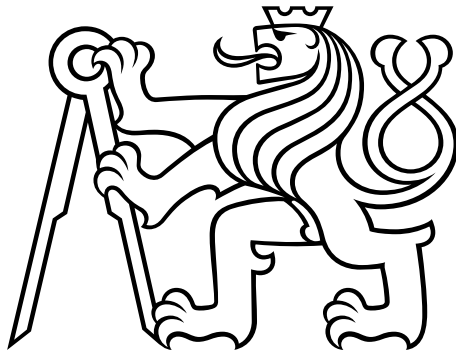


**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



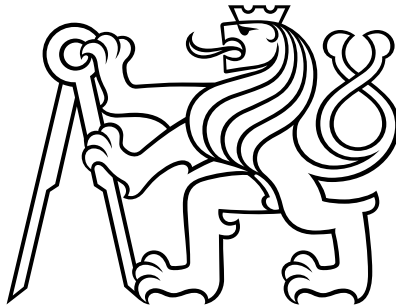
**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2024**

**KRYŠTOF  
GIL**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh zatahovacího hlavního podvozku soutěžního letounu**

**STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ**

**KRYŠTOF GIL**

**2024**



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gil** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **484136**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh zatahovacího hlavního podvozku soutěžního letounu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of retractable main landing gear for competition aircraft**

Pokyny pro vypracování:

Body zadání:

- Přehled koncepčních uspořádání podvozků
- Návrh kinematického mechanismu
- Stanovení zatížení
- Návrh konstrukce
- Pevnostní výpočet
- Hmotnostní rozbor

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jakub Valenta ústav letadlové techniky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **27.10.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **09.01.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Jakub Valenta  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Milan Dvořák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím pramenů a literatury, které jsou uvedené v seznamu citovaných zdrojů.

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

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat rodině za podporu při studiu. Velké díky patří panu Ing. Jakobovi Valentovi, za trpělivost během vedení práce a cenné rady a věcné poznámky. Dále bych chtěl poděkovat kolegům ze studentského týmu CTU AeroLab za spolupráci na uskutečněných projektech a v neposlední řadě také kolegům z Wingit Works za cenné rady.

**Autor:** Kryštof Gil

**Název bakalářské práce:** Návrh zatahovacího hlavního podvozku soutěžního letounu

**Rozsah práce:** 37 stran, 41 obrázků, 8 tabulek.

**Rok vyhotovení:** 2024

**Univerzita:** České vysoké učení technické v Praze - fakulta strojní

**Ústav:** Ústav letadlové techniky

**Vedoucí diplomové práce:** Ing. Jakub Valenta

**Klíčová slova:** Zatahovací podvozek, MKP pevnostní studie, kinematický mechanismus, bezpilotní letoun, hmotnostní rozbor, koncepční uspořádání podvozku

**Anotace:**

Cílem této bakalářské práce je navrhnout hlavní zatahovací podvozek pro bezpilotní letoun „Hus“ studentského týmu CTU AeroLab, ze soutěže Air Cargo Challenge 2022.

**Author:** Kryštof Gil

**Title of bachelor thesis:** Design of the retractable main landing gear of a competition aircraft.

**Extent:** 37 pages, 41 figures, 8 tables.

**Academic year:** 2024

**University:** Czech Technical University in Prague - Faculty of mechanical engineering

**Department:** Department of Aerospace Engineering

**Supervisor:** Ing. Jakub Valenta

**Keywords:** Retractable landing gear, FEM structural study, kinematic mechanism, unmanned aerial vehicle, mass analysis, conceptual arrangement of the landing gear

**Annotation:**  
The goal of this bachelor's thesis is to design the main retractable landing gear for the unmanned aircraft "Hus" of the CTU AeroLab student team, for the Air Cargo Challenge 2022 competition.



# Obsah

Seznam obrázků .....	1
Seznam tabulek .....	2
Seznam použitých programů .....	2
Použité zkratky .....	2
Použité značení .....	3
1. Úvod .....	4
2. Úvod do problematiky soutěže .....	5
2.1. Hlavní bodovaná kritéria ACC 2022: .....	5
2.2. Požadavky na letoun vyplývající z pravidel .....	5
2.3. Požadavky na podvozek od kolegů z týmu .....	5
2.4. Současný stav letounu Hus .....	6
3. Přehled koncepčních uspořádání podvozků .....	7
3.1. Zádový podvozek .....	7
3.2. Předový podvozek .....	7
3.3. Tandemový podvozek .....	8
4. Návrh kinematického mechanismu .....	9
4.1. Mechanismus 1 bez zalamovací vzpěry .....	9
4.2. Mechanismus 2 se zalamovací vzpěrou .....	10
4.3. Mechanismus 3 vylepšená zalamovací vzpěra .....	11
5. Stanovení zatížení .....	13
5.1. Součinitel bezpečnosti .....	13
5.2. Provozní zatížení podvozku pozemním zatížením .....	13
5.3. Přistávací podmínky pro podvozek .....	14
5.3.1. Vodorovné přistání na tři body .....	14
5.3.2. Vodorovné přistání s předovým kolem nad zemí .....	15
5.3.3. Přistání s velkým úhlem náběhu .....	15
5.3.4. Boční zatížení kol hlavního podvozku .....	16
5.3.5. Zatížení kol při brzdění .....	16
5.3.6. Provozní zatížení podvozku .....	17
5.3.7. Početní zatížení podvozku .....	17
5.3.8. Početní zatížení vynásobené doplňkovým součinitelem bezpečnosti .....	17
6. Návrh konstrukce .....	18
6.1. Pneumatický pohon .....	18

6.2.	Elektrický pohon servo motor.....	19
6.3.	Elektrický pohon motor se závitovou tyčí .....	19
6.4.	Kolečka.....	20
6.5.	Třecí vložka .....	20
	Geometrické parametry .....	21
6.6.	Naznačení konstrukce se zalamovací vzpěrou .....	22
6.7.	Naznačení konstrukce bez zalamovací vzpěry .....	23
6.8.	Finální konstrukce podvozku .....	24
6.9.	Volba materiálu.....	26
6.10.	Čepy .....	26
7.	Pevnostní výpočet .....	27
7.1.	Tvorba síťového modelu.....	28
7.1.1.	Zjednodušení modelu.....	28
7.1.2.	Aplikace geometrických a funkčních vazeb .....	29
7.2.	Zatížení .....	30
7.3.	Výsledky numerické studie .....	32
8.	Hmotový rozbor.....	34
9.	Závěr .....	35
10.	Reference .....	36

# Seznam obrázků

Obrázek 1 Letoun HUS [3].....	6
Obrázek 2 Detail na provedení podvozku [3] .....	6
Obrázek 3 Zádový podvozek [4].....	7
Obrázek 4 Předový podvozek [4] .....	7
Obrázek 5 Tandemový podvozek [4].....	8
Obrázek 6 mechanismus 1 vysunutý.....	9
Obrázek 7 Mechanismus 1 zatažený .....	9
Obrázek 8 mechanismus 2 vysunutá poloha .....	10
Obrázek 9 Mechanismus 2 zatažená poloha .....	10
Obrázek 10 Mechanismus 3 popis .....	11
Obrázek 11 Mechanismus 3 obecná poloha.....	12
Obrázek 12 Mechanismus 3 zasunutý.....	12
Obrázek 13 Souřadnicový systém podvozku [5] .....	14
Obrázek 14 Vodorovné přistání na tři body [5] .....	14
Obrázek 15 Vodorovné přistání s předovým kolem nad zemí [5] .....	15
Obrázek 16 Přistání s velkým úhlem náběhu [5] .....	15
Obrázek 17 Boční zatížení [5].....	16
Obrázek 18 Schéma pneumatického systému výrobce Robart [6] .....	18
Obrázek 19 Servo motor [7].....	19
Obrázek 20 Motor se závitovou tyčí [8] .....	19
Obrázek 21 Kolečko Kavan [9] .....	20
Obrázek 22 Osa kola [15].....	20
Obrázek 23 Třecí vložka [10].....	20
Obrázek 24 Obecné geometrické parametry [11] .....	21
Obrázek 25 Návrh konstrukce 1 vytažená poloha .....	22
Obrázek 26 Návrh konstrukce 1 zatažená poloha .....	22
Obrázek 27 Návrh konstrukce 2 vytažená poloha .....	23
Obrázek 28 Návrh konstrukce 2 zatažená poloha .....	23
Obrázek 29 Popis finální konstrukce .....	24
Obrázek 30 Finální konstrukce v zatažené poloze.....	25
Obrázek 31 Finální konstrukce ve vysunuté poloze.....	25
Obrázek 32 Čep .....	26
Obrázek 33 Stavěcí kroužek [14].....	26
Obrázek 34 Souřadnicový systém modelu .....	27
Obrázek 35 Ukázka lokálního zjemnění sítě, svp .....	28
Obrázek 36 Detail na síť vzpěry .....	29
Obrázek 37 Vznik přidavného momentu.....	30
Obrázek 38 Zadané zatížení .....	31
Obrázek 39 Maximální zatížení případ 1 .....	32
Obrázek 40 Řez uzlem B případ 2.....	33
Obrázek 41 Řez uzlem A případ 3 .....	33

## Seznam tabulek

Tabulka 1 parametry letounu Hus.....	6
Tabulka 2 Provozní zatížení podvozku.....	17
Tabulka 3 Početní zatížení podvozku .....	17
Tabulka 4 Početní zatížení vynásobené doplňkovým součinitelem bezpečnosti .....	17
Tabulka 5 vybrané hliníkové slitiny [12] [13] .....	26
Tabulka 6 Případy zatížení pro MKP studii .....	31
Tabulka 7 Výsledky studie MKP .....	32
Tabulka 8 Hmotový rozbor zasunutý podvozek.....	34

## Seznam použitých programů

DS Catia V5

Onshape

MS Office Word

MS Office Excel

MathLab

## Použité zkratky

ACC	Air Cargo Challenge
MTOW	Maximum take of weight
PetG	Glykolem modifikovaný Polyethylene Terephthalate - termoplast
PTFE	Polytetrafluorethylen – technický polymer
CNC	Computer numerical control - počítačem řízený obráběcí stroj
CAD	Computer aided design – Software
MKP	Metoda konečných prvků

## Použité značení

$\mu$	[-]	Součinitel smykového tření
$d$	[m]	průměr pneumatiky
$F$	[N]	Síla
$F_{\text{svislá}}$	[N]	Svislá síla
$f_u$	[-]	Součinitel bezpečnosti
$F_x$	[N]	Síla do směru osy x
$F_y$	[N]	Síla do směru osy y
$F_{z \text{ in}}$	[N]	Síla ve směru osy Z dovnitř
$F_{z \text{ out}}$	[N]	Síla ve směru osy Z ven
$G$	[Kg]	Tíha
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
$m$	[kg]	hmotnost
$M_k$	[Nm]	Kroutící moment
$M_o$	[Nm]	Ohybový moment
$n_k$	[-]	Provozní násobek na kolo
$n_{\text{pr}}$	[-]	provozní násobek
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha
$W_s$	[m/s]	Přistávací rychlost
$x$	[m]	Koeficient tlumiče
$X_i$	[m]	Souřadnice X
$Y$	[m]	Dráha tlumení
$Y_{\text{ef}}$	[m]	Efektivní dráha tlumení
$Y_i$	[m]	Souřadnice Y
$Y_{\text{pn}}$	[m]	Dráha tlumení pneumatiky
$Y_{\text{tl}}$	[m]	Dráha tlumení tlumiče
$Z_i$	[m]	Souřadnice Z

# 1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem zatahovacího podvozku, který bude instalován na letoun „Hus“ studentského týmu CTU AeroLab. Původní letoun s pevným podvozkem se účastnil soutěže Air Cargo Competition 2022 a obsadil 7. místo. Výsledkem této práce bude návrh podvozku, který bude vyrobitelný v podmínkách studentského týmu. Jedním z očekávaných přínosů této práce bude zjištění, jestli má cenu uvažovat zatahovací podvozek při vývoji letounu na soutěž ACC 2024.

ACC je mezinárodní letecká soutěž pro studenty technických vysokých škol. Soutěž se pořádá od roku 2003 pravidelně jednou za dva roky. Dle zvyku soutěž pořádá univerzita vítězného týmu z předchozí soutěže. Pořádající tým se soutěže neúčastní. Hlavním smyslem soutěže je navrhnout, postavit a předvést letadlo na dálkové ovládání s co možná nejvyšším nákladem. Pravidla soutěže vymýšlí pořádající tým. [1]

Motivace pro ročník 2022 je návrh letounu pro transport transfúzních sáčků v oblastech se špatnou infrastrukturou. Letoun musí být poháněn elektrickým motorem. Letoun musí být schopen vzlétnout a přistát na travnatém letišti. [2]

## 2. Úvod do problematiky soutěže

### 2.1. Hlavní bodovaná kritéria ACC 2022:

- Naložení co nejvíce transfúzních sáčků s vodou zahuštěnou škrobem.
- Start na 30 nebo 40 metrů, kratší dráha bodově zvýhodněna.
- Vylétnutí do co největší výšky během 60-ti sekund s maximálním omezením 100 metrů.
- Uražení co největší vzdálenosti po libovolné trajektorii v čase 120 sekund. [2]

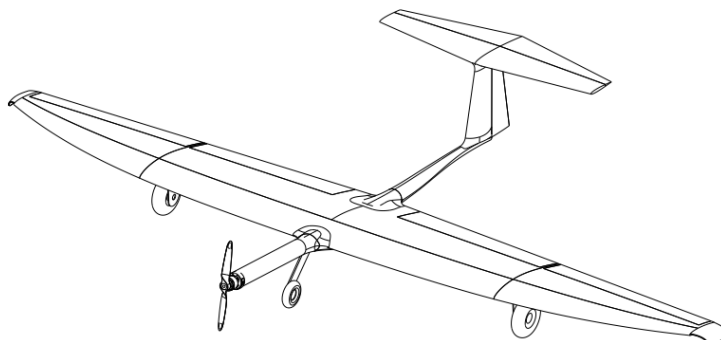
### 2.2. Požadavky na letoun vyplývající z pravidel

- Půdorys letounu připraveného na let se musí vejít do kosočtverce o stranách 1,5 m svírající libovolné úhly.
- Letoun připravený na let, stojící na zemi nesmí být vyšší než 50 cm.
- Letoun musí být složitelný a musí se vejít do přepravního boxu o rozměrech 1100x400x250 mm.
- Letoun musí vzlétnout i přistát na travnaté dráze dlouhé 40 m.
- Podvozek musí být po celou dobu letu pevně integrován do letounu.
- Letoun může ke vzletu použít pouze energii integrované baterie a specifikovaný motor s vrtulí. [2]

### 2.3. Požadavky na podvozek od kolegů z týmu

- Tříkolový podvozek s předovým kolem
- Zatahovací podvozek
- Přestavba na zatahovací podvozek nesmí představovat nárůst hmotnosti vyšší než 400 gramů oproti pevnému podvozku.
- Podvozek bude umístěn v centrolánu.
- Neměnné rozměry:
  - Rozchod
  - Rozvor
  - Výška letounu (v případě změny by se přizpůsobil předový podvozek)

## 2.4. Současný stav letounu Hus



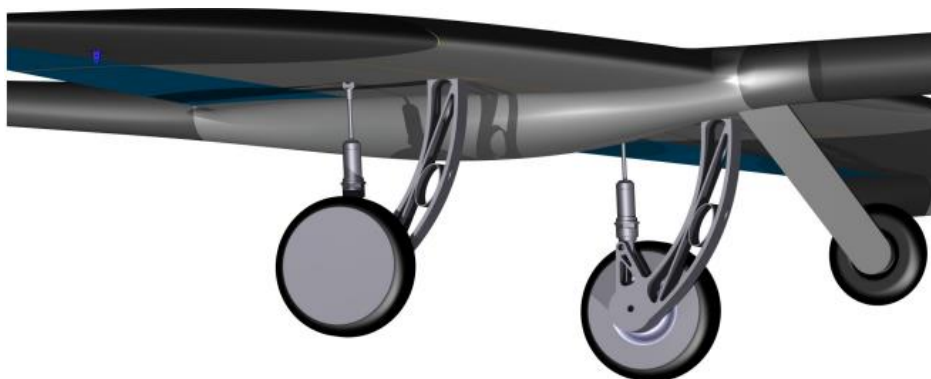
Obrázek 1 Letoun HUS [3]

Návrhová maximální vzletová hmotnost	8 Kg
Nová maximální vzletová hmotnost	4,5 Kg
Cestovní rychlost	100 km/h
Rozpětí křídla	2,1 m
Plocha křídla	0,69 m <sup>2</sup>
Rozchod podvozku	1 m
Rozvor podvozku	0,3 m

Tabulka 1 parametry letounu Hus

Původní podvozek letounu byl navržen pro maximální vzletovou hmotnost 8 Kg. Z důvodu obav poškození letounu během přistání byl podvozek navržen jako pružnice z 3D tištěného plastu PetG doplněný o olejový tlumič a pneumatické kolečko o průměru 100mm.

Z důvodu úprav konstrukce letounu při výrobě je maximální dosažitelná vzletová hmotnost letounu 4,5 Kg po naplnění všech prostorů pro určený náklad transfúzních sáčků. Nižší uvažovaná vzletová hmotnost umožní navržení podvozku bez tlumiče.



Obrázek 2 Detail na provedení podvozku [3]



### 3. Přehled koncepčních uspořádání podvozků

V této kapitole budou představeny nejčastěji používané koncepční uspořádání podvozků.

#### 3.1. Zádový podvozek



Obrázek 3 Zádový podvozek [4]

V současné době používaný, jen u velmi malých a speciálních letadel s přistávací rychlostí do 100 až 130 km/h. Těžiště letadla leží v klidu a při pomalém pojíždění za spojnicí kol hlavního podvozku, ostruhové kolo přenáší 6 – 15 % zatížení. Při prudkém brždění, či boření kol vzniká nebezpečí překlopení letounu na předek. Kromě překlopení bývá častou nehodou při pohybu po zemi přetočení letounu, v angličtině také označované jako ground loop. [4]

#### 3.2. Předový podvozek



Obrázek 4 Předový podvozek [4]

Nejběžněji používaný podvozek, těžiště leží před spojnicí kol hlavního podvozku. Předové kolo přenáší větší zatížení než ostruhové u zádového podvozku. Minimální riziko při brždění, ovšem existuje riziko překlopení podle spojnice kola hlavní podvozku a předového kola při současném brždění a zatáčení. Snadnější pro manévrování. Letoun často vzlétá ze všech tří bodů podvozku současně. Lze přistávat ve vyšších rychlostech než s normálním tricyklem. [4]

### 3.3. Tandemový podvozek



*Obrázek 5 Tandemový podvozek [4]*

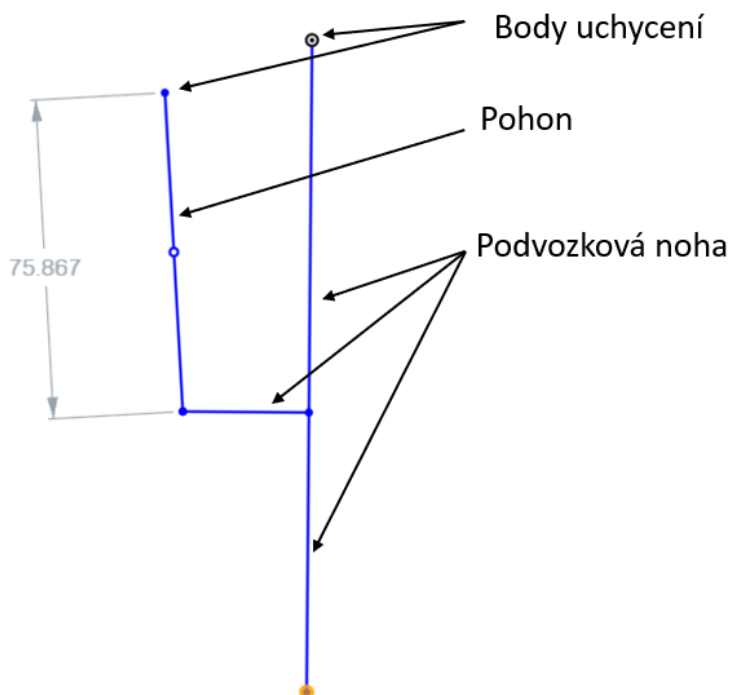
Používány hlavně u letadel, u kterých je potřeba využít prostor v oblasti těžiště. Zejména u bombardéru např. B-52. Hlavní podvozek se nachází poměrně daleko vzadu za těžištěm a přenáší jen okolo 55% zatížení, zbytek přenáší předový. Kola hlavního podvozku mezi sebou nemají žádný rozchod nebo pouze velmi malý v případě zdvojení podvozku jako je to například u B52. K udržení rovnováhy bývá podvozek doplněn podpěrami na křídlech. Z důvodu vyššího rozvoru musí být zpevněn trup a celková konstrukce vyjde cca o 15 až 20 % těžší než ostatní konfigurace. Tandemové uspořádání má vynikající směrovou stabilitu, je vhodné pro vysoké rychlosti rozjezdu a přistání. Pro zkrácení přistávací dráhy je vhodné použít i brzděné předové kolo. Brzdná síla předového kola bývá do 60% brzdné síly hlavního podvozku pro redukci nebezpečí smyku. [4]

## 4. Návrh kinematického mechanismu

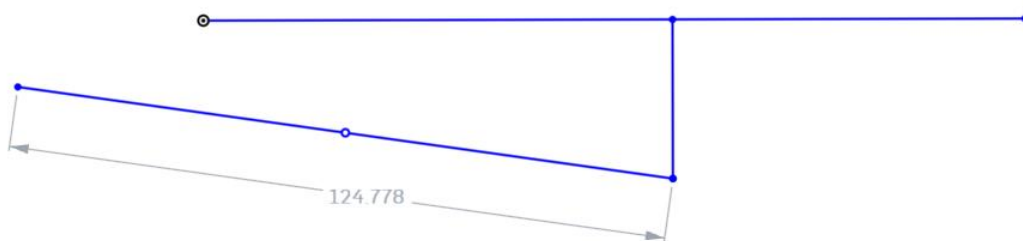
Při návrhu kinematiky je hledán kompromis, aby bylo dosaženo co nejjednodušší výroby, montáže a zároveň, aby výsledná konstrukce v křídle zabírala co nejmíň místa a měla nízkou hmotnost.

### 4.1. Mechanismus 1 bez zalamovací vzpěry

Jednoduchý mechanismus navržený pro pohon dvojčinným pneumatickým pístem. Pneumatický píst je připojen na konstrukci v křídle a na podvozkovou nohu. Za předpokladu udržení tlaku v komorách pístu, zastává funkci zámku polohy.



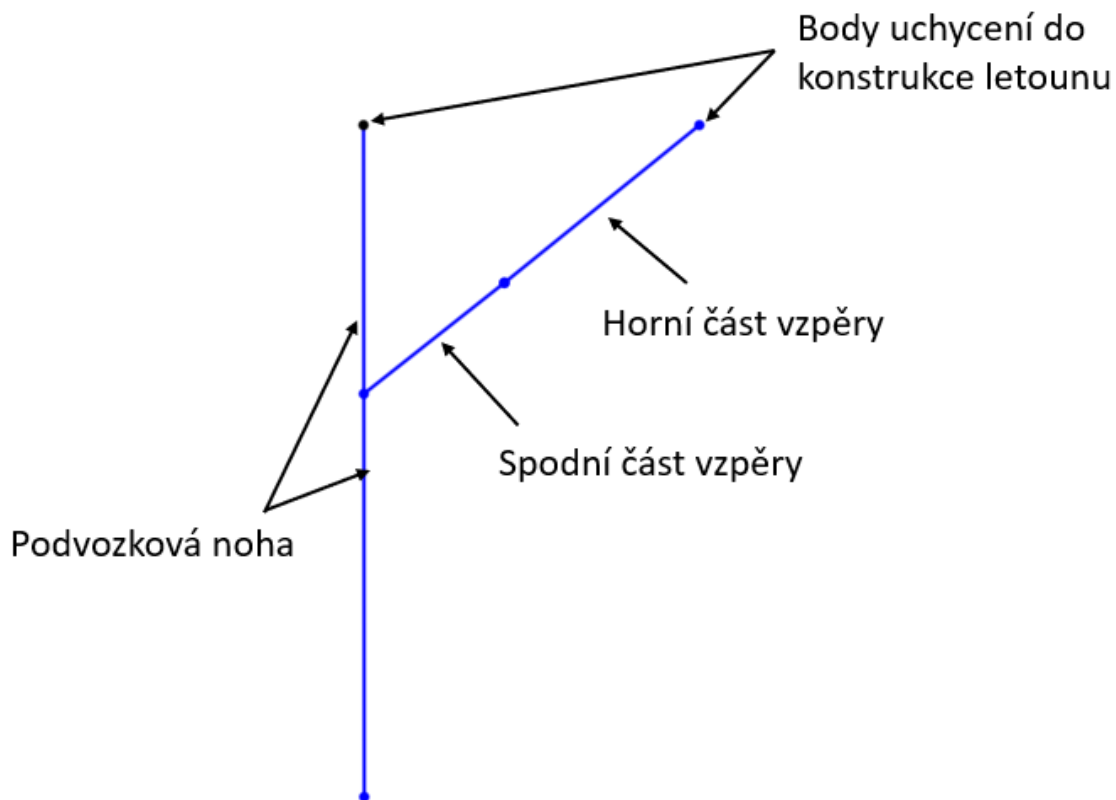
Obrázek 6 mechanismus 1 vysunutý



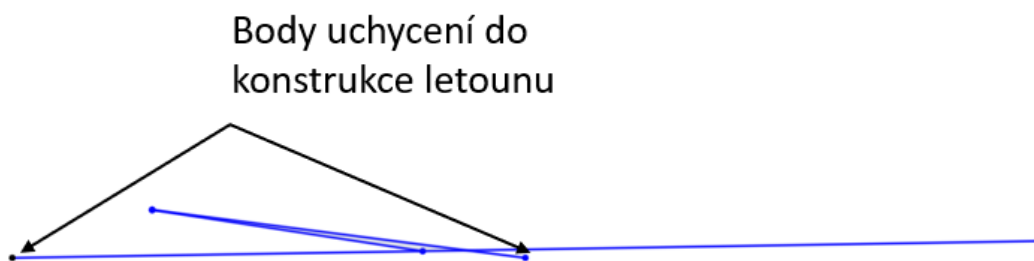
Obrázek 7 Mechanismus 1 zatažený

## 4.2. Mechanismus 2 se zalamovací vzpěrou

Nejjednodušší možné schéma mechanismu se zalamovací vzpěrou. U lehčích letounů může být pro pohon využit servo motor připojený přímo na zalamovací vzpěru. Aby nedošlo k přehřátí nebo poškození motoru, musí být navrženy i zámky krajních poloh nebo použit větší motor, který ovšem znamená přírůstek hmotnosti.



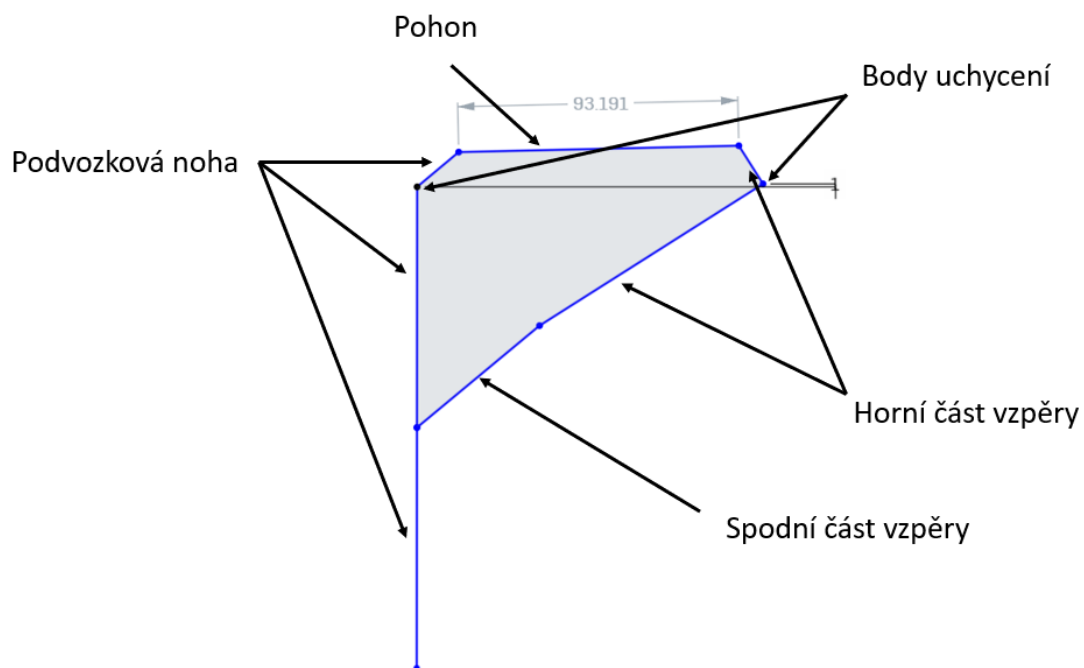
Obrázek 8 mechanismus 2 vysunutá poloha



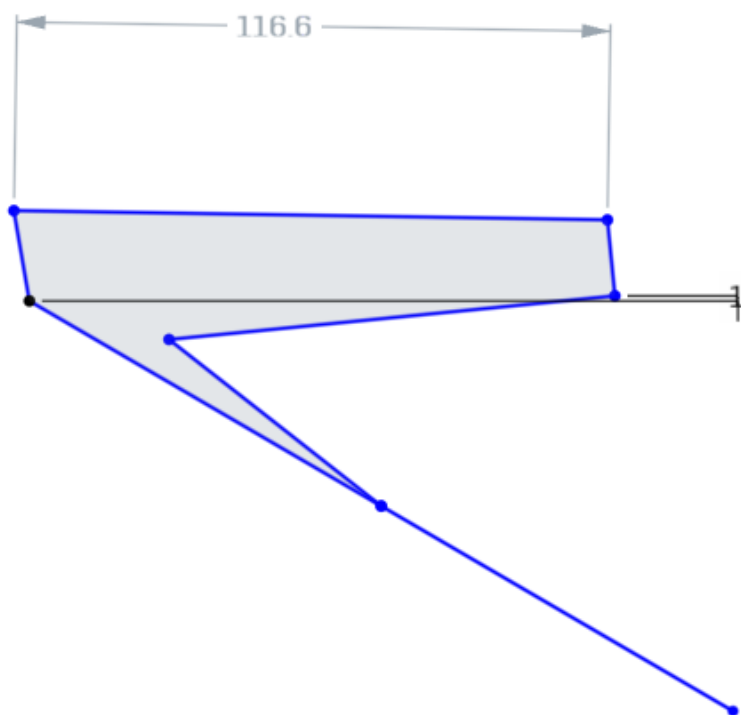
Obrázek 9 Mechanismus 2 zatažená poloha

### 4.3. Mechanismus 3 vylepšená zalamovací vzpěra

Mechanismus navržený pro fungování s pneumatickým pístem nebo elektrickým motorem se závitovou tyčí a maticí. Pohon je připojen zároveň na nohu podvozku a na zalamovací vzpěru, čímž umožní otevření z vysunuté polohy se zalomenou vzpěrou.



Obrázek 10 Mechanismus 3 popis



Obrázek 11 Mechanismus 3 obecná poloha



Obrázek 12 Mechanismus 3 zasunutý

## 5. Stanovení zatížení

Zatížení podvozku letounu bude stanoveno dle předpisu UL 2 [5], pevnostní požadavky jsou stanoveny formou provozního zatížení, tj. maximální zatížení, které lze očekávat v provozu a početního zatížení tj. provozní zatížení násobené příslušným součinitelem bezpečnosti.

### 5.1. Součinitel bezpečnosti

Předpis stanovuje hodnotu součinitele bezpečnosti 1,5. V určitých případech je součinitel bezpečnosti nutno vynásobit doplňkovým součinitelem bezpečnosti. V případě pevnostního průkazu vedeného početně se v daných případech aplikují doplňkové součinitele bezpečnosti, pro navrhovaný podvozek je nutné uvažovat doplňkový součinitel bezpečnosti 2,0 pro spoje s vůlí zatížené rázovým namáháním. [5]

Výsledný součinitel bezpečnosti pro spoje s vůlí

$$f_u = 2,0 \cdot 1,5 = 3,0 \quad (5.1)$$

### 5.2. Provozní zatížení podvozku pozemním zatížením

Stanovení přistávací rychlosti  $W_s$

$$w_s = 0,51 \cdot \sqrt[4]{m \cdot \frac{g}{S}} = 0,51 \cdot \sqrt[4]{4,5 \cdot \frac{9,81}{0,69}} = 1,44 \quad (5.2)$$

Stanovení celkové dráhy odpružení podvozku, kde  $y_{pn}$  je stlačení pneumatiky kola a  $y_{tl}$  je stlačení tlumiče.

$$y = y_{pn} + y_{tl} = 0,03 + 0 = 0,03 \quad (5.3)$$

Stanovení celkové efektivní dráhy tlumení, kdy koeficient  $x$  je 0,5 pro gumové tlumiče a 0,65 pro olejové tlumiče.

$$y_{ef} = 0,5 \cdot y_{pn} + x \cdot y_{tl} = 0,5 \cdot 0,03 + 0,5 \cdot 0 = 0,015 \quad (5.4)$$

Stanovení násobku na kolech

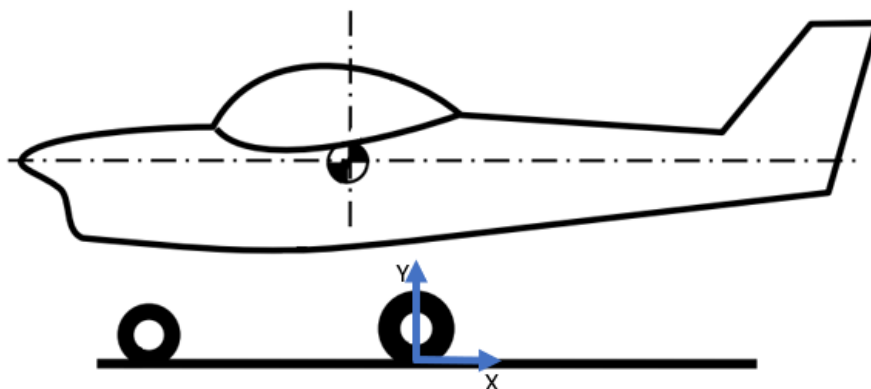
$$n_k = \frac{0,0132 \cdot \sqrt{m \cdot \frac{g}{S} + \frac{y}{3}}}{y_{ef}} = \frac{0,0132 \cdot \sqrt{4,5 \cdot \frac{9,81}{0,69} + \frac{0,03}{3}}}{0,015} = 7,04 \quad (5.5)$$

Stanovení provozního násobku v těžišti letounu

$$n_{pr} = n_k + 0,67 = 7,04 + 0,67 = 7,71 \quad (5.6)$$

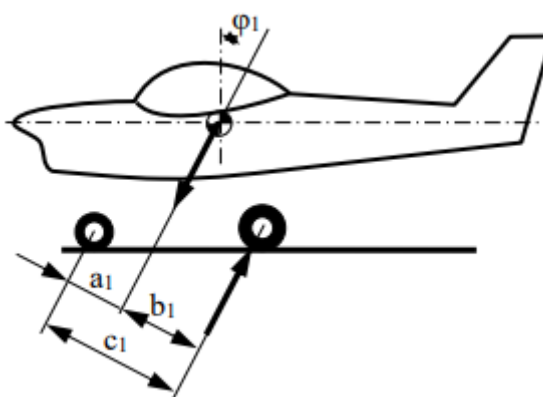
### 5.3. Přistávací podmínky pro podvozek

Uvažovaný souřadnicový systém sil na kolech letounu



Obrázek 13 Souřadnicový systém podvozku [5]

#### 5.3.1. Vodorovné přistání na tři body



Obrázek 14 Vodorovné přistání na tři body [5]

Svislá složka síly na kola hlavního podvozku

$$F_y = (n_{pr} - 0,667) \cdot G \cdot \frac{a_1}{c_1} = (7,71 - 0,667) \cdot 44,15 \cdot \frac{72,5}{284} = 79,38N \quad (5.7)$$

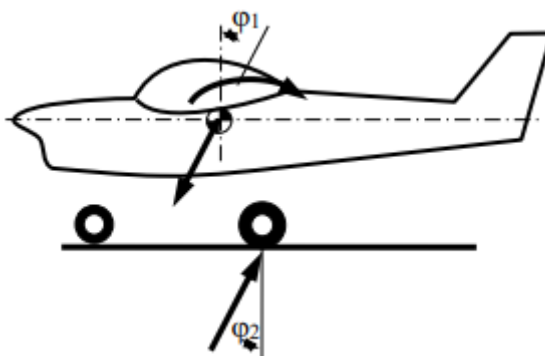
Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku

$$F_x = 0,25 \cdot n_{pr} \cdot G \cdot \frac{a_1}{c_1} = 0,25 \cdot 7,71 \cdot 44,15 \cdot \frac{72,5}{284} = 21,72N \quad (5.8)$$

Rozměry letounu, viz Obrázek 14, byly odečteny z CAD modelu.



### 5.3.2. Vodorovné přistání s předovým kolem nad zemí



Obrázek 15 Vodorovné přistání s předovým kolem nad zemí [5]

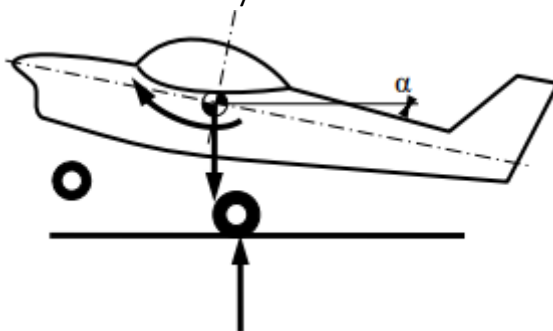
Svislá složka síly na kola hlavního podvozku

$$F_y = (n_{pr} - 0,667) \cdot G = (7,71 - 0,667) \cdot 44,15 = 310,95 \text{ N} \quad (5.9)$$

Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku

$$F_x = 0,25 \cdot n_{pr} \cdot G = 0,25 \cdot 7,71 \cdot 44,15 = 85,1 \text{ N} \quad (5.10)$$

### 5.3.3. Přistání s velkým úhlem náběhu



Obrázek 16 Přistání s velkým úhlem náběhu [5]

Svislá složka síly na kola hlavního podvozku.

$$F_{svislá} = (n_{pr} - 0,667) \cdot G = (7,71 - 0,667) \cdot 44,15 = 310,95 \text{ N} \quad (5.11)$$

Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku je nulová.

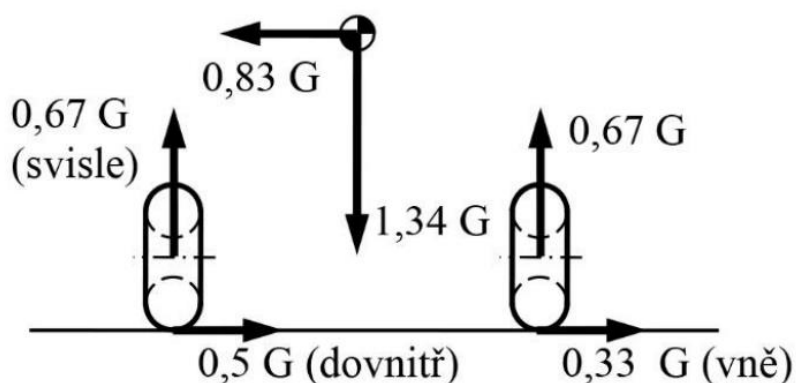
Přepočítání úhlu alfa do souřadnic letounu. Úhel alfa je odečtený z CAD, získaný spojnicí místa dotyku kol hlavního podvozku se zemí a koncem směrového kormidla.

$$F_x = F_{svislá} \cdot \sin(\alpha) = 310,95 \cdot \sin(13,8^\circ) = 74,2 \text{ N} \quad (5.12)$$

$$F_y = F_{svislá} \cdot \cos(\alpha) = 310,95 \cdot \cos(13,8^\circ) = 302 \text{ N} \quad (5.13)$$

### 5.3.4. Boční zatížení kol hlavního podvozku

Předpokládá se, že kola hlavního podvozku se dotýkají země a letoun je ve vodorovné poloze. Platí rozložení sil, viz Obrázek 17.



Obrázek 17 Boční zatížení [5]

Svisle

$$F_y = 0,67 \cdot G = 0,67 \cdot 44,15 = 29,58 \text{ N} \quad (5.14)$$

Dovnitř

$$F_{z \text{ in}} = 0,5 \cdot G = 0,5 \cdot 44,15 = 22,08 \text{ N} \quad (5.15)$$

Vně

$$F_{z \text{ out}} = 0,33 \cdot G = 0,33 \cdot 44,15 = 14,57 \text{ N} \quad (5.16)$$

### 5.3.5. Zatížení kol při brzdění

Vzhledem k nízké přistávací rychlosti a dlouhé travnaté přistávací dráze návrh letounu nepočítá s brzděnými koly. Síly na kola při zpomalování budou výrazně nižší než síly během přistávání a nebude na ně dále brán ohled.

### 5.3.6. Provozní zatížení podvozku

	Fx [N]	Fy [N]	Fz in [N]	Fz out [N]
Vodorovné přistání na tři body	10,86	39,69	0	0
Vodorovné přistání s příďovým kolem nad zemí	42,55	155,48	0	0
Přistání s velkým úhlem náběhu	-37,10	151	0	0
Boční zatížení kol hlavního podvozku:	0	29,58	22,08	14,57
Zatížení při brzdění	0	0	0	0

Tabulka 2 Provozní zatížení podvozku

### 5.3.7. Početní zatížení podvozku

	Fx [N]	Fy [N]	Fz in [N]	Fz out [N]
Vodorovné přistání na tři body	16,29	59,54	0	0
Vodorovné přistání s příďovým kolem nad zemí	63,83	233,21	0	0
Přistání s velkým úhlem náběhu	-55,65	226,5	0	0
Boční zatížení kol hlavního podvozku:	0	44,37	33,12	21,86
Zatížení při brzdění	0	0	0	0

Tabulka 3 Početní zatížení podvozku

### 5.3.8. Početní zatížení vynásobené doplňkovým součinitelem bezpečnosti

	Fx [N]	Fy [N]	Fz in [N]	Fz out [N]
Vodorovné přistání na tři body	32,58	119,07	0	0
Vodorovné přistání s příďovým kolem nad zemí	127,65	466,43	0	0
Přistání s velkým úhlem náběhu	-111,30	453	0	0
Boční zatížení kol hlavního podvozku:	0	88,74	66,24	43,71
Zatížení při brzdění	0	0	0	0

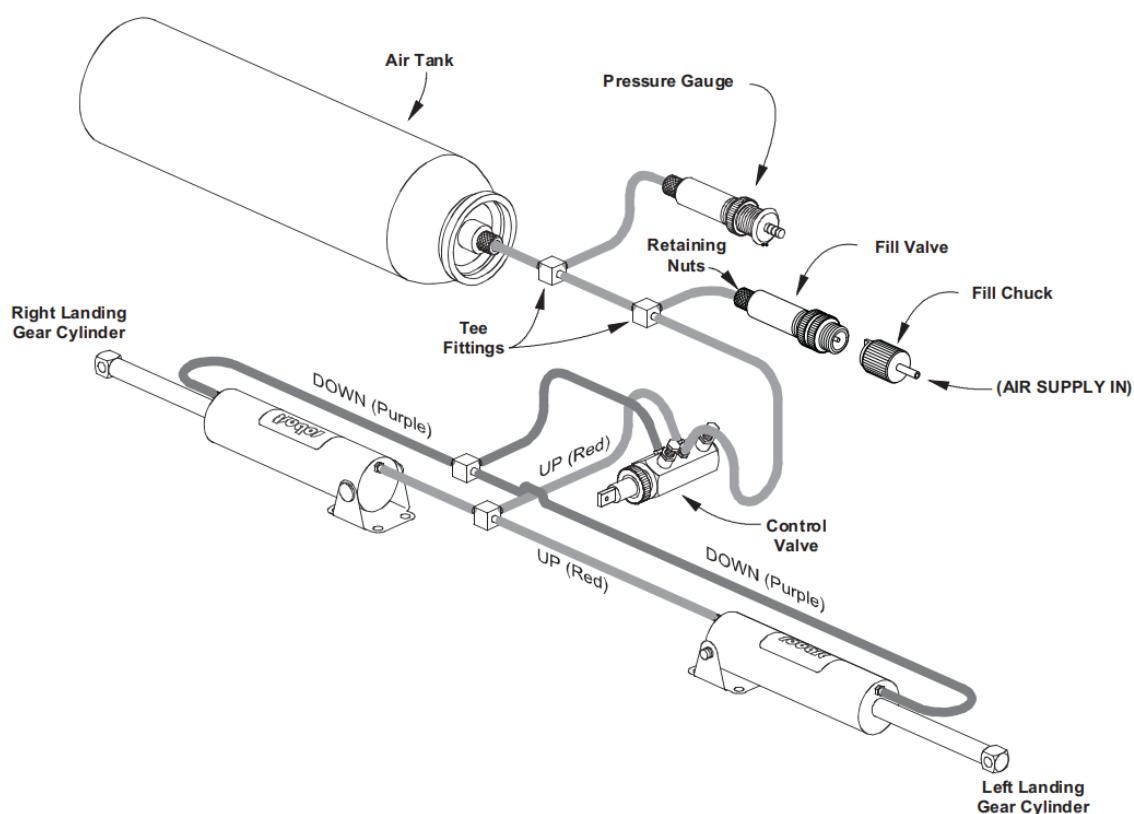
Tabulka 4 Početní zatížení vynásobené doplňkovým součinitelem bezpečnosti

## 6. Návrh konstrukce

Konstrukce podvozku je navržena s ohledy na minimální hmotnost, jednoduchost montáže a co nejnižší pořizovací náklady.

### 6.1. Pneumatický pohon

Pneumatický pohon využívá k vykonání lineárního pohybu dvojčinný píst. Tlak je do systému dodáván tlakovou nádobou, která je natlakovaná před vzletem letadla na 110 PSI. Tlakový vzduch je přiváděn do ventilu, který je přes táhlo ovládán modelářským servo motorem a distribuuje vzduch do komor pístu dle potřeby. Servo motor je zapojen do přijímače a ovládán pilotem ze země. Pro vyšší bezpečnost může být mezi ventil a přijímač zapojen ochranný senzor tlaku, který při detekci úniku vzduchu přepne ventil do vysunuté polohy a zbytkový vzduch vysune podvozek.



Obrázek 18 Schéma pneumatického systému výrobce Robart [6]

## 6.2. Elektrický pohon servo motor

Neustále odebírá proud z baterie pro udržení zvolené polohy, u hůře navržených systémů hrozí poškození servo motoru přehřátím. U levnějších serv s plastovými převody nezářídka dochází k vylámaní zubů kol.



Obrázek 19 Servo motor [7]

## 6.3. Elektrický pohon motor se závitovou tyčí



Obrázek 20 Motor se závitovou tyčí [8]

V některých aplikacích může nahradit pneumatický systém, oproti pneumatickému systému trvá vysouvání podvozku přibližně 2x až 3x déle. Výhodou je samosvornost šroubového mechanismu, nižší hmotnost a cena.

## 6.4. Kolečka

Z požadavku na pružení podvozku je vybráno pneumatické kolečko. Z variant dostupných na trhu přicházejí v úvahu kolečka značky Kavan. Volím kolečka „SCALE“ o průměru 110 mm s profilem a kuličkovými ložisky s vnitřním průměrem 5 mm. Hmotnost jednoho kusu je 62 gramů. Kolečko bude na ose axiálně zajištěno stavěcími kroužky, osa bude axiálně zajištěna maticí.



Obrázek 221 Kolečko Kavan [9]



Obrázek 212 Osa kola [15]

## 6.5. Třecí vložka

Pro zajištění hladkého chodu zatahovacího mechanismu budou čepy vloženy do třecích vložek. Na obrázku 23 je vidět zvolená třecí vložka z katalogu firmy SKF s označením PCM 030403 E/VB055 z materiálu PTFE. Uložení vložky v díře o průměru 4,5 mm a toleranci H7, pro hřídel s průměrem 3 mm a tolerancí f7. maximální statické zatížení 0,72 kN. Koeficient tření 0,03-0,25. [10]



Obrázek 23 Třecí vložka [10]

## Geometrické parametry

### Rozchod "B"

Vzdálenost mezi koly, vozíky hlavního podvozku v půdorysu nebo nárysu.

### Rozvor "b"

Vzdálenost os kol hlavního podvozku a předového podvozku.

### Vyložení předového podvozku "a"

Vzdálenost předového kola (vozíku) od těžiště letadla.

### Vyosení předového podvozku "c"

Vzdálenost kola předového podvozku od roviny symetrie letadla.

### Vyložení hlavního podvozku "e"

Vzdálenost osy kol hlavního podvozku od těžiště letadla.

### Úhel vyložení hl. podvozku "γ"

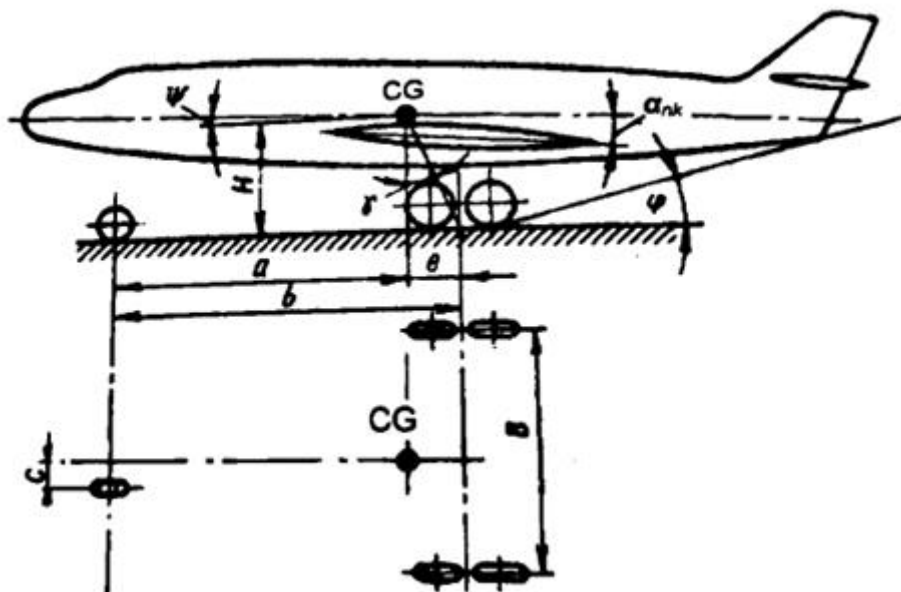
Úhel mezi svislicí spuštěnou z těžiště a spojnicí těžiště s bodem doteku mezi hlavním kolem anebo středem bodů doteku kol vozíku s povrchem dráhy.

### Úhel překlopení "φ"

Úhel mezi tečnou kol hlavního podvozku a obrysu ocasu letadla a povrchem dráhy.

### Úhel postoje "ψ"

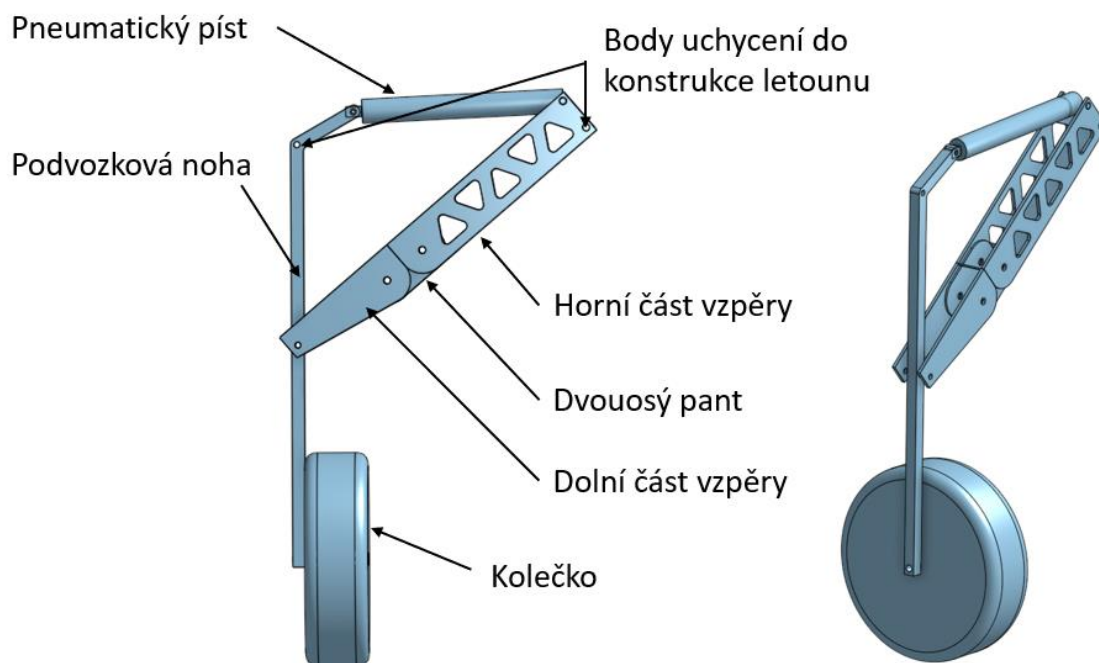
Úhel mezi návrhovou podélnou osou letadla a povrchem dráhy. [11]



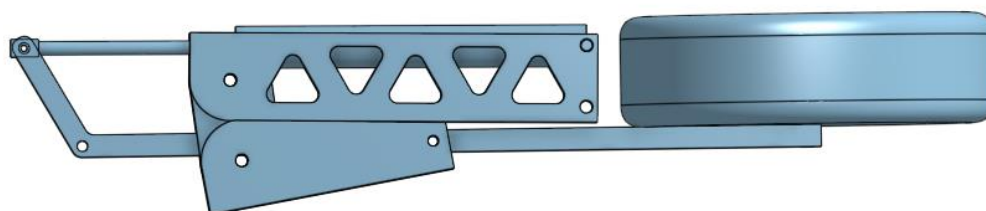
Obrázek 24 Obecné geometrické parametry [11]

## 6.6. Naznačení konstrukce se zalamovací vzpěrou

Konstrukce využívající pro pohon a zajištění krajní polohy pneumatický píst nebo motor se závitovou tyčí a maticí. Zalamovací vzpěra se skládá ze tří částí. Horní část zalamovací vzpěry se skládá z odlehčeného U-profilu. Pant a dolní část vzpěry se skládají z plechu, aby vznikl průchozí prostor a nebyl omezen pohyb podvozkové nohy při zatahování.



Obrázek 265 Návrh konstrukce 1 vytažená poloha



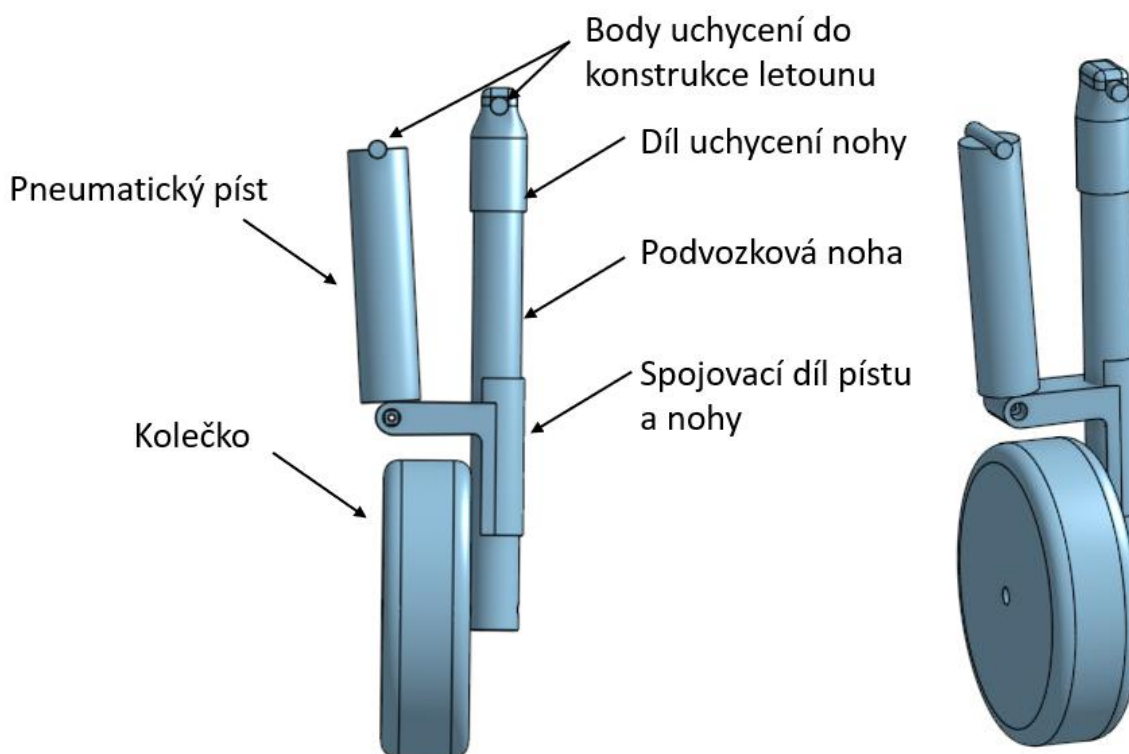
Obrázek 256 Návrh konstrukce 1 zatažená poloha



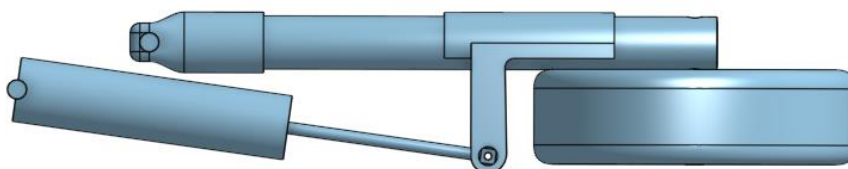
## 6.7. Naznačení konstrukce bez zalamovací vzpěry

Jednoduchá konstrukce, jejímž základem je trubková podvozková noha s připojeným pneumatickým pístem pro pohon zatahování. Píst zároveň zastává funkci mechanické pojistky krajních poloh. Tato konstrukce předpokládá minimální ztráty tlaku v komorách pístu pro udržení požadované polohy.

Největší nevýhodou konstrukce je malá vzdálenost bodů uchycení do konstrukce letounu, jejímž důsledkem vznikají výrazné reakční síly vyvolané bočním zatížením, které působí do konstrukce letounu. Vzdálenost bodů uchycení do konstrukce letounu by se dala zvýšit použitím pístu s vyšším zdvihem, čímž zásadně narůstá hmotnost konstrukce a klade požadavky na vyšší objem nádoby na stlačený vzduch.



Obrázek 27 Návrh konstrukce 2 vytažená poloha

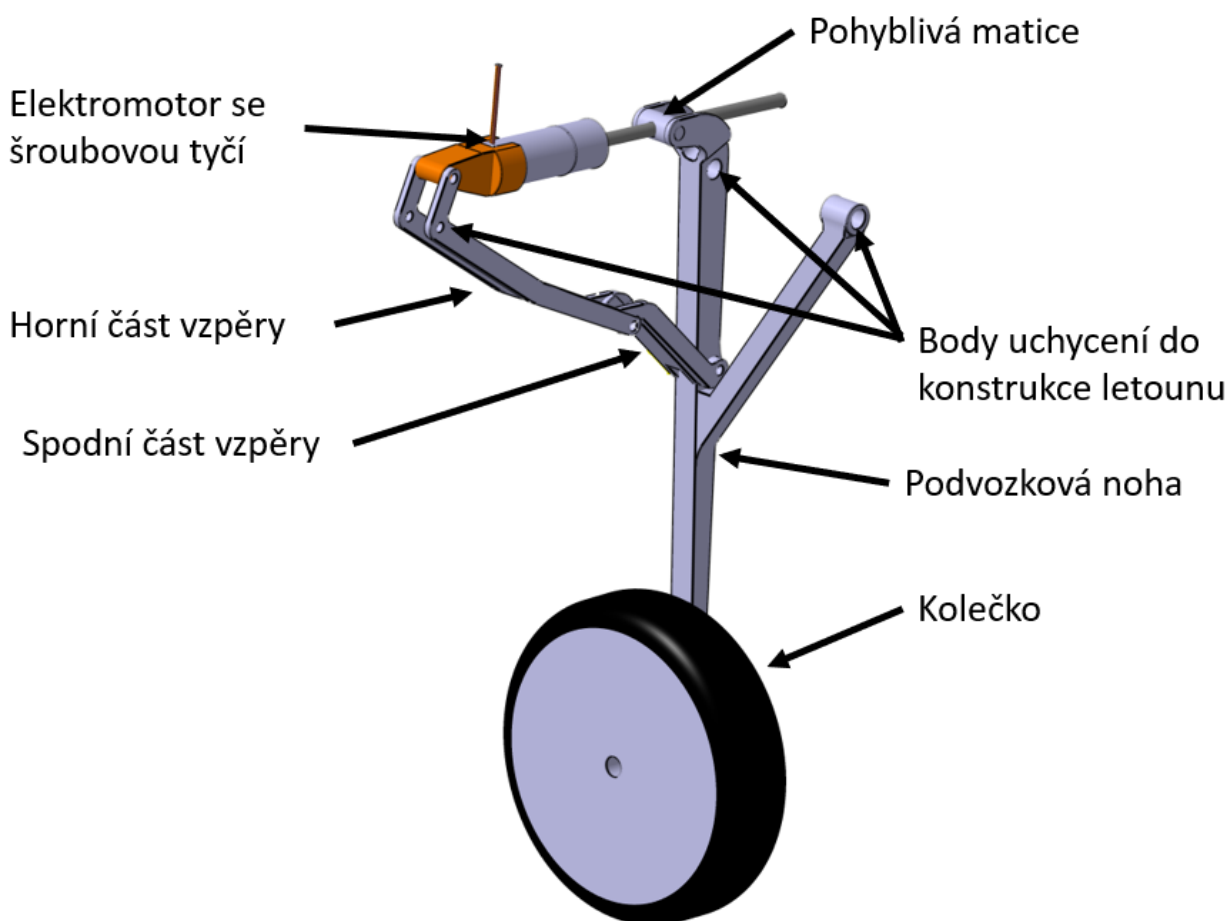


Obrázek 28 Návrh konstrukce 2 zatažená poloha

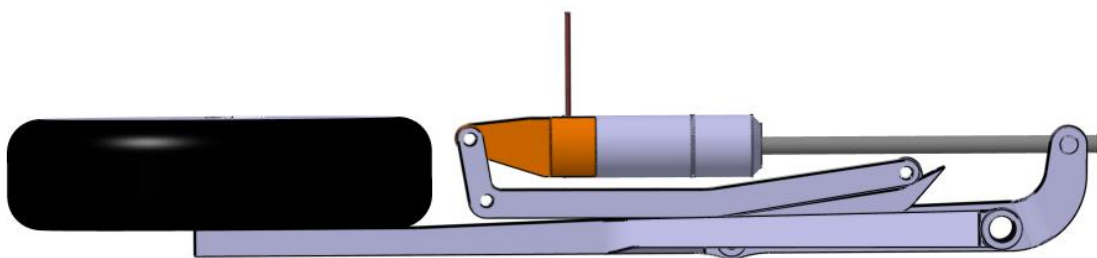
## 6.8. Finální konstrukce podvozku

Finální konstrukce podvozku byla vymodelována v programu Catia V5. Finální konstrukce využívá podobnou kinematiku zatahování jako návrhový koncept 1 se zalamovací vzpěrou. Podvozková noha ve tvaru písmene ypsilon lépe přenesne zatížení z podvozku do konstrukce letadla přes 3 body.

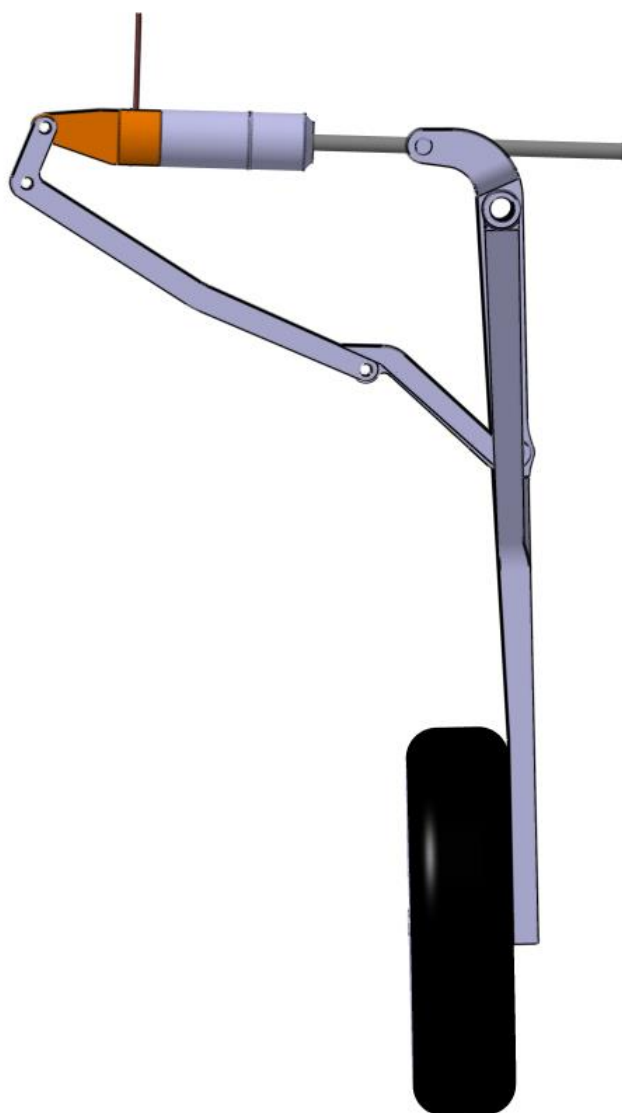
Tento koncept umožňuje využít jak elektrický, tak i pneumatický pohon. Na obr. 29 je varianta s elektrickým pohonem. Elektrický pohon je ve srovnání s pneumatickým systémem lehčí a levnější. Jedna z vlastností elektrického systému je samosvornost závitové tyče a pohyblivé matice, která bude využita k aretaci koncové polohy v zataženém stavu bez nutnosti využít polohové zámky. Stabilita vysunuté polohy je řešena zalomením vzpěry. Výroba všech nenakupovaných dílů počítá s využitím CNC obrábění z hliníkových materiálů.



Obrázek 29 Popis finální konstrukce



*Obrázek 30 Finální konstrukce v zatažené poloze*



*Obrázek 31 Finální konstrukce ve vysunuté poloze*

## 6.9. Volba materiálu

Jako hlavní materiál pro obráběné díly podvozku byla zvolena slitina hliníku s označením 6061 ve stavu T6. Tato slitina je jedna z nejlépe dostupných hliníkových slitin. Vyznačuje se dobrou svařitelností a obrobiteľností. Zároveň má dostačující mechanické vlastnosti.

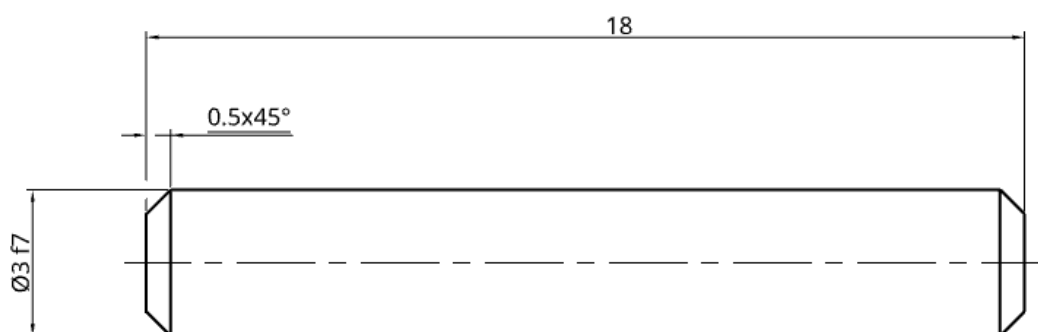
Slitina	Mez kluzu v tahu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [Mpa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Obrobiteľnost	svařitelnost
6061-T6	248	289	68 GPa	Dobrá	Výborná
7075-T6	475	537	71 GPa	Výborná	Dobrá
2024-T351	324	441	73 GPa	Výborná	Špatná

Tabulka 5 vybrané hliníkové slitiny [12] [13]

## 6.10. Čepy

Funkci čepu v kloubech zalamovací vzpěry bude zastávat tyčka se sražením, která bude vždy v jedné části (vnitřní) vzpěry/nohy uložena s přesahem a v druhé části spoje uložena s vůlí v třecích vložkách, doplňkové axiální zajištění budou zastávat stavěcí kroužky.

Polotovar: Tyč kruhová  $\varnothing 4$  mm AISI304



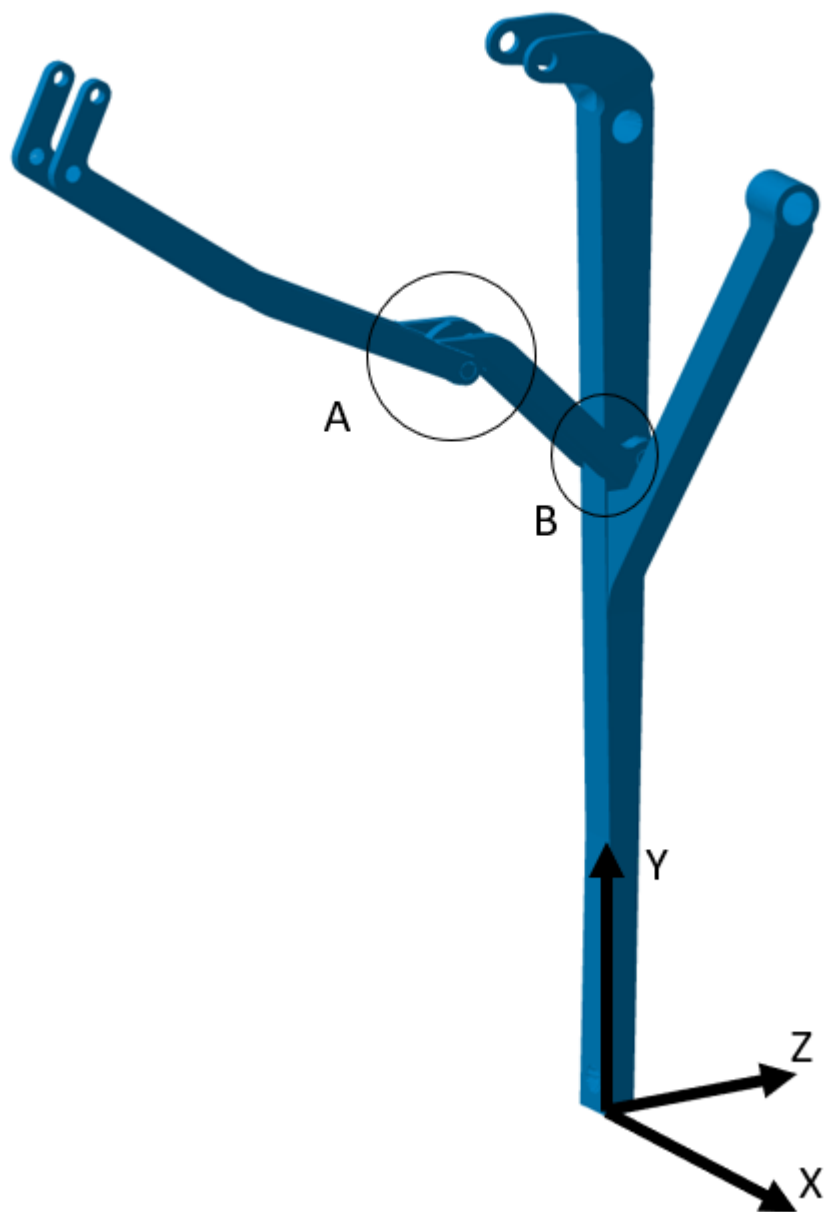
Obrázek 31 Čep



Obrázek 32 Stavěcí kroužek [14]

## 7. Pevnostní výpočet

Pevnostní výpočet navrhovaného podvozku byl proveden v prostředí generative structural analysis for designers programu Catia V5, řešení pevnostní studie bylo provedeno řešičem Elfini Solver. Předpokládaná kritická místa výpočtu jsou hlavně podvozková noha a vyznačené uzly A a B.



Obrázek 33 Souřadnicový systém modelu

## 7.1. Tvorba síťového modelu

Pro co nejlepší přesnost výsledku výpočtu a zároveň zachování kratšího výpočetního času, je nastavena hrubší základní síť modelu, zjemněna na významných místech např. uložení čepů nebo plochy dotyku funkcí local mesh size. Pro lepší určení špiček napětí je zjemněno i okolí největšího spočteného napětí.

### 7.1.1. Zjednodušení modelu

#### 1) Vynechání pohonu

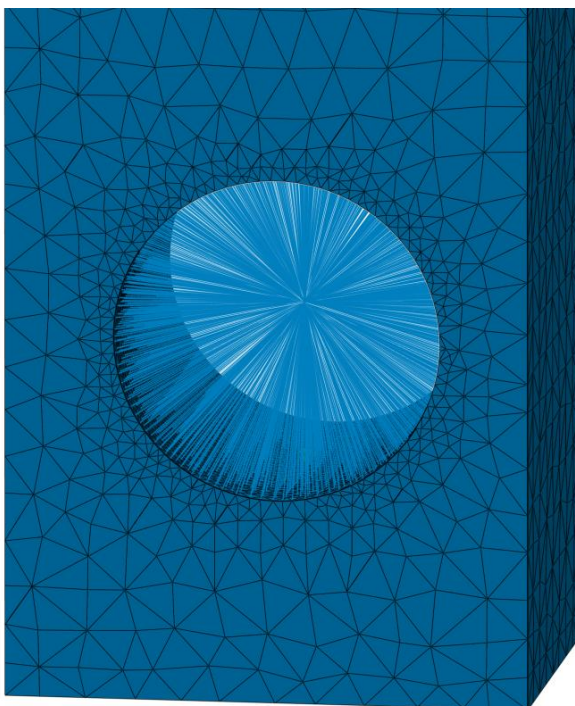
- Podvozek je navržen tak, že letoun přistane bezpečně i po ztrátě tlaku v pneumatickém válci nebo v případě prokluzu matice na závitové tyči pohonu.

#### 2) Vynechání kolečka

- Provozováním stejného modelu koleček na letounu s dvojnásobnou maximální vzletovou hmotností bylo provozem prokázáno, že kolečka spolehlivě obstojí v provozu s určeným zatížením. Namísto zavedení zatížení do místa styku kolečka se zemí jsou síly zavedeny do díry pro osu kolečka s využitím elementu smooth virtual part.

#### 3) Aplikace elementů Smooth virtual part

- Element, který se chová jako tuhé těleso bez hmotnosti, které nezvyšuje tuhost v místě aplikace, tato funkce je využita v dírách pro čepy uložení do konstrukce letounu a v díře pro osu kolečka. Na obrázku Obrázek 34 je vidět díra pro osu kolečka s aplikovaným elementem smooth virtual part



Obrázek 34 Ukázka lokálního zjemnění sítě, svp

## 7.1.2. Aplikace geometrických a funkčních vazeb

### 1) Pivot

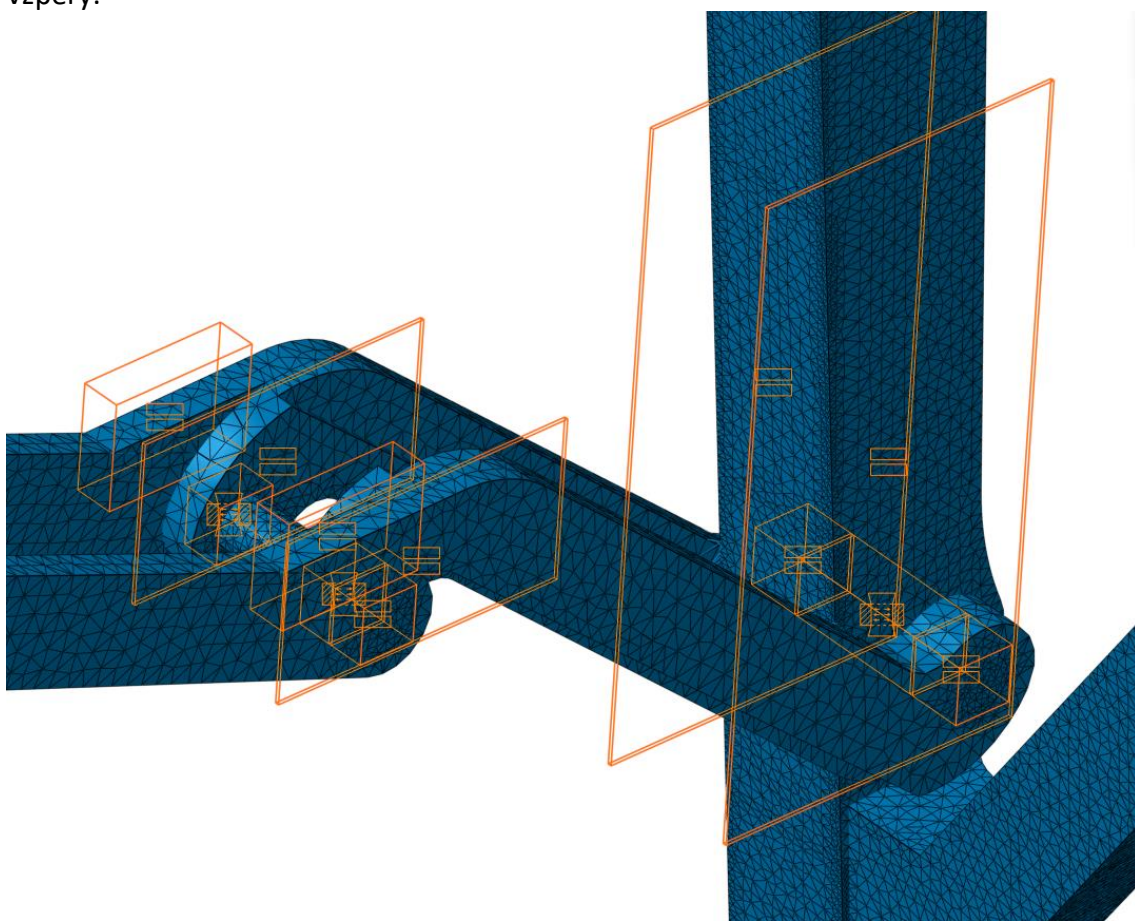
- Tato vazba odebere všechny stupně volnosti až na rotaci kolem jedné zvolené osy. Byla použita v místech uložení do konstrukce letounu přes elementy smooth virtual part.

### 2) Surface contact

- Tato vazba je použita buď jako obecná vazba dotyku ploch, nebo v dírách s kluzným ložiskem pro čep zalamovací vzpěry. Pro simulaci kluzných ložisek byl nastaven koeficient tření dle katalogu skf  $\mu=0,1$ .

### 3) Pressure fitting

- Tato vazba simuluje nalisování čepu v kloubech zalamovací vzpěry, zamezí posuv i rotaci simuluje nalisování čepu v díře. Použito na místa kontaktů čepů a vzpěry.



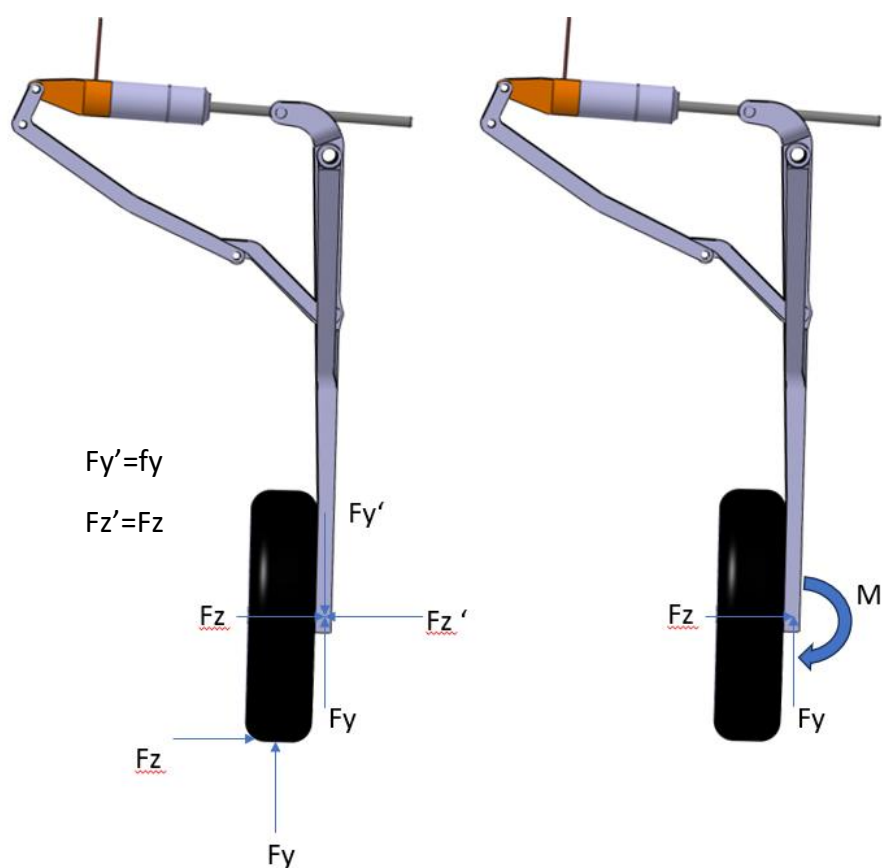
Obrázek 35 Detail na síť vzpěry

## 7.2. Zatížení

Do numerické studie byly zadány hodnoty početních zatížení z kapitoly 5. Stanovení zatížení. Do numerické studie bylo zatížení zadáno těmito funkcemi:

- 1) Distributed Force
  - Pro určené síly  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  bylo zvoleno působiště sil v díře pro osu kolečka přes element smooth virtual part. Kladné orientace v souladu s obrázkem 34.
- 2) Moment
  - Ohybový a kroutící moment vzniklý nahrazením působiště sil v dotyku se zemí, do díry osy kolečka na element virtual smooth part.
  - Princip výpočtu  $M$  od  $F_y$  a  $F_z$  viz obr 37, ostatní případy řešeny analogicky.

$$M = -F_z \cdot \frac{d}{2} + F_y * x \quad (7.1)$$



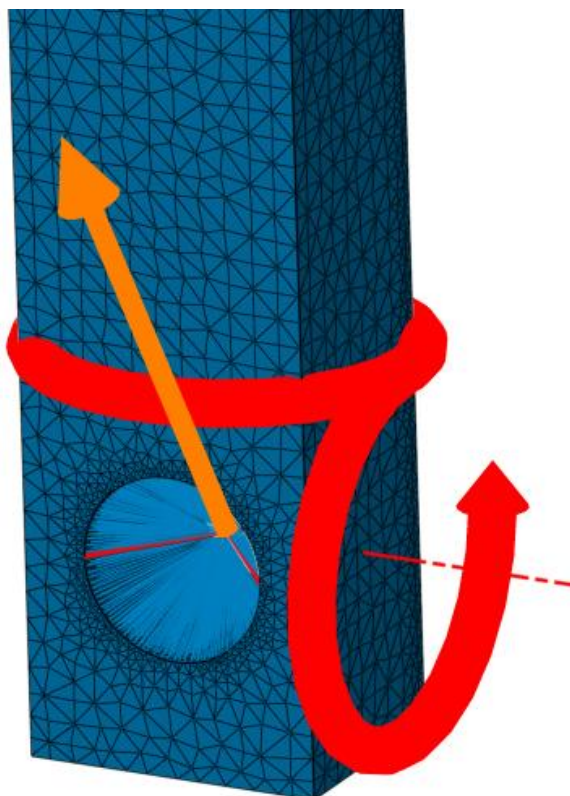
Obrázek 36 Vznik přidavného momentu



### Výsledné zatížení zadané do studie MKP

Případ	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mo od Fy [Nm]	Mo od Fz [Nm]	Mk od Fy [N]
1 Vodorovné přistání s příďovým kolem nad zemí	128	467	0	9,36	0	0
2 Přistání s velkým úhlem náběhu	-112	453	0	9,06	0	2,23
3 Boční zatížení kol hlavního podvozku in	0	89	-67	1,77	3,64	0
4 Boční zatížení kol hlavního podvozku out	0	89	44	1,77	-2,4	0

Tabulka 6 Případy zatížení pro MKP studii



Obrázek 37 Zadané zatížení

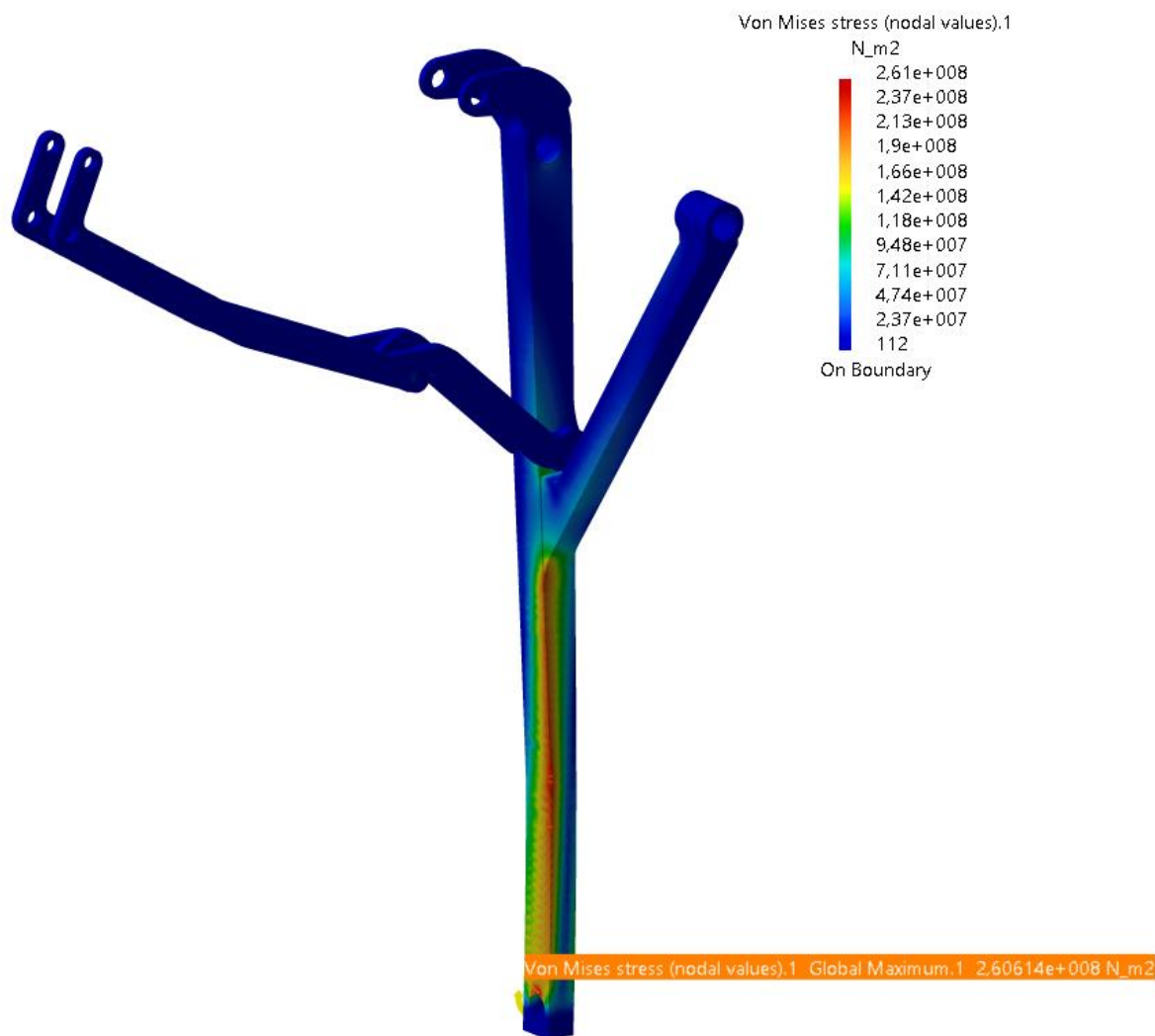
### 7.3. Výsledky numerické studie

Pro kontrolu sestavy podvozku byly zadány nejméně příznivé hodnoty početního zatížení s doplňkovým součinitelem bezpečnosti viz Tabulka 4 doplněné o ohybový a krouticí moment vzniklý změnou působišť sil. Moment k ose Z není uvažován, neboť kolečka nejsou brzděná.

Případ	Napětí Von Mises [Mpa]	
	Noha	Nejvíce namáhaný Čep
1 vodorovné přistání s přídovým kolem nad zemí	260,9	81,5 Uzel B
2 přistání s velkým úhlem náběhu	260,6	88,9 Uzel B
3 boční zatížení kol hlavního podvozku in	157,1	89,5 Uzel A
4 boční zatížení kol hlavního podvozku out	75,1	47,8 Uzel A

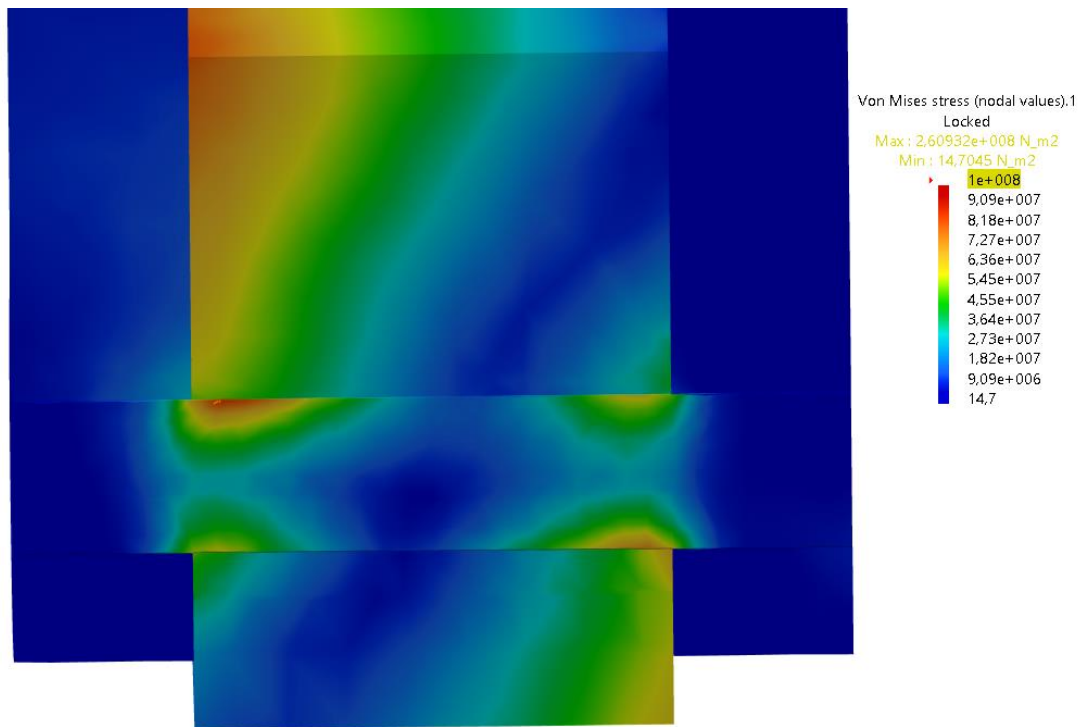
Tabulka 7 Výsledky studie MKP

Výsledné napětí nepřekročilo hodnotu 267 MPa, což je nižší než mez pevnosti v tahu uvažované slitiny hliníku 6061 T6, která je 289 MPa.



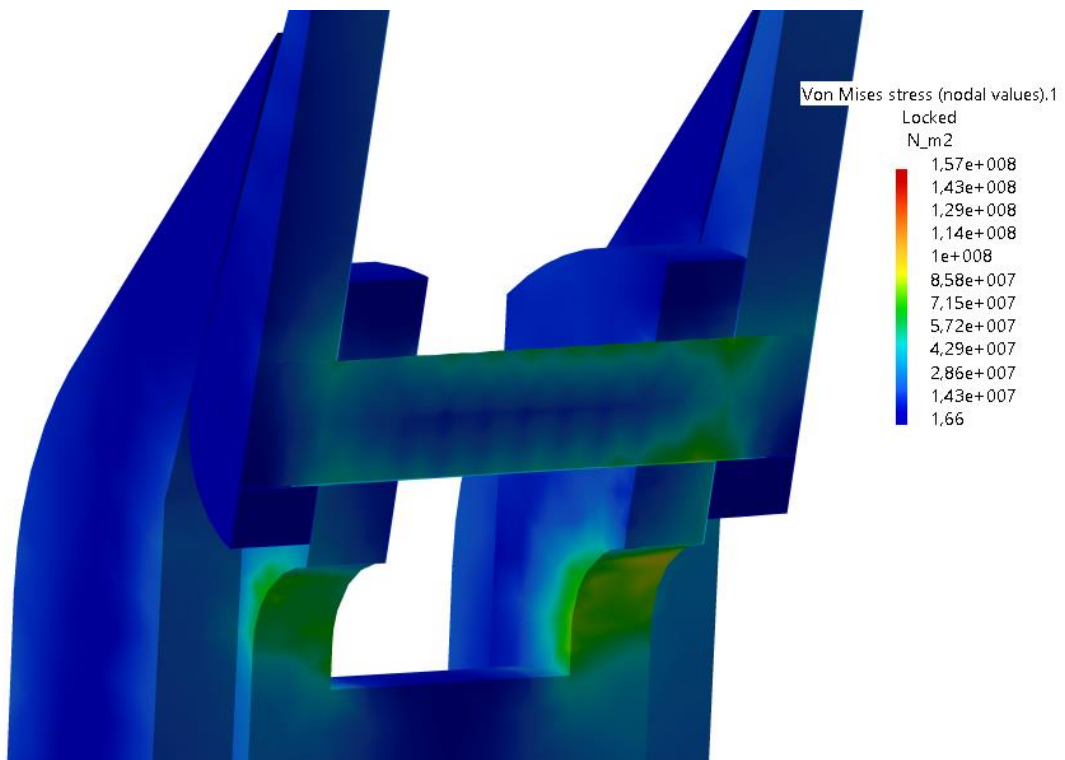
Obrázek 38 Maximální zatížení případ 1

Největší napětí v Uzlu B bylo Pro případ přistání s velkým úhlem náběhu



Obrázek 39 Řez uzlem B případ 2

Maximální napětí v uzlu A bylo pro případ bočního zatížení kol hlavního podvozku se silou  $F_z$  směřující dovnitř



Obrázek 40 Řez uzlem A případ 3

## 8. Hmotový rozbor

Hodnoty hmotností byly odečteny z CAD, hmotový rozbor je proveden pro konstrukci s elektrickým pohonem zatahovacího mechanismu. Hmotový rozbor je proveden pro podvozek v zatažené poloze. Hmotový rozbor je vytvořen pro sestavu zatahování pravého kola, levá strana symetricky (souřadnice Z budou kladné), hmotnost řídicí jednotky je proto uvažována poloviční. Hmotový rozbor neobsahuje uchyvací prvky ke konstrukci letounu.

Prvek	Hmotnost [g]	Vzdálenost těžiště prvku od počátku souřadného systému		
		Xi (mm)	Yi (mm)	Zi (mm)
Motor s tyčí	30	154	17	-438
Řídicí jednotka motoru	18	10	0	0
Podvozková noha	46	163	0	-454
Spodní část vzpěry	7	154	5	-475
Horní část vzpěry	6	154	7	-441
Kolečko	56	155	14	-341
Matice pohonu	4	153	17	-530
Čepy+stavěcí kroužky	5	154	6	-460
Osa kola + ax. Pojištění	10	155	15	-341
Suma	182			

Tabulka 8 Hmotový rozbor zasunutý podvozek

## 9. Závěr

V této práci byl popsán postup návrhu zatahovacího podvozku pro letoun Hus studentského týmu CTU AeroLab. Byl navržen kinematický mechanismus, který umožňuje využít pneumatický i elektrický pohon. Během návrhu byli splněny všechny požadavky kladené na podvozek, zejména velikost zatahovacího mechanismu, který se bez přesahu vejde do omezeného prostoru křídla. Konečná hmotnost celého podvozku je 363 gramů což nepředstavuje znatelný rozdíl oproti původnímu řešení. Vzhledem k výsledkům pevnostních výpočtů by se s využitím pevnější slitiny hliníku mohl podvozek ještě více odlehčit. Dále na tuto práci můžou navázat kolegové z týmu s konstrukčním návrhem uchycení podvozku do konstrukce letounu a úpravou potahů křídlo, aby celý mechanismus zatahování plynule fungoval. Z výsledků této práce vyplývá, že zatahovací podvozek má smysl uvažovat při vývoji dalších soutěžních letounů CTU AeroLab.

## 10. Reference

- [1] WIKIPEDIA.ORG. [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Air\\_Cargo\\_Challenge#Number\\_of\\_participated\\_Teams\\_per\\_Country\\_\(2007-2019\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_Cargo_Challenge#Number_of_participated_Teams_per_Country_(2007-2019))
- [2] AkaModell Munich. ACC2022-Regulations v01.15 [online]. Dostupné z: [https://akamodell-muenchen.de/wp-content/uploads/2020/08/regulations\\_acc\\_2021\\_munich\\_v01\\_10.pdf](https://akamodell-muenchen.de/wp-content/uploads/2020/08/regulations_acc_2021_munich_v01_10.pdf)
- [3] CTU Aerolab, Design report ACC 2022
- [4] GUDMUNDSSON, Snorri. General Aviation Aircraft Design: Applied methods and procedures. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397308-5
- [5] Letecká amatérská asociace ČR. UL 2 - Část I [online]. Praha: Letecká amatérská asociace ČR, 2019. Dostupné z: [https://www.laacr.cz/tml/files/2023/05/UL2-cast-I\\_26.3.2019.pdf](https://www.laacr.cz/tml/files/2023/05/UL2-cast-I_26.3.2019.pdf)
- [6] ROBART.COM. [online]. Dostupné z: <https://robart.com/collections/air-systems-components-air-cylinders/products/3-8-x-1-2-stroke-air-cylinder>.
- [7] BIGHOBBY.COM. [online]. Dostupné z: [https://www.bighobby.cz/digitalni-servo-pdi-hv7246mg-72g-0-1s-48kg-180-jx-servo/?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQiAwbitBhDIARIsABfFYIij4OzQLfDX4bKHNeNvPvZm-ubuRoR\\_1THPaNYuDecepq6CXEO\\_ZacaAu6gEALw\\_wcB](https://www.bighobby.cz/digitalni-servo-pdi-hv7246mg-72g-0-1s-48kg-180-jx-servo/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAwbitBhDIARIsABfFYIij4OzQLfDX4bKHNeNvPvZm-ubuRoR_1THPaNYuDecepq6CXEO_ZacaAu6gEALw_wcB).
- [8] JP HOBBY.COM. [online]. Dostupné z: <https://www.jphobby.eu/en/retracts/3799-jp-hobby-er-120-alloy-electric-main-retract-motor-part-m4-76mm-shaft-for-t-one-f-16-jtm-f-16c-18-12m-model.html>.
- [9] RC PROFI.CZ. [online]. Dostupné z: <https://www.rcprofi.cz/super-lehka-scale-kolecka-s-profilem-100mm-2-ks>.
- [10] SKF.COM. [online]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCM%20030403%20E%2FVB055>.
- [11] Mikula J.: Konstrukce a projektování letadel II, Vydavatelství ČVUT, Praha 2005,

- [12] MILITARY HANDBOOK METALLIC MATERIALS AND ELEMENTS MIL-HDBK-5H, Department of defense, 1998
- [13] PROAL.CZ. [online]. Dostupné z:  
<https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-2024/>.
- [14] PROFIMODEL.CZ. [online]. Dostupné z:  
[https://profimodel.cz/cs/pevne/269966-staveci-krouzek-3mm-5ks-8595241331560.html?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQiAh8OtBhCQARIsAikWb68JfrEqwgQ-H83kTf66UF1UFvYVEldqIKgDkFGpwo\\_BRwfaLs6jf4gaAvIMEALw\\_wcB](https://profimodel.cz/cs/pevne/269966-staveci-krouzek-3mm-5ks-8595241331560.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAh8OtBhCQARIsAikWb68JfrEqwgQ-H83kTf66UF1UFvYVEldqIKgDkFGpwo_BRwfaLs6jf4gaAvIMEALw_wcB).
- [15] PROFIMODEL.CZ. [online]. Dostupné z:  
<https://profimodel.cz/cs/ostatni/118775-2871-hridel-kola-pr5mm-2-ks-8595241391311.html>.