ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY

Odbor letadlová a kosmická technika

Diplomová práce

Motorové lože malého sportovního letounu

Praha, 2018 **David Písek**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pisek** Jméno: **David** Osobní číslo: **420506**

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:

Motorové lože malého sportovního letounu

Název diplomové práce anglicky:

Engine Mounts for Light Sport Aircraft

Pokyny pro vypracování:

- Konstrukční návrh zástavby pohonného agregátu do trupu letounu se zaměřením na motorové lože
- Stanovení zatížení motorového lože
- Pevnostní kontrola motorového lože a jeho uložení v trupu
- Hmotový rozbor a stanovení polohy těžiště motorového lože, motoru a jeho příslušenství
- Konstrukční návrh přípravku pro statické pevnostní zkoušky motorového lože dle předpisů UL2 a CS-VLA
- Stanovení náhradního zatížení pro statické pevnostní zkoušky motorového lože dle předpisů UL2 a CS-VLA

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Sommer, 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. Tomáš Sommer podpis vedoucí(ho) práce	Ing. Robert Theiner, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30. 4. 2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze, dne ……
……

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomáši Sommerovi za vedení, pomoc a podporu při řešení problémů s realizací této práce.

Dále děkuji rodičům za podporu a trpělivost, kterou se mnou měli při tvorbě této diplomové práce.

Obsah

1. Úvod 1
2. Cíle práce 1
3. Technický popis letounu 2
4. Specifikace motoru 3
5. Požadavky na motorové lože 7
6. Předpisy 8
   6.1. CS-VLA [1] 8
      6.1.1. HLAVA A: CS-VLA 1 Platnost 8
      6.1.2. HLAVA A: CS-VLA 3 Kategorie letounů 8
      6.1.3. HLAVA C: CS-VLA 337 Maximální provozní násobky zatížení při obratech 8
      6.1.4. HLAVA C: CS-VLA 361 Kroutící moment od motoru 8
   6.2. CS-VLA 363 Boční zatížení motorového lože 9
   6.3. CS-VLA 561 Podmínky nouzového přistání 9
   6.4. UL2 [2] 11
      6.4.1. A.1. Účel 11
      6.4.2. A.2. Použití 11
      6.4.3. C.III.3. Provozní násobky obratů 11
      6.4.4. C.III.6. Zatížení motorového lože 12
      6.4.5. C.III.7. Boční zatížení motorového lože 12
      6.4.6. C.X.1. Podmínky nouzového přistání, všeobecně 12
   6.5. LFT-UL [3] 14
      6.5.1. A. LTF–UL 1 Použitelnost 14
      6.5.2. C.III. LTF-UL 337 Provozní násobky obratů 14
      6.5.3. C.III. LTF-UL 361 Zatížení motorového lože 15
      6.5.4. C.III. LTF-UL 363 Boční zatížení motorového lože 15
      6.5.5. C.X. LTF-UL 561 Podmínky nouzového přistání, všeobecně 16
7. Konstrukční typy loží 17
   7.1. Příhradové lože 17
   7.2. Nosníkové lože 18
   7.3. Nosníko-příhradové lože 19
8. Konstrukční návrh lože 20
9. Letový režim a hmotnostní konfigurace 25
10. Zatížení 26
   10.1. Stanovení zatížení 26
      10.1.1. Varianta 1: 26
      10.1.2. Varianta 2: 27
      10.1.3. Varianta 3: 28
      10.1.4. Varianta 4: 29

10.1.5. Varianta 5: ... 30
10.1.6. Varianta 6: ... 31
10.1.7. Nouzové přistání: ... 31
10.2. Zatížení od motoru ... 32
10.3. Zatížení lože a síly do závěsů ... 38
10.4. Zatížení předního a zadního závěsu ... 47
10.5. Kontrola stavitelných ok ... 51
10.6. Kontrola otlačení závitů ... 54
10.7. Kontrola čepů ... 57
10.7.1. Kontrola na ohyb: ... 57
10.7.2. Kontrola na střih: ... 58
10.7.3. Otlačení stykových ploch v místě opření o závěs ... 58
10.8. Kontrola ok závěsů ... 66
10.8.1. Kontrola na tah ... 66
10.8.1. Kontrola na tlak ... 67
10.9. Kontrola svarů u závěsů ... 72
11. Zkušební přípravek a náhradní zatížení ... 78
12. Závěr ... 87
13. Literatura ... 88

Seznam obrázků

Obr. 1 Model letoun UL-39 Albi 2
Obr. 2 Model motoru včetně silentbloků 3
Obr. 3 Vzduchový filtr K&N RU-3103HBK [10] 4
Obr. 4 Intercooler 19x6x2.5 [11] 4
Obr. 5 Zástavba vzduchového filtru a intercooleru 4
Obr. 6 Výkonová charakteristika motoru Rotax 260HP [4] 6
Obr. 7 Svařované příhradové lože [5] 17
Obr. 8 Nosníkové lože [5] 18
Obr. 9 Nosníko-příhradové lože [5] 19
Obr. 10 Návrh motorového lože 20
Obr. 11 Jednotlivé svařence lože 20
Obr. 12 Šroubové spojení dvou dílů lože 21
Obr. 13 Konstrukšní řešení v okolí výfuku 21
Obr. 14 Levá zadní styčná plocha 22
Obr. 15 Spojení lože se závěsem pomocí stavitelného oka 22
Obr. 16 Zadní závěs 23
Obr. 17 Přední závěs 23
Obr. 18 Kompletní návrh lože 24
Obr. 19 Obecná letová obálka [1] 26
Obr. 20 Prutový model motoru 32
Obr. 21 FEM model motoru 33
Obr. 22 SIM model varianty 1 v bodě A letové obálky 33
Obr. 23 Výsledná deformace varianty 1 v bodě A letové obálky 34
Obr. 24 FEM model lože 38
Obr. 25 Nahrazení spoje oko-lože 39
Obr. 26 SIM model lože 39
Obr. 27 Amplitudy reakcí, včetně číslování pozic 40
Obr. 28 Rozložení napětí v loži 44
Obr. 29 FEM model pravého předního závěsu 47
Obr. 30 SIM model pravého předního závěsu 48
Obr. 31 Rozložení napětí v pravém předním závěsu 48
Obr. 32 Stavitelné oko SA 8 C [13] 51
Obr. 33 Schématický obrázek uložení čepu, včetně rozměrů pro výpočet 57
Obr. 34 Schématický obrázek oka, včetně rozměrů pro výpočet 66
Obr. 35 Schématické zobrazení závěsu, včetně rozměrů a rozležení sil 72
Obr. 36 Zkušební přípravek 78
Obr. 37 Prutový model zkušebního standu 79
Obr. 38 Nahrezení reakčního momentu 79
Obr. 39 Vznik přídavného momentu 80
Obr. 40 SIM model pro kontrolu náhradního zatížení 82
Obr. 41 Deformace při náhradním zatížení v bodě A letové obálky 82

Seznam tabulek

Tab. 1 Parametry motoru [9] 3
Tab. 2 Hmotnostní rozbor agregátu s příslušenstvím 5
Tab. 3 Celková hmotnost a poloha těžiště agregátu 5
Tab. 4 Výkon a otáčky motoru Rotax 260HP 6
Tab. 5 Specifikace materiálu 14 331.7 24
Tab. 6 Hmotnostní konfigurace 25
Tab. 7 Násobky v bodech letové obálky 25
Tab. 8 75% provozního zatížení 26
Tab. 9 Provozní zatížení 27
Tab. 10 Provozní zatížení 28
Tab. 11 75% početního zatížení 29
Tab. 12 Početní zatížení 30
Tab. 13 Početní zatížení 31
Tab. 14 Tuhosti silentbloků 32
Tab. 15 Reakce od motoru varianta 1 a 4 35
Tab. 16 Reakce od motoru varianta 2 a 5 36
Tab. 17 Reakce od motoru varianta 3 a 6 37
Tab. 18 Reakce od motoru při nouzovém přistání 37
Tab. 19 Síly do závěsů varianty 1 a 4 41
Tab. 20 Síly do závěsů varianty 2 a 5 42
Tab. 21 Síly do závěsů varianty 3 a 6 43
Tab. 22 Síldy do závěsů od nouzového přistání 44
Tab. 23 Napětí v loži při variantách 1 a 4 45
Tab. 24 Napětí v loži při variantách 2 a 5 45
Tab. 25 Napětí v loži při variantách 3 a 6 45
Tab. 26 Napětí v předním závěsu při variantách 1 a 4 49
Tab. 27 Napětí v předním závěsu při variantách 2 a 5 49
Tab. 28 Napětí v předním závěsu při variantách 3 a 6 49
Tab. 29 Napětí v zadním závěsu při variantách 1 a 4 50
Tab. 30 Napětí v zadním závěsu při variantách 2 a 5 50
Tab. 31 Napětí v zadním závěsu při variantách 3 a 6 50
Tab. 32 Základní parametry oka SA 8 C 51
Tab. 33 Kontrola stavitelných ok při nouzovém přistání 52
Tab. 34 Kontrola stavitelných ok při zatížení variantami 4, 5 a 6 53
Tab. 35 Kontrola závitu M8 při zatížení variantami 4, 5 a 6 55
Tab. 36 Kontrola závitu M8 při nouzovém přistání 56
Tab. 37 Kontrola čepů při zatížení variantou 1 59
Tab. 38 Kontrola čepů při zatížení variantou 2 60
Tab. 39 Kontrola čepů při zatížení variantou 3 61
Tab. 40 Kontrola čepů při zatížení variantou 4 62
Tab. 41 Kontrola čepů při zatížení variantou 5 63
Tab. 42 Kontrola čepů při zatížení variantou 6 64

Tab. 43 Kontrola čepů při nouzovém přistání 65
Tab. 44 Kontrola ok závěsů při zatížení variantou 4 68
Tab. 45 Kontrola ok závěsů při zatížení variantou 5 69
Tab. 46 Kontrola ok závěsů při zatížení variantou 6 70
Tab. 47 Kontrola ok závěsů při nouzovém přistání 71
Tab. 48 Kontrola svarů závěsů při zatížení variantou 4 74
Tab. 49 Kontrola svarů závěsů při zatížení variantou 5 75
Tab. 50 Kontrola svarů závěsů při zatížení variantou 6 76
Tab. 51 Kontrola svarů závěsů při nouzovém přistání 77
Tab. 52 Reakce od náhradního zatížení varianty 1 83
Tab. 53 Reakce od náhradního zatížení varianty 4 83
Tab. 54 Reakce od náhradního zatížení varianty 2 84
Tab. 55 Reakce od náhradního zatížení varianty 3 85

Seznam příloh

Hmotnostní rozbor lože

Deformace silentbloků

Výkresová dokumentace

Seznam použitých programů

Microsoft Word

Microsoft Excel

Siemens NX 11

Seznam použitých symbolů

α	$[°]$	úhel náběhu
β	$[-]$	součinitel tloušťky koutového svaru
a	$[mm]$	jmenovitá tloušťka svaru
c	$[\%b_{sat}]$	poloha centráže
d, D	$[mm]$	průměr
F	$[N]$	obecná síla
g	$[m/s^2]$	tíhové zrychlení
j	$[-]$	jistota
k	$[-]$	koeficient bezpečnosti
k_x, k_y, k_z	$[N/mm]$	tuhost
l	$[mm]$	délka
m	$[kg]$	hmotnost
M_k	$[Nm]$	kroutící moment
M_o	$[Nmm]$	ohybový moment
n	$[-]$	násobek tíhového zrychlení
n_{trv}	$[ot/s]$	otáčky motoru při maximálním trvalém výkonu
n_{vzl}	$[ot/s]$	otáčky motoru při maximálním vzletovém výkonu
p	$[MPa]$	tlak
P	$[mm]$	rozteč závitu
P_{trv}	$[kW]$	maximální trvalý výkon
P_{vzl}	$[kW]$	maximální vzletový výkon
ρ	$[kg/m^3]$	hustota materiálu
R	$[N]$	obecná silová reakce
R_e	$[MPa]$	napětí na mezi kluzu materiálu
R_m	$[MPa]$	napětí na mezi pevnosti materiálu
σ	$[MPa]$	obecné napětí
S	$[mm^2]$	plocha
τ	$[MPa]$	obecné smykové napětí
t	$[mm]$	jmenovitá šířka svaru
v	$[m/s], [km/h]$	rychlost letu
W_o	$[mm^3]$	průřezový modul v ohybu
X, Y, Z	$[mm]$	souřadnice těžiště

Anotační list

Jméno autora:	**David Písek**
Název diplomové práce:	**Motorové lože malého sportovního letounu**
Anglický název:	**Engine mounts for light sport aircraft**
Akademický rok:	2017/2018
Obor studia:	Letadlová a kosmická technika
Ústav/odbor:	Ústav letadlové technicky
Vedoucí diplomové práce:	**Ing. Tomáš Sommer**
Bibliografické údaje:	Počet stran: 89 Počet obrázků: 41 Počet tabulek: 55
Klíčová slova:	**Malý sportovní letoun, motor, motorové lože, NX 11, metoda konečných prvků, pevnostní analýza, náhradní zatížení**
Keywords:	**Light sport aircraft, engine, engine mounts, NX 11, finite element method, strength analysis, equivalent load**
Anotace:	**Diplomová práce se zabývá návrhem a pevnostní kontrolou motorového lože. Analýza pevnosti je provedena metodou konečných prvků v programu NX 11. Dále je navržen zkušební přípravek a určeno náhradní zatížení pro certifikační zkoušky dle předpisů.**
Abstract:	**The thesis deals with the design and strength analysis of engine mounts. The analysis of the strength is done by the finite element method in the NX 11 program. Test fixture is designed, and equivalent load is calculated for certification tests according to the regulations.**

1. Úvod

Motorové lože je nedílnou součástí každého motorem poháněného letounu. Jeho hlavním úkolem je přenos tahu vyvozeného motorovou jednotkou na trup letounu. Samotný návrh konstrukce je komplikovaný, neboť musí vycházet nejen z konstrukce motoru a jeho úchytných bodů, ale zároveň z konstrukce draku a jeho konstrukčních možností k přenosu velkých sil.

Na úvod bude představeno letadlo a pohonná jednotka, pro které bude lože navrhováno, a základní požadavky a předpisy nutné pro splnění certifikace. V další části jsou uvedena konstrukční řešení, postupy výpočtů a jejich výsledky.

Pro vytvoření 3D modelů a pro řešení výpočtů metodou konečných prvků bude použit program NX 11, patřící mezi špičkové softwary ve strojírenském průmyslu.

2. Cíle práce

Hlavním cílem této diplomové práce je návrh konstrukčního uchycení pohonné jednotky do ultralehkého letounu UL-39 Albi a jeho dimenzování dle předpisů CS-VLA, UL2 a LFT-UL. Pohonnou jednotku představuje motor 260 HP ROTAX 4 E-TEC (Rotax 4-TEC 1503 XHO), který je vyjmut z vodního skútru.

Stanovení dílčích úkolů:

- Konstrukční návrh zástavby pohonného agregátu do trupu letounu se zaměřením na motorové lože.
- Stanovení zatížení motorového lože.
- Pevnostní kontrola motorového lože a jeho uložení do trupu.
- Hmotnostní rozbor a stanovení polohy těžiště motorového lože, motoru a jeho příslušenství.
- Konstrukční návrh přípravku pro statické pevnostní zkoušky motorového lože dle požadavků UL2 a CS-VLA.
- Stanovení náhradního zatížení pro statické pevnostní zkoušky motorového lože dle předpisů UL2 a CS-VLA.

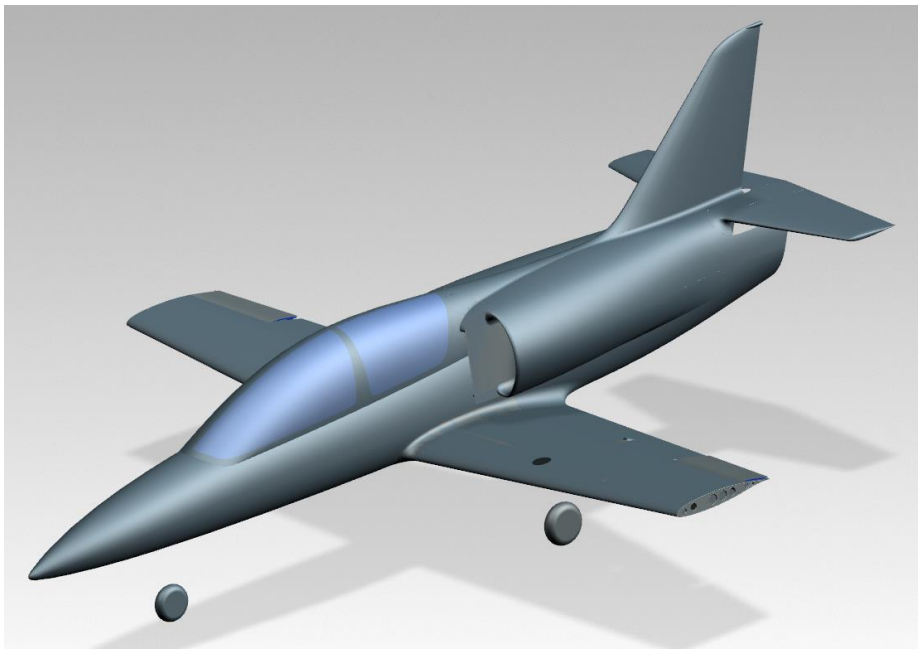
3. Technický popis letounu

Letoun UL-39 Albi byl vyvinut Ústavem letadlové techniky ČVUT v Praze. Je navržený dle stavebního předpisu UL-2 a zároveň splňuje požadavky předpisu CS-VLA. Jde o koncept dolnoplošníku s klasickým uspořádáním ocasních ploch. Jako dvoumístný ultralehký letoun je určen pro sportovní létání a výcvik pilotů. Výjimečností UL-39 Albi je dmychadlový propulzní systém, který je atypický pro tuto kategorii letounů.

Letoun má celokompozitní trup. Tato skořepinová konstrukce je tvořena sendvičem z uhlíkového nebo hybridního (uhlík-aramid) kompozitu a pěny na bázi polyuretanu. Skořepina je dále doplněna nosnými přepážkami a výztuhami.

Na přední přepážce je umístěn radom a řiditelné příďové kolo. Za přepážkou se nachází kabina s tandemovým uspořádáním sedadel a bočními panely. Palubní desky jsou součástí překrytu kabiny, který je vyroben z organického skla. Kabina je ukončena za sedadlem druhého pilota protipožární přepážkou, která ji odděluje od motorového prostoru. V tomto prostoru je uložena pohonná jednotka mezi vstupními kanály pro přívod vzduchu ke dmychadlu. Celý prostor je zesílen přepážkou. Zadní část trupu tvoří integrální konstrukce s kýlovou plochou a vodorovným stabilizátorem. Její součástí je výstupní kanál s obtokem, který je zakončen tryskou.

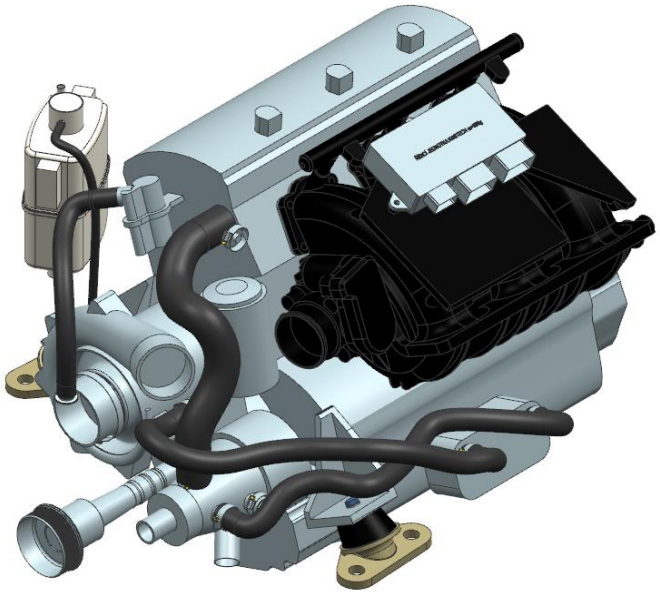
Podvozek je typu obrácený tricykl s řízeným nebrzděným příďovým kolem a brzděnými hlavními koly. Příďový podvozek se zatahuje do podvozkové šachty ve směru letu pomocí hydraulické soustavy. Hlavní podvozek je uchycen k nosníkům křídla a zatahuje se ve směru k rovině symetrie letounu.



Obr. 1 Model letoun UL-39 Albi

4. Specifikace motoru

Motor 260 HP ROTAX 4 E-TEC (Rotax 4-TEC 1503 XHO) je řadový čtyřtaktní tříválec o objemu 1493,8 cm^3, který je primárně určen pro vodní skútry. Vzhledem k dobrému poměru hmotnosti a výkonu při nižších otáčkách, je možné ho použít i pro některé letecké aplikace. Na druhou stranu jeho konstrukční řešení není pro letectví běžné.



Obr. 2 Model motoru včetně silentbloků

Specifikace motoru:

Objem [cm^3]	1493.8
Počet taktů	4
Počet válců	3
Uspořádání válců	řadové
Počet ventilů	12
Vrtání [mm]	100
Zdvih [mm]	63.4
Kompresní poměr	8,4:1
Typ chlazení	kapalinové uzavřené
Elektrická soustava	12V, 360W

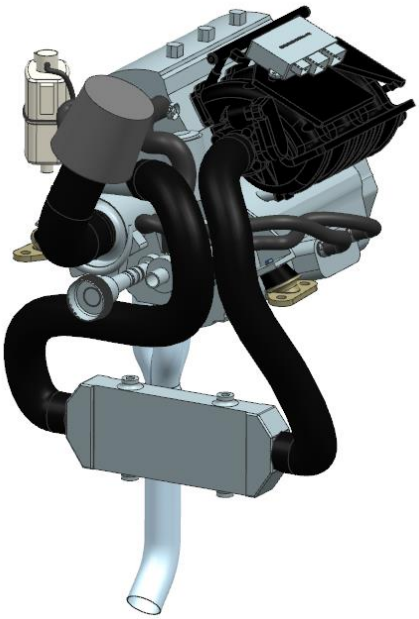
Tab. 1 Parametry motoru [9]

Aplikace v letectví vyžadovala modifikaci sání motoru. Vzduchový filtr Obr. 3 je připojen ke kompresoru přes silikonové koleno, které umožní svým vhodným natočením umístit filtr v prostoru za motorem. Stlačený vzduch z kompresoru je pak veden hadicí do intercooleru, kde je na rozdíl od vodního skútru chlazen okolním vzduchem. Samotný intercooler je umístěn v prostoru pod zadní částí motoru, který je dostatečný jak pro chladič, tak i pro hadice vedoucí stlačený vzduch.

Jak vzduchový filtr, tak chladič byly vybráni s ohledem na výkonnostní parametry motoru s důrazem na úsporu hmotnosti a jejich minimální rozměry. Zároveň hadice, vedoucí stlačený vzduch z kompresoru do chladiče a ven, jsou vedeny nejkratší možnou cestou pro minimalizaci hmotnosti. Konečné rozmístění příslušenství okolo motoru je znázorněno na obrázku Obr. 5.

Obr. 3 Vzduchový filtr K&N RU-3103HBK [10]

Obr. 4 Intercooler 19x6x2.5 [11]



Obr. 5 Zástavba vzduchového filtru a intercooleru

Umístění motoru s příslušenstvím určuje rozložení hmotnosti, které je potřeba pro výpočet zatížení lože. Ve výčtu příslušenství není uvažován intercooler, který je přimontován k podlaze a nezatěžuje tedy samotné lože. Dále je redukována hmotnost hadic z důvodu opření se o intercooler a chladící kapaliny, která jde mimo motor do chladiče. Výsledný hmotnostní rozbor včetně polohy těžiště jednotlivých komponent je uveden v tabulce níže.

Díl	**m [kg]**	**X [mm]**	**Y [mm]**	**Z [mm]**
Motor	79.900	4793.6	2.9	1693.7
Řídící jednotka Ignitech	0.693	4767	124	1945
Držák řídící jednotky	0.219	4762	175	1892
Kabeláž	0.480	4793.6	2.9	1693.7
Přední silentblok	0.397	4484.6	-45	1601.2
Boční silentbloky 2ks	0.582	4996.8	6.6	1599.2
Výstupní hřídel a Unašeč	1.753	5166.8	0	1600
Expanzní nádoba	0.314	4991.5	-235.9	1850.6
Výfuk				
Těsnící planžeta	0.072	4748.2	-153.2	1781
Svody	1.936	4723.3	-195.7	1612.1
3v1	1.318	4657.2	-196.3	1131.5
Spojovací materiál	0.092	4748.1	-156.8	1778.4
Vzduchový filtr	0.500	5263.2	35.3	1915.5
Koleno vzd. filtru	0.194	5219.3	-52.6	1727
Olej	3.680	4793.6	2.9	1693.7
Chladící kapalina 50%	2.851	4935.6	40.8	1693.7
Hadice chladiče 40%	0.939	5065.6	74.6	1538.8

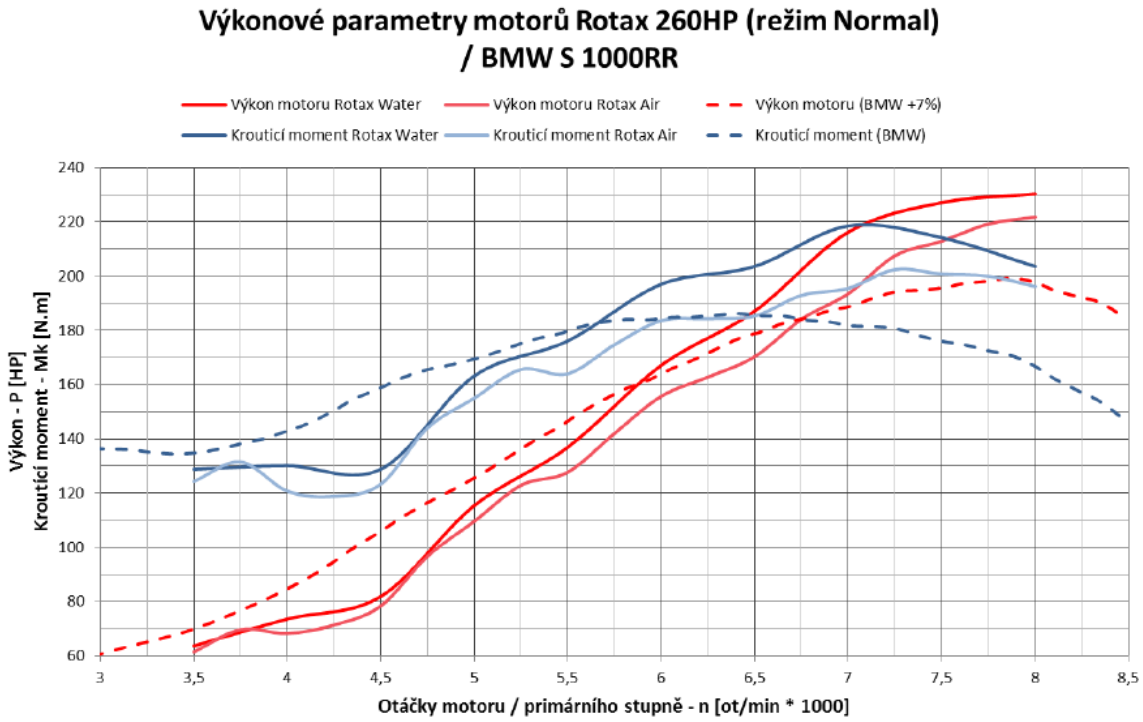
Tab. 2 Hmotnostní rozbor agregátu s příslušenstvím

Z tabulky lze dopočítat celkovou hmotnost motoru s příslušenstvím a polohu těžiště.

	m [kg]	**X [mm]**	**Y [mm]**	**Z [mm]**
Suma	95.920	4807.6	-1.98	1681.9

Tab. 3 Celková hmotnost a poloha těžiště agregátu

Jak už bylo uvedeno motor není primárně určen pro aplikace v letectví, nebylo proto možné sehnat potřebné parametry agregátu. Přesné výkonové charakteristiky byly stanoveny zkouškou, jejíž postup a popis je uveden ve zprávě Výkonové charakteristiky pohonného agregátu [4]. Výsledkem byla závislost výkonu a kroutícího momentu na otáčkách motoru viz níže.



Obr. 6 Výkonová charakteristika motoru Rotax 260HP [4]

Z grafu byly odečteny hodnoty maximálního vzletového výkonu s příslušnými otáčkami, dále pak maximální trvalý výkon, který byl předpokládán v 75% z rozsahu otáček, opět s příslušnými otáčkami. Tyto hodnoty jsou následně využity pro výpočty zatížení, viz. kapitola o stanovení zatížení.

	$P\ [HP]$	$P\ [kW]$	$n\ [ot/min]$	$n\ [ot/s]$
Max. vzletový výkon	221	162,545	8000	133.33
Max. trvalý výkon	155	114,002	6000	100

Tab. 4 Výkon a otáčky motoru Rotax 260HP

5. Požadavky na motorové lože

Při návrhu upevnění motoru je dobré dbát na obecnou filozofii návrhu motorového lože, která zahrnuje několik základních pravidel. Jejich zohledněním lze dosáhnout usnadnění jak samotné montáže lože a motoru na letadlo, tak i zjednodušení pozdější údržby motoru a přídavných agregátů.

Obecná pravidla pro návrh:

- Kompaktní umístění ústrojí a volný přístup k nim při montáži, provozu a opravě letounu.
- Co nejmenší hmotnost, při dostatečné pevnosti (statické i dynamické) a tuhosti.
- Jednoduché spoje, které zajišťují snadnou a rychlou výměnu motoru a jednotlivých částí zařízení.
- Pružné připojení motoru k loži nebo lože k letounu, pohlcující vibrace (v samé hnací jednotce).

To jsou však jen obecné požadavky, specifické požadavky a nároky na konstrukci motorového lože konkrétního letounu najdeme v předpisech, podle kterých bude letoun certifikován. V případě letounu UL-39 Albi jde o předpisy:

1) CS-VLA, Certifikační specifikace EASA pro velmi lehké letouny.
2) UL 2, Požadavky letové způsobilosti sportovních leteckých zařízení a ultralehkých letounů řízených aerodynamicky.
3) LFT-UL, Stavební předpisy pro aerodynamicky řízené ultralehké letouny.

6. Předpisy

Pro návrh motorového lože stačí vycházet jen z určitých pasáží daného předpisu, zabývajícího se požadavky na motorové lože. Aby bylo možné letadlo certifikovat dle zmíněných předpisů, musí splňovat vždy nejvyšší nárok v daném ohledu, proto je níže uveden výtah z jednotlivých předpisů CS-VLA, UL 2 a LFT-UL.

6.1. CS-VLA [1]

6.1.1. HLAVA A: CS-VLA 1 Platnost

Tento předpis letové způsobilosti platí pro letouny s jedním motorem (zážehovým nebo vznětovým) mající ne více než dvě sedadla, s maximální certifikovanou vzletovou hmotností ne více než 750 kg a pádovou rychlostí v přistávací konfiguraci ne vyšší než 83 km/h (45 uzlů) (CAS), které jsou schváleny pouze pro denní VFR lety (Viz AMC VLA 1).

6.1.2. HLAVA A: CS-VLA 3 Kategorie letounů

Tyto CS-VLA platí pro letouny určené pouze pro neakrobatický provoz. Neakrobatický provoz zahrnuje:

(a) Všechny obraty možné při normálním letu;

(b) Pády (s výjimkou ostrých pádů); a

(c) Horizontální osmy, svíčky a ostré zatáčky s úhlem náklonu ne vyšším než 60º.

6.1.3. HLAVA C: CS-VLA 337 Maximální provozní násobky zatížení při obratech

(a) Kladný maximální provozní násobek zatížení při obratech nesmí být menší než 3,8.

(b) Záporný maximální provozní násobek zatížení při obratech nesmí být menší než -1,5.

6.1.4. HLAVA C: CS-VLA 361 Kroutící moment od motoru

(a) Motorové lože a jeho nosná konstrukce musí být navrženy pro tyto účinky –

(1) Maximálního provozního kroutícího momentu motoru, odpovídajícího startovnímu výkonu a příslušným otáčkám vrtule, působícího současně se 75 % provozního zatížení v bodě A letové obálky CS-VLA 333(d).

(2) Maximálního provozního kroutícího momentu motoru specifikovaného v CS-VLA 361(b), působícího současně s provozním zatížením v bodě A letové obálky CS-VLA 333(d); a

(b) Maximální provozní krouticí moment uvažovaný v pododstavci (a)(2) tohoto odstavce musí být získán násobením průměrného kroutícího momentu pro maximální trvalý výkon koeficientem určeným následovně:

(1) Pro čtyřdobé motory –

(i) 1,33 u motorů s pěti nebo více válci,

(ii) 2, 3, 4 nebo 8 u motorů se čtyřmi, třemi, dvěma nebo jedním válcem.

(2) Pro dvoudobé motory:

(i) 2 u motorů se třemi nebo více válci,

(ii) 3 nebo 6 u motorů s dvěma nebo jedním válcem.

6.2. CS-VLA 363 Boční zatížení motorového lože

(a) Motorové lože a jeho nosná konstrukce musí být navrženy pro mezní násobek zatížení v bočním směru, pro boční zatížení motorového lože ne menší než 1,33.

(b) Boční zatížení předepsané v pododstavci (a) tohoto odstavce může být považováno za nezávislé na ostatních letových podmínkách.

6.3. CS-VLA 561 Podmínky nouzového přistání

(a) Letoun, i když může být při nouzovém přistání poškozen, musí být navržen podle požadavků tohoto odstavce tak, aby každá osoba na palubě letounu byla chráněna podle těchto podmínek.

(b) Konstrukce letounu musí být navržena tak, aby poskytovala každé osobě na palubě možnost přiměřené ochrany před vážným zraněním při méně vážném havarijním přistání za následujících podmínek

(1) Jsou správně použity bezpečnostní pásy nebo bezpečnostní postroje; a

(2) Osoby na palubě letounu jsou vystaveny působen mezních setrvačných sil uvedených dále:

Součinitel mezního setrvačného zatížení	
Nahoru	3,0g
Dopředu	9,0g
Do stran	1,5g

(c) Každá hmota, která by mohla poranit osobu na palubě v případě utržení, musí být navržena pro zatížení uvedenými součiniteli, kromě motorového lože a jeho nosné konstrukce, které musí odolat dopřednímu zrychlení 15 g pro motor umístěný za a/nebo nad kabinou posádky.

(1) Konstrukce musí být navržena tak, aby osoby na palubě byly chráněny i při úplném převrácení. V případě, že není k dispozici racionálnější rozbor, se předpokládá: Mezní setrvačná síla o velikosti 3,0 g působící směrem nahoru; a

(2) Součinitel tření na zemi je 0,5.

(d) Každý letoun se zatahovacím podvozkem musí být navržen tak, aby každá osoba na palubě byla chráněna při přistání –

(1) Se zasunutým podvozkem;

(2) Při menší klesací rychlosti; a

(3) V případě, že není racionálnější rozbor, se předpokládá:

(i) Mezní setrvačná síla o velikosti 3,0 g působící směrem dolů; a

(ii) Součinitel tření na zemi je 0,5.

6.4. UL2 [2]

6.4.1. A.1. Účel

Tento stavební předpis stanovuje minimální požadavky letové způsobilosti pro ultralehké letouny řízené aerodynamicky, které je potřeba splnit, aby použití UL-letounu pro stanovený účel bylo bezproblémové a nebyla ohrožena bezpečnost letového provozu stejně jako bezpečnost třetích osob.

6.4.2. A.2. Použití

Tyto požadavky letové způsobilosti mohou být použity pro aerodynamicky řízené ultralehké letouny

1) Jejichž vzletová hmotnost nepřevyšuje 450kg u dvoumístných
2) Jejichž vzletová hmotnost nepřevyšuje 300kg u jednomístných
3) Jejichž minimální rychlost V_{so} podle kapitoly B, oddíl II, bod 2. a) není vyšší než 65km/hod.

UL letounům se povoluje pouze neakrobatický provoz, který zahrnuje:

- Jakýkoliv obrat potřebný pro normální létání
- Nácvik pádů
- Ostré zatáčky s náklonem do 60°

6.4.3. C.III.3. Provozní násobky obratů

Provozní násobky obratů podle obálky obratů musí mít nejméně tyto hodnoty:

n1	+ 4.0
n2	+ 4.0
n3	- 1.5
n4	-2.0

Negativní provozní násobky obratů pro UL-letouny s netuhými nosnými plochami, které mají pouze omezenou schopnost udržet za letu negativní zrychlení, musí být konzultovány s odpovědným úřadem.

Deformace netuhých nosných ploch může vést k výrazným změnám použití obálky obratů, a popřípadě není bod A dosažitelný pod rychlostí V_D. Pokud jsou prokázány takové případy, může být snížen provozní násobek na nejvyšší dosažitelný násobek pod rychlostí V_D .

6.4.4. C.III.6. Zatížení motorového lože

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" viz. ustanovení kapitoly C, oddíl III, bod 1.
   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" viz. ustanovení kapitoly C, oddíl III, bod 1.

b) Pro konvenční pístové motory s přímým ("tvrdým") 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 podle následující tabulky:

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

6.4.5. C.III.7. Boční zatížení motorového lože

Motorové lože a konstrukce, na níž je zavěšeno, musí být navrženy na provozní obratový násobek zatížení v bočním směru ne menším než jedna třetina provozního násobku obratu pro případ "A" obálky obratů tj. 1/3 n1 dle C.III.3.

6.4.6. C.X.1. Podmínky nouzového přistání, všeobecně

a) Ačkoliv může být letoun při nouzovém přistání poškozen, musí být navržen tak, že každá osoba na palubě musí být chráněna před účinky sil uvedených v následujícím odstavci.

b) Konstrukce musí být navržena tak, že každá osoba na palubě musí mít v případě správného použití pásů dobrou šanci uniknout vážnému zranění v případě nouzového přistání, a to při následujících podmínkách:

1) Osoba na palubě je vystavena následujícím početním setrvačným silám, které způsobují uvedená zrychlení, nezávisle na sobě:

Nahoru	4,5g
Dopředu	9,0g
Do strany	3,0g
Dolů	4,5g

c) Palivové nádrže a jejich uchycení musí bez poškození vydržet zatížení setrvačnými silami uvedenými v odstavci b) 1).

6.5. LFT-UL [3]

6.5.1. A. LTF–UL 1 Použitelnost

Tyto normy letové způsobilosti jsou určeny pro aerodynamicky řízené UL-letouny,

1) Jejichž vzletová hmotnost –
    a. pro jednomístný stroj není větší než 300 kg, včetně záchranného systému
    b. pro dvoumístný stroj není větší než 450 kg, včetně záchranného systému

Upozornění: *Pro záchranný systém, včetně všech nutných upevňovacích a vypouštěcích prvků, může být při návrhu celkově použito maximálně 22.5 kg.*

2) Jejichž minimální rychlost V_{SO} podle Kapitoly B, Oddíl II., LTF-UL 49 není vyšší než 65 km/h.

6.5.2. C.III. LTF-UL 337 Provozní násobky obratů

Provozní násobky obratů podle obálky obratů (viz obr. 1) musí mít nejméně tyto hodnoty:

n1	+ 4.0
n2	+ 4.0
n3	- 1.5
n4	- 2.0

Negativní provozní násobky obratů pro UL-letouny s netuhými nosnými plochami, které mají pouze omezenou schopnost udržet za letu negativní zrychlení, musí být konzultovány s odpovědným úřadem.

Deformace netuhých nosných ploch může vést k výrazným změnám použití obálky obratů, a popřípadě není bod A dosažitelný pod rychlostí V_D. Pokud jsou prokázány takové případy, může být snížen provozní násobek na nejvyšší dosažitelný násobek pod rychlostí V_D .

6.5.3. C.III. LTF-UL 361 Zatížení motorového lože

1) Motorové lože a jeho uchycení musí být dimenzováno na následující případy zatížení:
   a. provozní zatížení kroutícím momentem od vrtule, které odpovídá vzletovému výkonu a příslušným otáčkám vrtule při současném působení 75% provozního zatížení z případu A podle Kapitoly C, Oddíl III, bod LTF-UL 333,
   b. provozní zatížení kroutícím momentem od vrtule, které odpovídá maximálnímu trvalému výkonu a příslušným otáčkám vrtule při současném působení provozního zatížení z případu A podle Kapitoly C, Oddíl III, bod LTF-UL 333,
   c. pokud má vrtule vlastní vrtulové ložisko, může být v odstavci a. a b. jako provozní zatížení kroutícím momentem od vrtule použito provozní zatížení kroutícím momentem od motoru.

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

	Dvoutaktní motor	Čtyřtaktní motor
1 Válec	6	8
2 Válce	3	4
3 Válce	2.5	3
4 Válce	1.5	2
5 a více	1.33	1.33

Poznámka:

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

6.5.4. C.III. LTF-UL 363 Boční zatížení motorového lože

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

6.5.5. C.X. LTF-UL 561 Podmínky nouzového přistání, všeobecně

1) Ačkoliv může být letoun při nouzovém přistání poškozen, musí být navržen tak, že každá osoba na palubě musí být chráněna před účinky sil uvedených v následujícím odstavci.
2) Konstrukce musí být navržena tak, že každá osoba na palubě musí mít v případě správného použití pásů dobrou šanci uniknout vážnému zranění v případě nouzového přistání, a to při následujících podmínkách:
    a. Osoba na palubě je vystavena následujícím početním setrvačným silám, které působí nezávisle na sobě:

nahoru	4,5 g
dopředu	9,0 g
do strany	3,0 g
dolů	4,5 g

3) Palivové nádrže musí bez poškození vydržet zatížení setrvačnými silami uvedenými v odstavci 2. a.

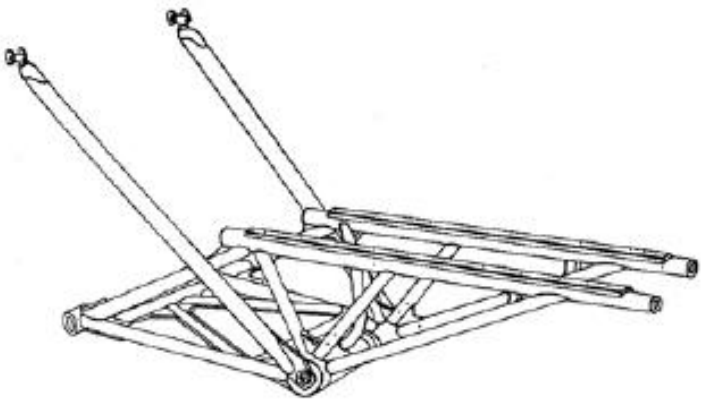
7. Konstrukční typy loží

Pokud jsou dány požadavky na motorové lože, lze se zaměřit na samotnou konstrukci. V literatuře se převážně vyskytují tři filozofie, jak přistoupit k řešení této problematiky. Obecně se dá mluvit o příhradovém, nosníkovém nebo nosníko-příhradovém loži, jednotlivé typy jsou popsány níže.

7.1. Příhradové lože

Tento typ motorového lože je řešen pomocí prostorové konstrukce tvořené převážně z trubek kruhového průřezu. V závislosti na umístění upevňovacích bodů motoru lze k řešení konstrukce lože přistoupit různými způsoby.

Jednou z možností je svařovaná příhradová konstrukce, u které je potřeba brát ohled na větší konstrukční složitost vedoucí k náročnější výrobě. Komplikace jsou spojeny především se svarovými spoji, na které jsou kladeny vysoké požadavky z hlediska kvality. Na rozdíl od nosníkového lože je potřeba větší počet jednotlivých komponent, tedy prutů, z důvodu dosažení potřebné tuhosti konstrukce, což vede k nárůstu zastavěného objemu. Na druhou stranu umožňuje optimalizaci rozložení hmotnosti. V důsledku většího zastavěného prostoru může dojít k problému s připevněním pomocných agregátů. Nespornou výhodou je však jeho variabilita a optimalizace, což znamená především tvarové přizpůsobení potřebám daného motoru a určenému prostoru, např. pokud jsou uchycovací body motoru nepříliš vhodně umístěny kolem samotného bloku motoru jako v případě motoru Rotax 260HP.

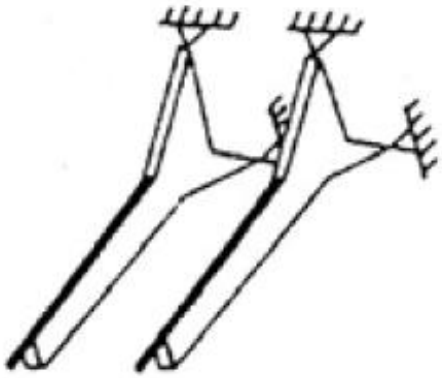


Obr. 7 Svařované příhradové lože [5]

Vzhledem k neoptimální konstrukci daného motoru se nabízí druhé řešení. Z každého upevňovacího bodu motoru vést několik příhrad přímo k trupu letadla. Výhodou tohoto uspořádání by bylo lepší přenesení zatížení na letadlo, tedy rozložení sil do více bodů na konstrukci. Menší síly v jednotlivých prutech umožní menší spoje s drakem letadla. Problém však spočívá v ustálení motoru v draku. S ohledem na možné problémy pří montáži nebyl tento koncept uvažován.

7.2. Nosníkové lože

Nosníkové motorové lože se skládá ze dvou oddělených nosníků, tzv. levého a pravého. Oba jsou uchyceny pouze ve dvou místech, což vyžaduje robustnější spoje, které jsou schopny přenést zatížení od motoru. Pokud není skříň motoru počítána na boční zatížení dojde ke zkroucení a proto je nutné použít příčné výztuhy. Vhledem k malému množství komponent a jejich relativní jednoduchosti je celková montáž snazší.

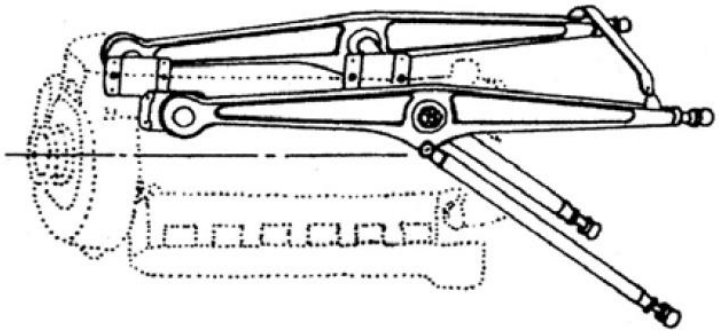


Obr. 8 Nosníkové lože [5]

Nosníkům kovaným v zápustce lze optimalizovat jejich vlastnosti a hmotnost správným navržením tvaru a umístěním odlehčovacích otvorů. Dalším typem nosníků jsou tzv. nosníky skříňového průřezu. Každý nosník se skládá ze stojiny, horních a dolních profilů a bočních příložek, které nosník místně zesilují.

7.3. Nosníko-příhradové lože

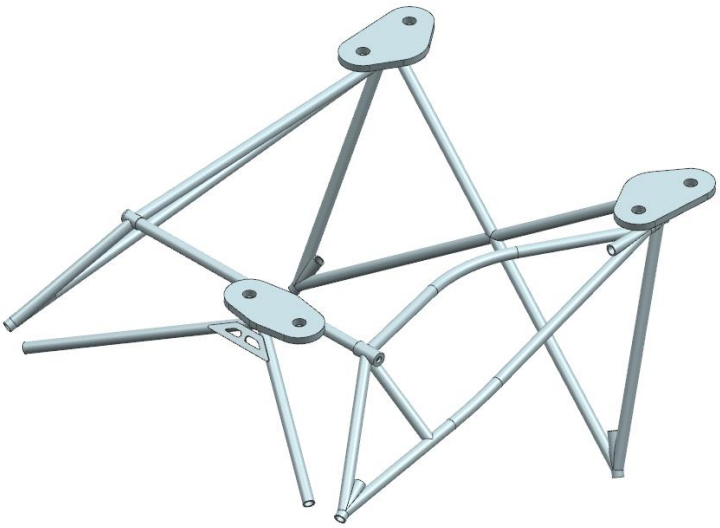
Nosníko-příhradové lože je ve své podstatě dost podobné nosníkovému loži. Rozdíl v konstrukci je dán dvěma výztuhami podepírající dva nosníky s převislým koncem. Oproti nosníkovému loži je komplikovanější na montáž. Velkou výhodou tohoto řešení mohou být stavitelné podpory, jimiž lze v případě potřeby nastavit úhel motoru.



Obr. 9 Nosníko-příhradové lože [5]

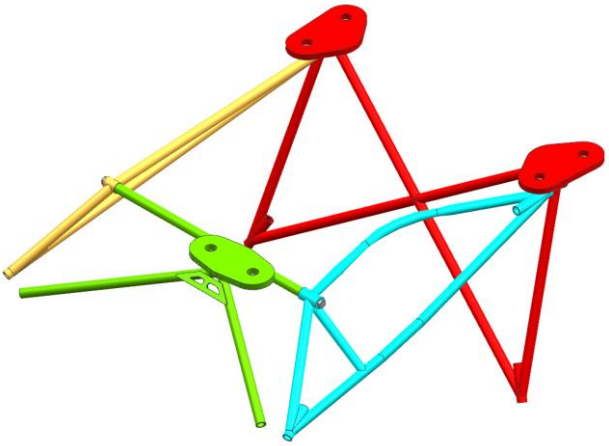
8. Konstrukční návrh lože

Při návrhu konstrukce lože bylo třeba zohlednit umístění silentbloků kolem motoru, omezený prostor a velikost otvoru pro vložení lože do letadla. Rozmístění silentbloků a umístění výfuku znemožňuje efektivní využití nosníkového lože, proto byla zvolena příhradová konstrukce. Při jejím návrhu byl kladen důraz na minimální délku příhrad pro minimalizaci celkové váhy. Manipulační otvor za zadní sedačkou pilota, určený pro vložení motoru a lože do draku, je však natolik malý, že bylo potřeba lože rozdělit na více kusů.

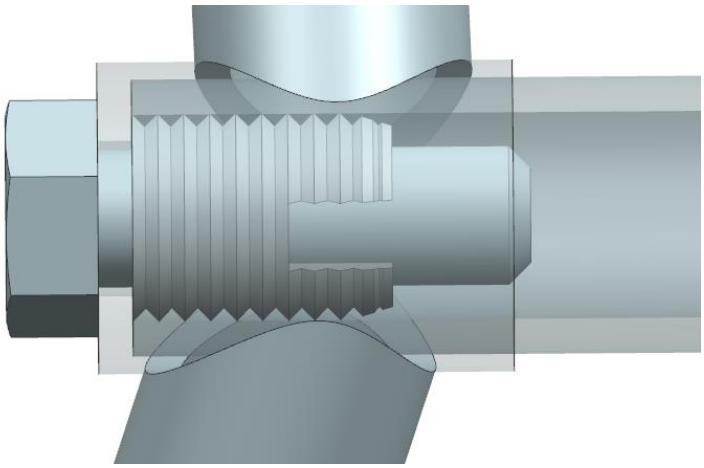


Obr. 10 Návrh motorového lože

Hlavní kostra lože je tvořena tenkostěnnými trubkami o průměru 16 mm. Celkem se skládá ze čtyř samostatných svařenců, jak lze vidět na obrázku Obr. 11. Jednotlivé svařence jsou vzájemně sešroubovány za pomoci závitových vložek (K0978) a šroubů se šestihrannou hlavou třídy pevnosti 8.8 dle normy ČSN EN ISO 4017, viz. obrázek Obr. 12.

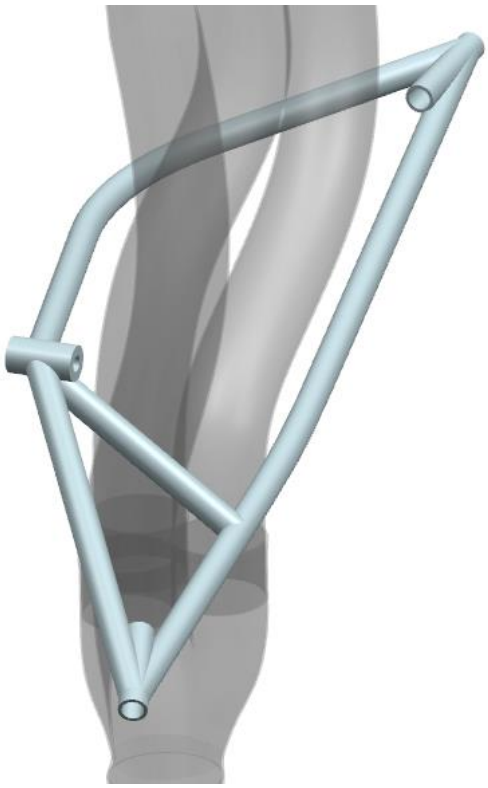


Obr. 11 Jednotlivé svařence lože



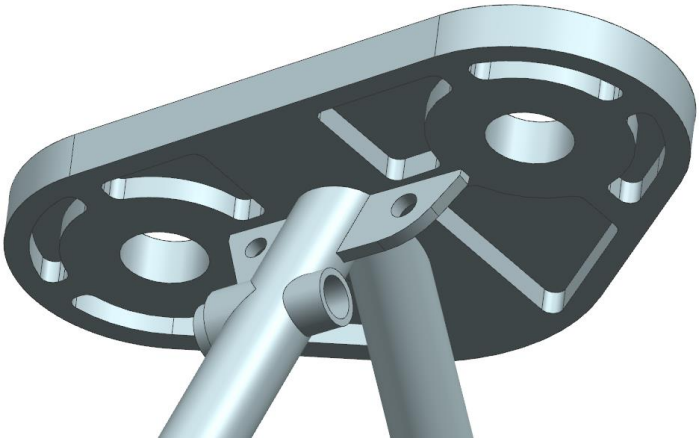
Obr. 12 Šroubové spojení dvou dílů lože

Na levé straně motoru je namontován výfuk, který významně ovlivnil konstrukci levého bočního svařence. Výsledný tvar na obrázku Obr. 13 byl navrhnut v závislosti na umístění motoru, výfuku a trupu letadla s ohledem na minimální tepelné ovlivnění od výfuku.



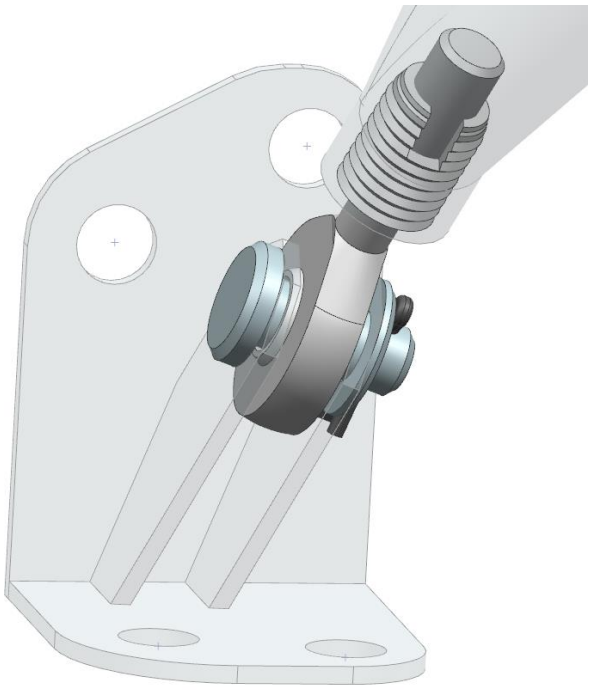
Obr. 13 Konstrukšní řešení v okolí výfuku

Motor je položen na tři styčná místa. Tyto podstavy tvoří 10 mm silný plech, zaručující dostatečnou tuhost. Vespod jsou vyfrézována žebra z důvodu odlehčení, zároveň jsou navržena tak, aby bylo možné snadné přivaření nosných trubek a navaření odlehčených podpůrných výztuh. Obrysový tvar odpovídá spodní části silentbloku, je však o 10 mm rozšířený ve všech směrech pro lepší variabilitu při ustavování motoru.



Obr. 14 Levá zadní styčná plocha

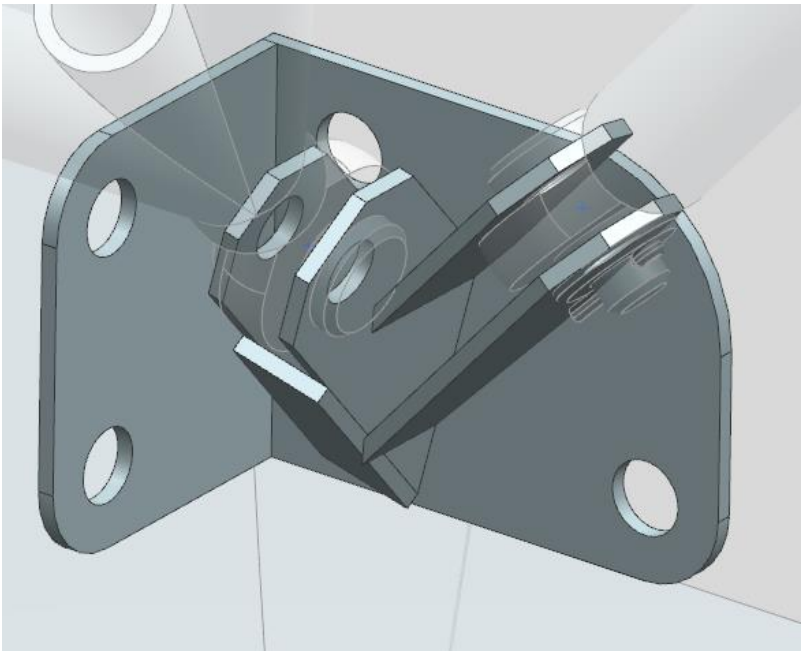
Lože je zavěšeno do závěsů pomocí šesti stavitelných ok od společnosti SKF s označením SA 6 E, která jsou našroubována do závitových vložek (K0978). Okem prochází čep 8x18x2, podle normy ISO 2341 typ B, zajištěný podložkou ISO 7090 a závlačkou 2x14 v normě ISO 1234. Stavitelná oka umožní dodatečnou změnu úhlu výstupní hřídele motoru.



Obr. 15 Spojení lože se závěsem pomocí stavitelného oka

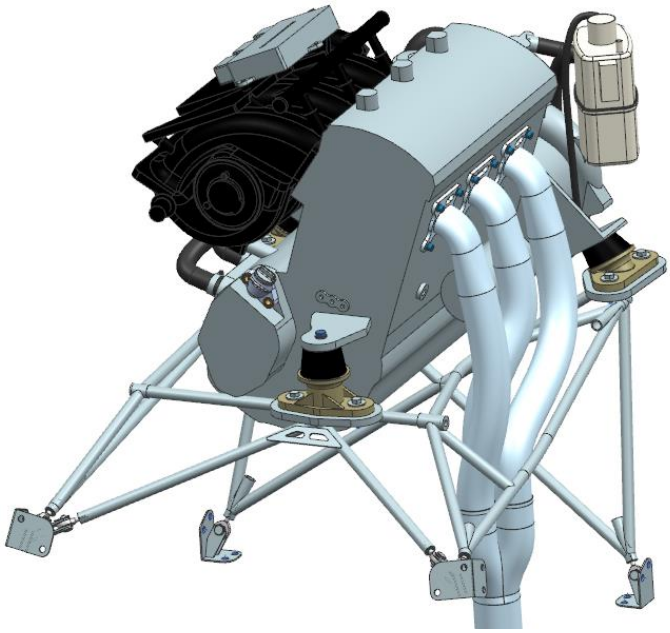
Přední i zadní závěsy jsou svařence tvořené z plechu o tloušťce 2 mm. Přední závěs je přimontován k protipožární přepážce a boku draku letadla, zadní závěs je uchycen k podlaze a boku draku letadla. Do každé stěny jsou upevněny dvěma šrouby kvůli lepší distribuci sil, konkrétní návrh toho spoje však nebyl úkolem této diplomové práce. Závěsy jsou navrženy na minimální rozměry při zachování snadné smontovatelnosti, tedy uchycení k draku letadla a namontování stavitelných ok lože.

Obr. 16 Zadní závěs



Obr. 17 Přední závěs

Obrázek Obr. 18 znázorňuje kompletní návrh lože, včetně svěrného uchycení lože s motorem za pomoci šesti šroubů se šestihrannou hlavou třídy pevnosti 8.8 dle normy ČSN EN ISO 4017, velkoplošných podložek DIN 9021 a matic ČSN EN ISO 4032.



Obr. 18 Kompletní návrh lože

Svařence motorového lože a svařence závěsů jsou vyrobeny z materiálů známého pod obchodním názvem L-ROL. Jedná se o Cr-Mn-Si ocel s číselným označením 14 331. Jeho hlavní předností je dobrá svařitelnost a prokalitelnost v oleji do 15 mm, proto se používá pro svařované součásti jako jsou trubkové konstrukce, podvozky a motorová lože. Podrobnější vlastnosti jsou v tabulce níže.

L-ROL (14 331)	
Střední složení [%]	0,32 C; 1,0Cr; 1,0Mn; 1,1Si
Stav	.7 (vytvrzení za studena)
Mez pevnosti R_m $[MPa]$	1080-1270
Mez kluzu R_e $[MPa]$	880
Tažnost A_5 [%]	12
Hustota ρ $[kg/m^3]$	7850

Tab. 5 Specifikace materiálu 14 331.7

Díky tomuto materiálu je předpokládaná hmotnost konstrukce lože 6,15 kg, předního závěsu 0,13 kg a zadního závěsu 0,07 kg.

9. Letový režim a hmotnostní konfigurace

Ke stanovení zatížení je potřeba vybrat nejméně příznivý případ letového režimu s ohledem na hmotnostní konfiguraci. V tabulce níže jsou vybrané hmotnostní variace s uvedenými celkovými hmotnostmi, polohami centráží a hmotnostmi paliva.

Konfigurace	$\boldsymbol{m}\ [\boldsymbol{kg}]$	$\boldsymbol{c}\ [\%\boldsymbol{b_{sat}}]$	$\boldsymbol{m_{pal}}\ [\boldsymbol{kg}]$
1	382.1	34.43	0.0
11	427.6	24.05	0.0
14	472.5	22.67	44.9
41	472.5	30.12	0.0
45	567.1	26.72	85.0
50	600.0	21.79	85.0
55	600.0	20.26	72.4
51	527.6	21.74	0.0

Tab. 6 Hmotnostní konfigurace

Následují tabulka zachycuje, jakých násobků bylo dosaženo pro jednotlivé hmotnostní konfigurace v daných bodech letové obálky.

	Číslo konfigurace			1	11	14	41	45	50	55	51
		bod	$\boldsymbol{v}\ [\boldsymbol{km/h}]$	$\boldsymbol{n}\ [-]$	$\boldsymbol{n}\ [-]$	$\boldsymbol{n}\ [-]$	$\boldsymbol{n}\ [-]$	$\boldsymbol{n}\ [-]$	$\boldsymbol{n}\ [-]$	$\boldsymbol{n}\ [-]$	$\boldsymbol{n}\ [-]$
	Vyvažovací případy	1	160.33	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
		2	350.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
		3	350.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		4	350.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00
		5	165.99	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00
		6	117.37	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
	Poryvove	9	230.00	4.93	4.63	4.37	4.37	3.94	3.81	3.81	4.11
		10	350.00	3.99	3.76	3.57	3.57	3.24	3.14	3.14	3.36
		11	350.00	-1.99	-1.76	-1.57	-1.57	-1.24	-1.14	-1.14	-1.36
		12	230.00	-2.93	-2.63	-2.37	-2.37	-1.94	-1.81	-1.81	-2.11
Klapky	***Velké***	15	65.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		16	91.92	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
		17	155.00	2.48	2.36	2.27	2.27	2.10	2.06	2.06	2.17
	Malé	18	75.45	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		19	106.70	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
		20	155.00	2.44	2.33	2.24	2.24	2.08	2.03	2.03	2.14

Tab. 7 Násobky v bodech letové obálky

Nejméně příznivý případ nastane ve chvíli, kdy je násobek v daném bodě maximální. Z tabulky je patrné, že nejvyšších násobků je dosaženo v konfiguraci 1, tedy v případě prázdného letounu.

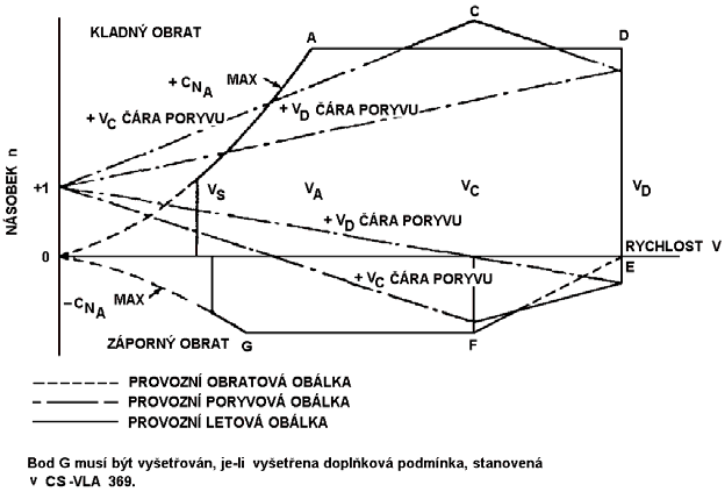
10. Zatížení

10.1. Stanovení zatížení

Zatížení motorového lože je specifikováno stejně ve všech třech uvedených předpisech. Pro výpočet jsou uvažovány nejen dvě varianty zatížení dle předpisů, které jsou rozebrány v bodech 1 a 2, ale také varianta s přihlédnutím k bezpečnosti. Ta znamená nejméně příznivou kombinaci setrvačných sil a kroutícího momentu, jak je popsáno v bodě 3.

10.1.1. Varianta 1:

Kroutící moment vyvolaný vzletovým výkonem a příslušnými otáčkami spolu se 75% provozního zatížení podle provozních podmínek v daném bodě letové obálky.



Obr. 19 Obecná letová obálka [1]

a) 75% provozního zatížení neboli 75% setrvačné síly se vypočítá součinem hmotnosti m, tíhového zrychlení g, letového násobku n a koeficientu 0,75.

$$F_{75\%} = 0{,}75 \cdot n \cdot g \cdot m \tag{10.1}$$

$$F_{75\%} = 0{,}75 \cdot 4 \cdot 9{,}81 \cdot 95{,}92 = 2822{,}84\ N \tag{10.2}$$

bod obálky	***n*** [−]		***α*** [°]	$\boldsymbol{F_{75\%}}$ [N]
A	v_A	4.00	12.88	2822.84
C	v_C	4.93	6.44	3476.93
D	v_D	4.00	0.20	2822.84
E	v_E	-2.00	-4.85	-1411.42
F	v_F	-2.93	-8.87	-2065.52
G	v_G	-2.00	-10.65	-1411.42

Tab. 8 75% provozního zatížení

b) 75% bočního zatížení je definováno jako $\frac{1}{3}$ setrvačných sil v bodě A letové obálky.

$$F_{B75\%} = 0{,}75 \cdot \frac{1}{3} \cdot n \cdot g \cdot m \tag{10.3}$$

$$F_{B75\%} = 0{,}75 \cdot \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 981 \cdot 95{,}92 = 940{,}95\ N \tag{10.4}$$

c) Kroutící moment při vzletovém výkonu na maximálních otáčkách je definován dle následujícího vzorce.

$$M_{K_{vzl}} = 3 \cdot \frac{P_{vzl}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{vzl}}{60}} \tag{10.5}$$

$$M_{K_{vzl}} = 3 \cdot \frac{162545}{2 \cdot \pi \cdot \frac{8000}{60}} = 582{,}07\ Nm \tag{10.6}$$

Pro následující výpočty v bodech 2 a 3 jsou použity principiálně stejné vzorce, které se liší pouze dosazenými hodnotami dle požadavků.

10.1.2. Varianta 2:

Kroutící moment vyvolaný maximálním trvalým výkonem a příslušnými otáčkami spolu s provozním zatížením podle provozních podmínek v daném bodě letové obálky.

a) Setrvačné síly (100%)

$$F = n \cdot g \cdot m \tag{10.7}$$

$$F = 4 \cdot 9{,}81 \cdot 95{,}92 = 3763{,}78\ N \tag{10.8}$$

bod obálky	***n*** [−]		***α*** [°]	***F*** [***N***]
A	v_A	4.00	12.88	3763,78
C	v_C	4.93	6.44	4635,91
D	v_D	4.00	0.20	3763,78
E	v_E	-2.00	-4.85	-1881,89
F	v_F	-2.93	-8.87	-2754,02
G	v_G	-2.00	-10.65	-1881,89

Tab. 9 Provozní zatížení

b) Boční zatížení

$$F_B = \frac{1}{3} \cdot n \cdot g \cdot m \tag{10.9}$$

$$F_B = \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 9.81 \cdot 95{,}92 = 1254.59\ N \tag{10.10}$$

c) Kroutící moment při maximálním trvalém výkonu na 75% maximálních otáček

$$M_{K_{trv}} = 3 \cdot \frac{P_{trv}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{trv}}{60}} \tag{10.11}$$

$$M_{K_{trv}} = 3 \cdot \frac{114002}{2 \cdot \pi \cdot \frac{6000}{60}} = 544{,}32\ Nm \tag{10.12}$$

10.1.3. Varianta 3:

S ohledem na bezpečnost je výpočet proveden pro nejhorší kombinaci zatížení. Tedy pro kroutící moment vyvolaný vzletovým výkonem a příslušnými otáčkami spolu s provozním zatížením podle provozních podmínek v daném bodě letové obálky.

a) Setrvačné síly

$$F = n \cdot g \cdot m \tag{10.13}$$

$$F = 4 \cdot 9{,}81 \cdot 95{,}92 = 3763{,}78\ N \tag{10.14}$$

bod obálky	***n*** [−]		***α*** [°]	***F*** [***N***]
A	v_A	4.00	12.88	3763,78
C	v_C	4.93	6.44	4635,91
D	v_D	4.00	0.20	3763,78
E	v_E	-2.00	-4.85	-1881,89
F	v_F	-2.93	-8.87	-2754,02
G	v_G	-2.00	-10.65	-1881,89

Tab. 10 Provozní zatížení

b) Boční zatížení

$$F = \frac{1}{3} \cdot n \cdot g \cdot m \tag{10.15}$$

$$F_B = \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 9.81 \cdot 95{,}92 = 1254.59\ N \tag{10.16}$$

c) Kroutící moment při vzletovém výkonu na maximálních otáčkách

$$M_{K_{vzl}} = 3 \cdot \frac{P_{vzl}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{vzl}}{60}} \tag{10.17}$$

$$M_{K_{vzl}} = 3 \cdot \frac{162545}{2 \cdot \pi \cdot \frac{8000}{60}} = 582{,}07\ Nm \tag{10.18}$$

Dalším kritériem motorového lože je bezporuchový provoz při početním zatížení, které je dáno součinem provozního zatížení a koeficientu bezpečnosti $k = 1{,}5$, Koeficientem bezpečnosti jsou přenásobeny nejen setrvačné síly ale i kroutící moment, jak je ukázáno v následujících variantách 4, 5 a 6.

10.1.4. Varianta 4:

Početní kroutící moment vyvolaný vzletovým výkonem a příslušnými otáčkami spolu se 75% početního zatížení podle provozních podmínek v daném bodě letové obálky.

a) 75% početního zatížení neboli 75% setrvačné síly se spočítá součinem hmotnosti m, tíhového zrychlení g, letového násobku n a koeficientu 0,75.

$$F_{p75\%} = k \cdot 0{,}75 \cdot n \cdot g \cdot m \tag{10.19}$$

$$F_{p75\%} = 1{,}5 \cdot 0{,}75 \cdot 4 \cdot 9{,}81 \cdot 95{,}92 = 4234{,}26\ N \tag{10.20}$$

bod obálky	***n*** [−]		***α*** [°]	$\boldsymbol{F_{p75\%}}$ [N]
A	v_A	4.00	12.88	4234,26
C	v_C	4.93	6.44	5215,40
D	v_D	4.00	0.20	4234,26
E	v_E	-2.00	-4.85	-2117,13
F	v_F	-2.93	-8.87	-3098,27
G	v_G	-2.00	-10.65	-2117,13

Tab. 11 75% početního zatížení

b) 75% bočního zatížení je definováno jako $\frac{1}{3}$ setrvačných sil v bodě A letové obálky.

$$F_{Bp75\%} = k \cdot 0{,}75 \cdot \frac{1}{3} \cdot n \cdot g \cdot m \tag{10.21}$$

$$F_{Bp75\%} = 1{,}5 \cdot 0{,}75 \cdot \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 981 \cdot 95{,}92 = 1411.42\ N \tag{10.22}$$

c) Početní kroutící moment při vzletovém výkonu na maximálních otáčkách je definován dle následujícího vzorce.

$$M_{Kp_{vzl}} = k \cdot 3 \cdot \frac{P_{vzl}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{vzl}}{60}} \tag{10.23}$$

$$M_{Kp_{vzl}} = 1{,}5 \cdot 3 \cdot \frac{162545}{2 \cdot \pi \cdot \frac{8000}{60}} = 873{,}11\ Nm \tag{10.24}$$

10.1.5. Varianta 5:

Početní kroutící moment vyvolaný maximálním trvalým výkonem a příslušnými otáčkami spolu s početním zatížením podle provozních podmínek v daném bodě letové obálky.

a) Početní zatížení odpovídající 100% setrvačné síly

$$F_p = k \cdot n \cdot g \cdot m \tag{10.25}$$

$$F_p = 1{,}5 \cdot 4 \cdot 9{,}81 \cdot 95{,}92 = 5645{,}68\ N \tag{10.26}$$

bod obálky	***n*** [−]		***α*** [°]	$\boldsymbol{F_p}$ [***N***]
A	v_A	4.00	12.88	5645,68
C	v_C	4.93	6.44	6953,87
D	v_D	4.00	0.20	5645,68
E	v_E	-2.00	-4.85	-2822,84
F	v_F	-2.93	-8.87	-4131,03
G	v_G	-2.00	-10.65	-2822,84

Tab. 12 Početní zatížení

b) Boční zatížení

$$F_{Bp} = k \cdot \frac{1}{3} \cdot n \cdot g \cdot m \tag{10.27}$$

$$F_{Bp} = 1{,}5 \cdot \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 9.81 \cdot 95{,}92 = 1881{,}89\ N \tag{10.28}$$

c) Kroutící moment při maximální trvalém výkonu na 75% maximálních otáček

$$M_{Kp_{trv}} = 1{,}5 \cdot 3 \cdot \frac{P_{trv}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{trv}}{60}} \tag{10.29}$$

$$M_{Kp_{trv}} = 1{,}5 \cdot 3 \cdot \frac{114002}{2 \cdot \pi \cdot \frac{6000}{60}} = 816.48\ Nm \tag{10.30}$$

10.1.6. Varianta 6:

S ohledem na bezpečnost je výpočet proveden opět pro nejhorší kombinaci zatížení dané početním kroutícím momentem od vzletového výkonu s příslušnými otáčkami a početním zatížením.

a) Setrvačné síly

$$F_p = k \cdot n \cdot g \cdot m \tag{10.31}$$

$$F_p = 1{,}5 \cdot 4 \cdot 9{,}81 \cdot 95{,}92 = 5645{,}68\ N \tag{10.32}$$

bod obálky	***n*** [−]		***α*** [°]	***F_p*** [***N***]
A	v_A	4.00	12.88	5645,68
C	v_C	4.93	6.44	6953,87
D	v_D	4.00	0.20	5645,68
E	v_E	-2.00	-4.85	-2822,84
F	v_F	-2.93	-8.87	-4131,03
G	v_G	-2.00	-10.65	-2822,84

Tab. 13 Početní zatížení

b) Boční zatížení

$$F_{Bp} = k \cdot \frac{1}{3} \cdot n \cdot g \cdot m \tag{10.33}$$

$$F_{Bp} = 1{,}5 \cdot \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 9.81 \cdot 95{,}92 = 1881{,}89\ N \tag{10.34}$$

c) Kroutící moment při vzletovém výkonu na maximálních otáčkách

$$M_{Kp_{vzl}} = k \cdot 3 \cdot \frac{P_{vzl}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{vzl}}{60}} \tag{10.35}$$

$$M_{Kp_{vzl}} = 1{,}5 \cdot 3 \cdot \frac{162545}{2 \cdot \pi \cdot \frac{8000}{60}} = 873.11\ Nm \tag{10.36}$$

10.1.7. Nouzové přistání:

Zatížení pro nouzové přistání je definováno předpisy podle vzorce (10.37). Jednotlivé předpisy definují rozdílně maximální hodnotu násobku pro výpočet dopředných setrvačných sil. Následující výpočet je proto s ohledem na certifikaci a bezpečnost proveden dle nejvyšších nároků, což znamená s násobkem $n = 15$.

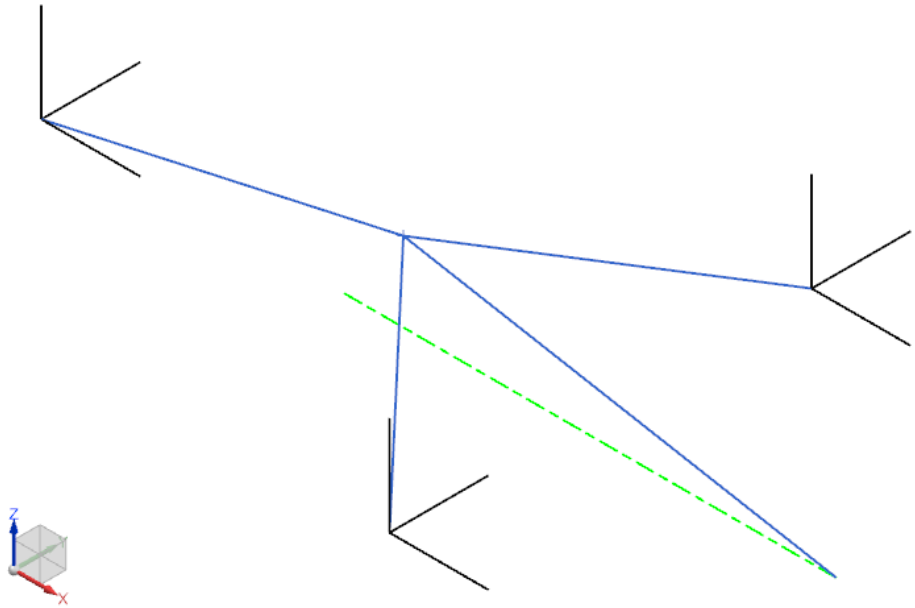
$$F = n \cdot g \cdot m \tag{10.37}$$

$$F = 15 \cdot 9.81 \cdot 95{,}92 = 14114{,}19\ N \tag{10.38}$$

10.2. Zatížení od motoru

Výpočet reakcí byl proveden v programu NX 11 za pomoci řešiče NX Nastran, který využívá metodu konečných prvků. K vytvoření výpočetního modelu byl blok motoru uvažován jako absolutně tuhé těleso zavěšené v prostoru.

Pro zjednodušení byl motor nahrazen prutovým modelem viz Obr. 20. Modré pruty spojují těžiště s osou výstupní hřídele (zeleně) a závěsy motoru. Černě jsou naznačeny hlavní směry os absolutního souřadného systému v závěsných bodech.

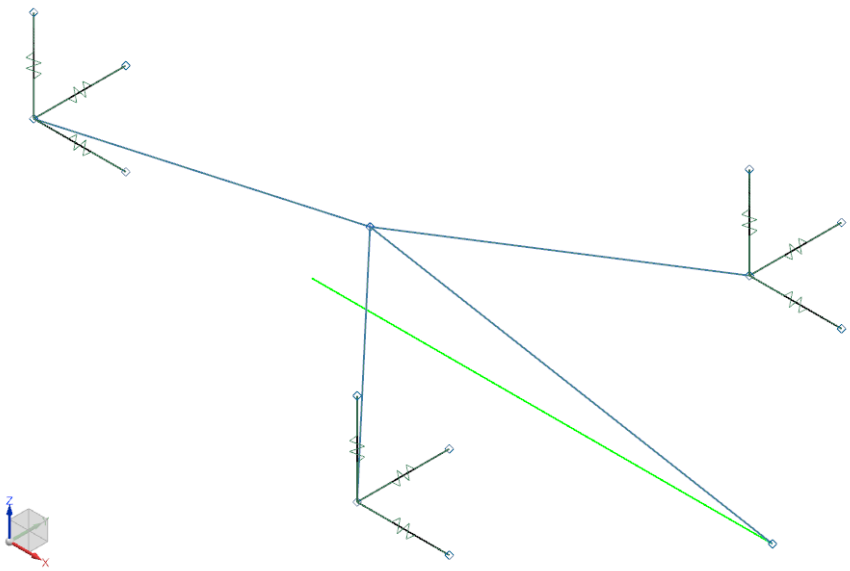


Obr. 20 Prutový model motoru

V dalším kroku byl vytvořen FEM model na Obr. 21 se sítí pro MKP analýzu. Blok motoru je představován čtyřmi 1D prvky „RBAR“ (modře), které jsou absolutně tuhé a nehmotné. V každém místě představujícím závěs motoru jsou vloženy tři pružiny pomocí prvku „CELAS2“ (tmavě zeleně). Pružiny jsou položeny ve směru hlavních os (na černé pruty). Tuhosti pružin pak odpovídají tuhostem jednotlivých silentbloků v daných směrech.

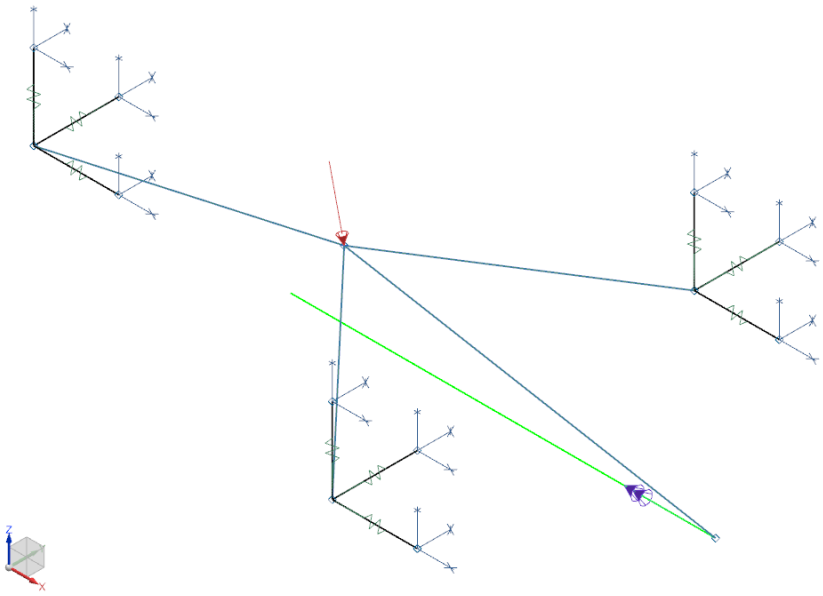
	$k_X\ [N/mm]$	$k_Y\ [N/mm]$	$k_Z\ [N/mm]$
Přední silentblok	61,9	61,9	347
Zadní silentbloky	84,6	99,5	272

Tab. 14 Tuhosti silentbloků



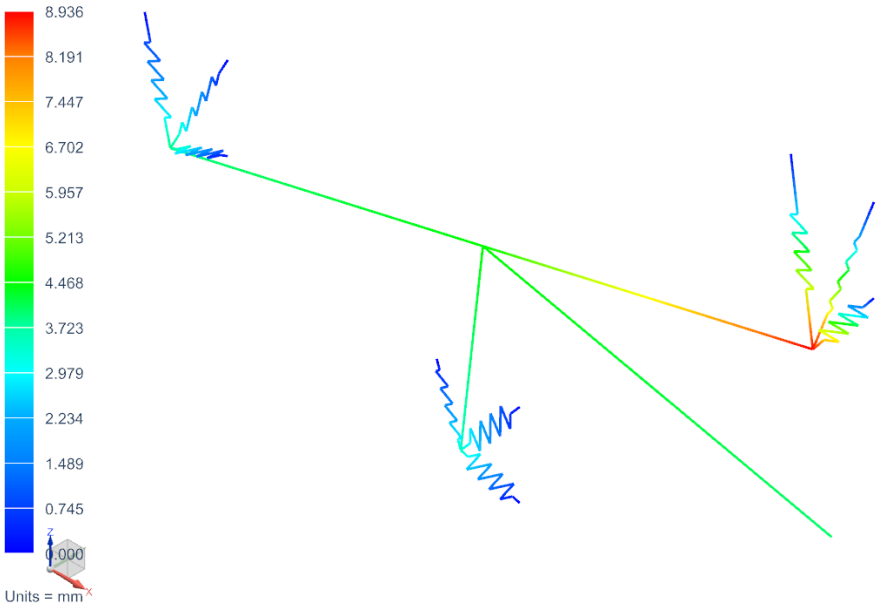
Obr. 21 FEM model motoru

Následně byl vytvořen konečný výpočetní model tzv. SIM model, ve kterém jsou nadefinovány síly, momenty, konstrukční vazby a typ výpočetního řešiče. Setrvačná síla, v obrázku Obr. 22 znázorněna červeně, je distribuovaná přímo v těžišti, což zajistí správné rozložení. Reakční moment (fialově) má opačný směr než skutečný kroutící moment. Konstrukční vazby (modře) jsou definovány na volných koncích jednotlivých pružin. Omezeny jsou v posuvu ve všech směrech, ne však v rotaci. Kompletní modelová situace na obrázku Obr. 22 je pro variantu 1 v bodě A letové obálky.



Obr. 22 SIM model varianty 1 v bodě A letové obálky

Následného řešení bylo dosaženo za pomoci řešiče typu „SOL 101 Linear Statics - Global Constraints“. Výsledná deformace je znázorněna na obrázku Obr. 23.



Obr. 23 Výsledná deformace varianty 1 v bodě A letové obálky

Síla působící v daném místě uložení a směru je pak dána součinem tuhosti pružiny a deformace vyvolané daným typem zatížení. Příklad výpočtu reakce na předním silentbloku ve směru osy x je znázorněna v rovnici (10.39).

$$R_X = k_X \cdot \Delta x \tag{10.39}$$

$$R_X = 61{,}9 \cdot 2.72 \doteq 168.4\ N \tag{10.40}$$

Reakce byly určeny pro jednotlivé body obálky, nouzové přistání a boční zatížení, které bylo s ohledem na asymetrii lože aplikováno zprava i zleva. Výpočet byl proveden pro všechny tři typy zatěžování dle předchozí kapitoly s využitím provozního zatížení.

Pro početní zatížení byla spočítána pouze varianta, kdy násobkem 1,5 zvětšíme jak kroutící moment při vzletovém výkonu, tak 75% provozního zatížení v bodě A letové obálky. Porovnáním reakcí bylo zjištěno, že reakce od početního zatížení je právě 1,5krát větší než od provozního zatížení, proto byli výsledky dalších bodů obálky převzaty a přepočítány pro početní zatížení.

Varianta 1 a 4: maximální vzletový výkon a 75% zatížení										
		Provozní zatížení						Početní zatížení		
	Silentblok	R_X $[N]$		R_Y $[N]$		R_Z $[N]$		R_{pX} $[N]$	R_{pY} $[N]$	R_{pZ} $[N]$
A	Přední	168.4		14.5		-953.1		252.5	21.7	-1429.6
	Zadní levý	240.3		-7.0		525.7		360.3	-10.5	788.7
	Zadní pravý	220.8		-7.5		-2324.5		331.1	-11.3	-3486.6
C	Přední	104.2		13.1		-1240.0		156.4	19.7	-1860.1
	Zadní levý	153.9		-6.3		338.2		230.9	-9.4	507.3
	Zadní pravý	131.9		-6.8		-2553.2		197.8	-10.2	-3829.8
D	Přední	2.2		10.6		-1046.2		3.3	16.0	-1569.4
	Zadní levý	16.6		-5.0		546.8		25.0	-7.6	820.2
	Zadní pravý	-8.8		-5.6		-2323.5		-13.2	-8.4	-3485.3
E	Přední	30.8		10.5		536.1		46.2	15.7	804.1
	Zadní levý	55.5		-5.0		1763.8		83.3	-7.5	2645.7
	Zadní pravý	32.9		-5.5		-893.9		49.4	-8.2	-1340.9
F	Přední	84.2		11.6		793.5		126.3	17.4	1190.2
	Zadní levý	127.4		-5.6		1934.4		191.1	-8.3	2901.5
	Zadní pravý	107.0		-6.1		-686.5		160.5	-9.1	-1029.8
G	Přední	68.8		11.4		544.2		103.2	17.1	816.2
	Zadní levý	106.6		-5.4		1748.7		159.9	-8.2	2623.1
	Zadní pravý	85.4		-5.9		-906.2		128.1	-8.9	-1359.3
boční zleva	Přední	-8.5		311.6		1.5		-12.8	467.4	2.3
	Zadní levý	-40.2		314.9		1483.7		-60.3	472.3	2225.5
	Zadní pravý	48.7		314.4		-1485.2		73.1	471.7	-2227.8
boční zprava	Přední	6.6		-291.5		0.6		9.9	-437.3	0.9
	Zadní levý	65.5		-324.4		1245.9		98.3	-486.6	1868.8
	Zadní pravý	-72.1		-325.0		-1246.5		-108.2	-487.5	-1869.7

Tab. 15 Reakce od motoru varianta 1 a 4

Varianta 2 a 5: maximální trvalý výkon a 100% zatížení										
		Provozní zatížení						Početní zatížení		
	Silentblok	R_X $[N]$		R_Y $[N]$		R_Z $[N]$		R_{pX} $[N]$	R_{pY} $[N]$	R_{pZ} $[N]$
A	Přední	224.9		15.3		-1271.3		337.3	23.0	-1906.9
	Zadní levý	315.3		-7.4		156.9		472.9	-11.1	235.3
	Zadní pravý	299.1		-7.9		-2554.9		448.6	-11.9	-3832.3
C	Přední	139.4		13.5		-1653.8		209.1	20.3	-2480.7
	Zadní levý	200.2		-6.5		-93.1		300.3	-9.7	-139.6
	Zadní pravý	180.5		-7.0		-2859.8		270.7	-10.5	-4289.8
D	Přední	3.3		10.2		-1395.4		4.9	15.3	-2093.1
	Zadní levý	17.2		-4.8		185.0		25.7	-7.3	277.5
	Zadní pravý	-7.1		-5.3		-2553.5		-10.6	-8.0	-3830.3
E	Přední	41.5		10.0		714.6		62.2	15.0	1071.8
	Zadní levý	69.0		-4.8		1807.9		103.5	-7.2	2711.9
	Zadní pravý	48.6		-5.2		-647.2		72.9	-7.8	-970.8
F	Přední	112.6		11.5		1057.3		168.9	17.2	1585.9
	Zadní levý	164.8		-5.5		2034.9		247.1	-8.3	3052.4
	Zadní pravý	147.3		-6.0		-371.1		220.9	-9.0	-556.7
G	Přední	92.1		11.2		725.4		138.2	16.8	1088.0
	Zadní levý	137.1		-5.4		1787.8		205.7	-8.0	2681.7
	Zadní pravý	118.5		-5.8		-663.6		177.8	-8.7	-995.3
boční zleva	Přední	-11.0		411.5		1.6		-16.5	617.2	2.4
	Zadní levý	-58.7		421.7		1434.2		-88.0	632.6	2151.3
	Zadní pravý	69.7		421.4		-1435.8		104.5	632.1	-2153.7
boční zprava	Přední	9.2		-392.7		0.4		13.8	-589.1	0.6
	Zadní levý	82.3		-430.6		1117.1		123.5	-646.0	1675.7
	Zadní pravý	-91.5		-431.2		-1117.5		-137.3	-646.8	-1676.3

Tab. 16 Reakce od motoru varianta 2 a 5

Varianta 3 a 6: maximální výkon a 100% zatížení										
		Provozní zatížení						Početní zatížení		
	Silentblok	R_X $[N]$		R_Y $[N]$		R_Z $[N]$		R_{pX} $[N]$	R_{pY} $[N]$	R_{pZ} $[N]$
A	Přední	224.8		16.0		-1271.2		337.2	24.0	-1906.8
	Zadní levý	316.1		-7.7		246.0		474.2	-11.6	369.0
	Zadní pravý	298.3		-8.3		-2644.0		447.5	-12.4	-3966.1
C	Přední	139.3		14.2		-1653.7		209.0	21.2	-2480.6
	Zadní levý	201.0		-6.8		-4.0		301.5	-10.2	-6.0
	Zadní pravý	179.7		-7.4		-2949.0		269.6	-11.0	-4423.5
D	Přední	3.2		10.8		-1395.3		4.8	16.3	-2093.0
	Zadní levý	18.0		-5.1		274.1		27.0	-7.7	411.2
	Zadní pravý	-7.8		-5.7		-2642.7		-11.8	-8.5	-3964.1
E	Přední	41.4		10.7		714.6		62.1	16.0	1072.0
	Zadní levý	69.8		-5.1		1897.0		104.7	-7.6	2845.5
	Zadní pravý	47.8		-5.6		-736.4		71.7	-8.4	-1104.6
F	Přední	112.5		12.1		1057.4		168.8	18.2	1586.0
	Zadní levý	165.6		-5.8		2124.0		248.4	-8.7	3186.0
	Zadní pravý	146.5		-6.3		-460.3		219.8	-9.5	-690.5
G	Přední	92.1		11.8		725.4		138.1	17.8	1088.2
	Zadní levý	138.0		-5.7		1876.9		206.9	-8.5	2815.3
	Zadní pravý	117.8		-6.2		-752.7		176.7	-9.2	-1129.1
boční zleva	Přední	-11.0		412.1		1.7		-16.6	618.2	2.5
	Zadní levý	-57.8		421.4		1523.3		-86.8	632.2	2284.9
	Zadní pravý	68.9		421.0		-1525.0		103.3	631.5	-2287.5
boční zprava	Přední	9.1		-392.1		0.5		13.7	-588.1	0.7
	Zadní levý	83.1		-430.9		1206.2		124.7	-646.4	1809.4
	Zadní pravý	-92.3		-431.6		-1206.7		-138.4	-647.3	-1810.0

Tab. 17 Reakce od motoru varianta 3 a 6

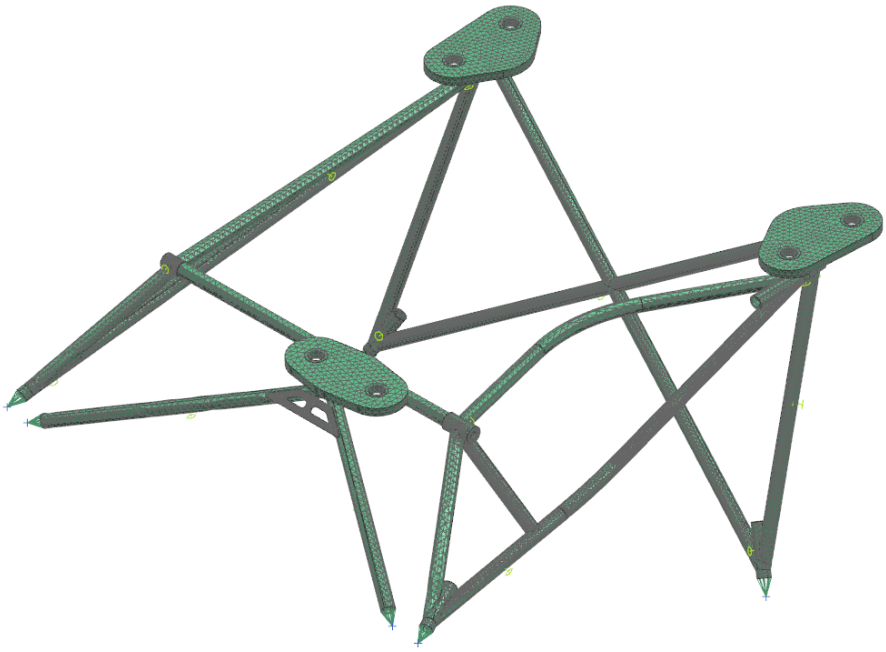
Nouzové přistání				
	Silentblok	R_X $[N]$	R_Y $[N]$	R_Z $[N]$
nouzové	Přední	-3787.0	-88.0	-1520.7
	Zadní levý	-5095.4	44.1	949.3
	Zadní pravý	-5231.6	43.9	571.4

Tab. 18 Reakce od motoru při nouzovém přistání

Červená barva zvýrazňuje maximální hodnotu, získanou porovnáním sil působících v daném místě, směru a podle typu zatížení. Modrá barva naopak označuje minima. Z rozložení jednotlivých maxim vyplývá, že další výpočty by měly být provedeny pro všechny typy zatížení a body obálky.

10.3. Zatížení lože a síly do závěsů

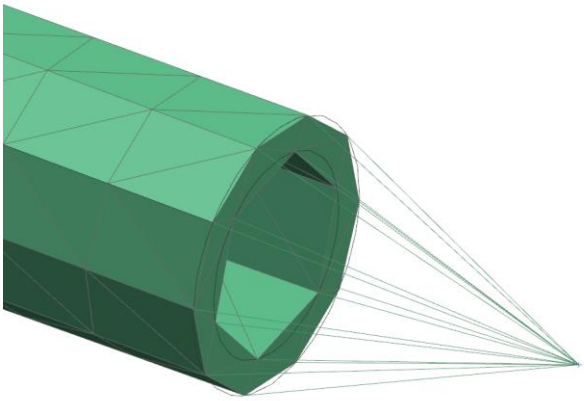
Pro zachycení reálnějšího chování zatíženého lože, byl využit již vytvořený 3D model. Každý konstrukční prvek je tvořen sítí čtyřbokých elementů. Hustota sítí je optimalizovaná pro každý jednotlivý prvek zvlášť, čímž dosáhneme kvalitnějších výpočtů. Jednotlivé sítě jsou spojeny pomocí funkce „Mesh Mating“. Kompletní síťový model je na obrázku Obr. 24.



Obr. 24 FEM model lože

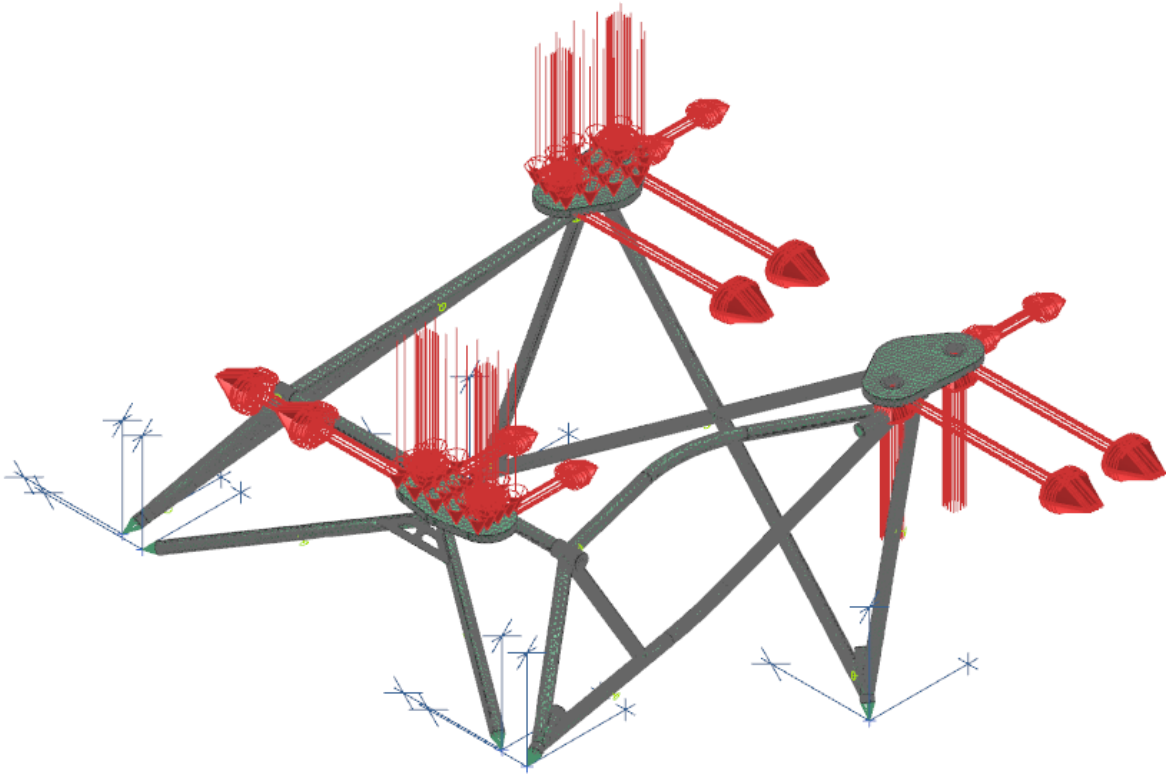
Přiblížení reálného přenosu zatížení od motoru na lože je zajištěno v místě styku lože se silentblokem, kde je v konstrukci využit svěrný spoj. Z tohoto důvodu je síť pod podložkou geometricky upravena pro lepší zadání působících sil.

Pro závěsy lože, bylo potřeba zavést zjednodušení spoje oko-lože. Tento spoj byl nahrazen 1D prvky „RBAR“, které jsou absolutně tuhé. Prvky vedou od čela trubky k bodu, který reprezentuje průsečík osy nosného závitu a osy čepu stavitelného oka. Nahrazení spoje je vidět na obrázku Obr. 25.



Obr. 25 Nahrazení spoje oko-lože

Obr. 26 zobrazuje umístění působících sil na jednotlivé nosné plochy. Síly ve směru os x, y a v záporném směru osy z působí na styčných plochách lože a silentbloku. Síly směřující v kladném směru osy z jsou umístěny zespodu nosné plochy na prostoru ohraničeném použitou podložkou. Gelenek stavitelného oka není schopen přenést moment, proto jsou veškeré body představující spoj omezeny pouze v translaci. Díky tomu lze odečíst síly působící ve stavitelném oku odpovídající silám působícím do závěsu.



Obr. 26 SIM model lože

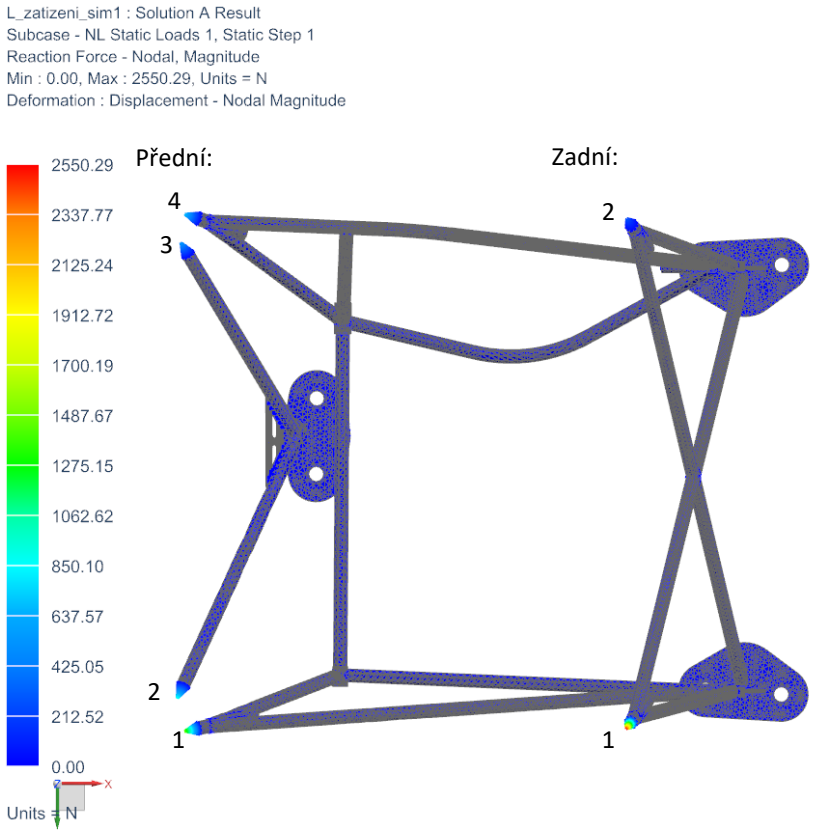
K řešení byl použit řešič „106 Nonlinear Statics - Global Constraints“, který je schopen řešit otázku vzpěru. Výpočty byly provedeny pro varianty 1, 2, 3 a bod A letové obálky varianty 4. Poměr reakcí v bodě A letové obálky variant 1 a 4, je roven poměru zatěžovacích sil, tedy koeficientu $k = 1{,}5$.

$$\mathrm{k} = \frac{R_{pX}}{R_X} \tag{10.41}$$

$$k = \frac{2170{,}26}{1446{,}03} = 1{,}5\ [-] \tag{10.42}$$

Lze proto přepokládat, že v ostatních bodech letové obálky při početním zatížení budou reakce větší o koeficient $k = 1{,}5$ než při ekvivalentním provozním zatížení. Zbylé hodnoty sil a napětí při zatížení variantami 4, 5 a 6 byly získány přenásobením odpovídajících variant 1, 2, 3 koeficientem k.

Obrázek Obr. 27 zobrazuje řešení varianty 1 v bodě A letové obálky, konkrétně velikost reakčních sil. Znázorněné číslování pozic je použito v následujících tabulkách, kde jsou uvedeny výsledky reakčních sil ve složkách.



Obr. 27 Amplitudy reakcí, včetně číslování pozic

Varianta 1 a 4: maximální výkon a 75% zatížení													
			Provozní zatížení						Početní zatížení		
	Pozice		R_X $[N]$		R_Y $[N]$		R_Z $[N]$		R_{pX} $[N]$	R_{pY} $[N]$	R_{pZ} $[N]$
A	Přední	1	1446.03		-72.32		245.03		2170.26	-107.82	367.36
	Přední	2	-335.01		769.99		-328.19		-503.36	1155.03	-491.38
	Přední	3	-250.04		-427.37		-237.22		-375.74	-641.29	-355.44
	Přední	4	682.25		-149.55		-33.66		1024.19	-224.76	-50.92
	Zadní	1	-921.58		143.97		-2373.59		-1382.89	215.77	-3561.23
	Zadní	2	7.85		-264.72		-24.26		11.75	-397.03	-36.28
C	Přední	1	1485.85		-56.21		232.54		2228.77	-84.32	348.81
	Přední	2	-439.92		1003.41		-425.04		-659.88	1505.11	-637.57
	Přední	3	-352.58		-599.31		-329.40		-528.87	-898.97	-494.10
	Přední	4	787.90		-192.39		-54.11		1181.84	-288.58	-81.16
	Zadní	1	-1008.76		175.80		-2605.22		-1513.13	263.70	-3907.83
	Zadní	2	-82.48		-331.29		-273.77		-123.72	-496.93	-410.65
D	Přední	1	1175.00		-41.69		183.70		1762.50	-62.53	275.56
	Přední	2	-381.83		864.64		-364.44		-572.75	1296.97	-546.65
	Přední	3	-314.49		-532.82		-290.61		-471.73	-799.23	-435.91
	Přední	4	379.48		-189.21		-99.52		569.22	-283.82	-149.28
	Zadní	1	-896.63		146.75		-2320.59		-1344.94	220.13	-3480.88
	Zadní	2	48.46		-247.68		68.54		72.69	-371.52	102.81
E	Přední	1	323.69		-72.72		124.24		485.54	-109.08	186.36
	Přední	2	164.11		-376.94		160.41		246.17	-565.41	240.62
	Přední	3	177.81		301.88		166.01		266.71	452.82	249.02
	Přední	4	-950.93		-10.94		-119.48		-1426.40	-16.41	-179.22
	Zadní	1	-297.17		-46.95		-757.10		-445.76	-70.43	-1135.65
	Zadní	2	701.70		205.67		1831.91		1052.54	308.51	2747.87
F	Přední	1	280.90		-86.31		133.86		421.34	-129.46	200.79
	Přední	2	256.48		-584.33		247.43		384.72	-876.50	371.15
	Přední	3	267.60		453.53		248.04		401.39	680.29	372.06
	Přední	4	-1053.28		26.82		-102.62		-1579.92	40.23	-153.93
	Zadní	1	-217.49		-76.17		-545.65		-326.23	-114.25	-818.47
	Zadní	2	784.39		266.37		2060.34		1176.59	399.55	3090.51
G	Přední	1	393.28		-79.57		138.89		589.92	-119.35	208.34
	Přední	2	170.21		-388.10		164.28		255.32	-582.14	246.42
	Přední	3	188.40		319.00		174.42		282.60	478.50	261.63
	Přední	4	-870.01		-3.28		-104.08		-1305.01	-4.93	-156.12
	Zadní	1	-307.98		-45.91		-782.54		-461.98	-68.86	-1173.81
	Zadní	2	686.89		197.96		1795.73		1030.33	296.94	2693.59
boční zleva	Přední	1	673.83		-67.20		161.08		1010.74	-100.80	241.61
	Přední	2	-108.78		231.48		-94.11		-163.16	347.22	-141.17
	Přední	3	67.94		113.49		63.95		101.91	170.23	95.93
	Přední	4	-631.99		-66.14		-125.44		-947.98	-99.21	-188.16
	Zadní	1	-689.40		334.29		-1779.99		-1034.10	501.43	-2669.98
	Zadní	2	688.39		394.98		1774.50		1032.58	592.47	2661.75
boční zprava	Přední	1	461.37		-49.23		109.42		692.05	-73.84	164.12
	Přední	2	65.87		-142.51		58.48		98.81	-213.76	87.72
	Přední	3	-52.87		-87.16		-47.14		-79.31	-130.73	-70.71
	Přední	4	-475.26		-84.31		-118.38		-712.90	-126.46	-177.58
	Zadní	1	-293.57		-299.16		-751.84		-440.35	-448.74	-1127.76
	Zadní	2	294.46		-278.54		749.47		441.70	-417.81	1124.20

Tab. 19 Síly do závěsů varianty 1 a 4

Varianta 2 a 5: maximální trvalý výkon a 100% zatížení															
			Provozní zatížení								Početní zatížení		
	Pozice		R_X $[N]$		R_Y $[N]$		R_Z $[N]$				R_{pX} $[N]$	R_{pY} $[N]$	R_{pZ} $[N]$
A	Přední	1	1702.16		-72.91		272.54				2553.24	-109.36	408.80
	Přední	2	-438.71		1009.26		-430.19				-658.06	1513.89	-645.28
	Přední	3	-336.82		-575.22		-319.34				-505.23	-862.83	-479.01
	Přední	4	1131.24		-169.58		3.53				1696.86	-254.38	5.29
	Zadní	1	-1032.80		184.71		-2660.12				-1549.21	277.07	-3990.18
	Zadní	2	-185.77		-376.27		-535.71				-278.65	-564.40	-803.57
C	Přední	1	1756.00		-51.24		255.80				2634.00	-76.86	383.71
	Přední	2	-578.98		1320.78		-559.15				-868.46	1981.17	-838.73
	Přední	3	-474.02		-804.91		-442.24				-711.03	-1207.36	-663.36
	Přední	4	1272.58		-226.65		-23.57				1908.87	-339.98	-35.36
	Zadní	1	-1149.46		228.57		-2970.10				-1724.19	342.86	-4455.14
	Zadní	2	-306.03		-466.55		-867.44				-459.04	-699.83	-1301.16
D	Přední	1	1340.75		-32.11		190.77				2011.12	-48.17	286.16
	Přední	2	-501.26		1135.69		-478.55				-751.89	1703.53	-717.82
	Přední	3	-422.85		-715.90		-390.49				-634.27	-1073.86	-585.73
	Přední	4	727.91		-222.41		-84.18				1091.87	-333.61	-126.26
	Zadní	1	-999.50		188.37		-2589.36				-1499.24	282.55	-3884.03
	Zadní	2	-131.66		-353.53		-412.11				-197.48	-530.29	-618.16
E	Přední	1	205.39		-73.65		111.63				308.09	-110.47	167.45
	Přední	2	227.28		-520.38		221.12				340.93	-780.56	331.69
	Přední	3	233.96		397.23		218.12				350.93	595.85	327.17
	Přední	4	-1047.05		15.47		-110.62				-1570.57	23.21	-165.93
	Zadní	1	-200.16		-69.75		-504.55				-300.24	-104.63	-756.82
	Zadní	2	739.68		251.07		1939.59				1109.52	376.61	2909.39
F	Přední	1	148.61		-91.69		124.42				222.92	-137.53	186.63
	Přední	2	350.06		-796.32		337.06				525.09	-1194.48	505.59
	Přední	3	353.36		599.09		327.43				530.04	898.63	491.14
	Přední	4	-1182.90		65.69		-88.18				-1774.35	98.53	-132.27
	Zadní	1	-94.13		-108.61		-223.17				-141.19	-162.92	-334.75
	Zadní	2	849.69		331.85		2243.54				1274.53	497.78	3365.31
G	Přední	1	298.06		-82.78		131.15				447.09	-124.17	196.73
	Přední	2	235.41		-535.22		226.27				353.12	-802.83	339.40
	Přední	3	248.07		420.03		229.31				372.10	630.04	343.96
	Přední	4	-939.24		25.67		-90.10				-1408.86	38.51	-135.14
	Zadní	1	-214.53		-68.42		-538.36				-321.79	-102.64	-807.53
	Zadní	2	719.93		240.73		1891.32				1079.89	361.09	2836.98
boční zleva	Přední	1	672.27		-66.40		160.88				1008.41	-99.59	241.32
	Přední	2	-136.49		290.94		-118.40				-204.74	436.41	-177.60
	Přední	3	87.57		146.06		81.92				131.36	219.09	122.88
	Přední	4	-622.05		-58.21		-118.66				-933.07	-87.31	-178.00
	Zadní	1	-723.29		438.65		-1868.72				-1084.93	657.97	-2803.08
	Zadní	2	721.98		503.56		1862.98				1082.97	755.33	2794.48
boční zprava	Přední	1	388.85		-42.42		91.97				583.27	-63.62	137.95
	Přední	2	96.40		-207.77		85.09				144.60	-311.65	127.63
	Přední	3	-73.50		-121.46		-66.20				-110.26	-182.19	-99.31
	Přední	4	-412.98		-82.43		-109.24				-619.46	-123.64	-163.86
	Zadní	1	-195.50		-405.87		-497.82				-293.26	-608.81	-746.73
	Zadní	2	196.73		-394.55		496.21				295.10	-591.83	744.32

Tab. 20 Síly do závěsů varianty 2 a 5

Varianta 3 a 6: maximální výkon a 100% zatížení															
			Provozní zatížení								Početní zatížení		
	Pozice		R_X $[N]$		R_Y $[N]$		R_Z $[N]$				R_{pX} $[N]$	R_{pY} $[N]$	R_{pZ} $[N]$
A	Přední	1	1739.20		-76.69		281.38				2608.79	-115.03	422.06
	Přední	2	-440.10		1012.13		-431.32				-660.15	1518.19	-646.98
	Přední	3	-336.32		-574.35		-318.80				-504.47	-861.52	-478.20
	Přední	4	1094.96		-174.51		-4.45				1642.44	-261.76	-6.68
	Zadní	1	-1064.91		185.88		-2742.76				-1597.37	278.82	-4114.14
	Zadní	2	-153.63		-372.47		-453.25				-230.44	-558.71	-679.87
C	Přední	1	1792.55		-55.10		264.63				2688.82	-82.64	396.95
	Přední	2	-580.37		1323.63		-560.27				-870.56	1985.45	-840.41
	Přední	3	-473.29		-803.67		-441.49				-709.94	-1205.50	-662.24
	Přední	4	1236.53		-231.72		-31.78				1854.79	-347.58	-47.68
	Zadní	1	-1181.20		228.22		-3051.69				-1771.81	342.34	-4577.54
	Zadní	2	-274.21		-461.37		-786.09				-411.31	-692.06	-1179.13
D	Přední	1	1377.94		-35.91		199.65				2066.91	-53.86	299.47
	Přední	2	-502.64		1138.51		-479.66				-753.95	1707.76	-719.49
	Přední	3	-422.37		-715.06		-389.96				-633.55	-1072.59	-584.94
	Přední	4	691.63		-227.34		-92.15				1037.45	-341.01	-138.23
	Zadní	1	-1031.65		189.55		-2672.12				-1547.48	284.32	-4008.18
	Zadní	2	-99.52		-349.74		-329.66				-149.28	-524.62	-494.49
E	Přední	1	242.41		-77.47		120.47				363.62	-116.20	180.71
	Přední	2	225.84		-517.38		219.92				338.76	-776.07	329.88
	Přední	3	234.45		398.09		218.66				351.67	597.14	328.00
	Přední	4	-1083.18		10.54		-118.61				-1624.77	15.82	-177.91
	Zadní	1	-232.25		-68.59		-587.19				-348.38	-102.89	-880.78
	Zadní	2	771.73		254.80		2021.94				1157.60	382.21	3032.91
F	Přední	1	185.61		-95.53		133.27				278.41	-143.29	199.90
	Přední	2	348.68		-793.45		335.90				523.02	-1190.18	503.86
	Přední	3	353.86		599.97		327.99				530.80	899.95	491.99
	Přední	4	-1219.08		60.77		-96.17				-1828.62	91.16	-144.26
	Zadní	1	-126.24		-107.43		-305.85				-189.35	-161.15	-458.78
	Zadní	2	881.76		335.67		2325.97				1322.65	503.50	3488.95
G	Přední	1	335.17		-86.61		140.01				502.75	-129.92	210.01
	Přední	2	234.01		-532.30		225.09				351.01	-798.45	337.64
	Přední	3	248.56		420.88		229.85				372.84	631.33	344.78
	Přední	4	-975.21		20.75		-98.06				-1462.82	31.12	-147.10
	Zadní	1	-246.59		-67.29		-620.92				-369.89	-100.93	-931.38
	Zadní	2	751.97		244.46		1973.63				1127.95	366.69	2960.44
boční zleva	Přední	1	709.32		-70.20		169.71				1063.98	-105.30	254.57
	Přední	2	-137.86		293.77		-119.53				-206.79	440.65	-179.29
	Přední	3	88.08		146.95		82.48				132.12	220.42	123.72
	Přední	4	-658.10		-63.11		-126.60				-987.15	-94.66	-189.90
	Zadní	1	-755.38		439.81		-1951.37				-1133.07	659.72	-2927.06
	Zadní	2	754.03		507.28		1945.30				1131.05	760.92	2917.95
boční zprava	Přední	1	425.87		-46.22		100.79				638.80	-69.34	151.19
	Přední	2	95.02		-204.92		83.94				142.53	-307.38	125.92
	Přední	3	-73.02		-120.61		-65.66				-109.53	-180.92	-98.49
	Přední	4	-449.18		-87.33		-117.20				-673.77	-131.00	-175.81
	Zadní	1	-227.59		-404.71		-580.47				-341.39	-607.07	-870.70
	Zadní	2	228.80		-390.80		578.59				343.20	-586.20	867.89

Tab. 21 Síly do závěsů varianty 3 a 6

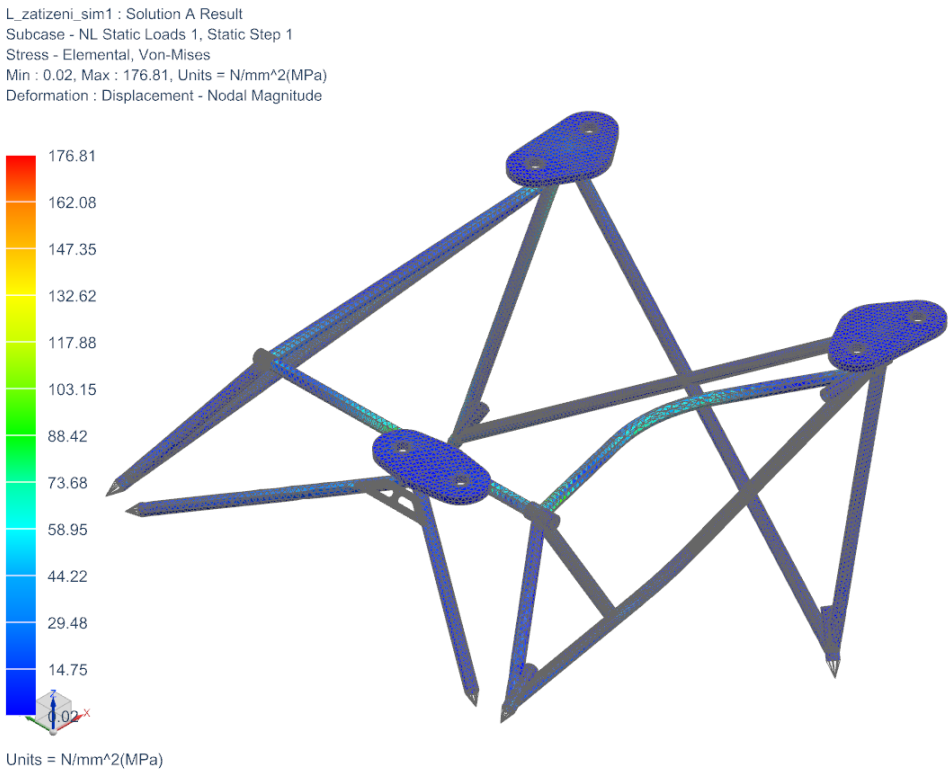
Červeně jsou označeny maximální hodnoty z porovnání sil působících v daném místě, směru a podle typu zatížení. Modrá barva naopak označuje minima. Z rozložení jednotlivých maxim vyplývá, že další výpočty týkající se namáhání závěsů by měly být provedeny pro všechny typy zatížení a body obálky.

Dále pak byly stanoveny reakce při nouzovém přistání viz. Tab. 22.

Nouzové přistání					
	Pozice		R_X $[N]$	R_Y $[N]$	R_Z $[N]$
nouzové	Přední	1	-6407.50	702.30	-1423.86
	Přední	2	-880.35	1764.02	-669.87
	Přední	3	-1290.61	-2130.70	-1092.73
	Přední	4	-7235.31	-852.60	-1501.78
	Zadní	1	844.98	-52.03	1835.56
	Zadní	2	1199.38	570.01	2763.96

Tab. 22 Síldy do závěsů od nouzového přistání

Na obrázku Obr. 28 je vidět rozložení napětí při zatěžovací variantě 1 v bodě A letové obálky.



Obr. 28 Rozložení napětí v loži

Varianta 1 a 4: maximální výkon a 75% zatížení				
	Provozní zatížení		Početní zatížení	
	$\sigma\ [N/mm^2]$	j [−]	$\sigma_P\ [N/mm^2]$	j_P [−]
A	176.81	4.98	266.04	4.06
C	192.35	4.57	288.53	3.74
D	172.23	5.11	258.35	4.18
E	89.70	9.81	134.55	8.03
F	100.15	8.79	150.23	7.19
G	88.12	9.99	132.18	8.17
Zleva	118.98	7.40	178.47	6.05
Zprava	80.00	11.00	120.00	9.00
Nouzové	-	-	661.08	1.63

Tab. 23 Napětí v loži při variantách 1 a 4

Varianta 2 a 5: maximální trvalý výkon a 100% zatížení				
	Provozní zatížení		Početní zatížení	
	$\sigma\ [N/mm^2]$	j [−]	$\sigma_P\ [N/mm^2]$	j_P [−]
A	195.93	4.49	293.90	3.67
C	216.65	4.06	324.98	3.32
D	189.77	4.64	284.66	3.79
E	94.19	9.34	141.29	7.64
F	113	7.79	169.50	6.37
G	92.06	9.56	138.09	7.82
Zleva	118.97	7.40	178.46	6.05
Zprava	67.01	13.13	100.52	10.74

Tab. 24 Napětí v loži při variantách 2 a 5

Varianta 3 a 6: maximální výkon a 100% zatížení				
	Provozní zatížení		Početní zatížení	
	$\sigma\ [N/mm^2]$	j [−]	$\sigma_P\ [N/mm^2]$	j_P [−]
A	202.51	4.35	303.77	3.56
C	223.24	3.94	334.86	3.23
D	196.36	4.48	294.54	3.67
E	98.34	8.95	147.51	7.32
F	112.8	7.80	169.20	6.38
G	96.21	9.15	144.32	7.48
Zleva	125.5	7.01	188.25	5.74
Zprava	73.51	11.97	110.27	9.79

Tab. 25 Napětí v loži při variantách 3 a 6

Výpočet jistoty je dán poměrem napětí na mezi kluzu a provozním napětím.

$$j = \frac{Rp0{,}2}{\sigma} \tag{10.43}$$

$$j = \frac{880}{176{,}81} = 4{,}98\ [-] \tag{10.44}$$

Naopak jistota bezporuchového provozu je dána poměrem napětí na mezi pevnosti a početním napětím.

$$j_P = \frac{Rm}{\sigma_P} \tag{10.45}$$

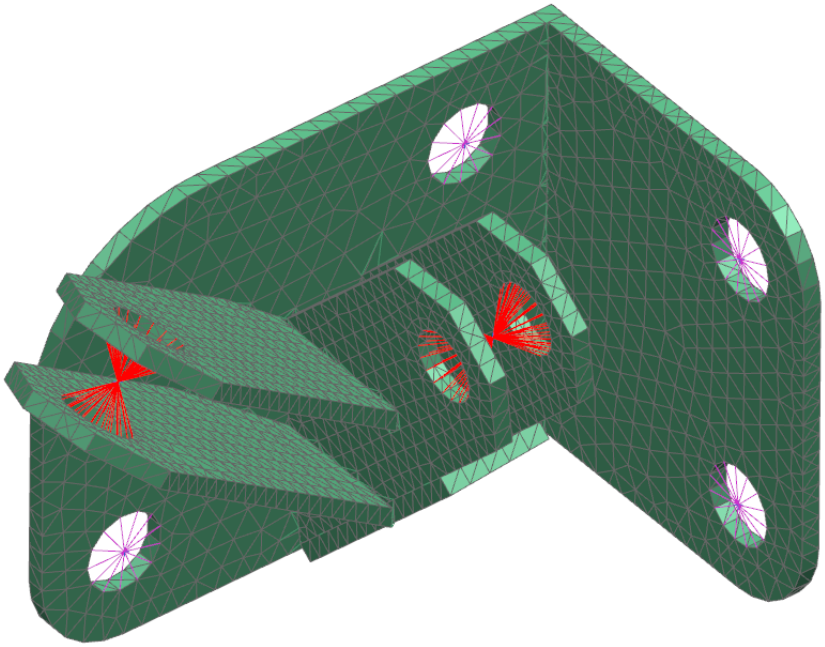
$$j_P = \frac{1080}{266{,}04} = 4{,}06\ [-] \tag{10.46}$$

Z výsledných jistot uvedených v tabulkách Tab. 23, Tab. 24 a Tab. 25 vyplývá, že během provozního zatížení nedojde k trvalý deformacím konstrukce a zároveň při početním zatížení nedojde k poruše.

10.4. Zatížení předního a zadního závěsu

Výpočetní model předního i zadního závěsu je principiálně stejný, proto bude celý postup demonstrován na pravém předním závěsu.

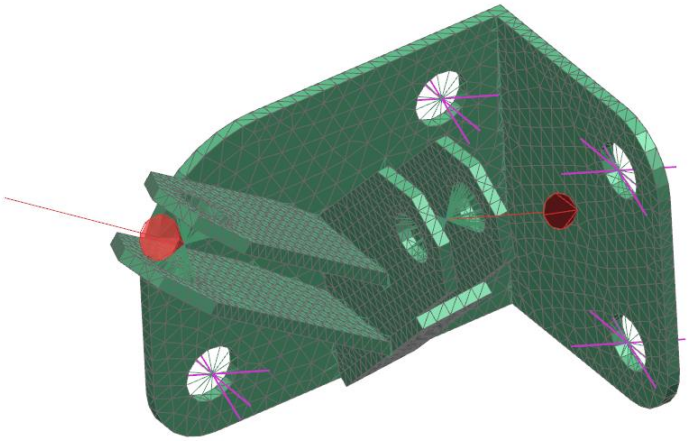
Z 3D modelu byl nejprve vytvořen FEM model. Jednotlivé konstrukční prvky jsou tvořeny sítí čtyřbokých elementů. Hustota sítě je optimalizována pro každý prvek. Propojení sítí na styčných plochách zajišťuje funkce „Mesh Mating“. V dírách pro šrouby, uchycující závěs k draku letadla, jsou vloženy 1D elementy „RBAR“ (fialové), spojující hranu otvoru s bodem ležícím na ose díry. Elementy „RBAR“ (červené) jsou využity v otvorech určených pro uložení čepu stavitelného oka, kde spojují vnitřní povrch otvoru s bodem představujícím průsečík osy čepu a osy závitu oka.



Obr. 29 FEM model pravého předního závěsu

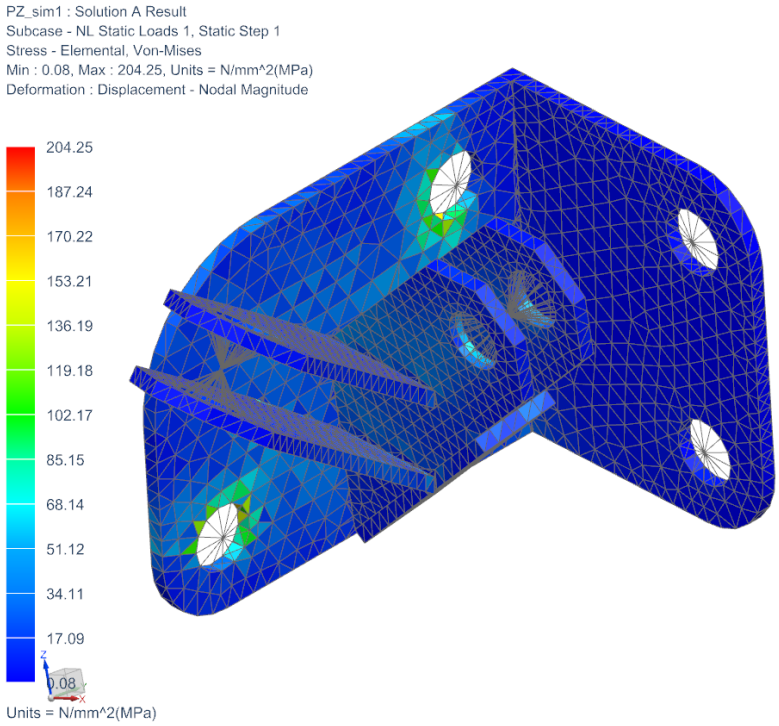
V SIM modelu byly vloženy síly dle předchozích tabulek Tab. 19, Tab. 20, Tab. 21 a Tab. 22. Jejich působiště leží v již zmíněných bodech příslušných průsečíků os čepů a os závitů ok. Na body v otvorech pro šrouby byla vložena fixní vazba, která je znázorněna fialově na obrázku Obr. 30.

Pro řešení nouzového přistání u předního závěsu byla přidána vazba reprezentující opření desky o drak letadla. Bez tohoto omezení docházelo při výpočtu k deformacím, které s ohledem na konstrukci nemohly nastat.



Obr. 30 SIM model pravého předního závěsu

Obrázek Obr. 31 zachycuje rozložení napětí při zatížení variantou 1 v bodě A letové obálky. Dá se však předpokládat, že reálné hodnoty napětí budou v některých případech nižší. Důvodem je nepřesné zavedení konstrukčních omezení, konkrétně nezadefinování možnosti opření destičky se šrouby v celé své ploše o drak letadla, jak tomu bylo nastaveno u nouzového přistání. Výhodou by byla lepší distribuce napětí, na druhou stranu nelze s určitostí říci, pro které případy to lze uvažovat.



Obr. 31 Rozložení napětí v pravém předním závěsu

S ohledem na podobnost pravého a levého závěsu jsou uvedeny pouze maximální vzniklá napětí v předním a zadním závěsu. Uvedené jistoty jsou spočteny podle již uvedených rovnic (10.43) a (10.45).

Varianta 1 a 4: maximální výkon a 75% zatížení				
	Provozní zatížení		Početní zatížení	
	$\sigma\ [N/mm^2]$	j $[-]$	$\sigma_P\ [N/mm^2]$	$j_P\ [-]$
A	204.25	4.31	306.38	3.53
C	212.57	4.14	318.86	3.39
D	166.39	5.29	249.59	4.33
E	154.65	5.69	231.98	4.66
F	188.26	4.67	282.39	3.82
G	145.11	6.06	217.67	4.96
Zleva	80.01	11.00	120.02	9.00
Zprava	61.00	14.43	91.50	11.80
Nouzové	-	-	460.37	2.35

Tab. 26 Napětí v předním závěsu při variantách 1 a 4

Varianta 2 a 5: maximální trvalý výkon a 100% zatížení				
	Provozní zatížení		Početní zatížení	
	$\sigma\ [N/mm^2]$	j $[-]$	$\sigma_P\ [N/mm^2]$	$j_P\ [-]$
A	253.23	3.48	379.85	2.84
C	302.03	2.91	453.05	2.38
D	212.64	4.14	318.96	3.39
E	181.71	4.84	272.57	3.96
F	226.49	3.89	339.74	3.18
G	169.00	5.21	253.50	4.26
Zleva	81.93	10.74	122.90	8.79
Zprava	53.29	16.51	79.94	13.51

Tab. 27 Napětí v předním závěsu při variantách 2 a 5

Varianta 3 a 6: maximální výkon a 100% zatížení				
	Provozní zatížení		Početní zatížení	
	$\sigma\ [N/mm^2]$	j $[-]$	$\sigma_P\ [N/mm^2]$	$j_P\ [-]$
A	249.24	3.53	373.86	2.89
C	298.12	2.95	447.18	2.42
D	208.65	4.22	312.98	3.45
E	185.68	4.74	278.52	3.88
F	230.46	3.82	345.69	3.12
G	172.98	5.09	259.47	4.16
Zleva	85.95	10.24	128.93	8.38
Zprava	57.58	15.28	86.37	12.50

Tab. 28 Napětí v předním závěsu při variantách 3 a 6

Varianta 1 a 4: maximální výkon a 75% zatížení				
	Provozní zatížení		Početní zatížení	
	$\sigma\ [N/mm^2]$	j $[-]$	$\sigma_P\ [N/mm^2]$	$j_P\ [-]$
A	256.57	3.43	384.86	2.81
C	278.33	3.16	417.50	2.59
D	249.95	3.52	374.93	2.88
E	158.93	5.54	238.40	4.53
F	172.67	5.10	259.01	4.17
G	156.39	5.63	234.59	4.60
Zleva	149.97	5.87	224.96	4.80
Zprava	170.64	5.16	255.96	4.22
Nouzové	-	-	222.42	4.86

Tab. 29 Napětí v zadním závěsu při variantách 1 a 4

Varianta 2 a 5: maximální trvalý výkon a 100% zatížení				
	Provozní zatížení		Početní zatížení	
	$\sigma\ [N/mm^2]$	j $[-]$	$\sigma_P\ [N/mm^2]$	$j_P\ [-]$
A	283.90	3.10	425.85	2.54
C	312.17	2.82	468.26	2.31
D	274.24	3.21	411.36	2.63
E	162.54	5.41	243.81	4.43
F	180.83	4.87	271.25	3.98
G	159.14	5.53	238.71	4.52
Zleva	141.21	6.23	211.82	5.10
Zprava	169.80	5.18	254.70	4.24

Tab. 30 Napětí v zadním závěsu při variantách 2 a 5

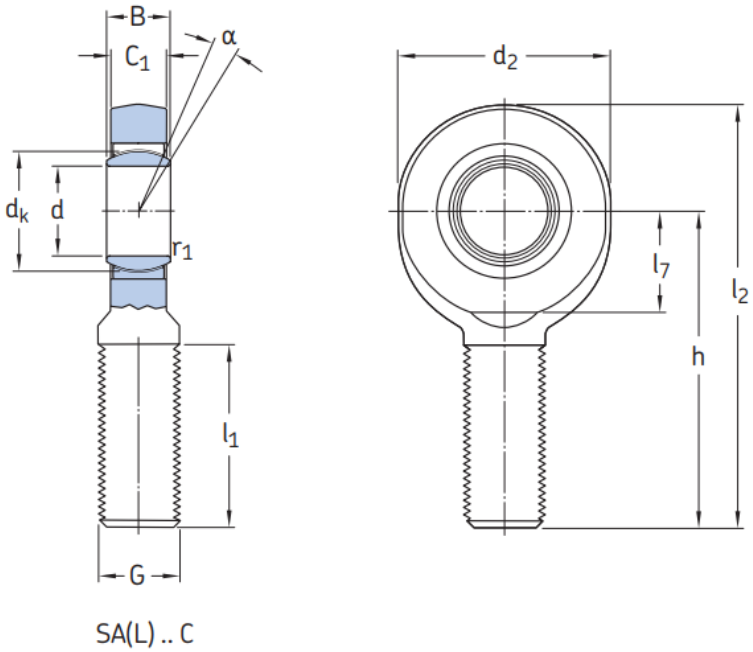
Varianta 3 a 6: maximální výkon a 100% zatížení				
	Provozní zatížení		Početní zatížení	
	$\sigma\ [N/mm^2]$	j $[-]$	$\sigma_P\ [N/mm^2]$	$j_P\ [-]$
A	292.81	3.01	439.22	2.46
C	322.04	2.73	483.06	2.24
D	283.93	3.10	425.90	2.54
E	170.62	5.16	255.93	4.22
F	188.92	4.66	283.38	3.81
G	167.23	5.26	250.85	4.31
Zleva	150.74	5.84	226.11	4.78
Zprava	179.21	4.91	268.82	4.02

Tab. 31 Napětí v zadním závěsu při variantách 3 a 6

Z vypočtených jistot lze říci, že přední i zadní závěsy pevnostně vydrží. Dalším výstupem z výpočetních modelů mohou být síly působících ve šroubech, spojující závěsy s trupem, pro návrh tohoto spoje.

10.5. Kontrola stavitelných ok

K zavěšení lože do závěsů jsou použita stavitelná oka s katalogovým označením SA 8 C od společnosti SKF. Alternativu představují stavitelná oka dle normy ONL 3779, jejichž nevýhodou je vyšší hmotnost a horší dostupnost na trhu.



Obr. 32 Stavitelné oko SA 8 C [13]

V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty rozměrů a přípustných zatížení.

$d\ [mm]$	8
$d_2\ [mm]$	25
G	M8
$B\ [mm]$	8
$C_1\ [mm]$	6,5
$h\ [mm]$	42
$\alpha\ [°]$	15
Dynamické zatížení $C\ [kN]$	5,85
Statické zatížení $C_0\ [kN]$	12,9
Hmotnost $[kg]$	0,03

Tab. 32 Základní parametry oka SA 8 C

Dynamické a statické zatížení odpovídá provoznímu zatížení. Součinitel bezpečnosti k pro výpočet početního přípustného zatížení, nebyl uveden. Proto byl s ohledem na použitý součinitel bezpečnosti v kapitole 10.1 a běžnou praxi ve strojírenství stanoven na $k = 1{,}5$.

Jistoty stavitelných ok jsou vztaženy k početnímu a nouzovému zatížení. Poměr sil od početního a provozního zatížení je roven součiniteli bezpečnosti k použitého pro stavitelné oko. Z toho plyne, že pokud součást vyhoví pro početní zatížení, vyhoví i pro provozní zatížení.

Níže je ukázkový výpočet jistoty stavitelného oka při maximální síle od početního a nouzového zatížení.

Početní zatížení:

$$j_P = \frac{C \cdot k}{F_{Pmax}} \tag{10.47}$$

$$j_P = \frac{5850 \cdot 1{,}5}{4198{,}35} = 2{,}09\ [-] \tag{10.48}$$

Nouzové přistání:

$$j_N = \frac{C \cdot k}{F_{Nmax}} \tag{10.49}$$

$$j_N = \frac{5850 \cdot 1{,}5}{7226.08} = 1{,}21\ [-] \tag{10.50}$$

Vypočtené jistoty ukazují, že stavitelná oka pevnostně vydrží.

Nouzové přistání				
	Pozice		F_n $[N]$	j_n $[-]$
nouzové	Přední	1	6594.23	1.33
	Přední	2	2082.11	4.21
	Přední	3	2720.13	3.23
	Přední	4	7385.18	1.19
	Zadní	1	2016.58	4.35
	Zadní	2	3063.13	2.86

Tab. 33 Kontrola stavitelných ok při nouzovém přistání

			Varianta 4		Varianta 5		Varianta 6	
	Pozice		F_p $[N]$	j_p $[-]$	F_p $[N]$	j_p $[-]$	F_p $[N]$	j_p $[-]$
A	Přední	1	2193.70	4.00	2576.46	3.41	2633.55	3.33
	Přední	2	1352.32	6.49	1772.33	4.95	1777.40	4.94
	Přední	3	823.50	10.66	1108.60	7.92	1106.89	7.93
	Přední	4	993.44	8.83	1645.58	5.33	1592.45	5.51
	Zadní	1	3825.32	2.29	4289.20	2.05	4422.03	1.98
	Zadní	2	398.23	22.04	1020.46	8.60	909.31	9.65
C	Přední	1	2246.49	3.91	2648.42	3.31	2704.71	3.24
	Přední	2	1762.72	4.98	2320.04	3.78	2325.08	3.77
	Přední	3	1154.07	7.60	1550.20	5.66	1547.77	5.67
	Přední	4	1149.50	7.63	1850.65	4.74	1798.47	4.88
	Zadní	1	4198.74	2.09	4789.33	1.83	4920.29	1.78
	Zadní	2	655.75	13.38	1546.77	5.67	1427.37	6.15
D	Přední	1	1775.93	4.94	2019.98	4.34	2077.19	4.22
	Přední	2	1519.52	5.77	1995.63	4.40	2000.61	4.39
	Přední	3	1025.31	8.56	1377.84	6.37	1376.19	6.38
	Přední	4	588.21	14.92	1070.51	8.20	1021.41	8.59
	Zadní	1	3738.09	2.35	4172.85	2.10	4305.86	2.04
	Zadní	2	391.04	22.44	837.36	10.48	735.38	11.93
E	Přední	1	531.28	16.52	366.09	23.97	421.24	20.83
	Přední	2	661.94	13.26	914.05	9.60	908.75	9.66
	Přední	3	581.51	15.09	764.97	11.47	766.67	11.45
	Přední	4	1412.59	6.21	1546.77	5.67	1601.76	5.48
	Zadní	1	1221.95	7.18	820.80	10.69	952.65	9.21
	Zadní	2	2958.66	2.97	3136.46	2.80	3268.73	2.68
F	Přední	1	483.26	18.16	315.37	27.82	366.63	23.93
	Přední	2	1026.64	8.55	1399.31	6.27	1394.23	6.29
	Přední	3	873.09	10.05	1153.09	7.61	1154.83	7.60
	Přední	4	1552.82	5.65	1735.26	5.06	1789.87	4.90
	Zadní	1	888.35	9.88	397.94	22.05	521.62	16.82
	Zadní	2	3330.95	2.63	3632.84	2.42	3765.06	2.33
G	Přední	1	636.90	13.78	503.31	17.43	559.66	15.68
	Přední	2	681.75	12.87	940.43	9.33	935.26	9.38
	Přední	3	614.20	14.29	808.50	10.85	810.19	10.83
	Přední	4	1290.16	6.80	1384.22	6.34	1438.85	6.10
	Zadní	1	1263.23	6.95	875.20	10.03	1007.09	8.71
	Zadní	2	2899.16	3.03	3056.96	2.87	3189.19	2.75
boční zleva	Přední	1	1042.25	8.42	1039.75	8.44	1097.07	8.00
	Přední	2	408.79	21.47	513.72	17.08	518.73	16.92
	Přední	3	220.33	39.83	283.42	30.96	285.17	30.77
	Přední	4	963.54	9.11	945.12	9.28	1000.60	8.77
	Zadní	1	2906.76	3.02	3076.83	2.85	3207.23	2.74
	Zadní	2	2915.76	3.01	3090.62	2.84	3220.59	2.72
boční zprava	Přední	1	714.09	12.29	601.98	14.58	659.25	13.31
	Přední	2	251.30	34.92	366.50	23.94	361.46	24.28
	Přední	3	168.46	52.09	234.96	37.35	233.28	37.61
	Přední	4	743.02	11.81	651.11	13.48	706.78	12.42
	Zadní	1	1291.11	6.80	1007.06	8.71	1114.93	7.87
	Zadní	2	1278.01	6.87	995.60	8.81	1102.04	7.96

Tab. 34 Kontrola stavitelných ok při zatížení variantami 4, 5 a 6

10.6. Kontrola otlačení závitů

Následující kapitola se týká spojení stavitelného oka a závitové vložky. Kontroluje se závit M8 s roztečí $P = 1{,}25\ mm$, malým průměrem $D_1 = 6{,}647\ mm$ a délkou závitu $l = 10\ mm$, při dovoleném tlaku v závitu $p_{dov} = 120\ MPa$.

Jistoty závitů jsou vztaženy k početnímu a nouzovému zatížení. Poměr sil od početního a provozního zatížení je roven součiniteli bezpečnosti $k = 1{,}5$. Z toho vyplývá, že pokud součást vyhoví pro početní zatížení, vyhoví i pro provozní zatížení.

Níže je ukázkový výpočet jistoty stavitelného oka při maximální síle od početního a nouzového zatížení.

Početní zatížení:

$$p_p = \frac{F_p}{\frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - D_1^2) \cdot \frac{l}{P}} \tag{10.51}$$

$$p_p = \frac{4198{,}35}{\frac{\pi}{4} \cdot (8^2 - 6{,}647^2) \cdot \frac{10}{1{,}25}} = 33{,}72\ MPa \tag{10.52}$$

Jistota:

$$j_P = \frac{p_{dov}}{p_p} \tag{10.53}$$

$$j_P = \frac{120}{33{,}72} = 3{,}56\ [-] \tag{10.54}$$

Nouzové zatížení:

$$p_n = \frac{F_n}{\frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - D_1^2) \cdot \frac{l}{P}} \tag{10.55}$$

$$p_n = \frac{7226.08}{\frac{\pi}{4} \cdot (8^2 - 6{,}647^2) \cdot \frac{10}{1{,}25}} = 58{,}03\ MPa \tag{10.56}$$

Jistota pro početní zatížení:

$$j_n = \frac{p_{dov}}{p_n} \tag{10.57}$$

$$j_n = \frac{120}{58{,}03} = 2{,}07\ [-] \tag{10.58}$$

Jistoty uvedené v tabulce níže dokazují, že nedojde k otlačení závitů.

			Varianta 4			Varianta 5			Varianta 6		
	Pozice		F_p $[N]$	p_p $[MPa]$	j_p $[-]$	F_p $[N]$	p_p $[MPa]$	j_p $[-]$	F_p $[N]$	p_p $[MPa]$	j_p $[-]$
A	Přední	1	2118.84	17.02	7.05	2481.38	19.93	6.02	2537.69	20.38	5.89
	Přední	2	1351.94	10.86	11.05	1771.82	14.23	8.43	1776.89	14.27	8.41
	Přední	3	823.32	6.61	18.15	1108.37	8.90	13.48	1106.66	8.89	13.50
	Přední	4	831.65	6.68	17.97	1443.65	11.59	10.35	1388.79	11.15	10.76
	Zadní	1	3289.98	26.42	4.54	3670.97	29.48	4.07	3788.19	30.42	3.94
	Zadní	2	143.42	1.15	104.18	525.74	4.22	28.42	408.27	3.28	36.60
C	Přední	1	2160.77	17.35	6.92	2538.20	20.38	5.89	2593.87	20.83	5.76
	Přední	2	1762.36	14.15	8.48	2319.57	18.63	6.44	2324.61	18.67	6.43
	Přední	3	1153.92	9.27	12.95	1550.00	12.45	9.64	1547.57	12.43	9.66
	Přední	4	944.01	7.58	15.83	1594.22	12.80	9.37	1539.48	12.36	9.71
	Zadní	1	3597.45	28.89	4.15	4081.56	32.78	3.66	4198.35	33.72	3.56
	Zadní	2	173.22	1.39	86.26	945.66	7.59	15.80	830.65	6.67	17.99
D	Přední	1	1707.82	13.72	8.75	1933.32	15.53	7.73	1989.86	15.98	7.51
	Přední	2	1519.30	12.20	9.83	1995.33	16.02	7.49	2000.32	16.06	7.47
	Přední	3	1025.21	8.23	14.57	1377.72	11.06	10.85	1376.07	11.05	10.86
	Přední	4	374.78	3.01	39.87	835.08	6.71	17.89	780.21	6.27	19.15
	Zadní	1	3210.31	25.78	4.65	3564.65	28.63	4.19	3682.02	29.57	4.06
	Zadní	2	269.54	2.16	55.44	357.79	2.87	41.76	240.33	1.93	62.17
E	Přední	1	530.96	4.26	28.14	363.92	2.92	41.06	420.22	3.37	35.56
	Přední	2	661.76	5.31	22.58	913.83	7.34	16.35	908.53	7.30	16.45
	Přední	3	581.44	4.67	25.70	764.87	6.14	19.54	766.57	6.16	19.49
	Přední	4	1340.42	10.76	11.15	1453.14	11.67	10.28	1507.81	12.11	9.91
	Zadní	1	1115.11	8.96	13.40	770.72	6.19	19.39	887.94	7.13	16.83
	Zadní	2	2525.53	20.28	5.92	2650.98	21.29	5.64	2768.30	22.23	5.40
F	Přední	1	482.60	3.88	30.96	299.78	2.41	49.84	356.06	2.86	41.97
	Přední	2	1026.43	8.24	14.56	1399.05	11.24	10.68	1393.97	11.20	10.72
	Přední	3	873.00	7.01	17.12	1152.97	9.26	12.96	1154.71	9.27	12.94
	Přední	4	1452.42	11.66	10.29	1601.73	12.86	9.33	1656.46	13.30	9.02
	Zadní	1	834.50	6.70	17.91	397.29	3.19	37.61	514.55	4.13	29.04
	Zadní	2	2815.58	22.61	5.31	3036.90	24.39	4.92	3154.27	25.33	4.74
G	Přední	1	635.57	5.10	23.51	503.22	4.04	29.69	559.66	4.49	26.70
	Přední	2	681.62	5.47	21.92	940.26	7.55	15.89	935.09	7.51	15.98
	Přední	3	614.15	4.93	24.33	808.43	6.49	18.48	810.12	6.51	18.44
	Přední	4	1220.73	9.80	12.24	1293.67	10.39	11.55	1348.12	10.83	11.08
	Zadní	1	1151.16	9.25	12.98	818.67	6.57	18.25	935.79	7.52	15.97
	Zadní	2	2477.54	19.90	6.03	2586.99	20.78	5.78	2704.25	21.72	5.53
boční zleva	Přední	1	1024.28	8.23	14.59	1021.83	8.21	14.62	1078.16	8.66	13.86
	Přední	2	408.77	3.28	36.55	513.70	4.13	29.09	518.71	4.17	28.81
	Přední	3	220.31	1.77	67.82	283.39	2.28	52.72	285.14	2.29	52.40
	Přední	4	940.19	7.55	15.89	919.92	7.39	16.24	974.44	7.83	15.33
	Zadní	1	2309.95	18.55	6.47	2364.26	18.99	6.32	2481.48	19.93	6.02
	Zadní	2	2324.57	18.67	6.43	2382.92	19.14	6.27	2500.22	20.08	5.98
boční zprava	Přední	1	701.75	5.64	21.29	591.57	4.75	25.26	647.86	5.20	23.06
	Přední	2	251.30	2.02	59.46	366.50	2.94	40.77	361.45	2.90	41.34
	Přední	3	168.46	1.35	88.70	234.96	1.89	63.59	233.28	1.87	64.05
	Přední	4	734.49	5.90	20.34	645.50	5.18	23.15	700.25	5.62	21.34
	Zadní	1	1281.21	10.29	11.66	992.49	7.97	15.05	1109.71	8.91	13.46
	Zadní	2	1270.23	10.20	11.76	977.09	7.85	15.29	1094.45	8.79	13.65

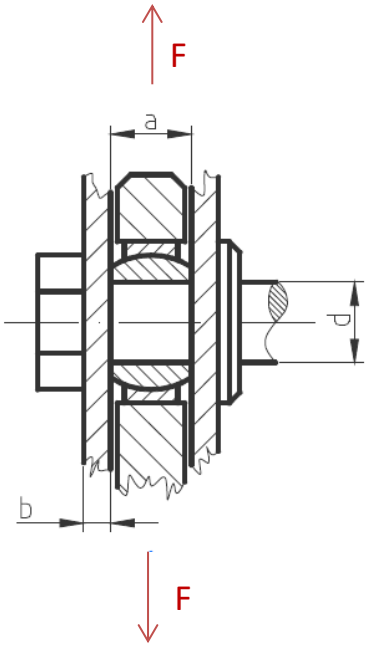
Tab. 35 Kontrola závitu M8 při zatížení variantami 4, 5 a 6

Nouzové přistání					
	Pozice		F_n $[N]$	p_n $[MPa]$	j_n $[-]$
nouzové	Přední	1	6463.80	51.91	2.31
	Přední	2	2080.34	16.71	7.18
	Přední	3	2720.01	21.84	5.49
	Přední	4	7226.08	58.03	2.07
	Zadní	1	1765.06	14.18	8.47
	Zadní	2	2474.00	19.87	6.04

Tab. 36 Kontrola závitu M8 při nouzovém přistání

10.7. Kontrola čepů

Stavitelná oka jsou v závěsu zajištěna šesti čepy 8x18x2, podle normy ISO 2341 typ B. Použitý materiál je ocel ČSN 11 600.0, s minimální mezí kluzu $R_e = 295\ MPa$ a minimální mezí pevnosti $R_m = 590\ MPa$. Čepy jsou kontrolovány na ohyb, střih a otlačení stykových ploch.



Obr. 33 Schématický obrázek uložení čepu, včetně rozměrů pro výpočet

Následující ukázkové výpočty jsou provedeny pro maximální sílu při početním zatížení. Jistoty pro početní a nouzové zatížení jsou vztaženy k mezi pevnosti R_m, naopak jistoty pro provozní zatížení jsou vztaženy k mezi kluzu R_e.

10.7.1. Kontrola na ohyb:

Ohybové napětí je dáno poměrem ohybového momentu M_o a průřezového modulu v ohybu W_o. Rovnice (10.59) je upravena pro výpočet čepu.

$$\sigma_{op} = \frac{M_{op}}{W_o} = \frac{4 \cdot F_p \cdot (a + 2 \cdot b)}{\pi \cdot d^3} \tag{10.59}$$

$$\sigma_{op} = \frac{4 \cdot 4920{,}29 \cdot (8 + 2 \cdot 2)}{\pi \cdot 8^3} = 146{,}83\ MPa \tag{10.60}$$

Jistota:

$$j_p = \frac{R_m}{\sigma_{op}} \tag{10.61}$$

$$j_p = \frac{590}{146{,}83} = 4{,}02\ [-] \tag{10.62}$$

10.7.2. Kontrola na střih:

Výpočet smykového napětí:

$$\tau_p = \frac{4 \cdot F_p}{\pi \cdot d^2} \tag{10.63}$$

$$\tau_p = \frac{4 \cdot 4920{,}29}{\pi \cdot 8^2} = 97{,}89\ MPa \tag{10.64}$$

Maximální dovolené smykové napětí:

$$\tau_{max} = \frac{R_m}{\sqrt{3}} \tag{10.65}$$

$$\tau_{max} = \frac{590}{\sqrt{3}} = 340{,}64\ MPa \tag{10.66}$$

Jistota:

$$j_{\tau p} = \frac{\tau_{max}}{\tau_p} \tag{10.67}$$

$$j_{\tau p} = \frac{340{,}64}{97{,}89} = 3{,}48\ [-] \tag{10.68}$$

10.7.3. Otlačení stykových ploch v místě opření o závěs

Napětí ve stykové ploše:

$$\sigma_{otlp} = \frac{F_p}{2 \cdot d \cdot b} \tag{10.69}$$

$$\sigma_{otlp} = \frac{4920{,}29}{2 \cdot 8 \cdot 2} = 153{,}76 \tag{10.70}$$

Jistota:

$$j_{otlp} = \frac{R_m}{\sigma_{otlp}} \tag{10.71}$$

$$j_{otlp} = \frac{590}{153{,}76} = 3{,}84\ [-] \tag{10.72}$$

Vypočtené jistoty v následujících tabulkách prokazují, že čepy splňují dané požadavky.

Varianta 1									
	Pozice		F $[N]$	σ_o $[MPa]$	j $[-]$	τ $[MPa]$	j_τ $[-]$	σ_{otl} $[MPa]$	j_{otl} $[-]$
A	Přední	1	1462.47	43.64	6.76	29.09	5.85	45.70	6.45
	Přední	2	901.55	26.90	10.97	17.94	9.50	28.17	10.47
	Přední	3	549.00	16.38	18.01	10.92	15.59	17.16	17.19
	Přední	4	662.29	19.76	14.93	13.18	12.93	20.70	14.25
	Zadní	1	2550.21	76.10	3.88	50.73	3.36	79.69	3.70
	Zadní	2	265.49	7.92	37.24	5.28	32.25	8.30	35.56
C	Přední	1	1497.66	44.69	6.60	29.80	5.72	46.80	6.30
	Přední	2	1175.15	35.07	8.41	23.38	7.29	36.72	8.03
	Přední	3	769.38	22.96	12.85	15.31	11.13	24.04	12.27
	Přední	4	766.33	22.87	12.90	15.25	11.17	23.95	12.32
	Zadní	1	2799.16	83.53	3.53	55.69	3.06	87.47	3.37
	Zadní	2	437.17	13.05	22.61	8.70	19.58	13.66	21.59
D	Přední	1	1183.95	35.33	8.35	23.55	7.23	37.00	7.97
	Přední	2	1013.01	30.23	9.76	20.15	8.45	31.66	9.32
	Přední	3	683.54	20.40	14.46	13.60	12.52	21.36	13.81
	Přední	4	392.14	11.70	25.21	7.80	21.83	12.25	24.07
	Zadní	1	2492.06	74.37	3.97	49.58	3.44	77.88	3.79
	Zadní	2	260.69	7.78	37.92	5.19	32.84	8.15	36.21
E	Přední	1	354.19	10.57	27.91	7.05	24.17	11.07	26.65
	Přední	2	441.30	13.17	22.40	8.78	19.40	13.79	21.39
	Přední	3	387.67	11.57	25.50	7.71	22.08	12.11	24.35
	Přední	4	941.73	28.10	10.50	18.74	9.09	29.43	10.02
	Zadní	1	814.63	24.31	12.13	16.21	10.51	25.46	11.59
	Zadní	2	1972.44	58.86	5.01	39.24	4.34	61.64	4.79
F	Přední	1	322.17	9.61	30.68	6.41	26.57	10.07	29.30
	Přední	2	684.42	20.42	14.44	13.62	12.51	21.39	13.79
	Přední	3	582.06	17.37	16.98	11.58	14.71	18.19	16.22
	Přední	4	1035.21	30.89	9.55	20.59	8.27	32.35	9.12
	Zadní	1	592.23	17.67	16.69	11.78	14.46	18.51	15.94
	Zadní	2	2220.63	66.27	4.45	44.18	3.86	69.39	4.25
G	Přední	1	424.60	12.67	23.28	8.45	20.16	13.27	22.23
	Přední	2	454.50	13.56	21.75	9.04	18.84	14.20	20.77
	Přední	3	409.47	12.22	24.14	8.15	20.91	12.80	23.05
	Přední	4	860.11	25.67	11.49	17.11	9.95	26.88	10.98
	Zadní	1	842.15	25.13	11.74	16.75	10.17	26.32	11.21
	Zadní	2	1932.77	57.68	5.11	38.45	4.43	60.40	4.88
boční zleva	Přední	1	694.84	20.73	14.23	13.82	12.32	21.71	13.59
	Přední	2	272.53	8.13	36.27	5.42	31.41	8.52	34.64
	Přední	3	146.89	4.38	67.30	2.92	58.28	4.59	64.27
	Přední	4	642.36	19.17	15.39	12.78	13.33	20.07	14.70
	Zadní	1	1937.84	57.83	5.10	38.55	4.42	60.56	4.87
	Zadní	2	1943.84	58.01	5.09	38.67	4.40	60.75	4.86
boční zprava	Přední	1	476.06	14.21	20.77	9.47	17.98	14.88	19.83
	Přední	2	167.53	5.00	59.01	3.33	51.10	5.24	56.35
	Přední	3	112.31	3.35	88.02	2.23	76.23	3.51	84.05
	Přední	4	495.34	14.78	19.96	9.85	17.28	15.48	19.06
	Zadní	1	860.74	25.69	11.48	17.12	9.95	26.90	10.97
	Zadní	2	852.00	25.43	11.60	16.95	10.05	26.63	11.08

Tab. 37 Kontrola čepů při zatížení variantou 1

Varianta 2									
	Pozice		F $[N]$	σ_o $[MPa]$	j $[-]$	τ $[MPa]$	j_τ $[-]$	σ_{otl} $[MPa]$	j_{otl} $[-]$
A	Přední	1	1717.64	51.26	5.76	34.17	4.98	53.68	5.50
	Přední	2	1181.55	35.26	8.37	23.51	7.25	36.92	7.99
	Přední	3	739.07	22.05	13.38	14.70	11.58	23.10	12.77
	Přední	4	1097.05	32.74	9.01	21.83	7.80	34.28	8.60
	Zadní	1	2859.47	85.33	3.46	56.89	2.99	89.36	3.30
	Zadní	2	680.31	20.30	14.53	13.53	12.58	21.26	13.88
C	Přední	1	1765.61	52.69	5.60	35.13	4.85	55.18	5.35
	Přední	2	1546.69	46.16	6.39	30.77	5.54	48.33	6.10
	Přední	3	1033.47	30.84	9.57	20.56	8.28	32.30	9.13
	Přední	4	1233.77	36.82	8.01	24.55	6.94	38.56	7.65
	Zadní	1	3192.89	95.28	3.10	63.52	2.68	99.78	2.96
	Zadní	2	1031.18	30.77	9.59	20.51	8.30	32.22	9.15
D	Přední	1	1346.66	40.19	7.34	26.79	6.36	42.08	7.01
	Přední	2	1330.42	39.70	7.43	26.47	6.43	41.58	7.10
	Přední	3	918.56	27.41	10.76	18.27	9.32	28.71	10.28
	Přední	4	713.68	21.30	13.85	14.20	12.00	22.30	13.23
	Zadní	1	2781.90	83.02	3.55	55.34	3.08	86.93	3.39
	Zadní	2	558.24	16.66	17.71	11.11	15.34	17.45	16.91
E	Přední	1	244.06	7.28	40.50	4.86	35.08	7.63	38.68
	Přední	2	609.37	18.18	16.22	12.12	14.05	19.04	15.49
	Přední	3	509.98	15.22	19.38	10.15	16.79	15.94	18.51
	Přední	4	1031.18	30.77	9.59	20.51	8.30	32.22	9.15
	Zadní	1	547.20	16.33	18.07	10.89	15.65	17.10	17.25
	Zadní	2	2090.97	62.40	4.73	41.60	4.09	65.34	4.51
F	Přední	1	210.25	6.27	47.02	4.18	40.72	6.57	44.90
	Přední	2	932.87	27.84	10.60	18.56	9.18	29.15	10.12
	Přední	3	768.73	22.94	12.86	15.29	11.14	24.02	12.28
	Přední	4	1156.84	34.52	8.55	23.01	7.40	36.15	8.16
	Zadní	1	265.29	7.92	37.26	5.28	32.27	8.29	35.58
	Zadní	2	2421.90	72.27	4.08	48.18	3.53	75.68	3.90
G	Přední	1	335.54	10.01	29.46	6.68	25.51	10.49	28.13
	Přední	2	626.95	18.71	15.77	12.47	13.66	19.59	15.06
	Přední	3	539.00	16.08	18.34	10.72	15.88	16.84	17.51
	Přední	4	922.81	27.54	10.71	18.36	9.28	28.84	10.23
	Zadní	1	583.47	17.41	16.94	11.61	14.67	18.23	16.18
	Zadní	2	2037.97	60.82	4.85	40.54	4.20	63.69	4.63
boční zleva	Přední	1	693.17	20.69	14.26	13.79	12.35	21.66	13.62
	Přední	2	342.48	10.22	28.86	6.81	25.00	10.70	27.56
	Přední	3	188.95	5.64	52.32	3.76	45.31	5.90	49.96
	Přední	4	630.08	18.80	15.69	12.54	13.59	19.69	14.98
	Zadní	1	2051.22	61.21	4.82	40.81	4.17	64.10	4.60
	Zadní	2	2060.42	61.49	4.80	40.99	4.16	64.39	4.58
boční zprava	Přední	1	401.32	11.98	24.63	7.98	21.33	12.54	23.52
	Přední	2	244.34	7.29	40.46	4.86	35.04	7.64	38.64
	Přední	3	156.64	4.67	63.11	3.12	54.66	4.89	60.27
	Přední	4	434.07	12.95	22.77	8.64	19.72	13.56	21.75
	Zadní	1	671.37	20.03	14.72	13.36	12.75	20.98	14.06
	Zadní	2	663.73	19.81	14.89	13.20	12.90	20.74	14.22

Tab. 38 Kontrola čepů při zatížení variantou 2

Varianta 3									
	Pozice		F $[N]$	σ_o $[MPa]$	j $[-]$	τ $[MPa]$	j_τ $[-]$	σ_{otl} $[MPa]$	j_{otl} $[-]$
A	Přední	1	1755.70	52.39	5.63	34.93	4.88	54.87	5.38
	Přední	2	1184.93	35.36	8.34	23.57	7.23	37.03	7.97
	Přední	3	737.93	22.02	13.40	14.68	11.60	23.06	12.79
	Přední	4	1061.63	31.68	9.31	21.12	8.06	33.18	8.89
	Zadní	1	2948.02	87.97	3.35	58.65	2.90	92.13	3.20
	Zadní	2	606.21	18.09	16.31	12.06	14.12	18.94	15.57
C	Přední	1	1803.14	53.81	5.48	35.87	4.75	56.35	5.24
	Přední	2	1550.05	46.26	6.38	30.84	5.52	48.44	6.09
	Přední	3	1031.85	30.79	9.58	20.53	8.30	32.25	9.15
	Přední	4	1198.98	35.78	8.24	23.85	7.14	37.47	7.87
	Zadní	1	3280.20	97.89	3.01	65.26	2.61	102.51	2.88
	Zadní	2	951.58	28.40	10.39	18.93	9.00	29.74	9.92
D	Přední	1	1384.80	41.32	7.14	27.55	6.18	43.27	6.82
	Přední	2	1333.74	39.80	7.41	26.53	6.42	41.68	7.08
	Přední	3	917.46	27.38	10.77	18.25	9.33	28.67	10.29
	Přední	4	680.94	20.32	14.52	13.55	12.57	21.28	13.86
	Zadní	1	2870.57	85.66	3.44	57.11	2.98	89.71	3.29
	Zadní	2	490.25	14.63	20.16	9.75	17.46	15.32	19.26
E	Přední	1	280.82	8.38	35.20	5.59	30.49	8.78	33.62
	Přední	2	605.83	18.08	16.32	12.05	14.13	18.93	15.58
	Přední	3	511.11	15.25	19.34	10.17	16.75	15.97	18.47
	Přední	4	1067.84	31.87	9.26	21.24	8.02	33.37	8.84
	Zadní	1	635.10	18.95	15.57	12.63	13.48	19.85	14.86
	Zadní	2	2179.15	65.03	4.54	43.35	3.93	68.10	4.33
F	Přední	1	244.42	7.29	40.45	4.86	35.03	7.64	38.62
	Přední	2	929.49	27.74	10.64	18.49	9.21	29.05	10.16
	Přední	3	769.89	22.97	12.84	15.32	11.12	24.06	12.26
	Přední	4	1193.24	35.61	8.28	23.74	7.17	37.29	7.91
	Zadní	1	347.75	10.38	28.43	6.92	24.62	10.87	27.15
	Zadní	2	2510.04	74.90	3.94	49.94	3.41	78.44	3.76
G	Přední	1	373.11	11.13	26.50	7.42	22.95	11.66	25.30
	Přední	2	623.51	18.61	15.85	12.40	13.73	19.48	15.14
	Přední	3	540.13	16.12	18.30	10.75	15.85	16.88	17.48
	Přední	4	959.23	28.62	10.31	19.08	8.92	29.98	9.84
	Zadní	1	671.39	20.04	14.72	13.36	12.75	20.98	14.06
	Zadní	2	2126.13	63.45	4.65	42.30	4.03	66.44	4.44
boční zleva	Přední	1	731.38	21.83	13.52	14.55	11.71	22.86	12.91
	Přední	2	345.82	10.32	28.59	6.88	24.76	10.81	27.30
	Přední	3	190.11	5.67	52.00	3.78	45.03	5.94	49.65
	Přední	4	667.07	19.91	14.82	13.27	12.83	20.85	14.15
	Zadní	1	2138.15	63.81	4.62	42.54	4.00	66.82	4.42
	Zadní	2	2147.06	64.07	4.60	42.71	3.99	67.10	4.40
boční zprava	Přední	1	439.50	13.12	22.49	8.74	19.48	13.73	21.48
	Přední	2	240.97	7.19	41.02	4.79	35.53	7.53	39.17
	Přední	3	155.52	4.64	63.56	3.09	55.05	4.86	60.70
	Přední	4	471.19	14.06	20.98	9.37	18.17	14.72	20.03
	Zadní	1	743.29	22.18	13.30	14.79	11.52	23.23	12.70
	Zadní	2	734.69	21.92	13.46	14.62	11.65	22.96	12.85

Tab. 39 Kontrola čepů při zatížení variantou 3

Varianta 4									
	Pozice		F_p $[N]$	σ_{op} $[MPa]$	j_p $[-]$	τ_p $[MPa]$	$j_{\tau p}$ $[-]$	σ_{otlp} $[MPa]$	j_{otlp} $[-]$
A	Přední	1	2193.70	65.46	9.01	43.64	7.81	68.55	8.61
	Přední	2	1352.32	40.36	14.62	26.90	12.66	42.26	13.96
	Přední	3	823.50	24.57	24.01	16.38	20.79	25.73	22.93
	Přední	4	993.44	29.65	19.90	19.76	17.24	31.04	19.00
	Zadní	1	3825.32	114.15	5.17	76.10	4.48	119.54	4.94
	Zadní	2	398.23	11.88	49.65	7.92	43.00	12.44	47.41
C	Přední	1	2246.49	67.04	8.80	44.69	7.62	70.20	8.40
	Přední	2	1762.72	52.60	11.22	35.07	9.71	55.08	10.71
	Přední	3	1154.07	34.44	17.13	22.96	14.84	36.06	16.36
	Přední	4	1149.50	34.30	17.20	22.87	14.90	35.92	16.42
	Zadní	1	4198.74	125.30	4.71	83.53	4.08	131.21	4.50
	Zadní	2	655.75	19.57	30.15	13.05	26.11	20.49	28.79
D	Přední	1	1775.93	53.00	11.13	35.33	9.64	55.50	10.63
	Přední	2	1519.52	45.34	13.01	30.23	11.27	47.48	12.43
	Přední	3	1025.31	30.60	19.28	20.40	16.70	32.04	18.41
	Přední	4	588.21	17.55	33.61	11.70	29.11	18.38	32.10
	Zadní	1	3738.09	111.55	5.29	74.37	4.58	116.82	5.05
	Zadní	2	391.04	11.67	50.56	7.78	43.79	12.22	48.28
E	Přední	1	531.28	15.85	37.21	10.57	32.23	16.60	35.54
	Přední	2	661.94	19.75	29.87	13.17	25.87	20.69	28.52
	Přední	3	581.51	17.35	34.00	11.57	29.44	18.17	32.47
	Přední	4	1412.59	42.15	14.00	28.10	12.12	44.14	13.37
	Zadní	1	1221.95	36.46	16.18	24.31	14.01	38.19	15.45
	Zadní	2	2958.66	88.29	6.68	58.86	5.79	92.46	6.38
F	Přední	1	483.26	14.42	40.91	9.61	35.43	15.10	39.07
	Přední	2	1026.64	30.64	19.26	20.42	16.68	32.08	18.39
	Přední	3	873.09	26.05	22.64	17.37	19.61	27.28	21.62
	Přední	4	1552.82	46.34	12.73	30.89	11.03	48.53	12.16
	Zadní	1	888.35	26.51	22.26	17.67	19.27	27.76	21.25
	Zadní	2	3330.95	99.40	5.94	66.27	5.14	104.09	5.67
G	Přední	1	636.90	19.01	31.04	12.67	26.88	19.90	29.64
	Přední	2	681.75	20.34	29.00	13.56	25.12	21.30	27.69
	Přední	3	614.20	18.33	32.19	12.22	27.88	19.19	30.74
	Přední	4	1290.16	38.50	15.32	25.67	13.27	40.32	14.63
	Zadní	1	1263.23	37.70	15.65	25.13	13.55	39.48	14.95
	Zadní	2	2899.16	86.52	6.82	57.68	5.91	90.60	6.51
boční zleva	Přední	1	1042.25	31.10	18.97	20.73	16.43	32.57	18.11
	Přední	2	408.79	12.20	48.36	8.13	41.88	12.77	46.18
	Přední	3	220.33	6.58	89.73	4.38	77.71	6.89	85.69
	Přední	4	963.54	28.75	20.52	19.17	17.77	30.11	19.59
	Zadní	1	2906.76	86.74	6.80	57.83	5.89	90.84	6.50
	Zadní	2	2915.76	87.01	6.78	58.01	5.87	91.12	6.48
boční zprava	Přední	1	714.09	21.31	27.69	14.21	23.98	22.32	26.44
	Přední	2	251.30	7.50	78.68	5.00	68.14	7.85	75.13
	Přední	3	168.46	5.03	117.36	3.35	101.64	5.26	112.07
	Přední	4	743.02	22.17	26.61	14.78	23.04	23.22	25.41
	Zadní	1	1291.11	38.53	15.31	25.69	13.26	40.35	14.62
	Zadní	2	1278.01	38.14	15.47	25.43	13.40	39.94	14.77

Tab. 40 Kontrola čepů při zatížení variantou 4

Varianta 5									
	Pozice		F_p $[N]$	σ_{op} $[MPa]$	j_p $[-]$	τ_p $[MPa]$	$j_{\tau p}$ $[-]$	σ_{otlp} $[MPa]$	j_{otlp} $[-]$
A	Přední	1	2576.46	76.89	7.67	51.26	6.65	80.51	7.33
	Přední	2	1772.33	52.89	11.16	35.26	9.66	55.39	10.65
	Přední	3	1108.60	33.08	17.83	22.05	15.44	34.64	17.03
	Přední	4	1645.58	49.11	12.01	32.74	10.40	51.42	11.47
	Zadní	1	4289.20	128.00	4.61	85.33	3.99	134.04	4.40
	Zadní	2	1020.46	30.45	19.37	20.30	16.78	31.89	18.50
C	Přední	1	2648.42	79.03	7.47	52.69	6.47	82.76	7.13
	Přední	2	2320.04	69.23	8.52	46.16	7.38	72.50	8.14
	Přední	3	1550.20	46.26	12.75	30.84	11.05	48.44	12.18
	Přední	4	1850.65	55.23	10.68	36.82	9.25	57.83	10.20
	Zadní	1	4789.33	142.92	4.13	95.28	3.58	149.67	3.94
	Zadní	2	1546.77	46.16	12.78	30.77	11.07	48.34	12.21
D	Přední	1	2019.98	60.28	9.79	40.19	8.48	63.12	9.35
	Přední	2	1995.63	59.55	9.91	39.70	8.58	62.36	9.46
	Přední	3	1377.84	41.12	14.35	27.41	12.43	43.06	13.70
	Přední	4	1070.51	31.95	18.47	21.30	15.99	33.45	17.64
	Zadní	1	4172.85	124.52	4.74	83.02	4.10	130.40	4.52
	Zadní	2	837.36	24.99	23.61	16.66	20.45	26.17	22.55
E	Přední	1	366.09	10.92	54.01	7.28	46.77	11.44	51.57
	Přední	2	914.05	27.28	21.63	18.18	18.73	28.56	20.66
	Přední	3	764.97	22.83	25.85	15.22	22.38	23.91	24.68
	Přední	4	1546.77	46.16	12.78	30.77	11.07	48.34	12.21
	Zadní	1	820.80	24.49	24.09	16.33	20.86	25.65	23.00
	Zadní	2	3136.46	93.60	6.30	62.40	5.46	98.01	6.02
F	Přední	1	315.37	9.41	62.69	6.27	54.29	9.86	59.87
	Přední	2	1399.31	41.76	14.13	27.84	12.24	43.73	13.49
	Přední	3	1153.09	34.41	17.15	22.94	14.85	36.03	16.37
	Přední	4	1735.26	51.78	11.39	34.52	9.87	54.23	10.88
	Zadní	1	397.94	11.88	49.68	7.92	43.03	12.44	47.44
	Zadní	2	3632.84	108.41	5.44	72.27	4.71	113.53	5.20
G	Přední	1	503.31	15.02	39.28	10.01	34.02	15.73	37.51
	Přední	2	940.43	28.06	21.02	18.71	18.21	29.39	20.08
	Přední	3	808.50	24.13	24.45	16.08	21.18	25.27	23.35
	Přední	4	1384.22	41.31	14.28	27.54	12.37	43.26	13.64
	Zadní	1	875.20	26.12	22.59	17.41	19.56	27.35	21.57
	Zadní	2	3056.96	91.22	6.47	60.82	5.60	95.53	6.18
boční zleva	Přední	1	1039.75	31.03	19.02	20.69	16.47	32.49	18.16
	Přední	2	513.72	15.33	38.49	10.22	33.33	16.05	36.75
	Přední	3	283.42	8.46	69.76	5.64	60.41	8.86	66.61
	Přední	4	945.12	28.20	20.92	18.80	18.12	29.53	19.98
	Zadní	1	3076.83	91.82	6.43	61.21	5.56	96.15	6.14
	Zadní	2	3090.62	92.23	6.40	61.49	5.54	96.58	6.11
boční zprava	Přední	1	601.98	17.96	32.84	11.98	28.44	18.81	31.36
	Přední	2	366.50	10.94	53.95	7.29	46.72	11.45	51.51
	Přední	3	234.96	7.01	84.15	4.67	72.87	7.34	80.35
	Přední	4	651.11	19.43	30.37	12.95	26.30	20.35	29.00
	Zadní	1	1007.06	30.05	19.63	20.03	17.00	31.47	18.75
	Zadní	2	995.60	29.71	19.86	19.81	17.20	31.11	18.96

Tab. 41 Kontrola čepů při zatížení variantou 5

Varianta 6									
	Pozice		F_p $[N]$	σ_{op} $[MPa]$	j_p $[-]$	τ_p $[MPa]$	$j_{\tau p}$ $[-]$	σ_{otlp} $[MPa]$	j_{otlp} $[-]$
A	Přední	1	2633.55	78.59	7.51	52.39	6.50	82.30	7.17
	Přední	2	1777.40	53.04	11.12	35.36	9.63	55.54	10.62
	Přední	3	1106.89	33.03	17.86	22.02	15.47	34.59	17.06
	Přední	4	1592.45	47.52	12.42	31.68	10.75	49.76	11.86
	Zadní	1	4422.03	131.96	4.47	87.97	3.87	138.19	4.27
	Zadní	2	909.31	27.14	21.74	18.09	18.83	28.42	20.76
C	Přední	1	2704.71	80.71	7.31	53.81	6.33	84.52	6.98
	Přední	2	2325.08	69.38	8.50	46.26	7.36	72.66	8.12
	Přední	3	1547.77	46.19	12.77	30.79	11.06	48.37	12.20
	Přední	4	1798.47	53.67	10.99	35.78	9.52	56.20	10.50
	Zadní	1	4920.29	146.83	4.02	97.89	3.48	153.76	3.84
	Zadní	2	1427.37	42.60	13.85	28.40	12.00	44.61	13.23
D	Přední	1	2077.19	61.99	9.52	41.32	8.24	64.91	9.09
	Přední	2	2000.61	59.70	9.88	39.80	8.56	62.52	9.44
	Přední	3	1376.19	41.07	14.37	27.38	12.44	43.01	13.72
	Přední	4	1021.41	30.48	19.36	20.32	16.76	31.92	18.48
	Zadní	1	4305.86	128.49	4.59	85.66	3.98	134.56	4.38
	Zadní	2	735.38	21.94	26.89	14.63	23.28	22.98	25.67
E	Přední	1	421.24	12.57	46.94	8.38	40.65	13.16	44.82
	Přední	2	908.75	27.12	21.76	18.08	18.84	28.40	20.78
	Přední	3	766.67	22.88	25.79	15.25	22.33	23.96	24.63
	Přední	4	1601.76	47.80	12.34	31.87	10.69	50.05	11.79
	Zadní	1	952.65	28.43	20.75	18.95	17.97	29.77	19.82
	Zadní	2	3268.73	97.54	6.05	65.03	5.24	102.15	5.78
F	Přední	1	366.63	10.94	53.93	7.29	46.70	11.46	51.50
	Přední	2	1394.23	41.61	14.18	27.74	12.28	43.57	13.54
	Přední	3	1154.83	34.46	17.12	22.97	14.83	36.09	16.35
	Přední	4	1789.87	53.41	11.05	35.61	9.57	55.93	10.55
	Zadní	1	521.62	15.57	37.90	10.38	32.83	16.30	36.19
	Zadní	2	3765.06	112.36	5.25	74.90	4.55	117.66	5.01
G	Přední	1	559.66	16.70	35.33	11.13	30.59	17.49	33.73
	Přední	2	935.26	27.91	21.14	18.61	18.31	29.23	20.19
	Přední	3	810.19	24.18	24.40	16.12	21.13	25.32	23.30
	Přední	4	1438.85	42.94	13.74	28.62	11.90	44.96	13.12
	Zadní	1	1007.09	30.05	19.63	20.04	17.00	31.47	18.75
	Zadní	2	3189.19	95.17	6.20	63.45	5.37	99.66	5.92
boční zleva	Přední	1	1097.07	32.74	18.02	21.83	15.61	34.28	17.21
	Přední	2	518.73	15.48	38.11	10.32	33.01	16.21	36.40
	Přední	3	285.17	8.51	69.33	5.67	60.04	8.91	66.21
	Přední	4	1000.60	29.86	19.76	19.91	17.11	31.27	18.87
	Zadní	1	3207.23	95.71	6.16	63.81	5.34	100.23	5.89
	Zadní	2	3220.59	96.11	6.14	64.07	5.32	100.64	5.86
boční zprava	Přední	1	659.25	19.67	29.99	13.12	25.97	20.60	28.64
	Přední	2	361.46	10.79	54.70	7.19	47.37	11.30	52.23
	Přední	3	233.28	6.96	84.75	4.64	73.40	7.29	80.93
	Přední	4	706.78	21.09	27.97	14.06	24.23	22.09	26.71
	Zadní	1	1114.93	33.27	17.73	22.18	15.36	34.84	16.93
	Zadní	2	1102.04	32.89	17.94	21.92	15.54	34.44	17.13

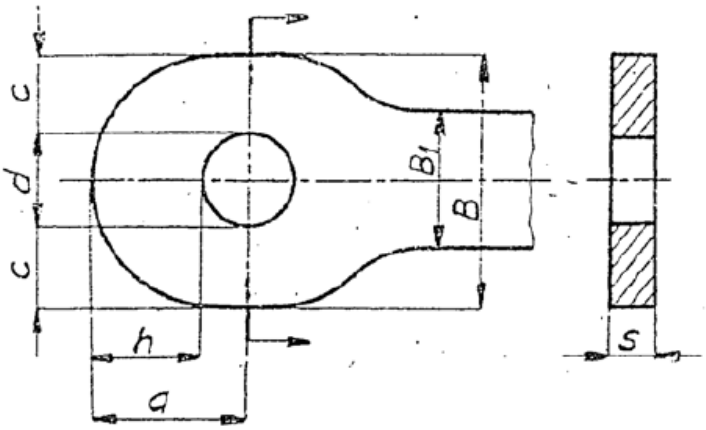
Tab. 42 Kontrola čepů při zatížení variantou 6

Nouzové přistání									
	Pozice		F_n $[N]$	σ_{on} $[MPa]$	j_n $[-]$	τ_n $[MPa]$	$j_{\tau n}$ $[-]$	σ_{otln} $[MPa]$	j_{otln} $[-]$
nouzové	Přední	1	6594.23	196.78	3.00	131.19	2.60	206.07	2.86
	Přední	2	2082.11	62.13	9.50	41.42	8.22	65.07	9.07
	Přední	3	2720.13	81.17	7.27	54.12	6.29	85.00	6.94
	Přední	4	7385.18	220.39	2.68	146.92	2.32	230.79	2.56
	Zadní	1	2016.58	60.18	9.80	40.12	8.49	63.02	9.36
	Zadní	2	3063.13	91.41	6.45	60.94	5.59	95.72	6.16

Tab. 43 Kontrola čepů při nouzovém přistání

10.8. Kontrola ok závěsů

Oka jako zbytek závěsu jsou z plechu tloušťky $2\ mm$ z materiálu L-ROL (14331.7), s mezí kluzu $R_e = 880\ MPa$ a mezí pevnosti $R_m = 1080\ MPa$. Závěs tvoří vždy dvojice ok, proto je působící síla v jednotlivých okách poloviční.



Obr. 34 Schématický obrázek oka, včetně rozměrů pro výpočet

S ohledem na skutečnou konstrukci oka je rozměr $B_1 = B$.

Jistoty ok jsou vztaženy k početnímu a nouzovému zatížení. Poměr meze pevnosti R_m a meze kluzu R_e materiálu $R_m/R_e = 1{,}28$ je menší než součinitel bezpečnosti $k = 1{,}5$ pro určení početního zatížení. Z toho vyplývá, že pokud součást vyhoví pro početní zatížení, vyhoví i pro provozní zatížení.

Oka jsou kontrolována na utržení a otlačení styčných ploch při namáhání tahem a tlakem. Následné ukázkové výpočty jsou provedeny pro maximální tahovou, respektive tlakovou sílu od početního zatížení.

10.8.1. Kontrola na tah

Utržení oka:

$$\sigma_p = 1{,}15 \cdot \frac{F_p}{2 \cdot c \cdot s} \tag{10.73}$$

$$\sigma_p = 1{,}15 \cdot \frac{1882{,}53}{2 \cdot 6 \cdot 2} = 90{,}2\ MPa \tag{10.74}$$

Jistota:

$$j_p = \frac{R_m}{\sigma_p} \tag{10.75}$$

$$j_p = \frac{1080}{90{,}2} = 11{,}97\ [-] \tag{10.76}$$

Napětí ve stykové ploše:

$$\sigma_{otlp} = \frac{F_p}{d \cdot s} \tag{10.77}$$

$$\sigma_{otlp} = \frac{1882{,}53}{8 \cdot 2} = 117{,}66\ MPa \tag{10.78}$$

Jistota:

$$j_{otlp} = \frac{R_m}{\sigma_{otlp}} \tag{10.79}$$

$$j_{otlp} = \frac{1080}{117{,}66} = 9{,}18\ [-] \tag{10.80}$$

10.8.1. Kontrola na tlak

Utržení oka:

$$\sigma_{tp} = 1{,}15 \cdot \frac{F_{tp}}{2 \cdot c \cdot s} \tag{10.81}$$

$$\sigma_{tp} = 1{,}15 \cdot \frac{2460{,}15}{2 \cdot 6 \cdot 2} = 117{,}88\ MPa \tag{10.82}$$

Jistota:

$$j_{tp} = \frac{R_m}{\sigma_p} \tag{10.83}$$

$$j_{tp} = \frac{1080}{117{,}88} = 9{,}16\ [-] \tag{10.84}$$

Napětí ve stykové ploše:

$$\sigma_{totlp} = \frac{F_{tp}}{d \cdot s} \tag{10.85}$$

$$\sigma_{totlp} = \frac{2460{,}15}{8 \cdot 2} = 153{,}76\ MPa \tag{10.86}$$

Jistota:

$$j_{totlp} = \frac{R_m}{\sigma_{otlp}} \tag{10.87}$$

$$j_{totlp} = \frac{1080}{153{,}76} = 7{,}02\ [-] \tag{10.88}$$

Jistoty v následujících tabulkách prokazují, že oka závěsů splňují veškeré požadavky.

Varianta 4								
	Pozice		F_p $[N]$	F_{tp} $[N]$	σ_{op} (σ_{op}) $[MPa]$	j_p (j_{tp}) $[-]$	σ_{otlp} (σ_{totlp}) $[MPa]$	j_{otlp} (j_{totlp}) $[-]$
A	Přední	1	1096.85	0.00	52.56	20.55	68.55	15.75
	Přední	2	0.00	676.16	32.40	33.33	42.26	25.56
	Přední	3	0.00	411.75	19.73	54.74	25.73	41.97
	Přední	4	496.72	0.00	23.80	45.38	31.04	34.79
	Zadní	1	0.00	1912.66	91.65	11.78	119.54	9.03
	Zadní	2	199.11	0.00	9.54	113.20	12.44	86.78
C	Přední	1	1123.25	0.00	53.82	20.07	70.20	15.38
	Přední	2	0.00	881.36	42.23	25.57	55.08	19.61
	Přední	3	0.00	577.04	27.65	39.06	36.06	29.95
	Přední	4	574.75	0.00	27.54	39.22	35.92	30.07
	Zadní	1	0.00	2099.37	100.59	10.74	131.21	8.23
	Zadní	2	0.00	327.88	15.71	68.74	20.49	52.70
D	Přední	1	887.97	0.00	42.55	25.38	55.50	19.46
	Přední	2	0.00	759.76	36.41	29.67	47.48	22.74
	Přední	3	0.00	512.65	24.56	43.97	32.04	33.71
	Přední	4	294.10	0.00	14.09	76.64	18.38	58.75
	Zadní	1	0.00	1869.05	89.56	12.06	116.82	9.25
	Zadní	2	195.52	0.00	9.37	115.28	12.22	88.38
E	Přední	1	265.64	0.00	12.73	84.85	16.60	65.05
	Přední	2	330.97	0.00	15.86	68.10	20.69	52.21
	Přední	3	290.76	0.00	13.93	77.52	18.17	59.43
	Přední	4	0.00	706.30	33.84	31.91	44.14	24.47
	Zadní	1	0.00	610.97	29.28	36.89	38.19	28.28
	Zadní	2	1479.33	0.00	70.88	15.24	92.46	11.68
F	Přední	1	241.63	0.00	11.58	93.28	15.10	71.51
	Přední	2	513.32	0.00	24.60	43.91	32.08	33.66
	Přední	3	436.55	0.00	20.92	51.63	27.28	39.58
	Přední	4	0.00	776.41	37.20	29.03	48.53	22.26
	Zadní	1	0.00	444.17	21.28	50.74	27.76	38.90
	Zadní	2	1665.47	0.00	79.80	13.53	104.09	10.38
G	Přední	1	318.45	0.00	15.26	70.78	19.90	54.26
	Přední	2	340.88	0.00	16.33	66.12	21.30	50.69
	Přední	3	307.10	0.00	14.72	73.39	19.19	56.27
	Přední	4	0.00	645.08	30.91	34.94	40.32	26.79
	Zadní	1	0.00	631.61	30.26	35.69	39.48	27.36
	Zadní	2	1449.58	0.00	69.46	15.55	90.60	11.92
boční zleva	Přední	1	521.13	0.00	24.97	43.25	32.57	33.16
	Přední	2	0.00	204.40	9.79	110.27	12.77	84.54
	Přední	3	110.17	0.00	5.28	204.59	6.89	156.85
	Přední	4	0.00	481.77	23.08	46.78	30.11	35.87
	Zadní	1	0.00	1453.38	69.64	15.51	90.84	11.89
	Zadní	2	1457.88	0.00	69.86	15.46	91.12	11.85
boční zprava	Přední	1	357.04	0.00	17.11	63.13	22.32	48.40
	Přední	2	125.65	0.00	6.02	179.38	7.85	137.53
	Přední	3	0.00	84.23	4.04	267.59	5.26	205.15
	Přední	4	0.00	371.51	17.80	60.67	23.22	46.51
	Zadní	1	0.00	645.56	30.93	34.91	40.35	26.77
	Zadní	2	639.00	0.00	30.62	35.27	39.94	27.04

Tab. 44 Kontrola ok závěsů při zatížení variantou 4

Varianta 5								
	Pozice		F_p $[N]$	F_{tp} $[N]$	σ_{op} (σ_{op}) $[MPa]$	j_p (j_{tp}) $[-]$	σ_{otlp} (σ_{totlp}) $[MPa]$	j_{otlp} (j_{totlp}) $[-]$
A	Přední	1	1288.23	0.00	61.73	17.50	80.51	13.41
	Přední	2	0.00	886.16	42.46	25.43	55.39	19.50
	Přední	3	0.00	554.30	26.56	40.66	34.64	31.17
	Přední	4	822.79	0.00	39.43	27.39	51.42	21.00
	Zadní	1	0.00	2144.60	102.76	10.51	134.04	8.06
	Zadní	2	0.00	510.23	24.45	44.17	31.89	33.87
C	Přední	1	1324.21	0.00	63.45	17.02	82.76	13.05
	Přední	2	0.00	1160.02	55.58	19.43	72.50	14.90
	Přední	3	0.00	775.10	37.14	29.08	48.44	22.29
	Přední	4	925.33	0.00	44.34	24.36	57.83	18.67
	Zadní	1	0.00	2394.66	114.74	9.41	149.67	7.22
	Zadní	2	0.00	773.39	37.06	29.14	48.34	22.34
D	Přední	1	1009.99	0.00	48.40	22.32	63.12	17.11
	Přední	2	0.00	997.81	47.81	22.59	62.36	17.32
	Přední	3	0.00	688.92	33.01	32.72	43.06	25.08
	Přední	4	535.26	0.00	25.65	42.11	33.45	32.28
	Zadní	1	0.00	2086.43	99.97	10.80	130.40	8.28
	Zadní	2	0.00	418.68	20.06	53.83	26.17	41.27
E	Přední	1	183.04	0.00	8.77	123.14	11.44	94.40
	Přední	2	457.03	0.00	21.90	49.32	28.56	37.81
	Přední	3	382.48	0.00	18.33	58.93	23.91	45.18
	Přední	4	0.00	773.38	37.06	29.14	48.34	22.34
	Zadní	1	0.00	410.40	19.67	54.92	25.65	42.11
	Zadní	2	1568.23	0.00	75.14	14.37	98.01	11.02
F	Přední	1	157.69	0.00	7.56	142.94	9.86	109.59
	Přední	2	699.65	0.00	33.53	32.21	43.73	24.70
	Přední	3	576.55	0.00	27.63	39.09	36.03	29.97
	Přední	4	0.00	867.63	41.57	25.98	54.23	19.92
	Zadní	1	0.00	198.97	9.53	113.28	12.44	86.85
	Zadní	2	1816.42	0.00	87.04	12.41	113.53	9.51
G	Přední	1	251.66	0.00	12.06	89.56	15.73	68.66
	Přední	2	470.21	0.00	22.53	47.93	29.39	36.75
	Přední	3	404.25	0.00	19.37	55.76	25.27	42.75
	Přední	4	0.00	692.11	33.16	32.57	43.26	24.97
	Zadní	1	0.00	437.60	20.97	51.51	27.35	39.49
	Zadní	2	1528.48	0.00	73.24	14.75	95.53	11.31
boční zleva	Přední	1	519.88	0.00	24.91	43.35	32.49	33.24
	Přední	2	0.00	256.86	12.31	87.75	16.05	67.27
	Přední	3	141.71	0.00	6.79	159.05	8.86	121.94
	Přední	4	0.00	472.56	22.64	47.70	29.53	36.57
	Zadní	1	0.00	1538.41	73.72	14.65	96.15	11.23
	Zadní	2	1545.31	0.00	74.05	14.59	96.58	11.18
boční zprava	Přední	1	300.99	0.00	14.42	74.88	18.81	57.41
	Přední	2	183.25	0.00	8.78	123.00	11.45	94.30
	Přední	3	0.00	117.48	5.63	191.86	7.34	147.09
	Přední	4	0.00	325.55	15.60	69.23	20.35	53.08
	Zadní	1	0.00	503.53	24.13	44.76	31.47	34.32
	Zadní	2	497.80	0.00	23.85	45.28	31.11	34.71

Tab. 45 Kontrola ok závěsů při zatížení variantou 5

Varianta 6								
	Pozice		F_p $[N]$	F_{tp} $[N]$	σ_{op} (σ_{op}) $[MPa]$	j_p (j_{tp}) $[-]$	σ_{otlp} (σ_{totlp}) $[MPa]$	j_{otlp} (j_{totlp}) $[-]$
A	Přední	1	1316.78	0.00	63.10	17.12	82.30	13.12
	Přední	2	0.00	888.70	42.58	25.36	55.54	19.44
	Přední	3	0.00	553.45	26.52	40.73	34.59	31.22
	Přední	4	796.23	0.00	38.15	28.31	49.76	21.70
	Zadní	1	0.00	2211.01	105.94	10.19	138.19	7.82
	Zadní	2	0.00	454.66	21.79	49.57	28.42	38.01
C	Přední	1	1352.36	0.00	64.80	16.67	84.52	12.78
	Přední	2	0.00	1162.54	55.70	19.39	72.66	14.86
	Přední	3	0.00	773.88	37.08	29.12	48.37	22.33
	Přední	4	899.24	0.00	43.09	25.06	56.20	19.22
	Zadní	1	0.00	2460.15	117.88	9.16	153.76	7.02
	Zadní	2	0.00	713.69	34.20	31.58	44.61	24.21
D	Přední	1	1038.60	0.00	49.77	21.70	64.91	16.64
	Přední	2	0.00	1000.31	47.93	22.53	62.52	17.27
	Přední	3	0.00	688.09	32.97	32.76	43.01	25.11
	Přední	4	510.71	0.00	24.47	44.13	31.92	33.84
	Zadní	1	0.00	2152.93	103.16	10.47	134.56	8.03
	Zadní	2	0.00	367.69	17.62	61.30	22.98	47.00
E	Přední	1	210.62	0.00	10.09	107.01	13.16	82.04
	Přední	2	454.38	0.00	21.77	49.60	28.40	38.03
	Přední	3	383.33	0.00	18.37	58.80	23.96	45.08
	Přední	4	0.00	800.88	38.38	28.14	50.05	21.58
	Zadní	1	0.00	476.33	22.82	47.32	29.77	36.28
	Zadní	2	1634.37	0.00	78.31	13.79	102.15	10.57
F	Přední	1	183.31	0.00	8.78	122.95	11.46	94.27
	Přední	2	697.12	0.00	33.40	32.33	43.57	24.79
	Přední	3	577.41	0.00	27.67	39.03	36.09	29.93
	Přední	4	0.00	894.93	42.88	25.19	55.93	19.31
	Zadní	1	0.00	260.81	12.50	86.42	16.30	66.25
	Zadní	2	1882.53	0.00	90.20	11.97	117.66	9.18
G	Přední	1	279.83	0.00	13.41	80.55	17.49	61.75
	Přední	2	467.63	0.00	22.41	48.20	29.23	36.95
	Přední	3	405.10	0.00	19.41	55.64	25.32	42.66
	Přední	4	0.00	719.42	34.47	31.33	44.96	24.02
	Zadní	1	0.00	503.54	24.13	44.76	31.47	34.32
	Zadní	2	1594.59	0.00	76.41	14.13	99.66	10.84
boční zleva	Přední	1	548.54	0.00	26.28	41.09	34.28	31.50
	Přední	2	0.00	259.36	12.43	86.90	16.21	66.62
	Přední	3	142.58	0.00	6.83	158.08	8.91	121.19
	Přední	4	0.00	500.30	23.97	45.05	31.27	34.54
	Zadní	1	0.00	1603.61	76.84	14.06	100.23	10.78
	Zadní	2	1610.29	0.00	77.16	14.00	100.64	10.73
boční zprava	Přední	1	329.63	0.00	15.79	68.38	20.60	52.42
	Přední	2	180.73	0.00	8.66	124.71	11.30	95.61
	Přední	3	0.00	116.64	5.59	193.23	7.29	148.15
	Přední	4	0.00	353.39	16.93	63.78	22.09	48.90
	Zadní	1	0.00	557.46	26.71	40.43	34.84	31.00
	Zadní	2	551.02	0.00	26.40	40.90	34.44	31.36

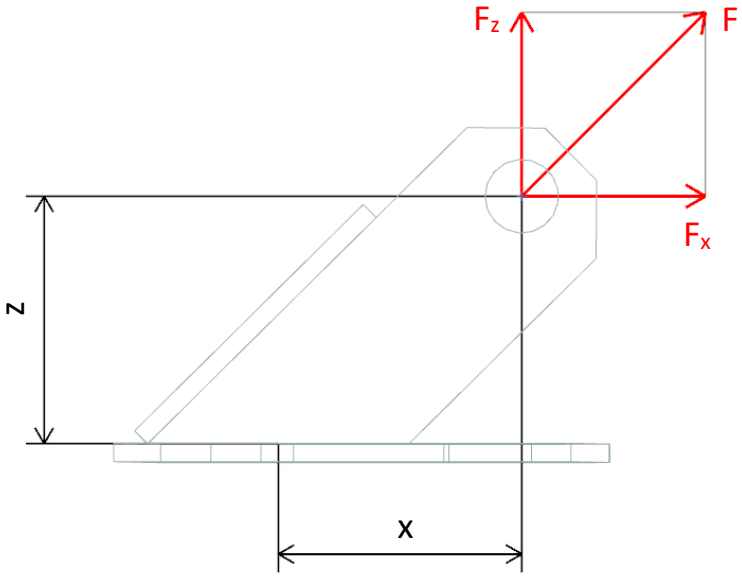
Tab. 46 Kontrola ok závěsů při zatížení variantou 6

Nouzové přistání								
	Pozice		F_n $[N]$	F_{tn} $[N]$	σ_{on} (σ_{on}) $[MPa]$	j_n (j_{tn}) $[-]$	σ_{otln} (σ_{totln}) $[MPa]$	j_{otln} (j_{totln}) $[-]$
nouzové	Přední	1	0.00	6594.23	315.97	3.42	412.14	2.62
	Přední	2	0.00	2082.11	99.77	10.83	130.13	8.30
	Přední	3	0.00	2720.13	130.34	8.29	170.01	6.35
	Přední	4	0.00	7385.18	353.87	3.05	461.57	2.34
	Zadní	1	2016.58	0.00	96.63	11.18	126.04	8.57
	Zadní	2	3063.13	0.00	146.77	7.36	191.45	5.64

Tab. 47 Kontrola ok závěsů při nouzovém přistání

10.9. Kontrola svarů u závěsů

Závěsy jsou navrženy z plechu tloušťky 2 mm z materiálu L-ROL (14331.7), s mezí kluzu $R_e = 880\ MPa$ a mezí pevnosti $R_m = 1080\ MPa$. Oka, která byla kontrolována v předcházející kapitole, jsou přivařena koutovým svarem k nosné přírubě. S ohledem na tloušťku svařovaného materiálu má svar jmenovitou tloušťku $a = \sqrt{2}\ mm$, respektive jmenovitou šířku $t = 2\ mm$.



Obr. 35 Schématické zobrazení závěsu, včetně rozměrů a rozležení sil

Schéma na Obr. 35 zobrazuje potřebné parametry výpočtu, jimiž jsou vzdálenosti působiště sil od těžiště spoje x $[mm]$, z $[mm]$ a složky síly F $[N]$. Dalším potřebným parametrem je délka svaru l $[mm]$.

Jistoty svarů jsou vztaženy k početnímu a nouzovému zatížení. Poměr meze pevnosti R_m a meze kluzu R_e materiálu $R_m/R_e = 1{,}28$ je menší než součinitel bezpečnosti $k = 1{,}5$ pro početní zatížení. Z toho vyplývá, že pokud součást vyhoví pro početní zatížení, vyhoví i pro provozní zatížení.

Svary jsou kontrolovány na maximální kombinované napětí. Pro oka přivařená ke dvěma přírubám je pro zjednodušení předpokládáno, že síla je přenese vždy větším svarem. Tímto předpokladem se pohybujeme na straně bezpečnosti, neboť kratší svar ve skutečnosti přenáší část síly. Následné ukázkové výpočty jsou provedeny pro sílu od nouzového zatížení v předním závěsu na pozici 4, dle obrázku Obr. 27.

Smykové napětí kolmé na směr svaru:

$$\tau_{zn} = \frac{F_{zn}}{2 \cdot S_{svar}} = \frac{F_{zn}}{2 \cdot a \cdot l} \tag{10.89}$$

$$\tau_{zn} = \frac{4003{,}27}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 28} = 50{,}55\ MPa \tag{10.90}$$

Smykové napětí rovnoběžné se směrem svaru:

$$\tau_{xn} = \frac{F_{xn}}{2 \cdot S_{svar}} = \frac{F_{xn}}{2 \cdot a \cdot l} \tag{10.91}$$

$$\tau_{xn} = \frac{6230{,}75}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 28} = 78{,}68\ MPa \tag{10.92}$$

Napětí od ohybového momentu v rovině desky:

$$\sigma_{on} = \frac{M_{on}}{W_o} = \frac{6 \cdot (F_{xn} \cdot z - F_{zn} \cdot x)}{2 \cdot a \cdot l^2} \tag{10.93}$$

$$\sigma_{on} = \frac{6 \cdot (6230{,}75 \cdot 26{,}6 - 4003{,}27 \cdot 26{,}6)}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 8^2} = 157{,}07\ MPa \tag{10.94}$$

Výsledné kombinované napětí:

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_{on}^2 + \left(\frac{\tau_{zn}}{\alpha_\perp}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xn}}{\alpha_\parallel}\right)^2} \tag{10.95}$$

$$\sigma_n = \sqrt{157{,}07^2 + \left(\frac{50{,}55}{0{,}75}\right)^2 + \left(\frac{78{,}68}{0{,}65}\right)^2} = 209{,}44\ MPa \tag{10.96}$$

Konstanty $\alpha_\perp$ a $\alpha_\parallel$ jsou převodní součinitelé pro koutový svar.

Jistota:

$$j_n = \frac{\beta \cdot R_m}{\sigma_n} = \frac{(1{,}3 - 0{,}03 \cdot t) \cdot R_m}{\sigma_n} \tag{10.97}$$

$$j_n = \frac{(1{,}3 - 0{,}03 \cdot 2) \cdot 1080}{209{,}44} = 6{,}39\ MPa \tag{10.98}$$

Konstanta β je součinitel tloušťky koutového svaru vyjádřená pro $t < 10mm$.

Uvedené jistoty v tabulkách níže prokazují, že svary pevnostně vydrží.

Varianta: 4												
	Pozice		F_{xp} $[N]$	F_{zp} $[N]$	l $[mm]$	x $[mm]$	z $[mm]$	τ_{xp} $[MPa]$	τ_{xp} $[MPa]$	σ_{op} $[MPa]$	σ_p $[MPa]$	j_p $[-]$
A	Přední	1	-1913.23	1088.80	28.0	26.9	26.6	24.16	13.75	58.45	71.65	18.69
	Přední	2	383.70	-1324.22	18.0	42.6	19.6	7.54	26.01	320.10	322.19	4.16
	Přední	3	234.41	-804.01	18.0	42.6	19.6	4.60	15.79	194.17	195.44	6.85
	Přední	4	-979.07	202.40	28.0	26.9	26.6	12.36	2.56	55.74	58.99	22.70
	Zadní	1	2289.57	-1203.88	25.5	20.4	14.9	31.74	16.69	31.17	62.07	21.58
	Zadní	2	-224.92	-205.17	25.5	20.4	14.9	3.12	2.84	24.59	25.34	52.86
C	Přední	1	-1976.17	1085.62	28.0	26.9	26.6	24.95	13.71	63.21	76.18	17.58
	Přední	2	501.97	-1720.33	18.0	42.6	19.6	9.86	33.79	415.41	418.12	3.20
	Přední	3	329.94	-1122.21	18.0	42.6	19.6	6.48	22.04	270.66	272.44	4.92
	Přední	4	-1139.17	202.29	28.0	26.9	26.6	14.38	2.55	67.27	70.89	18.89
	Zadní	1	2517.10	-1288.45	25.5	20.4	14.9	34.90	17.86	36.60	69.21	19.35
	Zadní	2	-200.60	-724.75	25.5	20.4	14.9	2.78	10.05	57.98	59.67	22.45
D	Přední	1	-1562.85	857.13	28.0	26.9	26.6	19.73	10.82	50.10	60.33	22.20
	Přední	2	434.14	-1478.44	18.0	42.6	19.6	8.53	29.04	356.65	358.98	3.73
	Přední	3	293.99	-994.23	18.0	42.6	19.6	5.77	19.53	239.58	241.15	5.55
	Přední	4	-589.65	-55.17	28.0	26.9	26.6	7.45	0.70	46.45	47.86	27.98
	Zadní	1	2238.75	-1165.19	25.5	20.4	14.9	31.04	16.16	31.28	61.01	21.95
	Zadní	2	-241.48	-12.38	25.5	20.4	14.9	3.35	0.17	12.56	13.58	98.62
E	Přední	1	-391.28	359.77	28.0	26.9	26.6	4.94	4.54	1.98	9.92	135.03
	Přední	2	-187.91	647.90	18.0	42.6	19.6	3.69	12.73	156.59	157.61	8.50
	Přední	3	-166.31	565.28	18.0	42.6	19.6	3.27	11.10	136.32	137.22	9.76
	Přední	4	1271.81	-628.18	28.0	26.9	26.6	16.06	7.93	45.81	53.11	25.21
	Zadní	1	705.34	-553.62	25.5	20.4	14.9	9.78	7.68	2.56	18.38	72.88
	Zadní	2	-429.95	3658.29	25.5	20.4	14.9	5.96	50.72	222.56	232.79	5.75
F	Přední	1	-325.66	356.57	28.0	26.9	26.6	4.11	4.50	2.51	9.08	147.55
	Přední	2	-292.49	1001.53	18.0	42.6	19.6	5.74	19.67	241.81	243.38	5.50
	Přední	3	-250.17	847.21	18.0	42.6	19.6	4.91	16.64	204.20	205.54	6.52
	Přední	4	1425.27	-634.14	28.0	26.9	26.6	18.00	8.01	56.43	63.75	21.01
	Zadní	1	497.55	-476.68	25.5	20.4	14.9	6.90	6.61	7.54	15.72	85.19
	Zadní	2	-452.43	4133.82	25.5	20.4	14.9	6.27	57.31	253.12	264.58	5.06
G	Přední	1	-481.83	417.38	28.0	26.9	26.6	6.08	5.27	4.30	12.47	107.40
	Přední	2	-194.19	665.21	18.0	42.6	19.6	3.81	13.07	160.62	161.66	8.28
	Přední	3	-176.07	595.74	18.0	42.6	19.6	3.46	11.70	143.57	144.51	9.27
	Přední	4	1166.49	-563.96	28.0	26.9	26.6	14.73	7.12	42.91	49.44	27.08
	Zadní	1	730.04	-567.62	25.5	20.4	14.9	10.12	7.87	2.29	18.92	70.79
	Zadní	2	-424.54	3583.09	25.5	20.4	14.9	5.89	49.68	217.82	227.85	5.88
boční zleva	Přední	1	-866.54	583.88	28.0	26.9	26.6	10.94	7.37	19.87	27.84	48.11
	Přední	2	119.97	-387.36	18.0	42.6	19.6	2.36	7.61	92.65	93.27	14.36
	Přední	3	-63.09	213.95	18.0	42.6	19.6	1.24	4.20	51.58	51.92	25.80
	Přední	4	819.57	-512.11	28.0	26.9	26.6	10.35	6.47	21.71	28.27	47.37
	Zadní	1	1779.71	-490.70	25.5	20.4	14.9	24.68	6.80	53.85	66.51	20.14
	Zadní	2	-246.55	3674.42	25.5	20.4	14.9	3.42	50.95	232.55	242.33	5.53
boční zprava	Přední	1	-593.78	399.92	28.0	26.9	26.6	7.50	5.05	13.63	19.08	70.18
	Přední	2	-73.24	239.84	18.0	42.6	19.6	1.44	4.71	57.50	57.88	23.14
	Přední	3	48.92	-161.37	18.0	42.6	19.6	0.96	3.17	38.73	38.99	34.35
	Přední	4	602.89	-436.92	28.0	26.9	26.6	7.61	5.52	11.59	18.05	74.21
	Zadní	1	629.37	-1008.90	25.5	20.4	14.9	8.73	13.99	36.55	43.17	31.02
	Zadní	2	-493.33	1269.32	25.5	20.4	14.9	6.84	17.60	60.49	65.73	20.37

Tab. 48 Kontrola svarů závěsů při zatížení variantou 4

Varianta: 5												
	Pozice		F_{xp} $[N]$	F_{zp} $[N]$	l $[mm]$	x $[mm]$	z $[mm]$	τ_{xp} $[MPa]$	τ_{xp} $[MPa]$	σ_{op} $[MPa]$	σ_p $[MPa]$	j_p $[-]$
A	Přední	1	-2260.58	1255.37	28.0	26.9	26.6	28.54	15.85	71.33	86.39	15.50
	Přední	2	502.70	-1736.01	18.0	42.6	19.6	9.87	34.10	419.69	422.42	3.17
	Přední	3	315.65	-1082.08	18.0	42.6	19.6	6.20	21.25	261.30	263.01	5.09
	Přední	4	-1590.29	459.09	28.0	26.9	26.6	20.08	5.80	81.04	87.08	15.38
	Zadní	1	2572.48	-1306.69	25.5	20.4	14.9	35.67	18.12	38.08	71.03	18.85
	Zadní	2	-152.39	-1259.70	25.5	20.4	14.9	2.11	17.47	91.24	94.22	14.21
C	Přední	1	-2345.60	1251.33	28.0	26.9	26.6	29.62	15.80	77.74	92.54	14.47
	Přední	2	660.71	-2264.15	18.0	42.6	19.6	12.98	44.47	546.72	550.29	2.43
	Přední	3	443.40	-1506.73	18.0	42.6	19.6	8.71	29.59	363.35	365.73	3.66
	Přední	4	-1804.35	459.44	28.0	26.9	26.6	22.78	5.80	96.42	102.89	13.02
	Zadní	1	2877.33	-1417.57	25.5	20.4	14.9	39.89	19.65	45.52	80.78	16.58
	Zadní	2	-121.59	-1951.75	25.5	20.4	14.9	1.69	27.06	135.80	140.54	9.53
D	Přední	1	-1793.35	946.48	28.0	26.9	26.6	22.64	11.95	60.18	71.34	18.77
	Přední	2	570.09	-1941.93	18.0	42.6	19.6	11.20	38.14	468.47	471.54	2.84
	Přední	3	395.18	-1335.74	18.0	42.6	19.6	7.76	26.24	321.84	323.96	4.13
	Přední	4	-1071.52	116.04	28.0	26.9	26.6	13.53	1.47	68.67	71.79	18.66
	Zadní	1	2504.61	-1255.16	25.5	20.4	14.9	34.73	17.40	38.21	69.66	19.22
	Zadní	2	-174.41	-1002.89	25.5	20.4	14.9	2.42	13.90	75.22	77.56	17.27
E	Přední	1	-230.79	283.46	28.0	26.9	26.6	2.91	3.58	4.02	7.68	174.29
	Přední	2	-259.82	893.56	18.0	42.6	19.6	5.10	17.55	215.89	217.29	6.16
	Přední	3	-218.84	743.39	18.0	42.6	19.6	4.30	14.60	179.26	180.44	7.42
	Přední	4	1412.04	-648.19	28.0	26.9	26.6	17.83	8.18	54.45	61.94	21.62
	Zadní	1	459.97	-439.35	25.5	20.4	14.9	6.38	6.09	6.88	14.48	92.51
	Zadní	2	-425.78	3892.56	25.5	20.4	14.9	5.90	53.97	238.36	249.15	5.38
F	Přední	1	-143.72	279.25	28.0	26.9	26.6	1.81	3.53	9.98	11.38	117.67
	Přední	2	-398.89	1364.34	18.0	42.6	19.6	7.84	26.80	329.35	331.50	4.04
	Přední	3	-330.40	1118.90	18.0	42.6	19.6	6.49	21.98	269.68	271.45	4.93
	Přední	4	1615.77	-655.95	28.0	26.9	26.6	20.40	8.28	68.55	76.20	17.58
	Zadní	1	183.46	-336.94	25.5	20.4	14.9	2.54	4.67	13.51	15.38	87.08
	Zadní	2	-455.67	4525.31	25.5	20.4	14.9	6.32	62.74	279.02	291.45	4.59
G	Přední	1	-351.36	360.18	28.0	26.9	26.6	4.44	4.55	0.93	9.18	145.93
	Přední	2	-268.19	916.60	18.0	42.6	19.6	5.27	18.00	221.24	222.68	6.01
	Přední	3	-231.84	783.97	18.0	42.6	19.6	4.55	15.40	188.91	190.15	7.04
	Přední	4	1271.74	-562.60	28.0	26.9	26.6	16.06	7.10	50.58	57.08	23.46
	Zadní	1	492.77	-458.06	25.5	20.4	14.9	6.83	6.35	6.53	15.00	89.31
	Zadní	2	-418.61	3792.20	25.5	20.4	14.9	5.80	52.58	232.03	242.55	5.52
boční zleva	Přední	1	-864.44	582.50	28.0	26.9	26.6	10.92	7.36	19.82	27.77	48.23
	Přední	2	150.66	-487.15	18.0	42.6	19.6	2.96	9.57	116.54	117.32	11.41
	Přední	3	-81.28	274.78	18.0	42.6	19.6	1.60	5.40	66.21	66.64	20.09
	Přední	4	809.36	-493.71	28.0	26.9	26.6	10.22	6.23	22.32	28.54	46.93
	Zadní	1	1892.80	-355.52	25.5	20.4	14.9	26.24	4.93	68.35	79.65	16.81
	Zadní	2	-181.17	3914.05	25.5	20.4	14.9	2.51	54.27	251.68	261.90	5.11
boční zprava	Přední	1	-500.58	337.10	28.0	26.9	26.6	6.32	4.26	11.49	16.09	83.24
	Přední	2	-106.98	349.23	18.0	42.6	19.6	2.10	6.86	83.68	84.24	15.90
	Přední	3	68.05	-225.64	18.0	42.6	19.6	1.34	4.43	54.20	54.56	24.55
	Přední	4	520.32	-393.38	28.0	26.9	26.6	6.57	4.97	8.82	14.96	89.53
	Zadní	1	358.99	-1046.30	25.5	20.4	14.9	4.98	14.51	52.18	56.18	23.84
	Zadní	2	-510.26	707.07	25.5	20.4	14.9	7.07	9.80	22.25	28.01	47.81

Tab. 49 Kontrola svarů závěsů při zatížení variantou 5

Varianta: 6												
	Pozice		F_{xp} $[N]$	F_{zp} $[N]$	l $[mm]$	x $[mm]$	z $[mm]$	τ_{xp} $[MPa]$	τ_{xp} $[MPa]$	σ_{op} $[MPa]$	σ_p $[MPa]$	j_p $[-]$
A	Přední	1	-2308.22	1287.48	28.0	26.9	26.6	29.15	16.26	72.42	87.89	15.24
	Přední	2	504.22	-1740.73	18.0	42.6	19.6	9.90	34.19	420.81	423.55	3.16
	Přední	3	315.18	-1080.36	18.0	42.6	19.6	6.19	21.22	260.88	262.59	5.10
	Přední	4	-1543.67	428.02	28.0	26.9	26.6	19.49	5.40	79.95	85.69	15.63
	Zadní	1	2651.13	-1355.60	25.5	20.4	14.9	36.76	18.80	38.65	72.94	18.36
	Zadní	2	-176.57	-1098.16	25.5	20.4	14.9	2.45	15.23	81.67	84.24	15.90
C	Přední	1	-2392.56	1283.21	28.0	26.9	26.6	30.21	16.20	78.80	94.00	14.25
	Přední	2	662.22	-2268.83	18.0	42.6	19.6	13.01	44.56	547.83	551.40	2.43
	Přední	3	442.72	-1504.30	18.0	42.6	19.6	8.70	29.55	362.76	365.14	3.67
	Přední	4	-1758.18	428.09	28.0	26.9	26.6	22.20	5.41	95.38	101.57	13.18
	Zadní	1	2954.58	-1468.61	25.5	20.4	14.9	40.96	20.36	45.88	82.55	16.22
	Zadní	2	-144.20	-1791.41	25.5	20.4	14.9	2.00	24.84	126.23	130.54	10.26
D	Přední	1	-1841.18	978.72	28.0	26.9	26.6	23.25	12.36	61.28	72.84	18.38
	Přední	2	571.58	-1946.57	18.0	42.6	19.6	11.23	38.23	469.58	472.65	2.83
	Přední	3	394.73	-1334.07	18.0	42.6	19.6	7.75	26.20	321.44	323.55	4.14
	Přední	4	-1024.90	84.96	28.0	26.9	26.6	12.94	1.07	67.58	70.47	19.00
	Zadní	1	2583.38	-1304.13	25.5	20.4	14.9	35.82	18.08	38.78	71.57	18.71
	Zadní	2	-198.60	-841.38	25.5	20.4	14.9	2.75	11.67	65.65	67.60	19.81
E	Přední	1	-278.41	315.58	28.0	26.9	26.6	3.52	3.98	2.93	8.13	164.76
	Přední	2	-258.25	888.59	18.0	42.6	19.6	5.07	17.45	214.70	216.10	6.20
	Přední	3	-219.30	745.11	18.0	42.6	19.6	4.31	14.64	179.68	180.86	7.40
	Přední	4	1458.44	-679.21	28.0	26.9	26.6	18.42	8.58	55.53	63.38	21.13
	Zadní	1	538.61	-488.28	25.5	20.4	14.9	7.47	6.77	6.31	15.92	84.14
	Zadní	2	-449.97	4053.80	25.5	20.4	14.9	6.24	56.21	247.91	259.17	5.17
F	Přední	1	-191.30	311.37	28.0	26.9	26.6	2.42	3.93	8.89	10.97	122.04
	Přední	2	-397.39	1359.58	18.0	42.6	19.6	7.81	26.70	328.21	330.36	4.05
	Přední	3	-330.87	1120.66	18.0	42.6	19.6	6.50	22.01	270.11	271.88	4.93
	Přední	4	1662.24	-686.99	28.0	26.9	26.6	20.99	8.67	69.63	77.62	17.25
	Zadní	1	262.15	-385.85	25.5	20.4	14.9	3.63	5.35	12.94	15.79	84.79
	Zadní	2	-479.82	4686.75	25.5	20.4	14.9	6.65	64.98	288.59	301.48	4.44
G	Přední	1	-399.10	392.37	28.0	26.9	26.6	5.04	4.95	0.17	10.19	131.46
	Přední	2	-266.66	911.74	18.0	42.6	19.6	5.24	17.91	220.08	221.52	6.05
	Přední	3	-232.30	785.68	18.0	42.6	19.6	4.56	15.43	189.33	190.57	7.03
	Přední	4	1317.93	-593.52	28.0	26.9	26.6	16.64	7.49	51.66	58.51	22.89
	Zadní	1	571.33	-506.98	25.5	20.4	14.9	7.92	7.03	5.97	16.49	81.20
	Zadní	2	-442.79	3953.38	25.5	20.4	14.9	6.14	54.81	241.58	252.57	5.30
boční zleva	Přední	1	-912.09	614.62	28.0	26.9	26.6	11.52	7.76	20.91	29.30	45.71
	Přední	2	152.15	-491.83	18.0	42.6	19.6	2.99	9.66	117.65	118.45	11.31
	Přední	3	-81.76	276.54	18.0	42.6	19.6	1.61	5.43	66.64	67.08	19.96
	Přední	4	855.67	-524.61	28.0	26.9	26.6	10.80	6.62	23.40	30.03	44.59
	Zadní	1	1971.45	-404.44	25.5	20.4	14.9	27.33	5.61	68.91	81.08	16.52
	Zadní	2	-205.37	4075.24	25.5	20.4	14.9	2.85	56.50	261.23	271.91	4.93
boční zprava	Přední	1	-548.19	369.20	28.0	26.9	26.6	6.92	4.66	12.58	17.62	76.01
	Přední	2	-105.48	344.51	18.0	42.6	19.6	2.07	6.77	82.55	83.10	16.11
	Přední	3	67.59	-223.94	18.0	42.6	19.6	1.33	4.40	53.79	54.14	24.73
	Přední	4	566.83	-424.40	28.0	26.9	26.6	7.16	5.36	9.91	16.45	81.43
	Zadní	1	437.63	-1095.22	25.5	20.4	14.9	6.07	15.19	51.62	56.22	23.82
	Zadní	2	-534.45	868.39	25.5	20.4	14.9	7.41	12.04	31.81	37.41	35.79

Tab. 50 Kontrola svarů závěsů při zatížení variantou 6

Nouzové přistání												
	Pozice		F_{xp} $[N]$	F_{zp} $[N]$	l $[mm]$	x $[mm]$	z $[mm]$	τ_{xp} $[MPa]$	τ_{xp} $[MPa]$	σ_{op} $[MPa]$	σ_p $[MPa]$	j_p $[-]$
Nouzové	Přední	1	5531.61	-3622.25	28.0	26.9	26.6	69.85	45.74	134.48	182.62	7.33
	Přední	2	629.73	-1908.32	18.0	42.6	19.6	12.37	37.48	451.45	454.60	2.95
	Přední	3	797.99	-2578.61	18.0	42.6	19.6	15.67	50.65	616.81	620.96	2.16
	Přední	4	6230.75	-4003.27	28.0	26.9	26.6	78.68	50.55	157.07	209.44	6.39
	Zadní	1	-1196.99	710.45	25.5	20.4	14.9	16.60	9.85	10.90	30.71	43.60
	Zadní	2	-291.73	3850.22	25.5	20.4	14.9	4.04	53.38	242.06	252.38	5.31

Tab. 51 Kontrola svarů závěsů při nouzovém přistání

11. Zkušební přípravek a náhradní zatížení

Zkušební přípravek je navrhnut s důrazem na jednoduchost a dostupnost použitého materiálu. Správné přerozdělení sil na zkoušené lože je dosaženo položením přípravku na silentbloky uchycené k loži. Výsledný tvar přípravku je dán podmínkou rovnoběžnosti styčných ploch v místech sešroubování přípravku se silentblokem, tím je redukována nerovnoměrná deformace silentbloku.

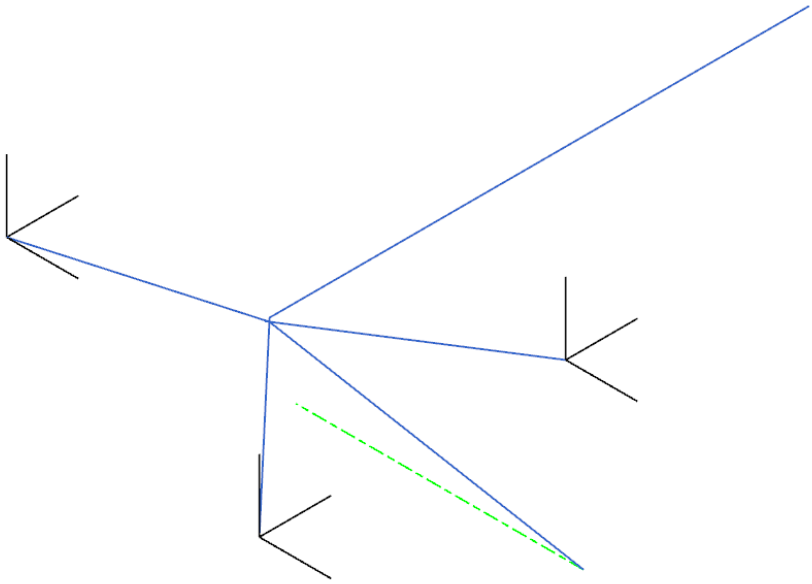
Základní tvar Y tvoří dva svařené jekly obdélníkového průřezu TR OBD 50x35x3 dle normy ČSN 42 5720. Delší z těchto dvou jeklů je přišroubován k přednímu silentbloku. V zadní části této základny je přivařena plechová vana o tloušťce materiálu 3 mm navrhnutá tak, aby rovnoměrně přenášela síly do zadních silentbloků.

Jekl v horní části přípravku slouží k zavedení náhradních sil, což umožňují dvě díry pro závěsná oka na užší spodní straně jeklu. Jedna díra je umístěna těsně nad zdánlivým těžištěm motoru a druhá pak ve vzdálenosti 750 mm od ní. Jekl obdélníkového průřezu TR OBD 60x40x3,5 dle normy ČSN 42 5720 lze připevnit dvěma způsoby. Pokud je zkouška lože prováděna mimo letadlo může být jekl přivařen, dojde tak k lepšímu toku sil. V případě, že je lože zkoušeno v trupu letadla, je potřeba jekl dodatečně přišroubovat kvůli omezenému prostoru při vkládání přípravku do trupu.

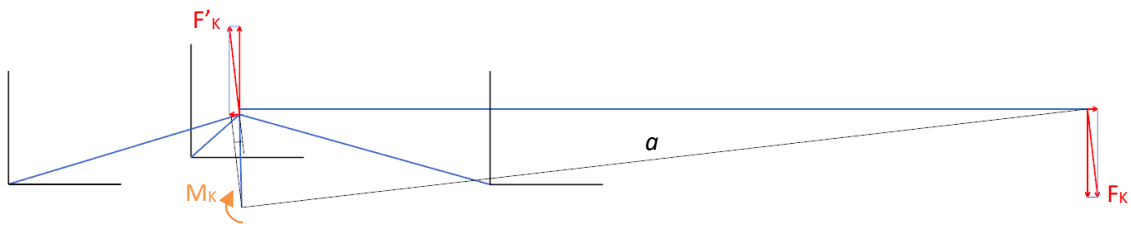
Materiál pro zkušební přípravek je konstrukční ocel 11 523 vhodná pro namáhané svařované konstrukce.

Obr. 36 Zkušební přípravek

Vzhledem k tomu, že známe geometrii zkušebního přípravku a body pro působení sil, bylo možné vytvořit zjednodušený prutový model. Principiálně se od prutového modelu motoru liší pouze o rameno, na kterém bude působit síla nahrazující kroutící moment. Z geometrie vyplývá, že rameno je dlouhé 750 mm a nachází se necelých 4,8 mm nad skutečným těžištěm motoru.



Obr. 37 Prutový model zkušebního standu



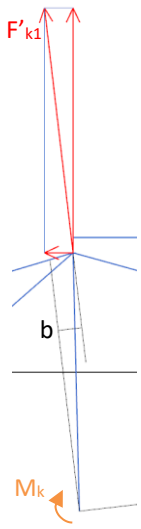
Obr. 38 Nahrezení reakčního momentu

Na obrázku Obr. 38 je vidět reakční moment M_k přepočtený na sílu F_k působící na rameni a. Pro dodržení silové rovnováhy je potřeba sílu F_k kompenzovat. Toho je dosaženo pomocí síly F'_k. Výpočet náhradní síly F_k respektive F'_k pro maximální vzletový výkon je znázorněn v následujících rovnicích.

$$F_{K1} = -F'_{K1} = \frac{M_{K_{vzl}}}{a} \tag{11.1}$$

$$F_{K1} = -F'_{K1} = \frac{582{,}07}{0{,}753} = 772{,}874\ N \tag{11.2}$$

Síla F'_{k1} vytváří na rameni b přídavný moment působící v opačném směru než reakční moment M_k, jak je vidět na obrázku Obr. 39. Odstranění vlivu přídavného momentu je spočteno v následujících rovnicích.



Obr. 39 Vznik přídavného momentu

$$F_K = -F'_K = \frac{M_{K_{vzl}}}{a - b} \tag{11.3}$$

$$F_K = -F'_K = \frac{582{,}07}{0{,}7530 - 0{,}0075} = 780{,}65\ N \tag{11.4}$$

Pro případ s maximálním trvalým výkonem se mění v předcházejících rovnicích pouze hodnota reakčního momentu. Délky ramen a a b mají stejnou velikost jako u předchozího výpočtu vzhledem ke shodné geometrii.

$$F_{K_{trv}1} = -F'_{K_{trv}1} = \frac{M_{K_{trv}}}{a} \tag{11.5}$$

$$F_{K_{trv}1} = -F'_{K_{trv}1} = \frac{544{,}32}{0{,}753} = 722.411\ N \tag{11.6}$$

$$F_{K_{trv}} = -F'_{K_{trv}} = \frac{M_{K_{trv}}}{a - b} \tag{11.7}$$

$$F_{K_{trv}} = -F'_{K_{trv}} = \frac{544{,}32}{0{,}7530 - 0{,}0075} = 729{,}679\ N \tag{11.8}$$

Působiště síly F'_k je posunuto o 4,8 mm níže do působiště setrvačných sil, tedy do teoretického těžiště motoru. Tím se dopustíme drobného znepřesnění ve výpočtu, avšak pro celkový výsledek zanedbatelného. Zároveň se toto zjednodušení promítne pozitivně do samotné zkoušky lože, neboť vzniknou pouze dvě působiště sil a zároveň není potřeba kompenzace přídavného momentu.

Pro úplnost je níže uvedena nejprve náhrada početního reakčního momentu od maximálního vzletového výkonu a posléze od maximálního trvalého výkonu.

Výpočet při početním vzletovém výkonu:

$$F_{K1p} = -F'_{K1p} = \frac{M_{Kp_{vzl}}}{a} \tag{11.9}$$

$$F_{K1p} = -F'_{K1p} = \frac{873{,}11}{0{,}753} = 772{,}874\ N \tag{11.10}$$

$$F_{Kp} = -F'_{Kp} = \frac{M_{Kp_{vzl}}}{a - b} \tag{11.11}$$

$$F_{Kp} = -F'_{Kp} = \frac{873{,}11}{0{,}7530 - 0{,}0075} = 1170{,}97\ N \tag{11.12}$$

Výpočet při početním trvalém výkonu:

$$F_{Kp_{trv}1} = -F'_{Kp_{trv}1} = \frac{M_{Kp_{trv}}}{a} \tag{11.13}$$

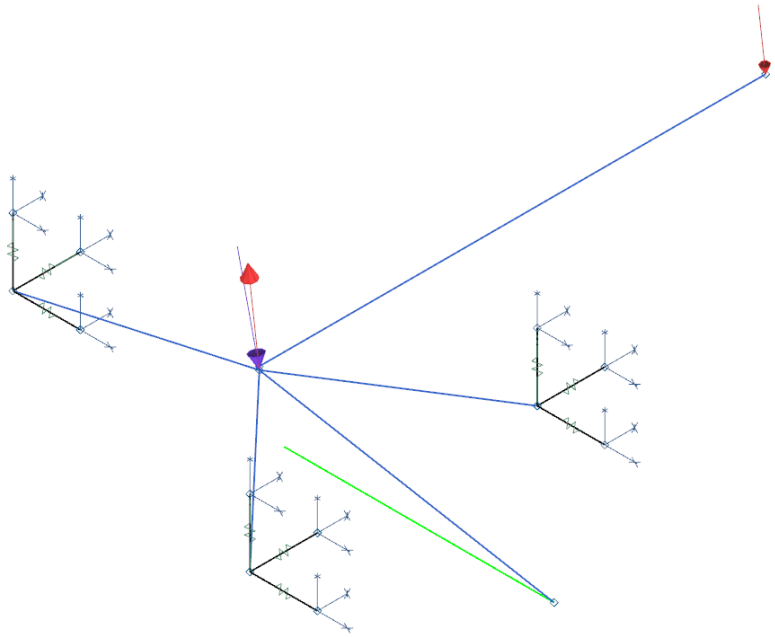
$$F_{Kp_{trv}1} = -F'_{Kp_{trv}1} = \frac{816{,}48}{0{,}753} = 1084{,}255N \tag{11.14}$$

$$F_{Kp_{trv}} = -F'_{Kp_{trv}} = \frac{M_{Kp_{trv}}}{a - b} \tag{11.15}$$

$$F_{Kp_{trv}} = -F'_{Kp_{trv}} = \frac{816{,}48}{0{,}7530 - 0{,}0075} = 1095{,}163\ N \tag{11.16}$$

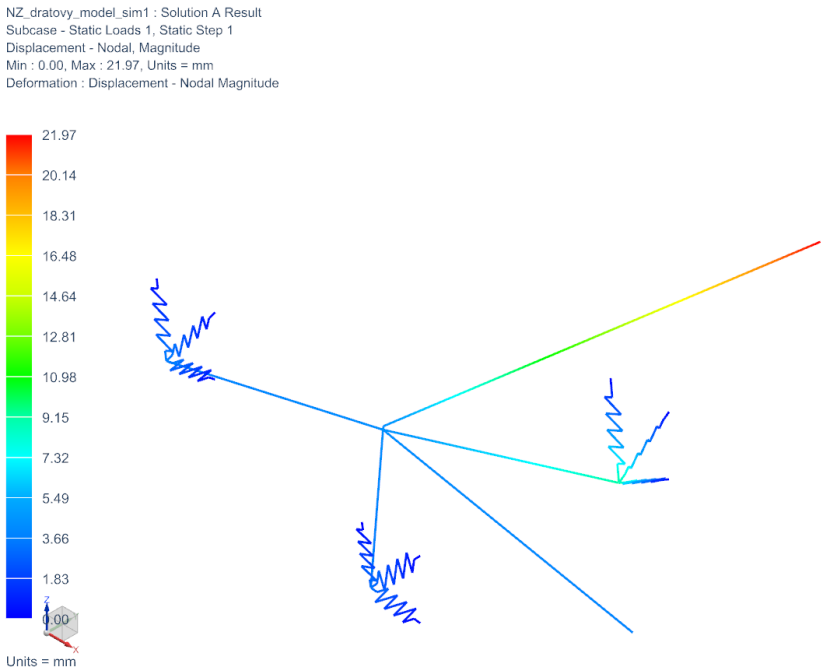
Výsledné náhradní zatížení je kombinací setrvačných sil z kapitoly 10.1 a náhrady za příslušný reakční moment.

Ke kontrole náhradního zatížené byl vytvořen výpočetní model, vycházející ze zjednodušeného prutového modelu zkušebního přípravku. FEM model byl vytvořen stejným principem jaký je popsán v kapitole 10.2. Na obrázku Obr. 40 je pak kompletní SIM model zahrnující setrvačnou sílu (fialově) a náhradní zatížení reakčního momentu (červeně).



Obr. 40 SIM model pro kontrolu náhradního zatížení

K řešení byl využit řešič typu „SOL 101 Linear Statics - Global Constraints“, který byl taktéž použit při výpočtu reakcí od motoru. Obrázek Obr. 41 zachycuje výsledné deformace při náhradním zatížení varianty 1 v bodě A letové obálky.



Obr. 41 Deformace při náhradním zatížení v bodě A letové obálky

Výsledky jsou zpracovány obdobně jako v kapitole 10.2. Velikosti reakcí R v silentblocích jsou porovnány s reakcemi R_{skut} od skutečného zatížení. Odchylka O v amplitudách je vyjádřen procentuálně.

Náhradní zatížení varianty 1: maximální výkon a 75% zatížení							
		Náhradní zatížení			Amplitudy		
	Silentblok	R_X $[N]$	R_Y $[N]$	R_Z $[N]$	R $[N]$	R_{skut} $[N]$	O [%]
A	Přední	168.3	14.5	-953.2	968.03	967.99	0.004
	Zadní levý	240.2	-7.0	525.8	578.11	578.02	0.017
	Zadní pravý	220.8	-7.5	-2324.7	2335.13	2334.97	0.007
C	Přední	104.2	13.1	-1240.1	1244.51	1244.48	0.002
	Zadní levý	153.9	-6.3	338.3	371.75	371.64	0.030
	Zadní pravý	131.9	-6.8	-2553.4	2556.80	2556.64	0.006
D	Přední	2.1	10.6	-1046.3	1046.33	1046.30	0.003
	Zadní levý	16.6	-5.0	546.9	547.19	547.05	0.025
	Zadní pravý	-8.9	-5.6	-2323.7	2323.68	2323.53	0.007
E	Přední	30.8	10.5	536.0	537.03	537.04	-0.002
	Zadní levý	55.5	-5.0	1763.9	1764.81	1764.69	0.007
	Zadní pravý	32.9	-5.5	-894.1	894.70	894.53	0.018
F	Přední	84.2	11.6	793.5	798.00	798.02	-0.002
	Zadní levý	127.4	-5.6	1934.5	1938.68	1938.55	0.007
	Zadní pravý	107.0	-6.1	-686.7	695.01	694.85	0.023
G	Přední	68.8	11.4	544.1	548.58	548.60	-0.003
	Zadní levý	106.6	-5.4	1748.8	1752.10	1751.97	0.007
	Zadní pravý	85.4	-5.9	-906.3	910.36	910.20	0.018
boční zleva	Přední	-8.5	311.6	1.5	311.71	311.71	0.000
	Zadní levý	-40.2	314.9	1483.8	1517.36	1517.24	0.008
	Zadní pravý	48.7	314.4	-1485.3	1519.05	1518.89	0.010
boční zprava	Přední	6.6	-291.5	0.6	291.62	291.62	0.000
	Zadní levý	65.5	-324.4	1246.0	1289.21	1289.08	0.010
	Zadní pravý	-72.1	-325.0	-1246.6	1290.32	1290.17	0.012

Tab. 52 Reakce od náhradního zatížení varianty 1

Náhradní zatížení varianty 4: početní maximální výkon a 75% početního zatížení							
		Náhradní zatížení			Amplitudy		
	Silentblok	R_X $[N]$	R_Y $[N]$	R_Z $[N]$	R $[N]$	R_{skut} $[N]$	O [%]
A	Přední	252.5	21.7	-1429.6	1451.77	1451.84	-0.005
	Zadní levý	360.3	-10.5	788.7	866.96	867.11	-0.018
	Zadní pravý	331.1	-11.3	-3486.6	3501.99	3502.28	-0.008

Tab. 53 Reakce od náhradního zatížení varianty 4

Náhradní zatížení varianty 2: maximální trvalý výkon a 100% zatížení							
		Náhradní zatížení			Amplitudy		
	Silentblok	R_X $[N]$	R_Y $[N]$	R_Z $[N]$	R $[N]$	R_{skut} $[N]$	O [%]
A	Přední	224.8	15.3	-1271.3	1291.10	1291.09	0.001
	Zadní levý	315.2	-7.4	156.9	352.18	352.24	-0.016
	Zadní pravý	299.0	-7.9	-2554.9	2572.33	2572.33	0.000
C	Přední	139.4	13.5	-1653.8	1659.73	1659.73	0.000
	Zadní levý	200.2	-6.5	-93.1	220.83	220.86	-0.013
	Zadní pravý	180.5	-7.0	-2859.9	2865.55	2865.54	0.000
D	Přední	3.2	10.2	-1395.4	1395.47	1395.46	0.001
	Zadní levý	17.1	-4.8	185.0	185.88	185.85	0.016
	Zadní pravý	-7.2	-5.3	-2553.5	2553.56	2553.56	0.000
E	Přední	41.5	10.0	714.6	715.85	715.84	0.002
	Zadní levý	69.0	-4.8	1807.9	1809.24	1809.22	0.001
	Zadní pravý	48.6	-5.2	-647.2	649.06	649.04	0.003
F	Přední	112.6	11.5	1057.3	1063.34	1063.34	0.001
	Zadní levý	164.8	-5.5	2034.9	2041.61	2041.59	0.001
	Zadní pravý	147.3	-6.0	-371.2	399.35	399.34	0.003
G	Přední	92.1	11.2	725.4	731.29	731.28	0.001
	Zadní levý	137.1	-5.4	1787.8	1793.05	1793.03	0.001
	Zadní pravý	118.5	-5.8	-663.6	674.09	674.08	0.002
boční zleva	Přední	-11.0	411.5	1.6	411.63	411.63	0.000
	Zadní levý	-58.7	421.7	1434.2	1496.09	1496.07	0.001
	Zadní pravý	69.7	421.4	-1435.8	1497.99	1497.98	0.001
boční zprava	Přední	9.2	-392.7	0.4	392.85	392.85	0.000
	Zadní levý	82.3	-430.6	1117.2	1200.11	1200.09	0.002
	Zadní pravý	-91.5	-431.2	-1117.5	1201.33	1201.32	0.001

Tab. 54 Reakce od náhradního zatížení varianty 2

Náhradní zatížení varianty 3: maximální výkon a 100% zatížení							
		Náhradní zatížení			Amplitudy		
	Silentblok	R_X $[N]$	R_Y $[N]$	R_Z $[N]$	R $[N]$	R_{skut} $[N]$	O [%]
A	Přední	224.8	16.0	-1271.2	1291.06	1291.01	0.003
	Zadní levý	316.0	-7.7	246.1	400.64	400.62	0.005
	Zadní pravý	298.2	-8.3	-2644.2	2660.99	2660.84	0.006
C	Přední	139.3	14.2	-1653.8	1659.68	1659.66	0.001
	Zadní levý	201.0	-6.8	-3.8	201.14	201.16	-0.011
	Zadní pravý	179.7	-7.4	-2949.2	2954.66	2954.50	0.005
D	Přední	3.2	10.8	-1395.4	1395.43	1395.39	0.003
	Zadní levý	17.9	-5.1	274.2	274.88	274.74	0.050
	Zadní pravý	-7.9	-5.7	-2642.9	2642.89	2642.74	0.006
E	Přední	41.4	10.7	714.6	715.90	715.91	-0.002
	Zadní levý	69.8	-5.1	1897.1	1898.42	1898.30	0.006
	Zadní pravý	47.8	-5.6	-736.5	738.12	737.95	0.023
F	Přední	112.5	12.1	1057.3	1063.39	1063.41	-0.002
	Zadní levý	165.6	-5.8	2124.2	2130.61	2130.48	0.006
	Zadní pravý	146.5	-6.3	-460.5	483.27	483.12	0.032
G	Přední	92.1	11.8	725.4	731.33	731.35	-0.002
	Zadní levý	138.0	-5.7	1877.0	1882.08	1881.95	0.007
	Zadní pravý	117.8	-6.2	-752.9	762.07	761.91	0.021
boční zleva	Přední	-11.0	412.1	1.7	412.29	412.29	0.000
	Zadní levý	-57.8	421.4	1523.4	1581.70	1581.58	0.008
	Zadní pravý	68.9	421.0	-1525.1	1583.69	1583.53	0.010
boční zprava	Přední	9.1	-392.1	0.4	392.19	392.19	0.000
	Zadní levý	83.1	-430.9	1206.4	1283.73	1283.61	0.009
	Zadní pravý	-92.3	-431.6	-1206.9	1285.01	1284.86	0.012

Tab. 55 Reakce od náhradního zatížení varianty 3

Z výsledků vyplývá, že maximální rozdíl v reakcích při zatěžování provozním zatížením a náhradním zatížení je pod hranicí 0,05 % odpovídající řádově chybě 0,15 N.

Kontrola náhradního početního zatížení je určena pouze pro variantu 4 v bodě A letové obálky. Pro zbylé kombinace je uvažován stejný předpoklad jako v kapitole 10.2, a to poměr reakcí početního a provozního zatížení je roven součiniteli bezpečnosti $k = 1{,}5$. Rozdíl amplitud reakcí je pod hranicí 0,02 % odpovídající řádově chybě 0,2 N.

Výpočet pro nouzové přistání nezahrnuje reakční moment, ale pouze setrvačné síly, proto není potřeba ověřovat náhradní zatížení.

Při realizaci zkoušky není možné vypočtených hodnot dosáhnout, a to hned z několika důvodů. Siloměry používané běžně při zkouškách nedosahují takové přesnosti měření s jakou je uvažováno ve výpočtech. Dalším omezením je způsob zatěžování. Běžně se používají zavěšené pytle s pískem o určité hmotnosti, kterými se však zdaleka nedosáhne dostatečně přesného zatížení. Pro zpřesnění působících sil se dá využít hydraulické soustavy s kladkami, ale ani ta nedosáhne potřebné přesnosti, navíc je takováto zkouška nákladnější. Nepřesnost je pak také zanesena výrobou zkušebního přípravku, proto je potřeba před zkouškou přepočítat náhradní zatížení s ohledem na skutečnou hmotnost přípravku. Chybu vytváří i netuhost celé konstrukce, která se dá omezit jen do určité míry.

12. Závěr

Úvod diplomové práce představuje letadlo UL-39 Albi a motor Rotax 4-TEC 1503 XHO, včetně návrhu změn příslušenství pro leteckou aplikaci a hmotovým rozborem.

Pro správný návrh motorového lože jsou uvedeny obecné předpoklady pro konstrukci a vybrané oddíly z předpisů CS-VLA, UL2 a LFT-UL kladoucí požadavky na certifikaci motorového lože. Zároveň jsou rozebrány běžné konstrukční koncepty používané v letectví. S ohledem na tento výčet byla navržena příhradová konstrukce motorového lože, která byla optimalizována s ohledem na dispozice motoru, omezený prostor v trupu letadla a omezení týkající se montáže.

V další části jsou stanoveny provozní a početní zatížení nejen dle předpisů, ale i s přihlédnutím k bezpečnosti. Pomocí programu NX 11, s využitím metody konečných prvků, je stanoveno namáhání lože a závěsů vlivem spočteného zatížení. Následná pevnostní kontrola prokázala, že vzniklé namáhání lože, závěsů a stavitelných ok se pohybuje v přijatelných mezích.

Poslední část práce se zabývá návrhem zkušebního přípravku pro certifikační zkoušky a výpočtem potřebného náhradního zatížení pro statické pevnostní zkoušky dle předpisů UL2 a CS-VLA. Výsledky výpočtu jsou ověřeny na výpočetním modelu v programu NX 11.

Tímto byly splněny veškeré cíle této práce, jejímž výsledkem je kompletní návrh motorového lože malého sportovního letounu a návrh certifikační zkoušky.

13. Literatura

[1] EVROPSKÁ AGENTURA PRO BEZPEČNOST LETECTVÍ. *Certifikační specifikace pro velmi lehké letouny (CS-VLA).* 2009

[2] LETECKÁ AMATÉRSKÁ ASOCIACE ČR. UL 2 - I. *Část, požadavky letové způsobilosti SLZ, ultralehké letouny řízené aerodynamicky.* 2002

[3] Přel. Ing. P. PROFOUS. *Stavební předpisy pro aerodynamicky řízené ultralehké letouny*. 2003

[4] HELMICH, M.; SOMMER, T.: *Výkonové charakteristiky pohonného agregátu.* Technická zpráva ULT č. TZP/ULT/23/2015, Ústav letadlové techniky ČVUT Praha, 2015.

[5] ŠUĽŽENKO, M. N., Přel. Ing. P. Kudrický. *Konstrukce letadel 2. opravné vydání.* V Praze: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.

[6] BOHÁČEK, F., A KOLEKTIV: *Části a mechanismy strojů I, Zásady konstruování spoje.* V Brně: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1984.

[7] HORKÝ, Josef. *Motorové lože malého sportovného letounu.* Praha, 2017. Diplomová práce (Ing.). České vysoké učení technické v praze, Ústav letadlové techniky, 2017-06-09.

[8] Smíšek, M. *Motorové lože malého sportovného letounu.* Praha, 2010. Diplomová práce (Ing.). České vysoké učení technické v praze, Ústav letadlové techniky, 2010-05-09.

[9] 2005 SEADOO ROTAX 1503 4-TEC ENGINE SHOP MANUAL. *SeaDooManuals* [online]. 2018 [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: http://seadoomanuals.net/manuals/2005-seadoo-rotax-1503-4-tech-shop-manual.php

[10] Vzduchový filtr K&N RU-3103HBK. *K&N Engineering* [online]. 2018 [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: https://www.knfilters.com/search/product.aspx?prod=RU-3103HBK

[11] Universal Tube&Fub Turbo Intercooler 19x6x2.5. *CXRacing* [online]. 2018 [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: https://www.cxracing.com/intercooler/intercooler-2_5-inch-inlet/IC-B928

[12] Silikonové koleno 90°, 50mm. *ESCAPE4X4* [online]. 2018 [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: http://www.escape4x4.cz/silikonove-koleno-90-50mm/d-75121/

[13] Stavitelné oko SA 6 C. *SKF* [online]. 2018 [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/plain-bearings/general/rod-ends-requiring-maintenance/male-thread/index.html?designation=SA%208%20C

[14] Závitová vložka K0978. HEINRICH KIPP WEK KG [online]. 2018 [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: https://www.kipp.cz/cz/cs/Produkty/Ovl%C3%A1dac%C3%AD-prvky-normovan%C3%A9-d%C3%ADly/%C4%8C%C3%A1sti-stroj%C5%AF-%C4%8D%C3%A1sti-p%C5%99%C3%ADpravk%C5%AF/K0978-Z%C3%A1vitov%C3%A9-vlo%C5%BEky-samo%C5%99ezn%C3%A9-s-%C5%99eznou-dr%C3%A1%C5%BEkou.html