžiště

Část sestavy	Hmotnost [kg]	Těžiště ve směru x [mm]	Těžiště ve směru y [mm]
Motor	97,47	-459	108,9
Vrtule	11	-955	-7
Motorové lože	5	-110	205

K výpočtu souřadnic těžiště použijeme vzorce:

$$x_T = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} \text{ [mm]} \quad (8.1)$$

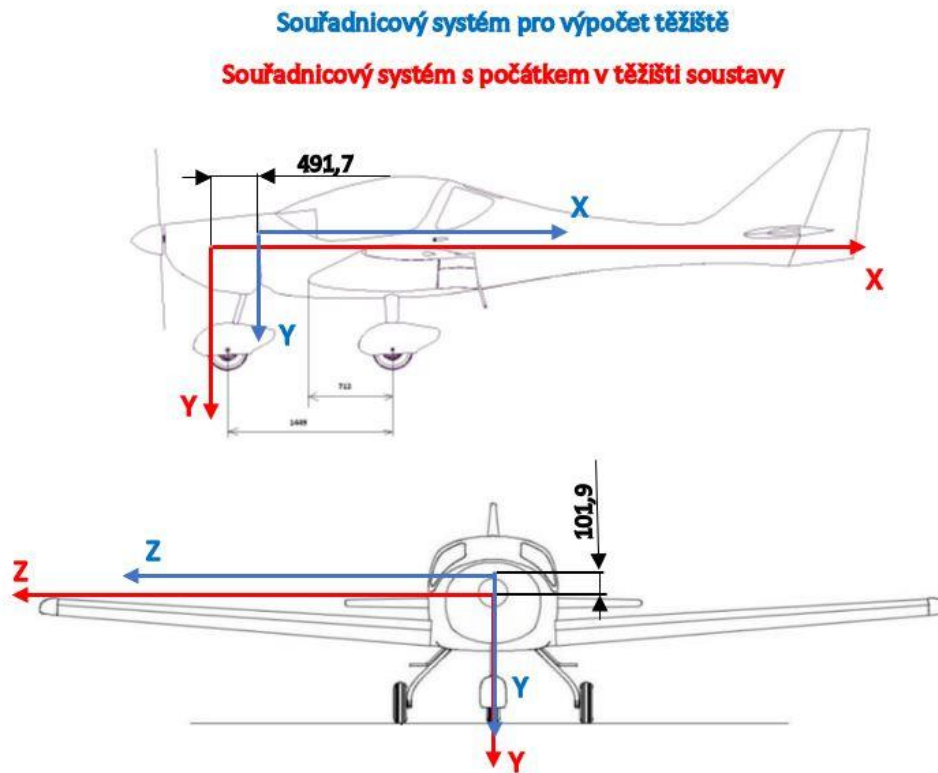
$$y_T = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i} \text{ [mm]} \quad (8.2)$$

Dosazením získáme souřadnice:

$$x_T = \frac{97,47 \cdot (-459) + 11 \cdot (-955) + 5 \cdot (-110)}{97,47 + 11 + 5} = -491,7 \text{ mm} \quad (8.3)$$

$$y_T = \frac{97,47 \cdot 108 + 11 \cdot (-7) + 5 \cdot 205}{97,47 + 11 + 5} = 101,9 \text{ mm} \quad (8.4)$$

Těžiště sestavy je tedy dle výpočtů 453,2 mm od počátku systému pro výpočet těžiště v záporném směru osy x a 101,9 mm od počátku systému pro výpočet těžiště v kladném směru osy y. Do tohoto bodu tedy umístíme souřadnicový systém, který budeme používat při následujících výpočtech. Vzájemná poloha souřadnicového systému pro výpočet těžiště a výsledného souřadnicového systému je zobrazena na Obr. 23.



Obr. 23 Vzájemná poloha souřadnicových systémů

Celková hmotnost, kterou budeme umísťovat do těžiště, je součet hmotností částí soustavy:

$$m_c = \sum m_i \text{ [kg]} \quad (8.5)$$

$$m_c = 97,47 + 11 + 5 = 113,47 \text{ kg} \quad (8.6)$$

Dále bude potřeba při výpočtu setrvačných sil uvažovat setrvačnou sílu podvozkové nohy, která bude působit na její uložení.

Krouticí moment motoru je reakcí na otáčení vrtule, a tudíž musí mít opačnou orientaci. Vrtule se otáčí doprava ve směru hodinových ručiček z pohledu pilota. Krouticí moment tudíž bude působit proti směru otáčení hodinových ručiček a jeho orientace tedy bude shodná s kladným směrem osy x. Účinky gyroskopického momentu na motorové lože budou zanedbány.

8.2 Zatížení dle UL 2 § 361

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

- a. provozní zatížení krouticím momentem od vrtule, které odpovídá vzletovému výkonu a příslušným otáčkám vrtule při současném působení 75 % provozního zatížení z případu A podle bodu UL 2 § 333.
- b. provozní zatížení krouticím momentem od vrtule, které odpovídá maximálnímu trvalému výkonu a příslušným otáčkám vrtule při současném působení provozního zatížení z případu A podle bodu UL 2 § 333. “ [20]

Provozní krouticí moment získáme vynásobením středního krouticího momentu koeficientem $k_{km} = 2$, který odečteme z tabulky v bodě 2 paragrafu 361. [20]

8.2.1 Příklad a.

Zatížení krouticím momentem je dáno vztahem:

$$M_r = k_{km} \cdot \frac{P_{mot} \cdot i \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_{mot}} [N \cdot m] \quad (8.7)$$

Dosazením do vztahu získáme výsledný krouticí moment:

$$M_r = 2 \cdot \frac{104\,000 \cdot 2,54 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 5800} = 869,84 N \cdot m \quad (8.8)$$

Setrvačná síla se počítá dle následujícího vztahu:

$$F_g = m_c \cdot n \cdot g [N] \quad (8.9)$$

Jelikož v bodě A působí na letadlo násobek 4, budeme do této rovnice dosazovat 75 % této hodnoty, tedy $n=3$:

$$F_g = 113,47 \cdot 3 \cdot 9,81 = 3\,339,42 N \quad (8.10)$$

Pro výpočet setrvačné síly podvozkové nohy použijeme tentýž vztah:

$$F_n = 6,2 \cdot 3 \cdot 9,81 = 182,47 N \quad (8.11)$$

Vztah pro výpočet tahu odvodíme ze vzorečku pro výkon:

$$P \cdot \eta = \frac{W}{t} = \frac{F_t \cdot s}{t} = F_t \cdot v [W] \quad (8.12)$$

Z toho vzorec pro tah:

$$F_t = \frac{P_{mot} \cdot \eta}{v} [N] \quad (8.13)$$

Kde η je účinnost vrtule. Vzhledem k tomu, že tuto účinnost neznáme, bude voleno $\eta=1$, díky čemuž budeme počítat s maximální velikostí tahu pro daný případ:

$$F_t = \frac{104\,000 \cdot 1}{50} = 2\,080\,N \quad (8.14)$$

8.2.2 Příklad b.

Pro výpočet zatížení použijeme stejné vztahy jako pro případ a., pouze do nich dosadíme jiné hodnoty.

Krouticí moment bude v tomto případě:

$$M_r = 2 \cdot \frac{99\,000 \cdot 2,54 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 5500} = 873,19\,N \cdot m \quad (8.15)$$

Do vzorce pro setrvačnou sílu tentokrát budeme zadávat plný násobek v bodu A:

$$F_g = 113,47 \cdot 4 \cdot 9,81 = 4\,452,56\,N \quad (8.16)$$

Setrvačná síla podvozkové nohy bude:

$$F_n = 6,2 \cdot 4 \cdot 9,81 = 243,29\,N \quad (8.17)$$

Pro výpočet tahu tentokrát budeme dosazovat maximální trvalý výkon místo vzletového:

$$F_t = \frac{99\,000 \cdot 1}{50} = 1\,980\,N \quad (8.18)$$

Shrnutí vypočtených provozních zatížení dle UL 2 § 361 je v následující tabulce, kde α je úhel náběhu pro bod A letové obálky.

Tab. 8 Provozní zatížení dle UL 2 § 361

Případ zatížení	n [-]	F_g [N]	F_t [N]	F_n [N]	M_r [N·m]	α [°]
§ 361 a.	3	3 339,42	2 080	182,47	869,84	15,3
§ 361 b.	4	4 452,56	1 980	243,29	873,19	15,3

8.3 Zatížení dle UL 2 § 363

„Motorové lože a jeho uchycení musí být navrženy na boční zatížení provozním násobkem ne menším než jedna třetina provozního násobku z bodu obálky A (1/3 n1).“ [20]

Setrvačná boční síla bude působit ve směru z. Vzhledem k tomu, že lože není symetrické, tak je potřeba prověřit jeho pevnost při působení této síly na obě strany. Proto bude ve výpočtech použito v rovnici znaménko \pm :

$$F_{gz} = \pm \frac{1}{3} \cdot m_c \cdot n \cdot g \text{ [N]} \quad (8.19)$$

Po dosazení:

$$F_{gz} = \pm \frac{1}{3} \cdot 113,47 \cdot 4 \cdot 9,81 = \pm 1\,484,19 \text{ N} \quad (8.20)$$

Setrvačná síla podvozkové nohy bude:

$$F_{nz} = \pm \frac{1}{3} \cdot 6,2 \cdot 4 \cdot 9,81 = \pm 81,1 \text{ N} \quad (8.21)$$

V následující tabulce je shrnuto zatížení při bočním zatížení.

Tab. 9 Boční zatížení dle UL 2 § 363

Případ zatížení	n [-]	F_{gz} [N]	F_{nz} [N]
§ 363	4/3	$\pm 1\,484,19$	$\pm 81,1$

8.4 Letové případy

Výpočet zatížení budeme provádět pro všechny významné body obálky uvedené v Tab. 6. Výpočty setrvačné síly, krouticího momentu a tahu budou prováděny obdobným způsobem jako v předchozích případech, budeme tedy dosazovat do rovnic 8.7, 8.9 a 8.13. Vzhledem k množství výpočtů a používání stále stejných vztahů jsou výsledky rovnou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 10 Zatížení motorového lože ve významných bodech obálky

Bod obálky	n [-]	F_g [N]	F_t [N]	F_n [N]	M_r [N·m]	α [°]
A	4	4 452,56	2 080	243,29	869,84	15,3
C	5.62	6 255,85	1 584	341,82	873,19	7,4
D	4	4 452,56	1 188,48	243,29	873,19	1,5
E	-2	- 2 226,28	1 188,48	- 121,64	873,19	- 4,4
F	-3.62	- 4 029,57	1 584	- 220,18	873,19	- 8,8
G	-2	- 2 226,28	2 024,54	- 121,64	873,19	- 8,2
P+	4,08	4 541,61	1 188,48	248,15	873,19	1,6
P-	-2.08	- 2 315,33	1 188,48	- 126,51	873,19	- 4,5

8.5 Přistávací případy

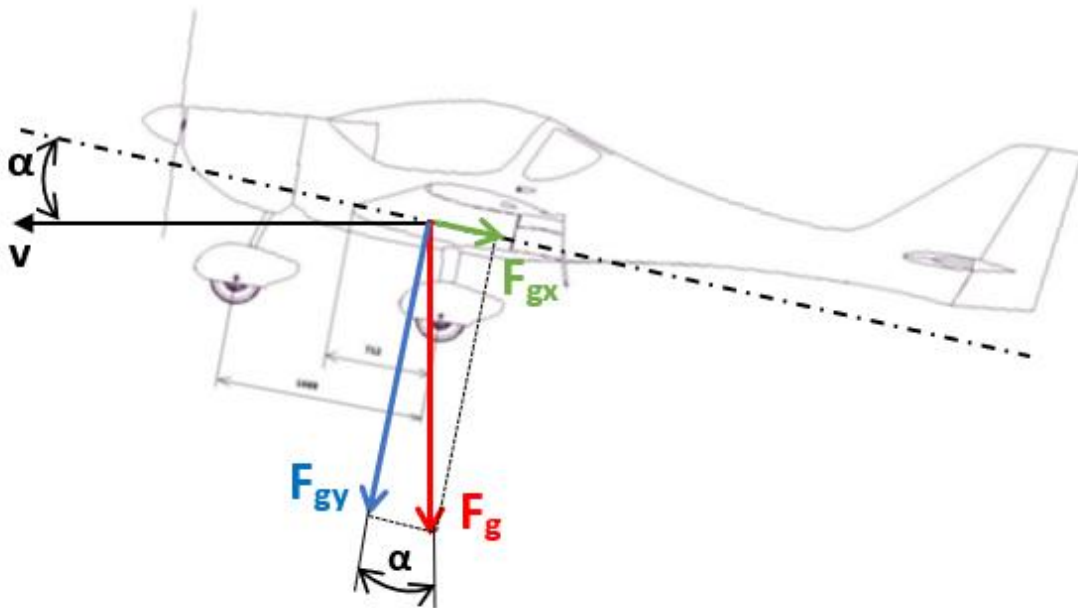
Je potřeba, aby motorové lože vydrželo i tvrdší přistání. Lože musí kromě setrvačných sil přenést i reakce z předového podvozku. Nejkritičtějším případem, pro který budeme lože navrhovat, je přistání bez podrovnání, kdy se předový podvozek dotkne země ve stejnou chvíli jako podvozek hlavní. Budeme vycházet z výpočtů dodaných výrobcem letounu. Dle těchto výpočtů je nejvyšší násobek $n = 4,38$ a vypočtené reakce na předovém podvozku jsou $R_x = 1588,8$ N a $R_y = 5369,1$ N. Vzhledem k předpokladu motoru staženého na volnoběh při přistání budeme brát krouticí moment i tahovou sílu jako nulové hodnoty. Výpočet setrvačných sil bude probíhat stejně jako v minulých případech a není tedy nutné ho zde znovu uvádět. Výsledky jsou zaznamenány v Tab. 11.

Tab. 11 Zatížení při přistání [22]

Přistávací případ	n [-]	F_g [N]	F_t [N]	F_n [N]	M_r [N·m]	R_x [N]	R_y [N]
	4,38	4 875,56	0	266,4	0	1 588,8	- 5 369,1

8.6 Rozklad vypočtených zatížení

Vzhledem k tomu, že letadlo ve většině režimů neletí s nulovým úhlem náběhu, tak je potřeba výsledné setrvačné síly rozložit do souřadnicových os letounu. Tah i boční síla působí nezávisle na úhlu náběhu vždy ve směru, nebo proti směru souřadnicových os, jejich rozklad tak není potřeba. Natočení doprava o 3° a dolů o 1° bude vzhledem k malým hodnotám zanedbáno. Princip rozkladu setrvačné síly F_g je vyznačen na Obr. 24.



Obr. 24 Princip rozkladu setrvačných sil

Z Obr. 24 je zřejmé, že k rozkladu použijeme následující vztahy:

$$F_{gx} = F_g \cdot \sin \alpha \quad (8.22)$$

$$F_{gy} = F_g \cdot \cos \alpha \quad (8.23)$$

Obdobné vztahy budou použity i pro rozklad setrvačné síly přední podvozkové nohy. Při vybraném přistávacím případě budeme uvažovat, že vypočtené setrvačné síly působí pouze v ose y a nebudeme je rozkládat. Tabulka na následující straně shrnuje hodnoty provozních zatížení pro uvažované případy.

Tab. 12 Rozklad provozních zatížení do směrů os souřadnicového systému

Případ zatížení	F_t [N]	F_{gx} [N]	F_{gy} [N]	F_{gz} [N]	F_{nx} [N]	F_{ny} [N]	F_{nz} [N]	M_r [N·m]	R_x [N]	R_y [N]
§ 361 a.	2 080	493,6	3 302,74	-	26,97	180,47	-	869,84	-	-
§ 361 b.	1 980	658,13	4 403,65	-	35,96	240,62	-	873,19	-	-
§ 363	-	-	-	± 1 484,19	-	-	± 81,1	-	-	-
A	2 080	658,13	4 403,65	-	35,96	240,62	-	869,84	-	-
C	1 584	805,73	6 203,75	-	44,02	338,97	-	873,19	-	-
D	1 188,48	116,55	4 451,04	-	6,37	243,20	-	873,19	-	-
E	1 188,48	170,80	- 2 219,72	-	9,33	- 121,29	-	873,19	-	-
F	1 584	616,47	- 3 982,13	-	33,68	- 217,58	-	873,19	-	-
G	2 024,54	317,53	- 2 203,52	-	17,35	- 120,40	-	873,19	-	-
P+	1 188,48	126,81	4 539,84	--	6,93	248,06	-	873,19	-	-
P-	1 188,48	181,66	- 2 308,2	-	9,93	- 126,12	-	873,19	-	-
Přistání	-	-	4 875,56	-	-	266,4	-	-	1 558,8	- 5 369,1

8.7 Dodatečné podmínky zatížení příďového podvozku

Vzhledem k tomu, že je uchycení příďového podvozku součástí motorového lože, je nutné, aby lože sneslo i zatížení, která jsou daná v UL 2 § 499, kde jsou definovány dodatečné podmínky zatížení pro příďový podvozek.

„Pro určení pozemního zatížení příďových podvozků a jejich uchycení, musí být za předpokladu, že stlačení tlumících prvků a pneumatik odpovídá klidovému stavu, splněny následující podmínky:

1. Pro zatížení působící dozadu musí mít složky síly působící v ose následující velikost:
 - a. svislá složka odpovídá 2,25násobku hodnoty klidového statického zatížení kola,
 - b. odporová složka odpovídá 0,8násobku svislé složky.
2. Pro zatížení působící dopředu musí mít složky provozní síly působící v ose následující velikost:
 - a. svislá složka odpovídá 2,25násobku hodnoty klidového statického zatížení kola,
 - b. směrem dopředu orientovaná složka odpovídá 0,4násobku svislé složky.
3. Pro boční zatížení musí mít provozní složky provozních sil v bodě dotyku se zemí následující velikost:
 - a. svislá složka odpovídá 2,25násobku hodnoty klidového statického zatížení kola,
 - b. boční složka zatížení odpovídá 0,7násobku svislé složky.“ [20]

Z vážních protokolů deseti naposledy vyrobených kusů letounu FM250 Vampire II bylo vyčteno, že váha na předním kole u žádného z kusů nepřesáhla v žádné konfiguraci 70 kilogramů. Vzhledem ke zvýšení hmotnosti vlivem těžší pohonné jednotky budeme jako statické zatížení kola používat hmotnost 80 kg.

Pro výpočet svislé složky zatížení, která bude působit v místě dotyku kola se zemí, použijeme vzorec:

$$F_s = R_y = -2,25 \cdot m_s \cdot g \text{ [N]} \quad (8.24)$$

Do tohoto vztahu dosadíme za m_s klidové statické zatížení a za g tíhové zrychlení:

$$F_s = R_y = -2,25 \cdot 80 \cdot 9,81 = -1\,765,8 \text{ N} \quad (8.25)$$

Tato svislá složka bude působit ve všech třech případech zatížení.

8.7.1 Zatížení působící dozadu

Odporová složka působí v kladném směru osy x a musí být rovna 0,8násobku svislé složky:

$$F_o = R_x = 0,8 \cdot F_s \text{ [N]} \quad (8.26)$$

Po dosazení:

$$F_o = R_x = 0,8 \cdot 1\,765,8 = 1\,412,64 \text{ N} \quad (8.27)$$

8.7.2 Zatížení působící dopředu

Složka orientovaná dopředu (v záporném směru osy x) musí být rovna 0,4násobku svislé složky:

$$F_d = -R_x = 0,4 \cdot F_s \text{ [N]} \quad (8.28)$$

Po dosazení:

$$F_d = -R_x = 0,4 \cdot 1\,765,8 = 706,32 \text{ N} \quad (8.29)$$

8.7.3 Boční zatížení

Boční zatížení budeme muset ověřit v obou směrech – kladném i záporném směru osy z. Boční složka zatížení musí mít velikost 0,7násobku svislého zatížení:

$$F_b = R_z = \pm 0,7 \cdot F_s \text{ [N]} \quad (8.30)$$

Po dosazení:

$$F_b = R_z = 0,7 \cdot 1\,765,8 = \pm 1\,236,06 \text{ N} \quad (8.31)$$

8.7.4 Shrnutí

Výsledná provozní zatížení pro dodatečné podmínky zatížení předřového podvozku jsou uvedena v následující tabulce. Působíště těchto zatížení je vždy místo dotyku se zemí na pneumatice.

Tab. 13 Zatížení při dodatečných podmínkách zatížení předřového podvozku

Zatížení	R_y [N]	R_x [N]	R_z [N]
Dozadu	- 1 765,8	1 412,64	-
Dopředu	- 1 765,8	- 706,32	-
Boční	- 1 765,8	-	$\pm 1\,236,06$

8.8 Výpočet výsledných početních zatížení pro uvažované případy

Z požadavků předpisu UL 2 je zřejmé, že vypočtené provozní hodnoty je potřeba vynásobit bezpečnostním koeficientem 1,5, abychom dostali početní zatížení, která musí konstrukce vydržet po dobu minimálně 3 sekund. [20]

Početní zatížení pro dodatečné podmínky zatížení příďového podvozku jsou uvedena v následující tabulce.

Tab. 14 Početní zatížení pro dodatečné podmínky zatížení příďového podvozku

Zatížení	R_y [N]	R_x [N]	R_z [N]
Dozadu	- 2 648,7	2 118,96	-
Dopředu	- 2 648,7	- 1 059,48	-
Boční	- 2 648,7	-	\pm 1 854,09

Tab. 15, která shrnuje početní zatížení pro návrhové, letové a přistávací případy, je vzhledem k její velikosti uvedena samostatně na příští straně.

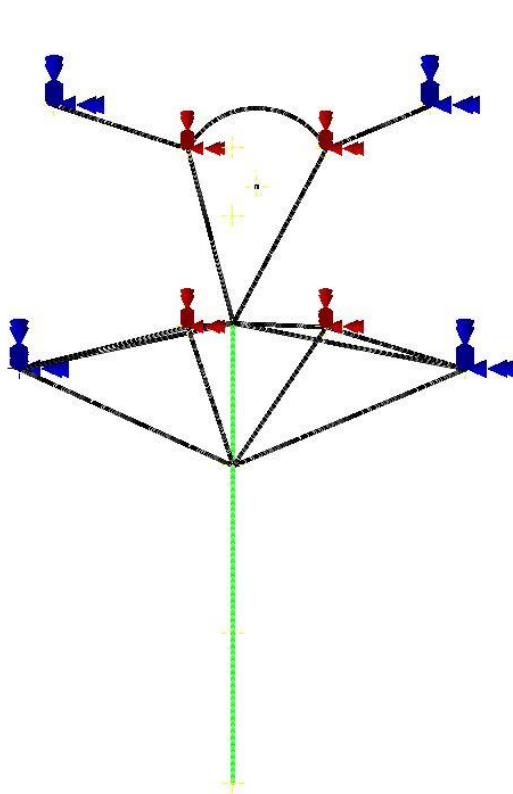
Tab. 15 Početní zatížení letových, návrhových a přistávacích případů

Případ zatížení	F_t [N]	F_{gx} [N]	F_{gy} [N]	F_{gz} [N]	F_{nx} [N]	F_{ny} [N]	F_{nz} [N]	M_r [N·m]	R_x [N]	R_y [N]
§ 361 a.	3 120	740,4	4 954,11	-	40,46	270,71	-	1 304,76	-	-
§ 361 b.	2 970	987,2	6 605,48	-	53,94	360,93	-	1 309,79	-	-
§ 363	-	-	-	± 2 226,29	-	-	± 121,65	-	-	-
A	3 120	987,2	6 605,48	-	53,94	360,93	-	1 304,76	-	-
C	2 376	1 208,6	9 305,63	-	66,03	508,46	-	1 309,79	-	-
D	1 782,72	174,83	6 676,56	-	9,56	364,8	-	1 309,79	-	-
E	1 782,72	256,2	- 3 329,58	-	14	- 181,94	-	1 309,79	-	-
F	2 376	924,71	- 5 973,2	-	50,52	- 326,37	-	1 309,79	-	-
G	3 036,81	476,3	- 3 305,28	-	26,03	- 180,6	-	1 309,79	-	-
P+	1 782,72	190,22	6 809,76	--	10,4	372,09	-	1 309,79	-	-
P-	1 782,72	272,49	- 3 462,3	-	14,9	- 189,18	-	1 309,79	-	-
Přistání	-	-	7 313,34	-	-	399,6	-	-	2 338,2	- 8 053,65

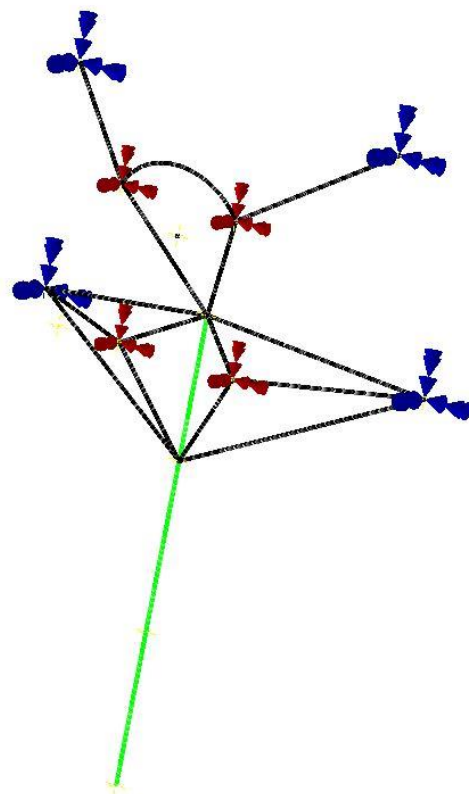
9 Konceptní návrhy lože

Byly navrženy 4 konceptní návrhy, na kterých budou prováděny MKP analýzy pomocí 1D prvků. Následně bude vybrána nejvhodnější varianta, na které bude provedena 3D MKP analýza. Konceptní návrhy je možno vidět v následujících podkapitolách. Motorové lože je vždy v konceptním návrhu zobrazeno černou barvou a podvozková noha je znázorněna zeleně. Modré šipky znázorňují pevnou vazbu k motorové přepážce a červené šipky znázorňují úchyty motoru.

9.1.1 Koncept 1

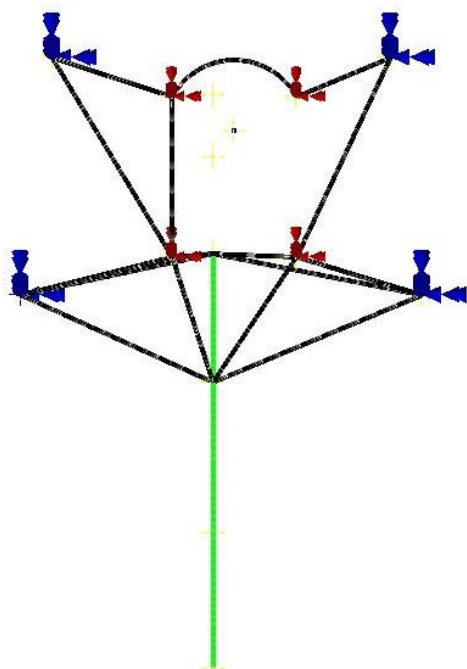


Obr. 25 Koncept 1, pohled zředu

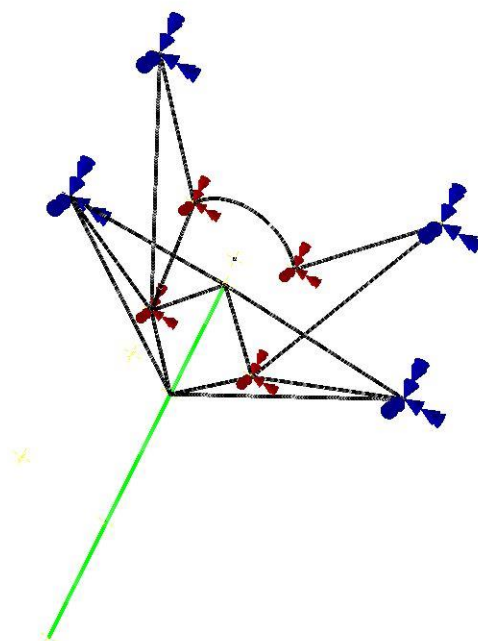


Obr. 26 Koncept 1, volný pohled

9.1.2 Koncept 2

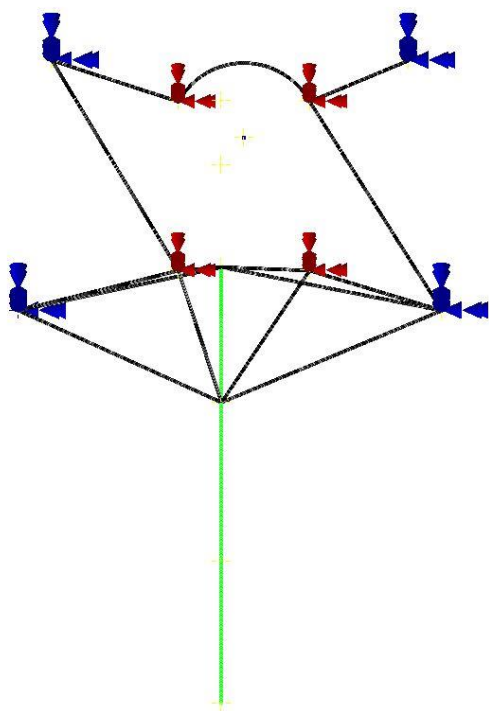


Obr. 27 Koncept 2, pohled zředu

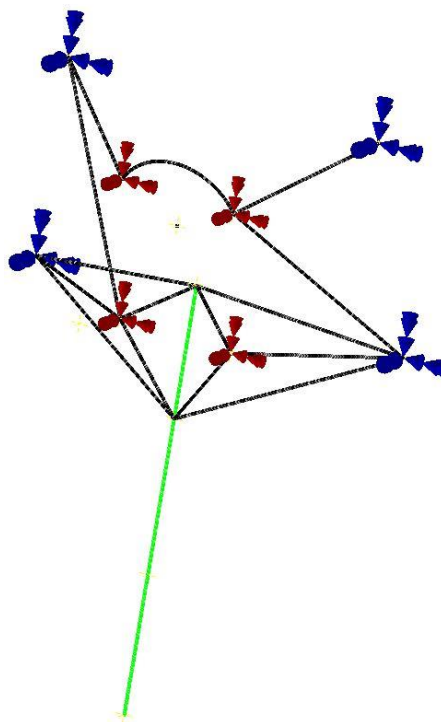


Obr. 28 Koncept 2, volný pohled

9.1.3 Koncept 3

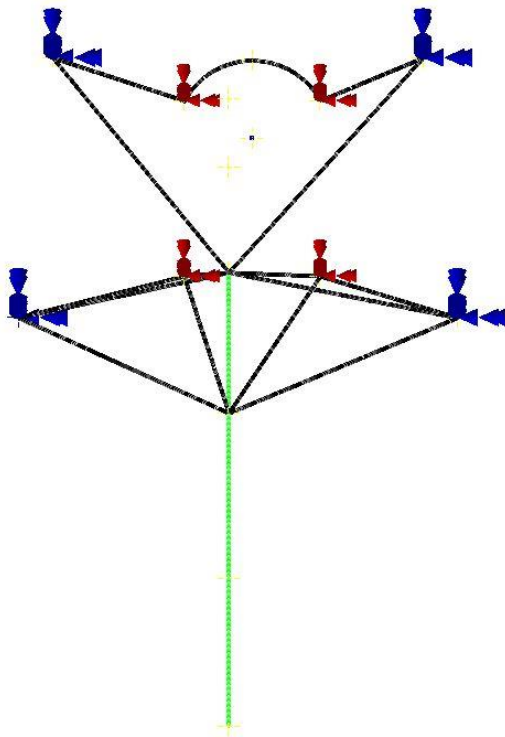


Obr. 29 Koncept 3, pohled zředu

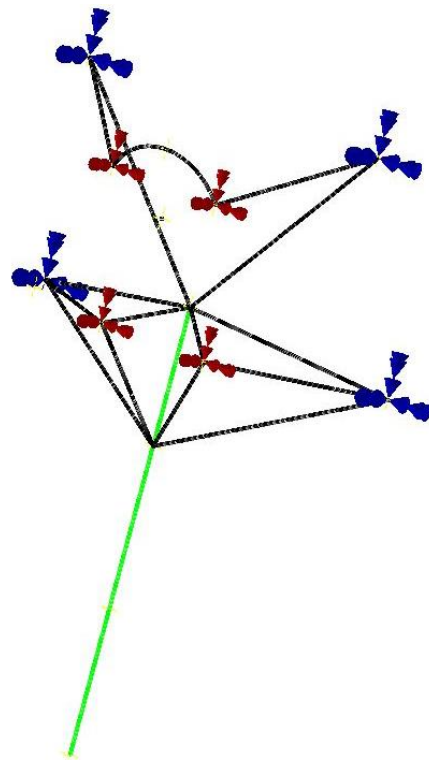


Obr. 30 Koncept 3, volný pohled

9.1.4 Koncept 4



Obr. 31 Koncept 4, pohled zředu



Obr. 32 Koncept 4, volný pohled

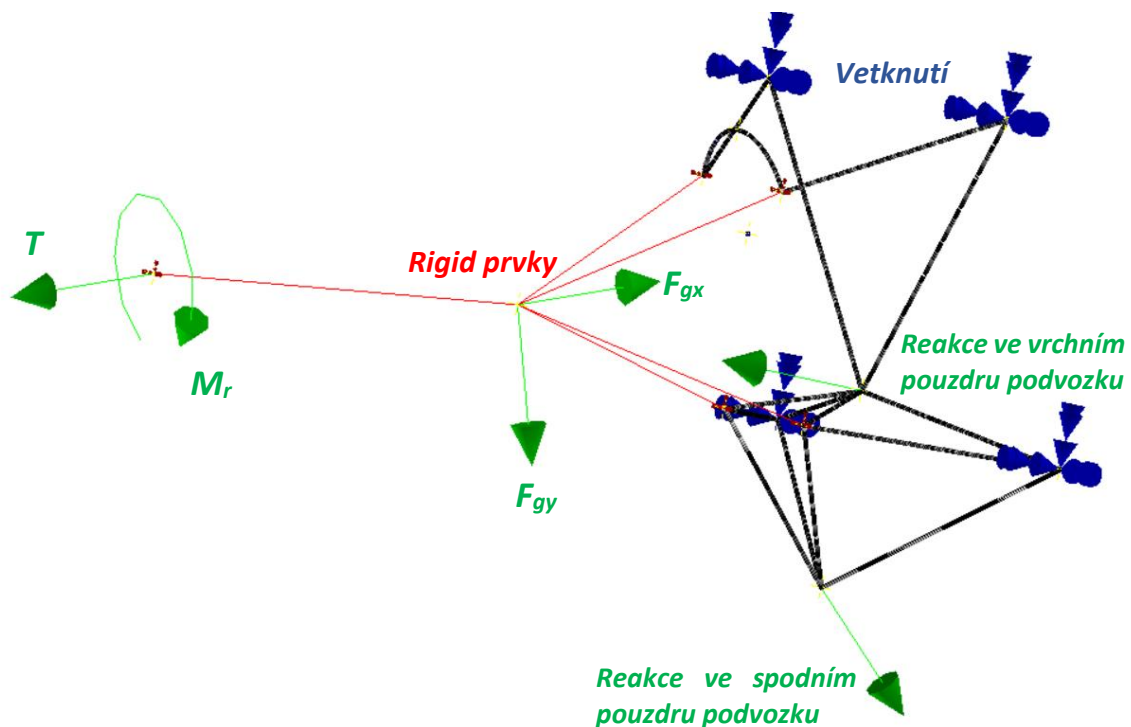
10 Pevnostní analýza

Pevnostní analýza 4 variant motorových loží byla provedena pomocí metody konečných prvků v řešiči Nastran, který je doplňkem aplikace Autodesk Inventor 2021.

Motorová lože byla sestrojena pomocí přímek a křivek, které nahrazovaly pruty, které budou ke konstrukci lože použity. Úchyty lože k přepážce a úchyty motoru byly v 1D analýze zanedbány. Pruty drátového modelu byly idealizovány jako 1D prvek typu Beam a byl zvolen průřez odpovídající kruhové trubce 16x1, která je použita i na loži pro Rotax 912. Poté byla vygenerována lineární síť s délkou prvku 1 milimetr. Jako materiál byla v programu zvolena ocel s Youngovým modulem $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ a Poissonovou konstantou $\nu = 0,3$.

Vzhledem k vysoké tuhosti motoru, a díky tomu jeho malé deformaci, byl motor nahrazen prvky typu Rigid body, které jsou uvažovány jako dokonale tuhé. Tyto prvky tedy pouze přenášejí síly působící v těžišti motoru, tah a krouticí moment do úchtů motoru. V místě uchycení lože k motorové přepážce bylo zadefinováno vetknutí prutů, kdy jim byly odebrány všechny stupně volnosti.

Setrvačné síly motoru, lože a vrtule byly zavedeny do těžiště, jehož poloha byla vypočítána v kapitole 8.1.1. Tah a krouticí moment byly zavedeny do polohy středu unašeče vrtule a setrvačné síly a přistávací reakce podvozku byly rozloženy do lokálního souřadnicového systému (viz. kapitola 10.1), a poté zavedeny do míst pouzder podvozku. Zavedení sil, použití Rigid prvků a vazeb vetknutí je patrné z Obr. 33.



Obr. 33 Idealizace motorového lože pomocí 1D prvků se zavedenými silovými účinky

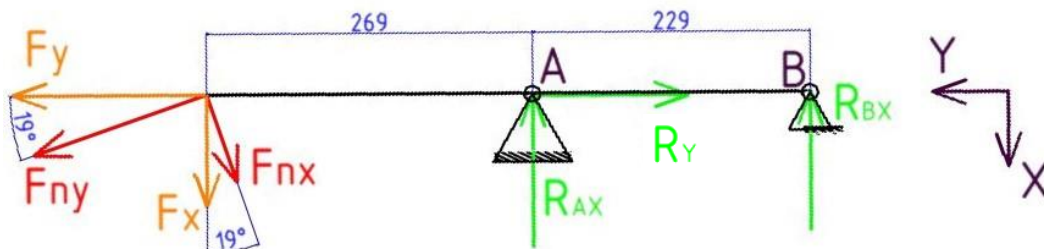
Vzhledem k tomu, že je lože složeno z prutů, tak by mohl být problém s jeho stabilitou ve vzpěrovém namáhání. Proto byla kromě statické lineární analýzy provedena i analýza zabývající se ztrátou stability při vzpěru, tzv. Linear Buckling analysis. Minimální napětí na mezi pevnosti by mělo být pro ocel 25CrMo4 $R_{m_{min}} = 800 \text{ MPa}$ a minimální napětí na mezi kluzu $R_{e_{min}} = 600 \text{ MPa}$. Díky tomu, že je mez pevnosti méně než 1,5krát větší a že je napětí při početním zatížení vždy 1,5krát větší než napětí při provozním zatížení, stačí provést pevnostní analýzy pro zatížení početní. [23]

10.1 Výpočet reakcí v pouzdrech podvozku

Pro 1D simulaci bylo nutné vypočítat reakce v pouzdrech podvozku, které způsobí síly působící na podvozkovou nohu. Zatížení vypočtené v minulých kapitolách bylo rozloženo do lokálního souřadnicového systému podvozkové nohy a následně byly spočítány reakce v pouzdrech podvozku. Následně byly do MKP analýzy zaneseny síly o velikosti vypočtených reakcí, ale opačného směru.

10.1.1 Výpočet reakcí od setrvačných sil

Pro jednodušší výpočet reakcí byly setrvačné síly předového podvozku působící v jeho těžišti převedeny do lokálního souřadnicového systému. Lokální souřadnicový systém je patrný z Obr. 34, na kterém jsou vyznačeny i směry reakcí. Bod A v tomto obrázku označuje spodní úchyt podvozku a bod B označuje úchyt vrchní. Reakce R_Y je na tomto obrázku vyznačena pro případy s kladnými násobky, pro záporné násobky bude tato reakce působit v bodě B. Síly a reakce na obrázku nejsou zobrazeny v měřítku.



Obr. 34 Skica pro výpočet reakcí

Následuje ukázka výpočtu pro případ § 361 a.

Síla F_Y byla spočítána dle rovnice:

$$F_Y = F_{ny} \cdot \cos(19^\circ) - F_{nx} \cdot \sin(19^\circ) \text{ [N]} \quad (9.1)$$

$$F_Y = 270,71 \cdot \cos(19^\circ) - 40,46 \cdot \sin(19^\circ) = 242,789 \text{ N} \quad (9.2)$$

Síla F_X byla spočítána dle rovnice:

$$F_X = F_{ny} \cdot \sin(19^\circ) + F_{nx} \cdot \cos(19^\circ) \text{ [N]} \quad (9.3)$$

$$F_X = 270,71 \cdot \sin(19^\circ) + 40,46 \cdot \cos(19^\circ) = 126,39 \text{ N} \quad (9.4)$$

Dále byly vytvořeny rovnice rovnováhy v osách X a Y:

$$R_{AX} + R_{BX} = F_X [N] \quad (9.5)$$

$$R_Y = F_Y [N] \quad (9.6)$$

a momentová rovnice k bodu B:

$$F_X \cdot (269 + 229) = R_{AX} \cdot 229 [N] \quad (9.7)$$

Z těchto rovnic byly vyjádřeny a vypočteny reakce v uloženích:

$$R_{AX} = \frac{F_X \cdot (269 + 229)}{229} [N] \quad (9.8)$$

$$R_{AX} = \frac{126,39 \cdot (269 + 229)}{229} = 274,86 N \quad (9.9)$$

$$R_{BX} = F_X - R_{AX} [N] \quad (9.10)$$

$$R_{BX} = 126,39 - 274,86 = -148,47 N \quad (9.11)$$

$$R_Y = 242,789 N \quad (9.12)$$

Vypočtené reakce jsou reakce, kterými působí uložení na podvozkovou nohu při početním zatížení. Reakce působící na uložení musí mít tedy oproti těmto reakcím opačný směr. Reakce od setrvačných sil pro ostatní letové případy by se počítaly obdobně a jsou shrnuty v následující tabulce s výjimkou případu § 363.

Tab. 16 Reakce, kterými uložení působí na podvozkovou nohu v letových případech

Případ	F_{nx} [N]	F_{ny} [N]	F_x [N]	F_Y [N]	R_{AX} [N]	R_{BX} [N]	R_Y [N]
§ 361 a.	40,46	270,71	126,39	242,79	274,86	- 148,47	242,79
§ 361 b.	53,94	360,93	168,51	323,7	366,45	- 197,94	323,7
A	53,94	360,93	168,51	323,7	366,45	- 197,94	323,7
C	66,03	508,46	227,97	459,26	495,76	- 267,79	459,26
D	9,56	364,8	127,81	341,81	277,94	- 150,13	341,81
E	14	-181,94	- 46	- 176,59	- 100,03	54,03	- 176,59*
F	50,52	-326,37	- 58,49	- 325,04	- 127,19	68,7	- 325,04*
G	26,03	-180,6	- 34,19	- 179,235	- 74,34	40,15	- 179,235*
P+	10,4	372,09	130,97	348,43	284,83	- 153,85	348,43
P-	14,9	- 189,18	- 47,5	-183,72	- 103,3	55,8	-183,72*
Přistání	0	399,6	130,1	377,83	377,83	- 152,82	377,83

* U těchto případů působí reakce R_Y na horní uložení podvozku

Jak už bylo dříve řečeno, tak v tabulce jsou uvedeny reakce, kterými působí uchycení na podvozkovou nohu. Síly zadávané do MKP analýzy budou mít tudíž opačné znaménko. V tabulce není uveden případ § 363, jelikož reakce působí pouze ve směru osy Z. Zatížení pro tento případ by se ovšem počítalo obdobně, a tudíž jsou v následující tabulce rovnou uvedeny výsledné hodnoty pro početní zatížení.

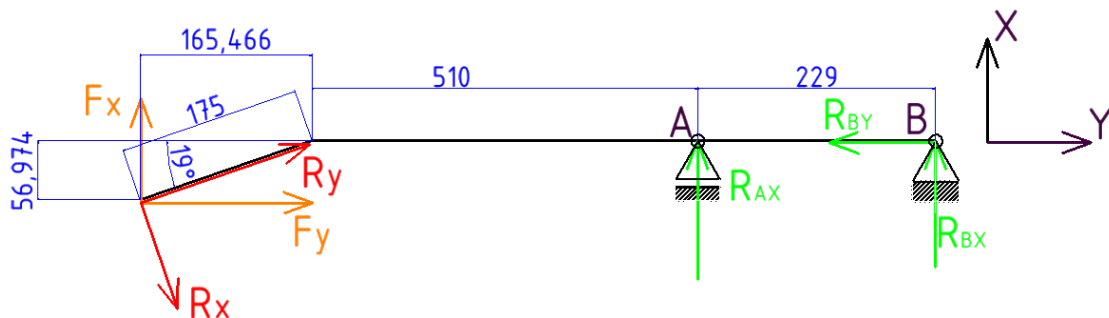
Tab. 17 Reakce, kterými pouzdra působí na podvozkovou nohu při bočním zatížení podle § 363 UL 2

Případ	F_{nz} [N]	F_z [N]	R_{AZ} [N]	R_{BZ} [N]	R_Y [N]
§ 363	±121,65	±121,65	±264,55	∓142,9	0

Znaménko \pm je u uvedených sil a reakcí uvedeno, jelikož motorové lože není symetrické a je potřeba zkusit boční zatížení v kladném i záporném směru osy Z.

10.1.2 Výpočet reakcí od zatížení při přistání

Stejně jako u zatížení setrvačnými silami byly reakce při přistání rozloženy do lokálního souřadnicového systému, přistávací reakce ale v tomto případě nepůsobí v těžišti, ale v místě dotyku kola se zemí. Značení je jinak shodné se značením v předchozí kapitole. Síly a reakce na Obr. 35 nejsou zobrazeny v měřítku.



Obr. 35 Schéma pro výpočet reakcí při přistání

Síla F_Y byla spočítána dle rovnice:

$$F_Y = R_x \cdot \sin(19^\circ) + R_y \cdot \cos(19^\circ) \text{ [N]} \quad (9.13)$$

$$F_Y = 2338,2 \cdot \sin(19^\circ) + 8053,65 \cdot \cos(19^\circ) = 8376,12 \text{ N} \quad (9.14)$$

Síla F_X byla spočítána dle rovnice:

$$F_X = -R_x \cdot \cos(19^\circ) + R_y \cdot \sin(19^\circ) \text{ [N]} \quad (9.15)$$

$$F_X = -2338,2 \cdot \cos(19^\circ) + 8053,65 \cdot \sin(19^\circ) = 411,2 \text{ N} \quad (9.16)$$

Dále byly vytvořeny rovnice rovnováhy v osách X a Y:

$$R_{AX} + R_{BX} = -F_X \text{ [N]} \quad (9.17)$$

$$R_{BY} = F_Y [N] \quad (9.18)$$

a momentová rovnice k bodu B:

$$R_{AX} \cdot 229 + F_X \cdot (229 + 510 + 165,466) - F_Y \cdot 56,974 = 0 [N] \quad (9.19)$$

Z těchto rovnic byly vyjádřeny a vypočteny reakce v pouzdech:

$$R_{AX} = \frac{F_Y \cdot 56,974 - F_X \cdot 904,466}{229} [N] \quad (9.20)$$

$$R_{AX} = \frac{8376,12 \cdot 56,974 - 411,2 \cdot 904,466}{229} = 459,84 N \quad (9.21)$$

$$R_{BX} = -F_X - R_{AX} [N] \quad (9.22)$$

$$R_{BX} = -411,2 - 459,84 = -871,04 N \quad (9.23)$$

$$R_{BY} = 8376,12 N \quad (9.24)$$

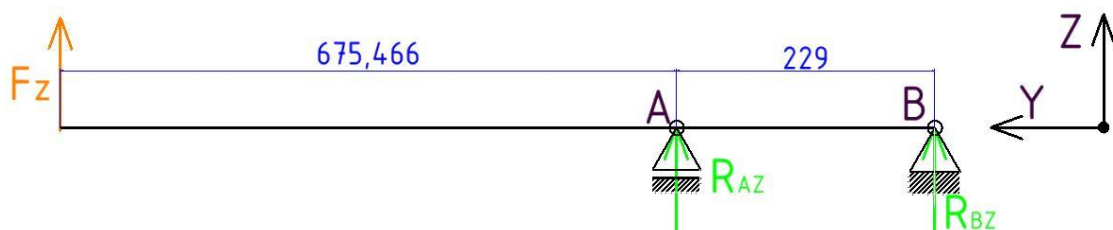
Vypočtené reakce jsou opět reakce, kterými působí pouzdra na podvozkovou nohu při početním zatížení. Reakce působící na uložení musí mít tedy oproti těmto reakcím opačný směr. Vypočtené hodnoty jsou shrnuty v Tab. 18. Kromě reakcí způsobených dotykem kola se zemí působí na podvozkovou nohu i setrvačné síly, které musíme uvažovat také. Reakce od setrvačných sil pro případ přistání jsou uvedeny v Tab. 16.

Tab. 18 Reakce, kterými pouzdra působí na podvozkovou nohu při dotyku kola se zemí

Případ	R_X [N]	R_Y [N]	F_x [N]	F_Y [N]	R_{AX} [N]	R_{BX} [N]	R_{BY} [N]
Přistání	2338,2	8053,65	411,2	8376,12	459,84	- 871,04	8376,12

10.1.3 Výpočet reakcí vznikajících při dodatečných podmínkách zatížení podvozku

Reakce vznikající při dodatečných podmínkách zatížení podvozku budou pro případy zatížení dopředu a dozadu počítány stejným způsobem jako reakce od zatížení při přistání. Při bočním zatížení bude nutné navíc vypočítat reakce ve směru osy Z. Na Obr. 36 je zobrazeno schéma podvozkové nohy v rovině YZ, síly a reakce opět nejsou zobrazeny v měřítku a síla F_z je shodná s reakcí R_z uvedené v Tab. 14.



Obr. 36 Schéma pro výpočet reakcí od pouzder podvozku ve směru osy Z

Dle schématu byla vytvořena rovnice rovnováhy a momentová rovnice k bodu B:

$$R_Z = F_Z [N] \quad (9.25)$$

$$R_{AZ} + R_{BZ} = -F_Z [N] \quad (9.26)$$

$$R_{AZ} \cdot 229 + F_Z \cdot (675,466 + 229) = 0 [N] \quad (9.27)$$

Z těchto rovnic byly vyjádřeny a vypočteny reakce v pouzdrech:

$$R_{AZ} = -\frac{F_Z \cdot (675,466 + 229)}{229} [N] \quad (9.28)$$

$$R_{AZ} = -\frac{1854,09 \cdot (675,466 + 229)}{229} = -7322,98 N \quad (9.29)$$

$$R_{BZ} = -F_Z - R_{AZ} [N] \quad (9.30)$$

$$R_{BZ} = -1854,09 + 7322,98 = 5468,09 N \quad (9.31)$$

Vypočtené reakce jsou znovu reakce, kterými pouzdra působí na podvozkovou nohu při početním zatížení, reakce působící na uložení musí mít tedy oproti těmto reakcím opačný směr. V následující tabulce jsou shrnuty výsledné reakce při všech případech zatížení při dodatečných podmínkách zatížení podvozku.

Tab. 19 Reakce, kterými pouzdra působí na podvozkovou nohu při dodatečných podmínkách zatížení podvozku

Případ	R_{AX} [N]	R_{BX} [N]	R_{BY} [N]	R_{AZ} [N]	R_{BZ} [N]
Dozadu	5301,972	- 4160,79	3194,26	0	0
Dopředu	- 6825,21	4961,12	2159,46	0	0
Boční	- 2782,82	1920,48	2504,4	∓7322,98	±5468,09

Znaménko \pm je u reakcí v ose Z uvedeno, jelikož motorové lože není symetrické a je potřeba zkoušet boční zatížení v kladném i záporném směru osy Z.

10.2 1D MKP analýza

Jak už bylo napsáno dříve, budeme pro každou variantu lože provádět lineární statickou analýzu a lineární analýzu vzpěrové stability prutů pro početní zatížení. U statické analýzy nás bude zajímat maximální napětí vzniklé v konstrukci lože pro každý z případů a u analýzy vzpěrové stability nás bude zajímat hodnota EIGV. Hodnota EIGV ukazuje, kolikrát větší může být zadané zatížení, než dojde ke ztrátě stability některého prutu. Hodnota EIGV proto musí být vždy větší než 1. Hodnoty maximálních napětí a nejmenších hodnot EIGV budou pro každou variantu zaneseny do tabulky.

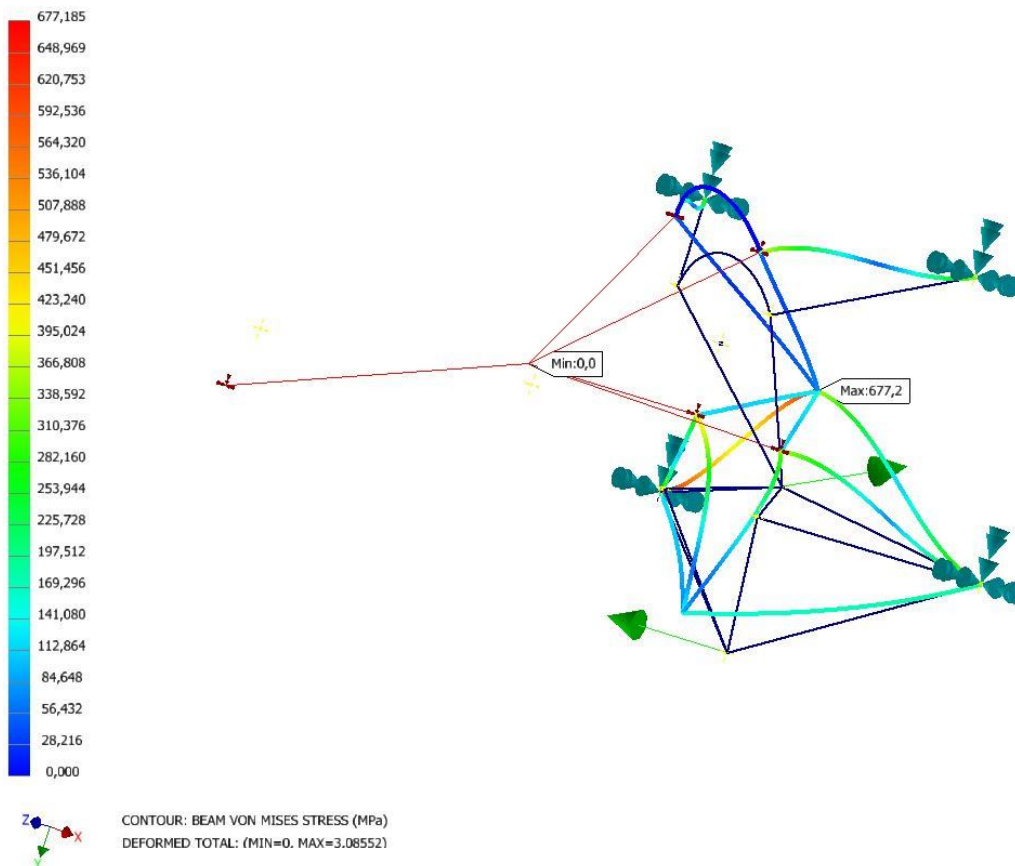
10.2.1 MKP analýza konceptu 1

Výsledky MKP analýzy konceptu 1 jsou zaneseny v následující tabulce.

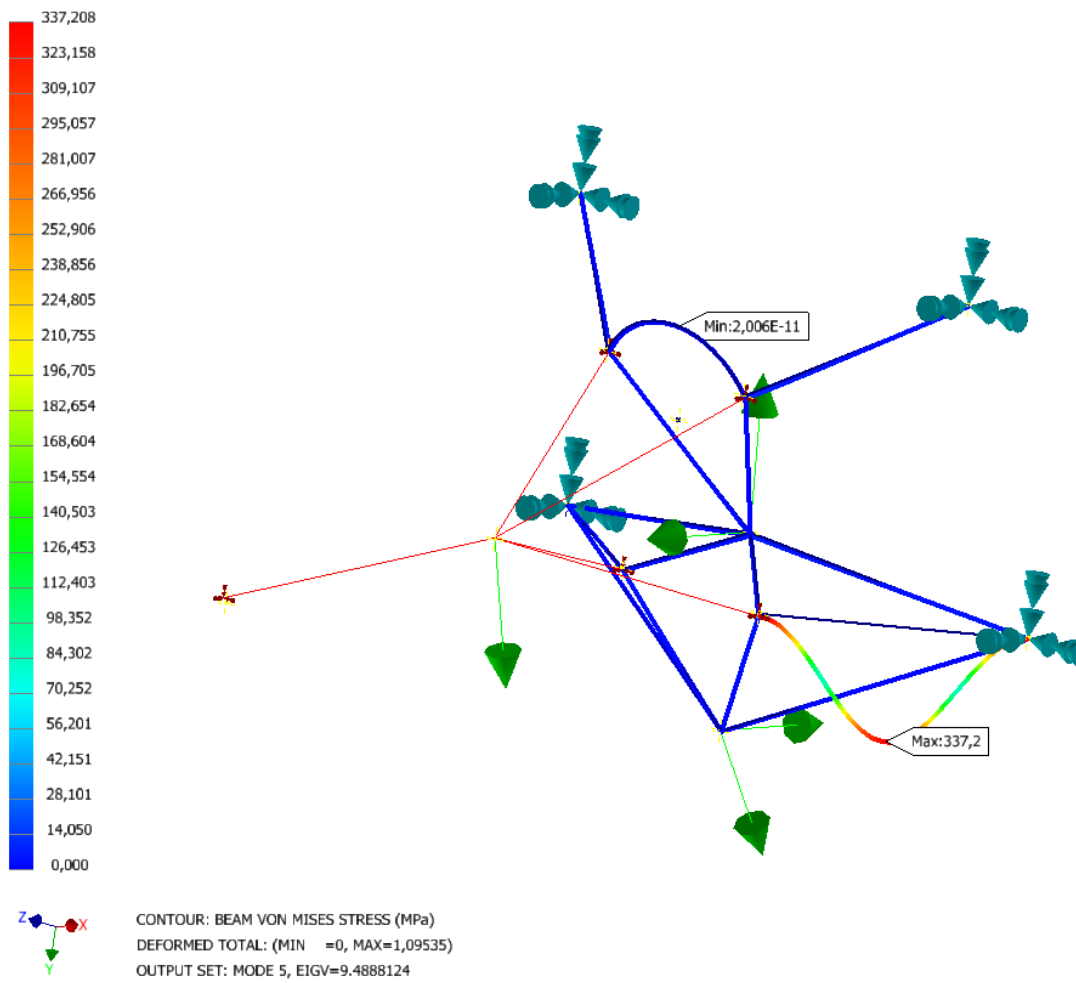
Tab. 20 Výsledky analýzy konceptu 1 při početním zatížení

Případ	Napětí Von-Mises [MPa]	EIGV [-]
§ 361 a.	192,24	18,46
§ 361 b.	229,07	14,84
§ 363 doprava	48,93	57,77
§ 363 doleva	48,93	74,39
A	228,62	14,92
C	295,16	11,26
D	232,31	14,96
E	172,65	29,14
F	260,24	19,28
G	168,74	30,74
P+	235,24	14,73
P-	177,07	28,33
Přistání	564,51	9,49
Dozadu	121,502	9,91
Dopředu	644,03	15,56
Boční doprava	654,52	16,76
Boční doleva	560,43	16,79

Z tabulky můžeme vyčíst, že maximální hodnota napětí nastane při dodatečných podmínkách zatížení podvozku při bočním zatížení na pravou stranu. Ovšem i tato hodnota je menší než mez pevnosti použitého materiálu, která je 800 MPa. Dále je z tabulky vidět, že se žádná z hodnot EIGV neblíží jedné, tím pádem ke ztrátě stability při vzpěru u žádného prutu téměř s jistotou nedojde. Na Obr. 37 je zobrazena deformovaná lože při dodatečných podmínkách zatížení podvozku směrem doprava a pruty jsou vybarveny podle vzniklého napětí. Na Obr. 38 je zobrazen průhyb prutu, u kterého by došlo ke ztrátě vzpěrové stability při případu přistání nejdříve.



Obr. 37 Napětí v loži při dodatečných podmínkách zatížení podvozku při bočním zatížení doprava konceptu 1



Obr. 38 Teoretický průběh ztráty stability prutu u případu přistání v loži konceptu 1

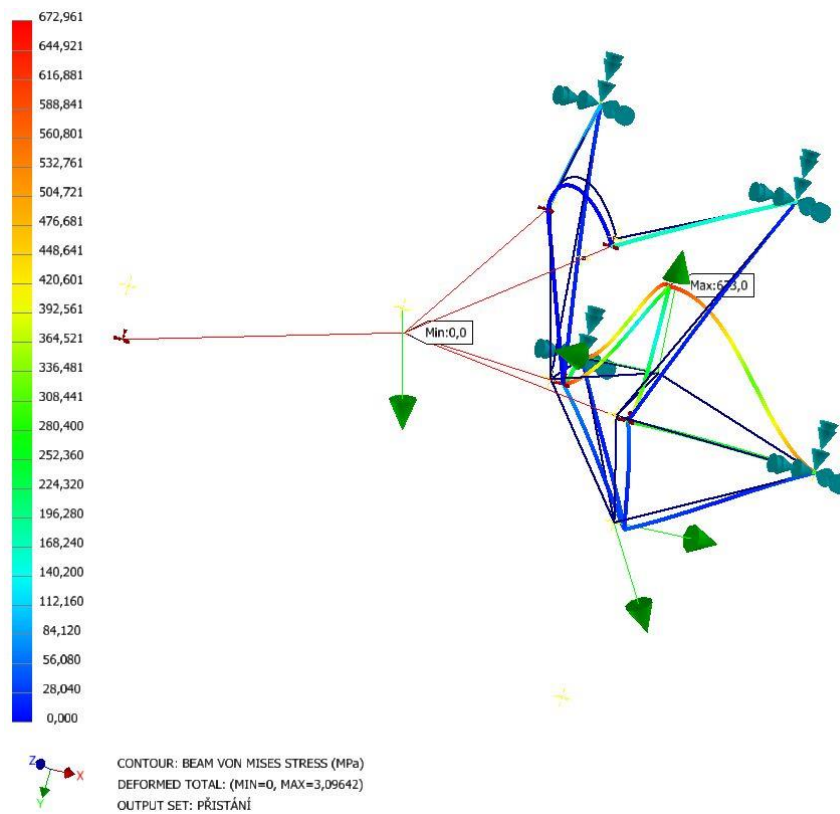
10.2.2 MKP analýza konceptu 2

Výsledky MKP analýzy konceptu 2 jsou zaneseny v následující tabulce.

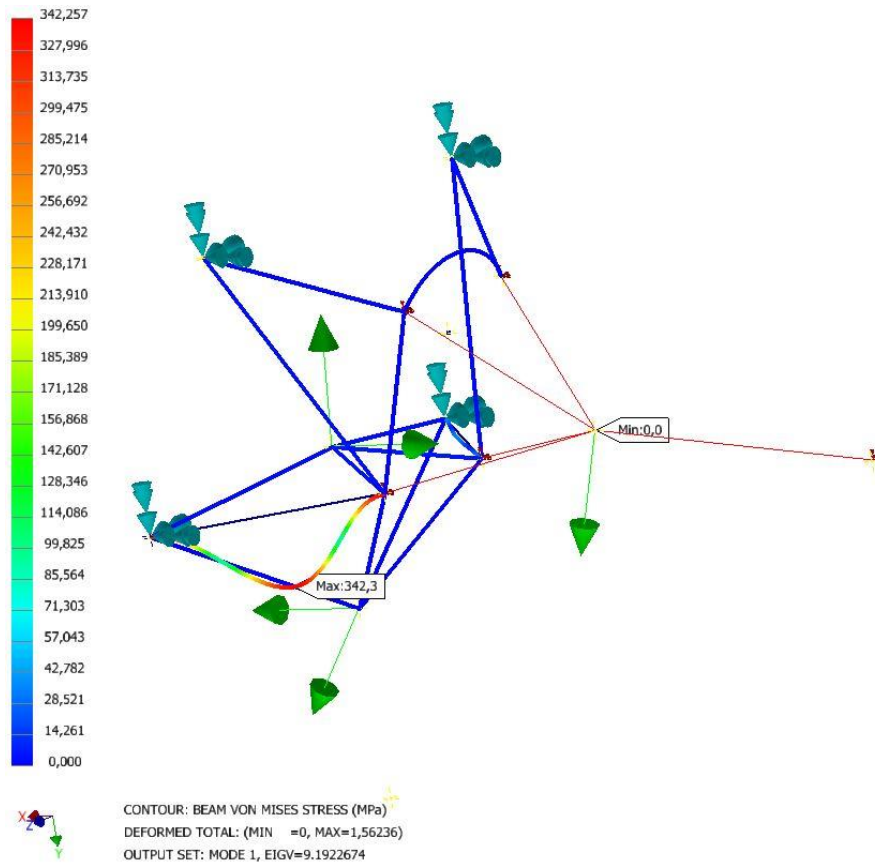
Tab. 21 Výsledky analýzy konceptu 2 při početním zatížení

Případ	Napětí Von-Mises [MPa]	EIGV [-]
§ 361 a.	162,2	21,60
§ 361 b.	172,92	16,15
§ 363 doprava	42,34	80,19
§ 363 doleva	42,34	94,26
A	174,50	16,25
C	227,98	11,45
D	164,90	16,23
E	118,56	18,94
F	164,06	15,03
G	100,92	18,48
P+	165,93	15,91
P-	121,20	18,70
Přistání	672,96	9,19
Dozadu	346,60	9,95
Dopředu	187,70	12,51
Boční doprava	192,81	16,86
Boční doleva	178,26	21,75

Z Tab. 21 můžeme vyčíst, že maximální hodnota napětí nastane při případě tvrdého přistání. V případě přistání je maximální napětí 672,96 MPa, což je menší hodnota než mez pevnosti použitého materiálu, která je 800 MPa. Dále je z tabulky vidět, že se žádná z hodnot EIGV neblíží jedné, tím pádem ke ztrátě stability při vzpěru u žádného prutu téměř s jistotou nedojde. Případně by ale byla ztráta vzpěrové stability nejpravděpodobnější opět pro případ přistání. Na Obr. 40 je zobrazena deformovaná lože při přistání a pruty jsou vybarveny podle vzniklého napětí. Na Obr. 39 je zobrazen průhyb prutu, u kterého by došlo ke ztrátě vzpěrové stability při případě přistání nejdříve.



Obr. 40 Napětí v loži při případu přistání konceptu 2



Obr. 39 Teoretický průběh ztráty stability prutu u případu přistání v loži konceptu 2

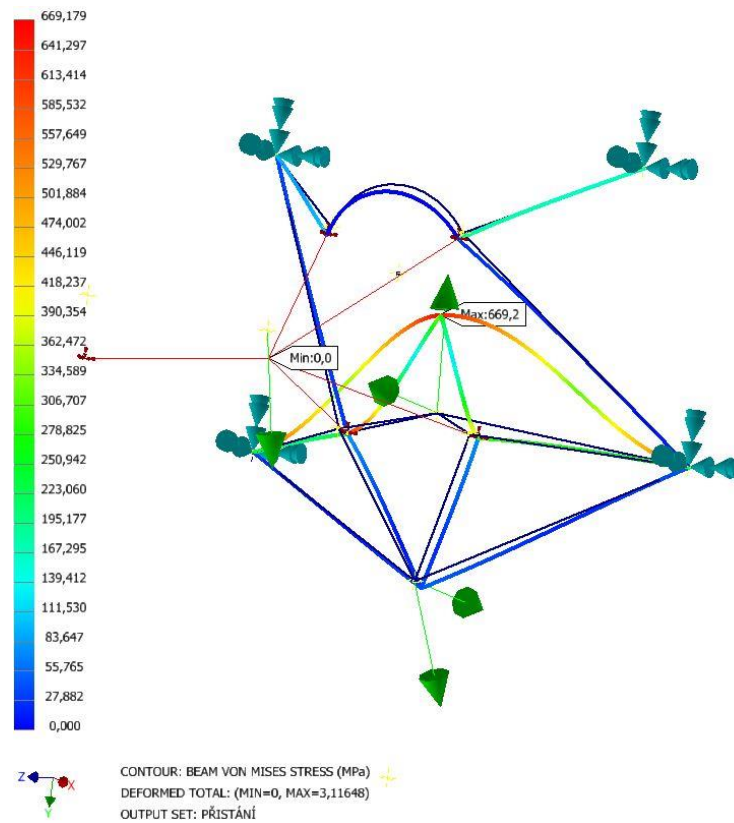
10.2.3 MKP analýza konceptu 3

Výsledky MKP analýzy konceptu 3 jsou zaneseny v následující tabulce.

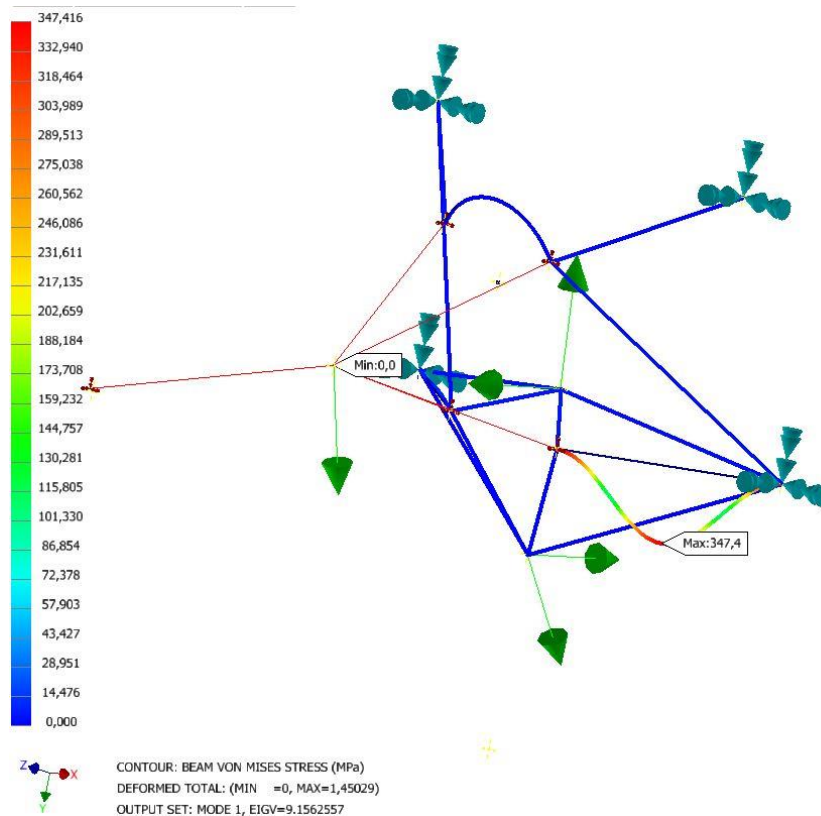
Tab. 22 Výsledky analýzy konceptu 3 při početním zatížení

Případ	Napětí Von-Mises [MPa]	EIGV [-]
§ 361 a.	156,30	22,14
§ 361 b.	183,34	16,62
§ 363 doprava	45,73	67,35
§ 363 doleva	45,73	75,63
A	184,74	16,70
C	237,27	11,83
D	177,18	16,74
E	121,07	19,71
F	170,77	15,50
G	113,54	19,40
P+	180,10	16,42
P-	123,78	19,45
Přistání	669,18	9,16
Dozadu	343,8	9,94
Dopředu	200,45	11,16
Boční doprava	192,34	15,50
Boční doleva	182,97	30,91

Z Tab. 22 je patrné, že maximální hodnota napětí nastane při případě tvrdého přistání. V případě přistání je maximální napětí 669,18 MPa, což je opět menší hodnota než mez pevnosti použitého materiálu. Dále je z tabulky patrné, že se žádná z hodnot EIGV neblíží jedné, tím pádem ke ztrátě stability při vzpěru u žádného prutu téměř s jistotou nedojde. Případně by ale byla ztráta vzpěrové stability nejpravděpodobnější pro případ přistání. Na Obr. 41 je zobrazena deformovaná lože při přistání a pruty jsou vybarveny podle vzniklého napětí. Na Obr. 42 je zobrazen průhyb prutu, u kterého by došlo ke ztrátě vzpěrové stability při případě přistání nejdříve.



Obr. 41 Napětí v loži při případu přistání konceptu 3



Obr. 42 Teoretický průběh ztráty stability prutu u případu přistání v loži konceptu 3

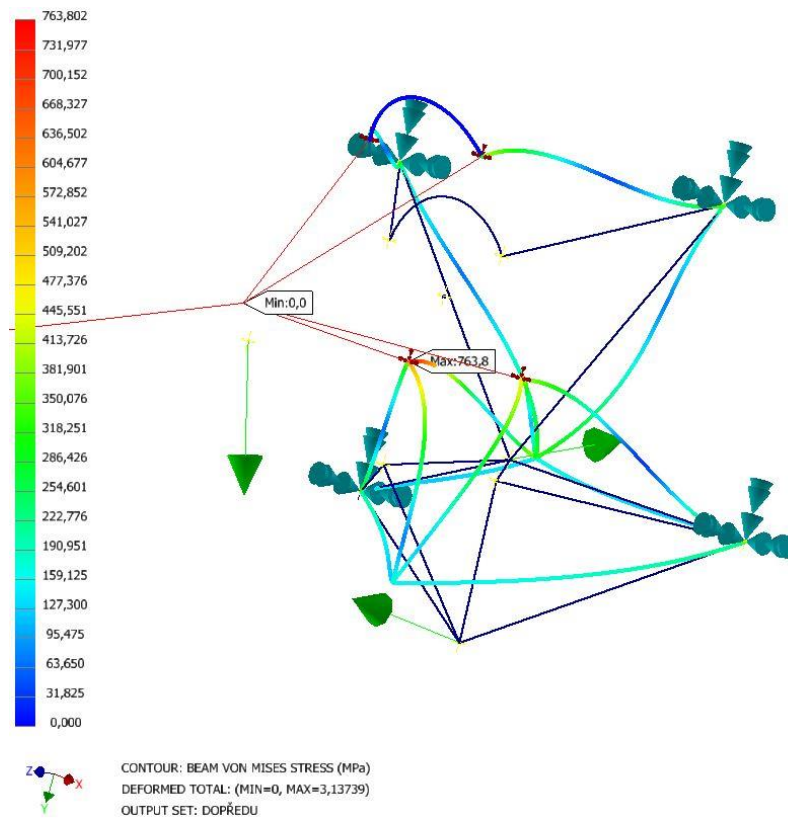
10.2.4 MKP analýza konceptu 4

Výsledky MKP analýzy konceptu 4 jsou zaneseny v následující tabulce.

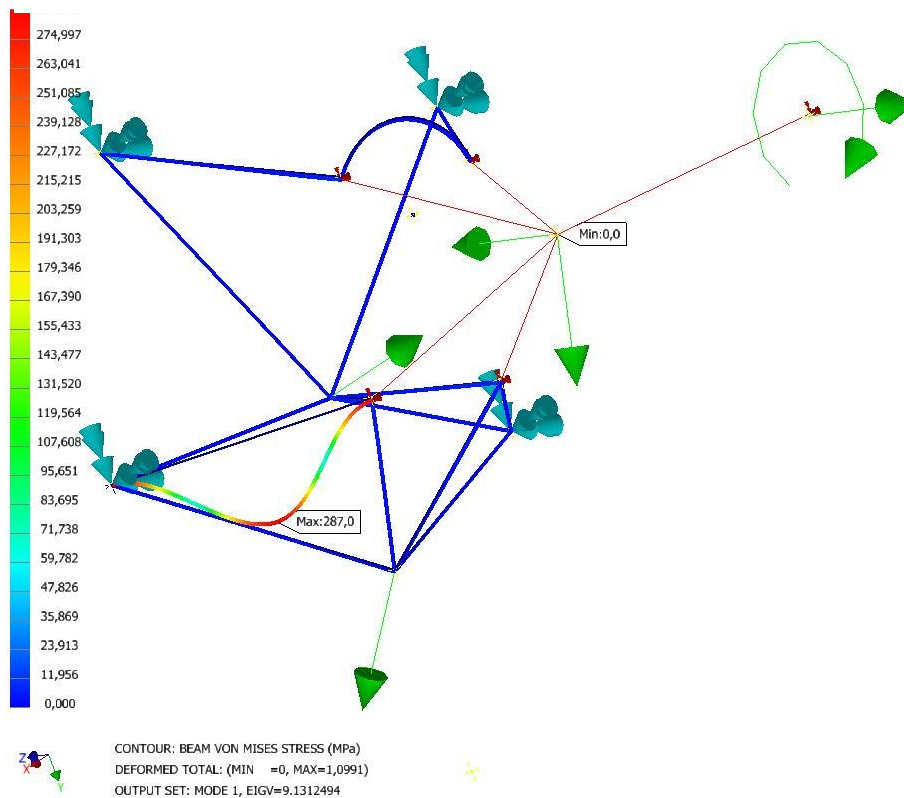
Tab. 23 Výsledky analýzy konceptu 4 při početním zatížení

Případ	Napětí Von-Mises [MPa]	EIGV [-]
§ 361 a.	227,316	16,22
§ 361 b.	282,70	12,55
§ 363 doprava	48,50	58,22
§ 363 doleva	48,49	73,18
A	281,02	12,66
C	388,74	9,13
D	290,55	12,37
E	223,90	29,47
F	349,44	20,19
G	258,56	29,08
P+	294,85	12,16
P-	229,58	29,21
Přistání	398,60	11,41
Dozadu	625,84	10,7
Dopředu	763,80	11,37
Boční doprava	324,06	13,71
Boční doleva	259,04	16,25

Z Tab. 23 je patrné, že maximální hodnota napětí nastane při dodatečných podmínkách namáhání podvozku ve směru dopředu. Tato hodnota je však stále menší než minimální hodnota meze pevnosti, takže by lože vyhovělo požadavkům předpisu UL 2. Dále je z tabulky patrné, že se žádná z hodnot EIGV neblíží jedné, tím pádem by ke ztrátě stability při vzpěru u žádného prutu téměř s jistotou nedošlo. Případně by ale byla ztráta vzpěrové stability nejpravděpodobnější pro bod obálky C. Na Obr. 43 je zobrazená deformovaná lože při dodatečných podmínkách zatížení podvozku směrem dopředu a pruty jsou vybarveny podle vzniklého napětí. Na Obr. 44 je zobrazen průhyb prutu, u kterého by došlo ke ztrátě vzpěrové stability při letovém pádu C nejdříve.



Obr. 43 Napětí v loži při případu dodatečných podmínek zatížení podvozku směrem dopředu konceptu 4



Obr. 44 Teoretický průběh ztráty stability prutu u letového případu C v loži konceptu 4

10.3 Výběr nejvhodnějšího konceptu lože

Nejvhodnější koncept lože budeme vybírat podle několika kritérií. Budeme porovnávat hmotnost lože, respektive hmotnost trubek, ze kterých by bylo lože svařeno, jelikož ostatní komponenty lože mají shodnou hmotnost pro všechny koncepty. Dále budeme porovnávat maximální napětí, které v konstrukci vzniká během některého z případů zatížení a poté průměrnou hodnotu napětí ze všech případů. Posledním kritériem bude průměrná hodnota EIGV, která nám řekne, jak jsou pruty náchylné na ztrátu vzpěrové stability. Hodnoty těchto veličin jsou uvedeny v následující tabulce.

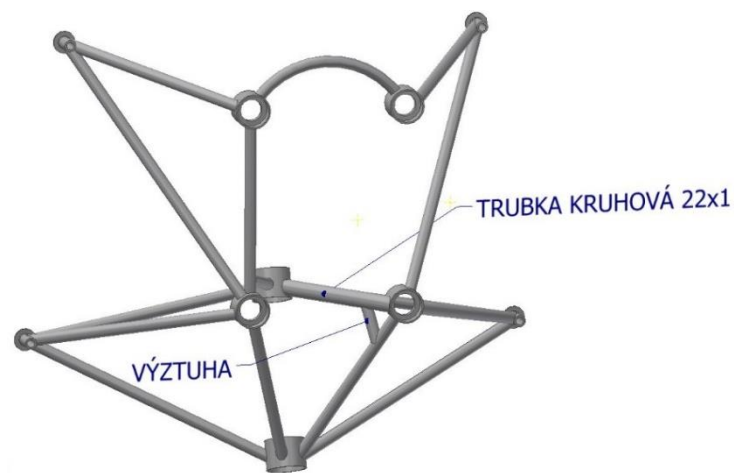
Tab. 24 Porovnání konceptů motorového lože

	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4
Hmotnost [Kg]	1,65	1,83	1,74	1,77
Maximální napětí [MPa]	654,32	672,96	669,18	763,80
Průměrné napětí [MPa]	284,36	190,36	195,78	311,47
Průměrná EIGV [-]	23,37	24,32	23,19	22,22

Z tabulky je patrné, že u konceptu 4 je napětí při případě přistání řádově o 100 MPa větší než u ostatních konceptů, a tudíž bude tento koncept z důvodu ponechání rezervy pro 3D výpočty z výběru vyřazen. U konceptu 1 je průměrné napětí výrazně vyšší než u dvou zbylých konceptů, proto od něho bylo také upuštěno. Ze dvou zbývajících konceptů byl kvůli menší hodnotě průměrného napětí, menším sklonům ke ztrátě vzpěrové stability a zanedbatelnému rozdílu hmotností vybrán koncept 2. Pro tento koncept bude vytvořen 3D model, který bude opět podroben MKP analýze.

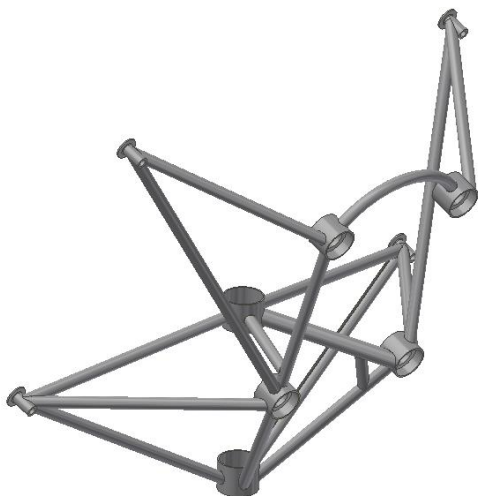
10.4 3D Model konceptu 2

Po výběru nejvhodnějšího konceptu byl vytvořen 3D model lože, který však na rozdíl od skutečnosti neobsahuje svary. Svary ovšem budou zvyšovat tloušťku materiálu a jejich zanedbání při MKP výpočtech by nemělo mít výrazný vliv. Motorové lože je tvořeno komponenty, které byly zmíněny v minulých kapitolách. Je tedy tvořeno úchyty motoru, úchyty pro uchycení k přepážce, úchyty podvozku, a samozřejmě trubkami, kterými je celá konstrukce spojená. Při tvoření 3D modelu byla kladena snaha na co největší podobnost s konceptem, ze kterého vychází. Po provedení předběžných pevnostních výpočtů však bylo nutné zesílit jednu z trubek (místo rozměru 16x1 byla použita 22x1), která spojuje uchycení podvozku s úchytem motoru a musela být přidána výztuha (viz. Obr. 45). Celková hmotnost lože při zanedbání svarů je 2,5 kg

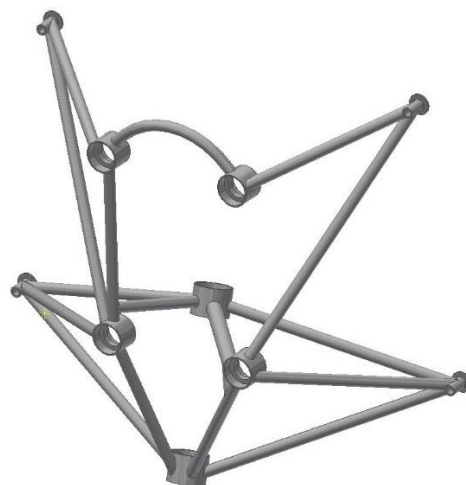


Obr. 45 3D model lože s popisky

Na dalších obrázcích je lože zobrazeno z dalších pohledů. Výkres motorového lože bude součástí příloh.



Obr. 46 3D model lože, pohled 1



Obr. 47 3D model lože, pohled 2

10.4.1 MKP analýza 3D modelu

Pro analýzu byl stejně jako u analýzy konceptů z 1D prvků použit program Autodesk Inventor Nastran a bude prováděna statická lineární analýza a lineární analýza vzpěrové stability. Lože bylo pro MKP výpočet modelováno jako jeden díl. K vysíťování modelu byly použity parabolické čtyřstěny velikosti 5 mm, které mají oproti lineárním čtyřstěnům 2,5krát více uzlů a poskytnou nám přesnější výsledek. Uchycení lože k motorové přepážce bylo simulováno definováním vetknutím v otvorech na šrouby v úchytech, kterými bude lože ve skutečnosti k přepážce uchyceno.

Místo modelu motoru byl stejně jako v 1D výpočtech použit prvek typu Rigid body, kterým jsou spojeny úchyty motoru, jeho těžiště a bod, ve kterém působí zatížení od vrtule.

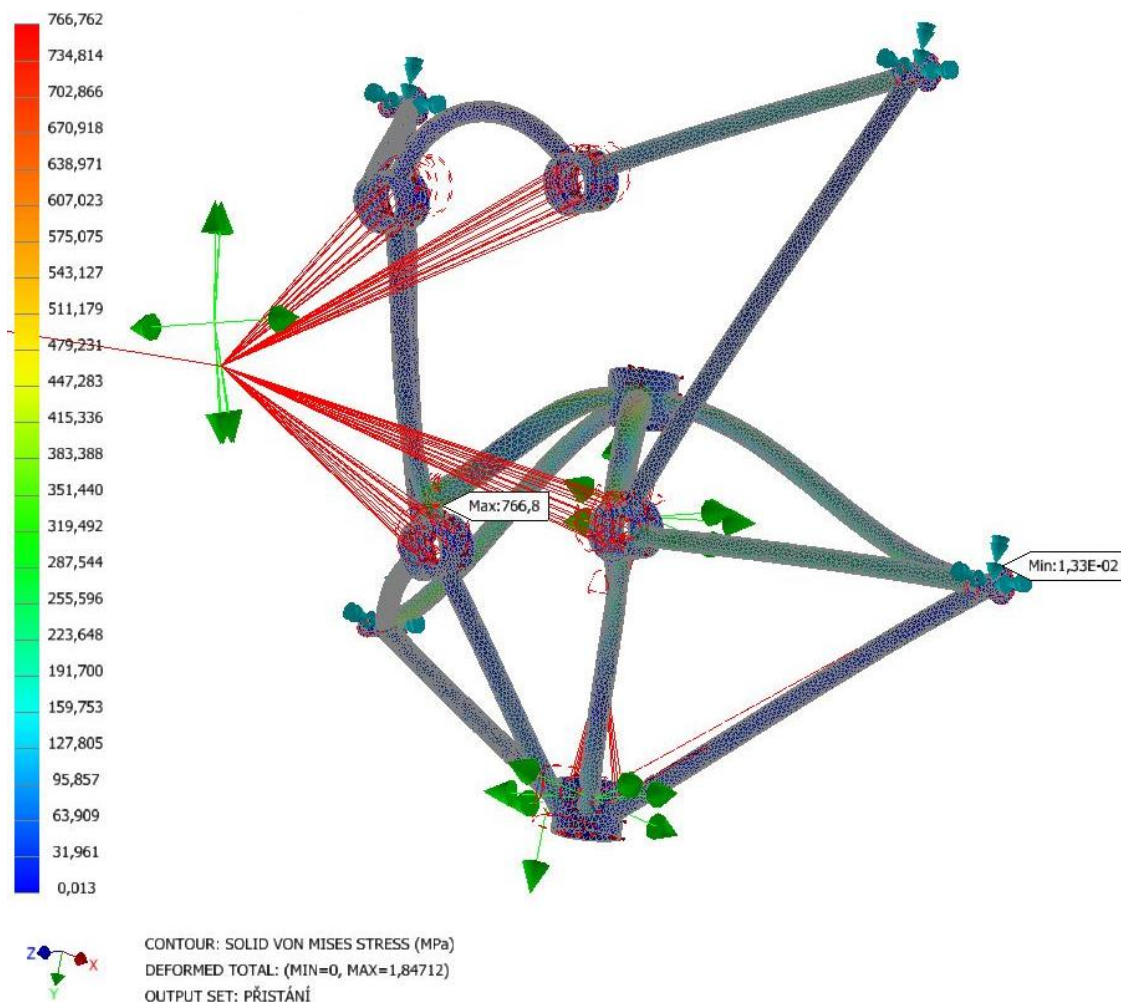
Jako materiál byla v programu opět zvolena ocel s Youngovým modulem $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ a Poissonovou konstantou $\nu = 0,3$.

Tab. 25 Výsledky MKP analýzy 3D modelu pro početní zatížení

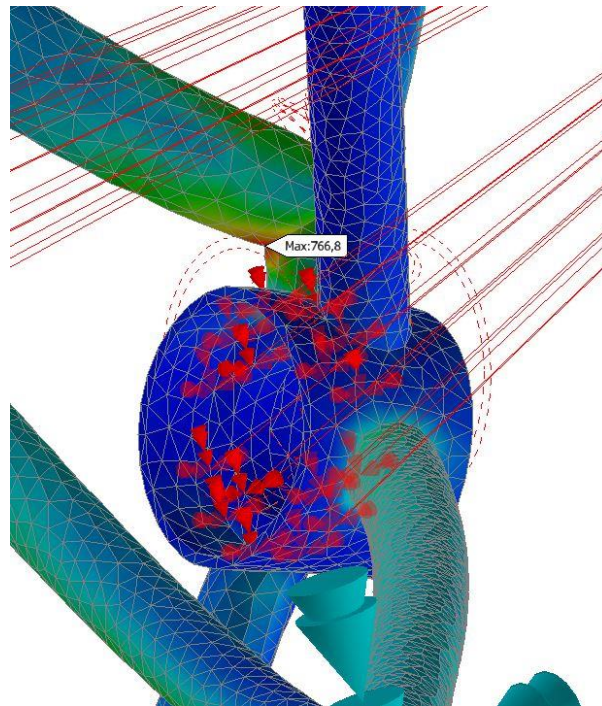
Případ	Napětí Von-Mises [MPa]	EIGV [-]
§ 361 a.	247,34	26,48
§ 361 b.	261,74	19,83
§ 363 doprava	88,01	99,55
§ 363 doleva	88,99	128,34
A	264,09	19,94
C	312,99	14,06
D	249,65	19,91
E	170,53	19,03
F	233,84	14,95
G	150,20	18,85
P+	251,06	19,53
P-	174,22	18,78
Přistání	766,76	11,66
Dozadu	342,75	16,11
Dopředu	289,58	15,03
Boční doprava	294,77	22,85
Boční doleva	218,63	11,07

Výsledky MKP výpočtů 3D modelu pro početní zatížení jsou uvedeny v Tab. 25. Z tabulky je zřejmé, že s výjimkou případu přistání lože vydrží se značnou bezpečností i nad rámec početního zatížení. U případu přistání se napětí blíží napětí na mezi pevnosti, ale toto napětí vzniká v místě, kde bude na skutečném loži přidán materiál díky svaru. Výsledek lineární statické MKP analýzy je vidět na Obr. 48 a na Obr. 49 je poté zobrazen detail místa s největším napětím. Vzpěrová bezpečnost vyšla u všech případů přes 10, což nám zaručuje, že ke ztrátě stability vzpěrem docházet nebude. Nejmenší bezpečnost vůči ztrátě vzpěrové stability vychází pro případ přistání, ale i tak by zatížení pro ztrátu stability muselo být 11,66krát větší než početní zatížení. Průběh případné ztráty stability u tohoto případu je vidět na Obr. 50.

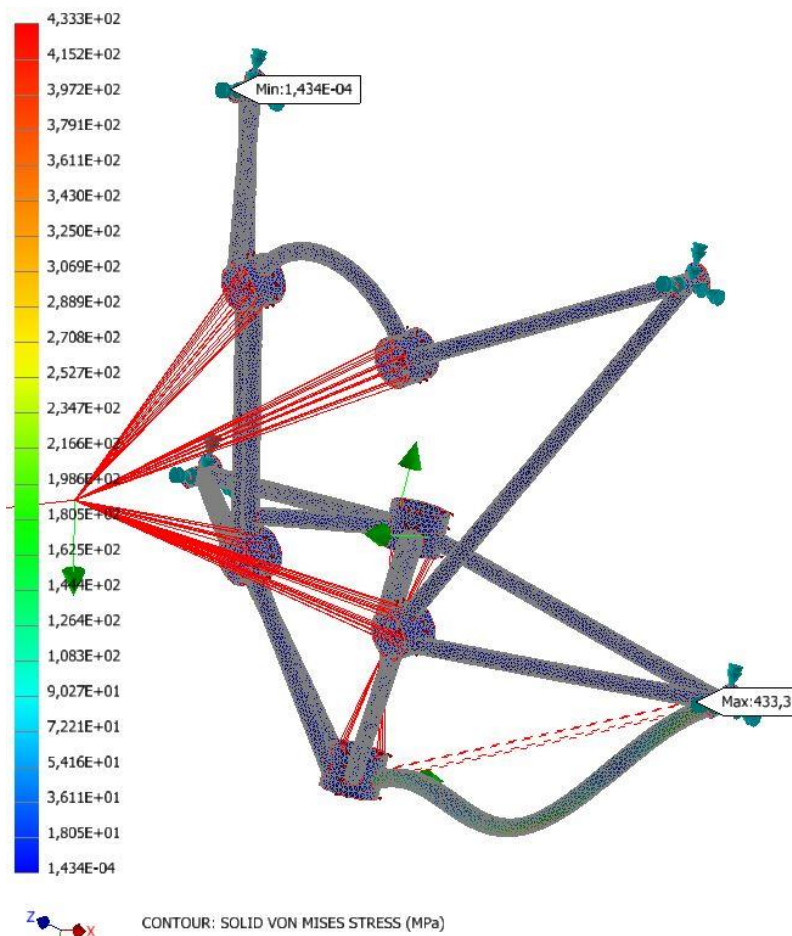
Vzhledem k výsledkům shrnutým v této kapitole můžeme konstatovat, že motorové lože by mělo bezpečně projít všemi pevnostními zkouškami, které předpis UL 2 požaduje.



Obr. 48 Napětí z MKP analýzy pro početní zatížení při případě přistání



Obr. 49 Detail místa s největším napětím při případu přistání – maximální napětí je vyznačeno bílou šipkou



Obr. 50 Teoretický průběh ztráty stability prutu u případu přistání

11 Závěr

V této práci bylo navrženo motorové lože pro zástavbu motoru Rotax 915 iS do malého sportovního letounu FM250 Vampire II od výrobce CARBON DESIGN s. r. o..

Nejprve byl proveden hmotnostní rozbor pohonného agregátu a jeho komponent a následně byl proveden výběr vrtule. Jako nejvhodnější vrtule, která splňovala požadavky výrobce letounu, byla vybrána hydraulicky stavitelná třílistá vrtule MTV-34-1-A/175-200 o průměru 175 cm.

Dále byl vybrán vhodný typ konstrukce motorového lože. Vzhledem k použití pomocného lože dodávaného s motorem byla zvolena konická konstrukce svařovaná metodou TIG z oceli 25CrMo4. Následně byly dle předpisu UL 2 – Část I. / Vydání 1. 2019 stanoveny případy a zatížení, na které je potřeba lože dimenzovat. Po stanovení těchto případů bylo přistoupeno k návrhu 4 konceptů lože, pro které byla provedena MKP studie pomocí 1D prvků.

Finální koncept byl z těchto 4 vybrán podle maximálních napětí, která v ložích vznikala, jejich hmotnosti, a jejich náchylnosti ke ztrátě vzpěrové stability. Podle zvoleného konceptu byl vymodelován 3D model, ve kterém byla oproti původnímu konceptu zesílena jedna z trubek a byla přidána výztuha. Tento 3D model byl poté podroben MKP analýze, konkrétně lineární statické analýze a analýze na ztrátu vzpěrové stability. V žádném z případů zatížení nedošlo k překročení meze pevnosti použitého materiálu, ani ke ztrátě vzpěrové stability, a motorové lože tedy vyhovělo požadavkům předpisu a může být na letounu použito. K práci bude přiložena výkresová dokumentace motorového lože. Pro dosažení stejného těžiště letounu jako s motory Rotax 912 bude nutné přidat do ocasu letounu závaží, jehož hmotnost ovšem bude potřeba přizpůsobit individuálně podle konfigurace jednotlivých kusů letounu.

Dalším postupem by byl návrh umístění všech komponent nutných pro správný chod motoru, jako jsou například chladiče či olejová soustava, a návrh aerodynamického zakrytí motoru.

12 Bibliografie

- [1] CarbonDESIGN: divize FLYING MACHINES. *CarbonDESIGN: divize FLYING MACHINES* [online]. Jaroměř: CARBON DESIGN s. r. o. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <http://www.flyingmachines.cz/cz/>
- [2] Technické údaje. *BEVAMPIRE* [online]. Jaroměř: CARBON DESIGN s. r. o. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <http://www.bevampire.cz/cz/technicke-udaje>
- [3] Galerie. *BEVAMPIRE* [online]. Jaroměř: CARBON DESIGN s. r. o. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <http://www.bevampire.cz/cz/fm250-vampire/galerie>
- [4] *Rotax* [online]. Günskirchen: BRP-Rotax GmbH & Co KG, 2021 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.rotax.com/en/>
- [5] *Rotax* [online]. Günskirchen: BRP-Rotax GmbH & Co KG [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.flyrotax.com/home.html>
- [6] ROTAX 915 IS / ISC. *Rotax* [online]. Günskirchen: BRP-Rotax GmbH & Co KG [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.flyrotax.com/produkte/detail/rotax-915-is-isc-2.html>
- [7] ROTAX 915 IS TURBO: 140 HP ENGINE. *California Power Systems: Experts in light sport aviation* [online]. Corona: California Power Systems, c1995-2021 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.cps-parts.com/catalog/rtxpages/915isrotaxengine140.php>
- [8] *Installation manual: For Rotax engine type 915 i A series* [online]. Revize 3. Günskirchen: BRP-Rotax GmbH & Co KG, 2020, 196 s. [cit. 21.02.2021]. Dostupné z: https://teveso.cz/content/m_dokumentace/2020/IM_915iA_Series_Ed0_Rev3.pdf
- [9] *Zástavba motoru Rotax 915 do UL letounu* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/86256/F2-DP-2020-Schreiber-Simon-Zavererna_diplomova_prace_SCHREIBER.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky. Vedoucí práce Ing. Helmich Martin.
- [10] KELLER, Ladislav. *Učebnice pilota 2013*. První. Cheb: Svět křídel, 2013. ISBN 978-80-87567-26-5.

- [11] PS-28 Cruiser. *Cruiser Aircraft EU* [online]. Bratislava: Cruiser Aircraft EU, 2017 [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <http://www.cruiseraircrafteu.com/en/aircraft>
- [12] Aircraft Propeller Basics. *Southern Wings* [online]. Invercargill: Southern Wings, 2015 [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.southernwings.co.nz/aircraft-propeller-basics/#:~:text=There%20are%20three%20basic%20types,propeller%2C%20it%20cannot%20be%20changed.>
- [13] Propeller for UL / LSA. *Mt-propeller* [online]. Entwicklung: MT-Propeller Entwicklung GmbH [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: https://www.mt-propeller.com/en/entw/pro_ul.htm
- [14] *Betriebs- und Einbauanweisung für hydraulische Verstellpropeller* [online]. Rev. 5. Entwicklung: MT-Propeller Entwicklung GmbH [cit. 06.03.2021]. Dostupné z: <https://www.mt-propeller.com/pdf/manuals/e-2285.pdf>
- [15] IVANOV, Roman a Lukáš HLAVATÝ. *FM250 Vampire 600 KG MTOW Výkresová dokumentace*. Jaroměř: Carbon design.
- [16] JONES, Mason. Types of Aircraft Engine Mounts. *Simplified Purchasing* [online]. Irvine: Simplified purchasing, 2021 [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://www.simplifiedpurchasing.com/blog/types-of-aircraft-engine-mounts/>
- [17] Aircraft Engine Mounts. *Experimental Aircraft Info* [online]. Experimental Aircraft Info, 2021 [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://www.experimentalaircraft.info/articles/aircraft-engine-mounts.php>
- [18] Wag-A-Bond and Piper PA-20 New Engine Mount, Lycoming Engine. *Wag-Aero* [online]. Lyons: The Wag Aero Group, 2021 [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://www.wagaero.com/engine-parts/engine-mounts/piper/new-engine-mounts-wag-a-bond-and-pa-20-s-with-lycoming-engine.html>
- [19] What Engine? Bigger Is Not Always Better. *EAA* [online]. Oshkosh: Experimental Aircraft Association, 2020 [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://www.eaa.org/aaa/aircraft-building/builderresources/while-youre-building/building-articles/engines-and-firewalls/what-engine-bigger-is-not-always-better?>
- [20] UL 2 – Část I.: Požadavky letové způsobilosti SLZ Ultralehké letouny řízené aerodynamicky. *LAA ČR* [online]. Praha: Letecká amatérská asociace ČR [cit. 2020-12-15]. Dostupné z:

http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL%202%20%C4%8D%C3%A1st%20I_26.3.2019.pdf

- [21] VANESSA AIR, S.R.O. *LOAD AERODYNAMICS CALCULATION: Flight envelope and load cases for FM250 Vampire MTOW=600kg in accordance with LTF-UL and UL 2.* 2019, 75 s.
- [22] *LOAD AERODYNAMICS CALCULATION: Undercarriage loads for FM250 Vampire MTOW=600kg in accordance with LTF-UL and UL 2.* VANESSA AIR, S.R.O., 2018, 15 s.
- [23] *Material specification sheet: Saarlstahl - 25CrMo4* [online]. Völklingen: Saarlstahl [cit. 21.02.2021]. Dostupné z: <https://www.saarlstahl.com/sag/en/general/search/index.shtml?q=25CrMo4>