

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE  
NÁVRH TRUPU RYCHLOSTNÍHO LETOUNU

LETECTVÍ A KOSMONAUTIKA  
JIŘÍ PETRUS

2022



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petrus** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **465516**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**  
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh trupu rychlostního letounu**

Název diplomové práce anglicky:

**Design of the fuselage of a racing aircraft**

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Návrh konstrukce
- 2) Stanovení zatížení
- 3) Dimenzování
- 4) Hmotový rozbor

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jiří Brabec, Ph.D., ústav letadlové techniky FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Jiří Brabec, Ph.D.  
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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Návrh trupu rychlostního letounu“ vypracoval samostatně a použil jsem pouze literární prameny uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne .....

.....

Podpis

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat mému vedoucímu Ing. Jiřímu Brabcovi, Ph.D. za velkou ochotu, pomoc a vstřícný přístup při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Karlu Barákovi za výukové videa k metodě konečných prvků z dob první vlny koronaviru. Nakonec bych chtěl také poděkovat své rodině za zázemí a podporu.

Jméno autora: Jiří Petrus

Název diplomové práce: Návrh trupu rychlostního letounu

Rozsah diplomové práce: 61 str., 58 obr., 53 tab., 14 grafů

Rok: 2022

Univerzita: České vysoké učení technické v Praze – Fakulta strojní

Ústav: Ústav letadlové techniky

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

Klíčová slova: trup, rychlostní letoun, metoda konečných prvků, pevnost, konstrukce, zatížení

**Anotace:**

Diplomová práce se potýká s problematikou návrhu trupu rychlostního letounu z hlediska konstrukce. Začátek práce se věnuje prvotnímu návrhu prvků a jejich materiálovou skladbou. Následně je stanoveno zatížení působící na trup od ocasních ploch. Poté je metodou konečných prvků provedeno samotné dimenzování trupu. Nakonec je vypracován hmotový rozbor celku.

Author: Jiří Petrus

Title of diploma thesis: Design of the fuselage of a racing aircraft

Extent: 61 pg., 58 fig., 53 tab., 14 graphs

Academic year: 2022

University: Czech Technical University in Prague – Faculty of mechanical engineering

Department: Department of Aerospace Engineering

Supervisor: Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

Keywords: Fuselage, racing aircraft, finite element method, strength, design

**Annotation:**

The diploma thesis is focused on the issue of designing the fuselage of a racing aircraft from the structure point of view. The beginning of the work is devoted to the initial design of elements and their material composition. The following part contains calculations of empennage flight loads. After that there is a fuselage dimensioning by the finite element method. The end shows the mass analysis of the fuselage.

## Obsah

Seznam obrázků .....	1
Seznam grafů.....	2
Seznam tabulek .....	2
Seznam použitých symbolů a zkratek .....	3
1 Úvod.....	5
2 Popis letounu .....	6
3 Návrh konstrukce .....	7
3.1 Materiály .....	7
3.1.1 Prepreg GG160T DT120-47.....	7
3.1.2 Textreme 1000 DT120 .....	7
3.1.3 Prepreg UTS-150 DT120-36.....	8
3.1.4 Rohacell 51A.....	9
3.1.5 Airex R82.80 .....	9
3.1.6 Překližka.....	9
3.2 Konstrukce .....	9
3.3 Popis jednotlivých částí.....	10
3.3.1 Potah.....	10
3.3.2 Přepážka č.1 .....	11
3.3.3 Přepážka č.2 .....	11
3.3.4 Podlaha .....	12
3.3.5 Přepážka č.3 .....	12
3.3.6 Rám kabiny .....	12
3.3.7 Sedačka.....	13
3.3.8 Přepážka č.4 .....	13
3.3.9 Přepážka č.5 .....	13
3.3.10 Přepážka č.6 .....	14
3.3.11 Nosník VOP .....	14
3.3.12 Žebra .....	14
3.3.13 Nosník SOP.....	15
3.3.14 Podélníky.....	15
4 Zatížení.....	16
4.1 Souřadnicový systém letadla.....	16
4.2 Stanovení zatížení ocasních ploch.....	16



4.2.1	Vodorovné ocasní plochy .....	16
4.2.1.1	Obratové zatížení VOP .....	17
4.2.1.2	Poryvové zatížení VOP .....	19
4.2.2	Svislá ocasní plocha .....	21
4.2.2.1	Obratové zatížení SOP .....	22
4.2.2.2	Poryvové zatížení SOP .....	24
4.2.3	Velikosti a polohy sil na ocasních plochách .....	26
4.3	Polohy těžišť .....	26
4.4	Přehled hmotových konfigurací .....	26
4.5	Letová obálka provozních násobků .....	27
4.6	Výpočet zatížení trupu .....	27
4.6.1	Výpočtový model .....	28
4.6.1.1	Rovnováha sil v rovině XY .....	28
4.6.1.2	Rovnováha sil v rovině XZ .....	29
4.6.2	Stanovení zatížení ve vyvažovacích případech (případy č. 1-4) .....	30
4.6.3	Stanovení zatížení při obratovém případě VOP (případ č. 5) .....	36
4.6.4	Stanovení zatížení při nesymetrickém zatížení na VOP (případ č.7) .....	37
4.6.5	Stanovení zatížení při kombinovaném zatížení na VOP (případ č.8) .....	37
4.6.6	Stanovení zatížení při kombinovaném zatížení na VOP (případ č.9) .....	37
4.6.7	Stanovení zatížení při obratovém případě SOP (případ č.6) .....	39
4.6.8	Stanovení kombinovaného zatížení na SOP (případ č.8) .....	40
4.6.9	Stanovení kombinovaného zatížení na SOP (případ č.9) .....	40
4.6.10	Minimální a maximální hodnoty pro XY rovinu a XZ rovinu .....	42
4.7	Kritické případy .....	43
4.7.1	Vyvažovací zatížení VOP, hmotová konfigurace č.1, případ č.4 .....	43
4.7.2	Kombinované zatížení ocasních ploch, hmotová konfigurace č.3, případ č.8 .....	43
4.7.3	Vyvažovací zatížení VOP, hmotová konfigurace č.2, případ č.2 .....	44
4.7.4	Obratové zatížení VOP, hmotová konfigurace č.2, případ č.5 .....	44
4.7.5	Kombinované 75% obratové zatížení SOP a 75% zatížení VOP, hmotová konfigurace č.4, případ č.9 .....	45
4.7.6	Vyvažovací zatížení VOP, hmotová konfigurace č.3, případ č.3 .....	45
4.7.7	Vyvažovací zatížení VOP, hmotová konfigurace č.4, případ č.3 .....	46
4.7.8	Vyvažovací zatížení VOP, hmotová konfigurace č.1, případ č.1 .....	46
4.8	Početní zatížení .....	47
5	Dimenzování .....	48





5.1	MKP Model.....	48
5.2	Síťování.....	48
5.3	Materiálová skladba .....	49
5.4	Zatížení a okrajové podmínky.....	51
5.5	Výsledky pevnostní analýzy.....	51
5.5.1	Oblast přední části trupu .....	52
5.5.2	Oblast prostřední části trupu.....	53
5.5.3	Oblast zadní části trupu a ocasních ploch.....	54
5.6	Návrh úpravy konstrukce .....	55
5.6.1	Úprava oblasti přední části trupu.....	55
5.6.2	Úprava oblasti prostřední části trupu.....	56
5.6.3	Úprava oblasti zadní části trupu a ocasních ploch.....	58
5.7	Kontrola na ztrátu stability .....	60
6	Hmotový rozbor .....	64
6.1	Souřadnicový systém pro hmotový rozbor.....	64
6.2	Hmotnost a poloha těžiště dílů .....	64
7	Závěr .....	66
	Seznam použité literatury .....	67

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Muška letounu – půdorys a bokorys [1].....	6
Obrázek 2 - Muška letounu – nárys [1].....	6
Obrázek 3 – Pohled na trup letounu .....	10
Obrázek 4 – Potah .....	10
Obrázek 5 – Přepážka č.1 .....	11
Obrázek 6 – Přepážka č.2.....	11
Obrázek 7 - Podlaha .....	12
Obrázek 8 - Přepážka č.3.....	12
Obrázek 9 - Rám .....	12
Obrázek 10 - Sedačka.....	13
Obrázek 11 - Přepážka č.4.....	13
Obrázek 12 - Přepážka č.5.....	13
Obrázek 13 - Přepážka č.6.....	14
Obrázek 14 - Nosník VOP .....	14
Obrázek 15 - Žebra.....	14
Obrázek 16 - Nosník SOP .....	15
Obrázek 17 - Podélníky.....	15
Obrázek 18 - Souřadnicový systém letadla .....	16
Obrázek 19 - Rozměry zatěžovacího obrazce při obratu [11].....	17
Obrázek 20 - Působíště síly od obratu na VOP.....	19
Obrázek 21 - Zatěžovací obrazec při poryvu [11].....	19
Obrázek 22 - Působíště síly od poryvu na VOP.....	21
Obrázek 23 - Opravené rozměry svislé ocasní plochy .....	21
Obrázek 24 - Působíště síly od obratu na SOP.....	24
Obrázek 25 - Působíště síly od poryvu na SOP.....	25
Obrázek 26 - Letová obálka provozních násobků [13] .....	27
Obrázek 27 - Zatížení v rovině XY .....	29
Obrázek 28 - Zjednodušení a sloučení sil každého prvku do jejich celkových sil v rovině XY .....	29
Obrázek 29 - Celkové zatížení v rovině XZ.....	30
Obrázek 30 - Metoda řezu, I. interval .....	31
Obrázek 31 - Metoda řezu, II. interval.....	31
Obrázek 32 - Metoda řezu, III. interval.....	32
Obrázek 33 - Metoda řezu, IV. interval .....	32
Obrázek 34 - Metoda řezu, V. interval.....	33
Obrázek 35 - Metoda řezu, VI. interval .....	33
Obrázek 36 - Metoda řezu, VII. interval .....	34
Obrázek 37 - Metoda řezu, VIII. interval.....	34
Obrázek 38 - Síť na modelu .....	48
Obrázek 39 - Pohled na síť v řezu.....	49
Obrázek 40 - Model s přiřazenými silami a okrajovými podmínkami.....	51
Obrázek 41 - Obálka indexů porušení pro všechny zatěžující případy .....	52
Obrázek 42 - Indexy porušení v přední části trupu .....	52
Obrázek 43 - Indexy porušení u přepážky č.1 a přepážky č.2.....	53
Obrázek 44 - Indexy porušení v prostřední části trupu .....	53
Obrázek 45 - Indexy porušení u přepážky č.4.....	54
Obrázek 46 - Indexy porušení v oblasti zadní části trupu a ocasních ploch.....	54
Obrázek 47 - Indexy porušení u nosníku VOP a nosníku SOP.....	55
Obrázek 48 - Výztuhy a úpravy v přední části trupu (pohled v řezu) .....	55
Obrázek 49 - Indexy porušení v přední části upraveného trupu.....	56
Obrázek 50 - Indexy porušení u upravené přepážky č.1 a přepážky č.2.....	56
Obrázek 51 – Úpravy v prostřední části trupu .....	57
Obrázek 52 – Indexy porušení u upravené prostřední oblasti trupu.....	57

Obrázek 53 - Indexy porušení u upravené přepážky č.4 .....	58
Obrázek 54 - Úpravy v zadní části trupu.....	58
Obrázek 55 - Indexy porušení v upravené oblasti zadní části trupu a ocasních ploch .....	59
Obrázek 56 - Indexy porušení u upraveného nosníku VOP a nosníku SOP .....	59
Obrázek 57 - Znázorněné a očíslované panely kontrolované na ztrátu stability .....	60
Obrázek 58 - Souřadnicový systém pro hmotový rozbor.....	64

## Seznam grafů

Graf 1 - Průběh spojitého zatížení od obratu VOP s výslednou silou .....	18
Graf 2 - Průběh spojitého zatížení od obratu SOP s výslednou silou.....	23
Graf 3 - Průběhy ohybových momentů pro všechny vyvažovací případy jednotlivých konfigurací (č. konfigurace - č. případu).....	36
Graf 4 - Průběhy ohybových momentů pro případy č.5,7,9 jednotlivých konfigurací (č. konfigurace - č. případu).....	39
Graf 5 - Průběhy ohybových momentů pro případy č.6,8,9 jednotlivých konfigurací (č. konfigurace - č. případu).....	42
Graf 6 - Obálka zatížení v rovině XY a v rovině XZ .....	42
Graf 7 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.1-4.....	43
Graf 8 - Průběhy ohybového momentu v rovině XY a XZ pro případ č.3-8 .....	44
Graf 9 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.2-2.....	44
Graf 10 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.2-5.....	45
Graf 11 - Průběh ohybového momentu v rovině XZ pro případ č.4-9 .....	45
Graf 12 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.3-3.....	46
Graf 13 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.4-3.....	46
Graf 14 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.1-1.....	47

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Materiálové charakteristiky GG160T DT120-47 [2] .....	7
Tabulka 2 – Materiálové charakteristiky Textreme 1000 DT120 [2].....	8
Tabulka 3 – Materiálové charakteristiky UTS-150 DT120-36 [2].....	8
Tabulka 4 – Materiálové charakteristiky Rohacell 51A [2] .....	9
Tabulka 5 – Materiálové charakteristiky Airex R82.80 [2] .....	9
Tabulka 6 – Materiálové charakteristiky překližky [2] .....	9
Tabulka 7 – Vrstvení potahu .....	10
Tabulka 8 – Vrstvení protipožární přepážky .....	10
Tabulka 9 – Vrstvení přepážky č.1.....	11
Tabulka 10 – Vrstvení sendviče přepážky č.1.....	11
Tabulka 11 – Vrstvení přepážky č.2.....	11
Tabulka 12 – Vrstvení sendviče přepážky č.2.....	11
Tabulka 13 – Vrstvení pásnic průběžného nosníku.....	11
Tabulka 14 – Vrstvení stojin průběžného nosníku.....	11
Tabulka 15 - Vrstvení sendviče podlahy .....	12
Tabulka 16 - Vrstvení podlahy .....	12
Tabulka 17 - Vrstvení přepážky č.3 .....	12
Tabulka 18 - Vrstvení sendviče přepážky č.3 .....	12
Tabulka 19 - Vrstvení rámu .....	12
Tabulka 20 - Vrstvení sendviče sedačky.....	13
Tabulka 21 - Vrstvení sedačky.....	13
Tabulka 22 - Vrstvení přepážky č.4 .....	13
Tabulka 23 - Vrstvení sendviče přepážky č.4 .....	13
Tabulka 24 - Vrstvení přepážky č.4 .....	13

Tabulka 25 – Vrstvení sendviče přepážky č.4.....	13
Tabulka 26 - Vrstvení přepážky č.6 .....	14
Tabulka 27 - Vrstvení sendviče přepážky č.6 .....	14
Tabulka 28 - Vrstvení pásnice nosníku VOP .....	14
Tabulka 29 - Vrstvení stojiny nosníku VOP .....	14
Tabulka 30 - Vrstvení žeber .....	14
Tabulka 31 - Vrstvení pásnice nosníku SOP.....	15
Tabulka 32 - Vrstvení stojiny nosníku SOP.....	15
Tabulka 33 - Vrstvení podélníků.....	15
Tabulka 34 - Rozměry vodorovných ocasních ploch.....	16
Tabulka 35 - Rozměry svislé ocasní plochy.....	22
Tabulka 36 - Poloha sil na ocasních plochách v absolutním souřadnicovém systému .....	26
Tabulka 37 - Poloha těžišť a hmotnost jednotlivých prvků v absolutním souřadnicovém systému	26
Tabulka 38 - Jednotlivé hmotové konfigurace .....	27
Tabulka 39 - Přehled prvků v souřadnicovém systému letadla.....	28
Tabulka 40 - Zbylé hodnoty pro vyvažovací případy pro hmotovou konfiguraci č.2.....	35
Tabulka 41 - Výsledné hodnoty zatížení pro rovinu XY pro hmotovou konfiguraci č.2.....	38
Tabulka 42 - Výsledné hodnoty pro rovinu XZ pro hmotovou konfiguraci č.2.....	41
Tabulka 43 - Maximální provozní hodnoty ohybového momentu v rovině XY a rovině XZ.....	43
Tabulka 44 - Hodnoty početního zatížení .....	47
Tabulka 45 - Vrstvení laminátů a poloha na síti .....	50
Tabulka 46 - Kritické napětí v jednotlivých panelech pro jednotlivé směry.....	61
Tabulka 47 - Průměrné smykové napětí v panelech.....	61
Tabulka 48 - Průměrné tlakové napětí ve směru X v panelech.....	62
Tabulka 49 - Průměrné tlakové napětí ve směru Y, popřípadě Z, v panelech.....	62
Tabulka 50 - Výsledné jistoty jednotlivých panelů.....	63
Tabulka 51 - Výsledné hodnoty pro upravené panely.....	63
Tabulka 52 - Hmotnost a poloha těžiště jednotlivých součástí .....	65
Tabulka 53 - Hmotnost a poloha těžiště lepidla a trupu s lepidlem .....	65

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$b_0$	[m]	Hloubka u kořenu
$b_k$	[m]	Hloubka na konci
$d$	[m]	Délka trupu
$E$	[Pa]	Modul pružnosti v tahu
$E_w$	[Pa]	Efektivní modul pružnosti
$f$	[-]	Součinitel bezpečnosti
$F_c$	[N]	Celková síla
$F_n$	[N]	Setrvačná síla od translačního násobku
$F_\varepsilon$	[N]	Setrvačná síla od rotačního zrychlení
$F_{SOP}$	[N]	Síla na SOP
$F_{VOP}$	[N]	Síla na VOP
$F_{VOP/2}$	[N]	Síla na polorozpětí VOP
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	Gravitační zrychlení
$G$	[Pa]	Modul pružnosti ve smyku
$i_y$	[m]	Poloměr setrvačnosti ke kolmé ose
$i_z$	[m]	Poloměr setrvačnosti k příčné ose
$j$	[-]	Jistota
$J_y$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti kolem kolmé osy

$J_z$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti kolem příčné osy
$k_1$	[-]	Základní součinitel bezpečnosti
$k_2$	[-]	Zvyšující součinitel pro kompozitové konstrukce
$k_\tau$	[-]	Koeficient součinitele vzpěru
$l_t$	[m]	Vzdálenost síly od kořene
$l_{T0}$	[m]	Vzdálenost těžiště zatěžovacího obrazce u kořenu
$l_{TK}$	[m]	Vzdálenost zatěžovacího obrazce na konci
$L$	[m]	Rozpětí
$m$	[kg]	Hmotnost
$M_k$	[N·m]	Kroutící moment
$M_o$	[N·m]	Ohybový moment
$M_{O_{max}}$	[N·m]	Maximální ohybový moment
$M_{O_{min}}$	[N·m]	Minimální ohybový moment
$MKP$	[-]	Metoda konečných prvků
$MTOM$	[kg]	Maximální vzletová hmotnost
$n$	[-]	Letový násobek
$NU$	[-]	Poissonovo číslo
$q_0$	[N·m <sup>-1</sup> ]	Spojité zatížení u kořenu
$q_k$	[N·m <sup>-1</sup> ]	Spojité zatížení na konci
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha křídla
$SC$	[Pa]	Maximální napětí v tlaku
$SOP$	[-]	Svislá ocasní plocha
$SS$	[Pa]	Maximální napětí ve smyku
$ST$	[Pa]	Maximální napětí v tahu
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem
$VOP$	[-]	Vodorovná ocasní plocha
$W_0$	[Pa]	Zatížení u kořenu
$W_k$	[Pa]	Zatížení na konci
$W=$	[Pa]	Průměrné zatížení
$x$	[m]	Souřadnice v podélném směru
$x_T$	[m]	Vzdálenost od těžiště
$x_{RB}$	[m]	Vzdálenost od zadního závěsu křídla
$y$	[m]	Souřadnice v kolmém směru
$z$	[m]	Souřadnice v příčném směru
$\varepsilon$	[rad·s <sup>-2</sup> ]	Úhlové zrychlení
$\kappa$	[-]	Koeficient pro rozdílný modul pružnosti v tahu
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota
$\sigma$	[Pa]	Normálové napětí
$\sigma_k$	[Pa]	Kritické normálové napětí
$\tau$	[Pa]	Smykové napětí
$\tau_k$	[Pa]	Kritické smykové napětí

# 1 Úvod

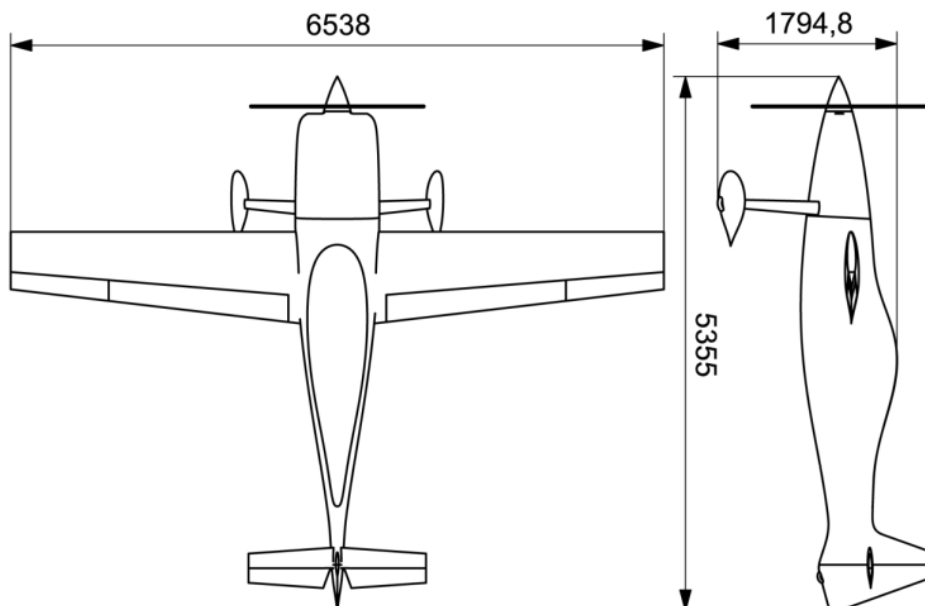
V roce 2019 byl na ústavu letadlové techniky vytvořen koncepční návrh rychlostního letounu, který by měl být schopen překonat světové rychlostní rekordy Mezinárodní letecké federace FAI. V současné době se počítá s tím, že navrhované letadlo by bylo v budoucnu uvolněno do provozu podle nového předpisu UL-2 z totožného roku. Cílem této diplomové práce je navázat na koncepci Ing. Valenty a provést prvotní konstrukční návrh trupu. Dále se zde také navazuje na práce studentů ústavu, kteří již řešili různé konstrukční celky letounu. Jmenovitě se jedná kupříkladu o křídlo, či ocasní plochy

V první části bude proveden počáteční návrh samotné kompozitové vnitřní konstrukce trupu s definováním materiálové skladby. Následovat bude stanovení zatížení ocasních ploch podle náhradních metod předpisu UL-2 a určení kritických případů zatížení pro pozdější dimenzování. Poté bude provedena pevnostní analýza pomocí metody konečných prvků a návrh konstrukce z úvodu práce upraven. Nakonec bude uvedena hmotnost a těžiště všech jednotlivých celků, které tvoří trup letounu.

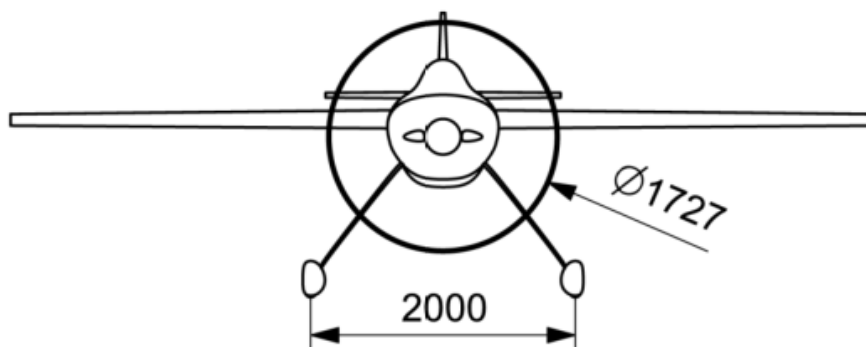
## 2 Popis letounu

Podle vytvořené koncepce Ing. Jakuba Valenty se jedná o jednomotorový jednomístný rychlostní celokompozitový středoplošník navržený podle předpisu UL-2, který má za úkol překonat světové rychlostní rekordy Mezinárodní letecké federace FAI. Maximální vzletová hmotnost letounu činí 345 kg a bude soutěžit v kategorii Aeroplanes.

Křídlo je jednonosníkové s pomocným nosníkem, nosným potahem s integrální palivovou nádrží a je opatřeno šterbinovou vztlakovou klapkou. Pro ocasní plochy bylo zvoleno klasické uspořádání. Jako pohonná jednotka na letounu je použit motor UL Power UL350iSA, který pohání constant speed vrtuli Airmaster AP521CTF-WWR68A o průměru 1,727 m. Trup je celokompozitový skořepinové konstrukce se systémem přepážek a podélníků. Podvozek je pevný s ostruhovým kolem z důvodu omezeného volného prostoru v trupu, a také kvůli tomu, že tato koncepce má menší hmotnost.[1]



Obrázek 1 - Muška letounu – půdorys a bokorys [1]



Obrázek 2 - Muška letounu – nárys [1]

### 3 Návrh konstrukce

V této kapitole je popis materiálů užitých na trupu. Poté následuje popis počátečního návrhu konstrukce společně s materiálovou skladbou jednotlivých částí.

#### 3.1 Materiály

Materiálové vlastnosti jsou převzaty z diplomové práce Ing. Malého [2], který se v ní zabýval dimenzováním trupu letounu UL-39 Albi a provedl materiálové zkoušky, jejichž výsledky budou také použity i v této práci pro dimenzování letounu.

##### 3.1.1 Prepreg GG160T DT120-47

Prepreg má gramáž 160 g/m<sup>2</sup>, tloušťka po vytvrzení je u jedné laminy 0,2 mm. Díky své vnitřní stavbě je schopen kopírovat plochy s vyšší křivostí, tím pádem ho lze použít na tvarově složité díly. Na letounu bude použit na stojinu nosníku SOP, stojinu nosníku VOP, žebra, podlahu, přepážky a sedačku.

*Tabulka 1 – Materiálové charakteristiky GG160T DT120-47 [2]*

<b>Hustota</b>	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	1 550
<b>Modul pružnosti v tahu</b>	E1 [Mpa]	61 562
	E2 [Mpa]	61 562
	E3 [Mpa]	7 312
<b>Poissonovo číslo</b>	NU12 [-]	0,062
	NU23 [-]	0,03
	NU13 [-]	0,03
<b>Modul pružnosti ve smyku</b>	G12 [Mpa]	4 207,54
	G13 [Mpa]	2 100
	G23 [Mpa]	2 100
<b>Maximální napětí v tahu</b>	ST1 [Mpa]	656
	ST2 [Mpa]	656
	ST3 [Mpa]	46
<b>Maximální napětí v tlaku</b>	SC1 [Mpa]	481
	SC2 [Mpa]	481
	SC3 [Mpa]	80
<b>Maximální napětí ve smyku</b>	SS [Mpa]	57

##### 3.1.2 Textreme 1000 DT120

Tento laminát má proti prepregu GG160T DT120-47 nižší gramáž a po vytvrzení tloušťku 0,125 mm. Díky tomu bude na letadle použit na velkých plochách, v tomto případě na potahu.



*Tabulka 2 – Materiálové charakteristiky Textreme 1000 DT120 [2]*

<b>Hustota</b>	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	1 498
<b>Modul pružnosti v tahu</b>	E1 [Mpa]	57 695
	E2 [Mpa]	57 695
	E3 [Mpa]	7 312
<b>Poissonovo číslo</b>	NU12 [-]	0,062
	NU23 [-]	0,03
	NU13 [-]	0,03
<b>Modul pružnosti ve smyku</b>	G12 [Mpa]	4 207
	G13 [Mpa]	2 100
	G23 [Mpa]	2 100
<b>Maximální napětí v tahu</b>	ST1 [Mpa]	604
	ST2 [Mpa]	604
	ST3 [Mpa]	46
<b>Maximální napětí v tlaku</b>	SC1 [Mpa]	443
	SC2 [Mpa]	443
	SC3 [Mpa]	80
<b>Maximální napětí ve smyku</b>	SS [Mpa]	57

### 3.1.3 Prepreg UTS-150 DT120-36

Prepreg má gramáž 150 g/m<sup>2</sup> a tloušťku jedné laminy 0,15 mm. Na letounu bude obsažen v podélnících, pásnicích nosníku SOP, pásnicích nosníku VOP a pásnicích skříňového nosníku, a to kvůli svému vysokému modulu pružnosti v tahu ve vybraném směru.

*Tabulka 3 – Materiálové charakteristiky UTS-150 DT120-36 [2]*

<b>Hustota</b>	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	1 480
<b>Modul pružnosti v tahu</b>	E1 [Mpa]	121 473
	E2 [Mpa]	7 312
	E3 [Mpa]	7 312
<b>Poissonovo číslo</b>	NU12 [-]	0,32
	NU23 [-]	0,032
	NU13 [-]	0,032
<b>Modul pružnosti ve smyku</b>	G12 [Mpa]	4 200
	G13 [Mpa]	4 200
	G23 [Mpa]	4 200
<b>Maximální napětí v tahu</b>	ST1 [Mpa]	1 774
	ST2 [Mpa]	46
	ST3 [Mpa]	46
<b>Maximální napětí v tlaku</b>	SC1 [Mpa]	1 200
	SC2 [Mpa]	90
	SC3 [Mpa]	90
<b>Maximální napětí ve smyku</b>	SS [Mpa]	77

### 3.1.4 Rohacell 51A

Polymetakrylátová pěna je použita jako jádro sendviče ve spojení s prepregem GG160T. Vyskytuje se na sedačce, podlaze a přepážce.

*Tabulka 4 – Materiálové charakteristiky Rohacell 51A [2]*

<b>Hustota</b>	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	52
<b>Modul pružnosti v tahu</b>	E [Mpa]	70
<b>Poissonovo číslo</b>	NU [-]	0,25
<b>Modul pružnosti ve smyku</b>	G [Mpa]	19
<b>Maximální napětí v tahu</b>	ST [Mpa]	1,9
<b>Maximální napětí v tlaku</b>	SC [Mpa]	0,9
<b>Maximální napětí ve smyku</b>	SS [Mpa]	0,62

### 3.1.5 Airex R82.80

Termoplastická polymerní pěna je stejně jako Rohacell použita jako jádro sendviče, ale ve spojení s laminátem Textreme 1000. Její výhodou je možnost vyztužení laminátu v křivých plochách při zachování aerodynamicky čistého povrchu. Nevýhodou je potom ovšem vyšší hustota než pěny Rohacell. Použita je na potahu letounu.

*Tabulka 5 – Materiálové charakteristiky Airex R82.80 [2]*

<b>Hustota</b>	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	80
<b>Modul pružnosti v tahu</b>	E [Mpa]	54
<b>Poissonovo číslo</b>	NU [-]	0,25
<b>Modul pružnosti ve smyku</b>	G [Mpa]	23
<b>Maximální napětí v tahu</b>	ST [Mpa]	1,7
<b>Maximální napětí v tlaku</b>	SC [Mpa]	0,9
<b>Maximální napětí ve smyku</b>	SS [Mpa]	0,9

### 3.1.6 Překližka

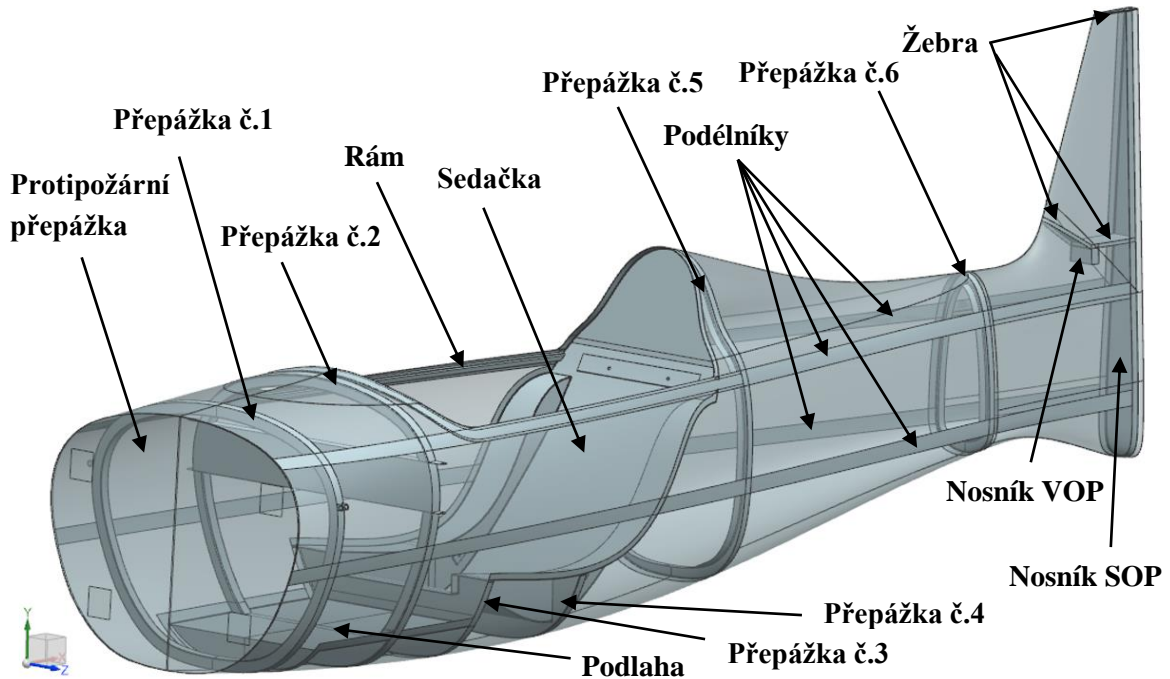
Materiál je použit k lokálnímu vyztužení míst, kam vstupují osamělé síly.

*Tabulka 6 – Materiálové charakteristiky překližky [2]*

<b>Hustota</b>	$\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	720
<b>Modul pružnosti v tahu</b>	E [Mpa]	12 500
<b>Poissonovo číslo</b>	NU [-]	0,25
<b>Modul pružnosti ve smyku</b>	G [Mpa]	4 500
<b>Maximální napětí v tahu</b>	ST [Mpa]	70
<b>Maximální napětí v tlaku</b>	SC [Mpa]	50
<b>Maximální napětí ve smyku</b>	SS [Mpa]	45

## 3.2 Konstrukce

Jak již bylo řečeno v minulé kapitole, jedná se o celokompozitovou skořepinu s nosným potahem tvořenou soustavou přepážek, podélníků a žeber. Počáteční návrh konstrukce je zobrazen na obr. 3, kde pro potřeby zviditelnění vnitřní struktury je potah zobrazen transparentně.



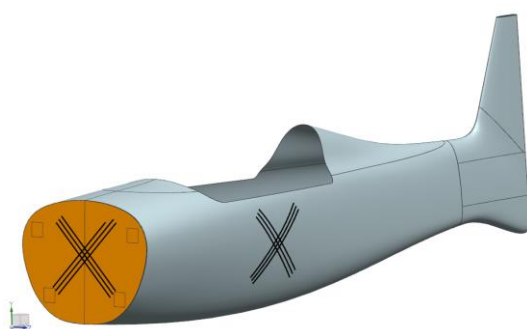
Obrázek 3 – Pohled na trup letounu

### 3.3 Popis jednotlivých částí

Níže je stručně uveden popis jednotlivých pevnostních prvků tvořících trup letounu a jeho vnitřní konstrukci. U každého prvku je schematicky znázorněna orientace vláken materiálu. Oranžově je vždy označeno místo výskytu sendviče, není-li v textu uvedeno jinak. Další popis poté také následuje v kapitole dimenzování.

#### 3.3.1 Potah

Potah tvoří základní stavbu trupu a podílí se z největší části na přenosu zatížení. Také určuje vnější tvar letounu. V oblasti kýlové části je uzavřen integrovaným žebrem, v přední části je skořepina uzavřena integrovanou protipožární přepážkou (zvýrazněna oranžově), která zároveň odděluje motorové lože od zbytku trupu.



Obrázek 4 – Potah

Tabulka 7 – Vrstvení potahu

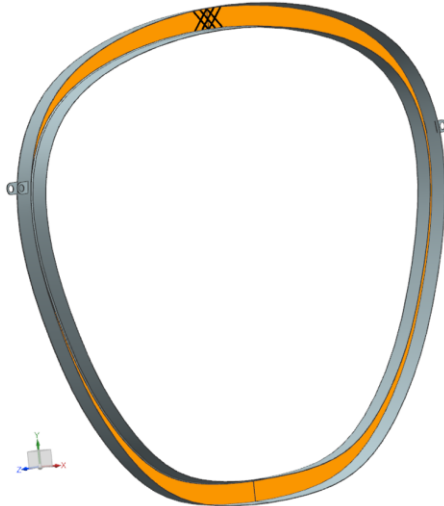
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Textreme 1000	0,125	± 45
2	Airex R82.80	3	-
3	Textreme 1000	0,125	± 45

Tabulka 8 – Vrstvení protipožární přepážky

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Textreme 1000	0,125	± 45
2	Textreme 1000	0,125	± 45
3	Airex R82.80	10	-
4	Textreme 1000	0,125	± 45
5	Textreme 1000	0,125	± 45

### 3.3.2 Přepážka č.1

Jelikož jsou zde uchyceny závěsy pro spojení křídla s trupem, tak hlavním cílem přepážky č.1 je přenos zatížení z předního závěsu křídla do trupu. Zároveň také vyztužuje skořepinu v jejím místě.



Obrázek 5 – Přepážka č.1

Tabulka 9 – Vrstvení přepážky č.1

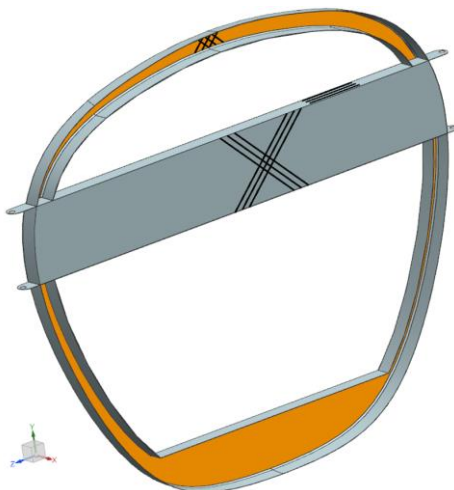
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Prepreg GG160T	0,2	± 45

Tabulka 10 – Vrstvení sendviče přepážky č.1

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Rohacell 51A	3	-
3	Prepreg GG160T	0,2	± 45

### 3.3.3 Přepážka č.2

Opět i u této přepážky je hlavním požadavkem přenos zatížení ze zadního závěsu křídla. Součástí přepážky je i skříňový průběžný nosník, na kterém jsou uchyceny závěsy. Další funkcí je podepření podlahy ve spodní části trupu.



Obrázek 6 – Přepážka č.2

Tabulka 11 – Vrstvení přepážky č.2

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Prepreg GG160T	0,2	± 45

Tabulka 12 – Vrstvení sendviče přepážky č.2

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Rohacell 51A	3	-
3	Prepreg GG160T	0,2	± 45

Tabulka 13 – Vrstvení pásnic průběžného nosníku

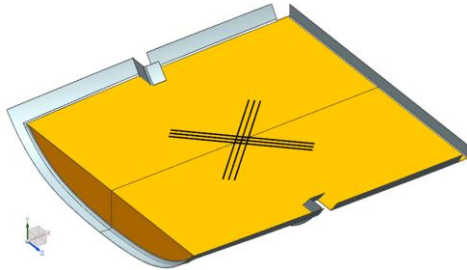
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg UTS-150	0,15	0
2	Prepreg UTS-150	0,15	0

Tabulka 14 – Vrstvení stojin průběžného nosníku

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	±45
2	Prepreg GG160T	0,2	±45

### 3.3.4 Podlaha

Slouží k podepření pilota při stání a vyztužuje spodní část trupu. Z jednoho konce je přilepena k přepážce č.3, z druhého konce zalomená a přilepena k potahu. Uprostřed je lepena k přepážce č.2.



Obrázek 7 - Podlaha

Tabulka 15 - Vrstvení sendviče podlahy

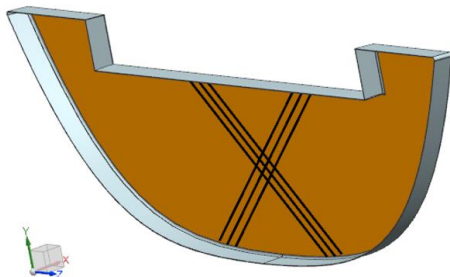
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Rohacell 51A	3	-
3	Prepreg GG160T	0,2	± 45

Tabulka 16 - Vrstvení podlahy

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Prepreg GG160T	0,2	± 45

### 3.3.5 Přepážka č.3

Přepážka přenáší zatížení od pilota a podepírá sedačku. Je k ní přilepena podlaha.



Obrázek 8 - Přepážka č.3

Tabulka 17 - Vrstvení přepážky č.3

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Prepreg GG160T	0,2	± 45

Tabulka 18 - Vrstvení sendviče přepážky č.3

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Rohacell 51A	3	-
3	Prepreg GG160T	0,2	± 45

### 3.3.6 Rám kabiny

Vyztužuje otvor vzniklý odebráním skořepiny pro překryt kabiny a přenáší zatížení v jeho místě. Je z části umístěn na dvou vrchních podélnících.



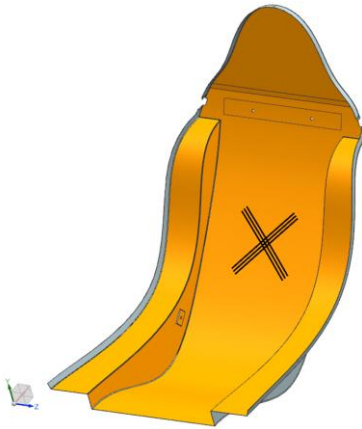
Obrázek 9 - Rám

Tabulka 19 - Vrstvení rámu

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Textreme 1000	0,125	± 45
2	Airex R82.80	3	-
3	Textreme 1000	0,125	± 45

### 3.3.7 Sedačka

Slouží k usazení pilota a k uchycení břišních a ramenních pásů. Jelikož je plnostěnná, tak slouží i jako přepážka a vyztužuje skořepinu.



Obrázek 10 - Sedačka

Tabulka 20 - Vrstvení sendviče sedačky

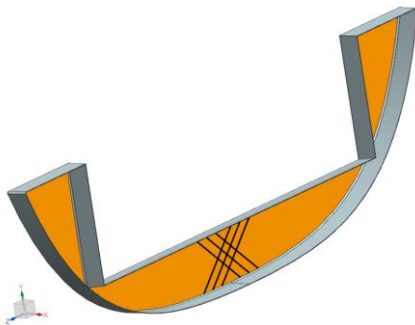
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Rohacell 51A	3	-
3	Prepreg GG160T	0,2	± 45

Tabulka 21 - Vrstvení sedačky

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Prepreg GG160T	0,2	± 45

### 3.3.8 Přepážka č.4

Podepírá sedačku s pilotem pod těžištěm a rozvádí jeho zatížení.



Obrázek 11 - Přepážka č.4

Tabulka 22 - Vrstvení přepážky č.4

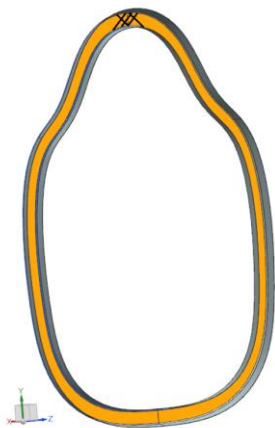
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Prepreg GG160T	0,2	± 45

Tabulka 23 - Vrstvení sendviče přepážky č.4

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Rohacell 51A	3	-
3	Prepreg GG160T	0,2	± 45

### 3.3.9 Přepážka č.5

Vyztužuje skořepinu v místech největšího průřezu trupu.



Obrázek 12 - Přepážka č.5

Tabulka 24 - Vrstvení přepážky č.4

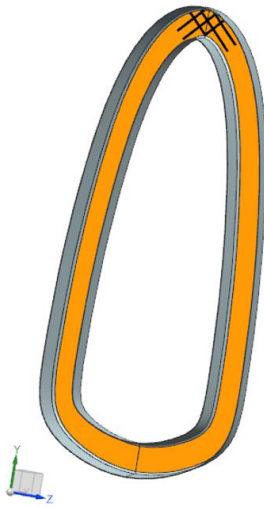
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Prepreg GG160T	0,2	± 45

Tabulka 25 - Vrstvení sendviče přepážky č.4

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Rohacell 51A	3	-
3	Prepreg GG160T	0,2	± 45

### 3.3.10 Přepážka č.6

Vyztužuje skořepinu v ocasní části v místech nejužšího průřezu trupu.



Obrázek 13 - Přepážka č.6

Tabulka 26 - Vrstvení přepážky č.6

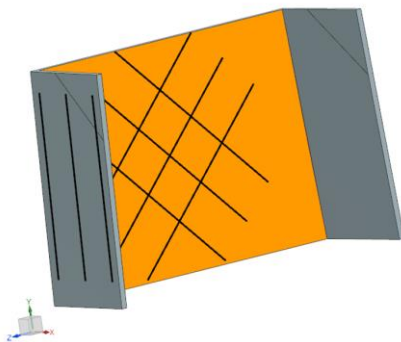
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Prepreg GG160T	0,2	± 45

Tabulka 27 - Vrstvení sendviče přepážky č.6

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Rohacell 51A	3	-
3	Prepreg GG160T	0,2	± 45

### 3.3.11 Nosník VOP

Slouží k uchycení stabilizátoru vodorovné ocasní plochy. Je k němu přilepeno rovné a zalomené žebro. Oranžově je označena stojina nosníku.



Obrázek 14 - Nosník VOP

Tabulka 28 - Vrstvení pásnice nosníku VOP

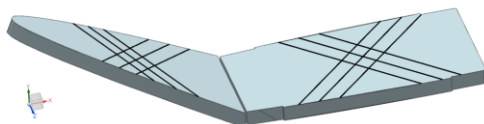
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg UTS-150	0,15	0
2	Prepreg UTS-150	0,15	0

Tabulka 29 - Vrstvení stojiny nosníku VOP

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Překližka	3	-
3	Prepreg GG160T	0,2	± 45

### 3.3.12 Žebra

Jedno integrované žebro ve vrchní části kýlu uzavírá skořepinu, zbylé dvě jsou umístěny poblíž nosníku VOP a nosníku SOP a vyztužují skořepinu.



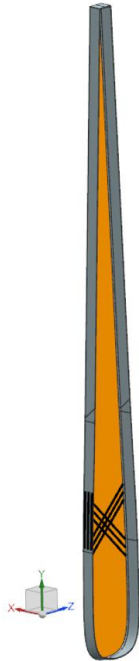
Obrázek 15 - Žebra

Tabulka 30 - Vrstvení žeber

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Prepreg GG160T	0,2	± 45

### 3.3.13 Nosník SOP

Uzavírá skořepinu a zároveň jsou v něm otvory pro uchycení závěsu směrového kormidla a stabilizátoru VOP. Oranžově je označena stojina nosníku.



Obrázek 16 - Nosník SOP

Tabulka 31 - Vrstvení pásnice nosníku SOP

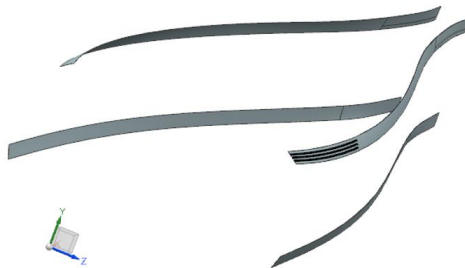
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg UTS-150	0,15	0
2	Prepreg UTS-150	0,15	0

Tabulka 32 - Vrstvení stojiny nosníku SOP

Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg GG160T	0,2	± 45
2	Prepreg GG160T	0,2	± 45

### 3.3.14 Podélníky

Podélníky jsou integrovanou částí potahu. Jejich funkcí je vyztužit potah a přenést zatížení od ohybového momentu.



Obrázek 17 - Podélníky

Tabulka 33 - Vrstvení podélníků

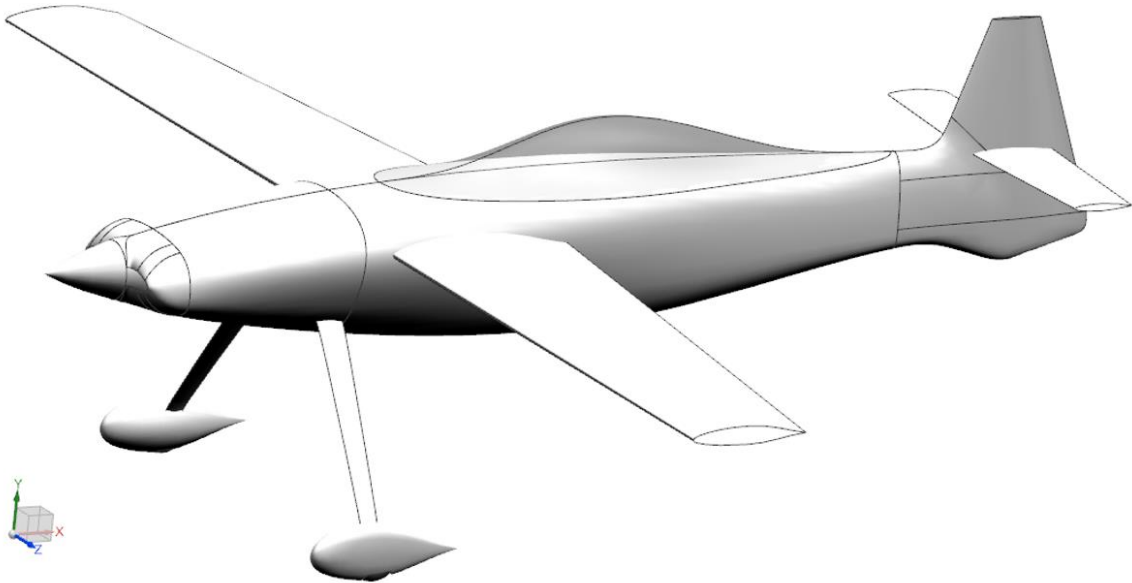
Vrstva	Materiál	Tloušťka [mm]	Orientace [°]
1	Prepreg UTS-150	0,15	0



## 4 Zatížení

### 4.1 Souřadnicový systém letadla

Souřadnicový systém letadla a jeho kladné směry jsou znázorněny na obr. 18. Osa X značí podélnou osu letadla, osa Y představuje kolmou osu letadla a osa Z značí příčnou osu letadla. Počátek vrtulového kuželu (a souřadnicového systému letadla) má v absolutním souřadnicovém systému souřadnice [840; 1988; 0].



Obrázek 18 - Souřadnicový systém letadla

### 4.2 Stanovení zatížení ocasních ploch

Ke stanovení zatížení ocasních ploch je použito náhradních metod pro konvenční letouny podle předpisu UL-2, přílohy III.[10]

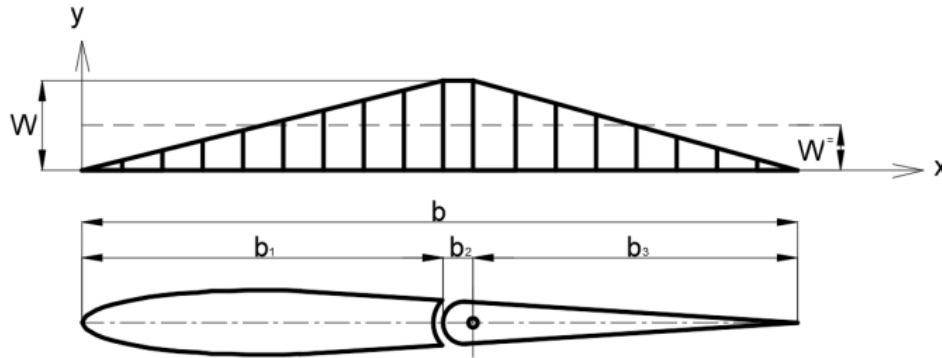
#### 4.2.1 Vodorovné ocasní plochy

Rozměry vodorovných ocasních ploch jsou převzaty z bakalářské práce pana Větrovce, uvedeny v tab. 34 a znázorněny na obr. 19. [11]

Tabulka 34 - Rozměry vodorovných ocasních ploch

Hloubky u kořenu		Hloubky na konci	
$b_{10}$ [m]	0,184	$b_{1k}$ [m]	0,129
$b_{20}$ [m]	0,025	$b_{2k}$ [m]	0,0175
$b_{30}$ [m]	0,209	$b_{3k}$ [m]	0,1465
$b_0$ [m]	0,418	$b_k$ [m]	0,293
<b>Polorozpětí L/2 [m]</b>	0,8885		

#### 4.2.1.1 Obrátové zatížení VOP



Obrázek 19 - Rozměry zatěžovacího obrazce při obrátu [11]

Průměrné zatížení VOP podle předpisu

$$W^{\bar{}} = 220 + 20,5 \cdot \frac{MTOM}{S} = 220 + 20,5 \cdot \frac{345}{5,029} = 1626,343 \text{ Pa} \quad (4.1)$$

Kde

$MTOM = 345 \text{ kg}$       Maximální vzletová hmotnost  
 $S = 5,029 \text{ m}^2$       Plocha křídla

Pro určení zatížení u kořenu platí rovnost obrazce

$$W^{\bar{}} \cdot b_0 = W_0 \cdot (0,5 \cdot b_{10} + b_{20} + 0,5 \cdot b_{30}) \quad (4.2)$$

a úprava do finální podoby

$$W_0 = \frac{W^{\bar{}} \cdot b_0}{0,5 \cdot b_{10} + b_{20} + 0,5 \cdot b_{30}} = \frac{1626,343 \cdot 0,418}{0,5 \cdot 0,184 + 0,025 + 0,5 \cdot 0,209} = 3069,126 \text{ Pa} \quad (4.3)$$

To samé lze udělat pro zatížení na konci

$$W_k = \frac{W^{\bar{}} \cdot b_k}{0,5 \cdot b_{1k} + b_{2k} + 0,5 \cdot b_{3k}} = \frac{1626,343 \cdot 0,293}{0,5 \cdot 0,129 + 0,0175 + 0,5 \cdot 0,1465} = 3069,363 \text{ Pa} \quad (4.4)$$

Spojité zatížení u kořenu lze spočítat

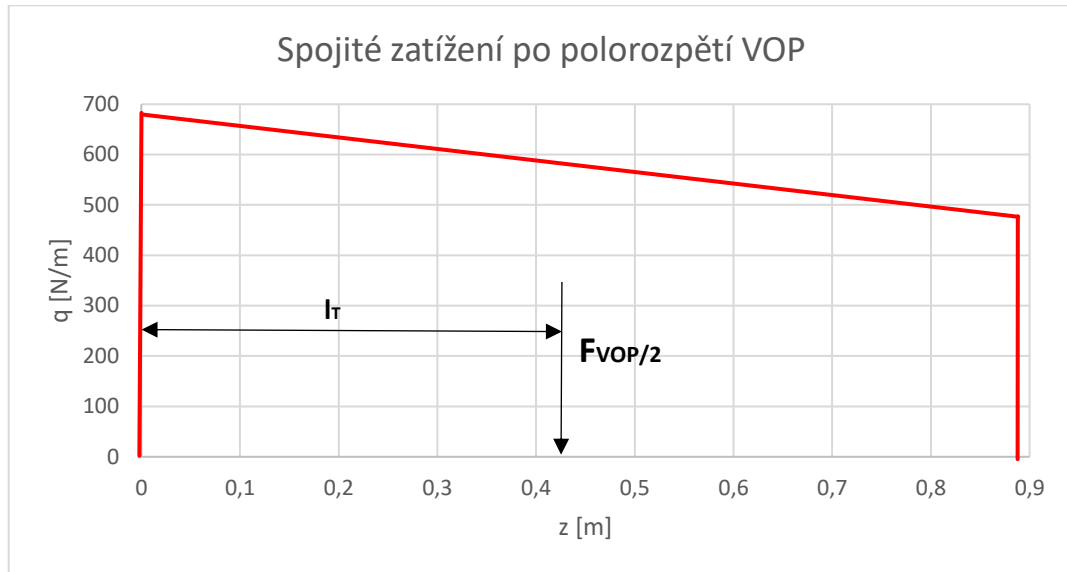
$$q_0 = W_0 \cdot (0,5 \cdot b_{10} + b_{20} + 0,5 \cdot b_{30}) = 3069,126 \cdot (0,5 \cdot 0,184 + 0,025 + 0,5 \cdot 0,209) = 679,811 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4.5)$$

Spojité zatížení na konci lze vypočítat stejným způsobem

$$q_k = W_k \cdot (0,5 \cdot b_{1k} + b_{2k} + 0,5 \cdot b_{3k}) = 3069,363 \cdot (0,5 \cdot 0,129 + 0,0175 + 0,5 \cdot 0,1465) = 476,519 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4.6)$$

Pro sílu na polorozpětí VOP z geometrického obrazce uvedeného v grafu 1 platí

$$F_{VOP/2} = \frac{q_0 - q_k}{2} \cdot \frac{L}{2} + q_k \cdot \frac{L}{2} = \frac{679,811 - 476,519}{2} \cdot 0,8885 + 476,519 \cdot 0,8885 = 513,7 \text{ N} \quad (4.7)$$



Graf 1 - Průběh spojitého zatížení od obratu VOP s výslednou silou

A pro její vzdálenost od kořenu

$$l_T = \frac{\frac{q_0 - q_k}{2} \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{L}{2} + q_k \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{2}}{F_{VOP/2}} =$$

$$= \frac{\frac{679,811 - 476,519}{2} \cdot 0,8885 \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,8885 + 476,519 \cdot 0,8885 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,8885}{513,7} =$$

$$= 0,418 \text{ m} \quad (4.8)$$

Vzdálenost těžiště zatěžovacího obrazce od náběžné hrany u kořenu se vypočte

$$l_{T_0} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot W_0 \cdot b_{10} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot b_{10}\right) + W_0 \cdot b_{20} \cdot \left(b_{10} + \frac{1}{2} \cdot b_{20}\right) + 0,5 \cdot W_0 \cdot b_{30} \cdot \left(b_{10} + b_{20} + \frac{1}{3} \cdot b_{30}\right)}{W^= \cdot b_0} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot 3069,126 \cdot 0,184 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 0,184\right) + 3069,126 \cdot 0,025 \cdot \left(0,184 + \frac{1}{2} \cdot 0,025\right) + 0,5 \cdot 3069,126 \cdot 0,209 \cdot \left(0,184 + 0,025 + \frac{1}{3} \cdot 0,209\right)}{1626,343 \cdot 0,418} =$$

$$= 0,2046 \text{ m} \quad (4.9)$$

Na konci se vzdálenost těžiště zatěžovacího obrazce od náběžné hrany spočte obdobným způsobem

$$l_{T_k} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot W_k \cdot b_{1k} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot b_{1k}\right) + W_k \cdot b_{2k} \cdot \left(b_{1k} + \frac{1}{2} \cdot b_{2k}\right) + 0,5 \cdot W_k \cdot b_{3k} \cdot \left(b_{1k} + b_{2k} + \frac{1}{3} \cdot b_{3k}\right)}{W^= \cdot b_k}$$

$$\begin{aligned}
 & 0,5 \cdot 3069,363 \cdot 0,129 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 0,129\right) + 3069,363 \cdot 0,0175 \cdot \left(0,129 + \frac{1}{2} \cdot 0,0175\right) + \\
 & + 0,5 \cdot 3069,363 \cdot 0,1465 \cdot \left(0,129 + 0,0175 + \frac{1}{3} \cdot 0,1465\right) \\
 = & \frac{\phantom{0,5 \cdot 3069,363 \cdot 0,129 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 0,129\right) + 3069,363 \cdot 0,0175 \cdot \left(0,129 + \frac{1}{2} \cdot 0,0175\right) + 0,5 \cdot 3069,363 \cdot 0,1465 \cdot \left(0,129 + 0,0175 + \frac{1}{3} \cdot 0,1465\right)}}{1626,343 \cdot 0,293} = \\
 & = 0,1434 \text{ m} \tag{4.10}
 \end{aligned}$$

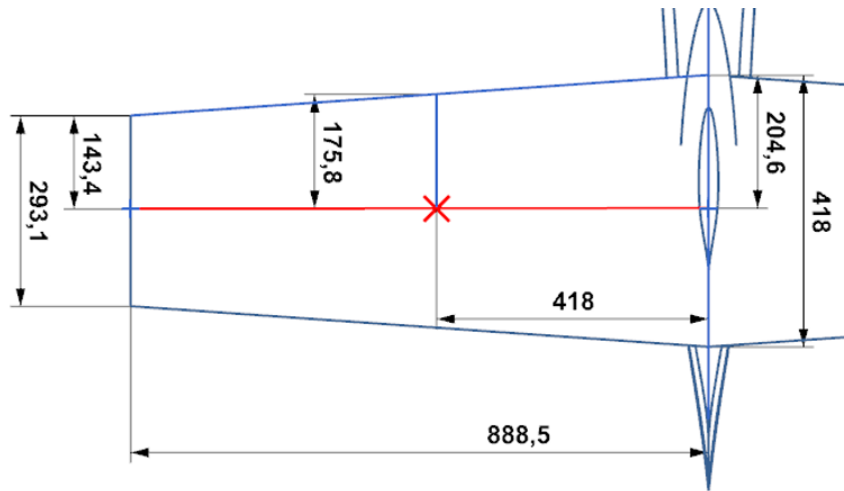
Z vypočtených hodnot lze poté sestavit směrníkovou rovnici pro zjištění polohy působíště  $F_{VOP/2}$  od obratu

$$x = k \cdot z + q = -0,0689 \cdot 0,418 + 0,2046 = 0,176 \text{ m od NH VOP} \tag{4.11}$$

$$k = \frac{l_{T_k} - l_{T_0}}{\frac{L}{2}} = \frac{0,1434 - 0,2046}{0,8885} = -0,0689 \tag{4.12}$$

$$q = l_{T_0} = 0,2046 \tag{4.13}$$

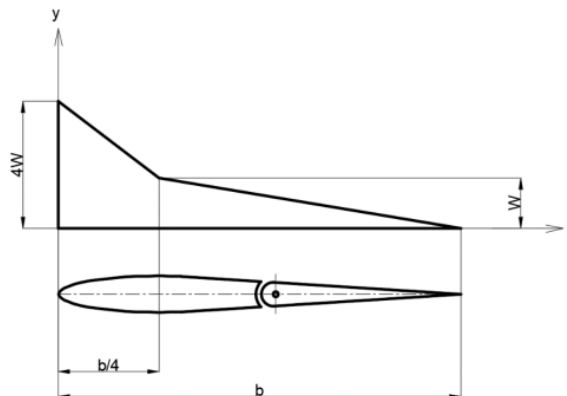
Grafické znázornění výsledků je na obr. 20.



Obrázek 20 - Působíště síly od obratu na VOP

#### 4.2.1.2 Poryvové zatížení VOP

Pro stanovení poryvového zatížení VOP se použije stejný postup jako u obratového zatížení, akorát s rozdílným náhradním zatěžovacím obrazcem. Průměrná hodnota zatížení  $W^-$  se nemění.



Obrázek 21 - Zatěžovací obrazec při poryvu [11]

Pro určení zatížení u kořenu platí opět rovnost obrazce

$$W^= \cdot b_0 = W_0 \cdot (0,25 \cdot b_0 + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot b_0 + 0,5 \cdot 0,75 \cdot b_0) \quad (4.14)$$

a úprava do finální podoby

$$\begin{aligned} W_0 &= \frac{W^= \cdot b_0}{0,25 \cdot b_0 + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot b_0 + 0,5 \cdot 0,75 \cdot b_0} = \\ &= \frac{1626,343 \cdot 0,418}{0,25 \cdot 0,418 + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot 0,418 + 0,5 \cdot 0,75 \cdot 0,418} = \\ &= 1626,343 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (4.15)$$

To samé lze udělat pro zatížení na konci

$$\begin{aligned} W_k &= \frac{W^= \cdot b_k}{0,25 \cdot b_k + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot b_k + 0,5 \cdot 0,75 \cdot b_k} = \\ &= \frac{1626,343 \cdot 0,293}{0,25 \cdot 0,293 + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot 0,293 + 0,5 \cdot 0,75 \cdot 0,293} = \\ &= 1626,343 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Spojité zatížení u kořenu a na konci je stejné, jako u obrátového případu VOP. Z toho vyplývá, že  $F_{VOP/2}$  a její vzdálenost od kořenu je také stejná.

Vzdálenost těžiště zatěžovacího obrazce od náběžné hrany u kořenu se spočte

$$\begin{aligned} l_{T_0} &= \\ &= \frac{0,25 \cdot W_0 \cdot b_0 \cdot (0,25 \cdot 0,5 \cdot b_0) + 0,5 \cdot 3 \cdot W_0 \cdot 0,25 \cdot b_0 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,25 \cdot b_0\right) + 0,5 \cdot 0,75 \cdot W_0 \cdot b_0 \cdot (0,5 \cdot b_0)}{W^= \cdot b_0} = \\ &= \frac{0,25 \cdot 1626,343 \cdot 0,418 \cdot (0,25 \cdot 0,5 \cdot 0,418) + 0,5 \cdot 3 \cdot 1626,343 \cdot 0,25 \cdot 0,418 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,25 \cdot 0,418\right) + 0,5 \cdot 0,75 \cdot 1626,343 \cdot 0,418 \cdot (0,5 \cdot 0,418)}{1626,343 \cdot 0,418} = \\ &= 0,1045 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Na konci se vzdálenost těžiště zatěžovacího obrazce od náběžné hrany spočte

$$\begin{aligned} l_{T_k} &= \\ &= \frac{0,25 \cdot W_k \cdot b_k \cdot (0,25 \cdot 0,5 \cdot b_k) + 0,5 \cdot 3 \cdot W_k \cdot 0,25 \cdot b_k \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,25 \cdot b_k\right) + 0,5 \cdot 0,75 \cdot W_k \cdot b_k \cdot (0,5 \cdot b_k)}{W^= \cdot b_k} = \\ &= \frac{0,25 \cdot 1626,343 \cdot 0,293 \cdot (0,25 \cdot 0,5 \cdot 0,293) + 0,5 \cdot 3 \cdot 1626,343 \cdot 0,25 \cdot 0,293 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,25 \cdot 0,293\right) + 0,5 \cdot 0,75 \cdot 1626,343 \cdot 0,293 \cdot (0,5 \cdot 0,293)}{1626,343 \cdot 0,293} = \\ &= 0,07325 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.18)$$

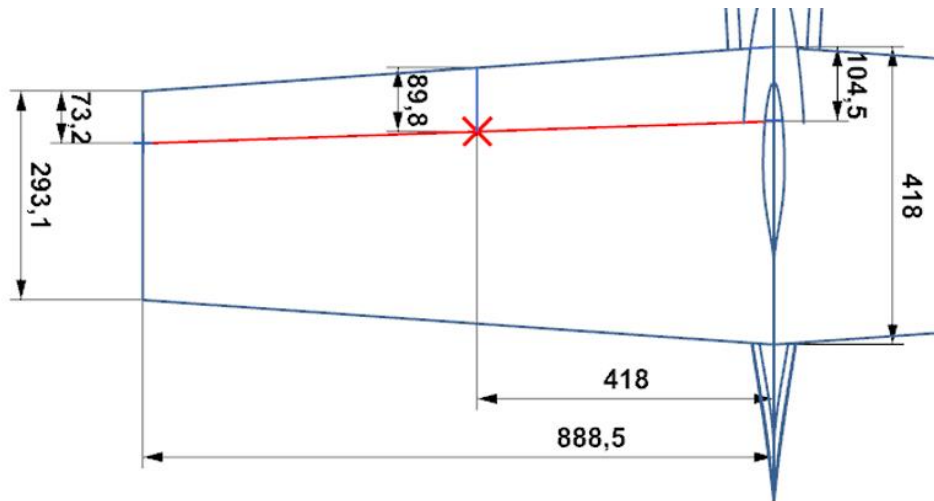
Ze zjištěných hodnot lze sestavit směrnice rovnici pro zjištění polohy působíště  $F_{VOP/2}$  od poryvu

$$x = k \cdot z + q = -0,035 \cdot 0,418 + 0,105 = 0,09 \text{ m od NH VOP} \quad (4.19)$$

$$k = \frac{l_{T_k} - l_{T_0}}{\frac{L}{2}} = \frac{0,07325 - 0,1045}{0,8885} = -0,035 \quad (4.20)$$

$$q = l_{T_0} = 0,1045 \quad (4.21)$$

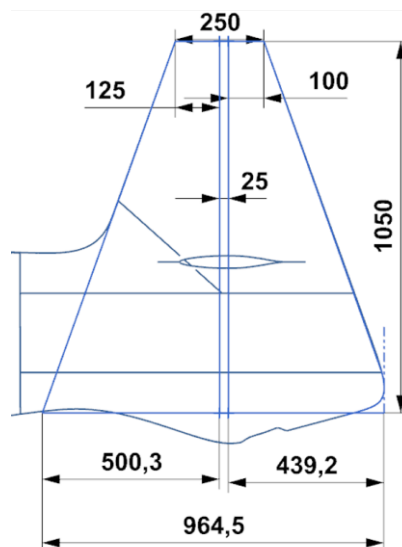
Grafické znázornění výsledků je následně na obr. 22.



Obrázek 22 - Působíště síly od poryvu na VOP

#### 4.2.2 Svislá ocasní plocha

Rozměry svislé ocasní plochy jsou převzaty z bakalářské práce pana Němce. Kvůli nesouladu hodnot rozměrů s grafickým znázorněním v téže práci byla provedena oprava a správné hodnoty byly zaneseny do obr. 23 a tab. 35. [12]



Obrázek 23 - Opravené rozměry svislé ocasní plochy

*Tabulka 35 - Rozměry svislé ocasní plochy*

Hloubky u kořenu		Hloubky na konci	
<b>b<sub>10</sub> [m]</b>	0,5003	<b>b<sub>1k</sub> [m]</b>	0,125
<b>b<sub>20</sub> [m]</b>	0,025	<b>b<sub>2k</sub> [m]</b>	0,025
<b>b<sub>30</sub> [m]</b>	0,4392	<b>b<sub>3k</sub> [m]</b>	0,1
<b>b<sub>0</sub> [m]</b>	0,9645	<b>b<sub>k</sub> [m]</b>	0,25
<b>Rozpětí [m]</b>	1,05		

#### 4.2.2.1 Obrátové zatížení SOP

Postup je stejný jako u obrátového zatížení VOP, viz obr. 19. Pro určení zatížení u kořenu platí rovnost obrazce

$$W^= \cdot b_0 = W_0 \cdot (0,5 \cdot b_{10} + b_{20} + 0,5 \cdot b_{30}) \quad (4.22)$$

a úprava do konečné podoby

$$W_0 = \frac{W^= \cdot b_0}{0,5 \cdot b_{10} + b_{20} + 0,5 \cdot b_{30}} = \frac{1626,343 \cdot 0,9645}{0,5 \cdot 0,5003 + 0,025 + 0,5 \cdot 0,4392} = 3170,51 \text{ Pa} \quad (4.23)$$

To samé lze udělat pro zatížení na konci

$$W_k = \frac{W^= \cdot b_k}{0,5 \cdot b_{1k} + b_{2k} + 0,5 \cdot b_{3k}} = \frac{1626,343 \cdot 0,25}{0,5 \cdot 0,125 + 0,025 + 0,5 \cdot 0,1} = 2956,988 \text{ Pa} \quad (4.24)$$

Spojité zatížení u kořenu

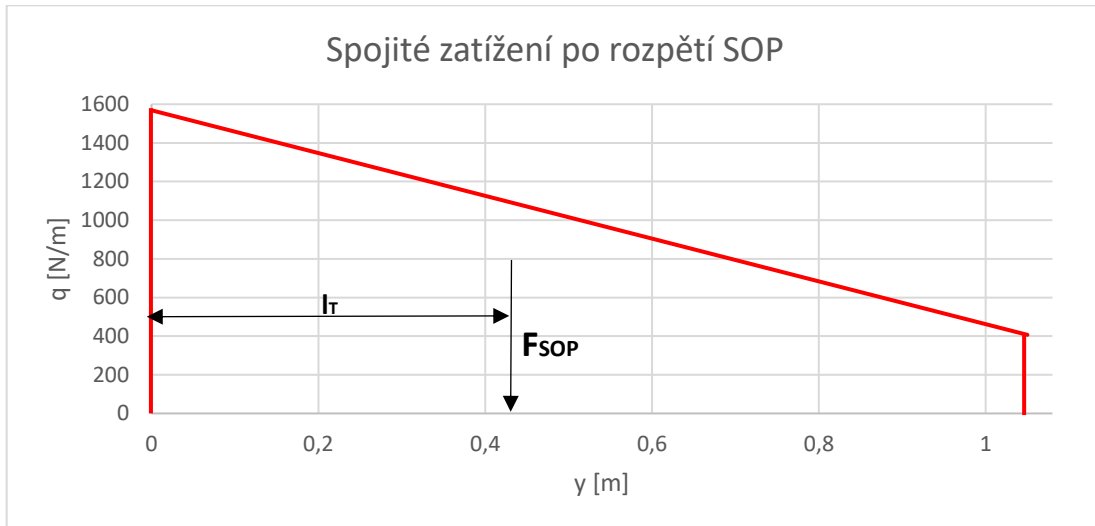
$$\begin{aligned} q_0 &= W_0 \cdot (0,5 \cdot b_{10} + b_{20} + 0,5 \cdot b_{30}) = 3170,51 \cdot (0,5 \cdot 0,5003 + 0,025 + 0,5 \cdot 0,4392) = \\ &= 1568,61 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Spojité zatížení na konci

$$\begin{aligned} q_k &= W_k \cdot (0,5 \cdot b_{1k} + b_{2k} + 0,5 \cdot b_{3k}) = 2956,988 \cdot (0,5 \cdot 0,125 + 0,025 + 0,5 \cdot 0,1) = \\ &= 406,59 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Pro sílu na SOP z geometrického obrazce uvedeného v grafu č.2 platí

$$F_{SOP} = \frac{q_0 - q_k}{2} \cdot L + q_k \cdot L = \frac{1568,61 - 406,59}{2} \cdot 1,05 + 406,59 \cdot 1,05 = 1036,977 \text{ N} \quad (4.27)$$



Graf 2 - Průběh spojitého zatížení od obratu SOP s výslednou silou

A pro její vzdálenost od kořenu

$$l_T = \frac{\left(\frac{q_0 - q_k}{2} \cdot L \cdot \frac{1}{3} \cdot L + q_k \cdot L \cdot \frac{1}{2} \cdot L\right)}{F_{SOP}} =$$

$$= \frac{\left(\frac{1568,61 - 406,59}{2} \cdot 1,05 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1,05 + 406,59 \cdot 1,05 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,05\right)}{1036,977} = 0,422 \text{ m} \quad (4.28)$$

Pro polohu těžiště zatěžovacího obrazce u kořenu platí

$$l_{T_0} = \frac{0,5 \cdot W_0 \cdot b_{10} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot b_{10}\right) + W_0 \cdot b_{20} \cdot \left(b_{10} + \frac{1}{2} \cdot b_{20}\right) + 0,5 \cdot W_0 \cdot b_{30} \cdot \left(b_{10} + b_{20} + \frac{1}{3} \cdot b_{30}\right)}{W^* \cdot b_0}$$

$$= \frac{0,5 \cdot 3170,506 \cdot 0,5003 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 0,5003\right) + 3170,506 \cdot 0,025 \cdot \left(0,5003 + \frac{1}{2} \cdot 0,025\right) + 0,5 \cdot 3170,506 \cdot 0,4392 \cdot \left(0,5003 + 0,025 + \frac{1}{3} \cdot 0,4392\right)}{1626,343 \cdot 0,9645} =$$

$$= 0,4927 \text{ m} \quad (4.29)$$

A pro polohu těžiště zatěžovacího obrazce na konci

$$l_{T_k} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot W_k \cdot b_{1k} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot b_{1k}\right) + W_k \cdot b_{2k} \cdot \left(b_{1k} + \frac{1}{2} \cdot b_{2k}\right) + 0,5 \cdot W_k \cdot b_{3k} \cdot \left(b_{1k} + b_{2k} + \frac{1}{3} \cdot b_{3k}\right)}{W^* \cdot b_k}$$

$$= \frac{0,5 \cdot 2956,988 \cdot 0,125 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 0,125\right) + 2956,988 \cdot 0,025 \cdot \left(0,125 + \frac{1}{2} \cdot 0,025\right) + 0,5 \cdot 2956,988 \cdot 0,1 \cdot \left(0,125 + 0,025 + \frac{1}{3} \cdot 0,1\right)}{1626,343 \cdot 0,25} =$$

$$= 0,1295 \text{ m} \quad (4.30)$$



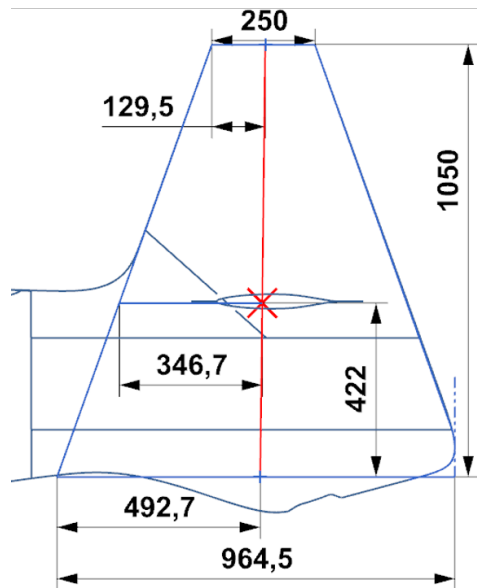
Ze zjištěných hodnot lze sestavit směrnicovou rovnici pro zjištění polohy působíště  $F_{SOP}$  od obratu

$$x = k \cdot y + q = -0,346 \cdot 0,422 + 0,4927 = 0,347 \text{ m od NH SOP} \quad (4.31)$$

$$k = \frac{l_{T_k} - l_{T_0}}{L} = \frac{0,1295 - 0,4927}{1,05} = -0,346 \quad (4.32)$$

$$q = l_{T_0} = 0,4927 \quad (4.33)$$

Grafické znázornění výsledků je na obr. 24.



Obrázek 24 - Působíště síly od obratu na SOP

#### 4.2.2.2 Poryvové zatížení SOP

Postup je stejný jako u poryvového zatížení VOP, viz obr. 21.

Pro určení zatížení u kořenu platí rovnost obrazce

$$W^= \cdot b_0 = W_0 \cdot (0,25 \cdot b_0 + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot b_0 + 0,5 \cdot 0,75 \cdot b_0) \quad (4.34)$$

a úprava do konečné podoby

$$\begin{aligned} W_0 &= \frac{W^= \cdot b_0}{0,25 \cdot b_0 + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot b_0 + 0,5 \cdot 0,75 \cdot b_0} = \\ &= \frac{1626,343 \cdot 0,9645}{0,25 \cdot 0,9645 + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot 0,9645 + 0,5 \cdot 0,75 \cdot 0,9645} = 1626,343 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (4.35)$$

To samé lze udělat pro zatížení na konci

$$\begin{aligned} W_k &= \frac{W^= \cdot b_k}{0,25 \cdot b_k + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot b_k + 0,5 \cdot 0,75 \cdot b_k} = \\ &= \frac{1626,343 \cdot 0,25}{0,25 \cdot 0,25 + 0,5 \cdot 3 \cdot 0,25 \cdot 0,25 + 0,5 \cdot 0,75 \cdot 0,25} = 1626,343 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (4.36)$$

Spojité zatížení u kořenu a u konce je opět stejné, jako u obratového případu. Z toho vyplývá, že  $F_{SOP}$  a její vzdálenost od kořenu je také stejná.

Vzdálenost těžiště zatěžovacího obrazce od náběžné hrany u kořenu se spočte

$$l_{T_0} = \frac{0,25 \cdot W_0 \cdot b_0 \cdot (0,25 \cdot 0,5 \cdot b_0) + 0,5 \cdot 3 \cdot W_0 \cdot 0,25 \cdot b_0 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,25 \cdot b_0\right) + 0,5 \cdot 0,75 \cdot W_0 \cdot b_0 \cdot (0,5 \cdot b_0)}{W^= \cdot b_0} =$$

$$= \frac{0,25 \cdot 1626,343 \cdot 0,9645 \cdot (0,25 \cdot 0,5 \cdot 0,9645) + 0,5 \cdot 3 \cdot 1626,343 \cdot 0,25 \cdot 0,9645 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,25 \cdot 0,9645\right) + 0,5 \cdot 0,75 \cdot 1626,343 \cdot 0,9645 \cdot (0,5 \cdot 0,9645)}{1626,343 \cdot 0,9645} =$$

$$= 0,2411 \text{ m} \quad (4.37)$$

Vzdálenost těžiště zatěžovacího obrazce od náběžné hrany na konci se spočte

$$l_{T_k} = \frac{0,25 \cdot W_k \cdot b_k \cdot (0,25 \cdot 0,5 \cdot b_k) + 0,5 \cdot 3 \cdot W_k \cdot 0,25 \cdot b_k \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,25 \cdot b_k\right) + 0,5 \cdot 0,75 \cdot W_k \cdot b_k \cdot (0,5 \cdot b_k)}{W^= \cdot b_k} =$$

$$= \frac{0,25 \cdot 1626,343 \cdot 0,25 \cdot (0,25 \cdot 0,5 \cdot 0,25) + 0,5 \cdot 3 \cdot 1626,343 \cdot 0,25 \cdot 0,25 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,25 \cdot 0,25\right) + 0,5 \cdot 0,75 \cdot 1626,343 \cdot 0,25 \cdot (0,5 \cdot 0,25)}{1626,343 \cdot 0,25} =$$

$$= 0,0625 \text{ m} \quad (4.38)$$

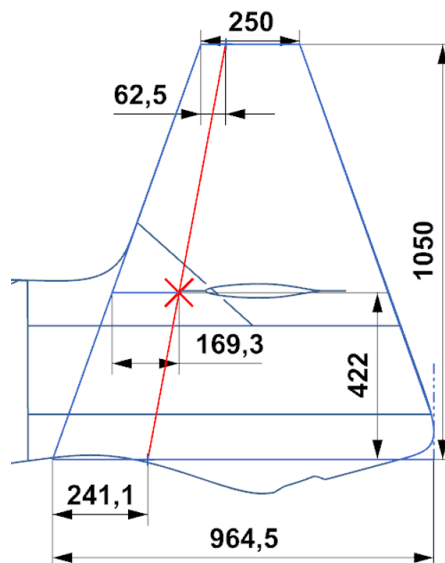
Ze zjištěných hodnot lze sestavit směrnicovou rovnici pro zjištění polohy působišť  $F_{SOP}$  od poryvu

$$x = k \cdot y + q = -0,17 \cdot 0,422 + 0,2411 = 0,169 \text{ m od NH SOP} \quad (4.39)$$

$$k = \frac{l_{T_k} - l_{T_0}}{L} = \frac{0,0625 - 0,2411}{1,05} = -0,17 \quad (4.40)$$

$$q = l_{T_0} = 0,2411 \quad (4.41)$$

Grafické znázornění výsledků je na obr. 25.



Obrázek 25 - Působišť síly od poryvu na SOP

### 4.2.3 Velikosti a polohy sil na ocasních plochách

V tab. 36 jsou ukázány všechny vypočtené případy zatížení ocasních ploch společně s polohou jejich působišť v absolutním souřadnicovém systému.

Tabulka 36 - Poloha sil na ocasních plochách v absolutním souřadnicovém systému

Případ	Síla [N]	x [mm]	y [mm]	z [mm]
VOP obrátový [1/2]	513,7	5762,6	[-]	418
VOP poryvový [1/2]	513,7	5676,6	[-]	418
SOP obrátový	1037	5730	2295,5	[-]
SOP poryvový	1037	5552,5	2295,5	[-]

Pro další výpočty budou použity obrátové případy kvůli poloze působišť blíže ke konci trupu.

### 4.3 Polohy těžišť

Polohy těžišť jednotlivých komponent byly převzaty z diplomové práce Ing. Valenty [1] a jsou znázorněny v tab. 37. Následně byla v absolutním souřadnicovém systému vypočtena poloha těžiště a hmotnost prázdného letounu (bez křídla, paliva v křídle, motoru a vrtule) a poloha těžiště spolu s hmotností pouze motoru a vrtule.

Tabulka 37 - Poloha těžišť a hmotnost jednotlivých prvků v absolutním souřadnicovém systému

Komponenta letounu	x [mm]	y [mm]	Hmotnost [kg]
Křídlo	2759	2109	35,66
VOP	5749	2300	2,7
SOP	5702	2420	1,95
Trup	3453	1988	29,43
Motor	1525	1962	81,506
Motorové lože	1988,5	1967,5	5
Motorová kapotáž	1720	1988	4
Vrtule	1140	1988	11,5
Podvozek	2130	1314	12,23
Trasy řízení	3796	1988	6,3
<b>Prázdný letoun</b>	<b>3165,9</b>	<b>1879,9</b>	<b>61,61</b>
<b>Motor + vrtule</b>	<b>1477,4</b>	<b>1965,2</b>	<b>93,006</b>

### 4.4 Přehled hmotových konfigurací

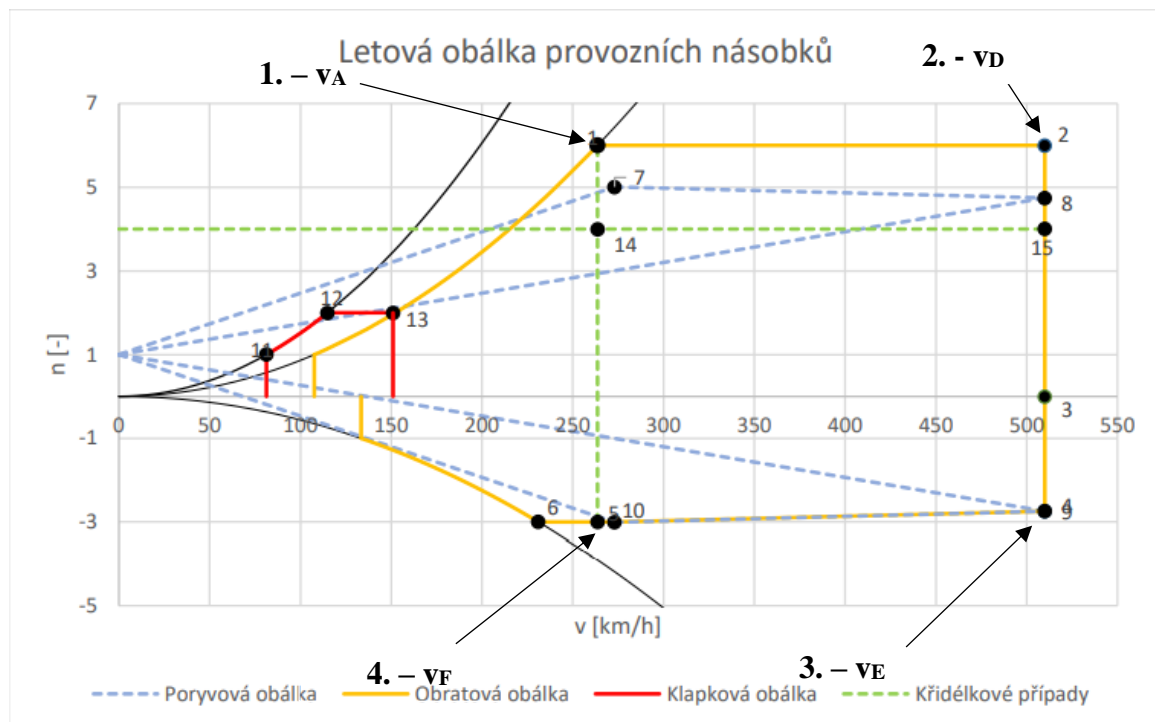
Pro jednotlivé případy všech čtyřech hmotových konfigurací budou stanoveny zatěžovací případy. V tab. 38 jsou uvedeny variabilní položky, které se mění s rozdílnými konfiguracemi.

Tabulka 38 - Jednotlivé hmotové konfigurace

Konfigurace	Hmotnost [kg]	Hmotnost pilota [kg]	Hmotnost paliva v křídle [kg]	Hmotnost paliva ve sběrné nádržce [kg]	Poloha těžiště v abs. souřadnicovém systému [mm]	Poloha těžiště v % stř. aerodynamické tětiny [%]
1	252,3	60	0	2	2540	18,32
2	345	110	42,7	2	2679	36
3	345	60	92,7	2	2563	21,25
4	300,3	110	0	0	2691	37,53

#### 4.5 Letová obálka provozních násobků

Jelikož je v textu postupně odkazováno na letovou obálku provozních násobků (z hlediska rychlostí i násobků), tak je zde pro názornost umístěna obálka (obr. 26) pro maximální hmotnost a jsou na ni vyznačeny zmiňované vyvažovací případy.



Obrázek 26 - Letová obálka provozních násobků [13]

#### 4.6 Výpočet zatížení trupu

Vzorový výpočet je uveden pro hmotovou konfiguraci 2. V tab. 39 jsou uvedeny jednotlivé prvky letounu a sil v souřadnicovém systému letadla společně se vzdáleností od zadního závěsu křídla, popřípadě vzdáleností od těžiště.

*Tabulka 39 - Přehled prvků v souřadnicovém systému letadla*

Prvek	x [m]	y [mm]	z [mm]	Hmotnost [kg]	Vzdálenost od zadního závěsu - $x_{RB}$ [m]	Vzdálenost od těžiště - $x_T$ [m]
Motor + vrtule	0,637	-22,8	[-]	93,006	1,298	1,202
Pilot	2,588	42	[-]	110	0,653	0,749
Prázdné letadlo	2,326	-108,1	[-]	61,61	0,391	0,487
Palivo - sběrná nádržka	1,310	112,0	[-]	2	0,625	0,529
Přední závěs	1,563	[-]	[-]	<b>Zatížení [N]</b>	0,372	0,276
Zadní závěs	1,935	[-]	[-]		0,000	0,096
VOP – vyvažovací	4,836	[-]	418,5	[-]	2,901	2,997
VOP – obrat <sub>[1/2]</sub>	4,923	[-]	418,2	-513,7	2,988	3,084
SOP – obrat	4,890	307,5	[-]	1037	2,955	3,051

#### 4.6.1 Výpočtový model

Jako výpočtový model trupu je uvažován nosník na dvou podpěrách, které symbolizují závěsy křídla (jejich reakce jsou na obr. 27 znázorněny červeně). Na letoun působí zároveň od jednotlivých prvků setrvačná síla od translačního násobku (na obr. 27 černě).

$$F_{n_i} = m_i \cdot g \cdot n \quad (4.42)$$

A setrvačná síla od rotačního zrychlení (na obr. 27 hnědě).

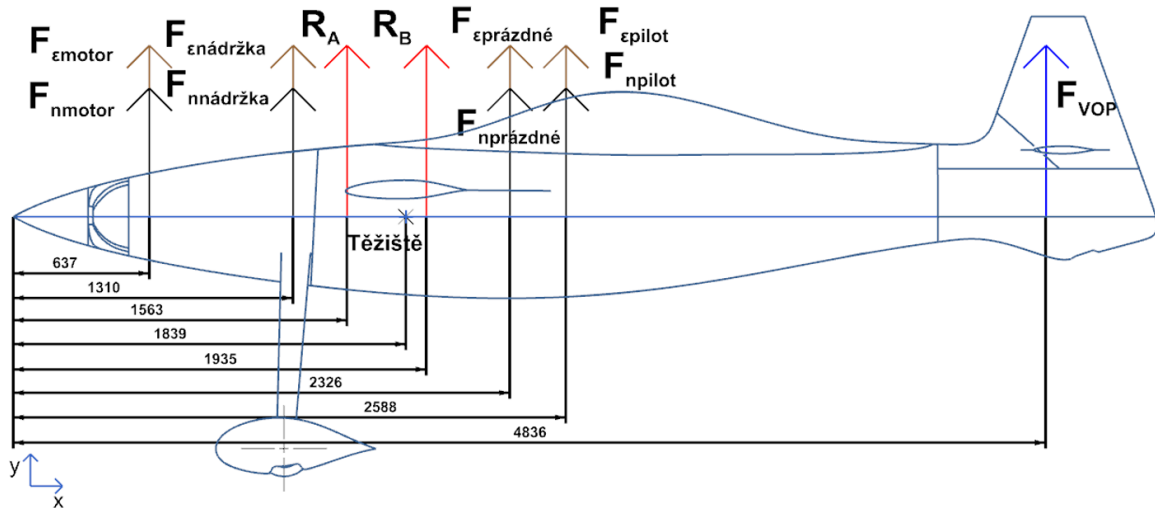
$$F_{\varepsilon_i} = m_i \cdot \varepsilon \cdot x_{T_i} \quad (4.43)$$

Kde

$m_i$ [kg]	Hmotnost prvku
$g$ [ $m \cdot s^{-2}$ ]	Gravitační zrychlení
$n$ [-]	Letový násobek
$\varepsilon$ [ $rad \cdot s^{-2}$ ]	Úhlové zrychlení
$x_{T_i}$ [m]	Vzdálenost prvku od těžiště letounu

##### 4.6.1.1 Rovnováha sil v rovině XY

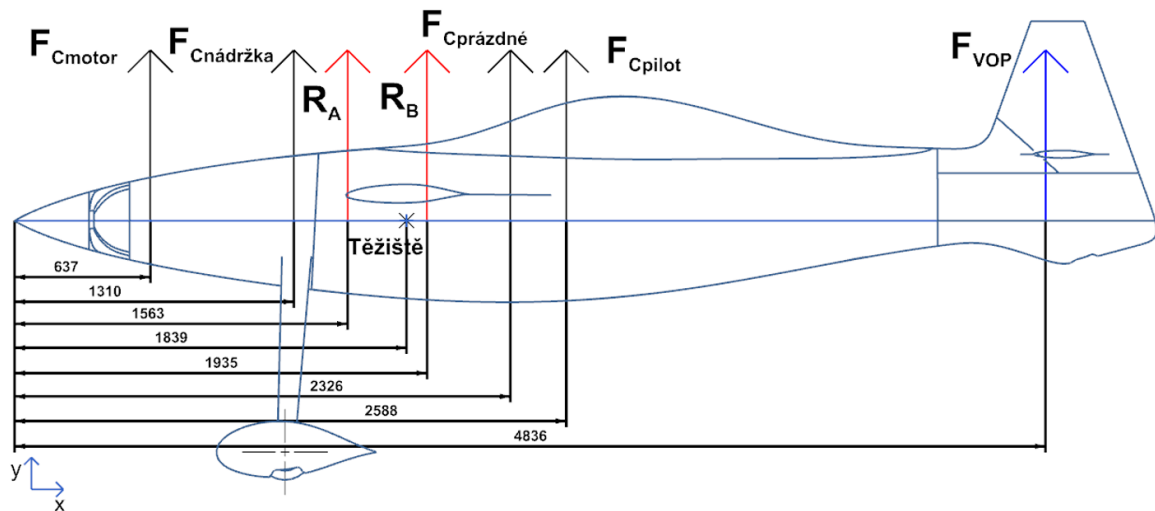
Na obr. 27 je znázorněna rovnováha sil v rovině XY, která je použita u vyvažovacích, obrátových, nesymetrických a kombinovaných případů VOP.



Obrázek 27 - Zatížení v rovině XY

Pro zjednodušení je pro každý prvek zavedena celková síla, která je součtem translační a rotační složky. Toto zjednodušení je znázorněno na obr. 28 a vyjádřeno rovnicí (4.44).

$$F_{C_i} = F_{n_i} + F_{\epsilon_i} \quad (4.44)$$



Obrázek 28 - Zjednodušení a sloučení sil každého prvku do jejich celkových sil v rovině XY

Rovnováha ve směru osy y tím pádem vypadá následovně

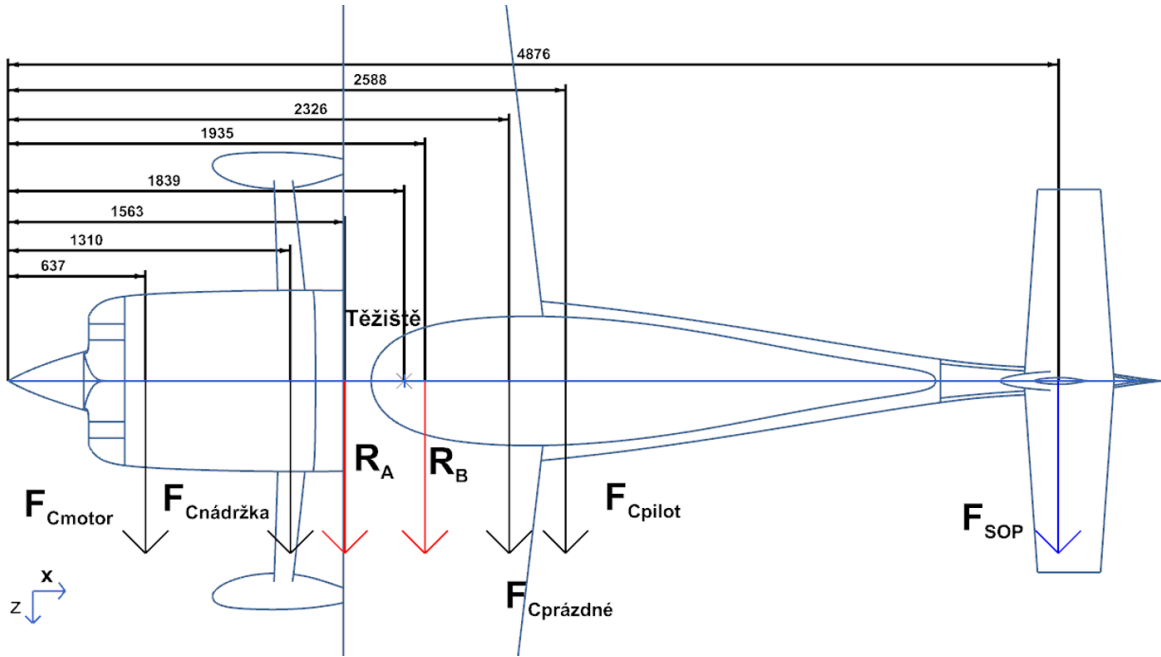
$$F_{C_{motor + vrtule}} + F_{C_{nádržka}} + R_A + R_B + F_{C_{prázdné}} + F_{C_{pilot}} + F_{VOP} = 0 \quad (4.45)$$

Moment k zadnímu závěsu křídla (reakci  $R_B$ ) poté

$$R_A \cdot x_{R_B} + F_{C_{motor + vrtule}} \cdot x_{R_B_{motor + vrtule}} + F_{C_{nádržka}} \cdot x_{R_B_{nádržka}} - F_{C_{prázdné}} \cdot x_{R_B_{prázdné}} - F_{C_{pilot}} \cdot x_{R_B_{pilot}} - F_{VOP} \cdot x_{R_B_{VOP}} = 0 \quad (4.46)$$

#### 4.6.1.2 Rovnováha sil v rovině XZ

Výpočetní model a způsob zatížení je stejný, jako v případě roviny XY, akorát transformován do roviny XZ. Na obr. 29 jsou poté uvedeny už celkové síly jednotlivých prvků v rovině XZ. Tato rovnováha je použita u obrátových a kombinovaných případů SOP.



Obrázek 29 - Celkové zatížení v rovině XZ

Rovnováha ve směru osy z

$$F_{C_{motor + vrtule}} + F_{C_{nádržka}} + R_A + R_B + F_{C_{prázdné}} + F_{C_{pilot}} + F_{SOP} = 0 \quad (4.47)$$

Moment k zadnímu závěsu křídla

$$R_A \cdot x_{R_B} + F_{C_{motor + vrtule}} \cdot x_{R_B_{motor + vrtule}} + F_{C_{nádržka}} \cdot x_{R_B_{nádržka}} - F_{C_{prázdné}} \cdot x_{R_B_{prázdné}} - F_{C_{pilot}} \cdot x_{R_B_{pilot}} - F_{SOP} \cdot x_{R_B_{SOP}} = 0 \quad (4.48)$$

#### 4.6.2 Stanovení zatížení ve vyvažovacích případech (případy č. 1-4)

Výpočet je názorně uveden pro vyvažovací případ č.1 při rychlosti  $v_A$ . Při vyvažovacích případech je úhlové zrychlení nulové a z toho vyplývá, že rotační síly jsou taktéž nulové.

Celkové síly jednotlivých prvků se vypočtou pomocí rovnice (4.44).

$$F_{C_{motor + vrtule}} = m_{motor + vrtule} \cdot g \cdot n + m_{motor + vrtule} \cdot \varepsilon \cdot x_{T_{motor + vrtule}} = -93,006 \cdot 9,81 \cdot 6 + 0 = -5\,474,333 \text{ N} \quad (4.49)$$

$$F_{C_{nádržka}} = m_{nádržka} \cdot g \cdot n + m_{nádržka} \cdot \varepsilon \cdot x_{T_{nádržka}} = -2 \cdot 9,81 \cdot 6 + 0 = -117,72 \text{ N} \quad (4.50)$$

$$F_{C_{prázdné}} = m_{prázdné} \cdot g \cdot n + m_{prázdné} \cdot \varepsilon \cdot x_{T_{prázdné}} = -61,61 \cdot 9,81 \cdot 6 + 0 = -3\,626,365 \text{ N} \quad (4.51)$$

$$F_{C_{pilot}} = m_{pilot} \cdot g \cdot n + m_{pilot} \cdot \varepsilon \cdot x_{T_{pilot}} = -110 \cdot 9,81 \cdot 6 + 0 = -6\,474,6 \text{ N} \quad (4.52)$$

Reakce v předním závěsu křídla

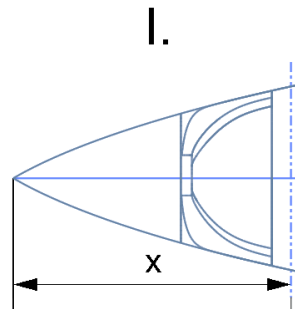
$$\begin{aligned}
 R_A &= \\
 &= \frac{F_{C_{motor+vtule}} \cdot x_{R_{B_{motor+vtule}}} + F_{C_{nádržka}} \cdot x_{R_{B_{nádržka}}} - F_{C_{prázdné}} \cdot x_{R_{B_{prázdné}}} - F_{C_{pilot}} \cdot x_{R_{B_{pilot}}} - F_{VOP} \cdot x_{R_{B_{VOP}}}}{x_{R_A}} = \\
 &= \frac{-5\,474,333 \cdot 1,298 - 117,72 \cdot 0,625 + 3\,626,365 \cdot 0,391 + 6\,474,6 \cdot 0,653 - 953,1 \cdot 2,901}{0,372} = 11\,550,1 \text{ N} \quad (4.53)
 \end{aligned}$$

Reakce v zadním závěsu křídla

$$\begin{aligned}
 R_B &= -F_{C_{motor+vtule}} - F_{C_{nádržka}} - R_A - F_{C_{prázdné}} - F_{C_{pilot}} - F_{VOP} = \\
 &= 5\,474,333 + 117,72 - 11\,550,1 + 3\,626,365 + 6\,474,6 - 953,1 = 3\,189,8 \text{ N} \quad (4.54)
 \end{aligned}$$

Pomocí Eulerovy metody řezu zleva je poté stanoven průběh ohybového momentu po celé délce trupu. Poslední (VIII. Interval) je pomocí metody řezu zprava.

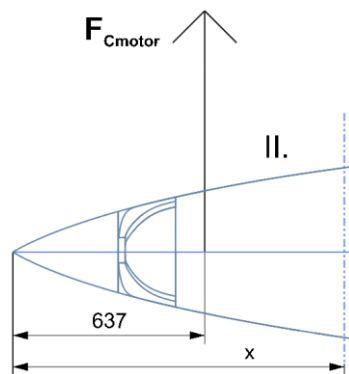
Interval I. -  $x \in \langle 0; 0,637 \rangle \text{ m}$



Obrázek 30 - Metoda řezu, I. interval

$$M_{O_I}(x) = 0 \quad (4.55)$$

Interval II. -  $x \in \langle 0,637; 1,310 \rangle \text{ m}$

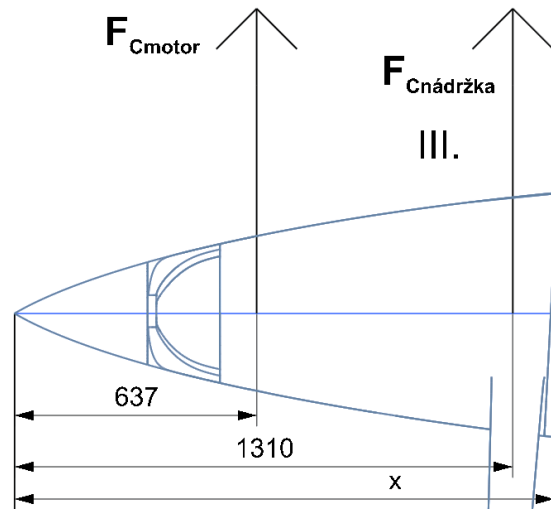


Obrázek 31 - Metoda řezu, II. interval

$$M_{O_{II}}(x) = F_{C_{motor+vtule}} \cdot (x - 0,637) = -5\,474,333 \cdot (x - 0,637) \quad (4.56)$$



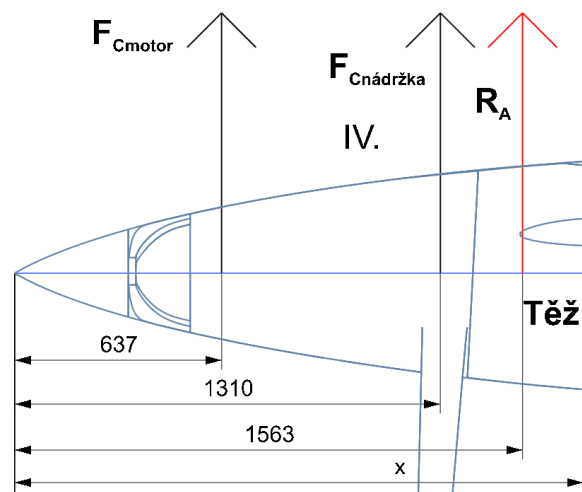
Interval III. -  $x \in \langle 1,310; 1,563 \rangle m$



Obrázek 32 - Metoda řezu, III. interval

$$\begin{aligned}
 M_{O_{III}}(x) &= F_{C_{motor + vrtule}} \cdot (x - 0,637) + F_{C_{nádržka}} \cdot (x - 1,31) = \\
 &= -5\,474,333 \cdot (x - 0,637) - 117,72 \cdot (x - 1,31)
 \end{aligned} \tag{4.57}$$

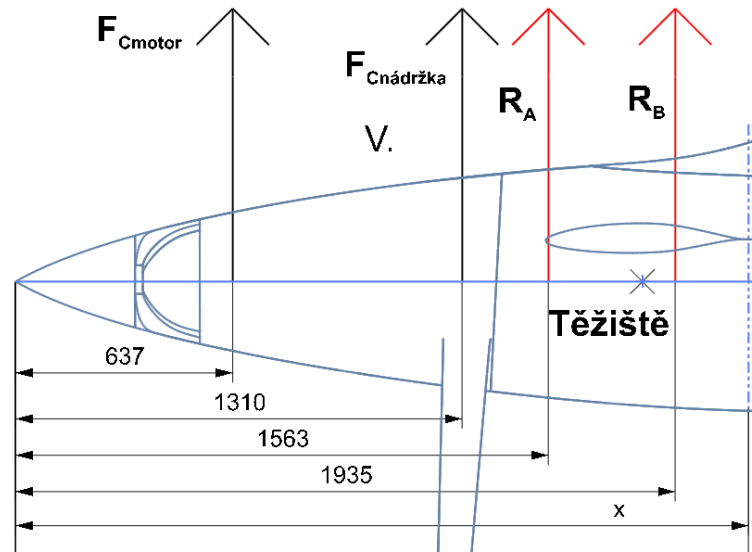
Interval IV. -  $x \in \langle 1,563; 1,935 \rangle m$



Obrázek 33 - Metoda řezu, IV. interval

$$\begin{aligned}
 M_{O_{IV}}(x) &= F_{C_{motor + vrtule}} \cdot (x - 0,637) + F_{C_{nádržka}} \cdot (x - 1,31) + R_A \cdot (x - 1,563) = \\
 &= -5\,474,333 \cdot (x - 0,637) - 117,72 \cdot (x - 1,31) + 11\,550,1 \cdot (x - 1,563)
 \end{aligned} \tag{4.58}$$

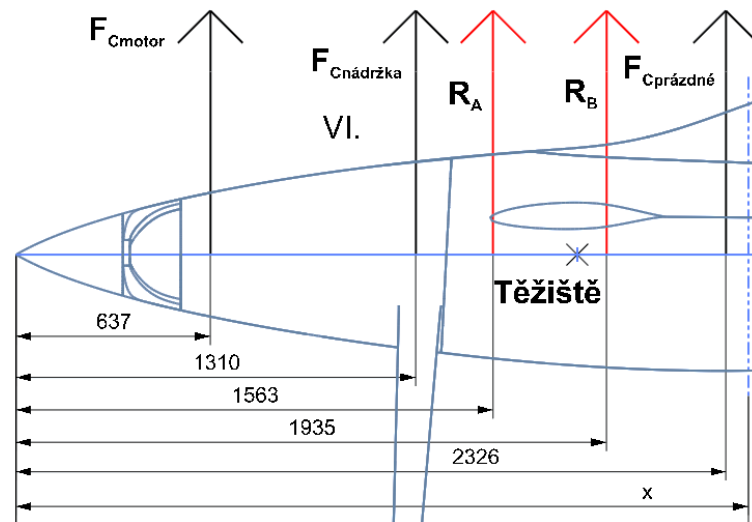
Interval V. -  $x \in \langle 1,935; 2,326 \rangle$  m



Obrázek 34 - Metoda řezu, V. interval

$$\begin{aligned}
 Mo_V(x) &= F_{C_{motor + vrtule}} \cdot (x - 0,637) + F_{C_{nádržka}} \cdot (x - 1,31) + R_A \cdot (x - 1,563) + \\
 &+ R_B \cdot (x - 1,935) = -5\,474,333 \cdot (x - 0,637) - 117,72 \cdot (x - 1,31) + \\
 &+ 11\,550,1 \cdot (x - 1,563) + 3\,189,8 \cdot (x - 1,935)
 \end{aligned} \quad (4.59)$$

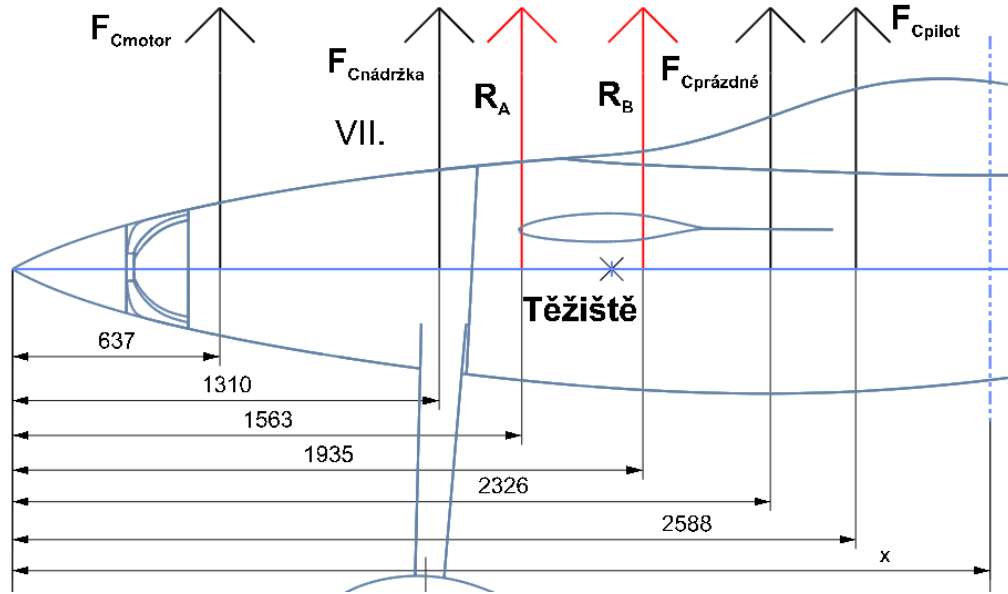
Interval VI. -  $x \in \langle 2,326; 2,588 \rangle$  m



Obrázek 35 - Metoda řezu, VI. interval

$$\begin{aligned}
 Mo_{VI}(x) &= F_{C_{motor + vrtule}} \cdot (x - 0,637) + F_{C_{nádržka}} \cdot (x - 1,31) + R_A \cdot (x - 1,563) + \\
 &+ R_B \cdot (x - 1,935) + F_{C_{prázdné}} \cdot (x - 2,326) = \\
 &= -5\,474,333 \cdot (x - 0,637) - 117,72 \cdot (x - 1,31) + 11\,550,1 \cdot (x - 1,563) + \\
 &+ 3\,189,8 \cdot (x - 1,935) - 3\,626,365 \cdot (x - 2,326)
 \end{aligned} \quad (4.60)$$

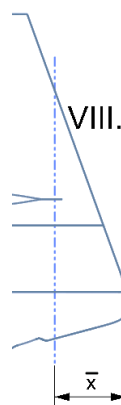
Interval VII. -  $x \in \langle 2,588; 4,836 \rangle m$



Obrázek 36 - Metoda řezu, VII. interval

$$\begin{aligned}
 Mo_{VII}(x) &= F_{C_{motor + vrtule}} \cdot (x - 0,637) + F_{C_{nádržka}} \cdot (x - 1,31) + R_A \cdot (x - 1,563) + \\
 &+ R_B \cdot (x - 1,935) + F_{C_{prázdné}} \cdot (x - 2,326) + F_{C_{pilot}} \cdot (x - 2,588) = \\
 &= -5\,474,333 \cdot (x - 0,637) - 117,72 \cdot (x - 1,31) + 11\,550,1 \cdot (x - 1,563) + \\
 &+ 3\,189,8 \cdot (x - 1,935) - 3\,626,365 \cdot (x - 2,326) - 6\,474,6 \cdot (x - 2,588) \quad (4.61)
 \end{aligned}$$

Interval VIII. -  $\bar{x} \in \langle 0; 0,519 \rangle m$



Obrázek 37 - Metoda řezu, VIII. interval

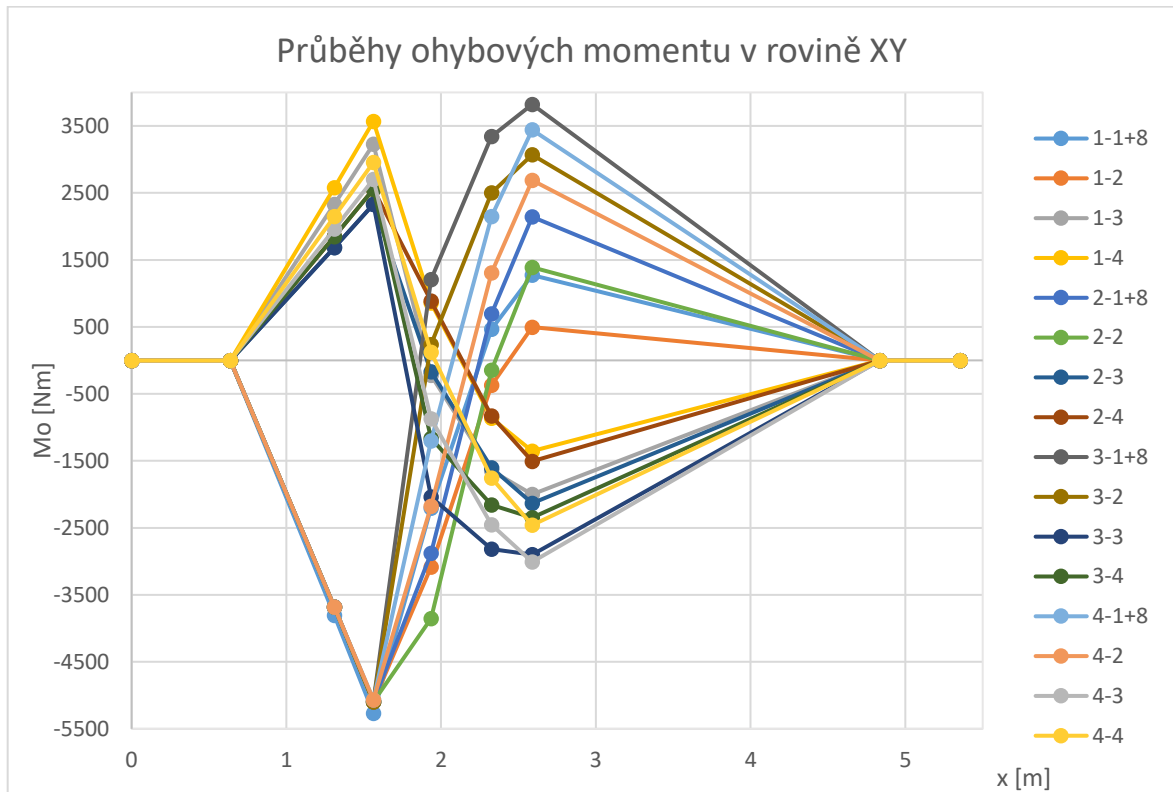
$$Mo_{VIII}(\bar{x}) = 0 \quad (4.62)$$

Pro další tři vyvažovací případy je postup totožný, a proto jsou pro hmotovou konfiguraci č. 2 uvedeny pouze hodnoty v tab. 40.

*Tabulka 40 - Zbýlé hodnoty pro vyvažovací případy pro hmotovou konfiguraci č.2*

<b>Případ</b>	<b>n [-]</b>	<b>F<sub>VOP</sub> [N]</b>	
č. 2 - Vyvažovací v <sub>D</sub>	6	618,1	
<b>Prvek</b>	<b>F<sub>n</sub> [N]</b>	<b>F<sub>ε</sub> [N]</b>	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>
Motor + vrtule	-5 474,333	0	-5 474,333
Palivo – sběrná nádržka	-117,72	0	-117,72
Pilot	-6 474,6	0	-6 474,6
Prázdné letadlo	-3 626,365	0	-3 626,365
Přední závěs – R <sub>A</sub>	[-]	[-]	8 937,975
Zadní závěs – R <sub>B</sub>	[-]	[-]	6 136,898
<b>Případ</b>	<b>n [-]</b>	<b>F<sub>VOP</sub> [N]</b>	
č. 3 - Vyvažovací v <sub>E</sub>	-2,74	-948,7	
<b>Prvek</b>	<b>F<sub>n</sub> [N]</b>	<b>F<sub>ε</sub> [N]</b>	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>
Motor + vrtule	2 502,749	0	2 502,749
Palivo – sběrná nádržka	53,819	0	53,819
Pilot	2 960,05	0	2 960,05
Prázdné letadlo	1 657,897	0	1 657,897
Přední závěs – R <sub>A</sub>	[-]	[-]	-9 280,649
Zadní závěs – R <sub>B</sub>	[-]	[-]	3 054,823
<b>Případ</b>	<b>n [-]</b>	<b>F<sub>VOP</sub> [N]</b>	
č. 4 - Vyvažovací v <sub>F</sub>	-3	-669,9	
<b>Prvek</b>	<b>F<sub>n</sub> [N]</b>	<b>F<sub>ε</sub> [N]</b>	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>
Motor + vrtule	2 743,818	0	2 743,818
Palivo – sběrná nádržka	59,003	0	59,003
Pilot	3 245,166	0	3 245,166
Prázdné letadlo	1 817,588	0	1 817,588
Přední závěs – R <sub>A</sub>	[-]	[-]	-7 287,951
Zadní závěs – R <sub>B</sub>	[-]	[-]	92,288

Průběhy ohybových momentů vyvažovacích případů pro všechny hmotové konfigurace jsou poté uvedeny níže na grafu 3.



Graf 3 - Průběhy ohybových momentů pro všechny vyvažovací případy jednotlivých konfigurací (č. konfigurace - č. případu)

#### 4.6.3 Stanovení zatížení při obrátovém případě VOP (případ č. 5)

Při obrátovém případě se mění poloha působíště síly na VOP oproti vyvažovacímu případu. Dále oproti vyvažovacím případům se zde také uvažuje s úhlovým zrychlením. Toto úhlové zrychlení je pro každou hmotovou konfiguraci rozdílné kvůli nekonstantnímu momentu setrvačnosti letounu, což je zapříčiněno měnící se hmotností jednotlivých konfigurací.

Moment setrvačnosti kolem příčné osy se vypočte dle [3]

$$J_z = m \cdot i_z^2 = m \cdot (0,165 \cdot d)^2 = 345 \cdot (0,165 \cdot 5,355)^2 = 269,34 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.63)$$

Kde

$m = 345 \text{ kg}$  Hmotnost letounu (zde pro 2. hmotovou konfiguraci)

$d = 5,355 \text{ m}$  Délka trupu

$i_z [\text{m}]$  Poloměr setrvačnosti k příčné ose

Úhlové zrychlení

$$\varepsilon = \frac{F_{VOP} \cdot x_{TVOP}}{J_z} = \frac{-1\,027,4 \cdot 3,084}{269,34} = 11,76 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (4.64)$$

Kde

$F_{VOP} = -1027,4 \text{ N}$  Síla při obrátu působící na VOP

$x_{T_{VOP}} = 3,084 \text{ m}$       Vzdálenost těže síly od těžiště  
 $J_z = 269,34 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$       Moment setrvačnosti kolem příčné osy

Pro celkové síly jednotlivých prvků poté opět platí

$$\begin{aligned} F_{C_{motor + vrtule}} &= m_{motor + vrtule} \cdot g \cdot n + m_{motor + vrtule} \cdot \varepsilon \cdot x_{T_{motor + vrtule}} = \\ &= -93,006 \cdot 9,81 \cdot 1 - 93,006 \cdot 11,76 \cdot 1,202 = -2\,226,9 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.65)$$

$$\begin{aligned} F_{C_{nádržka}} &= m_{nádržka} \cdot g \cdot n + m_{nádržka} \cdot \varepsilon \cdot x_{T_{nádržka}} = -2 \cdot 9,81 \cdot 1 - 2 \cdot 11,76 \cdot 0,529 = \\ &= -32,06 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.66)$$

$$\begin{aligned} F_{C_{prázdné}} &= m_{prázdné} \cdot g \cdot n + m_{prázdné} \cdot \varepsilon \cdot x_{T_{prázdné}} = -61,61 \cdot 9,81 \cdot 1 + 61,61 \cdot 11,76 \cdot 0,487 \\ &= -251,56 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.67)$$

$$\begin{aligned} F_{C_{pilot}} &= m_{pilot} \cdot g \cdot n + m_{pilot} \cdot \varepsilon \cdot x_{T_{pilot}} = -110 \cdot 9,81 \cdot 1 + 110 \cdot 11,76 \cdot 0,749 = \\ &= -110 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.68)$$

Pomocí metody řezu se také stanoví průběh ohybového momentu po celé délce letounu. Způsob výpočtu je stejný, jak již v uvedeném vyvažovacím případě, pouze poloha působišť síly na VOP se mění blíže ocasní části trupu.

#### 4.6.4 Stanovení zatížení při nesymetrickém zatížení na VOP (případ č.7)

Postup stejný jako u výpočtu obrátového případu VOP, akorát vzniká moment na VOP vlivem nesymetrie. Také se mění hodnota úhlového zrychlení v důsledku změny síly na VOP.

Síla na VOP při nesymetrickém zatížení

$$F_{VOP} = L_{VOP/2} + 0,7 \cdot L_{VOP/2} = -513,7 - 0,7 \cdot 513,7 = -873,3 \text{ N} \quad (4.69)$$

Moment vznikající nesymetrickým zatížením na VOP

$$M_{k_{VOP}} = (L_{VOP/2} - 0,7 \cdot L_{VOP/2}) \cdot z_{VOP} = (-513,7 + 0,7 \cdot 513,7) \cdot 0,4182 = -64,5 \text{ Nm} \quad (4.70)$$

Úhlové zrychlení

$$\varepsilon = \frac{F_{VOP} \cdot x_{T_{VOP}}}{J_z} = \frac{-873,3 \cdot 3,084}{269,34} = 10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (4.71)$$

#### 4.6.5 Stanovení zatížení při kombinovaném zatížení na VOP (případ č.8)

Dle požadavku předpisu je zatížení odpovídajícímu bodu A nebo D obrátové obálky (podle toho, které je větší) kombinováno s obrátovým zatížením na SOP. V případě VOP je vyšší zatížení v bodě obálky A, tím pádem případ č.1 – vyvažovací  $v_A$ . Tento případ je dále popsán v kapitole o zatížení v rovině XZ.

#### 4.6.6 Stanovení zatížení při kombinovaném zatížení na VOP (případ č.9)

Postup stejný jako u výpočtu obrátového případu VOP. Dle požadavku předpisu se kombinuje 75% zatížení od obrátu na VOP a 75% zatížení od obrátu na SOP. Úhlové zrychlení se opět mění v důsledku změny síly na VOP. Tento případ je také dále popsán v kapitole o zatížení v rovině XZ.

Úhlové zrychlení

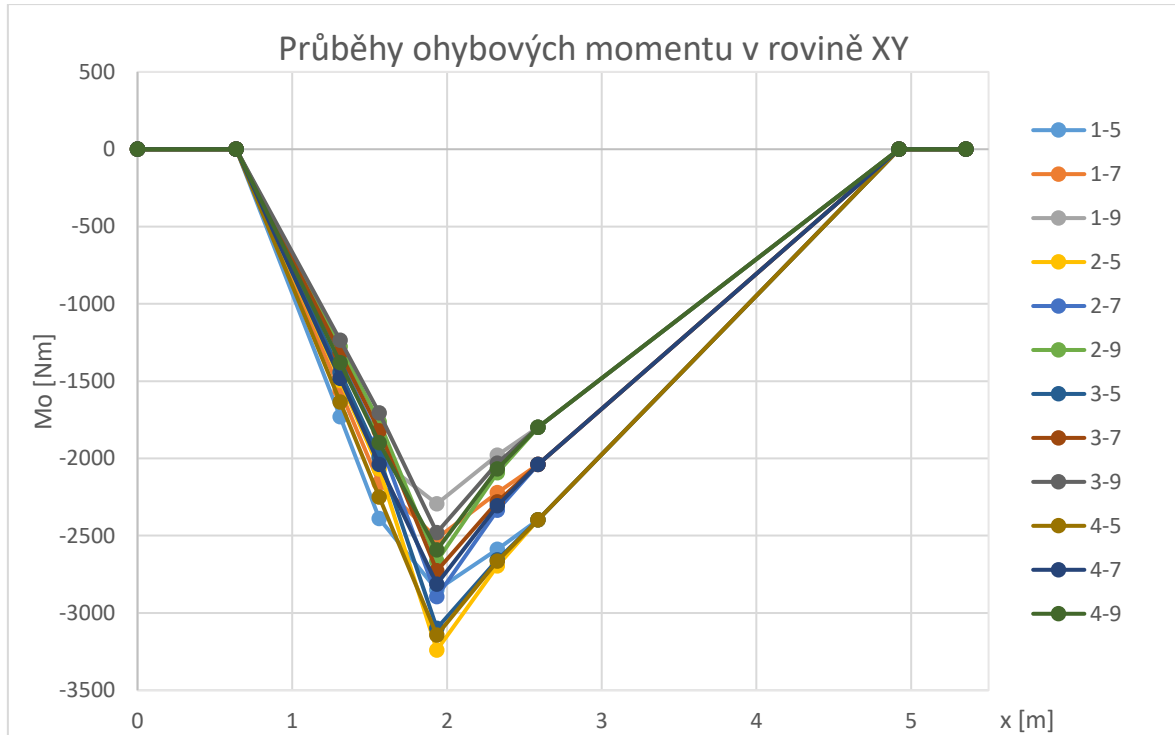
$$\epsilon = \frac{0,75 \cdot F_{VOP} \cdot x_{TVOP}}{J_z} = \frac{0,75 \cdot -1\,027,4 \cdot 3,084}{269,34} = 8,82 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (4.72)$$

Zbylé hodnoty případů č.7-9 jsou uvedeny v tab. 41.

Tabulka 41 - Výsledné hodnoty zatížení pro rovinu XY pro hmotovou konfiguraci č.2

<b>Případ</b>	<b>n [-]</b>	<b>F<sub>VOP</sub> [N]</b>	<b>ε [rad·s<sup>-2</sup>]</b>	<b>M<sub>k</sub> [Nm]</b>
č. 7 - Nesymetrický VOP	1	-873,3	10	-64,5
<b>Prvek</b>	<b>F<sub>n</sub> [N]</b>	<b>F<sub>ε</sub> [N]</b>	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>	
Motor	-912,389	-1 117,333	-2 029,722	
Palivo – sběrná nádržka	-19,62	-10,578	-30,198	
Pilot	-1 079,1	823,73	-255,37	
Prázdné letadlo	-604,394	299,908	-304,486	
Přední závěs – R <sub>A</sub>	[-]	[-]	-650,981	
Zadní závěs – R <sub>B</sub>	[-]	[-]	4 144,047	
<b>Případ</b>	<b>n [-]</b>	<b>F<sub>VOP</sub> [N]</b>	<b>ε [rad·s<sup>-2</sup>]</b>	<b>M<sub>k</sub> [Nm]</b>
č. 8 - Kombinovaný (vyvažovací v <sub>A</sub> a obrátový SOP)	6	953,1	0	0
<b>Prvek</b>	<b>F<sub>n</sub> [N]</b>	<b>F<sub>ε</sub> [N]</b>	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>	
Motor	-5 474,333	0	-5 474,333	
Palivo – sběrná nádržka	-117,72	0	-117,72	
Pilot	-6 474,6	0	-6 474,6	
Prázdné letadlo	-3 626,365	0	-3 626,365	
Přední závěs – R <sub>A</sub>	[-]	[-]	11 550,083	
Zadní závěs – R <sub>B</sub>	[-]	[-]	3 189,834	
<b>Případ</b>	<b>n [-]</b>	<b>F<sub>VOP</sub> [N]</b>	<b>ε [rad·s<sup>-2</sup>]</b>	<b>M<sub>k</sub> [Nm]</b>
č. 9 - Kombinovaný (75% obrátový VOP a 75% obrátový SOP)	1	-770,5	8,82	0
<b>Prvek</b>	<b>F<sub>n</sub> [N]</b>	<b>F<sub>ε</sub> [N]</b>	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>	
Motor	-912,389	-985,882	-1 898,271	
Palivo – sběrná nádržka	-19,62	-9,333	-28,953	
Pilot	-1 079,1	726,82	-352,28	
Prázdné letadlo	-604,394	264,625	-339,769	
Přední závěs – R <sub>A</sub>	[-]	[-]	-493,661	
Zadní závěs – R <sub>B</sub>	[-]	[-]	3 883,484	

Průběhy ohybových momentů obratových, nesymetrických a kombinovaných případů pro všechny konfigurace jsou poté uvedeny níže na grafu 4. Všechny hmotové případy u kombinovaného zatížení č.8 jsou vyvažovací  $v_A$  a uvedeny již ve grafu u vyvažovacích případů.



Graf 4 - Průběhy ohybových momentů pro případy č.5,7,9 jednotlivých konfigurací (č. konfigurace - č. případu)

#### 4.6.7 Stanovení zatížení při obratovém případě SOP (případ č.6)

Při všech případech zatížení SOP vzniká úhlové zrychlení a kroutící moment. Opět platí, že úhlové zrychlení je pro každou hmotovou konfiguraci rozdílné kvůli momentu setrvačnosti.

Vznikající kroutící moment

$$M_k = F_{SOP} \cdot y_{SOP} = 1\,037 \cdot 0,3075 = 318,88 \text{ Nm} \quad (4.73)$$

kde  $y_{SOP}$  je vztaženo k ose letadla.

Moment setrvačnosti kolem kolmé osy se vypočte podobně dle [3]

$$\begin{aligned} J_y &= m \cdot i_y^2 = m \cdot (\chi \cdot (0,182 + 0,001242 \cdot \chi))^2 = m \cdot \left( \frac{l+d}{2} \cdot \left( 0,182 + 0,001242 \cdot \frac{l+d}{2} \right) \right)^2 = \\ &= 345 \cdot \left( \frac{6,538 + 5,355}{2} \cdot \left( 0,182 + 0,001242 \cdot \frac{6,538 + 5,355}{2} \right) \right)^2 = 437,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.74) \end{aligned}$$

Zatížení na SOP způsobuje zatáčivé zrychlení kolem osy y

$$\epsilon = \frac{F_{SOP} \cdot x_{T_{SOP}}}{J_y} = \frac{1\,037 \cdot 3,051}{437,5} = 7,23 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (4.75)$$



Translační násobek se spočte

$$n_z = \frac{F_{SOP}}{m \cdot g} = \frac{1\,037}{345 \cdot 9,81} = 0,306 \quad (4.76)$$

Podle předpisu UL-2 musí být motorové lože navrženo na boční zatížení provozním násobkem ne menším než jedna třetina provozního násobku z bodu obálky A.

$$F_{motor + vrtule_{boční}} = \frac{1}{3} \cdot n_1 \cdot m_{motor + vrtule} \cdot g = -\frac{1}{3} \cdot 6 \cdot 93,006 \cdot 9,81 = -1\,824,78 \quad (4.77)$$

Boční zatížení je ve všech případech větší než zatížení od translace a rotace, v dalších výpočtech se proto uvažuje pouze s ním.

Jednotlivé celkové síly se vypočtou podobně jako při obratovém případě VOP. Pomocí metody řezu se také stanoví průběh ohybového momentu po celé délce letounu pro rovinu XZ.

#### **4.6.8 Stanovení kombinovaného zatížení na SOP (případ č.8)**

Výsledné kombinované zatížení č.8 je superpozicí už vypočteného zatížení č.1 a zatížení na SOP při obratu č.6. Vzniká zde navíc také stejný kroutící moment jako v případě č.6. Výsledný průběh se spočte stejně jako u předchozího případu.

#### **4.6.9 Stanovení kombinovaného zatížení na SOP (případ č.9)**

Výsledné kombinované zatížení č.9 se vypočte superpozicí 75% zatížení při obratovém případě VOP a 75% zatížení při obratovém případě SOP. Vzniká zde kroutící moment, který se vypočte

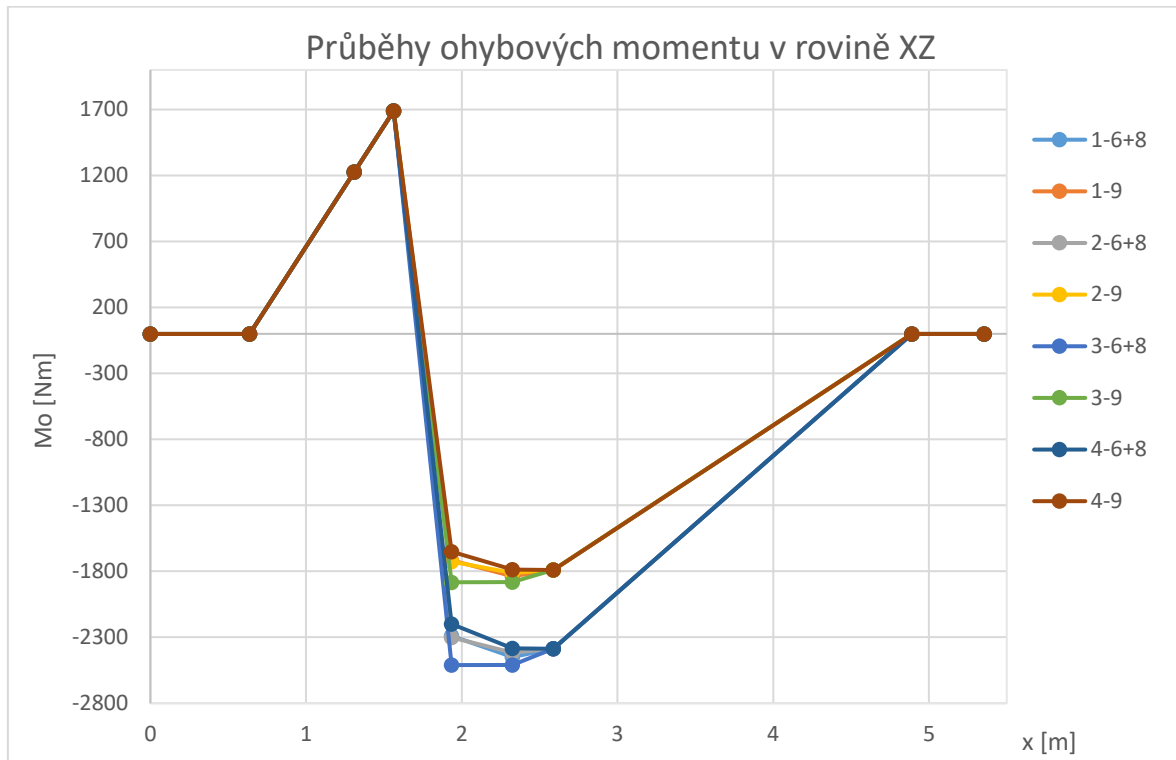
$$M_k = 0,75 \cdot F_{SOP} \cdot y_{SOP} = 0,75 \cdot 1\,037 \cdot 0,3075 = 239,2 \text{ Nm} \quad (4.78)$$

Průběh ohybového momentu se poté vypočte stejně jako v předchozích případech. Konečné hodnoty jsou znázorněny v tab. 42.

*Tabulka 42 - Výsledné hodnoty pro rovinu XZ pro hmotovou konfiguraci č.2*

<b>Případ</b>	<b>n [-]</b>	<b>F<sub>SOP</sub> [N]</b>	<b>ε [rad·s<sup>-2</sup>]</b>	<b>M<sub>k</sub> [Nm]</b>
č. 6 - Obratový SOP	0,306	1 037	7,23	318,9
<b>Prvek</b>	<b>F<sub>n</sub> [N]</b>	<b>F<sub>ε</sub> [N]</b>	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>	<b>F<sub>m+vboční</sub> [N]</b>
Motor + vrtule	-279,551	808,170	528,619	-1 824,778
Palivo – sběrná nádržka	-6,011	7,651	1,639	/
Pilot	-330,63	-595,806	-926,436	
Prázdné letadlo	-185,183	-216,924	-402,107	
Přední závěs – R <sub>A</sub>	[-]	[-]	12 550,916	
Zadní závěs – R <sub>B</sub>	[-]	[-]	-10 436,212	
<b>Případ</b>	<b>n [-]</b>	<b>F<sub>SOP</sub> [N]</b>	<b>ε [rad·s<sup>-2</sup>]</b>	<b>M<sub>k</sub> [Nm]</b>
č. 8 - Kombinovaný (vyvažovací v <sub>A</sub> a obratový SOP)	0,306	1 037	7,23	318,9
<b>Prvek</b>	<b>F<sub>n</sub> [N]</b>	<b>F<sub>ε</sub> [N]</b>	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>	<b>F<sub>m+vboční</sub> [N]</b>
Motor + vrtule	-279,551	808,170	528,619	-1 824,778
Palivo – sběrná nádržka	-6,011	7,651	1,639	/
Pilot	-330,63	-595,806	-926,436	
Prázdné letadlo	-185,183	-216,924	-402,107	
Přední závěs – R <sub>A</sub>	[-]	[-]	12 550,916	
Zadní závěs – R <sub>B</sub>	[-]	[-]	-10 436,212	
<b>Případ</b>	<b>n [-]</b>	<b>F<sub>SOP</sub> [N]</b>	<b>ε [rad·s<sup>-2</sup>]</b>	<b>M<sub>k</sub> [Nm]</b>
č. 9 - Kombinovaný (75% obratový VOP a 75% obratový SOP)	0,23	777,7	5,42	239,2
<b>Prvek</b>	<b>F<sub>n</sub> [N]</b>	<b>F<sub>ε</sub> [N]</b>	<b>F<sub>C</sub> [N]</b>	<b>F<sub>m+vboční</sub> [N]</b>
Motor + vrtule	-209,663	606,127	396,464	-1 824,778
Palivo – sběrná nádržka	-4,509	5,738	1,230	/
Pilot	-247,973	-446,854	-694,827	
Prázdné letadlo	-138,887	-162,693	-301,58	
Přední závěs – R <sub>A</sub>	[-]	[-]	11 004,477	
Zadní závěs – R <sub>B</sub>	[-]	[-]	-8 962,255	

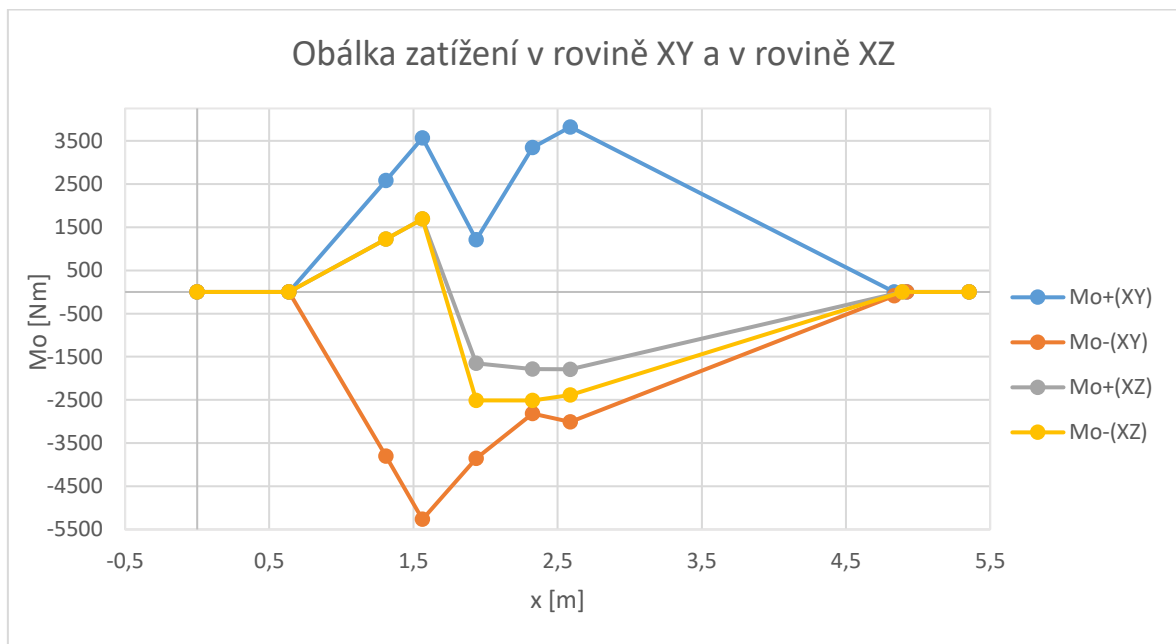
Průběhy ohybových momentů obratových a kombinovaných případů v rovině XZ pro všechny konfigurace jsou poté uvedeny níže na grafu 5.



Graf 5 - Průběhy ohybových momentů pro případy č. 6, 8, 9 jednotlivých konfigurací (č. konfigurace - č. případu)

#### 4.6.10 Minimální a maximální hodnoty pro XY rovinu a XZ rovinu

Na grafu 6 je uvedena obálka zatížení v rovině XY a rovině XZ společně s maximálními provozními hodnotami uvedenými v tab. 43.



Graf 6 - Obálka zatížení v rovině XY a v rovině XZ

*Tabulka 43 - Maximální provozní hodnoty ohybového momentu v rovině XY a rovině XZ*

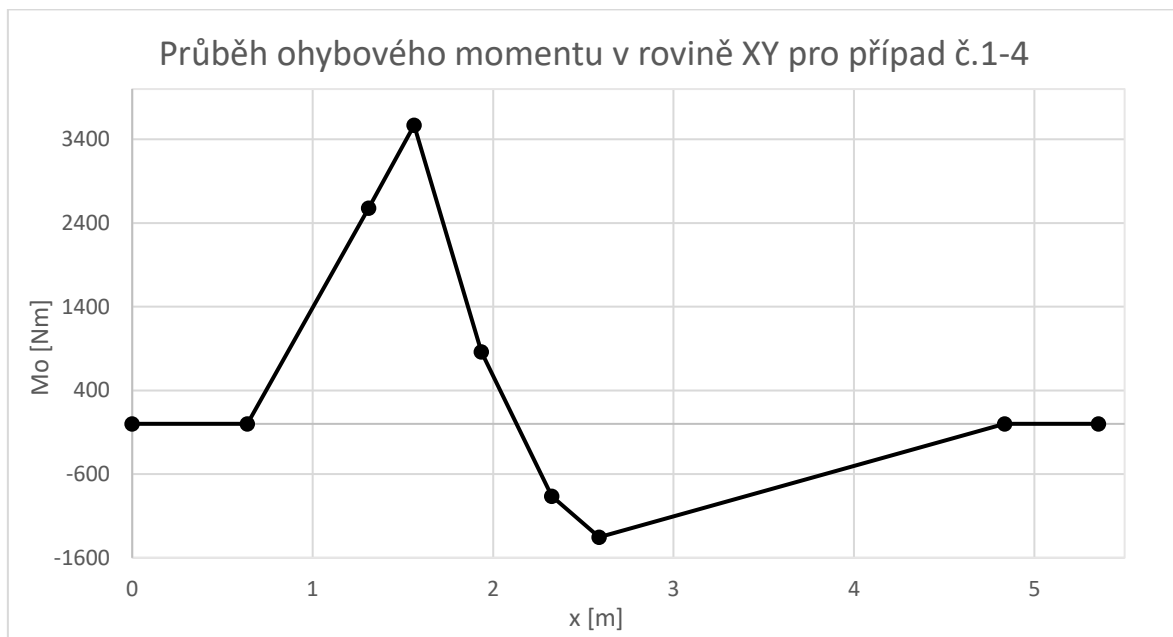
Rovina XY			Rovina XZ		
x [m]	$M_{o_{max}}$ [Nm]	$M_{o_{min}}$ [Nm]	x [m]	$M_{o_{max}}$ [Nm]	$M_{o_{min}}$ [Nm]
0	0	0	0	0	0
0,637	0	0	0,637	0	0
1,310	2 577,443	-3 804,8	1,310	1 227,354	1 227,354
1,563	3 567,795	-5 266,75	1,563	1 689,062	1 688,608
1,935	1 208,073	-3 852,17	1,935	-1 650,31	-2 510,78
2,326	3 341,511	-2 815,1	2,326	-1 787,65	-2 509,55
2,588	3 821,6	-3 008,5	2,588	-1 790,34	-2 387,12
4,923	0	-88,973	4,89	0	0
5,355	0	0	5,355	0	0

#### 4.7 Kritické případy

Pro další potřeby bylo vybráno z předešlých výpočtů 8 kritických případů zatížení.

##### 4.7.1 Vyvažovací zatížení VOP, hmotová konfigurace č.1, případ č.4

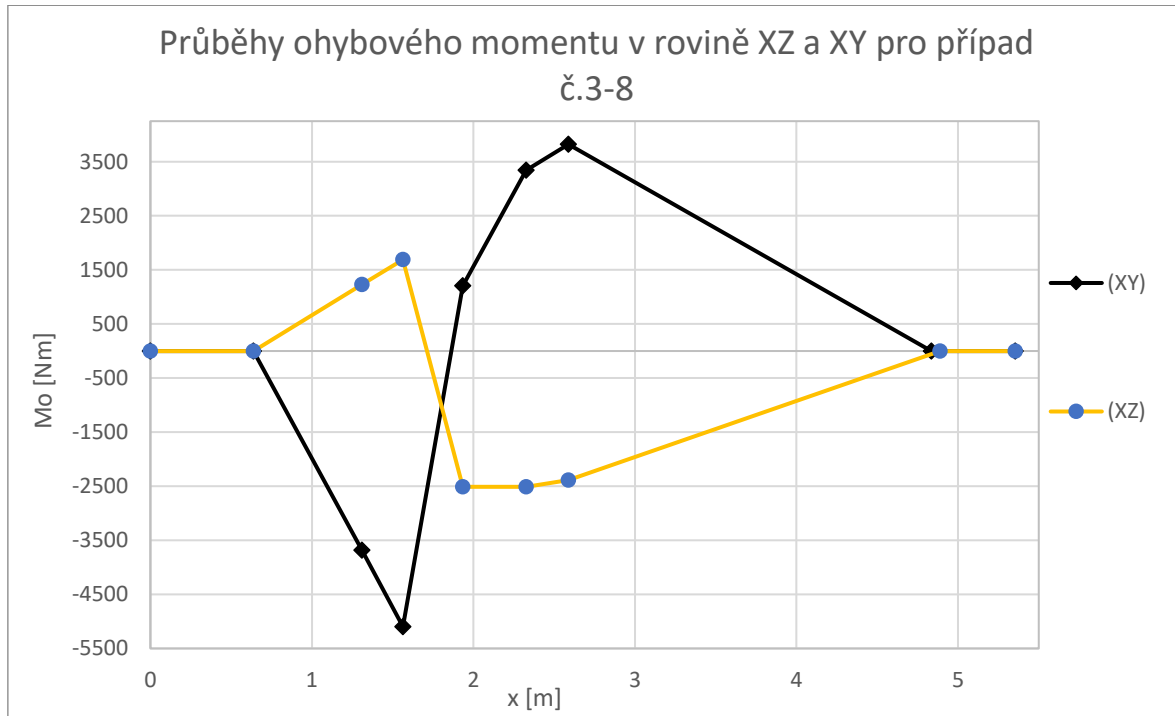
Jedná se o vyvažovací případ na rychlosti  $v_F$  a minimální vzletové hmotnosti. Tento případ je kritický pro přední část trupu, kde je maximální kladný ohybový moment v rovině XY. Průběh tohoto zatížení je znázorněn na grafu 7.



*Graf 7 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.1-4*

##### 4.7.2 Kombinované zatížení ocasních ploch, hmotová konfigurace č.3, případ č.8

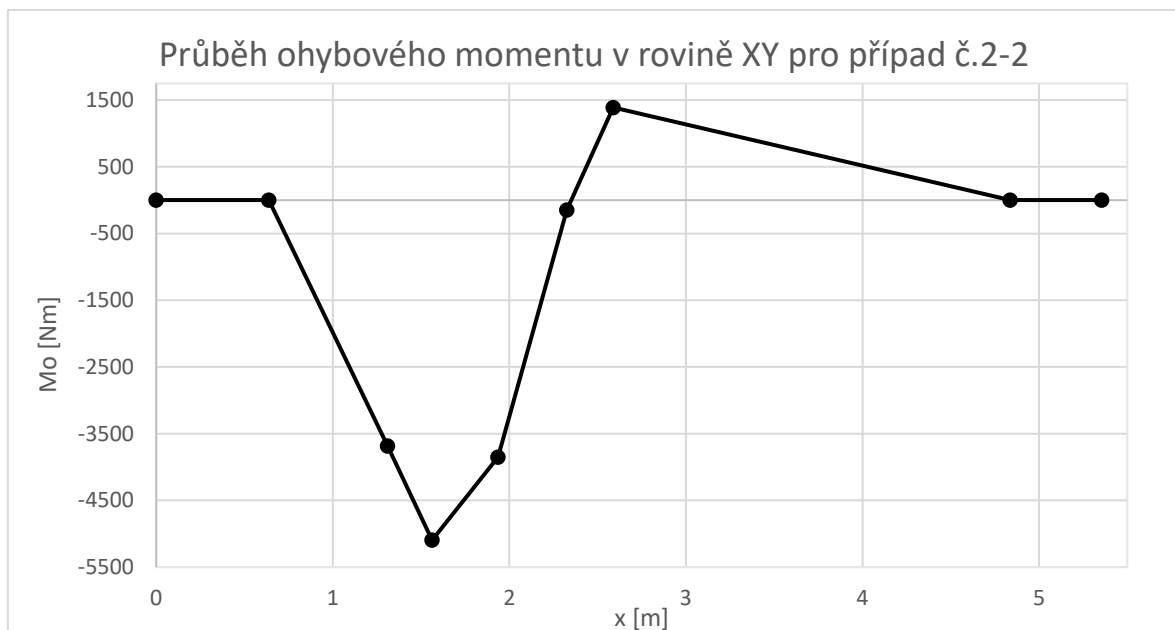
Případ kombinovaného zatížení ocasních ploch č.8 je kritický z pohledu zadní části trupu, kde zde ohybový moment nabývá maximálních kladných hodnot v rovině XY. Také v tomto případě trup nabývá maximálních hodnot kroutícího momentu. Zároveň i v rovině XZ je tento případ kritický pro zadní část trupu z pohledu ohybového momentu. Průběh je opět znázorněn na grafu 8 pro obě roviny.



Graf 8 - Průběhy ohybového momentu v rovině XY a XZ pro případ č.3-8

#### 4.7.3 Vyvažovací zatížení VOP, hmotová konfigurace č.2, případ č.2

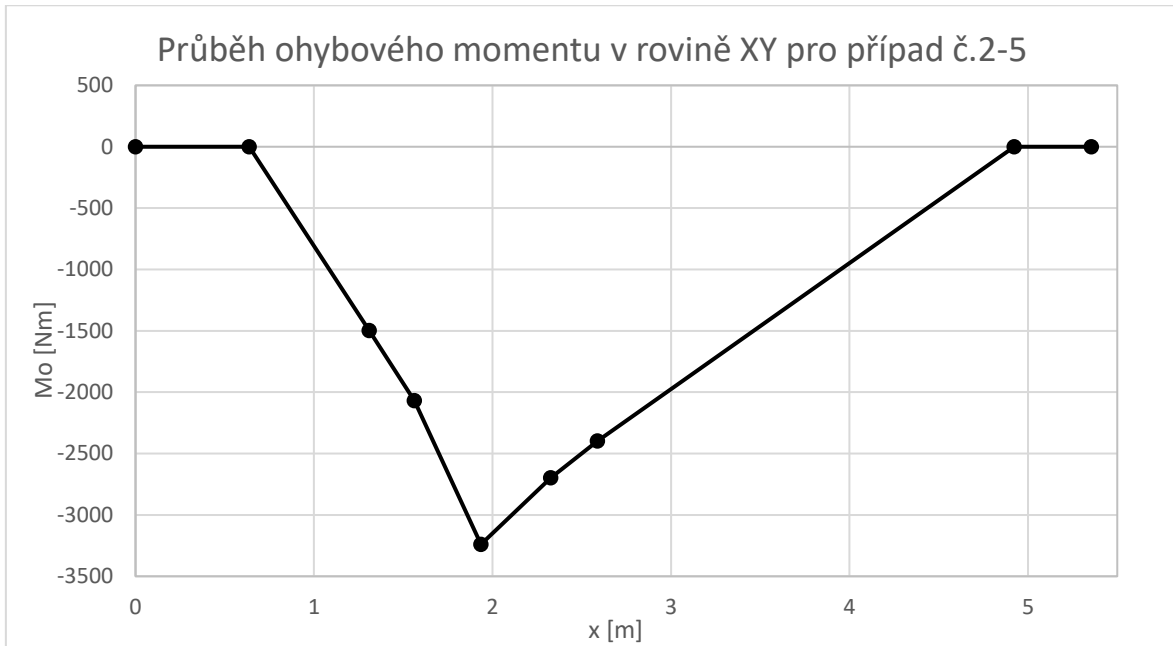
Jedná se o případ při maximální vzletové hmotnosti na rychlosti  $v_D$ . Případ je kritický, protože přední část trupu zde nabývá maximálních záporných hodnot ohybového momentu v rovině XY.



Graf 9 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.2-2

#### 4.7.4 Obratové zatížení VOP, hmotová konfigurace č.2, případ č.5

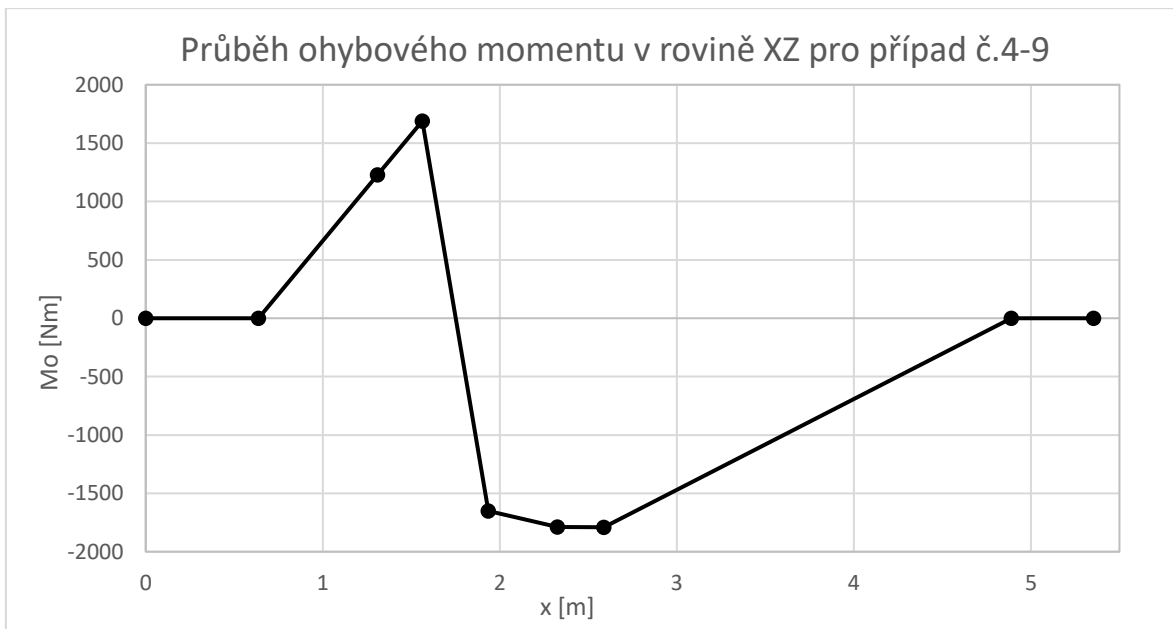
Obratový případ VOP na maximální vzletové hmotnosti je vybrán jako kritický, jelikož je zde maximální záporný ohybový moment v prostřední části trupu v rovině XY. Průběh lze vidět na grafu 10.



Graf 10 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.2-5

#### 4.7.5 Kombinované 75% obrátové zatížení SOP a 75% zatížení VOP, hmotová konfigurace č.4, případ č.9

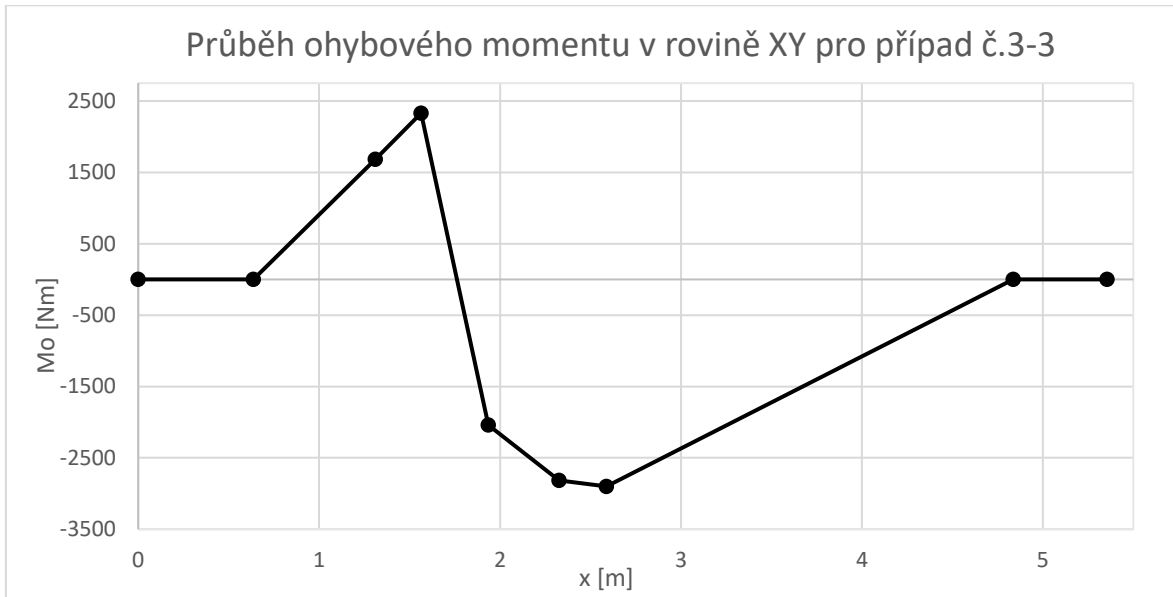
Na grafu 11 lze zpozorovat kombinované zatížení č.9 pro hmotovou konfiguraci č.4. Je vybráno, jelikož na trupu se zde vyskytuje maximální kladný ohybový moment v přední části trupu v rovině XZ.



Graf 11 - Průběh ohybového momentu v rovině XZ pro případ č.4-9

#### 4.7.6 Vyvažovací zatížení VOP, hmotová konfigurace č.3, případ č.3

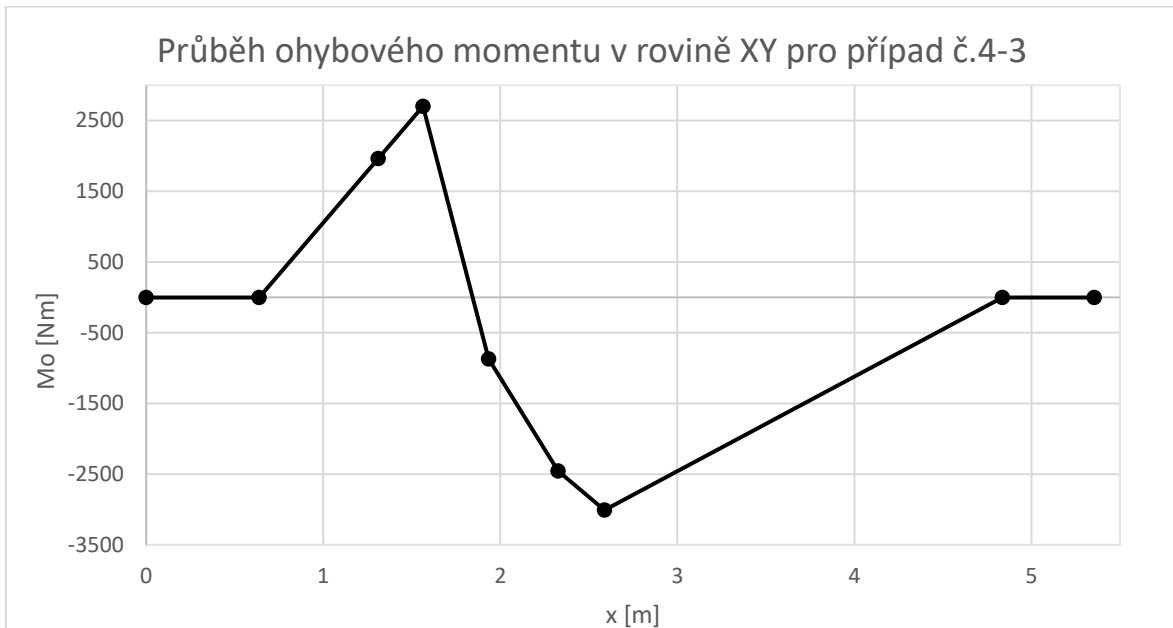
Jedná se o vyvažovací případ na rychlosti  $v_E$  a maximální vzletové hmotnosti s nejmenší hmotností pilota. V rovině XY se zde nalézá maximální záporný ohybový moment v prostřední části u těžiště trupu, jak lze vidět na grafu 12.



Graf 12 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.3-3

#### 4.7.7 Vyvažovací zatížení VOP, hmotová konfigurace č.4, případ č.3

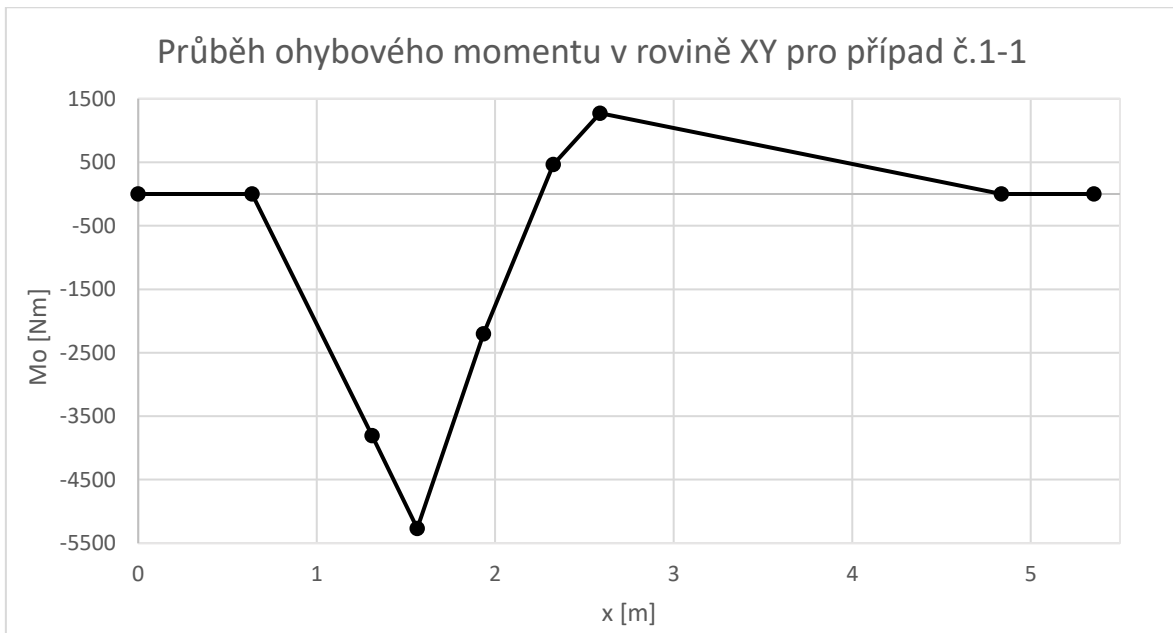
Vyvažovací případ na rychlosti  $v_E$  a vzletové hmotnosti s maximální hmotností pilota. Maximální záporný ohybový moment v rovině XY se zde nachází v zadní části trupu a u pilota.



Graf 13 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č.4-3

#### 4.7.8 Vyvažovací zatížení VOP, hmotová konfigurace č.1, případ č.1

U případu na rychlosti  $v_A$ , minimální vzletové hmotnosti s minimální hmotností pilota se v přední části v oblasti závěsu křídla vyskytuje maximální záporný ohybový moment, jak je uvedeno v grafu 14.



Graf 14 - Průběh ohybového momentu v rovině XY pro případ č. 1-1

#### 4.8 Početní zatížení

Pro potřeby předpisu je potřeba stanovit početní zatížení. To se získá tím, že provozní zatížení je vynásobeno součinitelem bezpečnosti ( $f=1,875$ ), který se skládá ze základního součinitele bezpečnosti ( $k_1=1,5$ ) a doplňkového zvyšujícího součinitele pro kompozitové konstrukce ( $k_2=1,25$ ).

$$F_{\text{početní}} = F_{\text{provozní}} \cdot f = F_{\text{provozní}} \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (4.79)$$

Hodnoty početního zatížení jsou poté uvedeny v tab. 44 pro všechny kritické případy.

Tabulka 44 - Hodnoty početního zatížení

Případ	1-4	3-8		2-2	2-5
Síla	XY [N]	XY [N]	XZ [N]	XY [N]	XY [N]
Motor	7 185,062	-10 264,375	-3 421,458	-10 264,375	-4 175,435
Palivo - s. n.	154,508	-220,725	0,353	-220,725	-60,121
Pilot	4 635,225	-6 621,75	-1 068,527	-12 139,875	-206,262
Prázdné letadlo	4 759,604	-6 799,434	-869,938	-6 799,434	-471,677
VOP	-1 128,938	3 187,5	[-]	1 158,938	-1 926,375
SOP	[-]	[-]	1 944,375	[-]	[-]
Případ	3-3	4-9		4-3	1-1
Síla	XY [N]	XY [N]	XZ [N]	XY [N]	XY [N]
Motor	4 692,655	-3 847,276	-3 421,458	5 474,333	-10 606,52
Palivo - s. n.	100,911	0	0	0	-228,083
Pilot	3 027,324	-488,751	-1 477,459	6 474,6	-6 842,475
Prázdné letadlo	3 108,557	-579,425	-639,608	3 626,365	-7 026,081
VOP	-2 418,938	-1 444,781	[-]	-2 050,875	1 061,625
SOP	[-]	[-]	1 458,281	[-]	[-]



## 5 Dimenzování

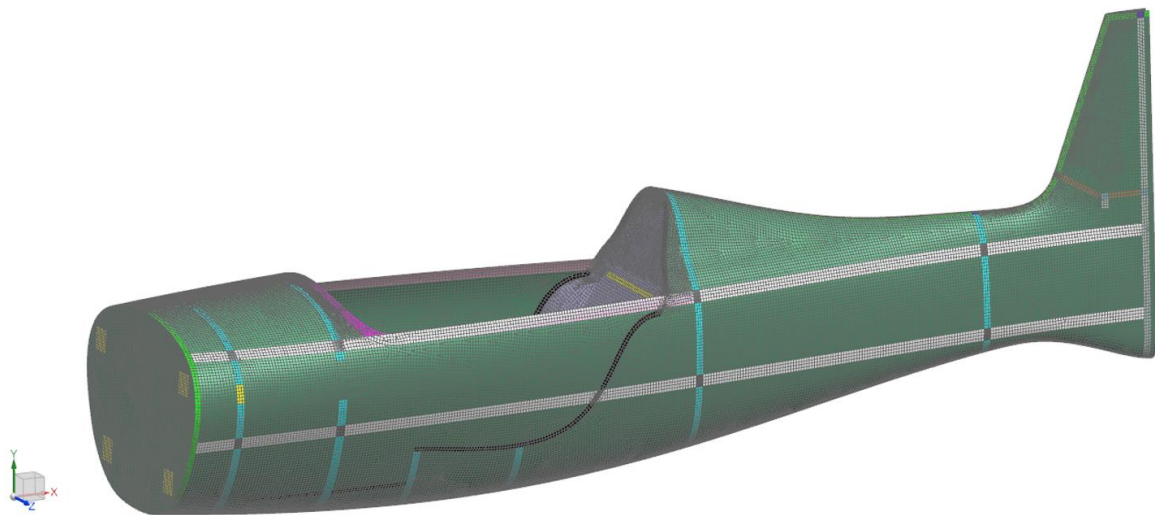
Vzhledem k náročnosti analytického výpočtu na tak složitém celku, je dimenzování trupu provedeno pomocí numerické metody konečných prvků. Pro potřeby výpočtu je použit software Nastran, který je součástí programu Siemens NX. V následujících podkapitolách je stručný popis MKP modelu použitého pro pevnostní analýzu.

### 5.1 MKP Model

Základem MKP modelu je již dříve vytvořený 3D model v programu Siemens NX. Jelikož se v případě trupu jedná o tenkostěnnou konstrukci, lze pomocí vhodných úprav převést výpočet na 2D úlohu, což zjednoduší nároky na samotný výpočet a zkrátí dobu řešení jednotlivých případů. 3D model je potřeba zredukovat na 2D plochy s ohledem na vrstvení kompozitu pro zachování geometrické návaznosti. Mezi asi nejvýraznější změny idealizace geometrie patří zanedbání lepidla mezi jednotlivými díly – nahrazeno protáhnutím a promítnutím jejich spoje do jedné společné plochy a dále zanedbání tloušťky jádra a jeho promítnutím do společné plochy. Tímto stylem lze dosáhnout modelu, který je rozdělen na několik různých ploch a pro každou plochu lze definovat přesné složení kompozitu podle dílů, které se na místě nachází. Nakonec byly jednotlivé plochy sešity na jejich rozhraní, aby byla dodržena pozdější návaznost sítě.

### 5.2 Sít'ování

Po úpravě 3D modelu na 2D lze nanést elementy na jednotlivé plochy. V tomto případě je použit typ elementů CQUAD4 o velikosti 10 mm, v některých případech, kde je potřeba jemnější síť, je použito i 5 mm. Společně s čtvercovými elementy je v mnohem menším počtu použito i elementů trojúhelníkových CTRIA3 tam, kde nebylo možno použít čtvercové elementy.



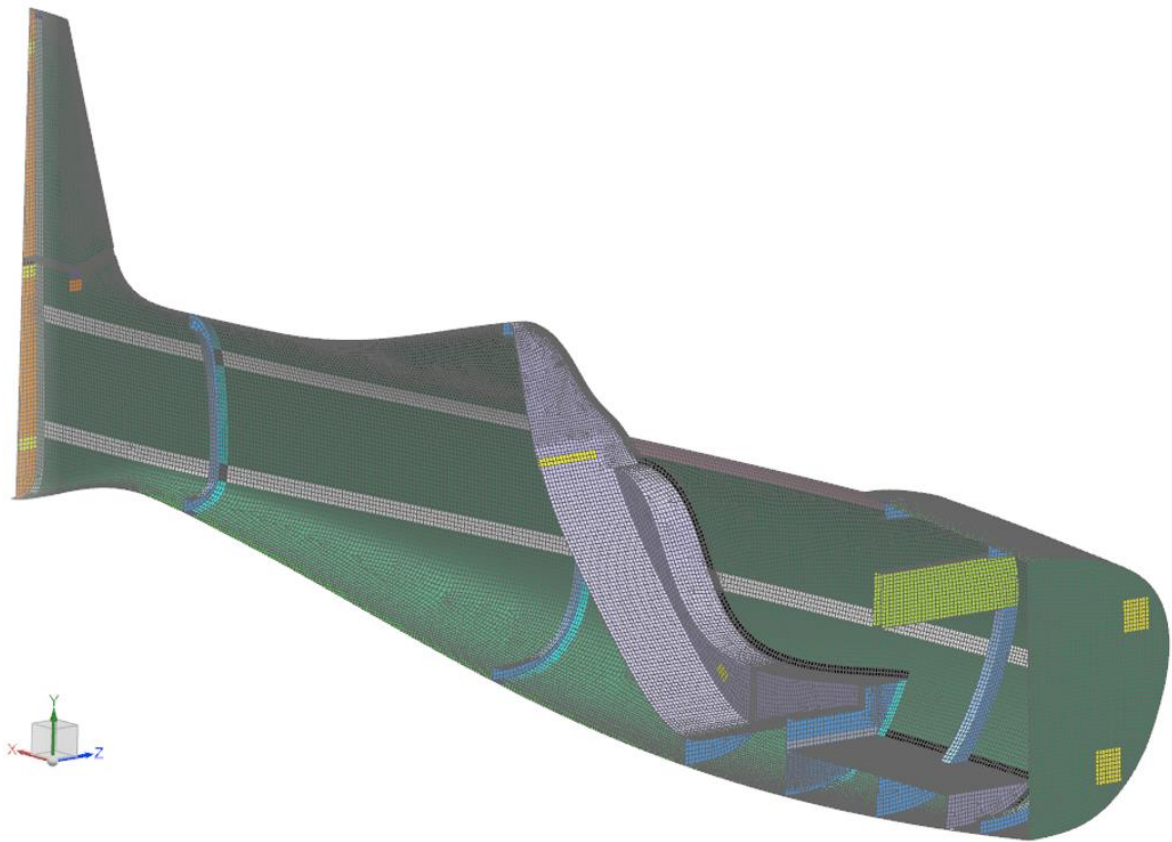
Obrázek 38 - Sít' na modelu

Po automatickém vysít'ování pomocí integrovaných nástrojů je potřeba zkontrolovat síť, a případně lokálně síť upravit. Dále je nutné zkontrolovat, zda jednotlivé elementy mají společné uzly na všech místech tam, kde je mít mají (kupříkladu mezi sešitými plochami dílů). Nakonec je provedena kontrola a úprava normál 2D elementů tak, aby směřovaly na druhou stranu vrstvení kompozitu a nastavena materiálová orientace sítě ve směru letu (záporném směru osy X). Přepážky a pásnice ocasních ploch mají materiálovou orientaci nastavenou v kladném směru osy Y. Pásnice

skříňového nosníku mají orientaci v kladném směru osy Z. Vnější pohled na síť je zobrazen na obr. 38.

### 5.3 Materiálová skladba

Pro potřeby přiřazení kompozitního materiálu k jednotlivým sítím existuje v softwaru samostatný nástroj „Laminate Modeler“. Nejprve je nutno vytvořit v knihovně materiálů jednotlivé materiály a k nim přiřadit fyzikální vlastnosti tak, jak již byly definovány v kapitole 3.1. Pro pěny a překližku je použit typ materiálu jako izotropní, pro zbylé zase ortotropní. Poté je vytvořeno pro každou síť vlastní vrstvení laminátu v modeláři, kde je dále definován směr vrstvení „Top“ (v návaznosti na normály 2D elementů). Jako kritérium porušení pro budoucí výpočet je zvoleno Hoffmanovo kritérium. Síť v řezu s materiálovou skladbou je znázorněna na obr. 39.



*Obrázek 39 - Pohled na síť v řezu*

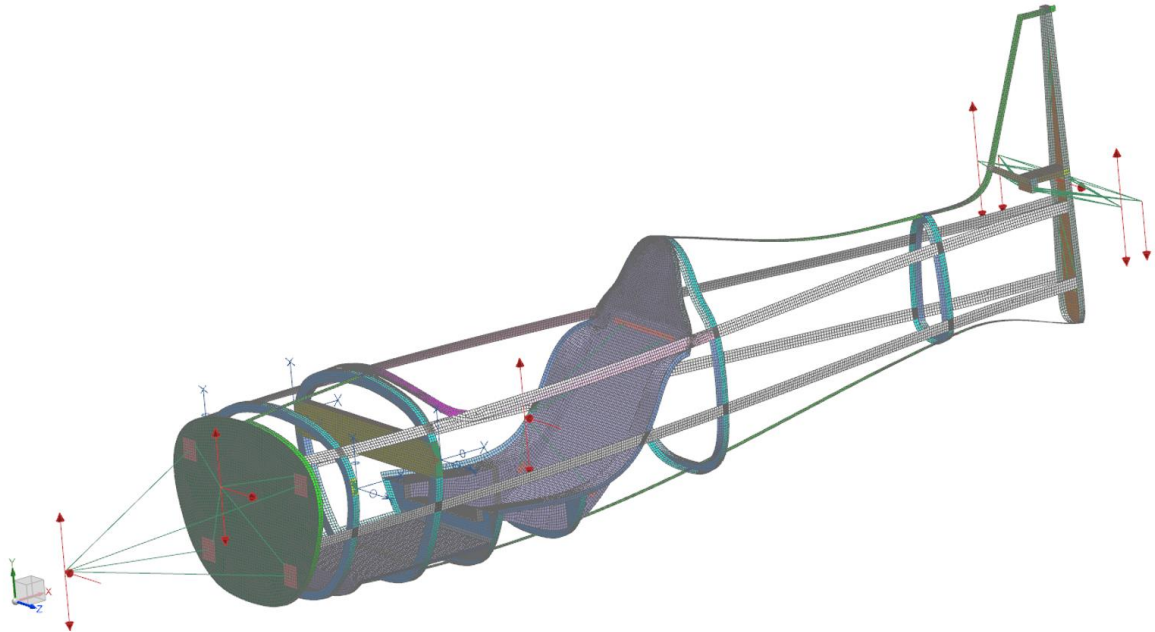
V tab. 45 jsou uvedena jednotlivá vrstvení přesně tak, jak jsou vytvořena a přiřazena v Nastranu. Pojmenování v kolonce vrstvení vychází z počátečního písmena zvoleného materiálu společně s úhlem kladení.

*Tabulka 45 - Vrstvení laminátů a poloha na síti*

Název	Barva	Vrstvení	Tloušťka [mm]
Potah	Tmavě zelená	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub>	3,25
Spojení potahů	Zelená	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , 3xT <sub>45</sub>	3,5
Protipožární přepážka	Tmavě zelená	2xT <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , 2xT <sub>45</sub>	10,5
Potah + Podélník	Bílá	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub> , U <sub>0</sub>	3,4
Potah + Podélník + Přepážka/Sedačka	Tmavě šedá	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub> , U <sub>0</sub> , 2xG <sub>45</sub>	3,8
Potah + Podélník + Rám	Růžová	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub> , U <sub>0</sub> , T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub>	6,65
Potah + Rám	Magenta	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , 2xT <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub>	6,5
Podlaha/Sedačka	Fialová	G <sub>45</sub> , R <sub>0</sub> , G <sub>45</sub>	3,4
Potah + Podlaha/Sedačka	Černá	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub> , 2xG <sub>45</sub>	3,65
Přepážka + Podlaha/Sedačka	Světle šedá	3xG <sub>45</sub> , R <sub>0</sub> , G <sub>45</sub>	3,8
Přepážka	Světle modrá	2xG <sub>45</sub>	0,4
Přepážka, sendvič	Tmavě modrá	G <sub>45</sub> , R <sub>0</sub> , G <sub>45</sub>	3,4
Potah + Přepážka	Cyan	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub> , 2xG <sub>45</sub>	3,65
Podlaha + Sedačka	Světle fialová	G <sub>45</sub> , R <sub>0</sub> , 3xG <sub>45</sub>	3,8
Skříň, pásnice	Světle zelená	2xU <sub>0</sub>	0,3
Skříň, stojina	Světle žlutá	2xG <sub>45</sub>	0,4
<b>Ocasní</b>			
Žebro	Hnědá	2xG <sub>45</sub>	0,4
Potah + Žebro	Světle hnědá	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub> , 2xG <sub>45</sub>	3,65
Potah + SOP/VOP, pásnice	Šedá	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub> , 2xU <sub>0</sub>	3,55
Žebro + VOP + Žebro	Indigo	6xG <sub>45</sub>	1,2
VOP, stojina	Oranžová	G <sub>45</sub> , P <sub>0</sub> , G <sub>45</sub>	3,4
Potah + SOP/VOP, pásnice + Žebro	Světle modrá	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub> , 2xU <sub>0</sub> , 2xG <sub>45</sub>	3,95
SOP, stojina	Oranžová	2xG <sub>45</sub>	0,4
SOP, stojina + Žebro	Tmavě hnědá	4xG <sub>45</sub>	0,8
<b>Spoje</b>			
Potah + Potah + SOP, pásnice	Tmavě fialová	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , 3xT <sub>45</sub> , 2xU <sub>0</sub>	3,8
Potah + Potah + Žebro	Tmavě červená	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , 3xT <sub>45</sub> , 2xG <sub>45</sub>	3,9
Potah + Potah + Podlaha/Sedačka	Světle červená	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , 3xT <sub>45</sub> , 2xG <sub>45</sub>	3,9
Potah + Potah + Rám	Červená	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , 4xT <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub>	6,75
Potah + Potah + Přepážka	Modrá	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , 3xT <sub>45</sub> , 2xG <sub>45</sub>	3,9
<b>Inzerty</b>			
Sedačka + Překližka	Žlutá	G <sub>45</sub> , P <sub>0</sub> , G <sub>45</sub>	3,4
SOP + Překližka	Žlutá	G <sub>45</sub> , P <sub>0</sub> , G <sub>45</sub>	3,4
Pásnice + Překližka	Žlutá	U <sub>0</sub> , P <sub>0</sub> , U <sub>0</sub>	3,3
Protipožární přepážka + Překližka	Žlutá	2xT <sub>45</sub> , P <sub>0</sub> , 2xT <sub>45</sub>	10,5
Potah + Překližka + Přepážka	Žlutá	T <sub>45</sub> , A <sub>0</sub> , T <sub>45</sub> , G <sub>45</sub> , P <sub>0</sub> , G <sub>45</sub>	6,65

## 5.4 Zatížení a okrajové podmínky

Finálním krokem k provedení výpočtu je přiřazení okrajových podmínek a definice zatížení pro jednotlivé případy v simulačním souboru.



Obrázek 40 - Model s přiřazenými silami a okrajovými podmínkami

Na obr. 40 je znázorněn již finální MKP model se zatížením a okrajovými podmínkami připravený pro výpočet. Na obrázku je pro zpřehlednění odejmut potah a znázorněny síly pro všechny letové případy. Síly od motoru společně se sběrnou nádržkou jsou pomocí 1D RBE2 elementů rozvedeny do překližkových inzertů v protipožární přepážce. Okrajové podmínky jsou definovány ve středu čepů mezi závěsy a je vždy nechán jeden stupeň volnosti pro každý čep, podle své osy otáčení. S konstrukcí trupu jsou spojeny v místě překližkových inzertů v přepážkách pomocí stejných elementů jako u motoru a nádržky. Zatížení od pilota je přeneseno 1D RBE3 elementy do překližkových inzertů v sedačce v místě uchycení břišních a ramenních pásů. Síly od VOP a SOP jsou přeneseny z působíště do konstrukce pomocí 1D RBE3 elementů, a to do míst jejich závěsů (překližkových inzertů) na nosníku VOP a nosníku SOP.

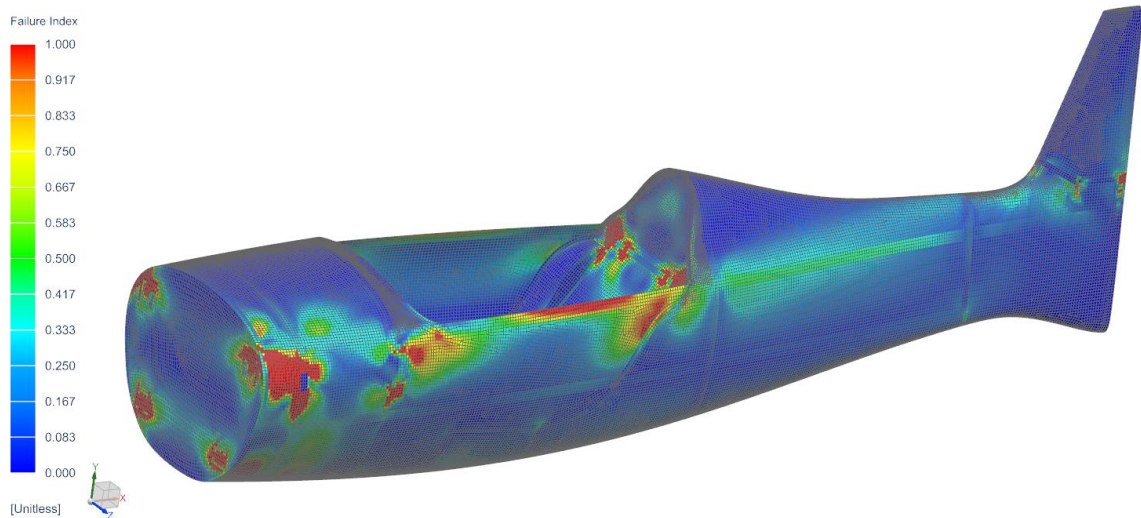
Předposledním krokem je dovyvážení trupu hmotností, která je rozpuštěna do potahu a podlahy tak, aby těžiště tohoto modelu trupu korespondovalo s těžištěm trupu s hmotami, které se ve výpočtu neuvažují. Nakonec je hmotě v modelu dodáno translační a rotační zrychlení podle jejich jednotlivých případů. Jakmile jsou všechny tyto dílčí úkoly dokončeny, tak je možno spustit řešení SOL 101 – statický lineární výpočet s globálními okrajovými podmínkami.

## 5.5 Výsledky pevnostní analýzy

V následujících podkapitolách je popis porušení konstrukce při přenosu početního zatížení. Řešič umožňuje vykreslit bezrozměrný index porušení pro každou jednotlivou laminu. Jak již bylo řečeno v předchozí podkapitole, pro index porušení bylo použito Hoffmanovo kritérium. Pokud se index tohoto kritéria nachází v mezích hodnot (0,1), tak nenastala laminární porucha a lamina vyhovuje. Pokud je index větší, tak je potřeba přistoupit k úpravě konstrukce k bezpečnému přenosu



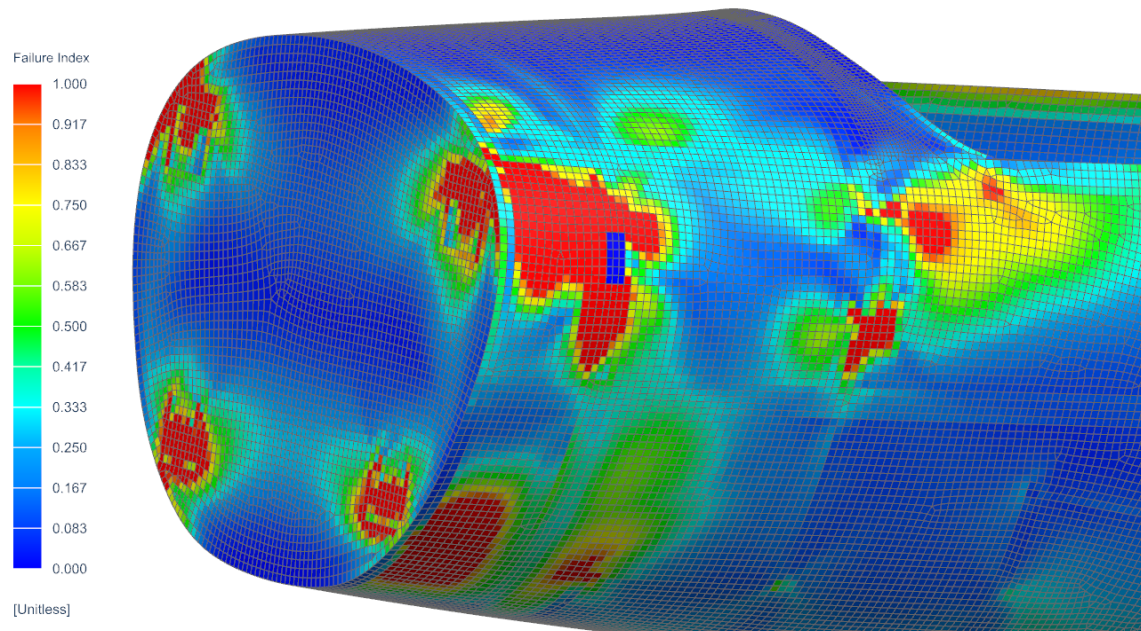
zatížení. Na obr. 41 je vykreslena obálka indexů porušení přes všechny laminy a pro všech 8 kontrolních zatěžujících případů.



Obrázek 41 - Obálka indexů porušení pro všechny zatěžující případy

### 5.5.1 Oblast přední části trupu

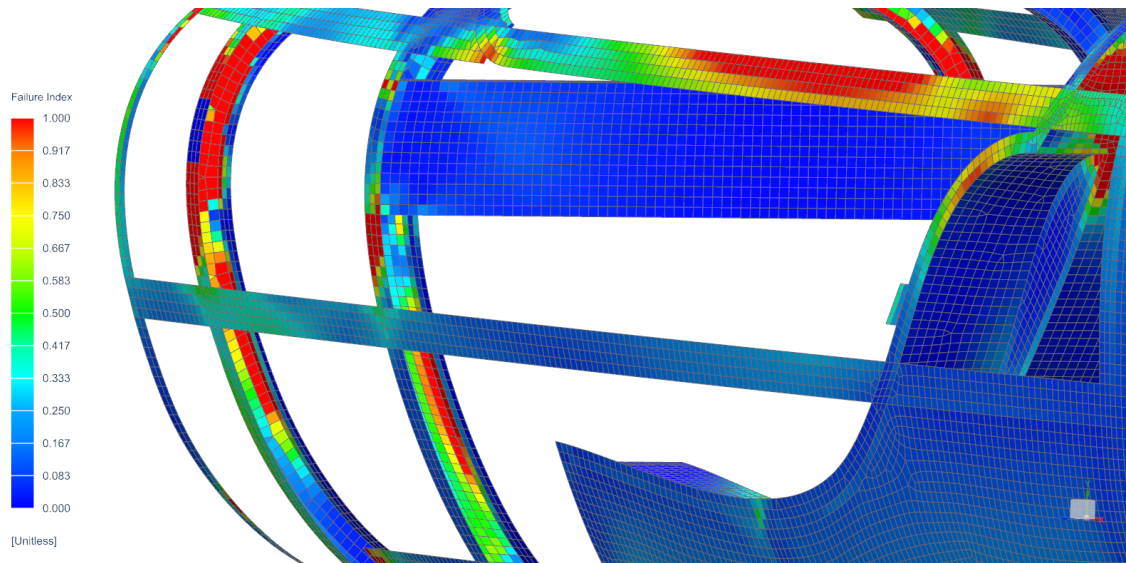
V oblasti přední části trupu, která je vidět na obr. 42, lze na konstrukci vidět, že selhává hned na několika místech. Toto místo je nejvíce namáhané, a to díky kombinaci uchycení motorového lože a předního a zadního závěsu křídla poměrně blízko sebe. Nejprve zde selhává protipožární přepážka. Index porušení zde sahá do hodnot 4,5. V oblasti předního závěsu křídla a potahu v blízkosti protipožární přepážky index dosahuje čísla 6,6. U zadního závěsu také dochází k porušení konstrukce a dále roznášení zatížení a poruch do prostřední části trupu.



Obrázek 42 - Indexy porušení v přední části trupu

Na obr. 43 lze vidět přepážku č.1 a přepážku č.2 s vypnutým zobrazením potahu. U přepážky č.1 nastává porucha ve všech třech vrstvách kompozitu – v obou tkaninách i pěnovém jádře –

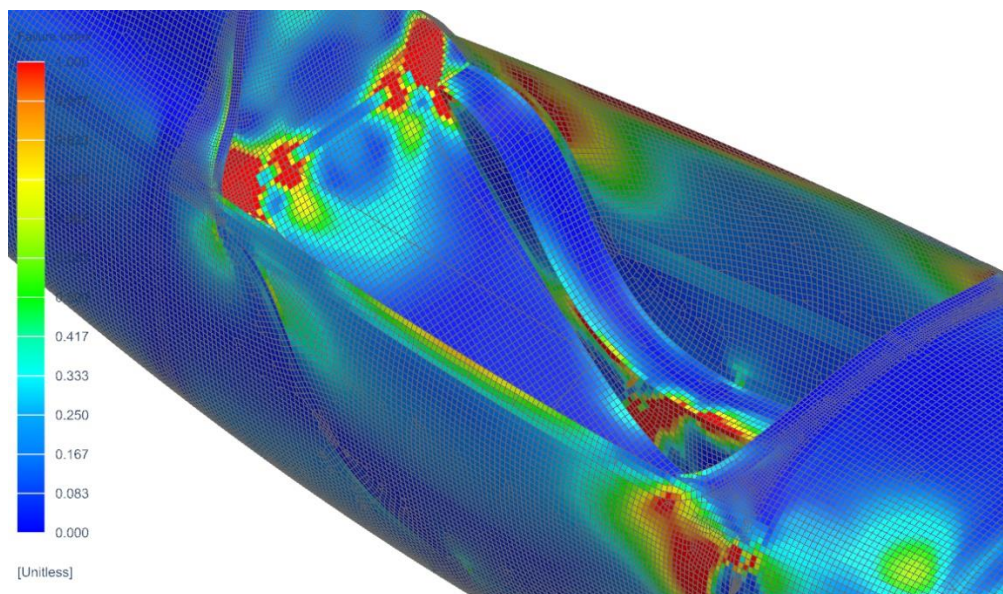
s maximálním indexem porušení 16,2. U přepážky č.2 dochází k porušení pouze v obou tkaninách s indexem 1,2.



Obrázek 43 - Indexy porušení u přepážky č.1 a přepážky č.2

### 5.5.2 Oblast prostřední části trupu

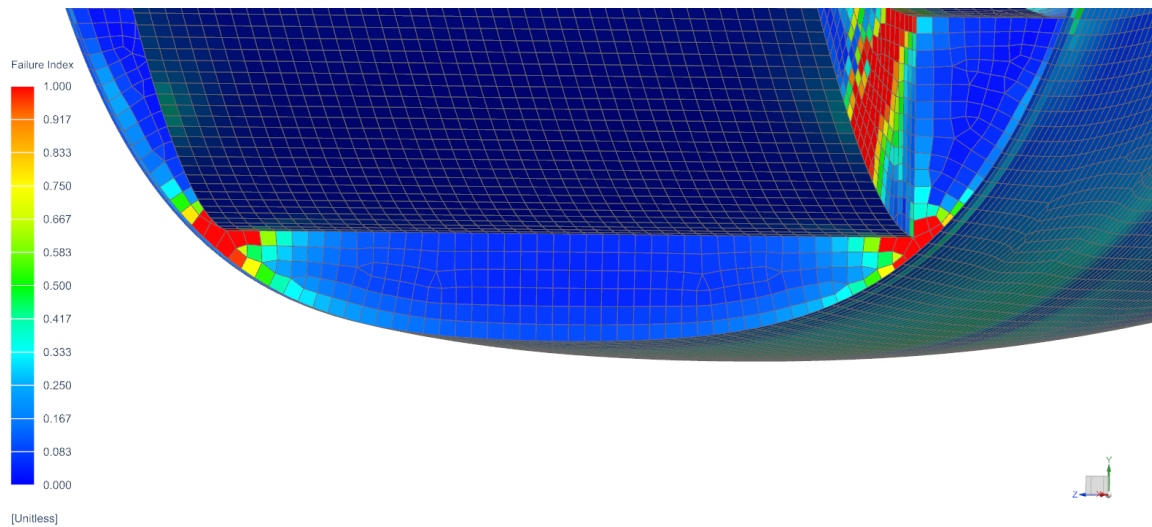
V oblasti prostřední části trupu (zobrazené na obr. 44) se vyskytuje pět kritických míst konstrukce. Prvním místem je vrchní uchycení ramenních bezpečnostních pásů s indexem porušení 4,6 a druhým uchycení břišních pásů s indexem porušení 4. U obou případů primárně selhávají obě vrstvy tkaniny použité na sedačce. Dalším místem je potah mezi podélníky, sedačkou a zadním závěsem křídla. Zde vzniká porucha v obou tkaninách sendviče – v blízkosti sedačky s indexem 1,65, u místa zadního závěsu křídla s indexem 1,2. Následujícím místem je podélník, který je pod rámem kabiny. Selhává zde jak tkanina ve skořepině, tak i v rámu, a to s maximálním indexem porušení 1,48.



Obrázek 44 - Indexy porušení v prostřední části trupu



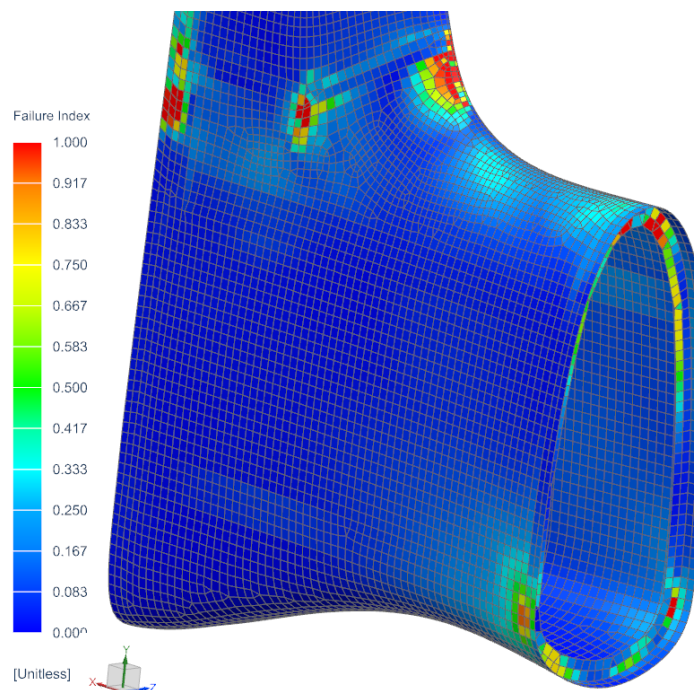
Posledním místem je přepážka pod pilotovou sedačkou – přepážka č.4, která je znázorněna na obr. 45. Maximální index poruchy nabývá hodnoty 7,6 a to v nejužším místě styku se sedačkou.



Obrázek 45 - Indexy porušení u přepážky č.4

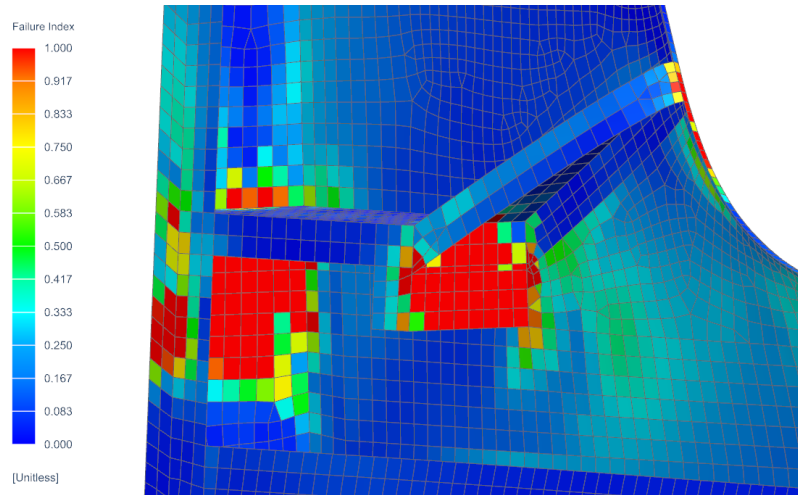
### 5.5.3 Oblast zadní části trupu a ocasních ploch

Nejviditelnějším kritickým místem konstrukce je přepážka č.6 (obr. 46) s maximálním indexem porušení 1,5. Zatížení nejsou schopny přenášet obě tkaniny vyskytující se v přepážce. Dalším místem je oblast potahu pod zalomeným žebrem v blízkosti slepení obou polovin trupu, kde také selhávají obě tkaniny. Index zde dosahuje hodnoty 5,9.



Obrázek 46 - Indexy porušení v oblasti zadní části trupu a ocasních ploch

Posledním místem celé konstrukce (obr. 47), které selhává, je oblast závěsů stabilizátoru na nosníku VOP, kde index nabývá hodnot 14,4 a nosníku SOP, kde nabývá čísla 11,5. Porušení nastává v každé vrstvě jednotlivých celků.



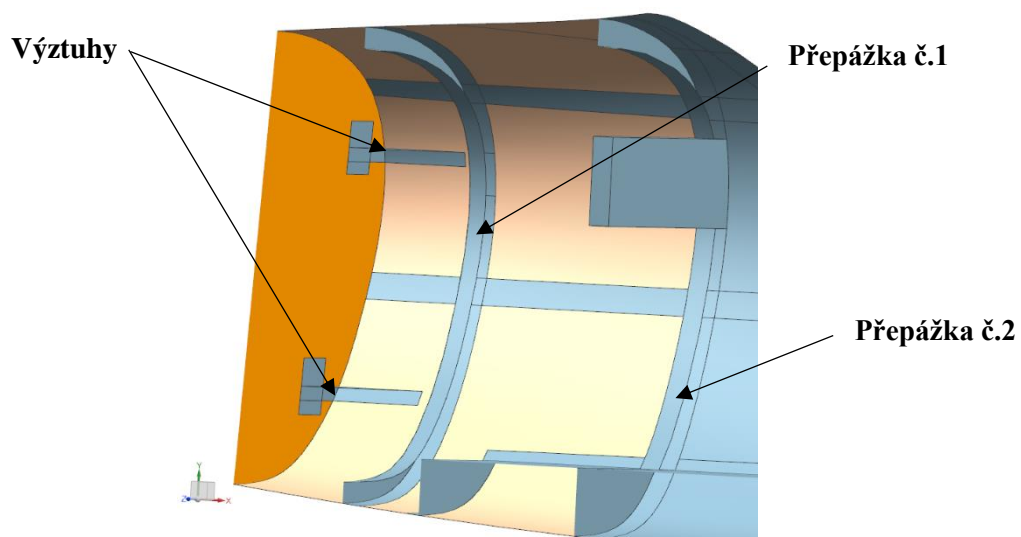
Obrázek 47 - Indexy porušení u nosníku VOP a nosníku SOP

## 5.6 Návrh úpravy konstrukce

V závislosti na předchozí analýze konstrukce je přistoupeno k postupné úpravě jednotlivých kritických oblastí ve snaze snížit hodnotu indexu porušení lamin na přijatelnou mez. Jednotlivé úpravy jsou popsány níže.

### 5.6.1 Úprava oblasti přední části trupu

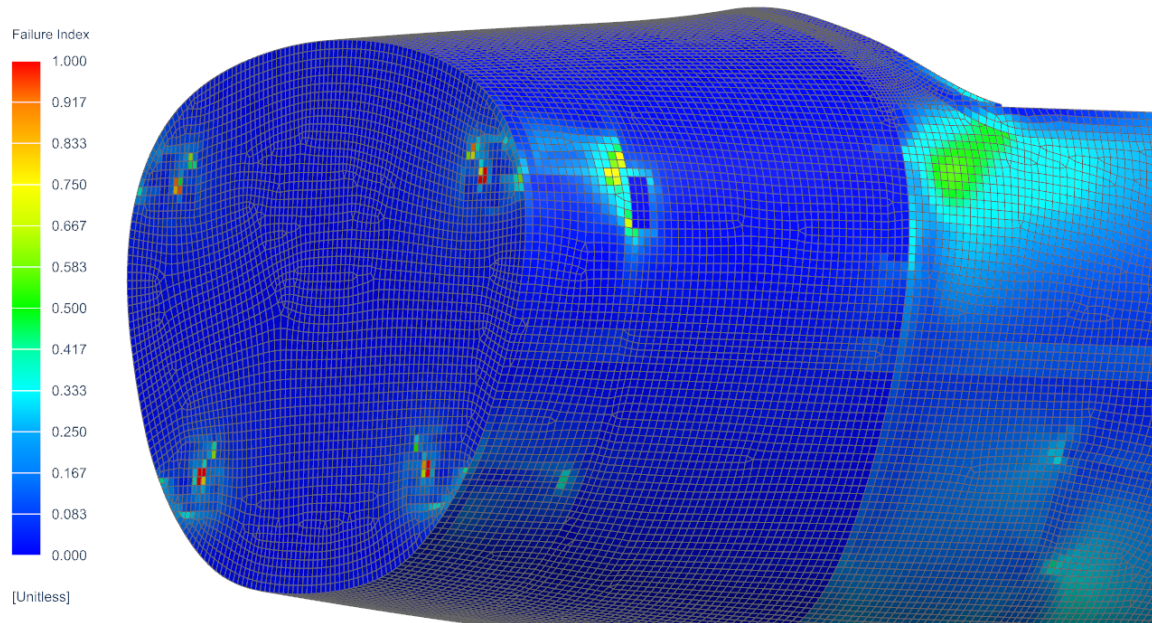
V oblasti přední části trupu bylo přistoupeno k úpravě protipožární přepážky (na obr. 48 oranžově). Její vrstvení bylo změněno (podle stejného principu jako v tab. 45) na (T<sub>45</sub>, T<sub>0</sub>, T<sub>45</sub>, T<sub>0</sub>, A<sub>0</sub>, T<sub>0</sub>, T<sub>45</sub>, T<sub>0</sub>, T<sub>45</sub>). Tloušťka jádra z pěny a překližkového insertu byly změněny na 10 mm. Další změnou bylo přidání čtyřech výztuh mezi protipožární přepážkou, potahem a přepážkou č.1. Jejich skladba je (GG<sub>45</sub>, GG<sub>45</sub>, GG<sub>45</sub>, GG<sub>0</sub>, GG<sub>45</sub>, GG<sub>0</sub>, GG<sub>45</sub>, GG<sub>0</sub>, R<sub>0</sub>, GG<sub>0</sub>, GG<sub>45</sub>) s jádrem o tloušťce 10 mm. Potah v přední části (na obr. 48 světle oranžově) byl také změněn a jeho skladba je (T<sub>45</sub>, T<sub>0</sub>, T<sub>45</sub>, T<sub>0</sub>, T<sub>45</sub>, T<sub>0</sub>, T<sub>45</sub>, T<sub>0</sub>, T<sub>45</sub>, T<sub>0</sub>, A<sub>0</sub>, T<sub>0</sub>, T<sub>45</sub>) s jádrem o tloušťce 10 mm.



Obrázek 48 - Výztuhy a úpravy v přední části trupu (pohled v řezu)

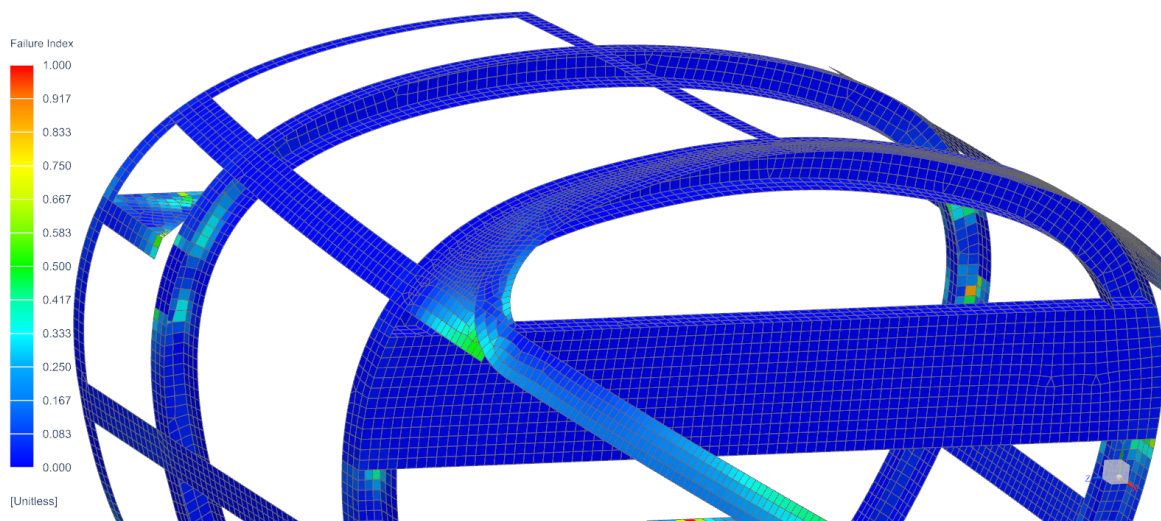
Na obr. 49 lze vidět indexy porušení v upravené přední části trupu. Díky úpravám byl index zredukován na maximální hodnotu 0,83. Index poruchy je větší než 1 akorát v případě překližkového insertu, ale to je zapříčiněno spojením motoru přes RBE2 element pouze do jednoho bodu.





Obrázek 49 - Indexy porušení v přední části upraveného trupu

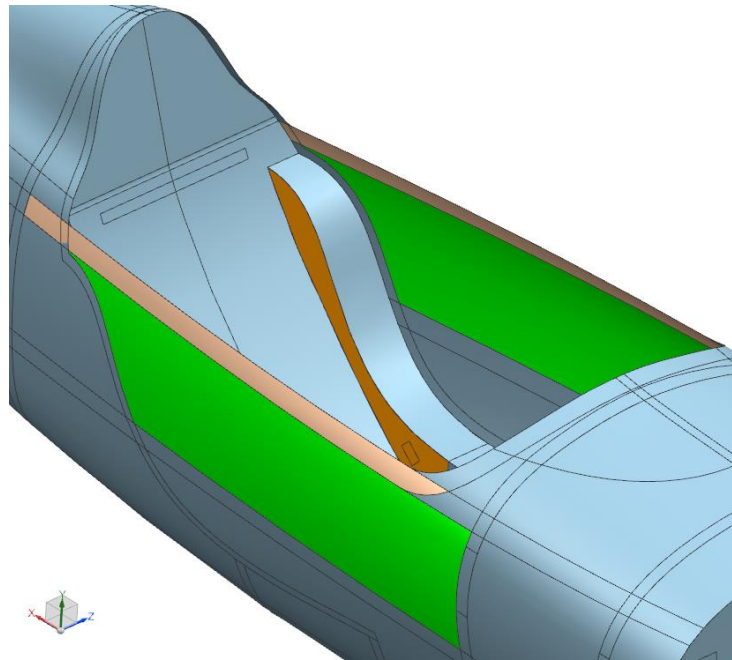
Další úpravou prošly přepážky č.1 a č.2 z obr. 48. V případě přepážky č.1 bylo zvětšeno jádro na tloušťku 10 mm a přidání dalších čtyřech lamin prepregu GG160 pod úhlem  $45^\circ$  z každé strany jádra. V případě přepážky č.2 je jedinou úpravou přidání pouze jedné laminy stejného prepregu pod stejným úhlem z každé strany jádra jako v případě přepážky č.1. Tato úprava redukuje maximální index u přepážky č.1 na hodnotu 0,84 a u přepážky č.2 na číslo 0,62, jak lze vidět na obr. 50.



Obrázek 50 - Indexy porušení u upravené přepážky č.1 a přepážky č.2

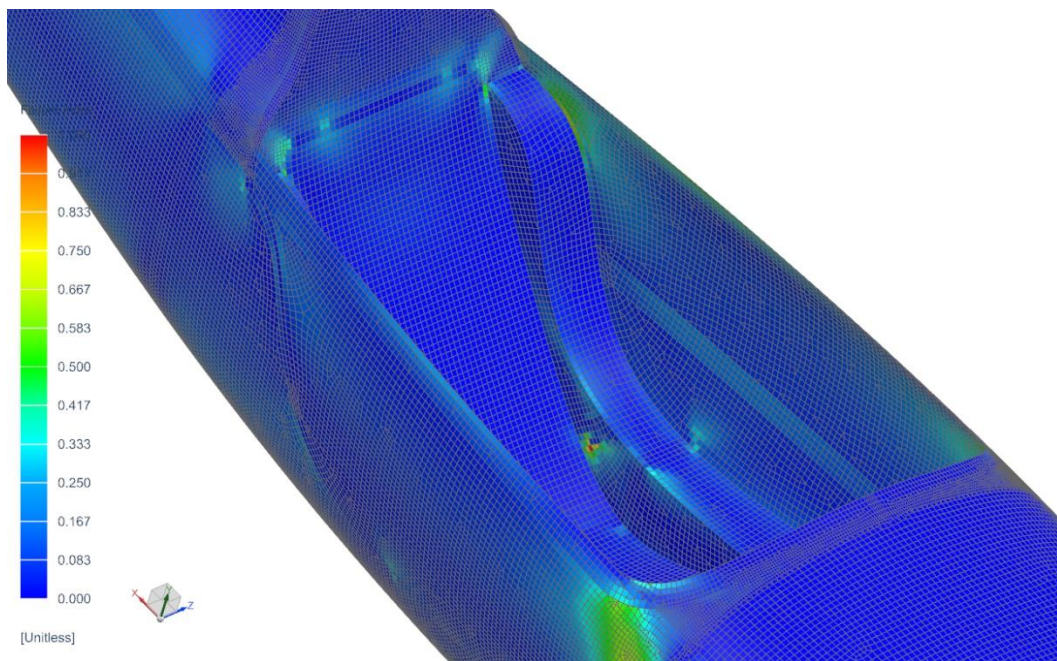
### 5.6.2 Úprava oblasti prostřední části trupu

V oblasti prostřední části trupu byla upravena sedačka, u které byla tloušťka jádra zvětšena na 6 mm a přidán jeden prepreg GG160 pod úhlem  $45^\circ$  z každé strany. Zároveň jsou tloušťky překližkových insertů zvětšeny na 10 mm. Na boku sedačky byl ještě navíc použit navíc navrch jeden prepreg GG160 pod úhlem  $45^\circ$  (na obr. 51 je jeho poloha oranžově). Další úpravou bylo přidání dvou prepregů UTS150 pod rám kabiny (na obr. 51 světle oranžově) pod úhlem  $0^\circ$ . Na vnitřní stranu potahu (na obr. 51 zeleně) pak byla přidána jedna tkanina Textreme1000 pod úhlem  $45^\circ$ .



Obrázek 51 – Úpravy v prostřední části trupu

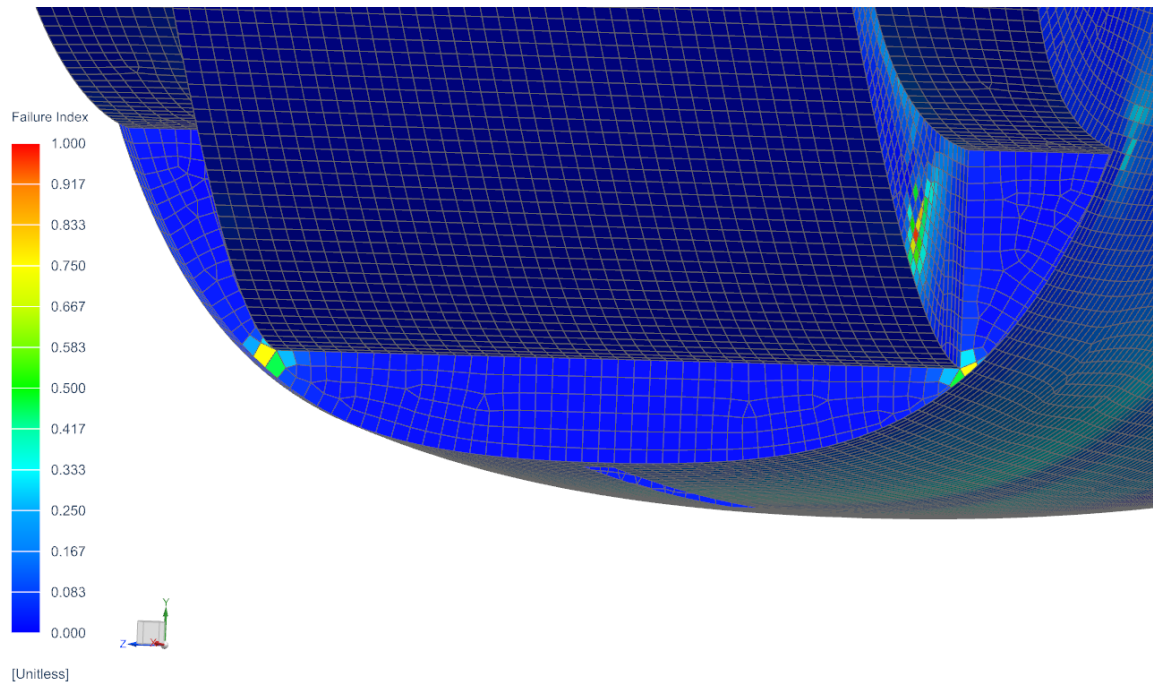
Na obr. 52 je poté možno vidět jednotlivé indexy porušení pro upravený model. U upnutí ramenních pásů byl index zredukován na maximální hodnotu 0,48. U překližkového insertu břišních pásů je maximální index 0,98. V případě rámu kabiny je nejvyšší hodnota indexu 0,45. Vyztužený potah má poté maximální hodnotu 0,65 lokalizovanou u spojení se sedačkou.



Obrázek 52 – Indexy porušení u upravené prostřední oblasti trupu

Poslední úpravou v této části trupu je vyztužení přepážky č.4. Bylo zvětšeno jádro na hodnotu 10 mm a z každé strany přidány další tři tkaniny GG160 pod úhlem 45°. Tato úprava redukuje maximální index poruchy na číslo 0,74, jak lze vidět na obr. 53.

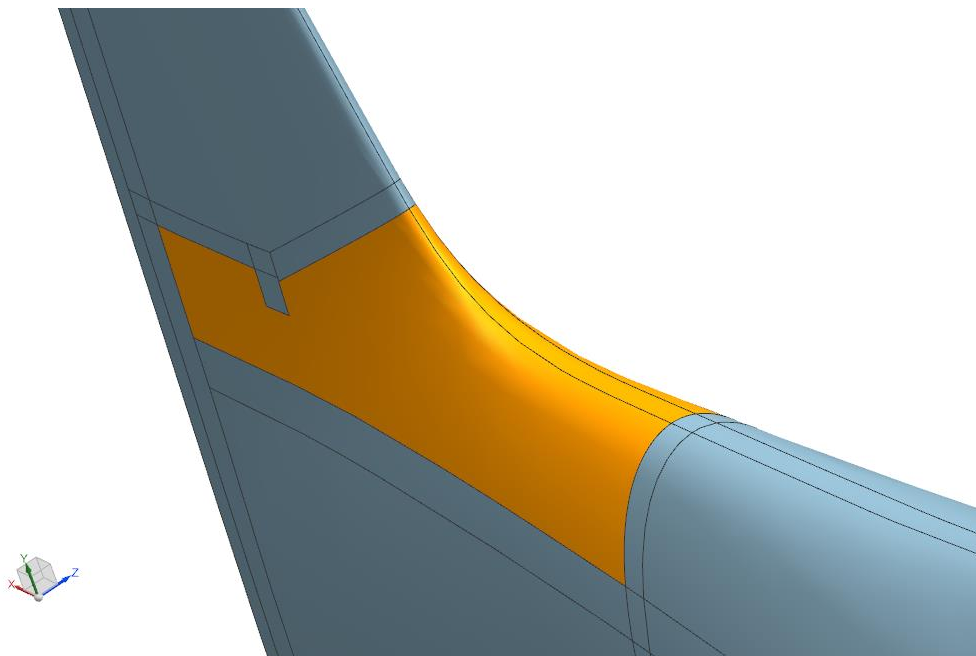




Obrázek 53 - Indexy porušení u upravené přepážky č.4

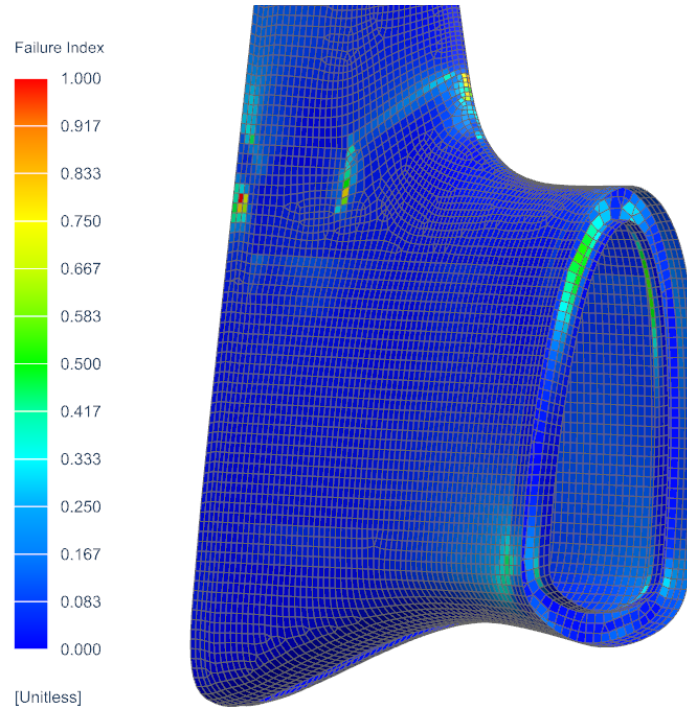
### 5.6.3 Úprava oblasti zadní části trupu a ocasních ploch

V této oblasti byla první změnou skladba přepážky č. 6. Tloušťka pěny v jádře zůstala nezměněna, ale z každé jeho strany byly přidány další dvě tkaniny GG160 pod úhlem  $45^\circ$ . Další úpravou prošel potah v zadní části. Na vnitřní stranu potahu (na obr.54 oranžově) byly přidány dvě tkaniny Textreme1000, jedna pod úhlem  $45^\circ$ , druhá pod úhlem  $0^\circ$ .



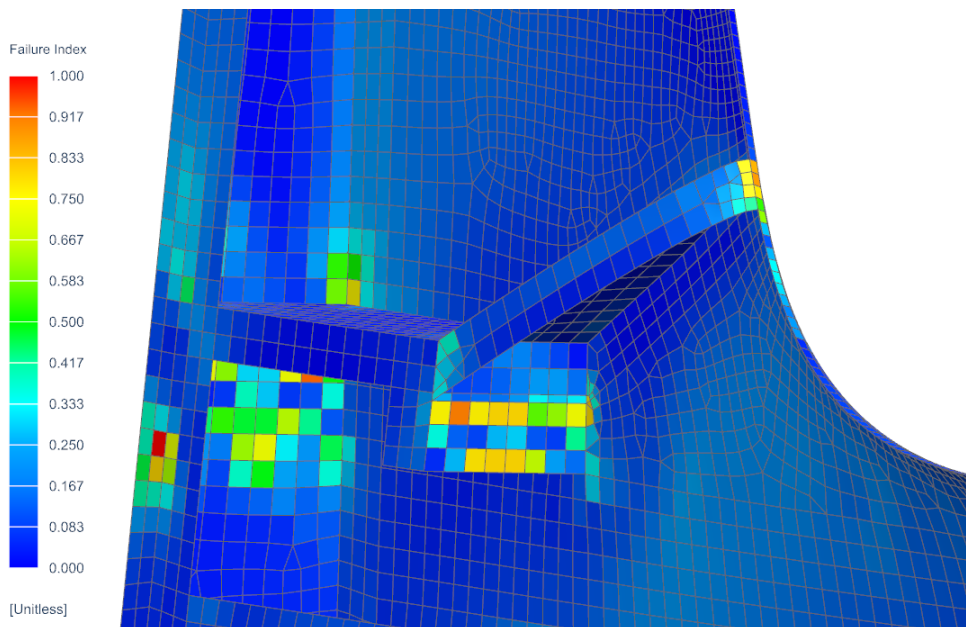
Obrázek 54 - Úpravy v zadní části trupu

Výsledky vyztuženého modelu lze vidět na obr. 55. U přepážky byl maximální index snížen na hodnotu 0,55. V druhé kritické oblasti u žebra byl nejvyšší index zredukován na hodnotu 0,9.



Obrázek 55 - Indexy porušení v upravené oblasti zadní části trupu a ocasních ploch

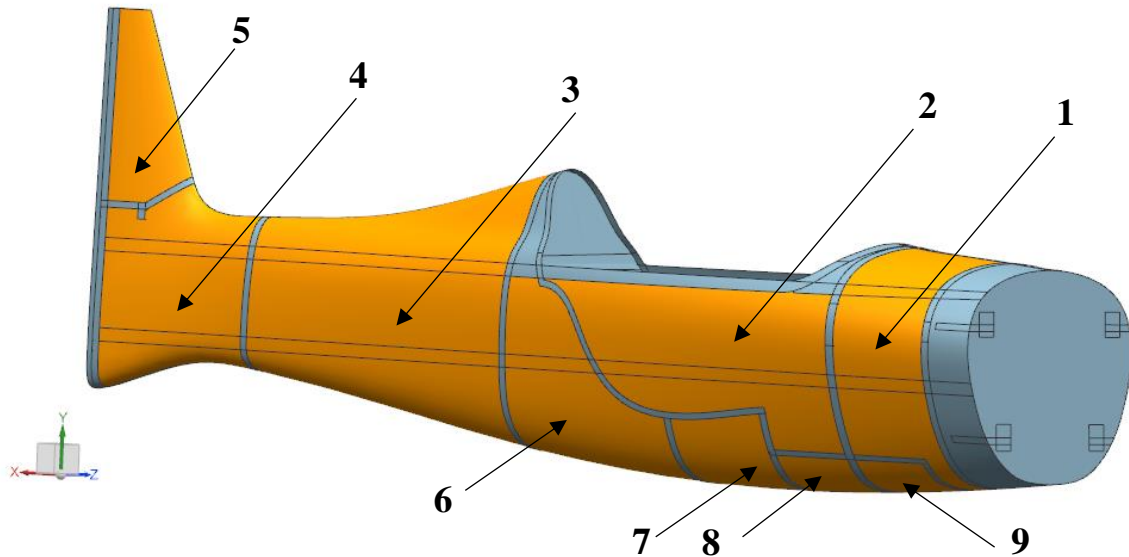
Předposlední úpravou je změna skladby stojiny nosníku VOP, ke kterému je uchycen stabilizátor. Celá stojina je nyní tvořena 15 mm překližkou, a navíc byly přidány další dvě tkaniny GG160 pod úhlem  $45^\circ$  na vnější stranu nosníku. Stejná úprava je provedena v místě překližkového inzertu závěsu stabilizátoru na nosníku SOP. Na obr. 56 jsou zobrazeny výsledky po úpravě. Na nosníku VOP byl maximální index poruchy snížen na 0,91 a u nosníku SOP na 0,96.



Obrázek 56 - Indexy porušení u upraveného nosníku VOP a nosníku SOP

## 5.7 Kontrola na ztrátu stability

Kontrola na ztrátu stability je provedena dle postupu uvedeného v literatuře [16]. V rámci zjednodušení není uvažována křivost sendvičových panelů, ale berou se jako rovné, což je z hlediska výsledků na bezpečné straně. Jednotlivé panely jsou oranžově zvýrazněné a očíslované na obr. č. 57.



Obrázek 57 - Znázorněné a očíslované panely kontrolované na ztrátu stability

Ztráta stability nastane, pokud v panelu dojde k překročení kritického napětí. Výpočet kritického napětí je pro názornost uveden na příkladu panelu č.3. Rozměry panelů byly odečteny v programu Siemens NX 12.

Pro smýkané panely platí

$$\tau_k = \kappa \cdot k_\tau \cdot E_{w_\tau} \cdot \left(\frac{d}{b}\right)^2 = 3 \cdot 11 \cdot 57\,695 \cdot \left(\frac{3,125}{828,5}\right)^2 = 27,1 \text{ MPa} \quad (5.1)$$

Kde

$\kappa$  Koeficient zohledňující rozdílný modul pružnosti a tloušťku vnějších vrstev sendviče (odečteno z obr. 4.41 z [16])

$k_\tau$  Koeficient součinitele vzpěru, který zohledňuje způsob uložení a rozměry panelu (odečteno z obr. 4.42 z [16])

$E_{w_\tau}$  Efektivní modul pružnosti sendvičového panelu

$\frac{d}{b}$  Poměr tloušťky kompozitu ku kratšímu rozměru panelu

Pro tlačené panely je postup analogický, akorát se mění koeficient součinitele vzpěru, který se odečítá pro tlačené panely dle obr. 4.43 z [16] v závislosti na typu namáhání.

$$\sigma_{k_x} = \kappa \cdot k_{\sigma_x} \cdot E_{w_{\sigma_x}} \cdot \left(\frac{d}{b}\right)^2 = 3 \cdot 8 \cdot 14\,803 \cdot \left(\frac{3,125}{828,5}\right)^2 = 5,05 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

Výsledné kritické napětí ve smyku, tlaku ve směru X a tlaku v směru Y, popřípadě Z, jsou uvedeny v tab. 46 společně s rozměry každého panelu.

*Tabulka 46 - Kritické napětí v jednotlivých panelech pro jednotlivé směry*

Panel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a [mm]	670	1 169	1090	576,5	573,5	670	406	315	285
b [mm]	359	505	828,5	542	273	579	345	291	241
d [mm]	10,75	3,125	3,125	3,125	3,125	3,125	3,125	3,125	10,75
b/a [-]	0,54	0,43	0,76	0,94	0,48	0,86	0,85	0,92	0,85
$\kappa$ [-]	1,65	3	3	3	3	3	3	3	1,65
Smyk									
$k_{\tau}$ [-]	9,5	9,1	11	12,4	9,25	11,7	11,6	12,3	11,6
$E_{w_{\tau}}$ [MPa]	57 695	57 695	57 695	57 695	57 695	57 695	57 695	57 695	57 695
$\tau_k$ [MPa]	810,9	60,3	27,1	71,3	209,8	59	164,7	245,5	2197,2
Tlak ve směru X									
$k_{\sigma_X}$ [-]	4,75	6,9	8	8,8	4,4	8,7	7	8,8	7
$E_{w_X}$ [MPa]	57 695	57 695	14 803	14 803	14 803	14 803	14 803	14 803	57 695
$\sigma_{k_X}$ [MPa]	405,46	45,73	5,05	12,99	25,6	11,25	25,51	45,07	1325,88
Tlak ve směru Y, popřípadě Z									
$k_{\sigma_{Y/Z}}$ [-]	7,3	4,2	6	8	7	7,1	8,6	8	8,6
$E_{w_{Y/Z}}$ [MPa]	57 695	57 695	14 803	14 803	14 803	14 803	14 803	14 803	57 695
$\sigma_{k_{Y/Z}}$ [MPa]	623,12	27,84	3,79	11,81	40,73	9,18	31,34	40,97	1628,93

Pro potřeby kontroly ztráty stability je potřeba znát napětí v jednotlivých panelech. Toto průměrné napětí bylo pro jednotlivé případy zatížení a jednotlivé směry odečteno v programu Siemens NX 12. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 47 až 49.

*Tabulka 47 - Průměrné smykové napětí v panelech*

Průměrné smykové napětí $\tau$ [MPa]									
Panel Případ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-4	5,96	3,81	3,94	3,71	0,14	5,25	0,86	7,13	1,71
2-5	3,02	9,48	5,65	8,38	0,18	7,09	9,89	3,26	1,44
2-2	1,33	30,32	0,9	2,86	0,06	1,25	17,94	4,71	0,84
3-8	5,4	17,49	4,6	6,3	0,88	4,21	6,13	12,04	5,55
4-9	3,26	7,67	7,48	14,09	0,77	6,43	10,16	2,08	1,1
1-1	3,03	18,39	0,49	1,79	0,09	0,98	11,28	4,14	0,66
3-3	5,09	4,13	4,74	5,52	0,15	4,82	1,58	5,46	1,26
4-3	2,98	13,52	3,63	4,53	0,11	3,32	5,15	5,06	0,79
<b>Max</b>	5,96	30,32	7,48	14,09	0,88	7,09	17,94	12,04	5,55

*Tabulka 48 - Průměrné tlakové napětí ve směru X v panelech*

Průměrné tlakové napětí ve směru X $\sigma_X$ [MPa]									
Panel Případ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-4	1,68	7,87	-3,03	9,43	-0,23	-17,76	-22,53	-16,49	-0,14
2-5	1,97	16,34	-4,34	17,92	0,29	-26,87	-46,48	-55,2	-10,17
2-2	1,34	6,21	0,98	-4,95	0,43	3,68	-20,89	-44,8	-11,24
3-8	-5,01	-31,21	-17,19	-26,25	1,53	9,63	9,78	6,28	-3,65
4-9	-0,64	-4,3	-19,17	-15,9	1,33	-33,14	-47,71	-50,78	-9,33
1-1	0,41	4,44	0,81	-0,63	-0,02	2,66	-13,05	-28,36	-8,27
3-3	1,59	9,69	-3,37	3,49	-0,23	-22,03	-28,49	-26,33	-2,5
4-3	0,49	4,97	-2,64	2,79	-0,17	-16,87	-13,18	-3,81	1,57
<b>Min</b>	-5,01	-31,21	-19,17	-26,25	-0,23	-33,14	-47,71	-55,2	-11,24

*Tabulka 49 - Průměrné tlakové napětí ve směru Y, popřípadě Z, v panelech*

Průměrné tlakové napětí ve směru Y $\sigma_Y$ , popřípadě Z $\sigma_Z$ [MPa]									
Panel Případ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-4	0,52	1,31	-0,43	-2,21	0,05	0,36	-1,14	-1,05	1,62
2-5	0,61	3,59	-2,22	-2,24	-0,03	0,81	-2	-5,93	0,81
2-2	0,98	5,29	0,14	1,4	-0,4	0,7	1,96	-4,07	2
3-8	0,27	-1,06	-0,92	-12,48	-17,12	-1,15	2,42	1,41	2,7
4-9	0,66	1,89	-1,55	-1,32	-11,57	0,3	-1,87	-5,13	0,78
1-1	0,63	3,01	0,16	0,48	-0,49	0,41	1,51	-2,22	1,82
3-3	0,19	1,27	-0,47	-1,33	0,93	0,42	-2,35	-3,16	-0,31
4-3	-0,21	-0,97	-0,29	-1,09	0,81	0,06	-2,29	-0,87	-0,44
<b>Min</b>	-0,21	-1,06	-2,22	-12,48	-17,12	-1,15	-2,35	-5,93	-0,44

Z napětí v predešlých tabulkách bylo vybráno maximální smykové a maximální tlakové napětí v jednotlivých panelech. Tyto napětí byly porovnány s kritickým napětím a dále stanovena jistota jednotlivých panelů podle níže uvedených vzorců. Výsledné hodnoty jsou zapsány v tab. 50.

$$j_{\tau} = \frac{\tau_k}{\tau} \quad (5.3)$$

$$j_X = \frac{\sigma_{kX}}{\sigma_X} \quad (5.4)$$

$$j_{Y/Z} = \frac{\sigma_{kY/Z}}{\sigma_{Y/Z}} \quad (5.5)$$

*Tabulka 50 - Výsledné jistoty jednotlivých panelů*

Panel	Napětí [MPa]			Kritické napětí [MPa]			Jistota [-]		
	$\sigma_X$	$\tau$	$\sigma_{Y/Z}$	$\sigma_{kX}$	$\tau_k$	$\sigma_{kY/Z}$	$j_X$	$j_\tau$	$j_{Y/Z}$
1	5,01	5,96	0,21	405,46	810,91	623,12	80,93	136,06	2 981,44
2	31,21	30,32	1,06	45,73	60,31	27,84	1,47	1,99	26,26
3	19,17	7,48	2,22	5,05	27,09	3,79	0,26	3,62	1,71
4	26,25	14,09	12,48	12,99	71,35	11,81	0,49	5,07	0,95
5	0,23	0,88	17,12	25,6	209,79	40,73	111,32	238,39	2,38
6	33,14	7,09	1,15	11,25	58,99	9,18	0,34	8,33	8,02
7	47,71	17,94	2,35	25,51	164,73	31,34	0,53	9,18	13,33
8	55,2	12,04	5,93	45,07	245,52	40,97	0,82	20,39	6,91
9	11,24	5,55	0,44	1 325,88	2 197,17	1 628,93	117,96	395,89	3 668,77

Z hodnot vyplývá, že panely 3,4,6,7,8 ztrácí stabilitu ve směru X a panel 4 zároveň i ve směru Y (zmiňené případy jsou v tab. 50 zvýrazněny červeně). V tab. 51 je navržena úprava použitím větší tloušťky pěny (přídavek je tučně znázorněn). S touto úpravou již všechny panely vyhovují.

*Tabulka 51 - Výsledné hodnoty pro upravené panely*

Panel	Nová tloušťka sendviče d [mm]	Kritické napětí [MPa]			Jistota [-]		
		$\sigma_{kX}$	$\tau_k$	$\sigma_{kY/Z}$	$j_X$	$j_\tau$	$j_{Y/Z}$
3	6,125 (+3)	19,42	104,06	14,56	1,01	13,91	6,56
4	5,125 (+2)	34,94	191,9	31,77	1,33	13,62	2,55
6	6,125 (+3)	43,24	226,62	35,28	1,3	31,99	30,82
7	5,125 (+2)	68,6	443,06	84,28	1,44	24,7	35,86
8	4,125 (+1)	78,53	427,79	71,39	1,42	35,53	12,05

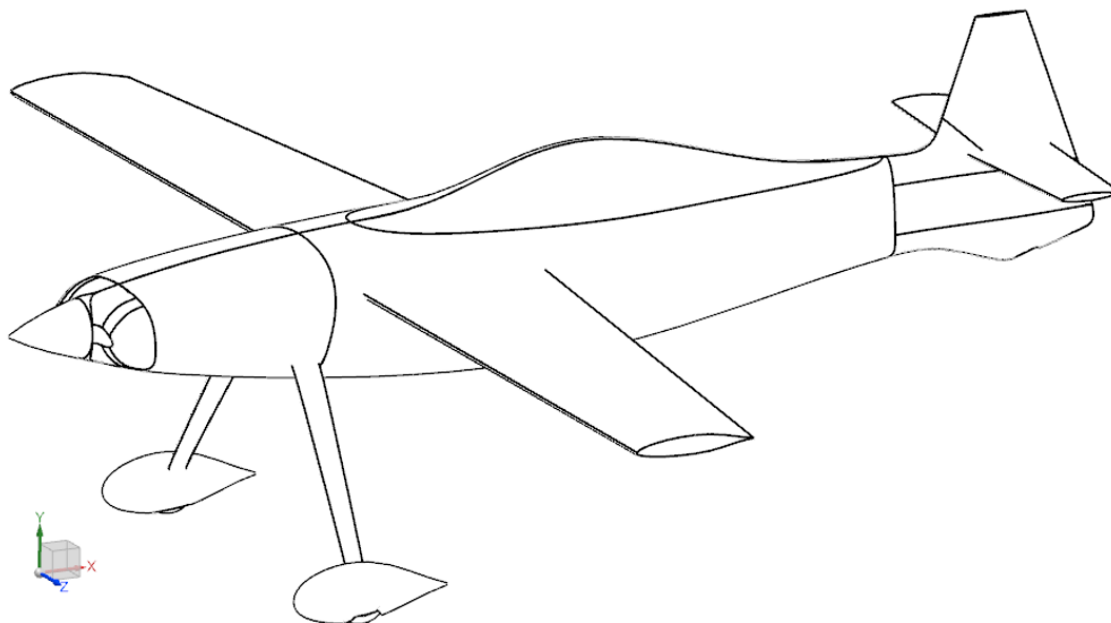


## 6 Hmotový rozbor

V této kapitole je proveden hmotový rozbor jednotlivých dílů, z kterých se skládá trup letounu.

### 6.1 Souřadnicový systém pro hmotový rozbor

Absolutní souřadnicový systém pro hmotový rozbor je zvolen shodný jako v koncepčním návrhu Ing. Valenty [1] a je znázorněn na obr. 58.



Obrázek 58 - Souřadnicový systém pro hmotový rozbor

### 6.2 Hmotnost a poloha těžiště dílů

Pomocí nástroje analýzy v programu Siemens NX 12 byl odečten objem společně s těžištěm pro každý materiál použitý v konstrukci jednotlivých dílů. Hmotnost každého materiálu se následně vypočte podle rovnice (6.1). Hustota jednotlivých materiálů je převzata z kapitoly 3.1.

$$m_i = \rho_i \cdot V_i \quad (6.1)$$

Pro polohu těžiště celé součásti poté platí rovnice pro jednotlivé souřadnice

$$x_{T_s} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{m_s} \quad (6.2)$$

$$y_{T_s} = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{m_s} \quad (6.3)$$

$$z_{T_s} = \frac{\sum m_i \cdot z_i}{m_s} \quad (6.4)$$

Stejným způsobem je možno získat polohu těžiště celého trupu. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 52.

*Tabulka 52 - Hmotnost a poloha těžiště jednotlivých součástí*

Součást	Hmotnost [g]	Poloha těžiště [mm]		
		x	y	z
Nosník SOP	119,4	5 730,9	2 281,2	0
Žebro (rovné)	10,3	5 657	2 345	0
Nosník VOP	37,9	5 582,6	2 325	0
Žebro (zalomené)	9	5 516	2 377	0
Přepážka č.6	142,2	5 151,2	2 084,3	0
Přepážka č.5	107,1	4 076,7	2 057,3	0
Přepážka č.4	251,9	3 437,3	1 697,7	0
Přepážka č.3	90,8	3 071,6	1 720,2	0
Přepážka č.2	347,8	2 770,8	2 012,6	0
Přepážka č.1	505,7	2 412,4	2 006,1	0
Podlaha	263,3	2 778,8	1 714,8	0
Rám	117,7	3 367,3	2 236,8	0
Výztuha č.1 (horní)	32,2	2 300,2	2 136,4	-361,8
Výztuha č.2 (dolní)	34,5	2 284,7	1 799,4	-276,7
Výztuha č.3 (horní)	32,2	2 300,2	2 136,4	361,8
Výztuha č.4 (dolní)	34,5	2 284,7	1 799,4	276,7
Podélník č.1 (horní)	30,1	4 004	2 220	-229
Podélník č.2 (dolní)	30,6	3 988	1 951	-251
Podélník č.3 (horní)	30,1	4 004	2 220	229
Podélník č.4 (dolní)	30,6	3 988	1 951	251
Sedačka	1 545,4	3 593,9	1 927,3	0
Potah	9 281,3	3 301,5	2 017,2	0
$\Sigma$ Trup	13 084,6	3 333,4	1 998,7	0

Dále je do hmotového rozboru zahrnuta i úvaha s hmotností lepidla. Pro lepidlo se počítá s předpokladem, že jednotlivé díly jsou odsazeny od sebe o 0,6 mm, což je tloušťka lepené spáry, a že se jedná o lepidlo HENKEL HYSOL EA 9394 s hustotou  $1360 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Výsledné hodnoty hmotnosti a těžiště lepidla a trupu s lepidlem jsou uvedeny v tab. 53.

*Tabulka 53 - Hmotnost a poloha těžiště lepidla a trupu s lepidlem*

Prvek	Hmotnost [g]	Poloha těžiště [mm]		
		x	y	z
Lepidlo	579,2	3476,9	2055,9	0
Trup s lepidlem	13 663,8	3339,5	2001,1	0

Vůči hmotnosti v koncepčním návrhu Ing. Valenty vychází trup řešený v této diplomové práci o 15,766 kg lehčí. Zároveň i těžiště je posunuto o 113,5 mm blíže ke přední části trupu a o 13 mm výše (ve směru kolmé osy) oproti prvotním odhadům.

## 7 Závěr

V rámci této diplomové práce byl řešen prvotní konstrukční návrh trupu rychlostního letounu s úvahou, že se bude jednat o celokompozitový konstrukční celek. V první části byly zvoleny materiály, které se budou v trupu vyskytovat a shrnuty jejich charakteristiky. Poté následoval návrh jednotlivých pevnostních prvků použitých na konstrukci. Bylo zvoleno, že protipožární přepážka společně s žebrem v kýlu budou integrální součástí potahu. Dále, že trup bude obsahovat šest přepážek a v oblasti hlavního nosníku křídla bude jedna přepážka mít v sobě skříňový nosník. Sedačka byla zvolena jako nosná a plní funkci přepážky. V zadní části bylo navrženo jedno rovné a jedno zalomené žebro, společně s pomocným nosníkem VOP a nosníkem SOP, který pomáhá uzavřít skořepinu v kýlové části trupu.

V další kapitole bylo pomocí náhradní metody pro konvenční letouny z předpisu UL-2 stanoveno zatížení ocasních ploch. Dále bylo pro kritické hmotové konfigurace stanoveno vyvažovací, obrátové a kombinované zatížení působící na trup letounu. Z těchto zatížení bylo vybráno osm, které se jeví jako kritické v odlišných částech trupu a z nich poté určeno početní zatížení pro potřeby dimenzování.

Následně byl vytvořen MKP model v programu Siemens NX k ověření návrhu konstrukce. Po vysíťování, definování materiálů, zavedení sil a určení okrajových podmínek byl proveden statický lineární výpočet. Jako slabé místo konstrukce se ukázala přední část trupu v oblastech motorového lože a závěsů křídla. Dále okolí sedačky s přepážkou č.4. Nakonec v zadní části trupu pevnostně nevyhovovala přepážka, potah a nosníky k uchycení ocasních ploch. V návaznosti na toto byla provedena úprava konstrukce, která už obstála v pevnostním výpočtu. V závěru kapitoly byla provedena zjednodušená kontrola na ztrátu stability sendvičových panelů s návrhem na vyztužení.

V poslední části práce byl proveden hmotový rozbor jednotlivých součástí konstrukce. Finální hmotnost trupu i s lepidlem vychází kolem 13,5 kilogramů.

Tato práce je prvotním vstupem ke konstrukci trupu. V návaznosti na tuto práci by bylo vhodné více se věnovat kritické části v přední oblasti trupu a místu spoje přepážky č.4 se sedačkou. Rovněž by bylo příhodné zpřesnit zatížení ocasních ploch. Z hlediska stability by bylo vhodné provést kontrolu na její ztrátu detailněji pomocí MKP.

## Seznam použité literatury

- [1] VALENTA, Jakub. *Koncepční návrh rychlostního letounu* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84757/F2-DP-2019-Valenta-Jakub-Diplomova%20prace%20-%20Konceptni%20navrh%20rychlostniho%20letounu.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
- [2] MALÝ, Vojtěch. *Dimenzování trupu letounu UL-39* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-08-15]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80094/F2-DP-2018-Maly-Vojtech-Zprava-Dimenzovani\\_trupu\\_letounu\\_UL-39.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80094/F2-DP-2018-Maly-Vojtech-Zprava-Dimenzovani_trupu_letounu_UL-39.pdf?sequence=-1&isAllowed=y). Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Karel Barák.
- [3] ŠPUNDA, Jaromír. *Stavebná mechanika a pevnost letounu*. Brno: VAAZ, 1961.
- [4] ČUDIN, A.V. *Pevnostní výpočet trupu letounu*. Brno: VTA AZ, 1958.
- [5] SULŽENKO, M.N. *Konstrukce letadel*. 2. opravené vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [6] ČALKOVSKÝ, Antonín a Josef PÁVEK. *Konstrukce a projektování letounů: Kapitola 9. Trup*. Brno: VAAZ, 1963.
- [7] CHUN-YUNG NIU, Michael. *Composite airframe structures*. Hong Kong: Conmilit Press, 1992. ISBN 962-7128-06-6.
- [8] CHUN-YUNG NIU, Michael. *Airframe structural design*. Druhé vydání. Hong Kong: Conmilit Press, 1989. ISBN 962-7128-04-X.
- [9] MIKULA, Jan. *Konstrukce a projektování letadel II*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3338-4.
- [10] UL 2 – Část I.: Požadavky letové způsobilosti SLZ, Ultralehké letouny řízené aerodynamicky. *LAACR* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: [https://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2%20%C4%8D%C3%A1st%20I\\_26.3.2019.pdf](https://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2%20%C4%8D%C3%A1st%20I_26.3.2019.pdf)
- [11] VĚTROVEC, Michal. *Návrh stabilizátoru rychlostního letounu* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/90367/F2-BP-2020-Vetrovec-Michal-PLNY\\_TEXT.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/90367/F2-BP-2020-Vetrovec-Michal-PLNY_TEXT.pdf?sequence=-1&isAllowed=y). Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
- [12] NĚMEC, Jiří. *Návrh směrového kormidla malého sportovního letounu* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/90384/F2-BP-2020-Nemec-Jiri-Bakalarska%20prace%20-%20Navrh%20smeroveho%20kormidla.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
- [13] TOMÁŠ, Filip. *Návrh křídla rychlostního letounu* [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-10-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/96313/F2-DP-2021-Tomas-Filip-Diplomova%20prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

- [14] *Www2.me.rochester.edu: NX Nastran User's Guide* [online]. [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: [http://www2.me.rochester.edu/courses/ME204/nx\\_help/index.html#uid:part\\_8:uid:index\\_User](http://www2.me.rochester.edu/courses/ME204/nx_help/index.html#uid:part_8:uid:index_User)
- [15] MING, Leu C, Thomas ALBIN a Kolan KRISHNA. *NX 9.0 for Engineering Design* [online]. Department of Mechanical and Aerospace Engineering: Missouri University of Science and Technology [cit. 2021-10-06].
- [16] FUNKE, Herbert. *Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges*. Paderborn, 2001 [cit. 2021-12-14]. Disertační práce. Universität-Gesamthochschule Paderborn. Vedoucí práce Walter Jorden.