

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2020

**MICHAL
VĚTROVEC**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav letadlové techniky



Návrh stabilizátoru rychlostního letounu

Design of stabilizer for racing airplane

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Michal Větrovec

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

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Větrovec** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **466629**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh stabilizátoru rychlostního letounu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of stabilizer for racing airplane

Pokyny pro vypracování:

- Pro vypracování proveďte:
- 1) Popis současného stavu
 - 2) Návrh konstrukce
 - 3) Stanovení zatížení
 - 4) Předběžné dimenzování
 - 5) Hmotový rozbor

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


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


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


Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské 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 odborníky

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) 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).

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Brabcovi, Ph.D. za odborné vedení a připomínky při zpracovávání této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jakubovi Valentovi, na jehož diplomovou práci navazuji.

Nakonec bych chtěl poděkovat mé rodině, jmenovitě mému bratrovi Ondřeji Větrovcovi, přítelkyni Sabině Tomáškové, rodičům Martině a Karlovi Větrovcovým a prarodičům Janu a Věře Prchalovým a Heleně Větrovcové, za jejich podporu při zpracování této práce i při studiu.

Autor: Michal Větrovec

Název bakalářské práce: Návrh stabilizátoru rychlostního letadla

Rozsah práce: 72 stran, 34 obrázků, 13 grafů, 12 tabulek, 2 přílohy

Rok vyhotovení: 2020

Universita: České vysoké učení technické v Praze – fakulta strojní

Ústav: Ústav letadlové techniky

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

Klíčová slova: Stabilizátor, konstrukce, zatížení, dimenzování, hmotový rozbor

Anotace:

Tato bakalářská práce si klade za cíl návrh stabilizátoru ultralehkého letadla ze studie vypracované v diplomové práci Ing. Jakuba Valenty. Na začátku práce je vypracován rozbor současného stavu možných konstrukcí. Dále je popsán zvolený konstrukční návrh. Následně jsou uvedeny pevnostní požadavky podle předpisu UL - 2 Část I. Na základě těchto pevnostních požadavků je spočítáno zatížení působící na navrhovaný stabilizátor. Na toto zatížení je poté provedeno dimenzování hlavních nosných prvků. V poslední části této práce je vyhotoven hmotový rozbor.

Author: Michal Větrovec

Title of bachelor thesis: Design of stabilizer for racing airplane

Extent: 72 pages, 34 figures, 13 graphs, 12 tables, 2 annexes

Academic year: 2020

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

Department: Department of Aerospace Engineering

Supervisor: Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

Key words: Stabilizer, design, load, dimensioning, mass analysis

Annotation:

This bachelor's thesis aims to design an ultralight aircraft stabilizer from a study prepared in the diploma thesis of Ing. Jakub Valenta. At the beginning of the work is an analysis of the current state of possible structures. Next, the selected design is described. The following are the strength requirements of UL-2 Part I. Based on these strength requirements, the load acting on the proposed stabilizer is calculated. The main load-bearing elements are then dimensioned for this load. In the last part of this work, mass analysis is made.

Obsah

Seznam zkratek a symbolů	- 1 -
1 Úvod.....	- 6 -
2 Popis současného stavu.....	- 7 -
2.1 Letadla	- 7 -
2.2 Uspořádání ocasních ploch	- 8 -
2.3 Konstrukce ocasních ploch	- 9 -
2.3.1 Podélný systém	- 9 -
2.3.2 Příčný systém	- 10 -
2.3.3 Potahy.....	- 11 -
2.3.3.1 Nenosné potahy	- 11 -
2.3.3.2 Nosné potahy	- 11 -
2.4 Spojení stabilizátoru s výškovým kormidlem.....	- 12 -
2.5 Letecké materiály	- 13 -
2.5.1 Kovové materiály	- 13 -
2.5.1.1 Oceli.....	- 13 -
2.5.1.2 Slitiny lehkých kovů	- 13 -
2.5.1.3 Titan a jeho slitiny	- 14 -
2.5.2 Nekovové materiály	- 14 -
2.5.2.1 Dřevo a tvrzené materiály.....	- 14 -
2.5.2.2 Plastické materiály.....	- 14 -
2.5.2.3 Technická pryž	- 15 -
2.5.2.4 Sendvičové materiály	- 15 -
2.5.2.5 Lamináty	- 16 -
2.5.2.6 Kompozity	- 16 -
3 Návrh konstrukce	- 23 -
3.1 Nosník	- 24 -
3.2 Žebra	- 25 -
3.3 Potah	- 26 -
4 Pevnostní požadavky	- 27 -
4.1 Předpis UL 2 – Část I.	- 27 -
4.1.1 Součinitel bezpečnosti.....	- 27 -
4.1.2 Zatížení VOP	- 30 -
4.1.3 Mechanické vlastnosti použitého uhlíkového kompozitu.....	- 31 -
5 Stanovení zatížení stabilizátoru	- 32 -
5.1 Reakce ze závěsů	- 34 -
5.2 Manévr.....	- 35 -
5.2.1 Měrné a spojitě zatížení při manévru	- 35 -
5.2.2 Posouvající síla a ohybový moment při manévru.....	- 37 -
5.2.3 Kroutící moment při manévru	- 39 -
5.3 Poryv	- 42 -
5.3.1 Měrné a spojitě zatížení při poryvu	- 43 -

5.3.2	Posouvající síla a ohybový moment při poryvu	- 44 -
	- 45 -
5.3.3	Kroutící moment při poryvu	- 46 -
5.3.4	Shrnutí zatížení	- 52 -
6	Předběžné dimenzování	- 53 -
6.1	Dimenzování pásnice	- 53 -
6.1.1	Zjednodušení geometrie pásnice	- 53 -
6.1.2	Pevnostní výpočet	- 54 -
6.1.3	Pevností kontrola a určení bezpečnosti	- 56 -
6.2	Dimenzování potahu.....	- 58 -
6.2.1	Smykové namáhání potahu.....	- 58 -
6.2.2	Stabilita částí namáhaných na smyk	- 61 -
6.2.2.1	Výpočet stability potahu.....	- 61 -
6.2.2.2	Výpočet stability stojiny nosníku.....	- 63 -
7	Hmotový rozbor	- 64 -
7.1	Hustoty použitých materiálů	- 64 -
7.2	Hmotnost	- 64 -
7.3	Těžiště	- 66 -
8	Závěr	- 68 -
	Seznam použité literatury	- 69 -
	Seznam obrázků.....	- 71 -
	Seznam grafů	- 72 -
	Seznam tabulek.....	- 72 -
	Seznam použitých programů	- 72 -
	Seznam příloh.....	- 72 -

Seznam zkratek a symbolů

OP		Ocasní plochy
VOP		Vodorovné ocasní plochy
SOP		Svislé ocasní plochy
b_{10}	[m]	Hloubka stabilizátoru u kořene
b_{20}	[m]	Hloubka od odtokové hrany stabilizátoru po osu otáčení kormidla u kořene
b_{30}	[m]	Hloubka od osy otáčení kormidla po odtokovou hranu kormidla u kořene
b_0	[m]	Hloubka celé VOP u kořene
b_{1k}	[m]	Hloubka stabilizátoru na volném konci
b_{2k}	[m]	Hloubka od odtokové hrany stabilizátoru po osu otáčení kormidla na volném konci
b_{3k}	[m]	Hloubka od osy otáčení kormidla po odtokovou hranu kormidla na volném konci
b_k	[m]	Hloubka celé VOP na volném konci
b_p	[mm]	Šířka pásnice
b_D	[mm]	Hloubka desky namáhané smykem
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
F_1	[N]	Reakce z prvního závěsu
F_2	[N]	Reakce z druhého závěsu
h_0	[mm]	Výška nosníku u kořene
h_k	[mm]	Výška nosníku na volném konci
$h(z)$	[mm]	Předpis funkce výšky nosníku závislé na souřadnici z
h_s	[mm]	Střední výška nosníku
J_z	[m ⁴]	Kvadratický moment průřezu k ose z
k	[/]	Součinitel bezpečnosti
k_p	[/]	Jistota k mezi pevnosti
k_{1P}	[/]	Jistota vůči mezi pevnosti v přední dutině
k_{2P}	[/]	Jistota vůči mezi pevnosti v zadní dutině
k_{SP}	[/]	Jistota vůči mezi pevnosti ve stojině

κ	[/]	Součinitel skladby materiálu
K_s	[/]	Součinitel velikosti
L	[m]	Polovina rozpětí VOP
l_Q	[m]	Rameno výslednice spojitého zatížení
l_1	[m]	Vzdálenost prvního závěsu od osy letounu
l_2	[m]	Vzdálenost druhého závěsu od osy letounu
L_{N0}	[mm]	Vzdálenost nosníku od odtokové hrany u kořene
L_{Nk}	[mm]	Vzdálenost nosníku od odtokové hrany na volném konci
$MTOM$	[kg]	Maximální vzletová hmotnost letounu
M_o^M	[Nm]	Ohybový moment při manévru
M_k^M	[Nm]	Kroutící moment při manévru
M_o^P	[Nm]	Ohybový moment při poryvu
M_k^P	[Nm]	Kroutící moment při poryvu
$M_{o_{max}}$	[Nm]	Maximální ohybový moment
$M_{k_{max}}$	[Nm]	Maximální kroutící moment
$M_{k_{E.O.}}$	[Nm]	Kroutící moment vztažený k elastické ose
m_N	[g]	Hmotnost poloviny nosníku
$m_{Mž0}$	[g]	Hmotnost malého žebra u kořene
$m_{Vž0}$	[g]	Hmotnost velkého žebra u kořene
m_{BM0}	[g]	Hmotnost malé překližky u kořene
m_{BV0}	[g]	Hmotnost velké překližky u kořene
$m_{Mž2}$	[g]	Hmotnost malého žebra u druhého závěsu
$m_{Vž2}$	[g]	Hmotnost velkého žebra u druhého závěsu
m_{BM2}	[g]	Hmotnost malé překližky u druhého závěsu
m_{BV2}	[g]	Hmotnost velké překližky u druhého závěsu
m_{z0}	[g]	Hmotnost závěsu u kořene
m_{z2}	[g]	Hmotnost druhého závěsu
m_{SP}	[g]	Hmotnost poloviny spodního potahu
m_{HP}	[g]	Hmotnost poloviny horního potahu
m_L	[g]	Hmotnost poloviny lepidla
m	[g]	Celková hmotnost poloviny bez lepidla
m_C	[g]	Celková hmotnost poloviny s lepidlem
m_S	[g]	Celková hmotnost celého stabilizátoru

Q	[N]	Výslednice spojitého zatížení
q_0^M	[N/m]	Spojité zatížení u kořene při manévru
q_k^M	[N/m]	Spojité zatížení na volném konci při manévru
q_0^P	[N/m]	Spojité zatížení u kořene při poryvu
q_k^P	[N/m]	Spojité zatížení na volném konci při poryvu
q_1	[N/m]	Smykový tok v přední dutině
q_2	[N/m]	Smykový tok v zadní dutině
q_s	[N/m]	Smykový tok ve stojině
q_c	[N/m]	Celkový smykový tok
r_{10}	[mm]	Rameno od nosníku k těžišti u kořene
r_{20}	[mm]	Rameno od osy otáčení k nosníku u kořene
r_{1k}	[mm]	Rameno od nosníku k těžišti na volném konci
r_{2k}	[mm]	Rameno od osy otáčení k nosníku na volném konci
$r_1(z)$	[mm]	Předpis funkce ramene r_1 závislé na souřadnici z
$r_2(z)$	[mm]	Předpis funkce ramene r_2 závislé na souřadnici z
r_t	[mm]	Vzdálenost těžiště průřezu pásnice od osy z
r_p	[mm]	Poloha krajního vlákna pásnice od osy ohybu
S	[m ²]	Plocha křídla
S_{10}	[mm ²]	Plocha obrazce 1 u kořene
S_{20}	[mm ²]	Plocha obrazce 2 u kořene
S_{30}	[mm ²]	Plocha obrazce 3 u kořene
S_{40}	[mm ²]	Plocha obrazce 4 u kořene
S_0	[mm ²]	Plocha celého obrazce u kořene
S_{1k}	[mm ²]	Plocha obrazce 1 na volném konci
S_{2k}	[mm ²]	Plocha obrazce 2 na volném konci
S_{3k}	[mm ²]	Plocha obrazce 3 na volném konci
S_{4k}	[mm ²]	Plocha obrazce 4 na volném konci
S_k	[mm ²]	Plocha celého obrazce na volném konci
T^M	[N]	Posouvající síla při manévru
T^P	[N]	Posouvající síla při poryvu
T_{max}	[N]	Maximální posouvající síla

t_p	[mm]	Tloušťka pásnice
t_{POT}	[mm]	Tloušťka potahu
$W^=$	[Pa]	Průměrné provozní zatížení
W_0^M	[/]	Měrné zatížení u kořene při manévru
W_k^M	[/]	Měrné zatížení na volném konci při manévru
W_0^P	[/]	Měrné zatížení u kořene při poryvu
W_k^P	[/]	Měrné zatížení na volném konci při poryvu
W_o	[m ³]	Modul průřezu v ohybu
x_{T0}	[mm]	Poloha těžiště obrazce u kořene – osa x
x_{Tk}	[mm]	Poloha těžiště obrazce na volném konci – osa x
x_{T10}	[mm]	Poloha těžiště obrazce 1 u kořene – osa x
x_{T20}	[mm]	Poloha těžiště obrazce 2 u kořene – osa x
x_{T30}	[mm]	Poloha těžiště obrazce 3 u kořene – osa x
x_{T40}	[mm]	Poloha těžiště obrazce 4 u kořene – osa x
x_{T1k}	[mm]	Poloha těžiště obrazce 1 na volném konci – osa x
x_{T2k}	[mm]	Poloha těžiště obrazce 2 na volném konci – osa x
x_{T3k}	[mm]	Poloha těžiště obrazce 3 na volném konci – osa x
x_{T4k}	[mm]	Poloha těžiště obrazce 4 na volném konci – osa x
y_{T0}	[mm]	Poloha těžiště obrazce u kořene – osa y
y_{Tk}	[mm]	Poloha těžiště obrazce na volném konci – osa y
$z_{E.O.}$	[mm]	Vzdálenost elastické osy od stojiny nosníku
σ_{pt}	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
σ_D	[MPa]	Dovolené napětí v ohybu
σ_{Dd}	[MPa]	Dovolené napětí v tlaku
σ_{Pd}	[MPa]	Mez pevnosti v tlaku
σ_o	[MPa]	Napětí v ohybu
τ	[MPa]	Smykové napětí
τ_1	[MPa]	Provozní napětí v přední dutině

τ_2	[MPa]	Provozní napětí v zadní dutině
τ_s	[MPa]	Provozní napětí ve stojině
τ_{1P}	[MPa]	Početní napětí v přední dutině
τ_{2P}	[MPa]	Početní napětí v zadní dutině
τ_{sP}	[MPa]	Početní napětí ve stojině
τ_{pS}	[MPa]	Mez pevnosti ve smyku pro vícesměrnou tkaninu
τ_k	[MPa]	Kritické smykové napětí
τ_{2k}	[MPa]	Kritické smykové napětí v zadní části potahu
τ_{1k}	[MPa]	Kritické smykové napětí v přední části potahu
τ_{Sk}	[MPa]	Kritické smykové napětí ve stojině

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je návrh stabilizátoru rychlostního letounu vycházejícího z diplomové práce pana Ing. Jakuba Valenty [1]. V již zmiňované diplomové práci je snaha o navrhnutí rychlostního letounu, který bude schopný překonat světové rychlostní rekordy Mezinárodní letecké federace FAI v kategorii Aeroplanes.

V této kategorii nejsou rozděleny hmotnostní třídy podle maximální vzletové hmotnosti (dále MTOM), ale podle maximální hmotnosti letounu během daného závodu. Z tohoto důvodu bude letoun s MTOM vyšší než 300 kg soutěžit ve dvou kategoriích. Na kratších tratích, na které je potřeba méně paliva, poletí letoun v kategorii C-1 a/o. Při natankování omezeného množství paliva zvládne letoun uletět kratší trať a jeho maximální hmotnost nepřekročí 300 kg. Na delších tratích, kde je potřeba více paliva a hmotnost letounu tak přesáhne 300 kg, poletí letoun v kategorii C-1 a.

Letoun bude navrhován dle předpisu UL 2 – Část I. [2]. Tento letoun je koncipován jako celokompozitový středoplošník s klasickým uspořádáním ocasních ploch, se šterbinovou vztlakovou klapkou, s pevným podvozkem a se čtyřtaktním spalovacím motorem.

2 Popis současného stavu

V této kapitole je provedeno seznámení se základními pojmy z oblasti letectví. Následně jsou popsány různé možnosti konstrukce ocasních ploch a spojení stabilizátoru s výškovým kormidlem. Kapitola je zakončena popsáním leteckých materiálů s důrazem na kompozity, jejich výrobu a způsoby spojení.

2.1 Letadla

Z fyzikálního principu překonání gravitace se letadla rozdělují na aerostaty a aerodyny. Aerostaty jsou letadla lehčí než vzduch. Vzletová hmotnost takového letadla musí být menší než hmotnost vzduchu odpovídající objemu létajícího aparátu. Mezi aerostaty patří balon nebo vzducholod'. Naopak aerodyny jsou letadla těžší než vzduch využívající nosné plochy, které generují vzlakovou sílu, jež udrží letadlo ve vzduchu. Aerodyny musí být v neustálém pohybu nebo musí využít rotujících součástí pro udržení se ve vzduchu. Rozdělují se na letadla s nepohyblivými nosnými plochami, s pohyblivými nosnými plochami a se smíšenými nosnými plochami. Pro tuto práci jsou nejdůležitější první zmiňované, které se dále dělí na bezmotorové (padák, větroň) a motorové (letoun) [4].

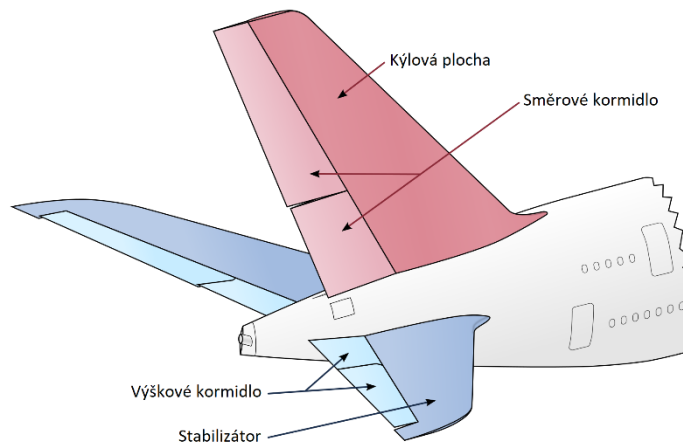
Letoun (obrázek 1) se skládá celkem ze tří celků. Jsou to drak, pohonná soustava a výstroj. Pro tuto práci je nejdůležitější první zmiňovaný. Drak obsahuje nosné plochy (křídlo), trup, ocasní plochy (vodorovné a svislé), podvozek a soustavu řízení [4].



Obrázek 1: Letoun UL - 39 Albi [5]

2.2 Uspořádání ocasních ploch

Ocasní plochy (dále jen OP) letounu se skládají z vodorovných ocasních ploch (dále jen VOP) a svislých ocasních ploch (dále jen SOP). VOP se skládají z nepohyblivé části tzv. stabilizátoru a z pohyblivé části tzv. výškového kormidla, které je se stabilizátorem spojené pomocí závěsů. VOP zajišťují podélnou stabilitu a výškové řízení letounu. SOP se také skládají z nepohyblivé části tzv. kýlové plochy a z pohyblivé části tzv. směrového kormidla. SOP zajišťují stranovou stabilitu letounu a jeho směrové řízení. Při ustáleném letu působí ocasní plochy záporným vztlakem. Rozdělení ocasních ploch je uvedeno na obrázku 2 [6; 7].



Obrázek 2: Rozdělení ocasních ploch [8]

Ocasní plochy se uspořádávají:

- a) Podle dělení po rozpětí
 - a. průběžné (nedělené)
 - b. dělené (konzolové)
- b) Podle dělení po hloubce
 - a. plovoucí
 - b. dělené (na stabilizátor a kormidlo)

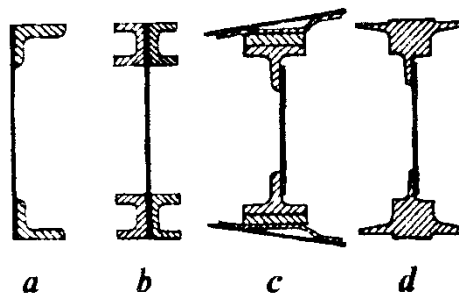
2.3 Konstrukce ocasních ploch

Konstrukce OP je totožná s konstrukcí křídla. OP se skládají z nosné konstrukce, na kterou jsou zavěšena kormidla a mechanizace, nacházející se uvnitř samotných OP. Dále jsou uvedeny prvky nosné konstrukce, která se skládá z podélných a příčných nosných elementů a potahů [6].

2.3.1 Podélný systém

Podélný systém přenosu sil obsahuje nosníky, podélné stěny (pomocné nosníky) a podélníky (stringery) [6].

Nosníkem je nazýván podélný článek, který přenáší ohybový moment a posouvající sílu. Nosníky mají vespod a nahoře pásnici, která zajišťuje přenos větší části ohybového momentu OP. Nosníky mohou být s pásnicemi složenými ze standardních lisovaných profilů (obrázek 3a, b, c), přičemž vzniká problém s přizpůsobením jejich tvaru obrysu profilu OP. Jeden ze způsobů řešení je vložit mezi pásnici a potah vložku z plechu osazeným přírubami, přičemž jsou tyto příruby tvarově přizpůsobeny proměnnému obrysu profilu (obrázek 3c). Druhá možnost je na pásnice přidělat nenosný pásek z lehkého obrobitebního materiálu. Následně tento pásek pilovat do tvaru profilu a poté nýtovat na přírubu pásnice společně s potahem. Tato možnost ale vyžaduje spoustu ruční práce. Další možnost, vhodná zejména při větších sériích, je výroba pásnice obráběním na CNC strojích přímo do tvaru profilů (obrázek 3d) [6; 7].

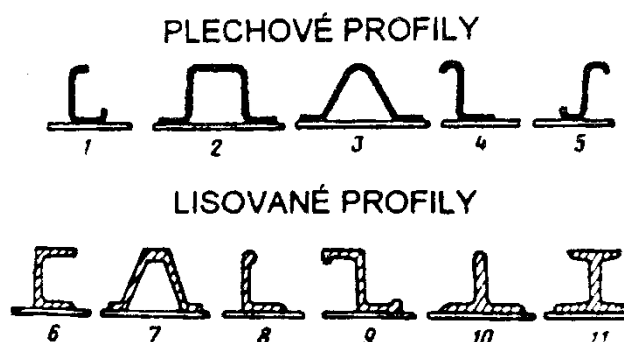


Obrázek 3: Typy nosníků [6]

Podélnou stěnou je nazýván článek umístěný v části nebo po celé délce OP a přenášející posouvající sílu. Konstrukce a umístění podélných stěn se podobá konstrukci a umístění nosníků, proto jsou tyto stěny často nazývány pomocnými nosníky. Umisťují se do přední a zadní části OP. Spojením horního a dolního potahu OP, utvářejí tyto stěny uzavřeny

obrys zachycující kroutící moment. Jsou oporou žeber a obrysových výztuh, utěšňují vnitřní prostory OP a podepírají potahy. Podélné stěny nepřenáší téměř vůbec ohybový moment. Podélná stěna v zadní části OP může být využita pro upevnění mechanizace nebo části řízení [6; 7].

Podélníkem je nazýván podélný článek zajišťující přenos vzdušných zatížení z potahu do žeber a přenášející část ohybového zatížení. Dále zvyšuje stabilitu potahu rozdělením velkých polí mezi nosníky na menší, čímž zamezuje vzniku hlubokých a dlouhých vln od smykových toků. V případě, jedná-li se o velmi lehké letadlo, je možné využít plechové (obrázek 4 -> 1 až 5), popřípadě lisované profily (obrázek 4 -> 6 až 11) [6; 7].

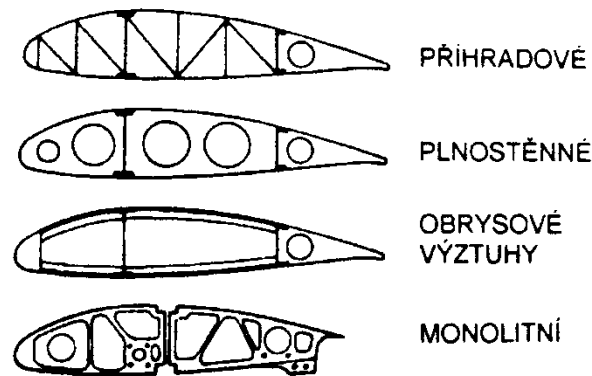


Obrázek 4: Typy podélníků [6]

2.3.2 Příčný systém

Příčný systém je tvořen žebry a obrysovými výztuhy (obrázek 5) [6].

Žebrem nazýváme prvek příčného systému spojující prvky podélného systému a potahu v jeden celek. Žebra a obrysové výztuhy slouží jako elementy vytvářející obrys pro podporu potahu a udržení tvaru křídla za letu. Dále slouží k přenosu zatížení z podélníků a potahu na nosníky. U starší generace letounů se používala příhradová konstrukce žeber, popřípadě se ještě zkombinovala s obrysovými výztuhami. V místech, kde do nosné konstrukce vstupují závěsy klapky, se použijí plnostěnná žebra, mezi kterými je potah podepírán pouze obrysovými výztuhami. Pokud je potřeba přenášet velké smykové síly, použijí se monolitní žebra frézovaná z tlustých plechů [6; 7].



Obrázek 5: Typy příčných systémů [6]

2.3.3 Potahy

Potahem je v letectví nazývána vnější konstrukční vrstva letadla, která tvoří vnější aerodynamický tvar [4]. Potahy můžeme rozdělit na nenosné a nosné, které se dále rozdělují na vyztužené a samonosné. Samonosné můžeme dělit na monolitní a vrstvené [6].

2.3.3.1 Nenosné potahy

Nenosné potahy přenášejí vzdušná zatížení. Z polí, tvořenými podélníky a žebry, přenášejí tato zatížení na nosné elementy konstrukce OP. Je potřeba si uvědomit, že v okrajových polích, působí téměř v rovině potahu tah. Tento tah je nutno zachytit, k čemuž je možné využít zesílené příruby z okrajového žebra [6].

2.3.3.2 Nosné potahy

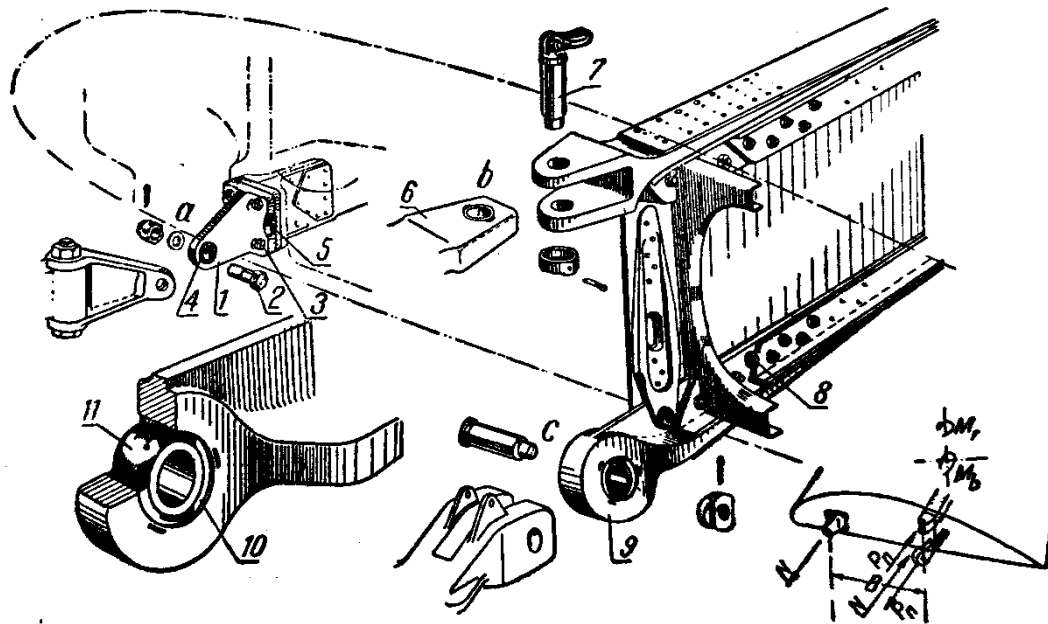
Nosné potahy mohou být vyztužené podélným a příčným systémem OP nebo mohou být samonosné. I přes působení vnějších nebo vnitřních zatížení, dokáže samonosný potah držet svůj tvar, přestože není podepírán žádným silovým systémem OP. Samonosné potahy můžeme konstruovat jako monolitní nebo jako vrstvené (sendvičové) [6].

Výhodou monolitních potahů oproti sendvičovým je zvýšení únavové životnosti tím, že snížíme počet koncentrátorů napětí (otvorů pro nýty) [6].

2.4 Spojení stabilizátoru s výškovým kormidlem

Pro spojení jednoho dílu letounu k druhému se využívá závěsných kování neboli závěsů (obrázek 6). Závěsy se rozdělují na dva základní druhy podle přenášeného zatížení a namáhání. Dělí se na tuhá kování a kloubová kování. Tuhá kování přenášejí ohybové a kroutící momenty. Pro spojení stabilizátoru s výškovým kormidlem je použito kloubového kování [7].

Kloubová kování přenášejí jen osové a posouvající síly. Jak název napovídá, kloubová kování umožňují otáčet spojovaným objektem (výškovým kormidlem) kolem své osy (osy kování). Konstruování je umožněno více způsoby, nejčastěji však pomocí vidlice a oka. Oko je vsunuto mezi vidlici a spojeno čepem, který musí být zkontrolován na smyk. Kování se navrhuje upevnit na průběžný zadní nosník stabilizátoru pomocí šroubových spojů. Další možností je přišroubovat závěs k žebru, popřípadě, je-li konstrukce vyrobená z kompozitu, je možné závěs laminovat přímo do žebra [7].



Obrázek 6: Příklad závěsů – spojení stabilizátoru s trupem [7]

2.5 Letecké materiály

Na letoun působí různé síly při popojíždění na zemi a během letu. Dále je letoun vystaven vlivům počasí jako je déšť, sníh, kroupy, vítr, což způsobuje, že na letoun působí během krátké doby velká změna teplot. Teplota 16 °C na letišti se za chvíli změní na -10 °C ve 3000 metrech nad mořem a v 10000 metrech nad mořem už může být přes -50 °C. Z těchto důvodů jsou na letecké materiály kladeny nejpřísnější požadavky. Mezi ně patří vysoká pevnost, nízká měrná hmotnost, vysoká mez únavy, vysoká teplotní stálost, vysoká odolnost proti opotřebení, korozivzdornost, tvarová stálost, dobrá obrobitelnost a nehořlavost. Zároveň je důležitá i co nejnižší cena, recyklovatelnost a ekologická nezávadnost [4].

Mezi první materiály patřilo dřevo následováno oceli, slitinami lehkých kovů, plasty, kompozity až po speciální slitiny lehkých kovů na bázi lithia. Letecké materiály se dělí na kovové a nekovové [4].

2.5.1 Kovové materiály

2.5.1.1 Oceli

Jedná se o nejstarší kovový materiál. Ocel se vyznačuje vysokou pevností a tuhostí, bohužel ale na úkor velké měrné hmotnosti. Oceli, jako leteckého materiálu, se používá více druhů. Oceli třídy 11 se využívají jako nýty, oceli třídy 14 jako výkovky, oceli třídy 15 a 16 jako závěsná kování a oceli třídy 17 pro potahy s vysokou korozivzdorností [4].

2.5.1.2 Slitiny lehkých kovů

Dalším kovovým materiálem jsou slitiny lehkých kovů. Do této skupiny patří slitiny hořčíku a hliníku. Tyto slitiny nabízí nízkou měrnou hmotnost při stále dostatečné pevnosti a tuhosti. Slitiny hořčíku se vyznačují menší měrnou hmotností než slitiny hliníku a využívají se jako potahové plechy kormidel, náběžných hran, páky, a konzoly. Přímé konstrukční využití čistého hliníku není pro jeho nízkou pevnost možné (100 MPa). Tuto nevýhodu je možné vylepšit vytvořením slitiny hliníku s dalšími prvky. Samostatně se však využívá jako antikoroziční ochranná vrstva ve formě plátů. Dále jsou uvedeny nejpoužívanější slitiny hliníku [4].

Al-Cu-Mg je skupina, do které patří duraly. Duraly jsou nejpoužívanější slitinou hliníku v leteckém průmyslu. Vyznačují se vysokou pevností (400 MPa), ale malou odolností proti korozi. Z toho důvodu se používá plátování (pokrytí povrchu tenkou vrstvou) například čistým hliníkem. Duraly se využívají ve formě plechů, tyčí, profilů a vidlic.

Dále do této skupiny patří superdural. Ten se používá především na velmi namáhané díly, jako jsou závěsná kování, páky, plechy, pásnice nosníků a žebra. Superdural dosahuje meze pevnosti i 490 MPa [4].

Al-Zn-Cu-Mg jsou legované vysokopevnostní slitiny hliníku s velmi vysokou metalurgickou čistotou. Využívají se na nejvíce namáhané díly, jako jsou podélné výztuhy křídel nebo vrtulové náboje. Dosahují meze pevnosti až 720 MPa [4].

Al-Si-Mg jsou slitiny používané na odlitky, které nedosahují takových pevností (320 MPa) jako předešlé slitiny. Jsou přesto velmi vhodné na odlévání tvarově složitých odlitků, jako jsou skříně nebo chladící žebra [4].

Al-Li-X je slitina hliníku a lithia. Tato slitina dosahuje srovnatelných pevností (400 MPa) jako duraly při o 10 % větším modulu pružnosti a nižších měrných hmotnostech. Umožňuje snížit hmotnost celé konstrukce až o 20 % [4].

2.5.1.3 Titan a jeho slitiny

Titan se vyznačuje velmi vysokou pevností (1 400 MPa) a dobrou tepelnou odolností až do 550 °C. Zároveň je možné jej svařovat. Nevýhody jsou vysoká cena, obtížná obrobitelnost a neúplné poznatky o únavových vlastnostech. Využívá se pro požární stěny, části potahů, v konstrukci motorů (lopatky) nebo jako žebra [4].

2.5.2 Nekovové materiály

2.5.2.1 Dřevo a tvrzené materiály

Mezi přednosti dřeva, jako materiálu leteckých konstrukcí, patří dobrá obrobitelnost, tlumící vlastnosti a nízká měrná hmotnost (tři až šestkrát lehčí než dural). Naopak nevýhodou je nízká pevnost, a především silné rozptyly mechanických vlastností. Pro zajištění bezpečnosti je nutné zvýšit součinitele bezpečnosti, oproti kovovým konstrukcím, čímž dřevo ztratí svou hlavní přednost v podobě nízké hmotnosti. Další nevýhody jsou neuspokojivá životnost, hořlavost a špatná automatizace výroby. Aby došlo k potlačení těchto nevýhod, je vhodné dřevo vrstvit a klížit, a tím vytvořit překližky [4].

2.5.2.2 Plastické materiály

Rozdělují se na reaktoplasty a termoplasty. Reaktoplasty lze použitím tlaku a tepla vytvrdit. Jakmile k tomu dojde, není již další tváření možné. Termoplasty naopak při ohřátí na vyšší teplotu je možné zpracovávat opakovaně. Mezi přednosti plastických materiálů patří nízká měrná hmotnost, snadná výroba i složitějších dílů, dobré tepelné a elektrické izolační

vlastnosti, dobrá obrobiteľnosť, sľepiteľnosť a u niektorých druhů i svařitelnost. Jako nevýhody se uvádí nízké mechanické vlastnosti, malá odolnosť teplotním změnám a špatná tvarová stálost. Dále je uvedeno pár druhů plastických materiálů a jejich použití.

ABS neboli Akrylonitrilbutadienstyren se využívá pro výrobu potrubí, nádrží, palubních desek a obložení stěn kabin. Fenolplasty se používají pro výrobu rukojetí, ovladačů a kladek. Organické sklo (někdy též akrylové sklo) nachází uplatnění při zasklení kabin podzvukových letadel. Polystyrén a polyuretan se využívá jako výplň sendvičových konstrukcí [4].

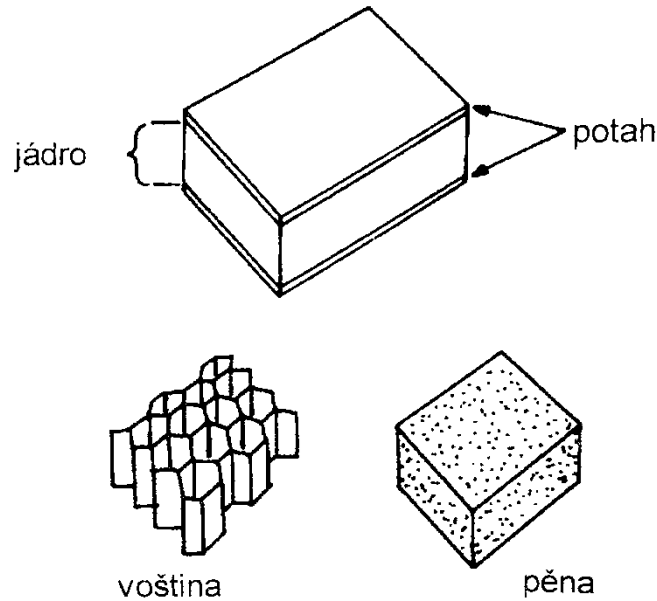
2.5.2.3 Technická pryž

Vulkanizací směsi umělého či přírodního kaučuku a přísad dojde k vyrobení pružné látky zvané technická pryž. Tento materiál vykazuje velmi nízký modul pružnosti a dobré materiálové tlumení. Využití nachází především při výrobě pneumatik, tlumičů, silentbloků, palivových a olejových hadic a těsnění [4].

2.5.2.4 Sendvičové materiály

Sendvičová konstrukce (obrázek 7) je vytvořena dvěma tenkými nosnými potahy, jejichž stabilitu zajišťuje lehké jádro vložené mezi ně. Materiál potahu může tvořit dřevěná překližka, termoplast, kompozit nebo duralový, ocelový či titanový plech. Jako materiál jádra se využívá voština z hliníku, duralu, oceli, titanu nebo z umělé hmoty. Druhou možností pro materiál jádra je využití pěny na bázi PVC, fenolu, polystyrenu či polyuretanu.

Nejčastěji využívané kombinace v leteckém průmyslu jsou duralové nebo kompozitní potahy s hliníkovými voštinami a duralové nebo kompozitní potahy s polyuretanovou výplní. Mezi přednosti sendvičových materiálů patří nízká měrná hmotnost, výborná tuhost v tlaku a ohybu, dobré únavové vlastnosti, kvalitní aerodynamický povrch, dobré tepelné a hlukové izolační vlastnosti a časová úspora při montáži (není potřeba nýtů). Naopak mezi překážky se řadí náročná výroba (lepení, obrábění), obtížná kontrola spojení potahu s jádrem a nutnost vlepování okrajových profilů pro vhodné zakončení panelů. Využití pro sendvičové materiály je u nosné části křídel, trupů, ovládacích ploch (stabilizátor, výškové kormidlo, směrové kormidlo) [4].



Obrázek 7: Sendvičové materiály [4]

2.5.2.5 Lamináty

Předchůdce kompozitů. Skládá se z pojiva (matrice) a výztuže. Matrice ve formě epoxidových nebo polyesterových pryskyřic a skelná vlákna jako výztuž [4].

2.5.2.6 Kompozity

Stabilizátor navrhovaný v této práci je zamýšlen z kompozitu, proto bude tomuto materiálu věnován větší důraz.

Stejně jako lamináty, se i kompozity skládají z pojiva (matrice) a výztuže. Matrice i výztuž mají výrazně odlišné vlastnosti, ovšem jejich spojením vznikne materiál s novými vlastnostmi, které jsou mnohem lepší a sama o sobě je nemá ani jedna složka [4; 9].

- **Matrice**

Je to složka rovnoměrně rozložená v celém objemu. Chrání výztuž před vnějšími vlivy. Matrice může být z polymeru, keramiky, kovu (Al, Mg, Ti), skla, sklokeramiky nebo z uhlíku. Nejpoužívanější materiál matrice v leteckém průmyslu je polymer na bázi pryskyřice [4; 9].

- Syntetické polymerní matrice

Vyrobene z reaktoplastů nebo termoplastů. Z reaktoplastů jako epoxidové pryskyřice (nejvhodnější, dobré mechanické a technologické vlastnosti, dobrá chemická odolnost a teplotní stálost), fenolické pryskyřice (odolnější proti vyšším teplotám než epoxidové,

cenově výhodnější, ovšem s nižšími mechanickými vlastnosti), polyesterové pryskyřice (nízká cena, dobrá spojitelnost se skelnou výztuží, ale nižší mechanické vlastnosti oproti epoxidové). Z termoplastů jako polyamidové pryskyřice (vysoká tepelná stálost) [4].

- **Výztuž**

Je pevnější a tužší než matrice. Slouží k přenášení zatížení. Její forma, materiál, tvar a obsah ovlivňují charakteristické vlastnosti výsledného kompozitu. Výztuž bývá ve formě vláken (dlouhá, krátká, prameny, tkaniny, rohože), částic (kulovité, destičkové, tyčinkové, nepravidelné) nebo whiskerů [4; 9].

- **Vlákno**

Výztuž, která přenáší napětí. Je důležitá adheze k matrici (možné podpořit povrchovou úpravou vláken). U vláken existuje tzv. tržná délka, což je parametr materiálu, udávající, jak dlouhé vlákno by se v zemském gravitačním poli přetrhlo vlastní tíhou [4; 9].

- **Skleněné vlákno**

Vyrábí se zvlákněním roztaveného skla. Má poměrně vysokou pevnost v tahu a nízký modul pružnosti [4].

- **Uhlíkové vlákno**

Vyrábí se karbonizací z vláken PAN (Polyakrylnitrilová vlákna), bitumenu nebo celulózy. Během tepelného zpracování materiál ztratí většinu neuhlíkových atomů v řetězcích. S rostoucí teplotou se zvyšuje pevnost a křehkost, a dále dochází ke snížení interlaminární pevnosti v kompozitu (pevnost mezi vrstvami). Uhlíková vlákna mohou být karbonizovaná (vyšší pevnost a nižší modul pružnosti) nebo grafitizovaná (nižší pevnost a vyšší modul pružnosti) [4; 9].

- **Organické vlákno (aramid)**

Nejčastěji používané aramidové vlákno je kevlar. Aramidy jsou velmi pevné a tuhé a používají se tam, kde se očekávají rázy (čelní část křidel). Vyznačují se dobrým vnitřním tlumením (osmkrát intenzivnější tlumení než ocel) [4].

- **Borové vlákno**

Vyrábí se metodou CVD (chemická depozice z plynné fáze) nanášením plynného boru na tenké dráty z wolframu nebo uhlíku (drahá a náročná výroba). Na povrchu drátu se z boru

vytváří jemná krystalická struktura, zajišťující výbornou přilnavost k matrici. Využívají se především pro výrobu prepregů (polotovar pro výrobu vláknových kompozitů) [4; 9].

- Keramické vlákno

Vyrobené ve formě vlákna z karbidu křemíku (SiC). Vyrábí se metodou CVD. Využívá se na díly, kde je potřebná odolnost proti vysokým teplotám [4].

- Prepreg

Prepreg je polotovar používaný k výrobě vláknových kompozitů. Hlavní složkou prepregu je výztuž předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Listy prepregu se vrství do požadované tloušťky a následně se ve formě dotvarují a dotvrdí pomocí tepla a tlaku. Prepreg je nutné skladovat pod bodem mrazu, má omezenou dobu použitelnosti a zpracovatelnosti a vyznačuje se vynikajícím poměrem matrice a výztuže [10].

- Částice

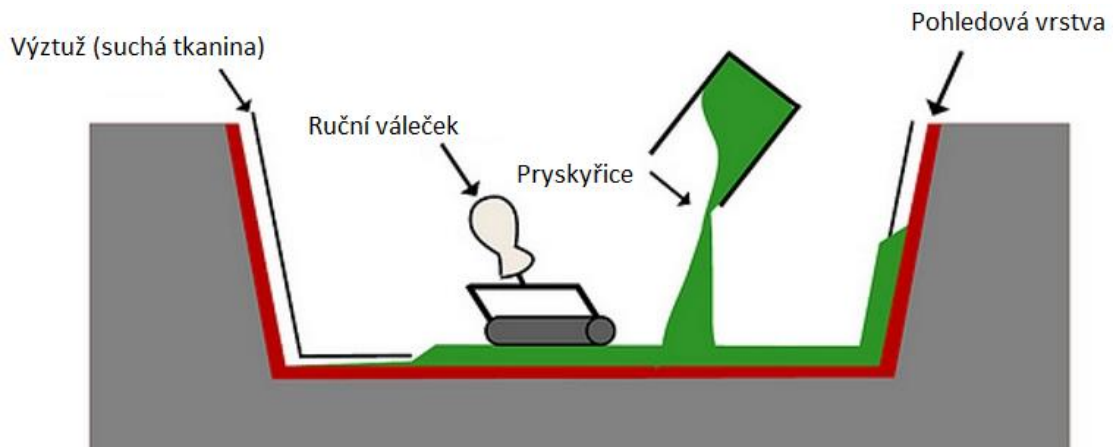
Částice mohou být orientované nebo neorientované [9].

- Whisker

Je monokrystalické vlákno s vysokým poměrem délky k tloušťce. Vyrábí se nejčastěji z uhlíku a karbidu křemíku. Odolávání lomu je podstatně vyšší než u běžných vláken ze stejného materiálu (kompozit s matricí vyztuženou 5 % whiskerů z nitridu křemičitého má dvojnásobnou houževnatost než kompozit s matricí vyztuženou 5 % vlákny z nitridu křemičitého). Z lékařského hlediska se whiskery považují za rakovinotvorné, protože jsou velmi tenké a mohou se snadno vdechnout a usadit na plicích [9].

- Metody zpracování kompozitů
 - Ruční laminace

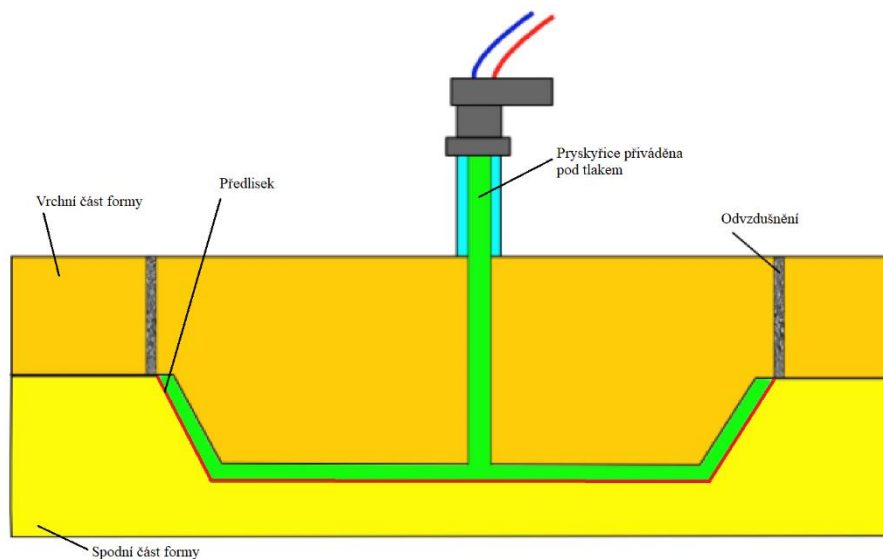
Jedná se o levnou technologii používanou zejména při kusové výrobě velkorozměrných dílů. Výroba probíhá ve formě, do které je vložena první pohledová vrstva. Následně je vkládána tkanina a jednotlivé vrstvy jsou prosycené pryskyřicí. Ručním válečkem jsou vytlačeny vzduchové bubliny a díl se nechá vytvrdnout [11].



Obrázek 8: Výroba kompozitu-ruční laminace [11]

- Metoda RTM

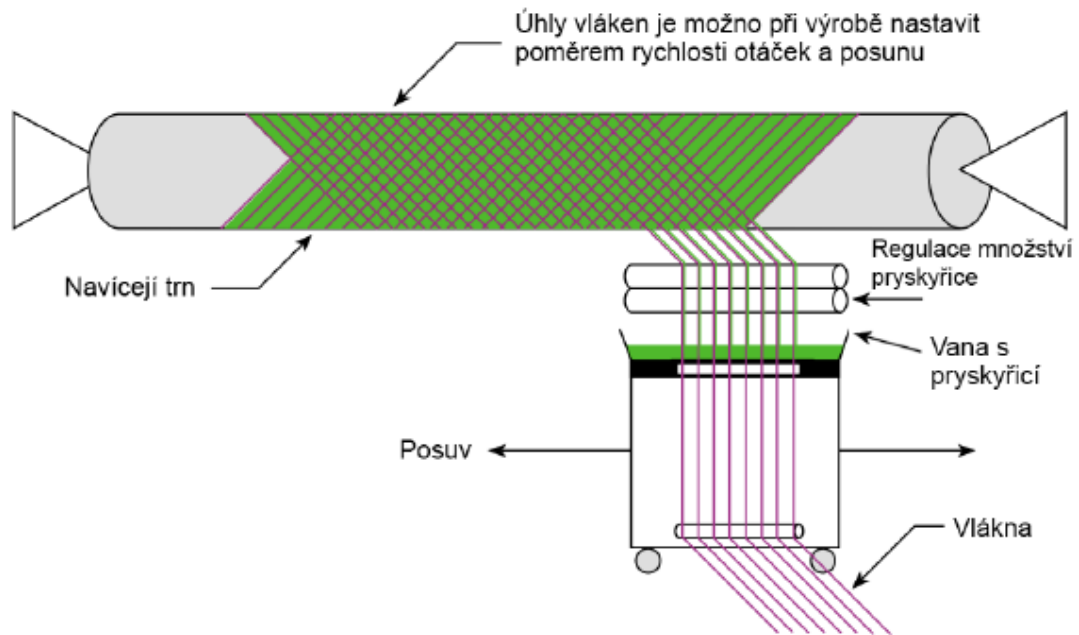
Do dutiny formy se vloží předlisek (suchá vlákna uspořádána do požadované struktury). Forma se uzavře a do dutiny se pod tlakem vstříkne směs pryskyřice s vytvrzovacím činidlem. Následně dochází k vytvrzování pryskyřice, otevření formy a vyjmutí dílu [12; 13].



Obrázek 9: Výroba kompozitu-metoda RTM [12]

○ Navíjení

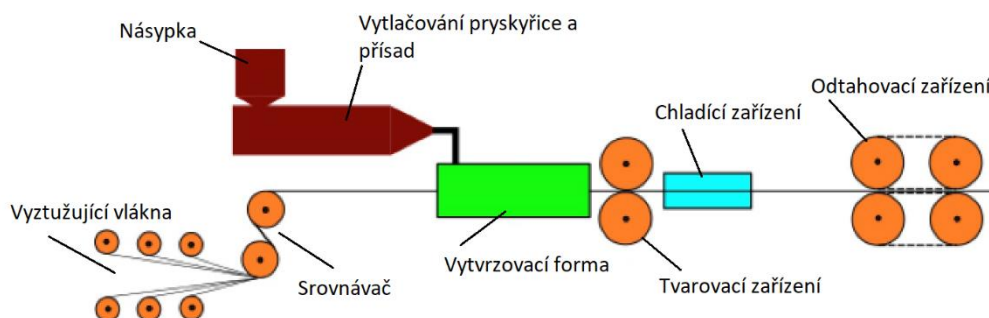
Využívá se pro díly, které musí odolat vysokému tlaku navzdory své nízké hmotnosti. Vlákno je prohááno impregnační lázní a navíjeno na trn. Trn se otáčí a mechanismus, odkud přichází vlákno, se pohybuje horizontálně. Tím dochází k pokládání vrstev vláken na sebe a k obalení celého trnu do požadované tloušťky [14].



Obrázek 10: Výroba kompozitu-navíjení [14]

○ Pultruze

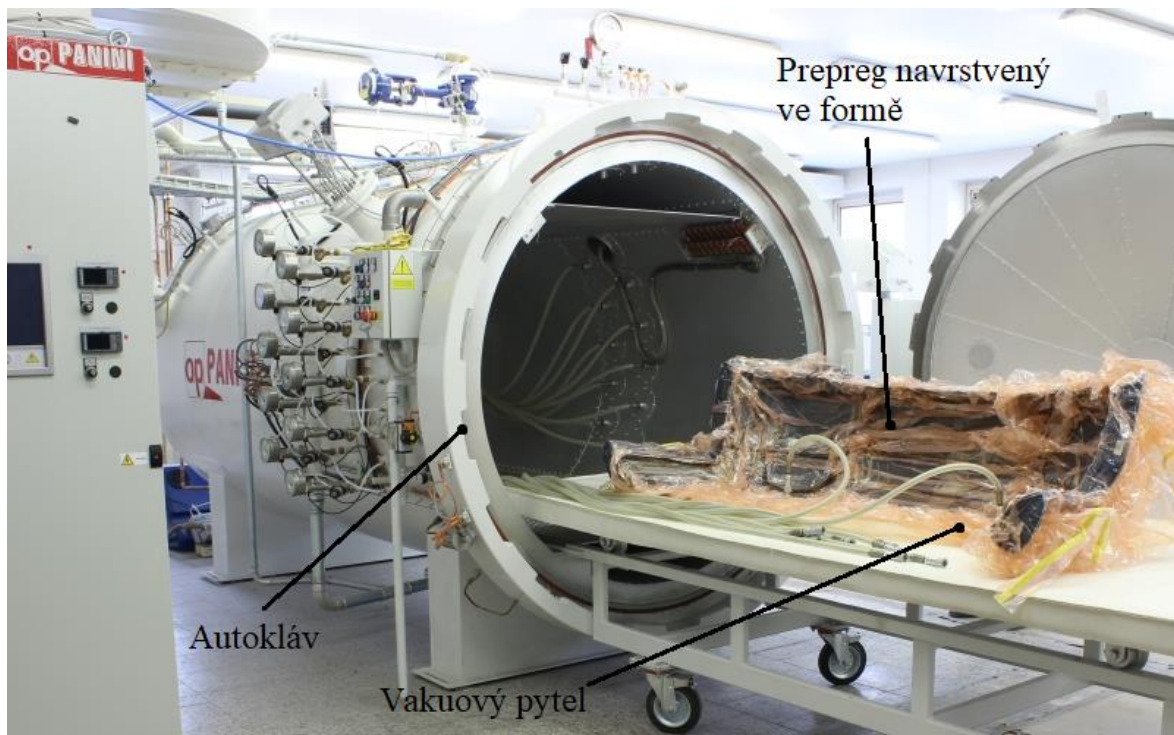
Vlákna prepregu jsou protahována zahřátou průtažnicí (vytvrzovací forma a tvarovací zařízení), která udává konstantní průřez. Používá se pro jednodušší geometrii [12].



Obrázek 11: Výroba kompozitu-Pultruze [12]

○ Autokláv

Polotovary pro výrobu kompozitů touto metodou je prepreg. Prepreg je nařezán na nástřihy s požadovanou orientací vláken a rozměry. Přesně nařezaný prepreg se vkládá a vrství do formy, která je následně zabalena do vakuového pytle. Tento celek se vloží do autoklávu, kde dochází k vytvrzování působením tepla a vysokého tlaku. Jedná se o nejlepší proces výroby kompozitů [15].



Obrázek 12: Výroba kompozitu – Autokláv [15]

- Metody spojování kompozitů
 - Šroubové spoje

Výhodou spojení pomocí šroubů je snadná rozebíratelnost, jednoduchost a rychlost. Nevýhodou ovšem je hmotnost a těsnost spoje, možný vznik koroze, aerodynamická čistota a koncentrace napětí v okolí otvoru [16].

- Nýtované spoje

Výhodou tohoto spojení je jednoduchost, rychlost a aerodynamická čistota. Naopak hmotnost, nerozebíratelnost, koroze a koncentrace napětí jsou hlavní nevýhody nýtování [16].

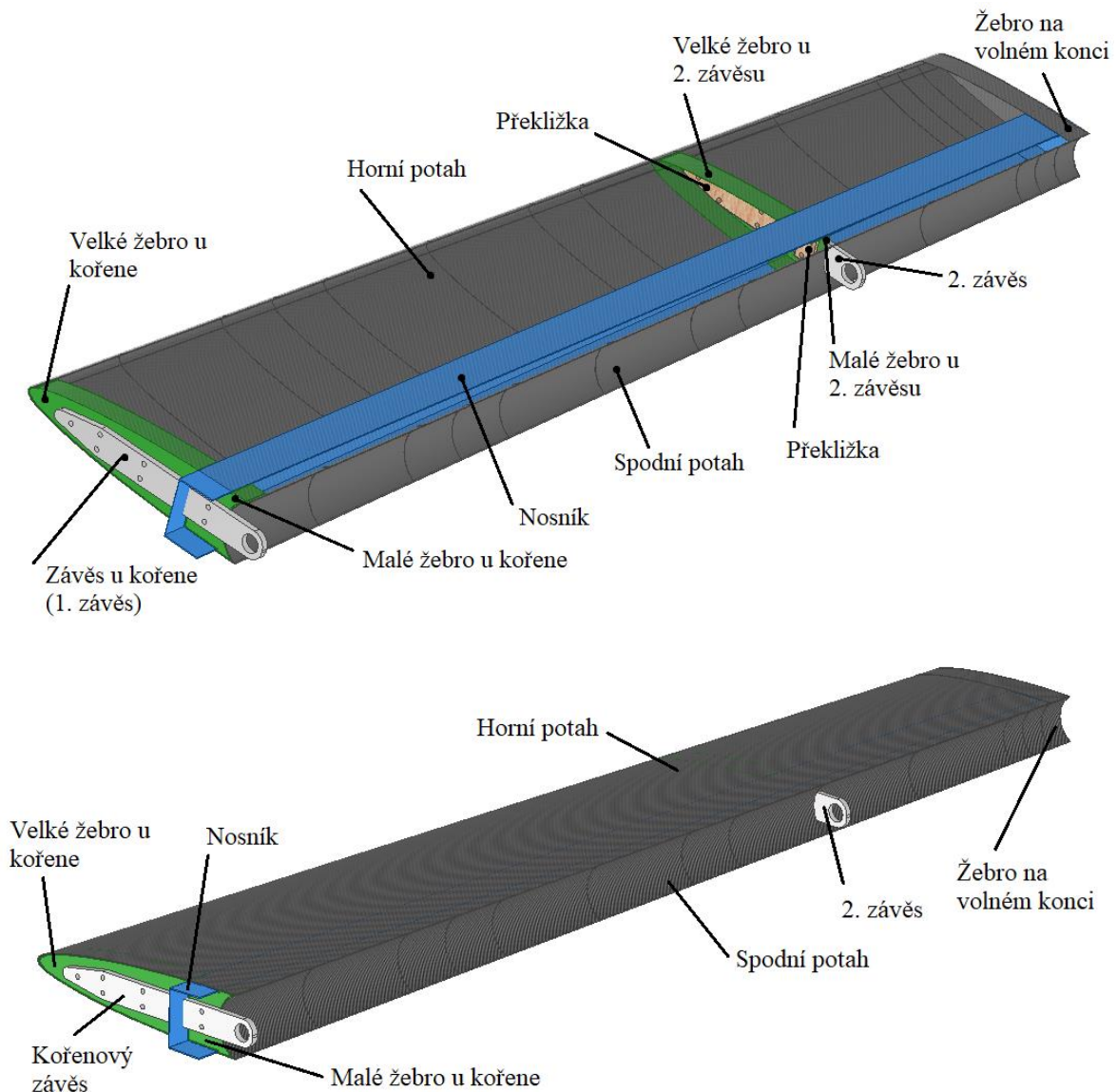
- Lepené spoje

Lepené spoje fungují na principu adheze (vzájemné přilnavosti materiálů). Oproti šroubovým a nýtovým spojům těsní, tlumí hluk a vibrace, dosahují dostatečné pevnosti při minimalizaci hmotnosti, nejsou koncentrátoři napětí, nenarušují materiály a nekorodují. Nevýhodou je nutnost ošetření lepených ploch (odmaštění, očištění), nerozebíratelnost, delší čas spojování (doba vytvrzení), složité odhadnutí životnosti a neexistuje univerzální lepidlo na všechny materiály. Nejčastěji se používají lepidla na bázi epoxidu, polyesteru, polyuretanu a metakrylátu [16].

3 Návrh konstrukce

Pro navrhovaný stabilizátor jsou zvoleny následující materiály. Závěsy jsou z duralu, překližky z březového dřeva a všechny ostatní součásti jsou z uhlíkového kompozitu s pojivem z epoxidové pryskyřice. Jako polotovar je použit prepreg, a jako způsob výroby je zvolena technologie autoklávu. Všechny součásti jsou k sobě přilepeny, proto jsou od sebe vzdáleny 0,6 mm, což je prostor pro lepidlo. Pouze závěsy jsou k žebřům i přišroubovány.

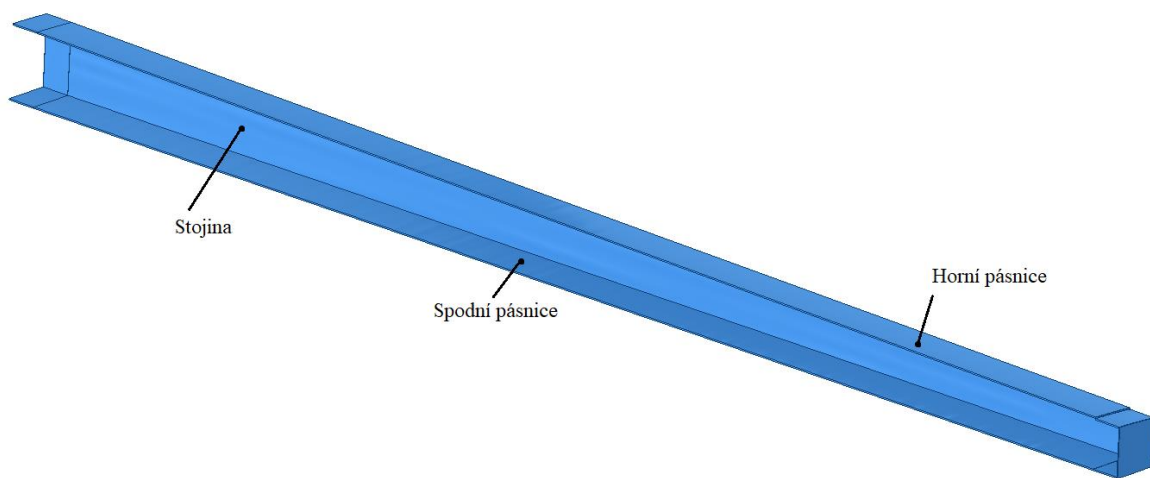
Jedna polovina stabilizátoru se skládá ze spodního a horního potahu, pěti žebřer, poloviny nosníku, dvou závěsů, čtyř březových překližek a spojovacího materiálu.



Obrázek 13: Pravá polovina stabilizátoru

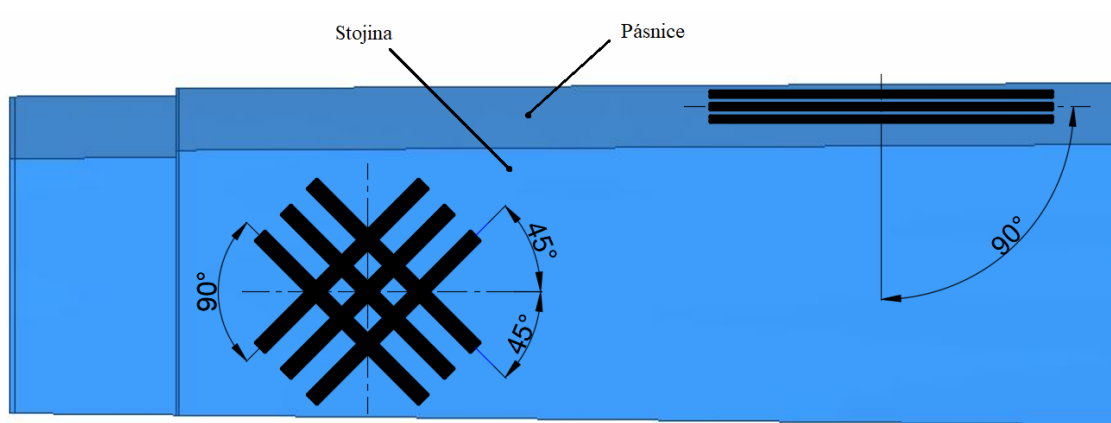
3.1 Nosník

Nosník je hlavní konstrukční prvek navrhovaného stabilizátoru. Nosník je zvolen jako průběžný, to znamená, že je umístěn po celém rozpětí stabilizátoru. Tvar nosníku byl zvolen C profil díky své dobré únosnosti. Správně dimenzovaný nosník zaručuje stabilitu potahu a přenos posouvající síly a ohybového momentu. Nosník se skládá ze stojiny o tloušťce 0,6 mm vyrobené z vícesměrné tkaniny a spodní a horní pásnice o tloušťce 0,91 mm vyrobené z jednosměrné tkaniny.



Obrázek 14: Pravá polovina nosníku

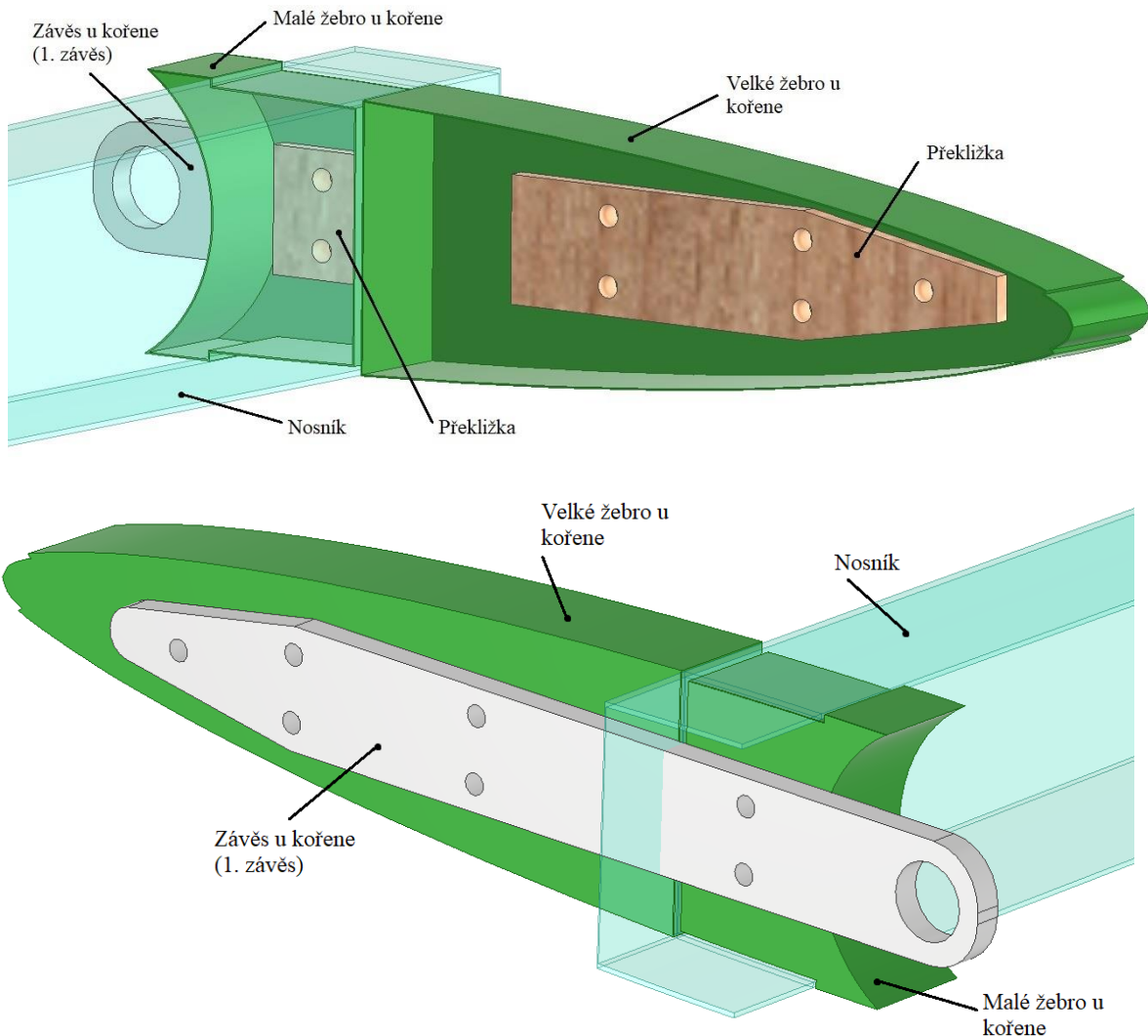
Pásnice je namáhána pouze ohybem, a proto je vyrobena z jednosměrné tkaniny s vlákny orientovanými ve směru délky nosníku. Naopak stojina přenáší zatížení čistým smykem a vlákna je potřeba orientovat ve směru hlavních napětí (obrázek 15).



Obrázek 15: Orientace vláken v pásnici a stojině nosníku

3.2 Žebra

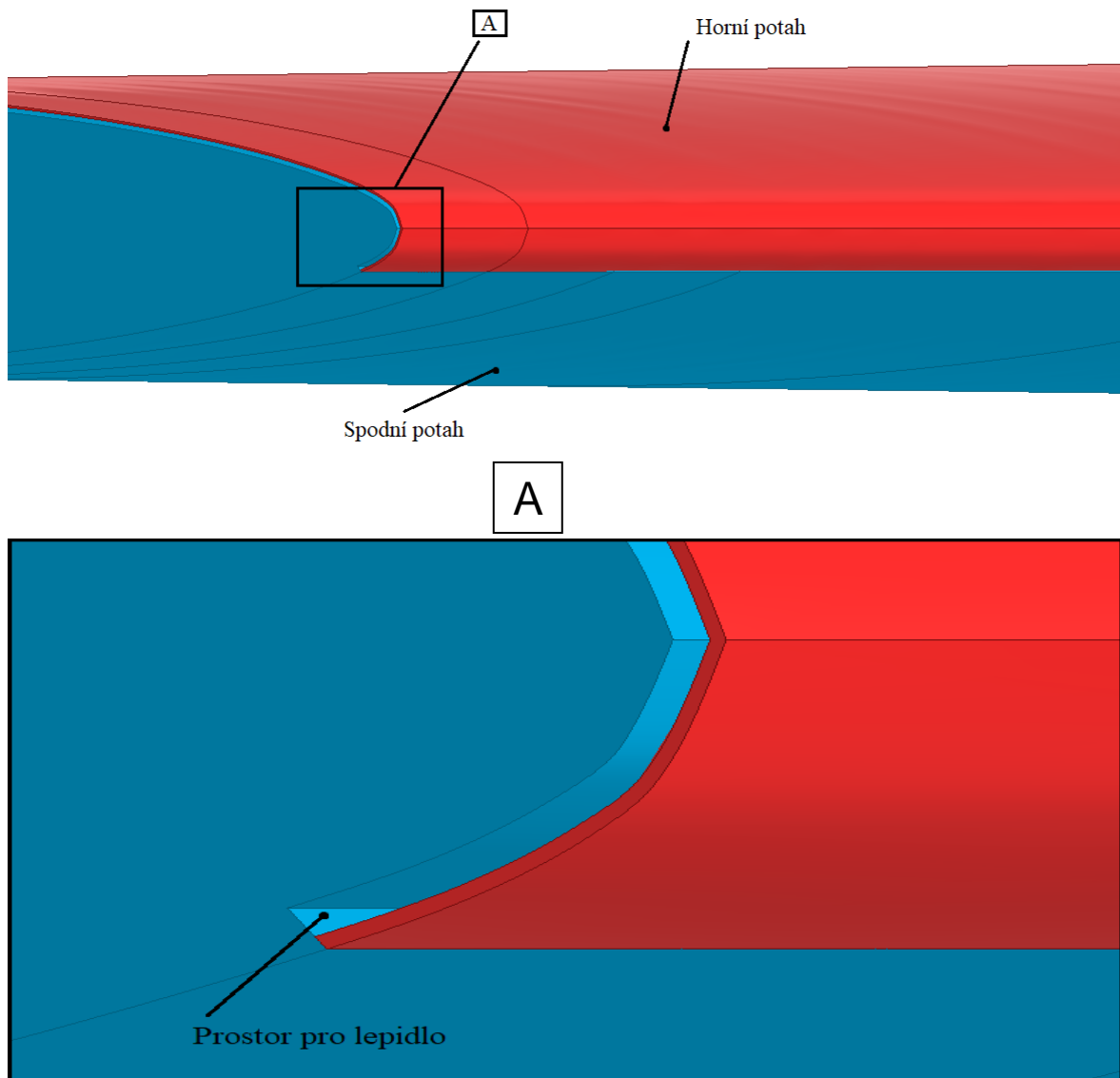
Na jedné polovině stabilizátoru je celkem pět žebér. Jedno žebro je součástí spodního potahu a je na volném konci. Dvě žebra jsou umístěna v místě druhého závěsu, přičemž jedno žebro je od náběžné hrany k nosníku a druhé žebro je od druhé strany nosníku k odtokové hraně. Poslední dvě žebra (zobrazená na obrázku 16) jsou v místě prvního závěsu (u kořene). První z nich (velké žebro) je opět umístěno od náběžné hrany k nosníku a druhé (malé žebro) od nosníku k odtokové hraně. Žebra jsou plnostěnná a jsou vyrobená z vícesměrné tkaniny. K žebřu jsou přišroubovány závěsy a v dutině žebra je zalaminována březová překližka. Provedení žebér a druhého závěsu je stejné, jako provedení u kořene. Žebra mají tloušťku 0,4 mm.



Obrázek 16: Uspořádání žebér u kořene

3.3 Potah

Potah je opět vyroben z vícesměrné tkaniny. Kvůli montáži stabilizátoru je potah rozdělen na dvě samostatné součásti, které jsou k sobě přilepeny. Pro správně přilepení jsou na potahu vytvořené tzv. zámky. Potah je nosný a přenáší smykové zatížení. Prostor pro lepidlo je 0,6 mm. Tloušťka obou potahů je 0,4 mm.



Obrázek 17: Zámek spodního a horního potahu

4 Pevnostní požadavky

Při výpočtu zatížení stabilizátoru je vycházeno z předpisu UL 2 – Část I. [2], který udává požadavky pro letovou způsobilost ultralehkých letounů řízených aerodynamicky.

4.1 Předpis UL 2 – Část I.

Předpis UL 2 je stavební předpis pro aerodynamicky řízené ultralehké letouny. Tento předpis je použitelný pro letouny se vzletovou hmotností maximálně 600 kg a s minimální rychlostí maximálně 83 km/h. Letoun dle tohoto předpisu má povolen pouze neakrobatický provoz. Tento provoz však zahrnuje jakýkoliv obrat potřebný pro normální létání, letové režimy s odchylkou maximálně 30° od horizontu kolem příčné osy a ostré zatáčky s náklonem do 60°. V tomto předpise jsou stanoveny minimální požadavky letové způsobilosti, které je nutné splnit [2].

4.1.1 Součinitel bezpečnosti

V první řadě je důležité objasnit pojmy „provozní zatížení“ a „početní zatížení“. Provozní zatížení je zatížení, které reálně působí na konstrukci letadla. U tohoto zatížení nepředpokládáme jeho překročení. Provozní zatížení stanovíme pomocí obálek obrátů a poryvů. Naopak početní zatížení je zatížení, se kterým počítáme při dimenzování konstrukce letadla. Toto zatížení získáme, pokud vynásobíme provozní zatížení součinitelem bezpečnosti. Konstrukce navrhovaného letounu musí přenášet provozní zatížení bez jakýchkoliv trvalých deformací, dále musí být schopna přenášet početní zatížení nejméně 3 sekundy a nesmí při tom vzniknout porucha. Součinitel bezpečnosti je koeficient, který stanovují letecké předpisy pro danou kategorii letadel [2].

V této práci bude použit rozšířený součinitel bezpečnosti podle rovnice (4.1), protože uhlíkový kompozit reaguje na změnu vlhkosti.

$$k = 1,5 \cdot 1,25 = 1,875 \quad (4.1)$$

V následující části je citováno z předpisu UL 2 – Část I. [2, str. 19,20].

„UL 2 § 303 Součinitel bezpečnosti

1. *Pokud není uvedena jiná hodnota, musí být použit součinitel bezpečnosti 1,5.*
2. *Součinitel bezpečnosti je nutno vynásobit doplňkovým součinitelem bezpečnosti, jestliže:*

- a. *existuje nejistota o pevnosti součásti (dílu),*
- b. *musí být očekávána ztráta pevnosti v čase do výměny,*
- c. *nejsou k dispozici přesné pevnostní hodnoty vzhledem k neznámým výrobním a zkušebním metodám.*

Velikost tohoto doplňkového součinitele bezpečnosti, pokud není v dalším uvedeno jinak, musí být stanovena pro každý typ zvlášť. Požadovaná doba do výměny těchto součástí (dílu) je uvedena v Provozně technické příručce.

- d. *doplňkový součinitel bezpečnosti je především stanoven pro:*
 - I. *každou část, která má vůli (neplatí pro nalisování) a na níž působí rázové namáhání nebo vibrace,*
 - II. *závěsy kormidel (mimo valivých a kloubových ložisek),*
 - III. *ložiska (klouby) v táhlovém řízení, která jsou vystavena úhlovému pohybu (mimo valivých a kloubových ložisek), a*
 - IV. *ložiska (klouby) v lanovém řízení.*

Tabulka 1: Součinitel bezpečnosti

<i>Aplikace</i>	<i>Doplňkový součinitel bezpečnosti</i>	<i>Výsledný součinitel bezpečnosti f_U</i>
<i>spoje (smykové uložení) s vůlí, zatížené rázovým namáháním nebo vibracemi</i>	2,0	$f_U = 2,0 \times 1,5 = 3,0$
<i>závěsy kormidel (mimo valivých a kloubových ložisek)</i>	4,44	$f_U = 6,67$
<i>ložiska (klouby) v řízení táhly</i>	2,2	$f_U = 3,30$
<i>ložiska (klouby) v lanovém řízení</i>	1,33	$f_U = 2,0$
<i>odlisky</i>	2,0	$f_U = 1,5 \times 2,0 = 3,0$
<i>kování – platí pro</i> - všechny prvky kování, - všechny spojovací prvky, - otlačení (u pevného uložení)	1,15	$f_U = 1,5 \times 1,15 = 1,725$
<i>bezpečnostní pásy a sedačky</i>	1,33	$f_U = 1,5 \times 1,33 = 2,0$

Zvyšující součinitele se aplikují v případě pevnostního průkazu vedeného početně (nikoliv zkouškou), vyjma bezpečnostních pásů a sedaček.

Výklad použití doplňkových součinitelů pro kompozitové konstrukce:

1. Součinitel bezpečnosti f pro kompozitové konstrukce je v rozmezí 1,5 až 2,25, to znamená zvyšující součinitel 1 až 1,5.
2. Použití zvyšujícího součinitele závisí na:
 - a. součásti či dílu, na který bude vztahován,
 - b. přesnosti výpočtů a jejich spolehlivosti,
 - c. předložených zkouškách vzorků kompozitového materiálu a jejich výsledcích,
 - d. ověření výroby, kontrolních postupech a zkušenostech výrobce.

O použití příslušného zvyšujícího součinitele bezpečnosti rozhodne Technická komise ve spolupráci s hlavním technikem a odborným oponentem projektu. U amatérských staveb rozhodne o použití součinitele hlavní technik s technikem stavebního dozoru. “

4.1.2 Zatížení VOP

Předpis UL 2 obsahuje čtyři paragrafy zabývající se zatížením vodorovných ocasních ploch.

UL 2 § 421 Vyvažovací zatížení udává, že VOP musí být navrženy pro vyvažovací zatížení, vyskytující se v jakémkoliv bodě obálky obrátů při kladně i záporně vysunutých nebo zasunutých klapkách. Přitom vyvažovací zatížení je takové, které zachová rovnováhu při daných podmínkách letu, aniž by došlo ke klopivému zrychlení kolem příčné osy [2].

UL 2 § 423 Obratová zatížení udává, že při pilotem vyvolaných obratech (při všech rychlostech až do V_D) musí být VOP navrženy na vzniklá obratová zatížení [2].

UL 2 § 425 Poryvová zatížení udává, že síly působící na VOP se vypočítají podle následujícího vzorce, není-li k dispozici výpočet odpovídající skutečným podmínkám.

V následující části je citováno z předpisu UL 2 – Část I. [2, str. 28].

$$P_{VOP} = p_0 + 0,5 \cdot \rho_0 \cdot a_{VOP} \cdot S_{VOP} \cdot U \cdot k_{VOP} \cdot V \cdot \left(1 - \frac{d\varepsilon}{d\alpha}\right), \text{ kde:}$$

P_{VOP} = síla na vodorovné ocasní plochy [N]

p_0 = vyvažovací síla na VOP, která působí před zatížením poryvem [N]

ρ_0 = hustota vzduchu při hladině moře [1,225 kg/m³]

a_{VOP} = sklon vztlakové čáry VOP [1/rad]

S_{VOP} = plocha VOP [m²]

U = rychlost poryvu [m/s]

k_{VOP} = zmírňující součinitel (může být použita stejná hodnota jako u křídla) [/]

V = rychlost letu [m/s]

$\frac{d\varepsilon}{d\alpha}$ = derivace zešikmení proudu podle úhlu náběhu v místě VOP [/]

UL 2 § 427 Nesymetrická zatížení udává, že při předpokladu velkého zatížení z vrtulového proudu na OP a kormidlo, je nutné tato zatížení spočítat podrobněji. Pokud se jedná o běžné zatížení, je možné uvažovat, že na jednu polovinu VOP působí 100 %, zatímco na druhou polovinu 70 % maximálního zatížení při symetrických letových podmínkách [2].

4.1.3 Mechanické vlastnosti použitého uhlíkového kompozitu

Zde jsou uvedeny mechanické vlastnosti uhlíkového kompozitu použitého na výrobu stabilizátoru v této práci.

Pro jednosměrnou tkaninu:

Jednosměrná tkanina má tloušťku jedné vrstvy 0,13 mm.

- Mez pevnosti v tahu:

$$\sigma_{pt} = 1\,700\text{ MPa} \quad (4.2)$$

- Mez pevnosti v tlaku:

$$\sigma_{pd} = 900\text{ MPa} \quad (4.3)$$

Pro vícesměrnou tkaninu:

Vícesměrná tkanina má tloušťku jedné vrstvy 0,2 mm.

- Pevnost ve smyku:

$$\tau_{ps} = 120\text{ MPa} \quad (4.4)$$

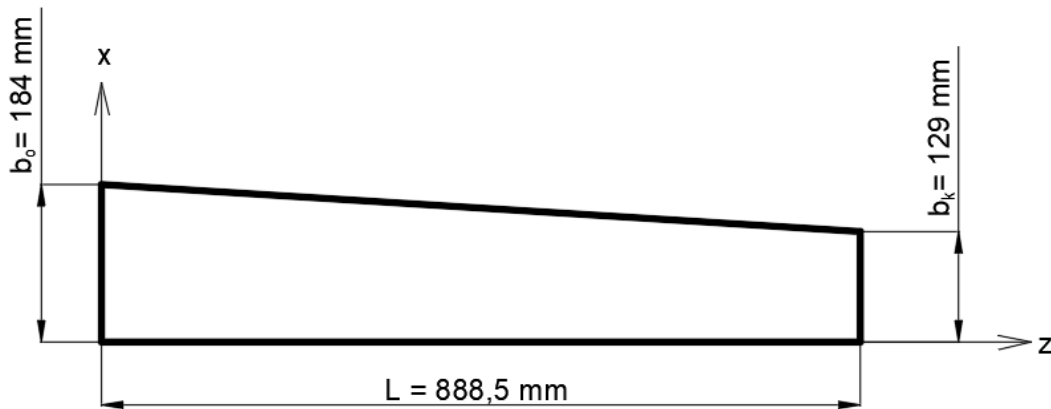
- Youngův modul pružnosti v tahu:

$$E = 74\,160\text{ MPa} \quad (4.5)$$

5 Stanovení zatížení stabilizátoru

Během letu působí na VOP zatížení vyvolané vychýlením kormidla (manévrem) a zatížení při změně úhlu náběhu vyvolané poryvem větru. Základní rozměry VOP a navrhovaného stabilizátoru vycházející z diplomové práce Ing. Valenty [1] jsou zobrazeny na obrázku 18 a v tabulce 2. Tento obrázek znázorňuje pravou polovinu daného stabilizátoru. Rozměry na obrázku jsou uvedeny v milimetrech. Je-li uvedený index „0“, značí to rozměr u kořene. Naopak index „k“ značí rozměr na volném konci.

V následujících kapitolách je postupováno podle předpisu UL 2 část I. Příloha III [2].



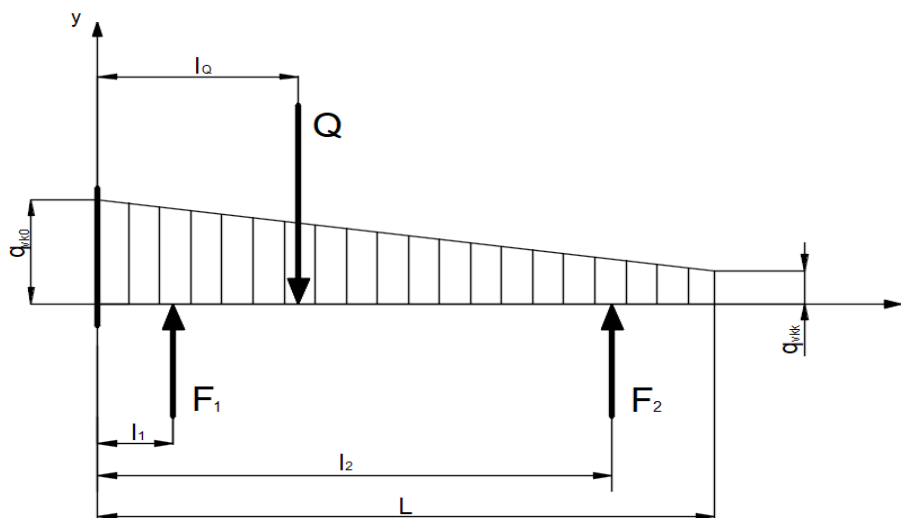
Obrázek 18: Rozměry pravé poloviny stabilizátoru

Tabulka 2: Základní rozměry VOP

Maximální vzletová hmotnost letounu	MTOM	345	kg
Plocha křídla	S	5,029	m ²
Hloubka u kořene			
Hloubka stabilizátoru	b ₁₀	0,184	m
Hloubka od odtokové hrany po osu otáčení kormidla	b ₂₀	0,025	m
Hloubka od osy otáčení kormidla po odtokovou hranu	b ₃₀	0,209	m
Hloubka celé VOP	b ₀	0,418	m
Hloubka na volném konci			
Hloubka stabilizátoru	b _{1k}	0,129	m
Hloubka od odtokové hrany po osu otáčení kormidla	b _{2k}	0,0175	m
Hloubka od osy otáčení kormidla po odtokovou hranu	b _{3k}	0,1465	m
Hloubka celé VOP	b _k	0,293	m
Polovina rozpětí VOP	L	0,8885	m

5.1 Reakce ze závěsů

Stabilizátor bude spojen k výškovému kormidlu pomocí závěsů. Z těchto závěsů vstupují do stabilizátoru reakce. Tyto reakce jsou převzaty z bakalářské práce pana Lukáše Hofrichtera, která se zabývá návrhem výškového kormidla pro letoun z diplomové práce Ing. Valenty [1]. Působení zmiňovaných reakcí je vyznačeno na obrázku 19 a jejich velikosti jsou uvedeny v tabulce 3. Při výpočtu stabilizátoru jsou reakce uvažovány s opačným znaménkem než při výpočtu výškového kormidla.



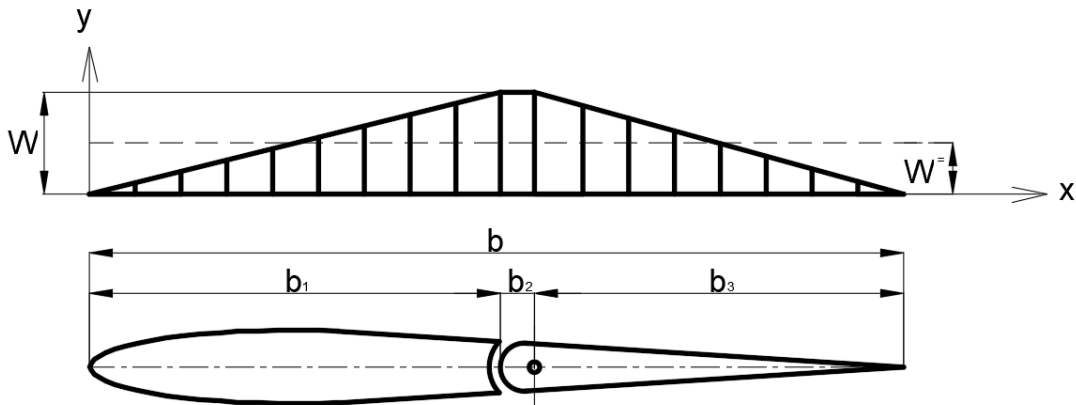
Obrázek 19: Schéma zatížení výškového kormidla

Tabulka 3: Velikost zatížení VOP a jejich působišť

Výslednice spojitého zatížení	Q	300,312	N
Rameno výslednice spojitého zatížení	l_Q	0,418	m
Vzdálenost prvního závěsu od osy letounu	l_1	0,0335	m
Vzdálenost druhého závěsu od osy letounu	l_2	0,63	m
Reakce prvního závěsu	F_1	-101,769	N
Reakce druhého závěsu	F_2	-198,543	N

5.2 Manévr

Následující obrázek (obrázek 20) udává zatížení VOP při manévru [2].



Obrázek 20: Zatěžující obrazec při manévru

kde,

W ... velikost měrného zatížení na ploše [N]

$W^=$... velikost průměrného provozního zatížení [Pa]

5.2.1 Měrné a spojitě zatížení při manévru

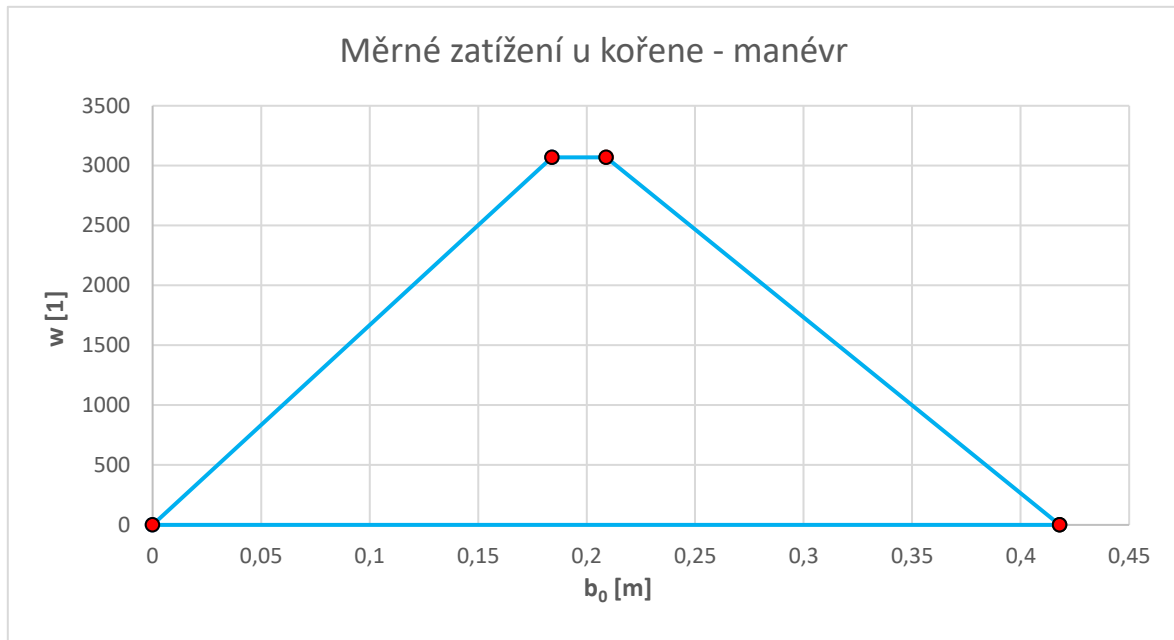
Na začátku je potřeba vypočítat průměrné provozní zatížení plochy podle rovnice (5.1) [2].

$$W^= = 220 + 20,5 \cdot \frac{MTOM}{S} = 220 + 20,5 \cdot \frac{345}{5,029} = 1\,626,343 \text{ Pa} \quad (5.1)$$

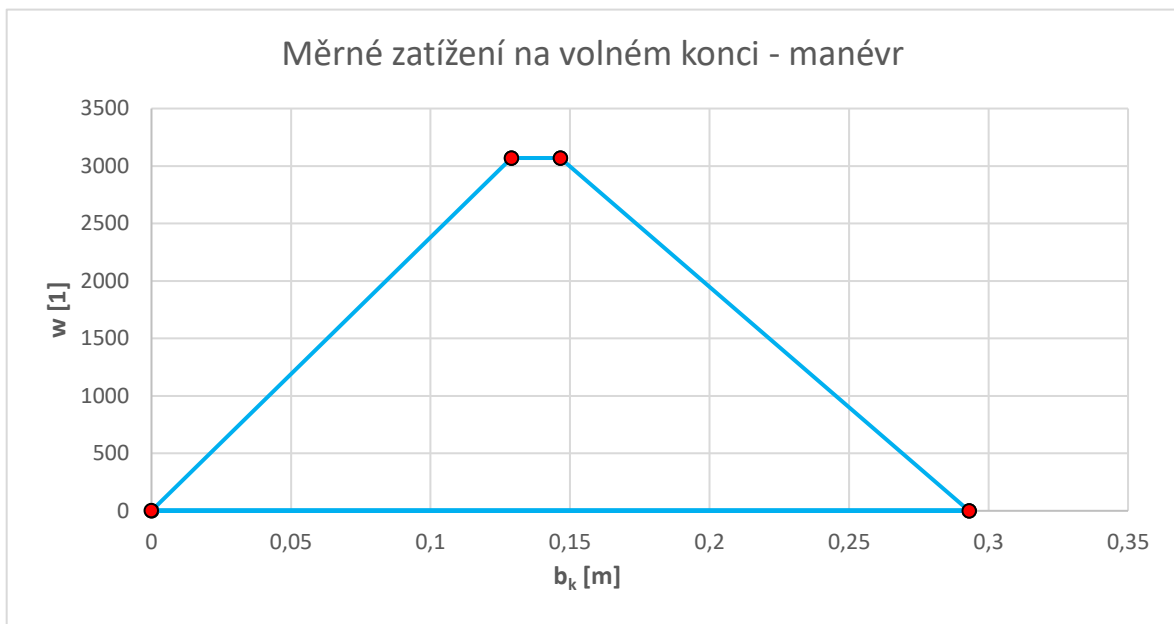
Následně je možné vypočítat velikost měrného zatížení na ploše a sestavit zatěžující obrázce u kořene a na volném konci.

$$W_0^M = \frac{W^= \cdot b_0}{\frac{1}{2} \cdot b_{10} + b_{20} + \frac{1}{2} \cdot b_{30}} = \frac{1\,626,343 \cdot 0,418}{\frac{1}{2} \cdot 0,184 + 0,025 + \frac{1}{2} \cdot 0,209} = 3\,069,126 \quad (5.2)$$

$$W_k^M = \frac{W^= \cdot b_k}{\frac{1}{2} \cdot b_{1k} + b_{2k} + \frac{1}{2} \cdot b_{3k}} = \frac{1\,626,343 \cdot 0,293}{\frac{1}{2} \cdot 0,129 + 0,0175 + \frac{1}{2} \cdot 0,1465} = 3\,069,363 \quad (5.3)$$



Graf č. 1: Průběh měrného zatížení VOP u kořene při manévru

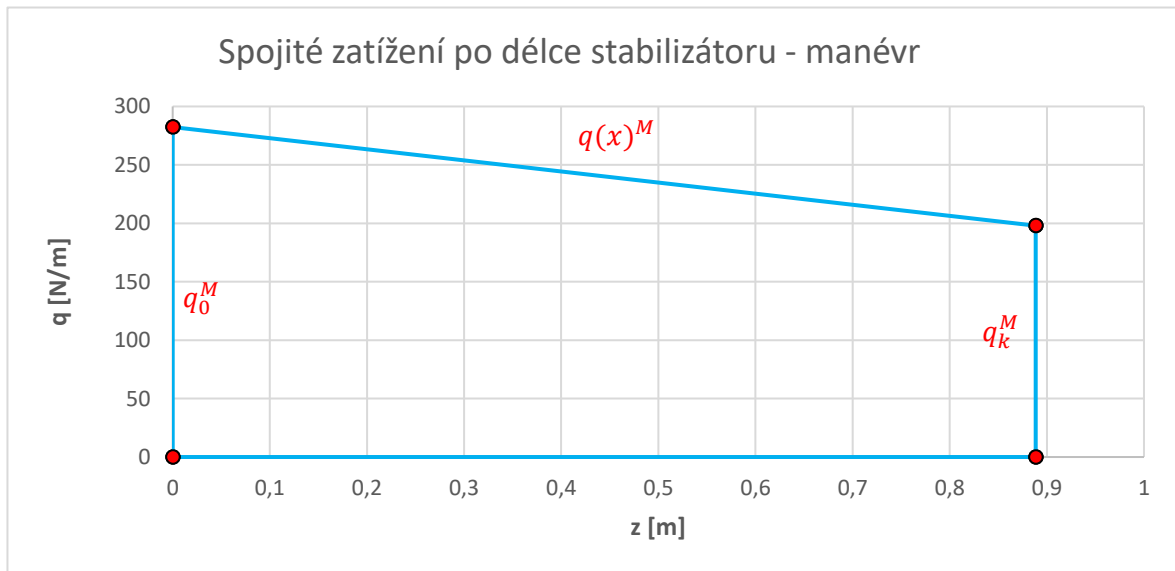


Graf č. 2: Průběh měrného zatížení VOP na volném konci při manévru

Ze zjištěného měrného zatížení je následně vypočítáno spojité zatížení po celé délce stabilizátoru (rovnice (5.4) a (5.5)). Protože hloubka stabilizátoru není konstantní, nebude ani spojité zatížení mít konstantní průběh. Spojité zatížení na délce stabilizátoru je vyneseno v grafu 3.

$$q_0^M = W_0^M \cdot \frac{b_{10}}{2} = 3\,069,126 \cdot \frac{0,184}{2} = 282,36 \text{ N/m} \quad (5.4)$$

$$q_k^M = W_k^M \cdot \frac{b_{1k}}{2} = 3\,069,363 \cdot \frac{0,129}{2} = 197,974 \text{ N/m} \quad (5.5)$$



Graf č. 3: Průběh spojitého zatížení po délce stabilizátoru při manévru

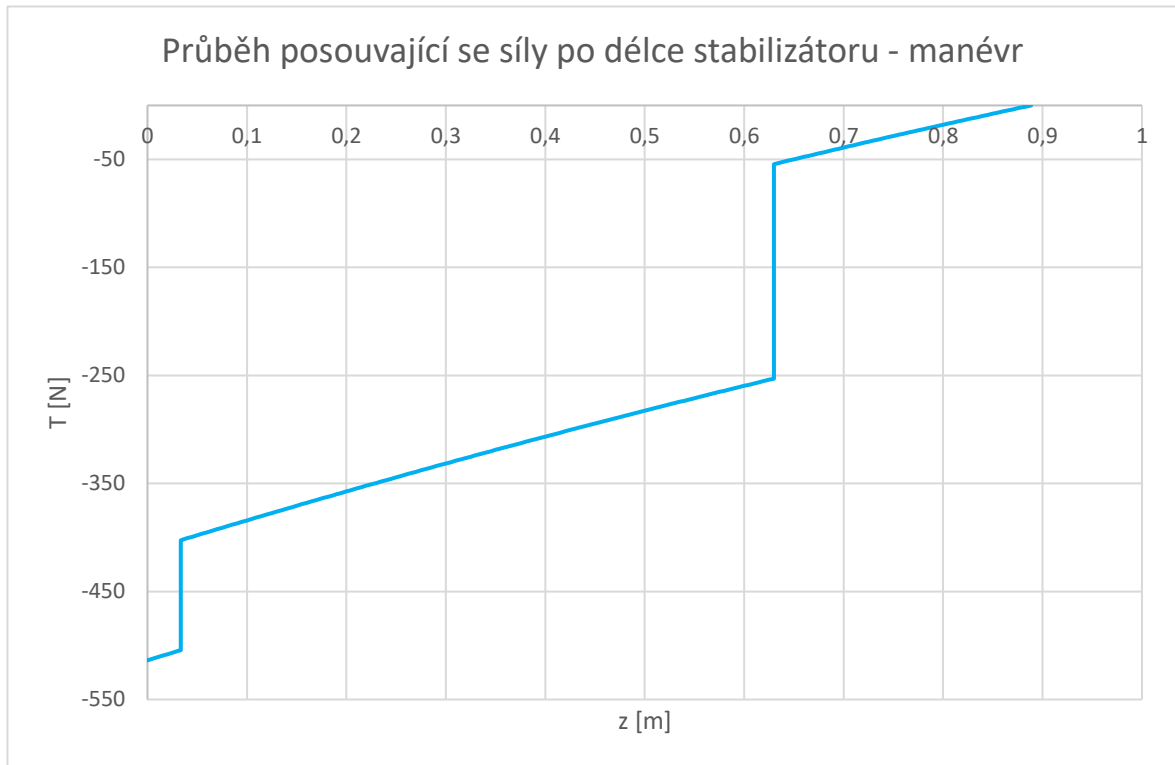
5.2.2 Posouvající síla a ohybový moment při manévru

Výpočet posouvající síly je proveden integrací spojitého zatížení stabilizátoru na vzdálenosti L se zavedenými reakcemi od závěsů (rovnice (5.6)). Průběh posouvající síly je vyneseno v grafu 4 [17].

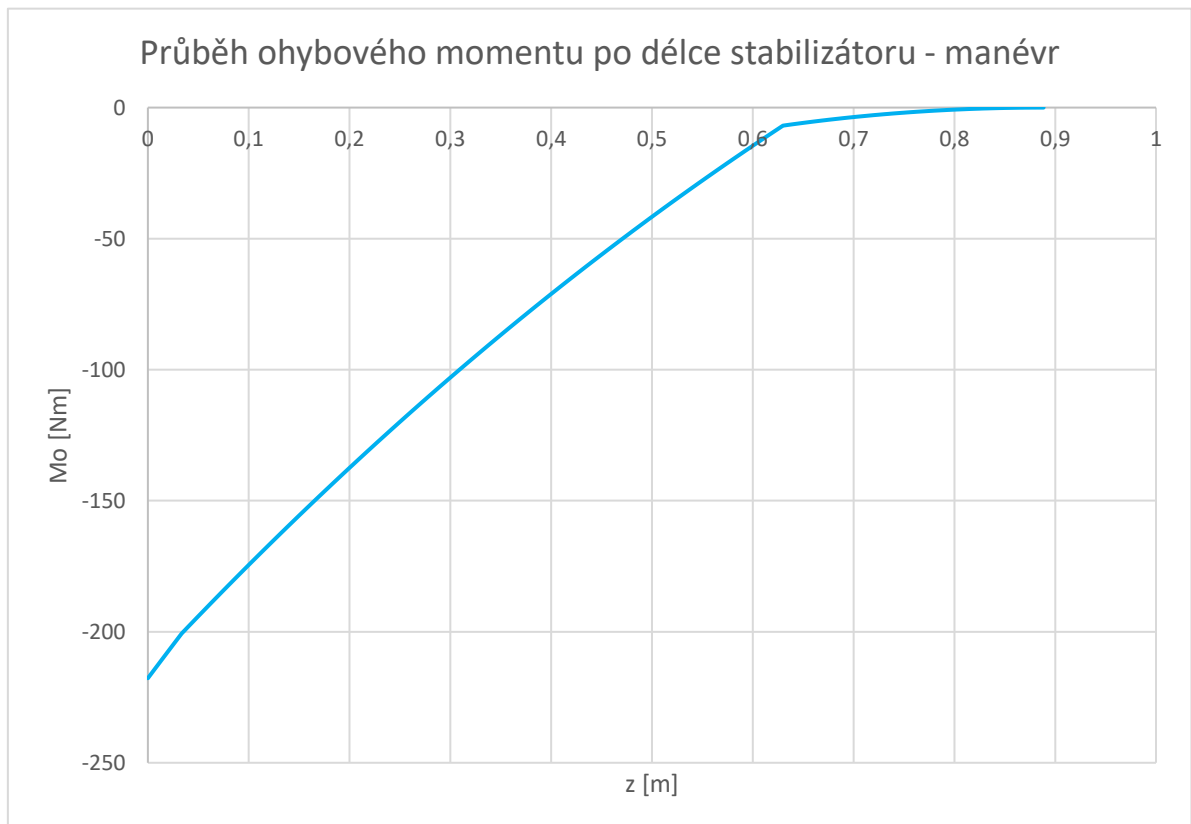
Ohybový moment je získán pomocí Schwedlerovy věty integrací posouvající síly na vzdálenosti L se zavedenými reakcemi od závěsů (rovnice (5.7)). Průběh ohybového momentu je vyneseno v grafu 5 [17].

$$T^M = \int_0^L q(z)^M \cdot dz \quad (5.6)$$

$$Mo^M = \int_0^L T(z)^M \cdot dz \quad (5.7)$$



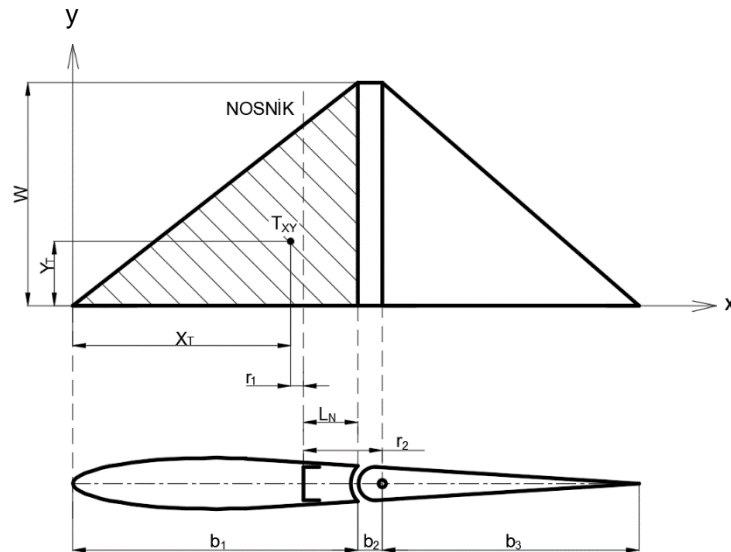
Graf č. 4: Průběh posouvající síly po délce stabilizátoru při manévru



Graf č. 5: Průběh ohybového momentu po délce stabilizátoru při manévru

5.2.3 Kroutící moment při manévru

Kroutící moment na stabilizátor působí od posouvající síly na rameni od místa působení výslednice posouvající síly k poloze nosníku. Dále do výpočtu vstupují reakce ze závěsů na rameni od osy otáčení výškového kormidla k poloze nosníku. Výslednice posouvající síly působí v těžišti obrazce pro stabilizátor z obrázku 20. Všechny hodnoty potřebné k výpočtu kroutícího momentu jsou zakresleny na obrázku 21.



Obrázek 21: Poloha těžiště výslednice spojitého zatížení

Výpočet souřadnic těžiště obrazce u kořene:

$$x_{T0} = \frac{2}{3} \cdot b_{10} = \frac{2}{3} \cdot 184 = 122,6 \text{ mm} \quad (5.8)$$

$$y_{T0} = \frac{1}{3} \cdot W_0^M = \frac{1}{3} \cdot 3\,069,126 = 1\,023,042 \quad (5.9)$$

Vzdálenost nosníku od odtokové hrany u kořene je odečtena z modelu:

$$L_{N0} = 47,345 \text{ mm} \quad (5.10)$$

Následně je vypočítáno rameno od polohy nosníku u kořene k těžišti:

$$r_{10} = b_{10} - x_{T0} - L_{N0} = 184 - 122,6 - 47,345 = 14,055 \text{ mm} \quad (5.11)$$

Rameno od osy otáčení k poloze nosníku u kořene je odečteno z modelu:

$$r_{20} = 58,43 \text{ mm} \quad (5.12)$$

Výpočet souřadnic těžiště obrazce na volném konci:

$$x_{Tk} = \frac{2}{3} \cdot b_{1k} = \frac{2}{3} \cdot 129 = 86 \text{ mm} \quad (5.13)$$

$$y_{Tk} = \frac{1}{3} \cdot W_k^M = \frac{1}{3} \cdot 3\,069,363 = 1\,023,121 \quad (5.14)$$

Vzdálenost nosníku od odtokové hrany na volném konci je odečtena z modelu:

$$L_{Nk} = 41,53 \text{ mm} \quad (5.15)$$

Následně je vypočítáno rameno od polohy nosníku na volném konci k těžišti:

$$r_{1k} = b_{1k} - x_{Tk} - L_{Nk} = 129 - 86 - 41,53 = 1,47 \text{ mm} \quad (5.16)$$

Rameno od osy otáčení k poloze nosníku u kořene je odečteno z modelu:

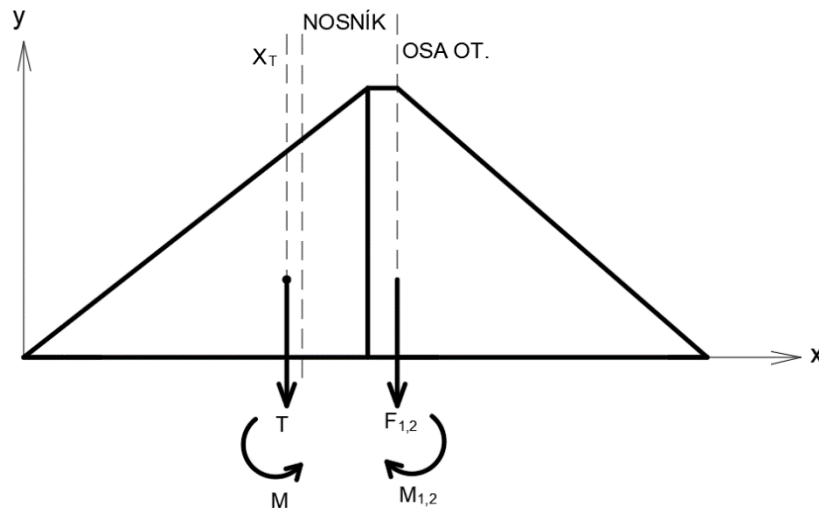
$$r_{2k} = 50,982 \text{ mm} \quad (5.17)$$

Ze zjištěných ramen u kořene a na volném konci, je potřeba sestavit předpis funkce, udávající souřadnice při jednotlivých řezech po rozpětí stabilizátoru:

$$r_1(z) = \frac{r_{1k} - r_{10}}{L} \cdot z + r_{10} \quad (5.18)$$

$$r_2(z) = \frac{r_{2k} - r_{20}}{L} \cdot z + r_{20} \quad (5.19)$$

Tímto jsou zjištěna ramena, na nichž posouvající síla a reakce od závěsů způsobují kroutící moment. Následuje tedy výpočet kroutícího momentu. Síly a ramena jsou dosazovány v základních jednotkách (newton, metr). Obrázek 22 znázorňuje působení momentu od reakcí a od posouvající síly. Tyto momenty působí proti sobě.



Obrázek 22: Působení momentů vytvářející kroutící moment

Pro „z“ v intervalu (0; 0,0335) od kořene:

$$Mk^M = T^M \cdot r_1 - F_1 \cdot r_2 - F_2 \cdot r_2 \quad (5.20)$$

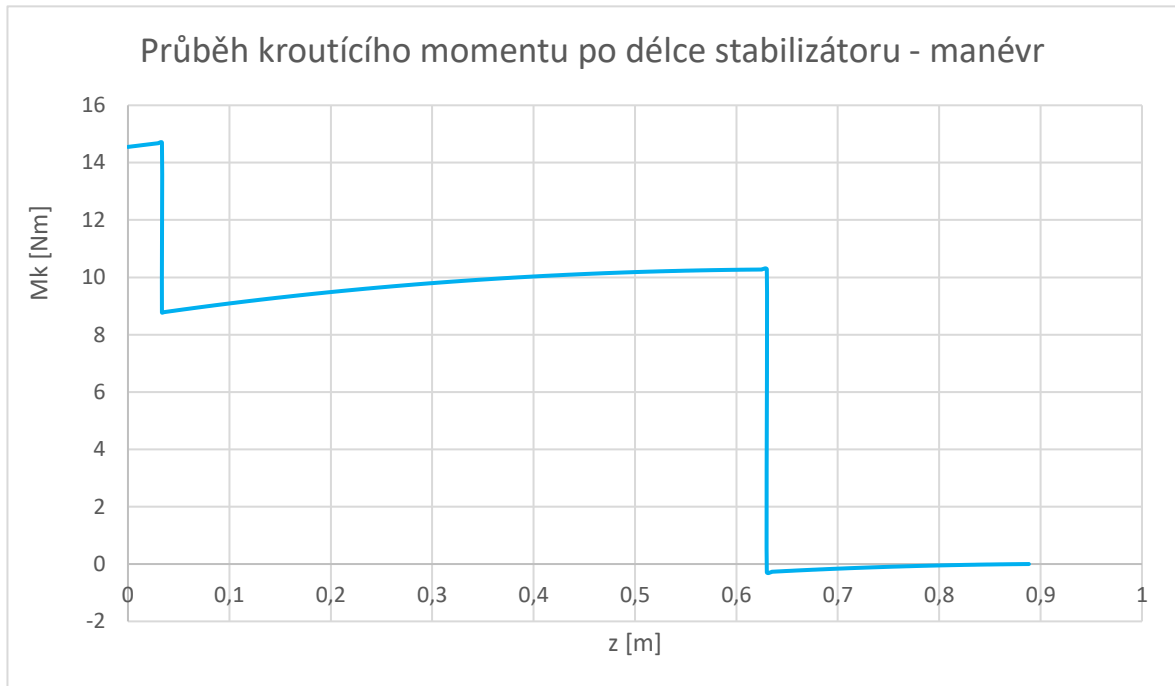
Pro „z“ v intervalu (0,0335; 0,63) od kořene:

$$Mk^M = T^M \cdot r_1 - F_2 \cdot r_2 \quad (5.21)$$

Pro „z“ v intervalu (0,63; 0,8885) od kořene:

$$Mk^M = T^M \cdot r_1 \quad (5.22)$$

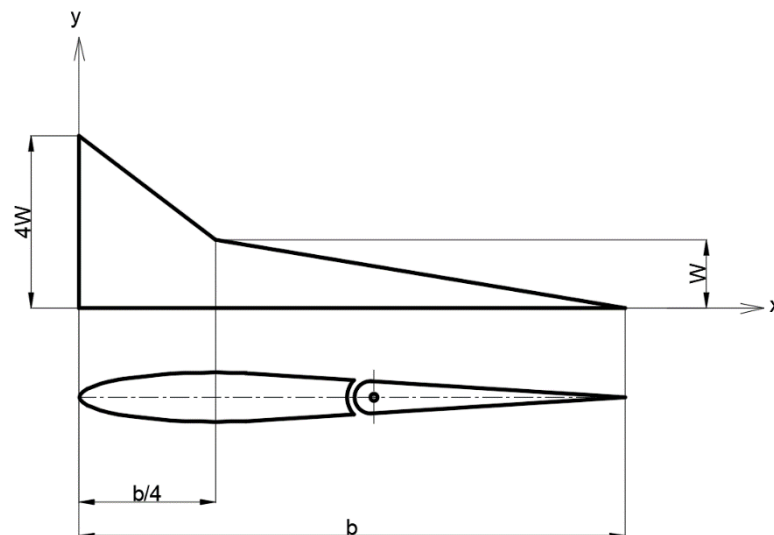
Celý průběh kroutícího momentu je vyneseno v grafu 6.



Graf č. 6: Průběh kroučícího momentu po délce stabilizátoru při manévru

5.3 Poryv

Následující obrázek (obrázek 23) udává zatížení VOP při poryvu [2].



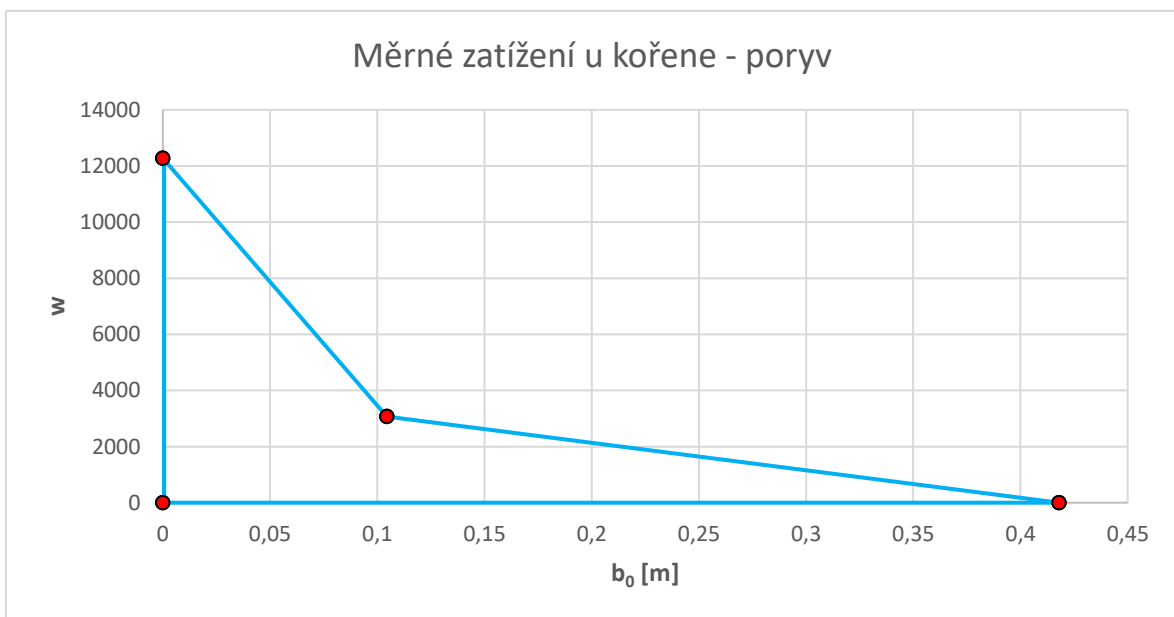
Obrázek 23: Zatěžující obrazec při poryvu

5.3.1 Měrné a spojité zatížení při poryvu

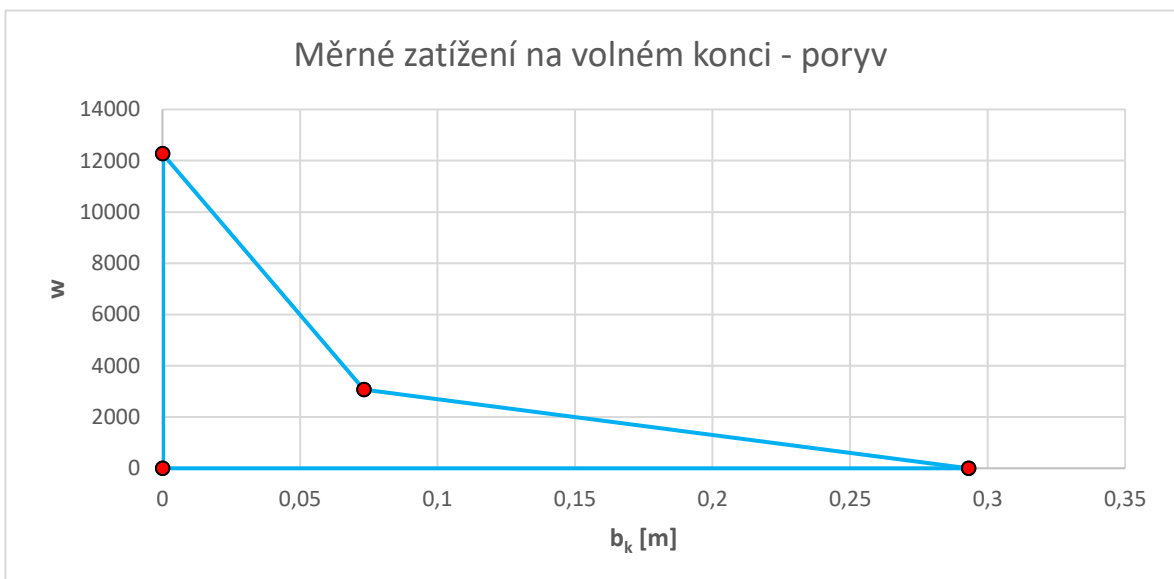
Velikost měrného zatížení na ploše bylo zjištěno v rovnicích (5.2) a (5.3). Po dopočítání vztahů (5.23) a (5.24), je tedy možné sestavit grafy 7 a 8 podle obrázku 23.

$$W_0^P = 4 \cdot W_0^M = 4 \cdot 3\,069,126 = 12\,276,504 \quad (5.23)$$

$$W_k^P = 4 \cdot W_k^M = 4 \cdot 3\,069,363 = 12\,277,452 \quad (5.24)$$



Graf č. 7: Průběh měrného zatížení VOP u kořene při poryvu

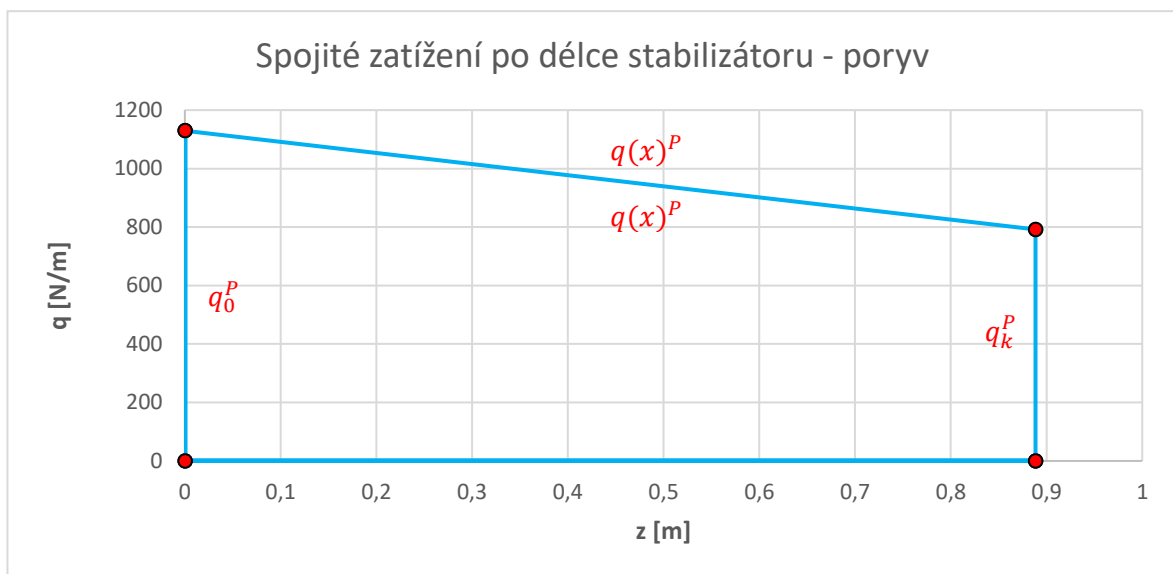


Graf č. 8: Průběh měrného zatížení VOP na volném konci při poryvu

Ze zjištěného měrného zatížení je následně vypočítáno spojité zatížení po délce stabilizátoru (rovnice (5.25) a (5.26)) při poryvu. Následně je vyneseno do grafu 9.

$$q_0^P = W_0^P \cdot \frac{b_{10}}{2} = 12\,276,504 \cdot \frac{0,184}{2} = 1\,129,438 \text{ N/m} \quad (5.25)$$

$$q_k^P = W_k^P \cdot \frac{b_{1k}}{2} = 12\,277,452 \cdot \frac{0,129}{2} = 791,896 \text{ N/m} \quad (5.26)$$

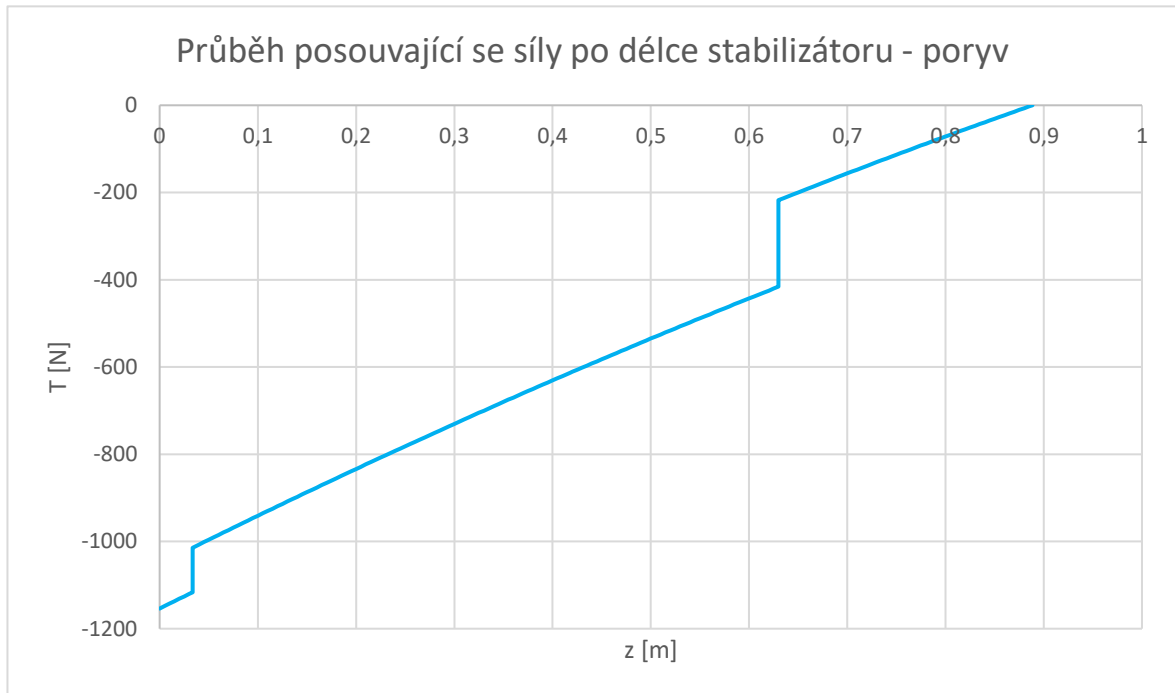


Graf č. 9: Průběh spojitého zatížení po délce stabilizátoru při poryvu

5.3.2 Posouvající síla a ohybový moment při poryvu

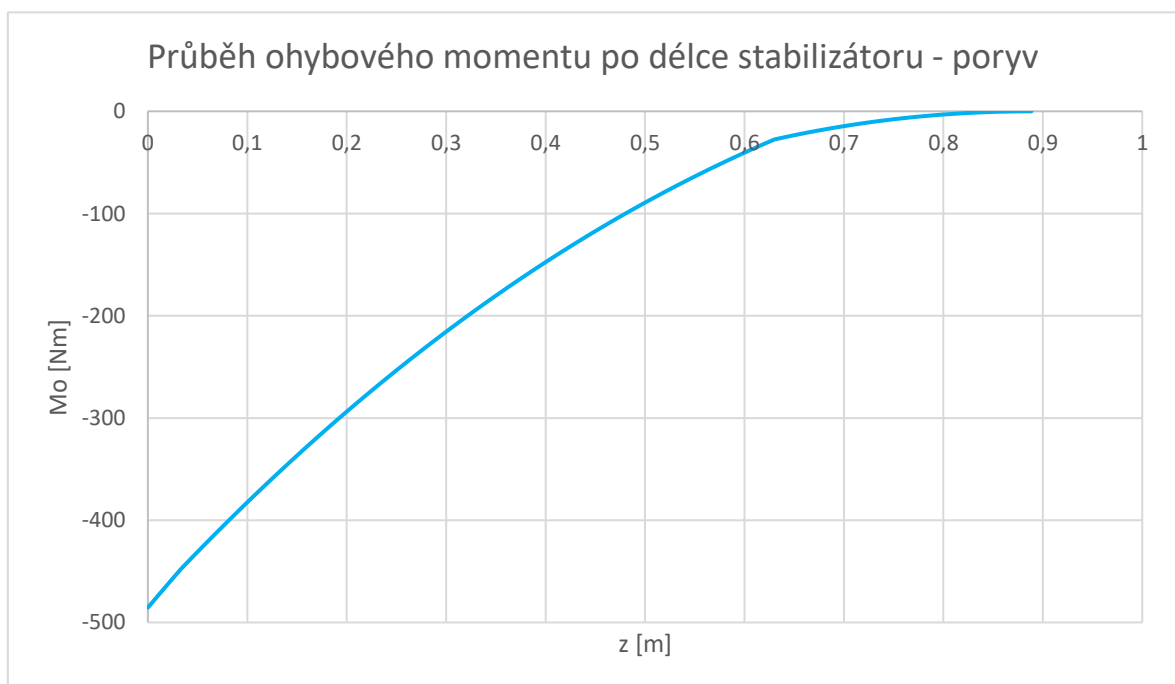
Výpočet posouvající síly (rovnice (5.27)) při poryvu je ekvivalentní výpočtu posouvající síly při manévru (rovnice (5.6)). Pouze je dosazeno spojité zatížení při poryvu. Ekvivalentní je i výpočet ohybového momentu (rovnice (5.28)), podle rovnice (5.7), pouze je dosazena posouvající síla při poryvu [17].

$$T^P = \int_0^L q(z)^P \cdot dz \quad (5.27)$$



Graf č. 10: Průběh posouvající síly po délce stabilizátoru při poryvu

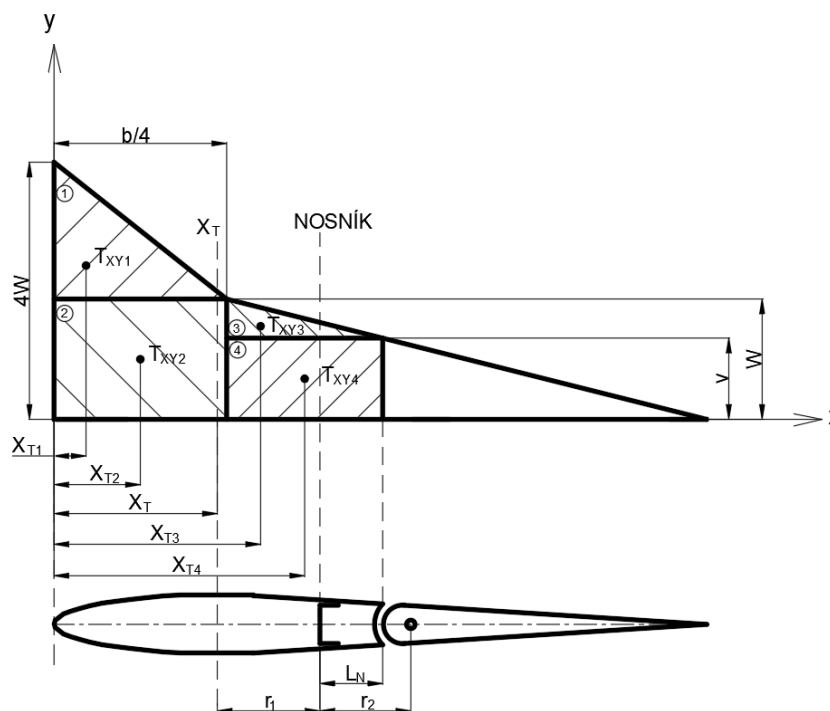
$$M_o^P = \int_0^L T(z)^P \cdot dx \quad (5.28)$$



Graf č. 11: Průběh ohybového momentu po délce stabilizátoru při poryvu

5.3.3 Kroutící moment při poryvu

Výpočet kroutícího momentu při poryvu je podobný výpočtu kroutícího momentu při manévru. Je ale potřeba získat působiště výslednice posouvající síly z obrazce pro stabilizátor z obrázku 23. Všechny hodnoty potřebné pro výpočet kroutícího momentu jsou zakresleny na obrázku 24. Jako první je potřeba vypočítat plochy a těžiště všech 4 obrazců, z nichž je následně možné dopočítat těžiště celého obrazce. V tomto těžišti působí výslednice posouvající síly. Pro urychlení výpočtů není spočítána souřadnice „y“ hledaného těžiště, protože není k výpočtu kroutícího momentu potřeba.



Obrázek 24: Působení kroutícího momentu při poryvu

První budou provedeny výpočty pro obrazec u kořene.

Hodnota „V“ je odečtena z obrazce vytvořeného v programu AutoCAD:

$$V = 2\,291 \text{ [l]} \quad (5.28)$$

Výpočet těžiště a plochy obrazce 1:

$$x_{T10} = \frac{1}{3} \cdot \frac{b_0}{4} = \frac{1}{3} \cdot \frac{418}{4} = 34,833 \text{ mm} \quad (5.29)$$

$$S_{10} = \frac{(4 \cdot W_0^P - W_0^P) \cdot \frac{b_0}{4}}{2} = \frac{(4 \cdot 3\,069,126 - 3\,069,126) \cdot \frac{418}{4}}{2} \quad (5.30)$$

$$S_{10} = 481\,085,5 \text{ mm}^2$$

Výpočet těžiště a plochy obrazce 2:

$$x_{T20} = \frac{1}{2} \cdot \frac{b_0}{4} = \frac{1}{2} \cdot \frac{418}{4} = 52,25 \text{ mm} \quad (5.31)$$

$$S_{20} = W_0^P \cdot \frac{b_0}{4} = 3\,069,126 \cdot \frac{418}{4} = 320\,723,667 \text{ mm}^2 \quad (5.32)$$

Výpočet těžiště a plochy obrazce 3:

$$x_{T30} = \frac{1}{3} \cdot \left(b_{10} - \frac{b_0}{4}\right) + \frac{b_0}{4} = \frac{1}{3} \cdot \left(184 - \frac{418}{4}\right) + \frac{418}{4} = 131 \text{ mm} \quad (5.33)$$

$$S_{30} = \frac{(W_0^P - V) \cdot (b_{10} - \frac{b_0}{4})}{2} = \frac{(3\,069,126 - 2\,291) \cdot (184 - \frac{418}{4})}{2} \quad (5.44)$$

$$S_{30} = 30\,930,509 \text{ mm}^2$$

Výpočet těžiště a plochy obrazce 4:

$$x_{T40} = \frac{1}{2} \cdot \left(b_{10} - \frac{b_0}{4}\right) + \frac{b_0}{4} = \frac{1}{2} \cdot \left(184 - \frac{418}{4}\right) + \frac{418}{4} = 144,25 \text{ mm} \quad (5.35)$$

$$S_{40} = \left(b_{10} - \frac{b_0}{4}\right) \cdot V = \left(184 - \frac{418}{4}\right) \cdot 2291 = 182\,134,5 \text{ mm}^2 \quad (5.36)$$

Výpočet celkové plochy:

$$S_0 = S_{10} + S_{20} + S_{30} + S_{40} = 1\,014\,874,176 \text{ mm}^2 \quad (5.37)$$

Výpočet celkového těžiště:

$$x_{T0} = \frac{x_{T10} \cdot S_{10} + x_{T20} \cdot S_{20} + x_{T30} \cdot S_{30} + x_{T40} \cdot S_{40}}{S} = 62,905 \text{ mm} \quad (5.38)$$

Vzdálenost nosníku od odtokové hrany je odečtena z modelu:

$$L_{N0} = 47,345 \text{ mm} \quad (5.39)$$

Výpočet ramena od polohy nosníku k těžišti:

$$r_{10} = b_{10} - x_{T0} - L_{N0} = 184 - 62,905 - 47,345 = 73,75 \text{ mm} \quad (5.10)$$

Rameno od osy otáčení k poloze nosníku je odečteno z modelu:

$$r_{20} = 58,43 \text{ mm} \quad (5.11)$$

Nyní budou provedeny výpočty pro obrazec na volném konci.

Hodnota „V“ je odečtena z obrazce vytvořeného v programu AutoCAD:

$$V = 2\,291 \text{ [/]} \quad (5.42)$$

Výpočet těžiště a plochy obrazce 1:

$$x_{T1k} = \frac{1}{3} \cdot \frac{b_k}{4} = \frac{1}{3} \cdot \frac{293}{4} = 24,416 \text{ mm} \quad (5.43)$$

$$S_{1k} = \frac{(4 \cdot W_k^P - W_k^P) \cdot \frac{b_k}{4}}{2} = \frac{(4 \cdot 3\,069,363 - 3\,069,363) \cdot \frac{293}{4}}{2} \quad (5.44)$$

$$S_{1k} = 337\,246,26 \text{ mm}^2$$

Výpočet těžiště a plochy obrazce 2:

$$x_{T2k} = \frac{1}{2} \cdot \frac{b_k}{4} = \frac{1}{2} \cdot \frac{293}{4} = 36,625 \text{ mm} \quad (5.45)$$

$$S_{2k} = W_k^P \cdot \frac{b_k}{4} = 3\,069,363 \cdot \frac{293}{4} = 224\,830,84 \text{ mm}^2 \quad (5.46)$$

Výpočet těžiště a plochy obrazce 3:

$$x_{T3k} = \frac{1}{3} \cdot \left(b_{1k} - \frac{b_k}{4} \right) + \frac{b_k}{4} = \frac{1}{3} \cdot \left(129 - \frac{293}{4} \right) + \frac{293}{4} = 91,83 \text{ mm} \quad (5.47)$$

$$S_{3k} = \frac{(W_k^P - V) \cdot \left(b_{1k} - \frac{b_k}{4} \right)}{2} = \frac{(3\,069,363 - 2\,291) \cdot \left(129 - \frac{293}{4} \right)}{2} \quad (5.48)$$

$$S_{3k} = 21\,696,87 \text{ mm}^2$$

Výpočet těžiště a plochy obrazce 4:

$$x_{T4k} = \frac{1}{2} \cdot \left(b_{1k} - \frac{b_k}{4} \right) + \frac{b_k}{4} = \frac{1}{2} \cdot \left(129 - \frac{293}{4} \right) + \frac{293}{4} = 101,125 \text{ mm} \quad (5.49)$$

$$S_{4k} = \left(b_{1k} - \frac{b_k}{4} \right) \cdot V = \left(129 - \frac{293}{4} \right) \cdot 2291 = 127\,723,25 \text{ mm}^2 \quad (5.50)$$

Výpočet celkové plochy:

$$S_k = S_{1k} + S_{2k} + S_{3k} + S_{4k} = 711\,497,22 \text{ mm}^2 \quad (5.51)$$

Výpočet celkového těžiště:

$$x_{Tk} = \frac{x_{T1k} \cdot S_{1k} + x_{T2k} \cdot S_{2k} + x_{T3k} \cdot S_{3k} + x_{T4k} \cdot S_{4k}}{S_k} = 44,1 \text{ mm} \quad (5.52)$$

Vzdálenost nosníku od odtokové hrany je odečtena z modelu:

$$L_{Nk} = 41,53 \text{ mm} \quad (5.53)$$

Výpočet ramena od polohy nosníku k těžišti:

$$r_{1k} = b_{1k} - x_{Tk} - L_{Nk} = 129 - 44,1 - 41,53 = 43,37 \text{ mm} \quad (5.54)$$

Rameno od osy otáčení k poloze nosníku je odečteno z modelu:

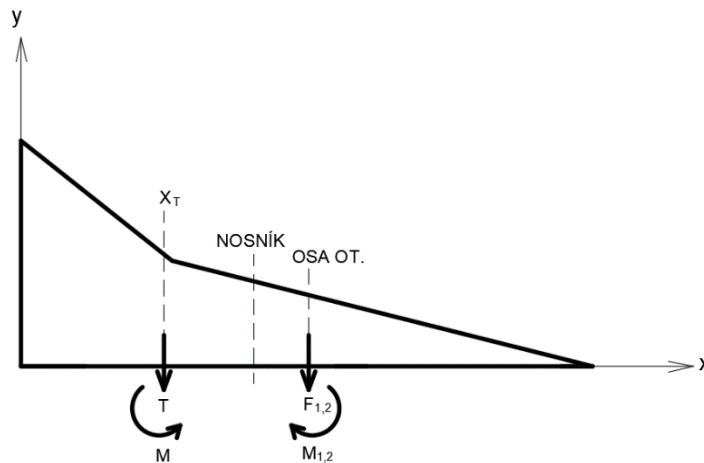
$$r_{2k} = 50,982 \text{ mm} \quad (5.55)$$

Ze zjištěných ramen u kořene a na volném konci je potřeba sestavit předpis funkce, udávající souřadnice při jednotlivých řezech po rozpětí stabilizátoru:

$$r_1(z) = \frac{r_{1k} - r_{10}}{L} \cdot z + r_{10} \quad (5.56)$$

$$r_2(z) = \frac{r_{2k} - r_{20}}{L} \cdot z + r_{20} \quad (5.57)$$

Po vypočítání ramen, na nichž posouvající síla a reakce od závěsů způsobují kroučící moment, je možné vypočítat kroučící moment. Síly jsou dosazovány v newtonech a ramena v metrech.



Obrázek 25: Momenty způsobující kroučící moment při poryvu

Na obrázku 25 je vidět, že moment způsobený od reakcí má opačný směr oproti momentu způsobeným posouvající silou.

Pro „z“ v intervalu (0; 0,0335) od kořene:

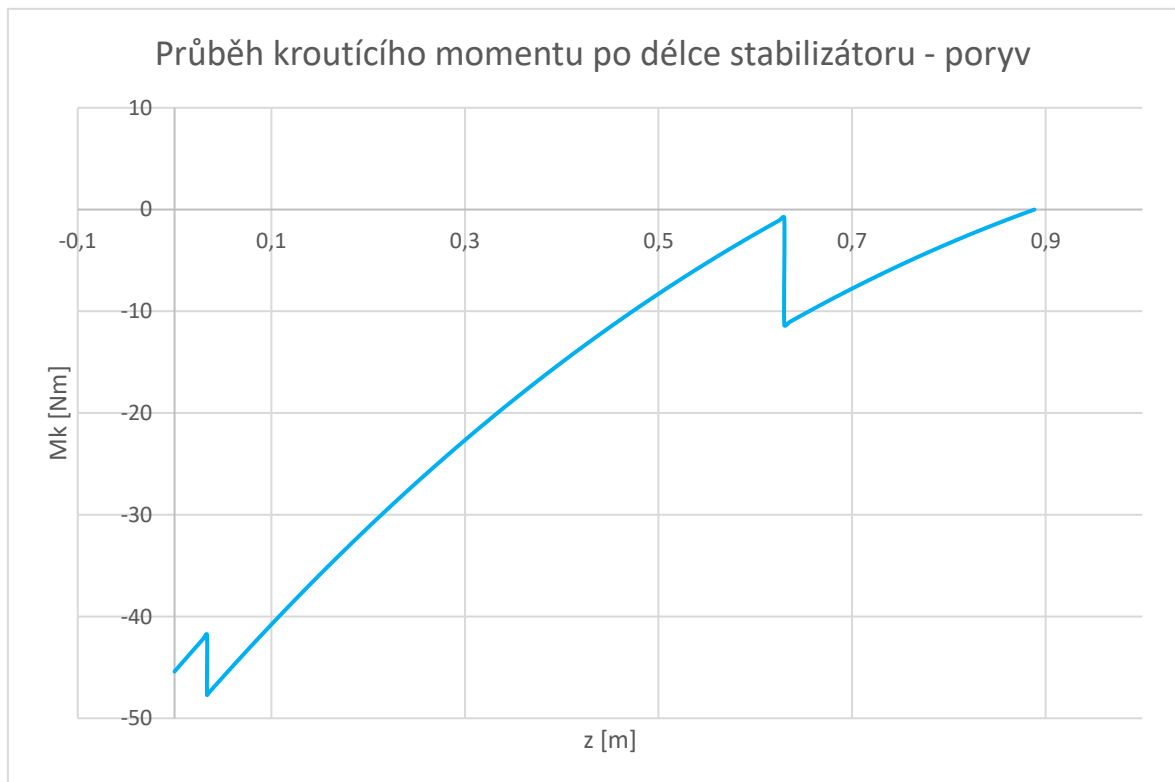
$$Mk^P = T^P \cdot r_1 - F_1 \cdot r_2 - F_2 \cdot r_2 \quad (5.58)$$

Pro „z“ v intervalu (0,0335; 0,63) od kořene:

$$Mk^P = T^P \cdot r_1 - F_2 \cdot r_2 \quad (5.59)$$

Pro „z“ v intervalu (0,63; 0,8885) od kořene:

$$Mk^P = T^P \cdot r_1 \quad (5.60)$$



Graf č. 12: Průběh kroutícího momentu po délce stabilizátoru při poryvu

5.3.4 Shrnutí zatížení

V kapitole 5 bylo vypočítáno provozní zatížení posouvající silou, ohybovým a kroutícím momentem. Všechna maximální zatížení vznikají při poryvu. V tabulce 4 jsou uvedeny maximální hodnoty těchto zatížení.

Tabulka 4: Maximální provozní zatížení stabilizátoru

Maximální provozní zatížení stabilizátoru			
Posouvající síla	T_{\max}	-1 153,864	N
Ohybový moment	$M_{O_{\max}}$	-485,477	Nm
Kroutící moment	$M_{K_{\max}}$	-47,695	Nm

6 Předběžné dimenzování

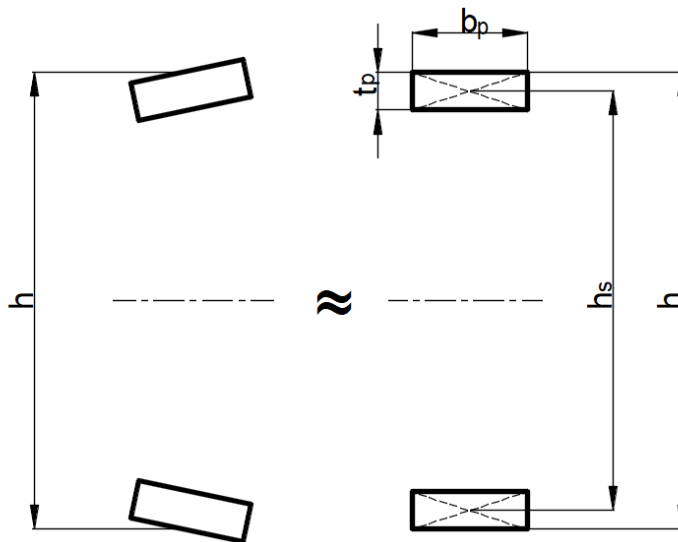
V předešlé kapitole bylo zjištěno maximální provozní zatížení působící na stabilizátor. V této kapitole je potřeba dimenzovat základní prvky stabilizátoru (pásnice nosníku a potah) na zjištěné zatížení.

6.1 Dimenzování pásnice

Pásnice nosníku je zamýšlena z jednosměrné uhlíkové tkaniny, při tloušťce jedné vrstvy 0,13 mm a s pojivem epoxidovou pryskyřicí.

6.1.1 Zjednodušení geometrie pásnice

Pásnice nosníku kopírují tvar horního a spodního potahu. Toto zakřivení je velmi malé a je možné jej pro další výpočet zanedbat (obrázek 26), čímž dojde ke značnému zjednodušení výpočtů. Zakřivení pásnice ve skutečnosti únosnost nosníku zvyšuje, takže toto zjednodušení vlastně bezpečnost nijak neohroží.



Obrázek 26: Zjednodušená geometrie pásnice

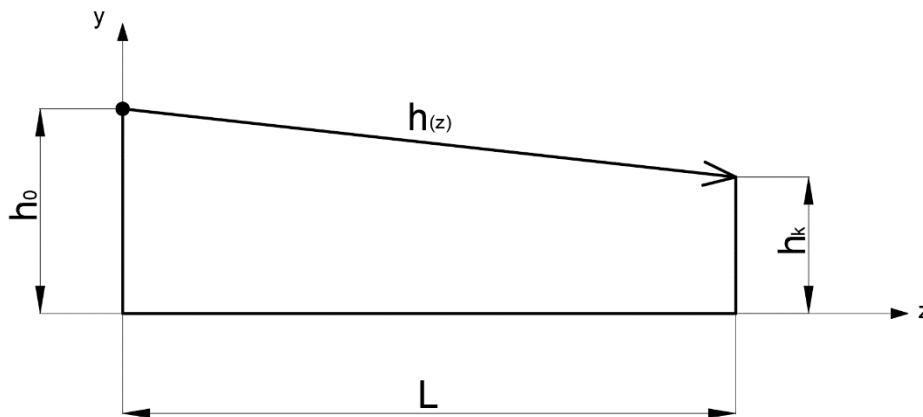
Od kořene stabilizátoru k jeho volnému konci, se výška nosníku mění lineárně. Je-li známa výška nosníku u kořene a na volném konci, je snadné zjistit předpis funkce popisující výšku nosníku po délce stabilizátoru. Výška nosníku u kořene (rovnice (6.1)) a na volném konci (rovnice (6.2)) je odečtena z modelu vytvořeném v programu Inventor Professional 2020.

$$h_0 = 47,722 \text{ mm} \quad (6.1)$$

$$h_k = 32,873 \text{ mm} \quad (6.2)$$

Předpis funkce popisující délku nosníku po délce stabilizátoru (obrázek 28):

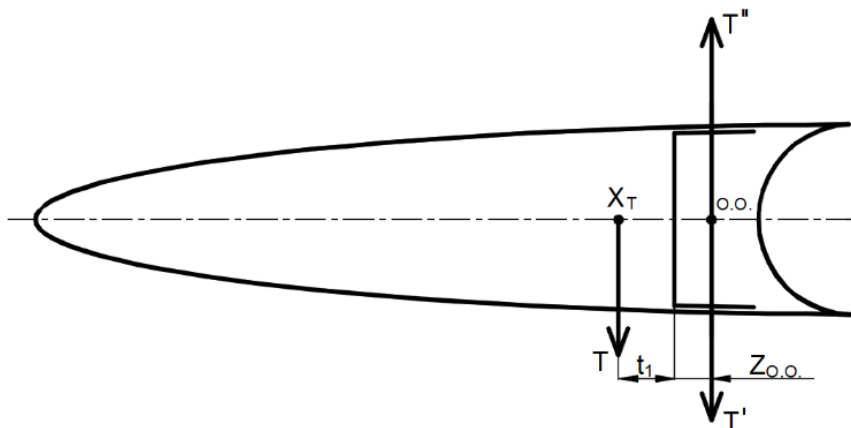
$$h(z) = h_0 + \left(\frac{h_k - h_0}{L}\right) \cdot z \quad (6.3)$$



Obrázek 27: Směrnice nosníku

6.1.2 Pevnostní výpočet

Pro výpočet pevnosti je potřeba rozdělit namáhání na čistý krut a čistý ohyb. Do místa ohybové osy nosníku se zavedou dvě protilehlé síly T' a T'' o velikosti posouvající síly T . Jak je patrné z obrázku 28, síla T' vytváří zatížení čistým ohybem a dvojice sil T'' a T kroutícím momentem. Ohybové a kroutící momenty jsou odvozeny v kapitole 5.2.2 a 5.2.3. Tento způsob rozdělení namáhání je převzat z [18].



Obrázek 28: Silové rozložení při dimenzování pásnic

Celý výpočet je postavený na pevnosti podmínce z rovnice (6.4).

$$\frac{\sigma_{pt}}{k} = \sigma_D \geq \frac{M_{o_{max}}}{W_o} \quad (6.4)$$

Modul průřezu v ohybu W_o se vypočítá podle rovnice (6.5).

$$W_o = \frac{J_z}{r_t} \quad (6.5)$$

J_z je kvadratický moment průřezu k ose z a je možné jej zjistit ze Steinerovy věty (rovnice (6.6)). Rozměr r_t je vzdálenost těžiště průřezu pásnice od osy z .

$$J_z = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot b_p \cdot t_p^3 + b_p \cdot t_p \cdot \left(\frac{h_s}{2} \right)^2 \right) \quad (6.6)$$

Dosazením rovnice (6.6) do rovnice (6.5) a dosazením této rovnice do rovnice (6.4) se vyjádří šířka pásnice b_p (rovnice (6.7)). Za r_t je dosazeno $h/2$.

$$b_p = \frac{M_{o_{max}} \cdot h}{\sigma_D \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot t_p^3 + t_p \cdot h_s^2 \right)} \quad (6.7)$$

Jedna pásnice je při vychýlení namáhána na tah a druhá na tlak. Protože obě pásnice mohou být namáhány tahem i tlakem (postupně, ne zároveň), je potřeba provést dimenzování na menší hodnotu dovoleného napětí (kapitola 4.1.3). V tomto případě je menší hodnota dovoleného napětí v tlaku (rovnice (6.8)). Tuto hodnotu je třeba ponížít koeficientem bezpečnosti, který je použit 1,875 (viz. kapitola 4.1.1).

$$\sigma_{Dd} = \frac{\sigma_{Pd}}{k} = \frac{900}{1,875} = 480 \text{ MPa} \quad (6.8)$$

Jak bylo zmíněno na začátku této kapitoly, jedna vrstva tkaniny je 0,13. Při výpočtech v příloženém souboru excel bylo zvoleno 7 vrstev. Do rovnice (6.7) je tedy dosazena tloušťka pásnice z rovnice (6.9).

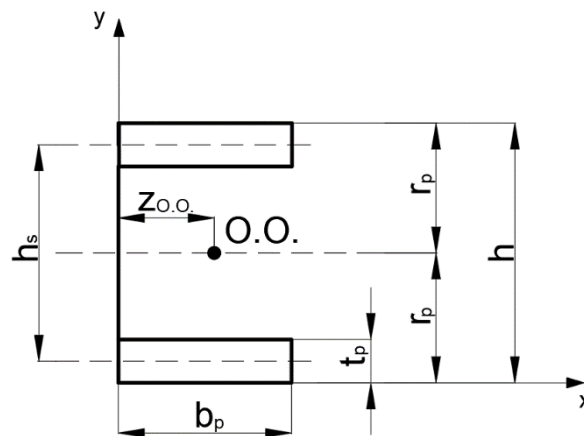
$$t_p = 7 \cdot 0,13 = 0,91 \text{ mm} \quad (6.9)$$

Poslední je potřeba odečíst z modelu vytvořeném v programu Inventor Professional 2020 střední výšku nosníku h_s . Tento rozměr by také bylo možné vypočítat odečtením tloušťky pásnice od výšky nosníku. Za proměnnou h je dosazena výška nosníku v místě maximálního ohybového momentu. Po dosazení je možné vypočítat potřebnou šířku pásnice (rovnice (6.10)).

$$b_p = 24,201 \text{ mm} \quad (6.10)$$

6.1.3 Pevností kontrola a určení bezpečnosti

V této kapitole je vypočítána bezpečnost pro rozměry navržené v předešlé kapitole. Podle obrázku 29 je určena rovnice (6.11). Nyní je potřeba vypočítat kvadratický moment průřezu k ose z , která prochází ohybovou osou (rovnice (6.12)). Protože horní a spodní pásnice jsou stejné, je rovnice na začátku násobena dvěma.



Obrázek 29: Průřez pásnic nosníku

$$r_p = \frac{h}{2} \quad (6.11)$$

$$J_z = 2 \cdot b_p \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot t_p^3 + t_p \cdot \left(r_p - \frac{t_p}{2} \right)^2 \right) \quad (6.12)$$

Dosazením rovnic (6.11) a (6.12) do rovnice (6.5) a tu následně do rovnice (6.4), vznikne rovnice pro výpočet napětí v pásnici (rovnice (6.13)).

$$\sigma_o = \frac{h \cdot M_o}{2 \cdot J_z} \quad (6.13)$$

Následuje rovnice pro výpočet bezpečnosti pásnice na tlak.

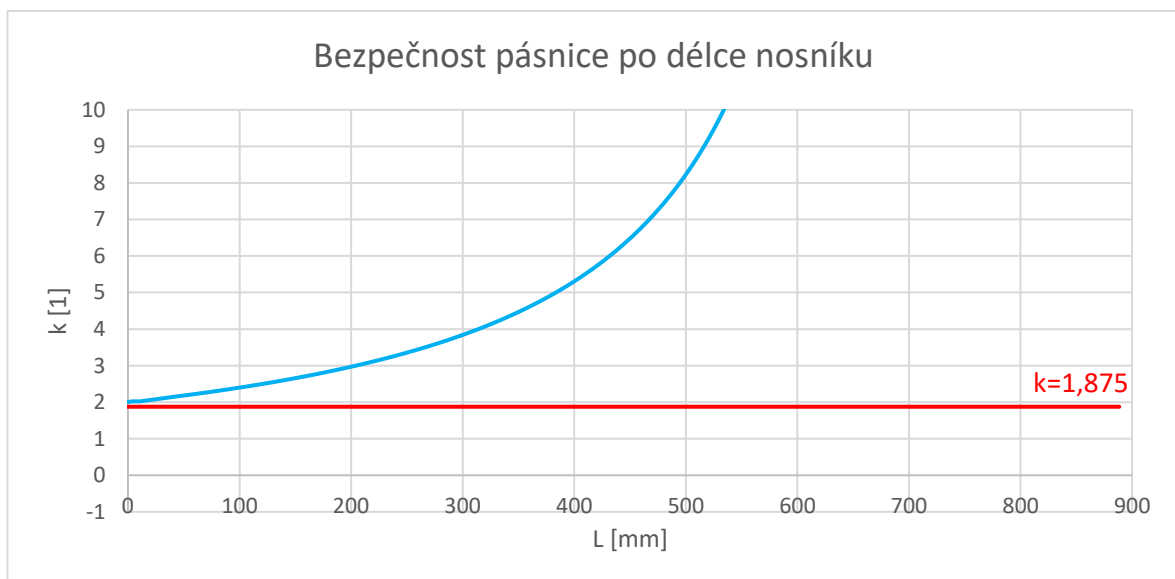
$$k = \frac{\sigma_{Dd}}{\sigma_o} \quad (6.14)$$

V příloženém souboru excel byly prováděny tyto výpočty, dokud nevyšla bezpečnost větší než 1,875. Toho bylo dosaženo změnou tloušťky a šířky pásnice do vyhovujícího rozměru. Nakonec byla zvolena šířka pásnice v rovnici (6.15) a tloušťka pásnice (6.16).

$$b_p = 30 \text{ mm} \quad (6.15)$$

$$t_p = 0,91 \text{ mm} \quad (6.16)$$

V grafu 13 je uveden průběh bezpečnosti po délce nosníku. Při pohledu na průběh ohybového momentu (graf 11) je zřejmé, že maximální ohybový moment je u kořene stabilizátoru a klesá k volnému konci, kde končí v nule. Zjištěná bezpečnost je přesně opačná. U kořene je nejnižší a postupně roste až k volnému konci, kde je nejvyšší.



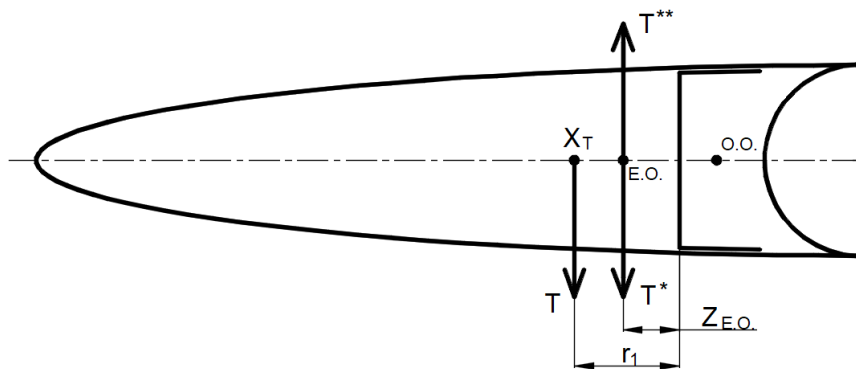
Graf č. 13: Průběh bezpečnosti pásnice po délce nosníku

6.2 Dimenzování potahu

Po dimenzování pásnice nosníku je nutné dimenzovat i potah stabilizátoru. V této kapitole je nejprve potah nadimenzován a následně zkontrolovat na stabilitu.

6.2.1 Smykové namáhání potahu

Stejně jako v kapitole 6.1.2 je i zde využit princip superpozice. Zatížení stabilizátoru krutem bude přeneseno přímo na potah. Jedná se o krut nekruhového uzavřeného průřezu s přepážkou, kterou tvoří stojina nosníku.



Obrázek 30: Silové rozložení při dimenzování potahu

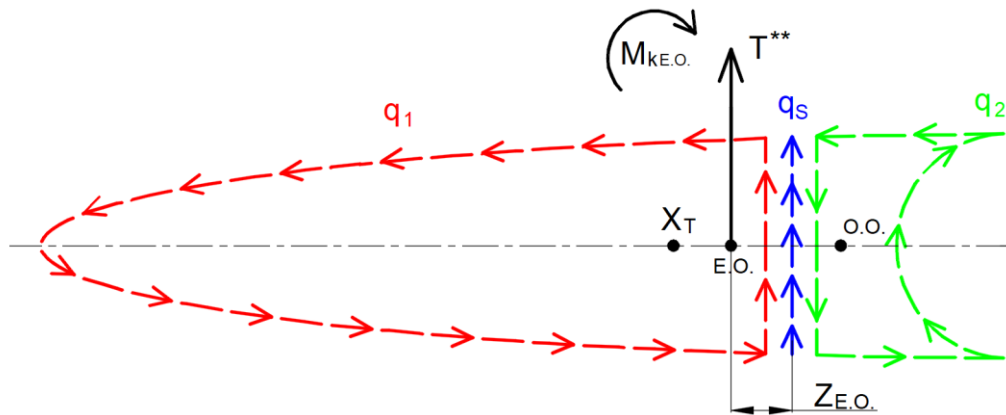
Na obrázku 30 je uvedeno silové rozložení způsobující namáhání potahu a smykové toky procházející dutinami a stojinou nosníku. V místě elastické osy jsou zavedeny síly T^* a T^{**} o stejné velikosti jako posouvající síla T . Síla T^{**} společně se silou T vytváří kroutící moment vzhledem k elastické ose. Síla T^* se uvažuje jako posouvající síla. Tento moment je popsán v rovnici (6.17). Tento postup byl převzat z [19].

$$Mk_{E.O.} = Mk - T \cdot z_{E.O.} \quad (6.17)$$

V rovnici (6.17) je neznámá souřadnice elastické osy. Elastická osa je místo, kde je nulový zkrut. Výpočet souřadnice elastické osy je proveden podle rovnice (6.18) převzaté z [14].

$$z_{E.O.} = \frac{-2 \cdot s_1 \cdot (s_1 \cdot U_2 + U_1 \cdot h_s + U_2 \cdot h_s)}{(s_1 + h_s) \cdot (s_1 \cdot s_2 + s_1 \cdot h_s + s_2 \cdot h_s)} + \frac{2 \cdot U_1}{s_1 + h_s} \quad (6.18)$$

Následující vztahy jsou převzaty z práce [20], kde jsou sestaveny na základě [19].
Působení smykových toků je vyznačeno na obrázku 31.



Obrázek 31: Působení smykových toků ve stabilizátoru

Smykový tok v přední dutině:

$$q_1 = \frac{-(U_1 \cdot s_2 + U_1 \cdot h_s + U_2 \cdot h_s) \cdot \frac{Mk_{E.O.}}{2 \cdot U_2} - (U_1 + U_2) \cdot h_s \cdot q_s}{U_2 \cdot s_1 + U_2 \cdot h_s + 2 \cdot U_1 \cdot h_s + \frac{U_1}{U_2} \cdot (U_1 \cdot s_2 + U_1 \cdot h_s)} \quad (6.19)$$

Smykový tok v zadní dutině:

$$q_2 = \frac{-Mk_{E.O.} - 2 \cdot U_1 \cdot q_1}{2 \cdot U_2} \quad (6.20)$$

Smykový tok ve stojině:

$$q_s = \frac{T}{h_s} \quad (6.21)$$

Celkový smykový tok:

$$q_c = q_1 + q_s - q_2 \quad (6.22)$$

Smykové napětí:

$$\tau = \frac{q}{t_{POT}} \quad (6.23)$$

Tloušťka potahu:

$$t_{POT} = 0,4 \text{ mm} \quad (6.24)$$

V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty provozního smykového napětí v místech prvního a druhého závěsu, v polovině stabilizátoru a na jeho konci zjištěné podle rovnice (6.23).

Tabulka 5: Provozní smykové napětí

Provozní smykové napětí ve vzdálenosti	33,5 mm	630 mm	444,25 mm	888,5 mm
$\tau_1 [MPa]$	-0,297	-0,118	-0,207	0
$\tau_2 [MPa]$	0,204	0,304	0,248	0
$\tau_s [MPa]$	-27,023	-6,85	-16,825	0

Nyní je potřeba ze získaného provozního napětí spočítat početní napětí (tabulka 6). Početní napětí, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1.1, je provozní napětí rozšířené součinitelem bezpečnosti 1,875.

Z početního napětí je následně možné spočítat jistotu k mezi pevnosti podle vzorce (6.24). Tato jistota je uvedena v tabulce 7.

Tabulka 6: Početní smykové napětí

Početní smykové napětí ve vzdálenosti	33,5 mm	630 mm	444,25 mm	888,5 mm
$\tau_{1P} [MPa]$	-0,557	-0,221	-0,389	0
$\tau_{2P} [MPa]$	0,383	0,571	0,464	0
$\tau_{sP} [MPa]$	-50,667	-12,843	-31,546	0

$$k_P = \frac{\tau_{PS}}{\tau_P} \quad (6.25)$$

Kde τ_{PS} je mez pevnosti ve smyku pro vícesměrnou tkaninu pro uhlíkový kompozit a její velikost je uvedena v rovnici (6.25).

$$\tau_{PS} = 120 \text{ MPa} \quad (6.26)$$

Tabulka 7: Jistota vůči pevnosti ve smyku

Jistota	33,5 mm	630 mm	444,25 mm	888,5 mm
k_{1P}	215,297	542,96	308,527	Zde není napětí
k_{2P}	313,185	210,271	258,428	Zde není napětí
k_{SP}	2,368	9,344	3,804	Zde není napětí

6.2.2 Stabilita částí namáhaných na smyk

Všechny namáhané části si musí zachovat svou stabilitu, až do působení početního zatížení z tabulky 6. Zajištění stability bude provedeno porovnáním početního zatížení se zatížením kritickým zjištěného pomocí rovnice (6.26) [21].

$$\tau_k = \kappa \cdot K_s \cdot E \cdot \left(\frac{t_{POT}}{b_D} \right)^2 \quad (6.27)$$

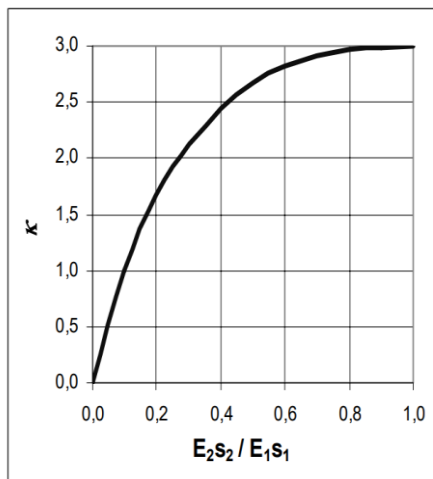
Příklad dosazení do rovnice (6.26.) pro přední část potahu v poli 0 až 33,5 mm od kořene:

$$\tau_{1k}^{[1]} = 3 \cdot 34 \cdot 74 \, 160 \cdot \left(\frac{0,4}{47,722} \right)^2 = 68,314 \text{ MPa} \quad (6.28)$$

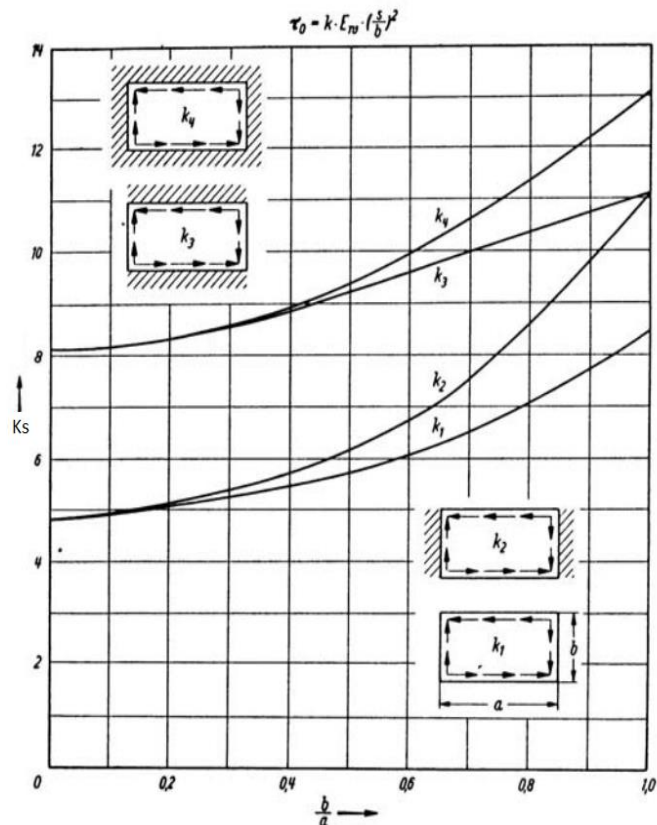
6.2.2.1 Výpočet stability potahu

Na rozdíl od výškového kormidla, je u stabilizátoru nejkritičtější místem stabilita potahu v přední dutině. Pro kontrolu je ovšem proveden výpočet stability i v dutině zadní. Postup výpočtu je stejný, pouze u přední dutiny bude počítáno s b_D , jako s hloubkou pole od

stojiny k náběžné hraně a u zadní dutiny bude b_D představovat hloubku pole od stojiny k odtokové hraně. Součinitel κ je odečten z obrázku 32. Pro symetrickou skladbu uhlíkového kompozitu je to hodnota 3. Součinitel K_s je odečten z obrázku 33. Modul pružnosti v tahu je z kapitoly 4.1.3. Tloušťka potahu je zvolena 0,4 mm. S těmito hodnotami je nyní možné vypočítat kritické napětí. Výpočty byly provedeny v souboru excel a výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.



Obrázek 32: Závislost $\kappa = f\left(\frac{E_1 \cdot s_1}{E_2 \cdot s_2}\right)$ [21]



Obrázek 33: Závislost $\kappa = f\left(\frac{b}{a}\right)$ [21]

Tabulka 8: Kritické smykové napětí potahu

	Kritické smykové napětí τ [MPa]		
Interval pole [mm]	0 až 33,5	33,5 až 630	630 až 888,5
Zadní část potahu	$\tau_{2k} = 226,74$	$\tau_{2k} = 113,059$	$\tau_{2k} = 154,571$
Přední část potahu	$\tau_{1k}^{[1]} = 68,314$	$\tau_{1k} = 17,701$	$\tau_{1k} = 28,145$

Na první pohled je vidět, že početní smykové napětí zjištěné v tabulce 6 je ve všech případech menší, než kritické smykové napětí zjištěné v tabulce 8. Potah je tedy stabilní. Z tabulky 8 je dále patrné, jak již bylo zmíněno, že z pohledu stability je u stabilizátoru

rozhodující přední část potahu (kritické napětí pro přední část dosahuje nižších hodnot, než pro zadní část).

6.2.2.2 Výpočet stability stojiny nosníku

Postup výpočtu stability stojiny, je stejný jako postup výpočtu stability potahu v kapitole 6.2.2.1. Pouze je dosazena tloušťka stojiny podle rovnice (6.28). Kritické smykové napětí stojiny je opět vypočítáno v programu Excel a výsledky jsou uvedeny v tabulce 9.

$$t_{STOJ} = 0,6 \text{ mm} \quad (6.29)$$

Tabulka 9: Kritické smykové napětí stojiny

	Kritické smykové napětí τ [MPa]		
Interval pole [mm]	0 až 33,5	33,5 až 630	630 až 888,5
Stojina nosníku	$\tau_{Sk} = 545,126$	$\tau_{Sk} = 289,875$	$\tau_{Sk} = 473,034$

Při porovnání hodnot v tabulce 9 s hodnotami v tabulce 6 je opět zřejmé, že kritické smykové napětí stojiny je ve všech případech větší než početní smykové napětí stojiny. Také stojina nosníku je tedy stabilní.

7 Hmotový rozbor

V poslední kapitole je potřeba zjistit souřadnice těžišť jednotlivých součástí a jejich hmotnost. Z těchto hodnot bude následně zjištěna hmotnost celého stabilizátoru a jeho těžiště. Toto je nutné udělat, aby při konstrukci celého letounu bylo možné zjistit jeho těžiště a hmotnost.

7.1 Hustoty použitých materiálů

Při konstrukci stabilizátoru jsou použity tři různé materiály. Pro závěsy je použit dural, pro překližky bříza a pro ostatní součásti je použit uhlíkový kompozit. Jednotlivé součásti jsou k sobě přilepeny lepidlem. Hustoty všech výše zmíněných jsou přiřazeny součástem přímo v programu Inventor Professional 2020.

7.2 Hmotnost

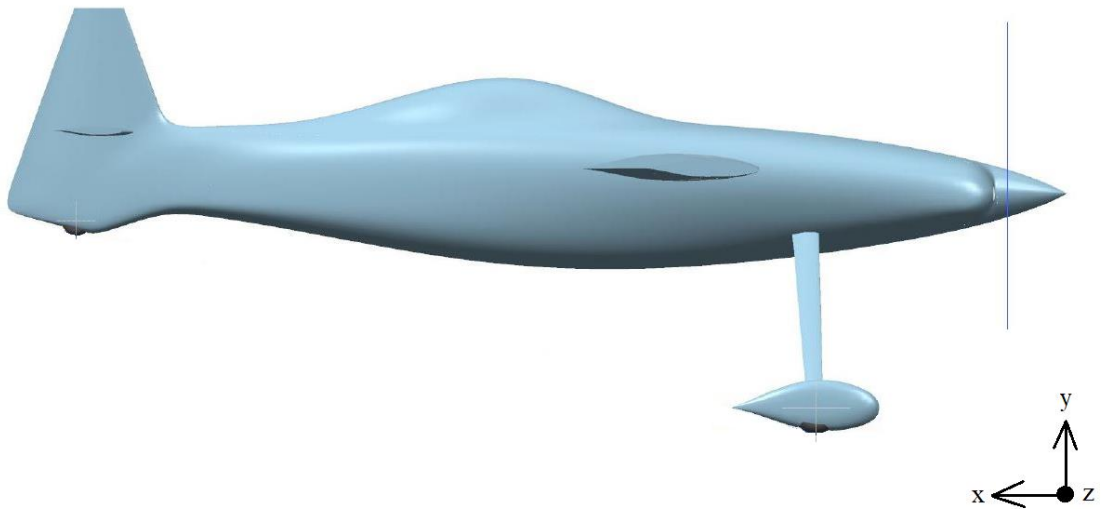
Ve vytvořeném modelu v programu Inventor Professional 2020 je každé součásti přiřazen materiál o dané hustotě. Následně je v tomto programu odečtena hmotnost jednotlivých součástí i hmotnost celé sestavy. Hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 10. Při všech výpočtech byla počítána pouze jedna polovina stabilizátoru. Proto je teď potřeba celkovou hmotnost vynásobit dvěma, čímž je získána hmotnost celého stabilizátoru.

Tabulka 10: Hmotnost jednotlivých součástí i celého stabilizátoru

Součást	Značení	Hmotnost	Jednotka
Nosník – polovina	m_N	109,273	g
Žebro malé – první závěs (kořen)	$m_{M\check{Z}0}$	3,264	g
Žebro velké – první závěs (kořen)	$m_{V\check{Z}0}$	7,295	g
Překližka malá – první závěs	m_{BM0}	0,72	g
Překližka velká – první závěs	m_{BV0}	3,434	g
Žebro malé – druhý závěs	$m_{M\check{Z}2}$	2,657	g
Žebro velké – druhý závěs	$m_{V\check{Z}2}$	4,954	g
Překližka malá – druhý závěs	m_{BM2}	0,56	g
Překližka velká – druhý závěs	m_{BV2}	2,65	g
Závěs první (kořen)	m_{Z0}	38,045	g
Závěs druhý	m_{Z2}	30,562	g
Spodní potah – polovina	m_{SP}	131,673	g
Horní potah – polovina	m_{HP}	95,937	g
Lepidlo – polovina	m_L	76,681	g
Celková hmotnost bez lepidla – polovina	m	431,024	g
Celková hmotnost s lepidlem – polovina	m_C	507,705	g
Celková hmotnost celého stabilizátoru	m_S	1 015,41	g

7.3 Těžiště

Souřadnice těžiště každé součásti i celé soustavy jsou opět odečteny z modelu v programu Inventor Professional 2020. Hodnoty jednotlivých součástí pravé poloviny stabilizátoru jsou uvedeny v tabulce 11 a hodnoty těžiště celého stabilizátoru potom v tabulce 12. Souřadnice jsou vztahovány k počátku souřadnicového systému celého letounu z diplomové práce Ing. Valenty [1]. Souřadnicový systém je vyznačen na obrázku 34.



Obrázek 34: Naznačení použitého souřadnicového systému [1]

Tabulka 11: Souřadnice těžiště součástí z pravé poloviny stabilizátoru

Součásti z pravé poloviny stabilizátoru	x	y	z	Jednotka
Nosník	5773,633	2300,011	453,214	mm
Malé žebro u kořene	5727,66	2300	41,2	mm
Velké žebro u kořene	5643,226	2300,001	41,2	mm
Překližka – malé žebro u kořene	5725,669	2300	49,5	mm
Překližka – velké žebro u kořene	5642,348	2300	49,5	mm
Malé žebro u 2. závěsu	5724,71	2300	641,384	mm
Velké žebro u 2. závěsu	5664,682	2300,001	641,384	mm
Překližka – malé žebro u 2. závěsu	5728,431	2300	645,336	mm
Překližka – velké žebro u 2. závěsu	5664,341	2300	645,336	mm
Závěs u kořene (1. závěs)	5683,977	2300	33,5	mm
Druhý závěs	5698,096	2300	650	mm
Spodní potah s koncovým žebrem	5684,002	2288,336	451,547	mm
Horní potah	5665,733	2315,422	438,738	mm

Tabulka 12: Souřadnice těžiště celého stabilizátoru

Celý stabilizátor	x	y	z	Jednotka
Těžiště celého stabilizátoru	5492,4	2507	0	mm

8 Závěr

V této bakalářské práci je řešen návrh stabilizátoru rychlostního letounu. Na začátku práce je proveden rozbor současného stavu možných konstrukčních řešení a použitých materiálů.

Následně bylo vybráno toto řešení. Stabilizátor je složen z průběžného nosníku ve tvaru C, spodního potahu s žebrem na volném konci, velkého a malého žebra s překližkami v místě druhého závěsu, velkého a malého žebra s překližkami v místě prvního závěsu, samostatného horního potahu a dvou závěsů. Jako materiál pro závěsy byl zvolen dural, pro překližky bříza a pro ostatní součásti uhlíkový kompozit s pojivem z epoxidové pryskyřice. Uhlíkový kompozit je použit jako jednosměrná tkanina pro pásnice nosníku a jako vícesměrná tkanina pro stojinu, žebra a oba potahy. Všechny komponenty jsou k sobě navzájem přilepeny, pouze závěsy jsou navíc přišroubované.

V první řadě bylo potřeba zjistit působící zatížení podle předpisu UL 2 – Část I. Letecké amatérské asociace ČR. Pro tyto výpočty jsou potřeba reakční síly působící od závěsů. Tyto síly jsou převzaty z bakalářské práce pana Lukáše Hofrichtera a jsou uvažovány s opačným znaménkem. Následně byl proveden výpočet posouvající síly, ohybového momentu a kroutícího momentu, a to jak pro zatížení při manévru, tak pro zatížení při poryvu. Z těchto výpočtů byly vybrány maximální hodnoty potřebné pro následné dimenzování.

Pásnice nosníku přenáší ohybový moment, proto byla dimenzována na jeho maximální hodnotu. Naopak kroutící moment přenáší potah, stojina nosníku a žebra. Stojina a potah byly dimenzovány vůči pevnosti ve smyku. Následně byla provedena kontrola stability zadní a přední části potahu, z nichž je pro stabilizátor stěžejní přední část, a také byla provedena kontrola stability stojiny nosníku. Všechny kontroly vyhovují.

V poslední kapitole této práce již jsou známy všechny rozměry navrhovaných součástí, proto mohl být proveden hmotový rozbor. K hmotovému rozboru byl vytvořen model stabilizátoru v programu Inventor Professional 2020. Z tohoto modelu jsou odečteny hmotnosti jednotlivých částí a hmotnost celého stabilizátoru. Také jsou odečteny souřadnice těžiště.

Pro další pokračování tohoto návrhu by bylo vhodné laminovat závěsy přímo do žeber a ušetřit tak hmotnost na spojovacím materiálu. Dále je možné pokusit se snížit únosnost navržených součástí, neboť rezervy jsou vcelku velké. Došlo by tím ke snížení hmotnosti.

Seznam použité literatury

- [1] VALENTA, Jakub. *Koncepční návrh rychlostního letounu* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/84757>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
- [2] *UL 2 - Část I.: Požadavky letové způsobilosti SLZ*. In: . Praha: Letecká amatérská asociace ČR, 2019, s. 69. Dostupné také z: http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL%202%20%C4%8D%C3%A1st%20I_26.3.2019.pdf.
- [3] Section 2 - Aeroplanes. Fédération Aéronautique Internationale [online]. Lausanne, Switzerland: The World Air Sport Federation, 2020, 01-2018 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://www.fai.org/gac-documents>.
- [4] SLAVÍK, Svatomír. *Stavba letadel*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1997. ISBN 80-01-01671-4.
- [5] Unikátní ultralehký letounu UL-39 Albi [online]. In: . Praha, 2018 [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/aktuality/230-212/unikatni-ultralehky-letounu-ul-39-albi/>.
- [6] MIKULA, Jan. *Konstrukce a projektování letadel II*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2005. ISBN 80-01-03338-4.
- [7] ŠULŽENKO, Michail, Nikolajevič. *Konstrukce letadel*. 2. opravné vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [8] Nejčastější uspořádání ocasních ploch. In: Wikipedie [online]. Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Stabiliz%C3%A1tor_\(letectv%C3%AD\)#/media/Soubor:Tail_of_a_conventional_aircraft.svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Stabiliz%C3%A1tor_(letectv%C3%AD)#/media/Soubor:Tail_of_a_conventional_aircraft.svg).
- [9] Vojtěch D.: *Kovové materiály*. 1. vydání. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. Str. 001. ISBN 80-7080-600-1.
- [10] Prepreg technologie. Form-composite [online]. Horní Lideč: FORM, 2020 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <https://www.form-composite.com/prepreg>.
- [11] Ruční laminace. In: Plastic [online]. Dolní Vlčkovice, c2017 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: http://www.plastic.cz/technologie-rucni_laminace-cz.
- [12] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. Svitavy: Střední odborné učiliště Svitavy, 2015 [cit. 2020-07-12]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Impresum.html>.
- [13] Lehké RTM. In: Plastic [online]. Dolní Vlčkovice, c2017 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: http://www.plastic.cz/technologie-lehke_rtm.
- [14] Gurit.com. Gurit [online]. 2012 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: [http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites\(1\).pdf](http://www.gurit.com/files/documents/Gurit_Guide_to_Composites(1).pdf).



- [15] Autokláv. In: Plastic [online]. Dolní Vlčkovice, c2017 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <http://www.plastic.cz/technologie-autoklav-cz>.
- [16] Řešení pro spojování kompozitních materiálů. BOSSARD Proven Productivity [online]. 2020 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: https://media.bossard.com/cs/-/media/bossard-group/website/documents/white-paper/bossard_white_paper_composites_cz.pdf?la=cs.
- [17] ŘEZNÍČEK, Jan a Jitka ŘEZNÍČKOVÁ. Pružnost a pevnost v technické praxi: příklady III. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03947-2.
- [18] BARÁK Karel. Materiálové podklady letounu UL-39 Albi II. Praha: ČVUT v Praze, 2016.
- [19] Špunda, Jaromír. Stavební mechanika a pevnost letounu: Část IV. Brno : Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1971.
- [20] VALENTA, Jakub. Návrh vztlakové klapky malého sportovního letounu [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-08-09]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/73137>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
- [21] FUNKE, Herbert. Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges. Rheda-Wiedenbrück, 2001. Disertační práce (Dr.-Ing.). Universität-GH Paderborn, Laboratorium für Konstruktionslehre, 27. 8. 2001. ISBN 3-00-008670-6. Dostupné z: http://www.r-g.de/w/images/9/99/Dissertation_von_Herbert_Funke.pdf.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Letoun UL - 39 Albi [5].....	- 7 -
Obrázek 2: Rozdělení ocasních ploch [8].....	- 8 -
Obrázek 3: Typy nosníků [6].....	- 9 -
Obrázek 4: Typy podélníků [6]	- 10 -
Obrázek 5: Typy příčných systémů [6]	- 11 -
Obrázek 6: Příklad závěsů – spojení stabilizátoru s trupem [7]	- 12 -
Obrázek 7: Sendvičové materiály [4]	- 16 -
Obrázek 8: Výroba kompozitu-ruční laminace [11].....	- 19 -
Obrázek 9: Výroba kompozitu-metoda RTM [12]	- 19 -
Obrázek 10: Výroba kompozitu-navíjení [14].....	- 20 -
Obrázek 11: Výroba kompozitu-Pultruze [12]	- 20 -
Obrázek 12: Výroba kompozitu – Autokláv [15].....	- 21 -
Obrázek 13: Pravá polovina stabilizátoru.....	- 23 -
Obrázek 14: Pravá polovina nosníku.....	- 24 -
Obrázek 15: Orientace vláken v pásnici a stojině nosníku.....	- 24 -
Obrázek 16: Uspořádání žeber u kořene	- 25 -
Obrázek 17: Zámek spodního a horního potahu.....	- 26 -
Obrázek 18: Rozměry pravé poloviny stabilizátoru	- 32 -
Obrázek 19: Schéma zatížení výškového kormidla.....	- 34 -
Obrázek 20: Zatěžující obrazec při manévru.....	- 35 -
Obrázek 21: Poloha těžiště výslednice spojitého zatížení	- 39 -
Obrázek 22: Působení momentů vytvářející kroučící moment	- 41 -
Obrázek 23: Zatěžující obrazec při poryvu	- 42 -
Obrázek 24: Působení kroučícího momentu při poryvu	- 46 -
Obrázek 25: Momenty způsobující kroučící moment při poryvu	- 50 -
Obrázek 26: Zjednodušená geometrie pásnice	- 53 -
Obrázek 27: Směrnice nosníku.....	- 54 -
Obrázek 28: Silové rozložení při dimenzování pásnic	- 54 -
Obrázek 29.: Průřez pásnice nosníku	- 54 -
Obrázek 30: Silové rozložení při dimenzování potahu	- 58 -
Obrázek 31: Působení smykových toků ve stabilizátoru.....	- 59 -
Obrázek 32: Závislost $\kappa = f(E1 \cdot s1)/(E2 \cdot s2)$ [21].....	- 62 -
Obrázek 33: Závislost $\kappa = f(\frac{b}{a})$ [21]	- 62 -
Obrázek 34: Naznačení použitého souřadnicového systému [1].....	- 66 -

Seznam grafů

Graf č. 1: Průběh měrného zatížení VOP u kořene při manévru	- 36 -
Graf č. 2: Průběh měrného zatížení VOP na volném konci při manévru	- 36 -
Graf č. 3: Průběh spojitého zatížení po délce stabilizátoru při manévru	- 37 -
Graf č. 4: Průběh posouvající síly po délce stabilizátoru při manévru	- 38 -
Graf č. 5: Průběh ohybového momentu po délce stabilizátoru při manévru	- 38 -
Graf č. 6: Průběh kroutícího momentu po délce stabilizátoru při manévru	- 42 -
Graf č. 7: Průběh měrného zatížení VOP u kořene při poryvu	- 43 -
Graf č. 8: Průběh měrného zatížení VOP na volném konci při poryvu	- 43 -
Graf č. 9: Průběh spojitého zatížení po délce stabilizátoru při poryvu	- 44 -
Graf č. 10: Průběh posouvající síly po délce stabilizátoru při poryvu	- 45 -
Graf č. 11: Průběh ohybového momentu po délce stabilizátoru při poryvu	- 45 -
Graf č. 12: Průběh kroutícího momentu po délce stabilizátoru při poryvu	- 51 -
Graf č. 13: Průběh bezpečnosti pásnice po délce nosníku	- 57 -

Seznam tabulek

Tabulka 1: Součinitel bezpečnosti	- 29 -
Tabulka 2: Základní rozměry VOP	- 33 -
Tabulka 3: Velikost zatížení VOP a jejich působišť	- 34 -
Tabulka 4: Maximální provozní zatížení stabilizátoru	- 52 -
Tabulka 5: Provozní smykové napětí	- 60 -
Tabulka 6: Početní smykové napětí	- 60 -
Tabulka 7: Jistota vůči pevnosti ve smyku	- 61 -
Tabulka 8: Kritické smykové napětí potahu	- 62 -
Tabulka 9: Kritické smykové napětí stojiny	- 63 -
Tabulka 10: Hmotnost jednotlivých součástí i celého stabilizátoru	- 65 -
Tabulka 11: Souřadnice těžiště součástí z pravé poloviny stabilizátoru	- 67 -
Tabulka 12: Souřadnice těžiště celého stabilizátoru	- 67 -

Seznam použitých programů

Inventor Professional 2020
AutoCAD 2020
Microsoft Office Word 2020
Microsoft Office Excel 2020

Seznam příloh

Příloha 1 Model stabilizátoru
Příloha 2 Soubor výpočtů