

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2021

**JAN
PROCHÁZKA**



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

Návrh ocasních ploch rychlostního letounu

Design of tail surfaces of a racing aircraft

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Jan PROCHÁZKA

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

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

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Procházka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **484122**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh ocasních ploch rychlostního letounu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of tail surfaces of a racing aircraft

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Návrh konstrukce ocasních ploch
- 2) Revizi zatížení ocasních ploch
- 3) Pevnostní kontrolu základních konstrukčních prvků
- 4) 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: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2021**

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 děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem 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

V první řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Brabcovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu nejen během zpracování této práce, ale také během celého studia. Můj dík patří také mým kamarádům, kteří mne v tomto nelehkém období podpořili, zejména pak Zdeňku Fišerovi, který mi v obtížných situacích vždy dokázal zvednout náladu.

Jan Procházka

Autor:	Jan Procházka	
Název bakalářské práce:	Návrh ocasních ploch rychlostního letounu	
Rok vyhotovení:	2021	
Univerzita:	České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní	
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství	
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový	
Ústav:	Ústav letadlové techniky	
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jiří Brabec, Ph.D.	
Bibliografické údaje:	Počet stran:	70
	Počet obrázků:	42
	Počet grafů:	12
	Počet tabulek:	6
	Počet příloh:	2
Klíčová slova	Ocasní plochy, kýlová plocha, konstrukce, zatížení, dimenzování, hmotnostní rozbor	

Anotace

Úkolem této bakalářské práce je návrh konstrukce a smontovatelnosti ocasních ploch pro ultralehký letoun, navržený v diplomové práci Ing. Jakuba Valenty, vycházející z bakalářských prací panů Hofrichtera, Němce a Větrovce. Na začátku práce je vypracována rešerše konstrukce a leteckých materiálů. Následně jsou uvedeny pevnostní požadavky dle předpisu UL 2. Díky těmto pevnostním požadavkům je stanoveno provozní zatížení, na jehož základě je provedeno dimenzování pásnic nosníku kýlové plochy a závěsů stabilizátoru pro jeho uchycení ke kýlové ploše. V závěru práce je proveden hmotový rozbor.

Author:	Jan Procházka	
Title of bachelor thesis:	Design of tail surfaces of a racing aircraft	
Academic year:	2021	
University:	Czech Technical University in Prague Faculty of mechanical engineering	
Studijní program:	B2342 Theoretical fundamentals of mechanical engineering	
Obor studia:	2301R000 The study programme is without specialisation	
Department:	Department of Aerospace Engineering	
Supervisor:	Ing. Jiří Brabec, Ph.D.	
Extent:	Number of pages:	70
	Number of figures:	42
	Number of graphs:	12
	Number of tables:	6
	Number of attachments:	2
Keywords	Tail planes, vertical fin, design, load, dimensioning, mass analysis	

Annotation

The task of this bachelor's thesis is to design construction and assembling of tail planes for ultralight aircraft, designed in the diploma thesis of Ing. Jakub Valenta, based on bachelor's theses of Mr. Hofrichter, Mr. Němec, and Mr. Větrovec. In the beginning of this thesis there is summary of construction and overview of aviation materials. It is followed by strength requirements according to UL 2 regulation. According to this regulation, operating load is determined. Dimensioning of stabilizer hinges to attach to vertical fin and flanges of the beam of vertical fin is determined by operating load. In the end of this thesis, mass analysis is made.

Obsah

Seznam obrázků, grafů a tabulek	1
Seznam použitého SW	3
Seznam příloh	3
1 Úvod	6
2 Uspořádání ocasních ploch	7
2.1 Vzájemná interakce OP	7
2.2 Dělení OP	8
2.3 Části OP	8
3 Konstrukce	10
3.1 Konstrukce jednotlivých částí OP	11
3.1.1 Stabilizátor	12
3.1.2 Výškové kormidlo	12
3.1.3 Směrové kormidlo	13
4 Letecké materiály	15
4.1 Nekovové materiály	16
4.2 Výroba kompozitů	20
5 Zatížení OP	23
5.1 Síly působící na letadlo za letu	23
5.2 Letová zatížení dle předpisu UL 2 část I. -ULL, znění 2019, max. MTOM 600 kg	23
5.3 Definice letového násobku	23
5.4 UL 2 § 335 Návrhové rychlosti letu	24
5.5 Zatížení VOP	25
5.5.1 Vyvažovací - UL 2 § 421	25
5.5.2 Obratové - UL 2 § 423	25
5.5.3 Poryvové - UL 2 § 425	26
5.5.4 Nesymetrické zatížení - UL 2 § 441	27
5.6 Zatížení SOP	27
5.6.1 Obratové zatížení - UL 2 § 441	27
5.6.2 Poryvové zatížení - UL 2 § 443	27
5.7 Výpočet zatížení	28
5.8 Výpočet zatížení VOP	28
5.9 Výpočet nesymetrické zatížení	29
5.9.1 Výpočet nesymetrické spojité zatížení na VOP	29
5.9.2 Nesymetrický ohybový moment	30

5.10	Zatížení SOP	31
5.10.1	Stanovení zatížení kýlové plochy při manévru	31
5.10.2	Průběh posouvající síly a ohybového momentu při manévru	33
5.10.3	Průběh kroutícího momentu při manévru	34
5.10.4	Stanovení zatížení kýlové plochy při poryvu	37
5.10.5	Průběh posouvající síly a ohybového momentu při poryvu	39
5.10.6	Průběh kroutícího momentu při poryvu	41
5.10.7	Shrnutí maximálního (provozního) zatížení na SOP	46
6	Předběžný návrh konstrukce	48
6.1	Řešení smontovatelnosti jednotlivých částí OP	48
6.1.1	Smontování stabilizátoru s kýlem	48
6.1.2	Smontování výškového kormidla se stabilizátorem	48
6.1.3	Smontování směrového kormidla s kýlem	48
6.2	Konstrukční úpravy stabilizátoru	49
6.3	Konstrukční úpravy výškového kormidla	51
6.4	Konstrukční úpravy směrového kormidla	52
6.5	Návrh kýlové plochy	53
6.5.1	Nosníky	54
6.5.2	Žebra	55
6.5.3	Potah	55
6.5.4	Závěsy	56
7	Předběžné dimenzování	57
7.1	Úprava výpočtů ve výškovém kormidle	57
7.2	Dimenzování pásnic kýlové plochy	58
7.2.1	Výpočet jistoty pásnice	61
7.3	Dimenzování závěsů	62
7.3.1	Síla působící na závěs od kroutícího momentu	62
7.3.2	Síla působící na závěs od nesymetrického zatížení	63
7.3.3	Ohyb závěsu	64
7.3.4	Střih závěsu	64
7.3.5	Výpočet jistoty závěsů	65
8	Hmotový rozbor	66
8.1	Hmotnosti	66
8.2	Hustoty materiálů	66
9	Závěr	69
	Reference	70

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1:	Rozlišení jednotlivých částí ocasních ploch [6]	7
Obrázek 2:	Vzájemná interakce OP [12]	8
Obrázek 3:	Typy nosníků [4]	10
Obrázek 4:	Typy žeber [4]	11
Obrázek 5:	Typy závěsů [17]	11
Obrázek 6:	Konstrukce stabilizátoru [15]	12
Obrázek 7:	Konstrukce výškového kormidla [2]	13
Obrázek 8:	Směrové kormidlo [7]	14
Obrázek 9:	Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů [3]	19
Obrázek 10:	Ruční laminace [9]	20
Obrázek 11:	Metoda RTM [5]	21
Obrázek 12:	Metoda navíjení [5]	21
Obrázek 13:	Metoda pultruze [5]	22
Obrázek 14:	Autokláv [8]	22
Obrázek 15:	Síly působící na letadlo za letu [12]	23
Obrázek 16:	Obálka obrátů [13]	24
Obrázek 17:	Rozložení zatížení po hloubce při obrátu [7]	26
Obrázek 18:	Rozložení zatížení po hloubce při poryvu [7]	27
Obrázek 19:	Poloha výslednice spojitého zatížení [15]	34
Obrázek 20:	Působení kroutících momentů [15]	36
Obrázek 21:	Reakce v závěsech - poryv	40
Obrázek 22:	Poloha výslednice spojitého zatížení - poryv [15]	42
Obrázek 23:	Smontované ocasní plochy	49
Obrázek 24:	Montáž stabilizátoru	50
Obrázek 25:	Krytka stabilizátoru	50
Obrázek 26:	Montáž výškového kormidla	51
Obrázek 27:	Detail B-Úprava trubek s pákami řízení	52
Obrázek 28:	Montáž směrového kormidla	53
Obrázek 29:	Detail A	53
Obrázek 30:	Popis součástí kýlové plochy	54
Obrázek 31:	Hlavní nosník	55
Obrázek 32:	Pomocný nosník	55

Obrázek 33:	Zalomené žebro	55
Obrázek 34:	Žebro	55
Obrázek 35:	Potah	56
Obrázek 36:	Montáž OP	56
Obrázek 37:	Schéma sil působících na trubku s pákami řízení	57
Obrázek 38:	Zjednodušená geometrie pásnic	59
Obrázek 39:	Rovnice zúžení pásnic po délce kýlové plochy	60
Obrázek 40:	M_k na zadních závěsech	63
Obrázek 41:	δM_o	63
Obrázek 42:	Souřadnicový systém letounu [14]	68

Seznam grafů

Graf 1:	Nesymetrické zatížení stabilizátoru	30
Graf 2:	Nesymetrické zatížení VK	30
Graf 3:	Nesymetrický ohybový moment	31
Graf 4:	Průběh spojitého zatížení po délce kýlové plochy - manévr	32
Graf 5:	Průběh posouvající síly po délce kýlové plochy - manévr	33
Graf 6:	Průběh ohybového momentu po délce kýlové plochy - manévr	34
Graf 7:	Průběh kroucího momentu po délce kýlové plochy - manévr	37
Graf 8:	Průběh spojitého zatížení po délce kýlové plochy - poryv	39
Graf 9:	Průběh posouvající síly po délce kýlové plochy - poryv	41
Graf 10:	Průběh ohybového momentu po délce kýlové plochy - poryv	41
Graf 11:	Průběh kroucího momentu po délce kýlové plochy - poryv	46
Graf 12:	Průběh kroucího momentu po délce VOP	62

Seznam tabulek

Tabulka 1:	Provozní zatížení na VOP	28
Tabulka 2:	Reakce v závěsech [7]	33
Tabulka 3:	Provozní zatížení na SOP	47
Tabulka 4:	Hodnoty početního zatížení - kýlová plocha	59
Tabulka 5:	Tabulka hmotností a těžišť 1/2	67
Tabulka 6:	Tabulka hmotností a těžišť 2/2	68

Seznam použitého SW

Inventor Professional 2020

Microsoft Excel

www.overleaf.com (L^AT_EX)

Seznam příloh

Příloha 1: Model ocasních ploch

Příloha 2: Soubor výpočtů

Použité zkratky

OP ... Ocasní plochy
SOP ... Svislé ocasní plochy
VOP ... Vodorovné ocasní plochy
VK ... Výškové kormidlo
SK ... Směrové kormidlo

Použité indexy

o ... Koncový řez
k ... Kořenový řez
M ... Manévr
P ... Poryv

Použité značení

G ... Váha letounu [kg]
 Y ... Vztlak [N]
 Q_0 ... Čelní odpor [N]
 P_0 ... Tah vrtule [N]
 n ... Letový násobek [-]
 P_{VOP} ... Síla na VOP [N]
 p_0 ... Vyvažovací síla na VOP působící před zatížení poryvem [N]
 ρ_0 ... Hustota vzduchu při hladině moře [$1,225kg/m^3$]
 a_{SOP} ... Sklon vztlakové čáry SOP [rad^{-1}]
 S_{SOP} ... Plocha SOP [m^2]
 U ... Rychlost poryvu [m/s]
 k_{SOP} ... Zmírňující součinitel [-]
 M ... Maximální hmotnost letounu [kg]
 l_{m_s} ... Střední geometrická tětíva SOP [m]
 q ... Spojité zatížení [N/m]
 T ... Posouvající síla [N]
 M_o ... Ohybový moment [$N.m$]

- M_k ... Kroutící moment [$N.m$]
 R_m ... Mez pevnosti v tahu [MPa]
 $R_{p0.2}$... Smluvní mez kluzu [MPa]
 E ... Modul pružnosti v tahu [MPa]
 Q ... Výslednice spojitého zatížení [N]
 k ... Součinitel bezpečnost [$-$]
 h_k ... Výška nosníku u kořene [mm]
 h_0 ... Výška nosníku u konce [mm]
 h_s ... Výška nosníku v $M_{o_{max}}$
 W_o ... Průřezová charakteristika v ohybu [mm^3]
 J_z ... Kvadratický moment v průřezu [mm^4]
 x_p ... Vzdálenost těžiště pásnice od osy x [mm]
 b_p ... Šířka pásnice [mm]
 t_p ... Tloušťka pásnice
 T_{St}^P ... Posouvající síla stabilizátoru pro případ porvyvu [N]
 T_{VK}^P ... Posouvající síla VK pro případ porvyvu [N]
 r_{1St} ... Vzdálenost od působíště výslednice spojitého zatížení stabilizátoru k jeho nosníku [mm]
 r_{2St} ... Vzdálenost od stojiny nosníku stabilizátoru k ose otáčení VK [mm]
 r_p ... Vzdálenost páky od osy trubky [N]
 r_t ... Vzdálenost páky od kořene VK [mm]
 F_{Paka} ... Síla v páce řízení [N]
 $\tau_{Provoz.}$... Provozní smykové napětí [MPa]
 $\sigma_{Provoz.oh.}$... Provozní napětí v ohybu [MPa]
 j ... Jistota [$-$]
 $\sigma_{Pocet.}$... Početní napětí [MPa]
 ρ_{Svs} ... Plošná hustota vícesměrné tkaniny [kg/m^2]
 ρ_{Sjs} ... Plošná hustota vícesměrné tkaniny [kg/m^2]
 ρ_{Vvs} ... Objemová hustota vícesměrné tkaniny [kg/m^3]
 ρ_{Vjs} ... Objemová hustota jednosměrné tkaniny [kg/m^3]
 m_{OP} ... Hmotnost OP [kg]

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je návrh konstrukce ocasních ploch pro rychlostní letoun, vycházející z diplomové práce pana Ing. Jakuba Valenty. V této již zmiňované diplomové práci byl proveden návrh koncepce rychlostního letounu schopného překonávat světové rychlostní rekordy Mezinárodní letecké federace FAI v kategorii Aeroplanes.

Při návrhu konstrukce a smontovatelnosti ocasních ploch se bude vycházet nejen z uvedené diplomové práce [14], ale i z bakalářských prací pánů Větrovce [15], Hofrichtera [2] a Němce [7], kteří se zabývali jednotlivými částmi ocasních ploch, jež budou v této práci upraveny pro potřeby smontovatelnosti.

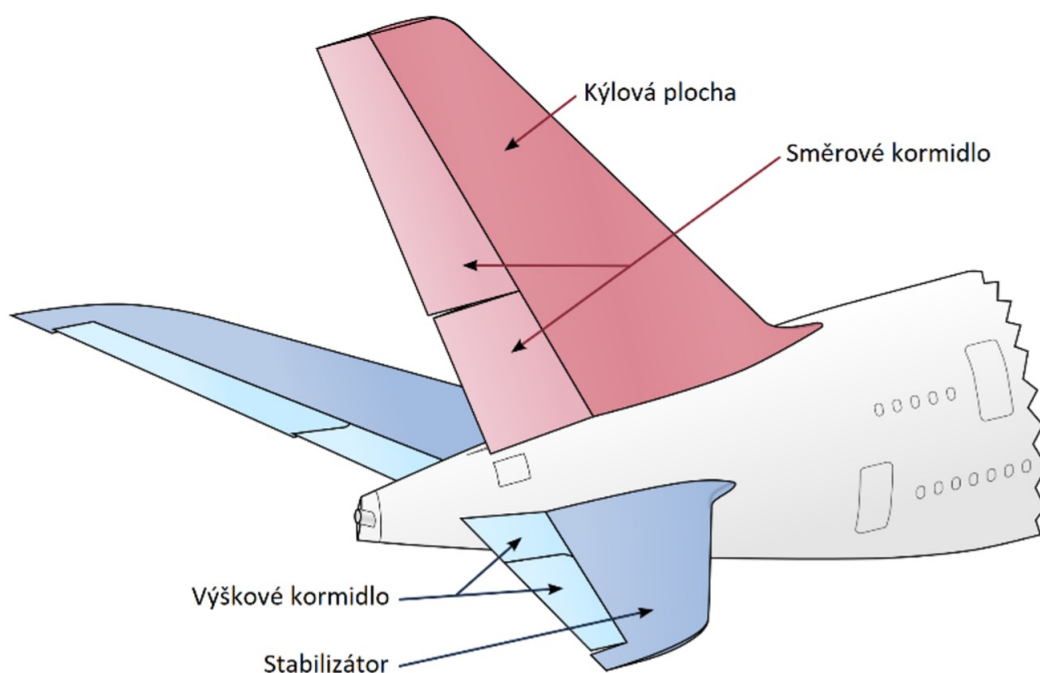
Dále se v této práci bude navrhovat konstrukce kýlové plochy a závěsy v kýlové ploše pro spojení všech ocasních ploch, přičemž bude provedeno dimenzování pro zatížení dle předpisu UL 2.

V závěru práce bude proveden hmotový rozbor, ve kterém bude pomocí programu Autodesk Inventor Professional 2020 zjištěna hmotnost a poloha těžiště hotové konstrukce.

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), přičemž VOP se skládají z nepohyblivé části, tzv. stabilizátoru, a z pohyblivé části, tzv. výškového kormidla, které je se stabilizátorem spojeno pomocí závěsů. VOP zajišťují podélnou stabilitu letadla a podélné 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, kterým vyvažují klopivý moment křídla.

Rozdělení ocasních ploch je uvedeno na obr.1. [4], [12].

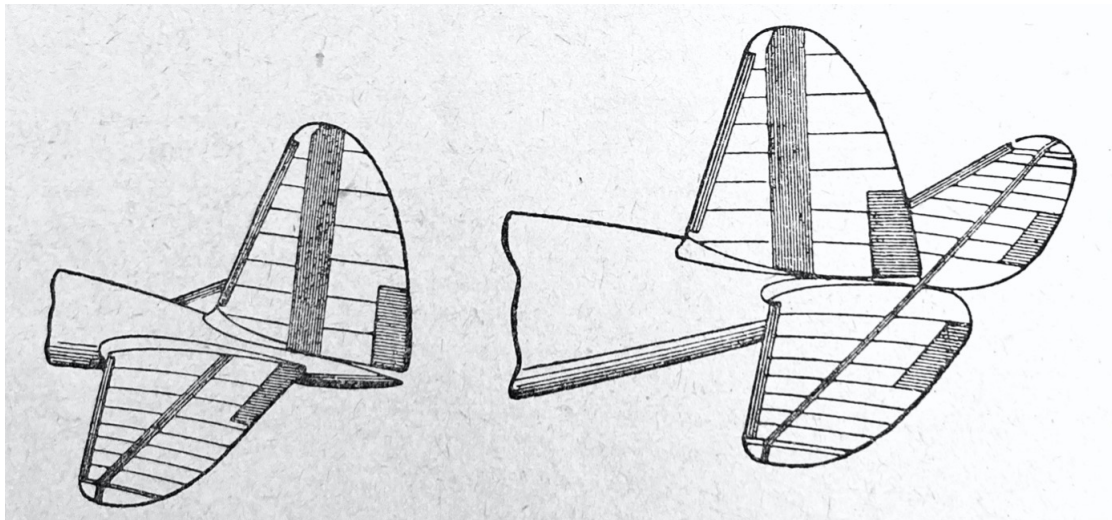


Obr. 1: Rozlišení jednotlivých částí ocasních ploch [6]

2.1 Vzájemná interakce OP

Nejběžnějším případem ovlivnění funkce jedné ocasní plochy druhou je stínění části jedné z ploch úplavem odtrženého proudu vzduchu za druhou plochou. Krátkodobě k tomu může dojít při velkých dynamických vybočeních. Nemělo by docházet ke stínění SOP úplavem za nevhodně položenou vodorovnou ocasní plochou při velkých zakritických úhlech náběhu, při dynamických pádech z přetažení, nebo ve vývrtce. Částečné zastínění však vyloučit nelze. Důležité je, aby alespoň část směrového kormidla nebyla stíněna VOP a letadlo mohlo reagovat

na jeho výchylky. Aby tento případ nevznikl, jsou obvykle SOP proti VOP posunuty ve směru osy trupu a někdy jsou dokonce jedny úplně před druhými. Z hlediska aerodynamiky nezáleží na tom, které ocasní plochy jsou vpředu, po konstrukční stránce je výhodnější předsunout VOP. [4]



Obr. 2: Vzájemná interakce OP [12]

2.2 Dělení OP

a) Podle dělení po rozpětí

- Průběžné (nedělené)
- Dělené (konzolové)

b) Podle dělení po hloubce

- Plovoucí
- Dělené (na stabilizátor a kormidlo)

2.3 Části OP

– **Stabilizátor**

Stabilizátor letounu bývá často průběžný, za letu přestavitelný. Je to nehybná část vodorovných ocasních ploch.

– **Výškové kormidlo (VK)**

Bude-li na samotné křídlo působit kladný poryv, křídlo bude zvyšovat úhel náběhu. Aby k tomuto jevu nedocházelo a aby se zajistil podélný rovnovážný stav, je nakonec trupu umístěna vodorovná ocasní plocha, která vybudí opačný klopivý moment pomocí vztlakové síly.

– **Směrové kormidlo (SK)**

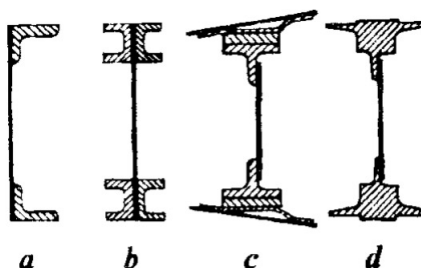
Směrové kormidlo je založeno na podobném principu jako VK a zajišťuje příčný rovnovážný stav letounu.

3 Konstrukce

Konstrukce OP je totožná s konstrukcí křídla. OP se skládají z nosné konstrukce, na kterou jsou pomocí závěsů zavěšena kormidla a mechanizace nacházející se uvnitř samotných OP. Prvky nosné konstrukce se skládají z podélných a příčných nosných elementů a potahů. [4]

– Nosníky

Skládají se ze stojiny (přenáší smykové napětí) a pásnic (přenášejí ohybový moment), které jsou umístěny vespod a nahoře stojiny. [4]



Obr. 3: Typy nosníků [4]

– Podélné stěny

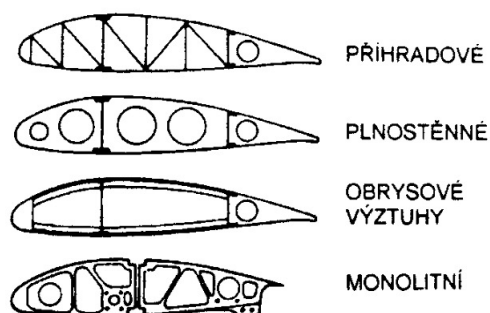
Podélná stěna má za úkol přenášet posouvající sílu. Konstrukce podélných stěn je velmi blízká nosníkům, proto se také podélným stěnám často říká pomocné nosníky. Podélné stěny mohou být v části anebo po celé délce OP a umístí ují se do přední a zadní části OP. Po spojení horní a dolní části potahu dojde k vytvoření uzavřeného obrysu (skříňe), který zachycuje kroutící moment. Podélná stěna v zadní části OP pak může být využita pro uchycení mechanizace křídla. [4]

– Podélníky

Podélníky mají za úkol přenášet vzdušné zatížení z potahu do žeber a dále část ohybového zatížení. Jejich dalším úkolem je zvýšit stabilitu potahu tím, že rozdělí velká pole mezi nosníky na menší. [4]

– Žebra

Žebro je element příčného systému spojující prvky podélného systému a potahu v jeden celek. Rozdělení jednotlivých konstrukčních provedení je na obr. 4. [4]



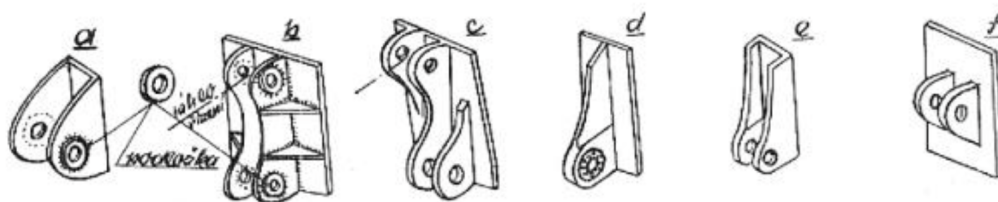
Obr. 4: Typy žeber [4]

– Potahy

Vnější konstrukční vrstva letadla tvoří vnější aerodynamický tvar. Dělí se na nosné potahy a nenosné potahy. Nosné potahy mohou být vyztuženy podélným nebo příčným systémem ocasních ploch, nebo mohou být provedeny jako samonosné (drží svůj tvar bez vzpěry). Mají za úkol přenášet zároveň smykové napětí a zatížení od krutu, což znamená značné ulehčení nosníkům. Zatížení nenosných potahů pak je pouze tlakové a je přenášeno na nosné elementy konstrukce ocasních ploch. [4]

– Závěsy

Závěsy spojují jednotlivé části OP. Dělí se na tuhá kování (tuhé závěsy) a kloubová kování (kloubové závěsy). Ukázka různých typů závěsů je zobrazena na obr. 5. [4]



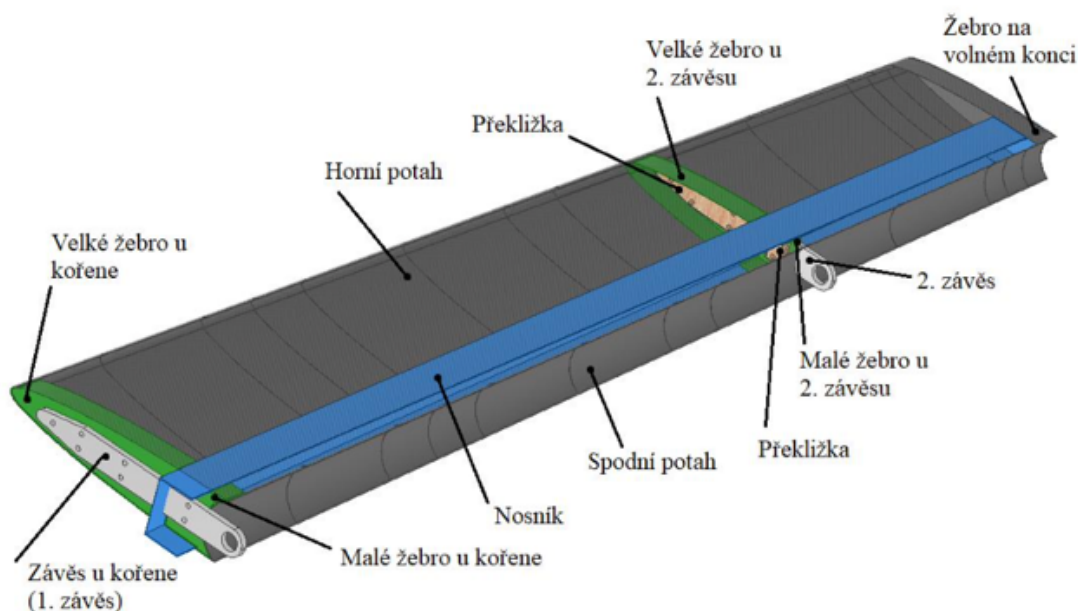
Obr. 5: Typy závěsů [17]

3.1 Konstrukce jednotlivých částí OP

V této podkapitole bude popsán současný stav materiálů jednotlivých částí ocasních ploch tak, jak je kolegové ve svých pracích navrhli. Na obrázcích pak bude vyobrazena konstrukce jimi navrhovaných částí OP.

3.1.1 Stabilizátor

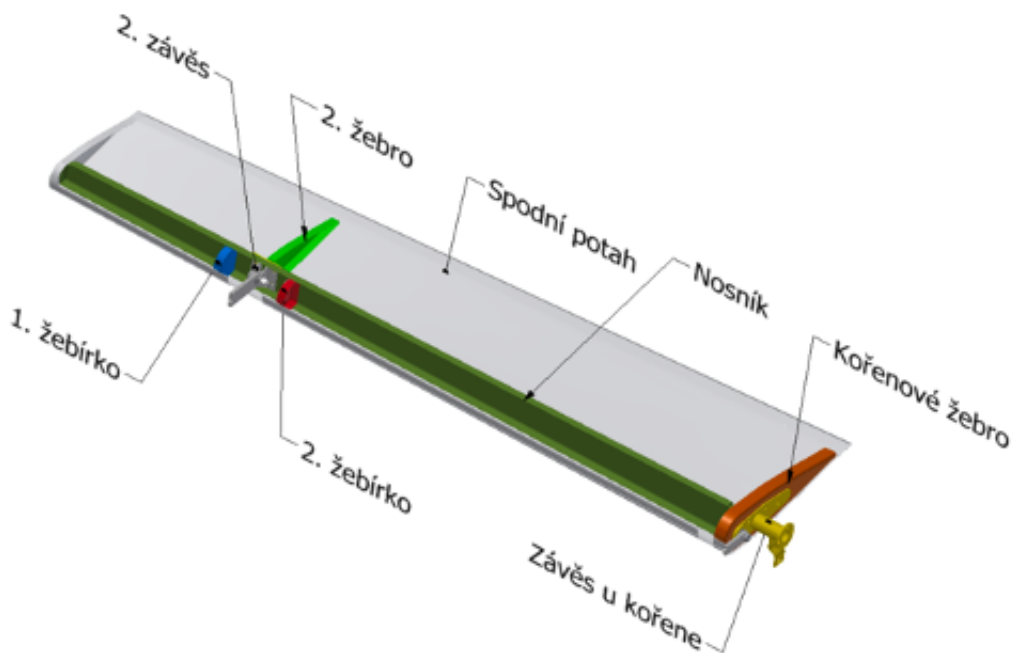
Z bakalářské práce Michala Větrovce [15], který se zabýval návrhem stabilizátoru, byly získány následující výstupy provedení a použitých materiálů: stabilizátor se skládá z průběžného nosníku tvaru C, spodního potahu s žebrem na volném konci, velkého a malého žebra s překližkami v místě prvního závěsu, velkého a malého žebra v místě druhého závěsu, samostatného horního potahu a dvou závěsů. Materiálem závěsů je dural, překližky jsou březové a pro ostatní součásti je zvolen uhlíkový kompozit s pojivem z epoxidové pryskyřice. Uhlíkový kompozit je jako jednosměrná tkanina použita pro pásnice nosníku a jako vícesměrná tkanina pro stojinu, žebra a oba potahy. Spojení jednotlivých částí je provedeno lepením, až na závěsy, které jsou sešroubovány. Konstrukce stabilizátoru je vidět na obr. 6.



Obr. 6: Konstrukce stabilizátoru [15]

3.1.2 Výškové kormidlo

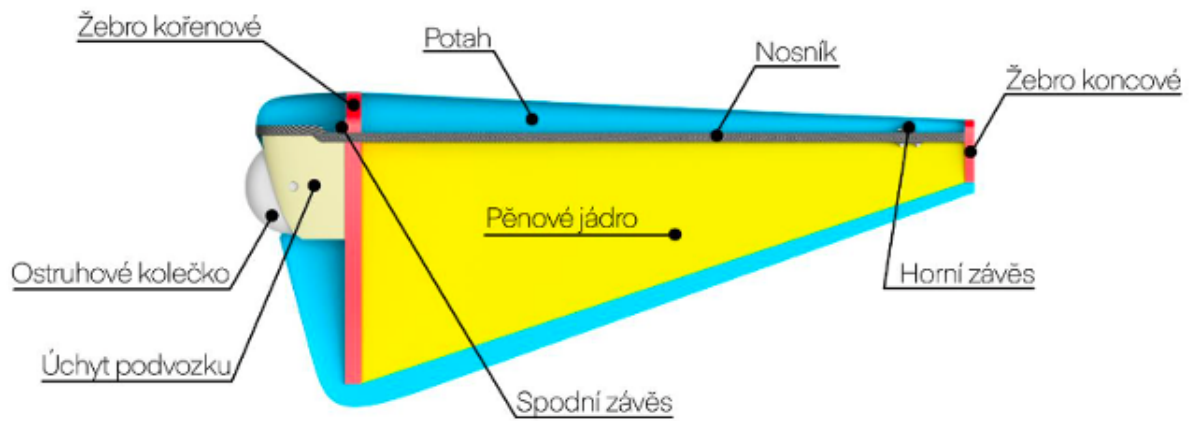
Z bakalářské práce Lukáše Hofrichtera [2], který se zabýval návrhem výškového kormidla, byly získány následující výstupy provedení a použitých materiálů: výškové kormidlo sestává z nosníku tvaru C, složeného ze dvou symetrických pásnic a stojiny, žeber, závěsů a horního a dolního potahu. Všechny součásti jsou vyrobeny z uhlíkového kompozitu (prepreg) s pojivem z epoxidové pryskyřice. Pásnice jsou z jednosměrné tkaniny s orientací po délce nosníku, stojina a žebra jsou z vícesměrné tkaniny s orientací vláken po $\pm 45^\circ$ a závěsy jsou vyrobeny z oceli AISI 4130. Spojení jednotlivých částí je provedeno lepením (tloušťka lepidla je 3 mm), závěsy jsou sešroubovány. Konstrukce výškového kormidla je vidět na obr. 7.



Obr. 7: Konstrukce výškového kormidla [2]

3.1.3 Směrové kormidlo

Z bakalářské práce Jiřího Němce [7], který se zabýval návrhem směrového kormidla, byly získány následující výstupy provedení a použitých materiálů: směrové kormidlo sestává z nosníku tvaru C, který se skládá z pásnic a stojiny, žeber, závěsů, potahu, v kterém je kvůli stabilitě přidáno pěnové jádro, a úchytu ostruhového podvozku. Všechny součásti jsou vyrobeny z uhlíkového kompozitu (prepreg) s pojivem z epoxidové pryskyřice. Pásnice jsou z jedné vrstvy jednosměrné tkaniny o tloušťce 0,13 mm, stojina a žebra jsou ze dvou vrstev vícesměrné tkaniny o tloušťce jedné vrstvy 0,2 mm s tím, že u žeber je ještě zalaminované jádro z březové překližky pro uchycení závěsů. Závěsy jsou pak každý z jiného materiálu, horní závěs je z duralového L profilu a dolní závěs je z konstrukční oceli ČSN 15130. Úchyt ostruhového podvozku je vyroben z vícesměrného prepregu o dvou vrstvách, obdobně jako stojina a žebra. Potah je pak z vícesměrného prepregu o dvou vrstvách tloušťky 0,2 mm, kam bylo kvůli stabilitě přidáno pěnové jádro o tloušťce 3 mm. Konstrukce směrového kormidla je vidět na obr. 8.



Obr. 8: Směrové kormidlo [7]

4 Letecké materiály

Letecké součásti zhotovené z leteckých materiálů jsou vystavovány často velice náročnému prostředí (teplotní rozdíly a povětrností podmínky) a zároveň jsou vysoce namáhány, což znamená, že je třeba stanovit základní požadavky leteckých materiálů:

1. Funkční požadavky

- Vysoká pevnost a tuhost
- Nízká hustota
- Vysoké specifické vlastnosti ($\frac{R_m}{\rho}$; $\frac{R_{p0,2}}{\rho}$; $\frac{E}{\rho}$)
- Vysoká korozní odolnost
- Odolnost proti tečení a tepelným napětím

2. Technologické požadavky

- Tvařitelnost, svařitelnost, obrobitelnost, slévatelnost

3. Základní typy materiálů

- Izotropní - většina kovových materiálů, vlastnosti stejné ve všech směrech
- Anizotropní - kompozitní materiály vyztužené vlákny, vlastnosti jsou výrazně směrově závislé

[1]

Konstrukční letecké materiály lze rozčlenit do skupin podle toho, které vlastnosti jsou pro dané materiály dominantní:

- Dřevo
- Zušlechtěné dřevo (překližky)
- Oceli (ušlechtilé oceli)
- Slitiny lehkých kovů (Mg, Al)
- Speciální slitiny (Ti, Co+Ni)

- Plasty (termosety, termoplasty)
- Kompozity
- Speciální slitiny lehkých kovů na bázi lithia

[11]

Ocasní plochy jsou v této bakalářské práci navrženy převážně z kompozitních materiálů, proto budou rozebrány pouze nekovové materiály a výroba kompozitů.

4.1 Nekovové materiály

V této podkapitole je čerpáno převážně ze zdroje [11]. Nekovové materiály jsou historicky reprezentovány zejména dřevem a jeho tvrzenými aplikacemi (překližky), plastovými materiály v nenosných konstrukcích a kompozitními materiály.

1. Dřevo a tvrzené materiály

Dřevo je přírodní nehomogenní anizotropní materiál, který je svými vlastnostmi podobný kompozitním materiálům. Konstrukce ze dřeva byly hojně využívány v průběhu první světové války a dnes se používají jen při rekonstrukci historických letounů.

- Mezi přednosti dřeva patří:

Nízká měrná hmotnost
Dobrá obrobitelnost
Dobré tlumící vlastnosti

- Mezi nedostatky dřeva patří:

Nízké mechanické vlastnosti
Obtížná automatizace výroby
Vysoká hořlavost

Větší citlivost na provozní podmínky ve srovnání s kovovými konstrukcemi

2. Plastické materiály

Plastické materiály jsou vysokomolekulární látky, které při ohřevu přecházejí do plastického stavu. Dělí se na dvě základní skupiny:

- a) Termosety - plastický stav nastane pouze při prvním ohřevu

b) Termoplasty - plastický stav při každém ohřevu

- Mezi přednosti plastických materiálů patří:

Nízká měrná hmotnost
Snadná výroba i složitých částí
Dobrá obrobitelnost, sleitelnost

- Mezi nedostatky plastických materiálů patří:

Nízké mechanické vlastnosti
Malá odolnost vůči teplotním změnám
Špatná tvarová stálost

Plastické materiály se v konstrukci používají pro nenosné a výplňové části, interiéry kabin atd.

3. Pryž

Pryž je pružná látka vyrobená vulkanizací směsi umělého nebo přírodního kaučuku a přísad. Konstrukční předností tohoto materiálu je jeho velmi nízký modul pružnosti a dobré vnitřní (materiálové) tlumení.

Použití pryže:

Výroba tlumících a pružících elementů podvozkových částí (pneumatiky, pryžové tlumiče atd.)

Tlumiče pro uchycení motoru

Technická pryž se uplatňuje při výrobě palivových a olejových hadic

4. Sendvičové materiály

Sendvičové materiály jsou vrstveně uspořádané a navzájem propojené materiály. Sendvičová konstrukce se skládá ze dvou tenkých nosných potahů a lehkého jádra (zajišťuje stabilitu potahu).

- Nosné potahy se dělají z těchto materiálů:

Dřevěné překližky
Termoplasty
Kompozitní potahy

Duralové plechy
Ocelové plechy
Titanové plechy

- Materiál jádra se dělá z těchto materiálů:

Voštinová jádra (Al, Al+Mg, ocelová, Ti, kevlarová)
Pěnová (pěnové hmoty na bázi PVC, PF, PS)

- Mezi přednosti sendvičových materiálů patří:

Nízká měrná hmotnost
Výborné tuhostní charakteristiky (v tlaku a ohybu)
Dobré únavové vlastnosti

- Mezi nedostatky sendvičových materiálů patří:

Náročná výroba (složitá technologie lepení, vypěňování)
Problematika elektrochemické koroze a rozdílné tepelné dilatace

Sendvičové materiály se používají pro nosné části křídel, trupů, ocasních ploch (směrová a výšková kormidla), křídélka, klapky a spoilery, interceptory a aerodynamické brzdy.
[11]

5. Kompozitní materiály

Kompozitní materiál je složen nejméně ze dvou strukturních fází s makroskopickým rozhraním, které společně vytvářejí finální vlastnosti materiálu, které jsou jiné než vlastnosti dílčích fází.

Kompozity jsou tvořeny maticí a výztuží, přidávané pro zvýšení tuhosti a pevnosti matrice.

Výztuž

Výztuž je ve formě vláken nebo částic, proto se rozlišují kompozity *vláknové*, kde vlákno je výztuž přenášející napětí, nebo *částicové (disperzní)*.

- *Vlákna* - se zmenšujícím se průřezem se zvyšuje pevnost, která závisí na délce vlákna. Většina vláken je kruhového průřezu o průměru od 5 do 20 μm , přičemž pro kompozity jsou vyráběna vlákna:

Skleněná

Uhlíková
Polymerní
Keramická
Kovová

Z hlediska vzájemné materiálové interakce s matricí se rozlišují vlákna pro polymerní matrice (skleněná, uhlíková, polymerní) a vlákna pro vysokoteplotní aplikace (uhlíková, keramická, kovová). Vlákna se dodávají navinutá na cívce (tzv. roving) nebo v podobě textilií. Na obr. 9 jsou uvedeny mechanické vlastnosti jednotlivých druhů vláken.

Materiál	modul pružnosti [GPa]	pevnost v tahu [MPa]
skleněné vlákno typu E	73	2500
sklovina E	73	100
uhlíkové vlákno	230 až 950	2000 až 6000
polykrystalický grafit	10	20
keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
UHMW polyethylenové vlákno	90 až 170	3000
lineární polyethylen	0,4	26

Obr. 9: Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů [3]

- *Whiskery* - speciálním případem vláken jsou tzv. whiskery, což je monokrystalické vlákno, které má výrazný poměr průřezu ke své délce: jsou vyráběny nejčastěji z uhlíku nebo karbidu křemíku. Nespornou výhodou whiskerů je jejich odolnost v lomu, která je výrazně větší než u běžných vláken o stejném materiálu. Průměr whiskeru se pohybuje okolo 1 μm . [16]
- *Částice* - přidávají se do polymerních matric pro zvýšení tuhosti. Nejčastěji používané částice jsou veliké 1 až 10 μm . Tvarově jsou nejvhodnější destičky, jehlice, disky (anizometrické částice). [3]

Matrice

Matrice je v kompozitu důležitá proto, že váže vlákna dohromady, umožňuje přenos zatížení mezi jednotlivými vlákny a zároveň chrání vlákna před vlivem okolního prostředí.

Materiálem matrice může být polymer, keramika, kov (Al, Mg, Ti), sklo, sklokeramika nebo uhlík, přičemž v leteckém průmyslu je nejčastěji používanou matricí polymer, a to polymer na bázi pryskyřice. [11], [16]

Prepreg

Prepreg je speciální polotovar k výrobě kompozitů. Jedná se o předem naimpregnovanou

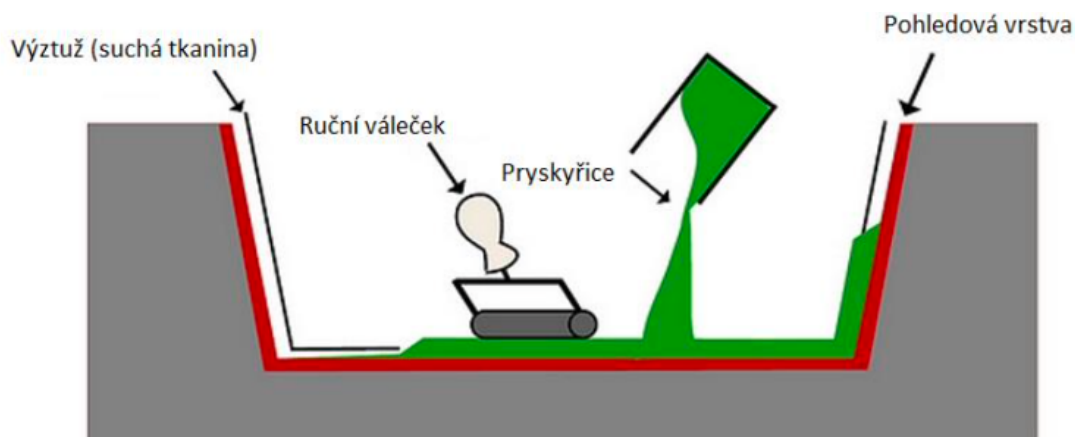
tkaninu v matrici, jejíž nespornou výhodou je to, že již nemusíme vlákna prosycovat pojivem. [10]

4.2 Výroba kompozitů

Způsobů výroby kompozitů je několik od ruční laminace až po zcela automatizované procesy. V následujících bodech bude nastíněno několik způsobů výroby:

1. Ruční laminace

Ruční laminace spočívá ve vrstvení tkanin do formy a jejich následném ručním prosycování pojivem. Jako pojivo se nejčastěji používá isoftalycká polyesterová pryskyřice s příměsí UV inhibitorů. Formy jsou pak nejčastěji kovové, dřevěné nebo laminátové. Samotná technologie má následující postup. Nejdříve se do formy nanese pojivo, které bude tvořit výsledný povrch. Poté se začínají klást jednotlivé vrstvy tkanin, které je potřeba řádně prosytit pojivem, čehož se v praxi docílí válečkem. U prosycování je důležité, aby byla tkanina rozumným množstvím pojiva prosycena celá rovnoměrně. Je nežádoucí prosytit tkaninu v průměru, neboť to může zapříčinit nežádoucí mechanické vlastnosti. [9]

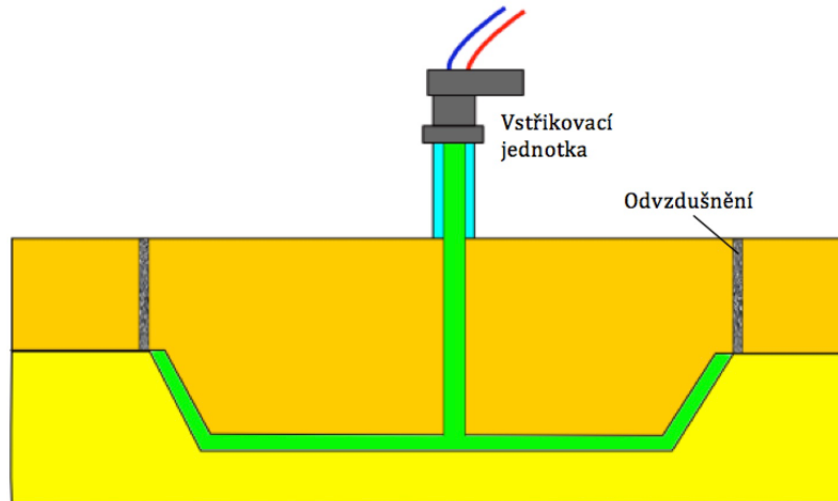


Obr. 10: Ruční laminace [9]

2. Metoda RTM - reakční vstřikování

Tato metoda spočívá ve výrobě vláknového předlisku ve formě a následném zastříknutí předlisku pryskyřicí (matricí). Pryskyřice se následně pohybuje skrz výztuž a vytlačuje vzduch, který je odváděn odvzdušňovacími ventily umístěnými v nejvyšších bodech

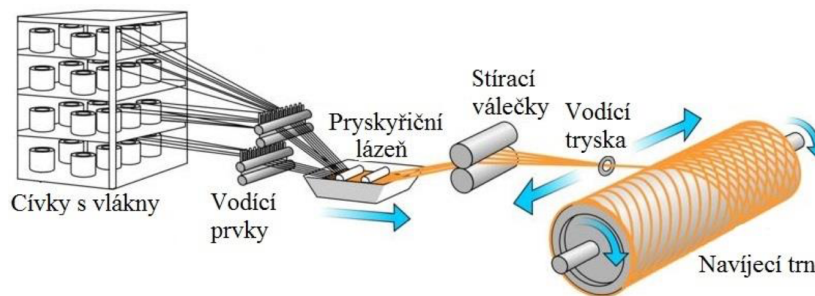
dutiny formy, nebo v prostorách dutiny. Tlak pryskyřice se při této metodě pohybuje okolo 0,3 MPa. [5]



Obr. 11: Metoda RTM [5]

3. Metoda navíjení

Při této metodě se výztuž, většinou skelné nebo uhlíkové vlákno, které je předem naimpregnováno pojivem (matricí), navíjí na jádro (trn) ve tvaru výrobku. Proto je tato metoda vhodná pro výrobu dutých výrobků, jako jsou palivové nádrže apod. [5]

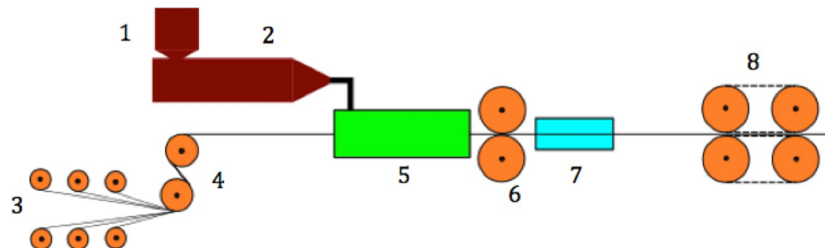


Obr. 12: Metoda navíjení [5]

4. Pultruze

Technologie pultruze spočívá v tom, že vlákna, která jsou na začátku v podobě rovingu nebo plošných rohoží, jsou tažena skrz celou výrobní linku. Nejdříve projdou srovnávačem, který je rovnoměrně rozmístí, pak vstoupí do vytlačovací hlavy, kde je na ně „vytlačovačem“ nanášeno pojivo. Následně se proces podobá technologii vytlačování.

Kontinuální pás je tvarován, pak prochází přes chladicí a odtahovací zařízení, po kterém následuje dělení na finální rozměr. [5]



Obr. 13: Metoda pultruze [5]

5. Autokláv

Pro výrobu kompozitu je zde jako polotovár použit prepreg. Technologie autoklávu probíhá následovně: přesně nařezaný prepreg se vrství do formy, ta je pak s dalšími technickými pomocnými foliemi zabalena do tzv. vakuového pytle. Vše se pak vloží do autoklávu, kde za vysokých teplot a vysokého tlaku dochází k vytvrzování. [8]



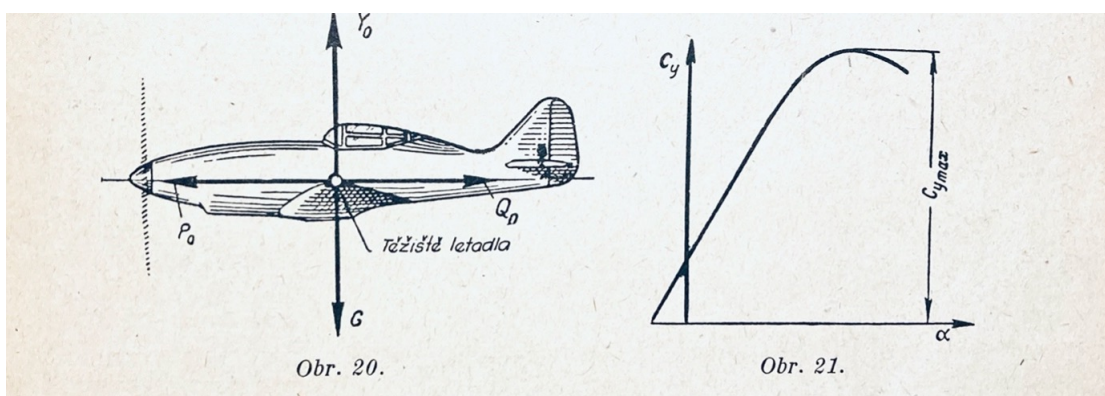
Obr. 14: Autokláv [8]

5 Zatížení OP

Obecně jsou ocasní plochy zatíženy setrvačnými a aerodynamickými silami. Setrvačné síly jsou vzhledem k nízké hmotnosti OP oproti silám aerodynamickým značně menší a při návrhu se s nimi nepočítá.

5.1 Síly působící na letadlo za letu

Při přímočarém vodorovném letu působí na letoun tyto síly viz obr.15.



Obr. 15: Síly působící na letadlo za letu [12]

Aby letadlo mohlo konat vodorovný přímočarý let stálou rychlostí v , musí být všechny tyto síly v rovnováze. Proto

$$Y_0 = G \cdot P_0 = Q_0 \quad (5.1)$$

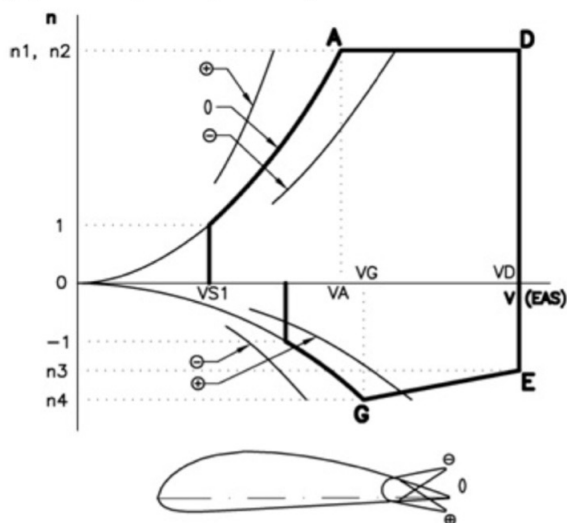
[12]

5.2 Letová zatížení dle předpisu UL 2 část I. -ULL, znění 2019, max. MTOM 600 kg

Dle UL 2 § 333 je důležité, aby pevnost konstrukce byla prokázána pro všechny kombinace rychlostí letu a násobků zatížení, nacházejících se na hraniční křivce a uvnitř obálky zatížení popsané v následujícím podkapitole. [13]

5.3 Definice letového násobku

Letové násobky jsou dány poměrem složky vzdušných sil, které působí kolmo na dráhu letu letounu, k tíži letounu. Při kladném násobku je vzdušná síla orientovaná vzhledem k letounu nahoru. [4]



Obr. 16: Obálka obrátů [13]

5.4 UL 2 § 335 Návrhové rychlosti letu

Pro uvažované zatížení ocasních ploch dle předpisu UL 2, je potřeba zmínit 4 návrhové rychlosti, jak uvádí [13]:

1. Návrhová manévrovací rychlost V_A

$$V_A = V_{S1} \cdot \sqrt{n} \quad (5.2)$$

- V_{S1} je stanovená návrhová pádová rychlost při maximální návrhové hmotnosti, zasunutých vztlakových klapkách a s motorem ve volnoběhu.

2. Návrhová rychlost letu s vysunutými vztlakovými klapkami V_F

Při všech stávajících konfiguracích nesmí být V_F menší než větší z obou následujících hodnot:

$$1,4 \cdot V_{S1}$$

$$1,8 \cdot V_{SF}$$

- V_{SF} je vypočtená pádová rychlost s plně vysunutými vztlakovými klapkami a při maximální hmotnosti

3. Maximální návrhová rychlost V_D

Maximální návrhová rychlost může být volena navrhovatelem, ovšem nesmí být menší než větší z hodnot:

$$1,2 \cdot V_H$$

$$1,5 \cdot V_A$$

– V_H je maximální rychlost vodorovného letu při maximálním trvalém výkonu motoru

4. Návrhová rychlost při silném poryvu V_B

Maximální návrhová rychlost při silném poryvu může být volena navrhovatelem, ovšem:

Nesmí být menší než V_A

Nemusí být větší než $0,9 \cdot V_H$

5.5 Zatížení VOP

V této podkapitole bude vysvětlen výpočet zatížení na VOP dle UL 2 [13].

5.5.1 Vyvažovací - UL 2 § 421

Vyvažovací zatížení je takové zatížení, které je potřebné k zachování rovnováhy při jakýchkoliv daných podmínkách letu bez klopivých zrychlení kolem příčné osy. VOP musí být navrženy pro taková vyvažovací zatížení, která se vyskytnou v jakémkoliv bodě obálky obrátů a při poloze vztlakových klapků podle bodu UL 2 § 335. [13]

5.5.2 Obratové - UL 2 § 423

VOP musí být navrženy na obratová zatížení, která je možno očekávat při pilotem vyvolaných obratech při všech rychlostech až do VD. [13]

Zatížení musí být určeno pro náhlou výchylku výškového řízení, přičemž je nutno vzít v úvahu následující případy:

Rychlost V_A při maximální výchylce nahoru

Rychlost V_A při maximální výchylce dolů

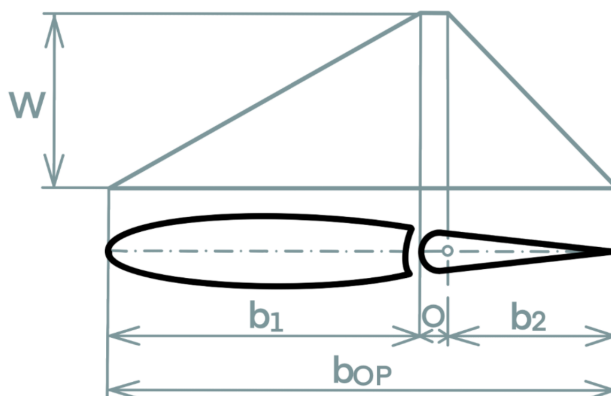
Rychlost V_D při jedné třetině maximální výchylky nahoru

Rychlost V_D při jedné třetině maximální výchylky dolů

1. Letoun je na počátku ve vodorovném letu a ani jeho poloha ani rychlost se nemění.
2. Zatížení jsou vyvážena setrvačnými silami.

[13]

Pro zatížení při obratu se vychází z rozložení zatížení po hloubce, které je na obr. 17.



Obr. 17: Rozložení zatížení po hloubce při obratu [7]

5.5.3 Poryvové - UL 2 § 425

Pokud není k dispozici přesnější výpočet odpovídající skutečným podmínkám, musí se síly působící na vodorovné ocasní plochy počítat následujícím způsobem:

$$P_{VOP} = p_0 + 0,5 \cdot \rho_0 \cdot a_{VOP} \cdot S_{VOP} \cdot U \cdot k_{VOP} \cdot V \cdot \left(1 - \frac{d\epsilon}{d\alpha}\right), \quad kde \quad (5.3)$$

P_{VOP} ... Síla na VOP [N]

p_0 ... Vyvažovací síla na VOP, která působí před zatížení poryvem [N]

ρ_0 ... Hustota vzduchu při hladině moře [$1,225 \text{ kg/m}^3$]

a_{VOP} ... Sklon vztlakové čáry VOP [rad^{-1}]

S_{VOP} ... Plocha VOP [m^2]

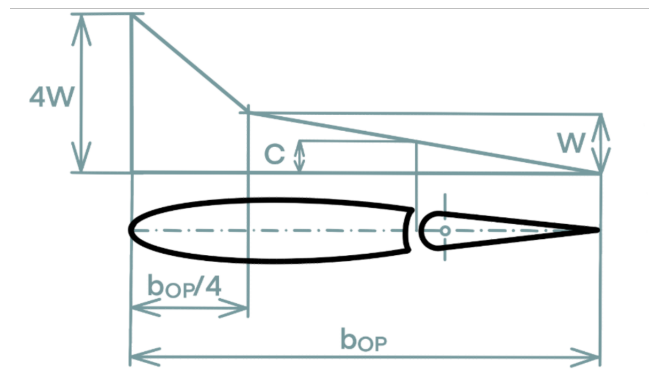
U ... Rychlost poryvu [m/s]

k_{VOP} ... Zmírňující součinitel (může být použita stejná hodnota jako u křídla) [–]

$\frac{d\epsilon}{d\alpha}$... Derivace zešikmení proudu podle úhlu náběhu v místě VOP

[13]

Pro zatížení při poryvu se vychází z rozložení zatížení po hloubce, které je na obr. 18.



Obr. 18: Rozložení zatížení po hloubce při poryvu [7]

5.5.4 Nesymetrické zatížení - UL 2 § 441

Dojde-li ke zvýšení zatížení vlivem účinku vrtulového proudu, pak je třeba toto zatížení podrobněji spočítat. Pokud se však jedná o běžné zatížení, tak lze uvažovat, že na jednu polovinu VOP působí 100 % všech zatížení a na druhou polovinu působí 70 % všech zatížení, přičemž do všech zatížení řadíme zatížení obrátové, vyvažovací a poryvové. [13]

5.6 Zatížení SOP

V následující podkapitole bude rozvedeno zatížení na SOP dle předpisu UL 2 [13].

5.6.1 Obrátové zatížení - UL 2 § 441

SOP musí být navrženy tak, aby odolaly zatížení při obrátu, které může nastat při maximální výchylce směrového kormidla při rychlosti V_A , nebo při jedné třetině výchylky směrového kormidla při rychlosti V_D . [13]

V případě zatížení při manévru se uvažuje stejné rozložení zatížení po hloubce SOP, jako u VOP viz obr. 17.

Toto zatížení bylo pro směrové kormidlo stanoveno v práci kolegy Němce a pro kýlovou plochu bude dopočteno v kapitole 5.7.

5.6.2 Poryvové zatížení - UL 2 § 443

Pokud není k dispozici přesnější výpočet, který by odpovídal skutečným podmínkám, musí se použít následující vzorec:

$$P_{SOP} = 0,5 \cdot \rho_0 \cdot a_{SOP} \cdot S_{SOP} \cdot U \cdot k_{SOP} \cdot V, \quad kde \quad (5.4)$$

$$k_{SOP} = \frac{0,88 \cdot \mu}{5,3 + \mu}, \quad kde \quad (5.5)$$

$$\mu = \frac{2 \cdot M}{S_{SOP} \cdot \rho_0 \cdot l m_s \cdot a_{SOP}}, \quad kde \quad (5.6)$$

P_{SOP} ... Síla na SOP [N]

ρ_0 ... Hustota vzduchu při hladině moře [1,225 kg/m³]

a_{SOP} ... Sklon vztlakové čáry SOP [rad⁻¹]

S_{SOP} ... Plocha SOP [m²]

U ... Rychlost poryvu [m/s]

k_{SOP} ... Zmírňující součinitel [-]

M ... Maximální hmotnost letounu [kg]

$l m_s$... Střední geometrická tětíva SOP [m]

[13]

Pro výpočet tohoto zatížení se uvažuje rozložení zatížení po hloubce, které je stejné jako zatížení při poryvu u VOP viz obr. 18.

5.7 Výpočet zatížení

V této podkapitole bude stanoveno zatížení působící na VOP a SOP.

5.8 Výpočet zatížení VOP

Zatížení VOP bylo napočítáno ve všech případech kromě zatížení při poryvu výškového kormidla, které se však může zanedbat, neboť je u výškového kormidla výrazně menší než zatížení při manévru.

Zároveň došlo k úpravě výpočtu zatížení stabilizátoru při poryvu, neboť pan Větrovec ve své práci počítal pro případ poryvu s reakcemi závěsů při manévru.

Maximální (provozní) zatížení působící na VOP je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1: Provozní zatížení na VOP

	Výškové kormidlo		Stabilizátor	
	Manévr	Poryv	Manévr	Poryv
T_{max}	117,067 N	41,806 N	-513,565 N	-960,864 N
$M_{O_{max}}$	11,195 N.m	3,998 N.m	-227,148 N.m	-401,961 N.m
Mk_{max}	19,000 N.m	3,731 N.m	14,431 N.m	-68,667 N.m

5.9 Výpočet nesymetrické zatížení

U VOP je kromě zatížení od manévru a zatížení od poryvu ještě nedílnou částí zatížení, nesymetrické zatížení. Jak již bylo řečeno v podkapitole 5.5, zatížení nesymetrické se určí dle stavebního předpisu UL 2 [13] jako 100 % zatížení na jedné straně VOP a 70 % zatížení na straně druhé.

5.9.1 Výpočet nesymetrické spojitě zatížení na VOP

Nesymetrické zatížení je určeno pro případ poryvu, které je pro VOP kritičtější než zatížení při manévru.

$$q_{0st}^P = 1\,129,438 \quad N/m \dots \text{pro koncový řez levé poloviny stabilizátoru}$$

$$q_{kst}^P = 791,896 \quad N/m \dots \text{pro kořenový řez levé poloviny stabilizátoru}$$

$$q_{0vk}^P = 142,029 \quad N/m \dots \text{pro koncový řez levé poloviny výškového kormidla}$$

$$q_{kvk}^P = 99,527 \quad N/m \dots \text{pro kořenový řez levé poloviny výškového kormidla}$$

Na druhé polovině stabilizátoru budou tyto hodnoty sníženy o 30 %.

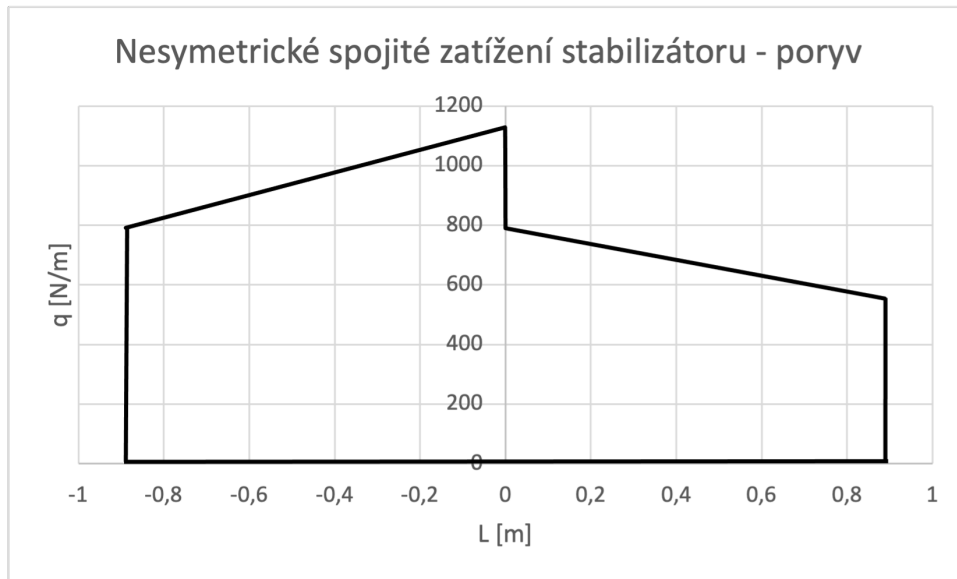
$$q_{0st}^P = 0,7 \cdot 1\,129,438 = 790,607 \quad N/m \dots \text{pro koncový řez pravé poloviny stabilizátoru}$$

$$q_{kst}^P = 0,7 \cdot 791,896 = 554,327 \quad N/m \dots \text{pro kořenový řez pravé poloviny stabilizátoru}$$

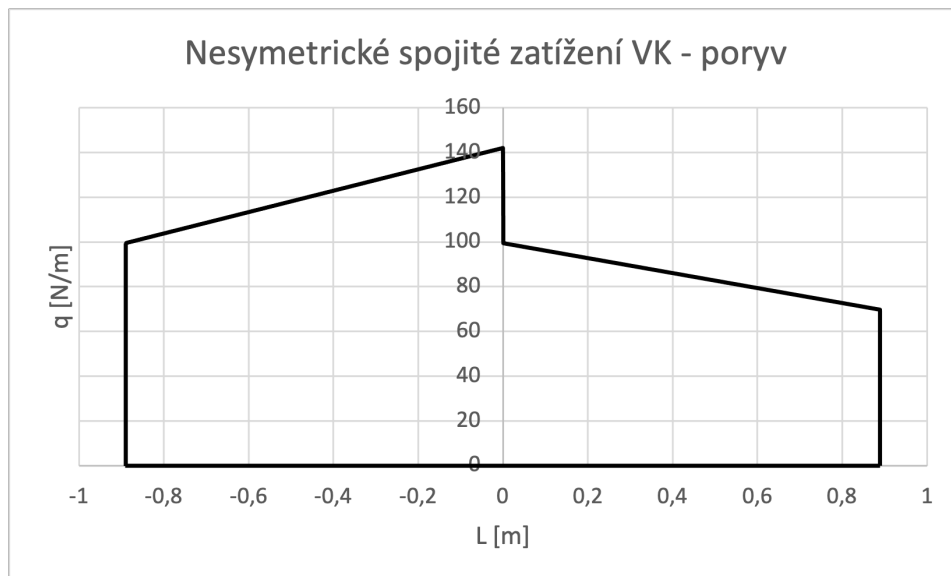
$$q_{0vk}^P = 0,7 \cdot 142,029 = 99,4203 \quad N/m \dots \text{pro koncový řez pravé poloviny výškového kormidla}$$

$$q_{kvk}^P = 0,7 \cdot 99,527 = 69,6689 \quad N/m \dots \text{pro kořenový řez pravé poloviny výškového kormidla}$$

Průběh spojitěho zatížení po délce stabilizátoru a výškového kormidla je vidět v grafech 1 a 2.



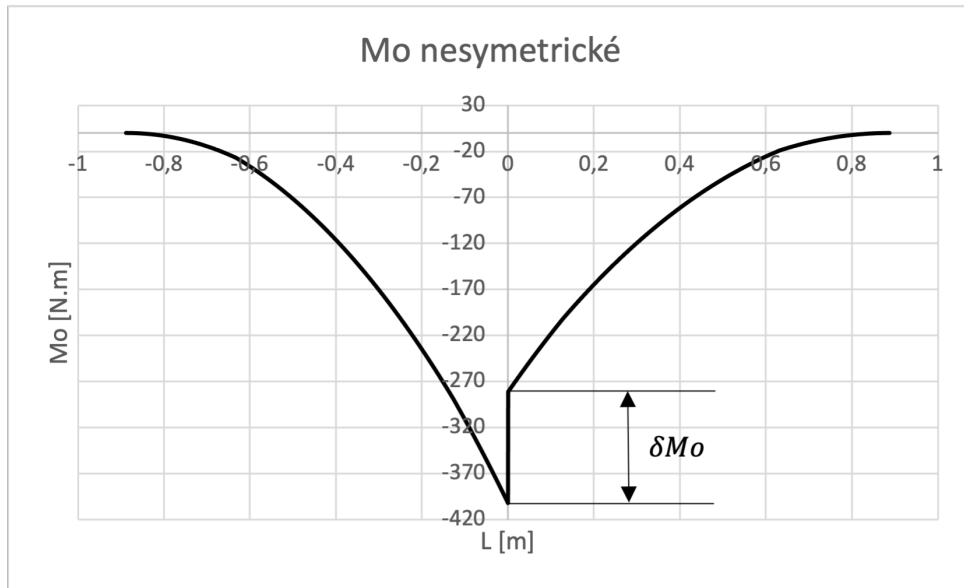
Graf 1: Nesymetrické zatížení stabilizátoru



Graf 2: Nesymetrické zatížení VK

5.9.2 Nesymetrický ohybový moment

Z nesymetrického ohybového momentu získáme důležitou hodnotu pro další výpočty, a to δM_o viz graf 3.



Graf 3: Nesymetrický ohybový moment

$$\delta M_o = M_{o_{max}} \cdot (1 - 0,7) = 0,3 \cdot (-401,961) = -120,588 \text{ N.m} \quad (5.7)$$

5.10 Zatížení SOP

Zatížení působící na SOP bylo stanoveno jen pro směrové kormidlo v práci pana Němce [7] a je uvedeno v tabulce 3.

Zatížení působící na kýlovou plochu bude dopočteno v následujících podkapitolách.

5.10.1 Stanovení zatížení kýlové plochy při manévru

Při manévru působí na kýlovou plochu rozložení tlaku po hloubce tak, jak je to popsáno v kapitole 5.6.1 a znázorněno na obr. 17.

Ve výpočtech zatížení se bude pracovat s hodnotou průměrného provozního zatížení $W^=$, která byla vypočtena v rovnici 5.8.

Na základě znalosti této hodnoty lze vypočítat velikost měrného zatížení podle rovnice 5.9 pro kořen a podle rovnice 5.10 pro volný konec kýlové plochy.

$$W^= = 220 + 20,5 \cdot \frac{G}{S} = 220 + 20,5 \cdot \frac{345}{5,029} = 1\,626,343 \text{ Pa} \quad (5.8)$$

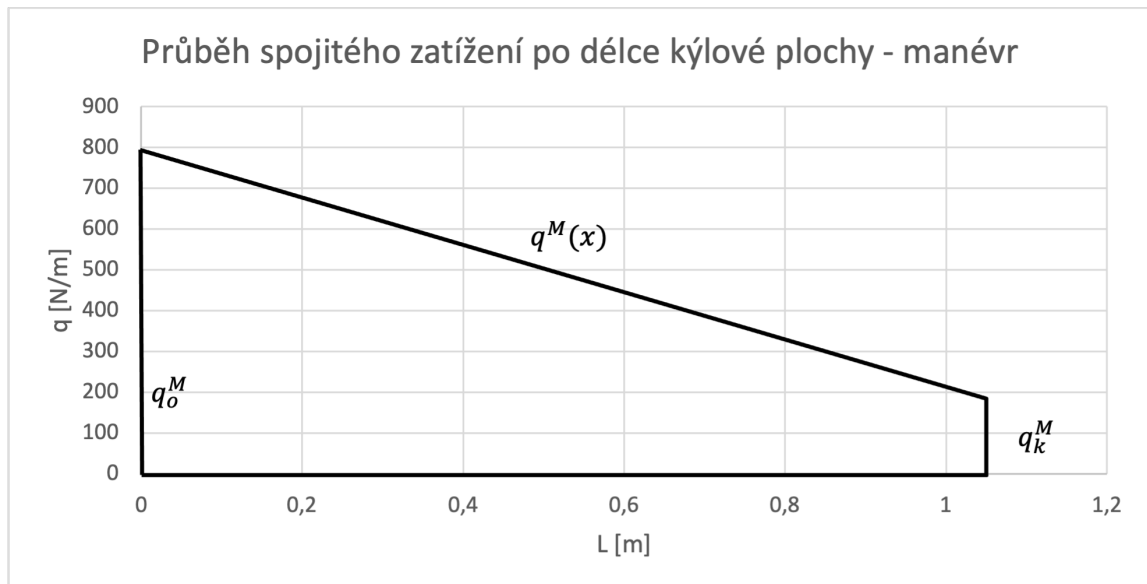
$$W_o^M = \frac{W^{\cdot} \cdot b_{op}}{\frac{1}{2} \cdot b_1 + o + \frac{1}{2} \cdot (b_2 - o)} = \frac{1\,626,343,0,964\,5}{\frac{1}{2} \cdot 0,500\,3 + 0,025 + \frac{1}{2} \cdot (0,464 - 0,025)} = 3\,170,506\,Pa \quad (5.9)$$

$$W_k^M = \frac{W^{\cdot} \cdot b_{op}}{\frac{1}{2} \cdot b_1 + o + \frac{1}{2} \cdot (b_2 - o)} = \frac{1\,626,343,0,25}{\frac{1}{2} \cdot 0,125 + 0,025 + \frac{1}{2} \cdot (0,125 - 0,025)} = 2\,956,988\,Pa \quad (5.10)$$

Následně lze stanovit velikost spojitěho zatížení kýlové plochy pro kořen a volný konec, viz rovnice 5.11 a 5.12, které se vypočte z obr. 17 pro jednotlivý řez po hloubce jako obsah plochy pod křivkou, takže spojitě zatížení nebude z důvodu proměnlivé hloubky kýlové plochy konstantní a bude mít průběh, který je znázorněn v grafu 4.

$$q_o^M = \frac{1}{2} \cdot W_o^M \cdot b_1 = \frac{1}{2} \cdot 3\,170,506 \cdot 0,500\,3 = 793,102\,N/m \quad (5.11)$$

$$q_k^M = \frac{1}{2} \cdot W_k^M \cdot b_1 = \frac{1}{2} \cdot 2\,956,988 \cdot 0,125 = 184,812\,N/m \quad (5.12)$$



Graf 4: Průběh spojitěho zatížení po délce kýlové plochy - manévr

5.10.2 Průběh posouvající síly a ohybového momentu při manévru

Průběh posouvající síly znázorněný v grafu 5 je získán pomocí Schwedlerovy věty integrací spojitého zatížení po délce kýlové plochy, viz rovnice 5.13, přičemž jsou uvažovány zavedené reakce v závěsech, které byly získány z práce pana Němce a jsou uvedeny v tabulce 2.

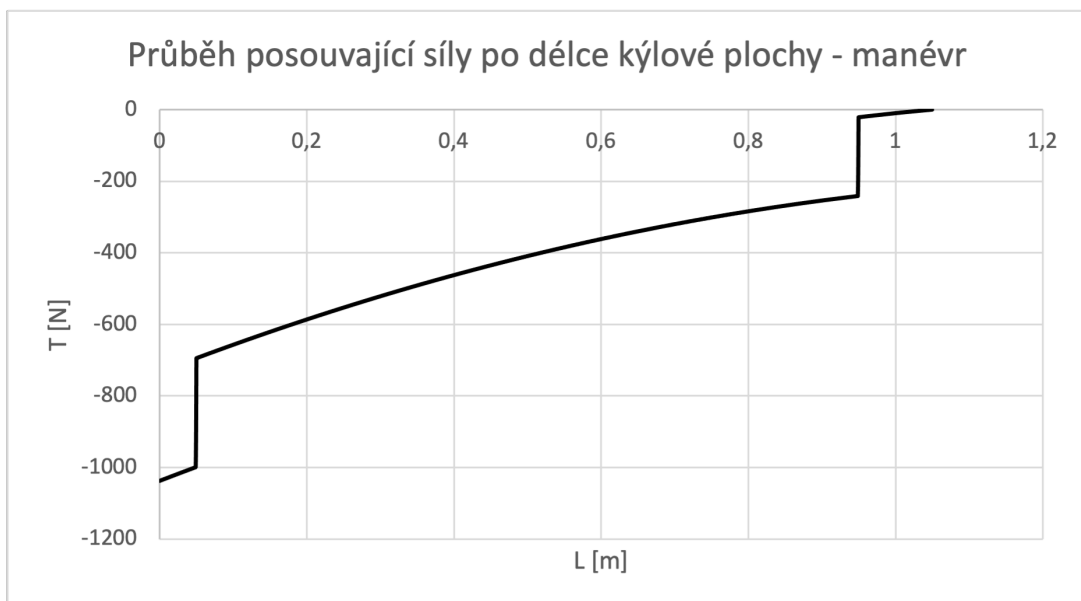
$$T^M = \int_0^L q(x)^M dx \quad (5.13)$$

Průběh ohybového momentu znázorněný v grafu 6 je též získán pomocí Schwedlerovy věty integrací posouvající síly po délce kýlové plochy, viz rovnice 5.14.

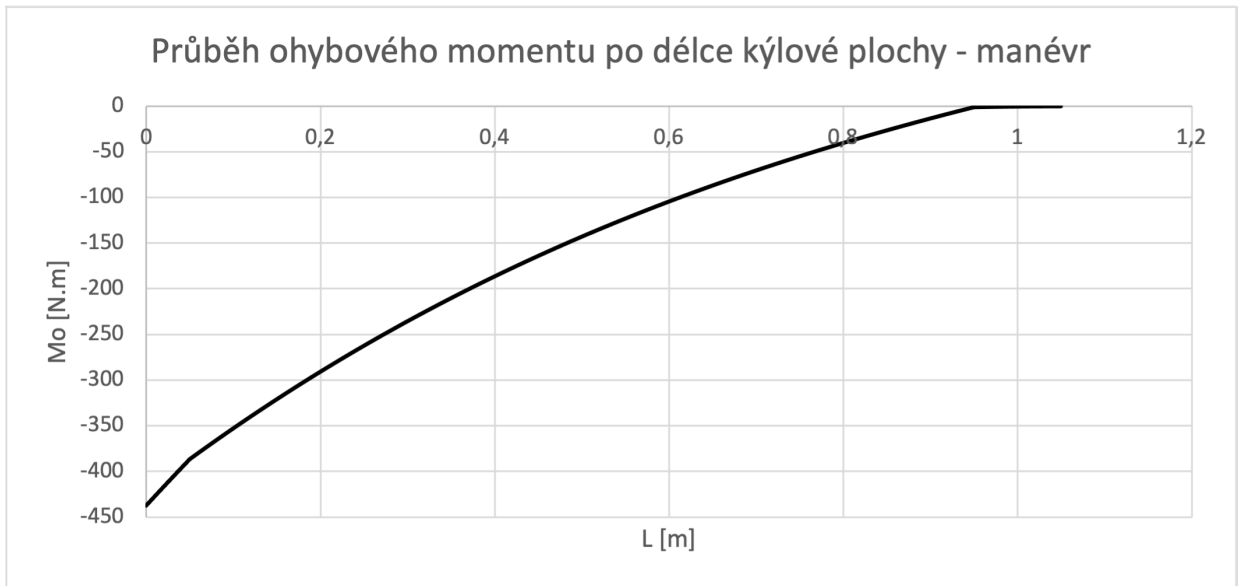
$$Mo^M = \int_0^L T(x)^M dx \quad (5.14)$$

Tab. 2: Reakce v závěsech [7]

F_A	303,77	N
F_B	219,8	N
l_A	50	mm
l_B	950	mm



Graf 5: Průběh posouvající síly po délce kýlové plochy - manévr

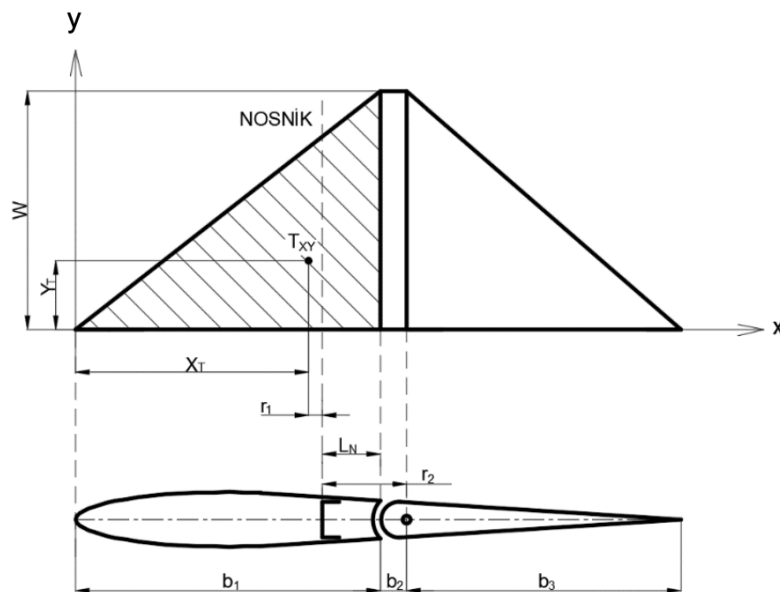


Graf 6: Průběh ohybového momentu po délce kýlové plochy - manévr

5.10.3 Průběh kroutícího momentu při manévru

Kroutící moment při manévru je vyvolán za prvé výslednicí spojitého zatížení na rameni od místa působení této výslednice k nosníku, a za druhé reakcemi v závěsech, které působí na rameni od osy otáčení směrového kormidla k nosníku.

Výslednice spojitého zatížení působí v těžišti zatěžovacího obrazce, viz obr. 19.



Obr. 19: Poloha výslednice spojitého zatížení [15]

Výpočet polohy těžiště zatěžovacího obrazce u kořene (pro výpočet Mk není potřeba souřadnice ve směru y):

$$x_{To} = \frac{2}{3} \cdot b_{1o} = \frac{2}{3} \cdot 500,3 = 333,5 \text{ mm} \quad (5.15)$$

Vzdálenost nosníku od odtokové hrany kýlové plochy u kořene odečtena z CAD modelu:

$$L_{No} = 78,8 \text{ mm} \quad (5.16)$$

Vzdálenost nosníku od osy otáčení směrového kormidla u kořene odečtena z CAD modelu:

$$r_{2o} = 19,3 \text{ mm} \quad (5.17)$$

Vzdálenost od nosníku k těžišti zatěžovacího obrazce u kořene:

$$r_{1o} = b_{1o} - x_{To} - L_{No} = 500,3 - 333,533 - 78,815 = 87,9 \text{ mm} \quad (5.18)$$

Výpočet polohy těžiště zatěžovacího obrazce na volném konci:

$$x_{Tk} = \frac{2}{3} \cdot b_{1k} = \frac{2}{3} \cdot 125 = 83,3 \text{ mm} \quad (5.19)$$

Vzdálenost nosníku od odtokové hrany kýlové plochy na volném konci odečtena z CAD modelu:

$$L_{Nk} = 20,3 \text{ mm} \quad (5.20)$$

Vzdálenost nosníku od osy otáčení směrového kormidla na volném konci odečtena z CAD modelu:

$$r_{2k} = 28,8 \text{ mm} \quad (5.21)$$

Vzdálenost od nosníku k těžišti zatěžovacího obrazce na volném konci:

$$r_{1k} = b_{1k} - x_{Tk} - L_{Nk} = 125 - 83,333 - 20,264 = 21,4 \text{ mm} \quad (5.22)$$

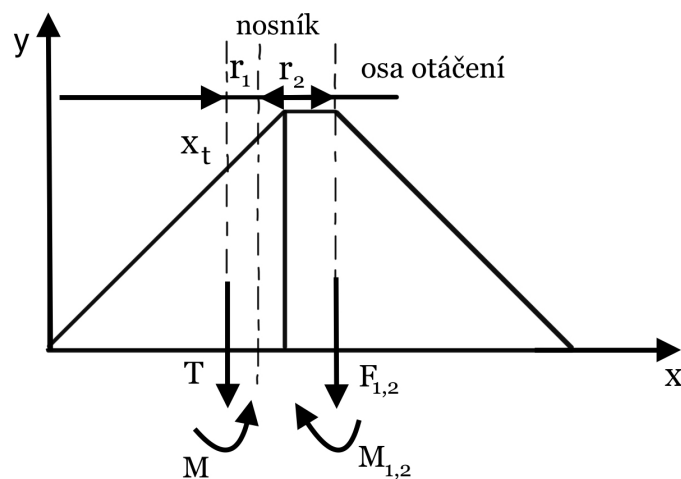
Lineární funkce popisující průběh ramene $r_1(x)$ po délce kýlové plochy:

$$r_1(x) = 0,0879 - 0,063.x \quad (5.23)$$

Lineární funkce popisující průběh ramene $r_2(x)$ po délce kýlové plochy:

$$r_2(x) = 0,0193 + 0,009.x \quad (5.24)$$

Tím byly stanoveny funkce ramen, na kterých působí síly od reakcí v závěsech a posouvající síla, čímž vytvářejí kroučící moment. Na obr. 20 je zobrazeno působení kroučícího momentu, přičemž je vidět, že kroučící moment od posouvající síly působí proti kroučícímu momentu od reakcí v závěsech.



Obr. 20: Působení kroučících momentů [15]

Metodou řezu jsou zjištěny průběhy v jednotlivých intervalech:

Pro interval $\langle 0; 0,05 \rangle$:

$$M_k^M(x) = T^M(x).r_1(x) - F_1.r_2(x) - F_2.r_2(x) \quad (5.25)$$

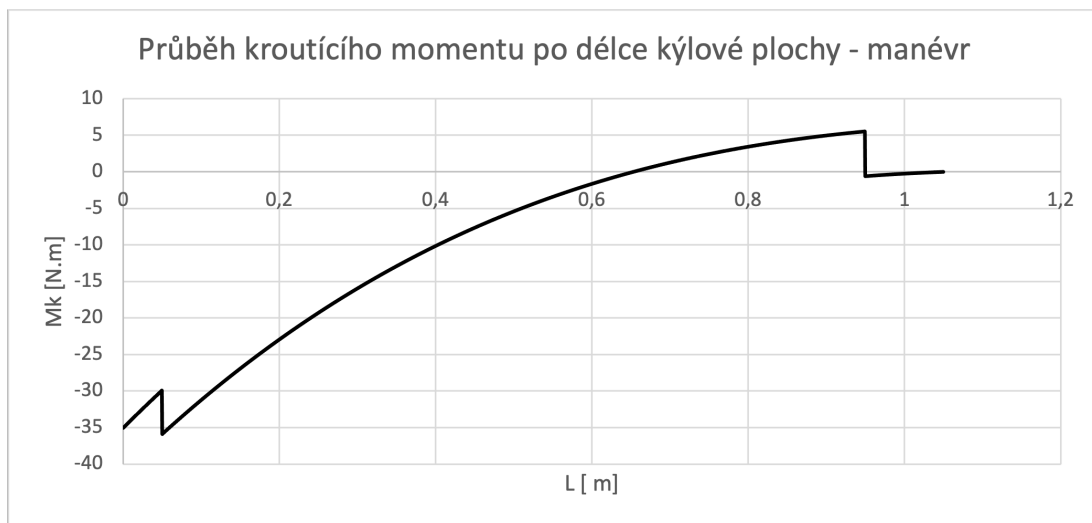
Pro interval $\langle 0, 05; 0, 95 \rangle$:

$$M_k^M(x) = T^M(x) \cdot r_1(x) - F_2 \cdot r_2(x) \quad (5.26)$$

Pro interval $\langle 0, 95; 1, 05 \rangle$:

$$M_k^M(x) = T^M(x) \cdot r_1(x) \quad (5.27)$$

Průběh kroutícího momentu je následně vyneseno v grafu 7.



Graf 7: Průběh kroutícího momentu po délce kýlové plochy - manévr

5.10.4 Stanovení zatížení kýlové plochy při poryvu

Při poryvu působí na kýlovou plochu zatížení popsané v podkapitole 5.6.2 a zobrazené na obr. 18, tedy čtyřikrát větší než při manévru.

$$W_o^P = 4 \cdot W_o^M = 4 \cdot 3\,170,506 = 12\,682,025 \text{ Pa} \quad (5.28)$$

$$W_k^P = 4 \cdot W_k^M = 4 \cdot 2\,956,988 = 11\,827,951 \text{ Pa} \quad (5.29)$$

Ze znalosti měrného zatížení je následně vypočítáno spojité zatížení kýlové plochy při poryvu pro kořen a pro volný konec viz rovnice 5.32 a 5.34, které je získáno z obr. 18 jako plocha pod křivkou.

Pro výpočet těchto zatížení je třeba ještě stanovit z podobnosti trojúhelníků rozměr C z obr. 18, viz rovnice 5.30.

Průběh spojitého zatížení po délce kýlové plochy je pak znázorněn v grafu 8.

$$C = \frac{W \cdot b_2}{\frac{3}{4} \cdot b_{op}} Pa \quad (5.30)$$

Pro kořen:

$$C_o = \frac{3\,170,506.0,464}{\frac{3}{4} \cdot 0,964} = 2\,035,614 Pa \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} q_o^P &= \frac{3 \cdot W_o^P \cdot b_{opo}}{32} + \frac{W_o^P \cdot b_{opo}}{16} + \frac{3 \cdot C_o \cdot b_{opo}}{4} + \frac{3 \cdot b_{opo}}{8} \cdot \left(\frac{W_o^P}{4} - C_o \right) = \\ &= \frac{3 \cdot 12\,682,025 \cdot 0,964}{32} + \frac{0,964 \cdot 12\,682,025}{16} + \frac{3 \cdot 2\,035,614 \cdot 0,964}{4} + \\ &+ \left(\frac{12\,682,025}{4} - 2\,035,614 \right) \left(\frac{3 \cdot 0,964}{8} \right) = 3\,792,243 N/m \end{aligned} \quad (5.32)$$

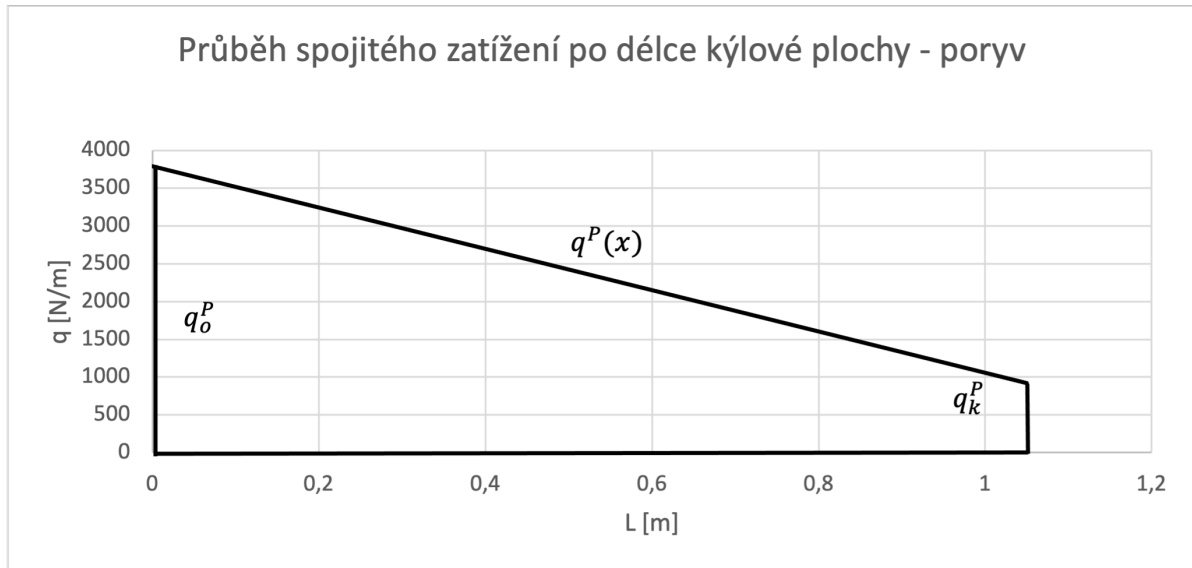
Pro volný konec:

$$C_k = \frac{2\,956,988.0,125}{\frac{3}{4} \cdot 0,250} = 1\,971,325 Pa \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} q_k^P &= \frac{3 \cdot W_k^P \cdot b_{opk}}{32} + \frac{W_k^P \cdot b_{opk}}{16} + \frac{3 \cdot C_k \cdot b_{opk}}{4} + \frac{3 \cdot b_{opk}}{8} \cdot \left(\frac{W_k^P}{4} - C_k \right) = \\ &= \frac{3 \cdot 11\,827,951 \cdot 0,25}{32} + \frac{0,25 \cdot 11\,827,951}{16} + \frac{3 \cdot 1\,971,325 \cdot 0,25}{4} + \\ &+ \left(\frac{11\,827,951}{4} - 1\,971,325 \right) \left(\frac{3 \cdot 0,25}{8} \right) = 924,059 N/m \end{aligned} \quad (5.34)$$

Rovnice spojitého zatížení pro poryv:

$$q^P(x) = 3\,792,243 - 2\,731,604 \cdot x \quad (5.35)$$



Graf 8: Průběh spojitého zatížení po délce kýlové plochy - poryv

5.10.5 Průběh posouvající síly a ohybového momentu při poryvu

Výpočet průběhu spojitého zatížení a ohybového momentu při poryvu je v zásadě stejný jako u manévru, liší se jen ve spojitém zatížení při integraci (opět je použita Schwedlerova věta, viz rovnice 5.36 a 5.37), průběhy jsou na grafech 9 a 10.

$$T^P = \int_0^L q(x)^P dx \quad (5.36)$$

$$M_o^P = \int_0^L T(x)^P dx \quad (5.37)$$

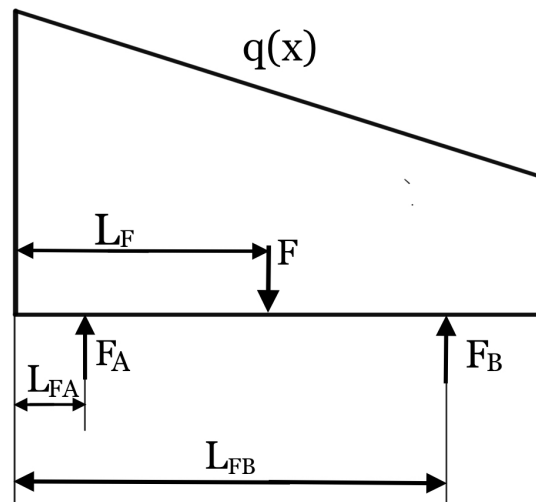
Při výpočtech jsou opět zohledněny reakce v závěsech směrového kormidla, které nebyly počítány pro případ poryvu v práci pana Němce, a které budou vypočteny v rovnicích 5.40 a 5.41, přičemž vychází z obr. 21.

$$F = \frac{q_o^P - q_k^P}{2} \cdot L + q_k^P \cdot L = \frac{242,39 - 55,26}{2} \cdot 1,05 + 55,26 \cdot 1,05 = 156,266 \text{ N} \quad (5.38)$$

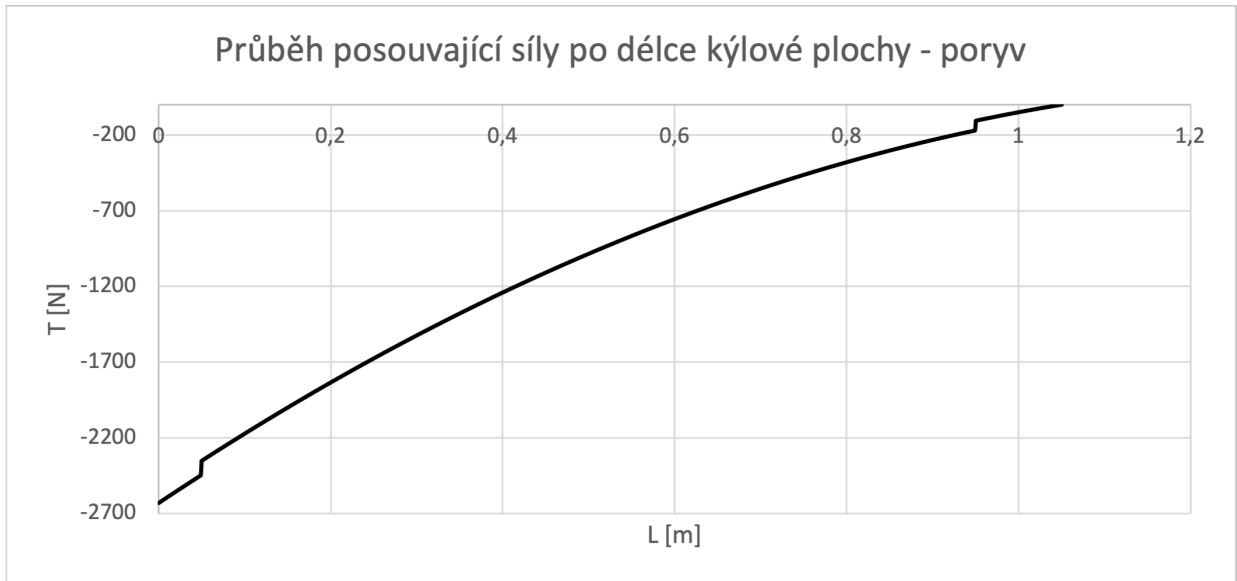
$$L_F = \frac{\frac{q_o^P - q_k^P}{6} \cdot L^2 + \frac{q_k^P}{2} \cdot L^2}{F} = \frac{\frac{242,39 - 55,26}{6} \cdot 1,05^2 + \frac{55,26}{2} \cdot 1,05^2}{155,266} = 0,417 \text{ m} \quad (5.39)$$

$$F_B = \frac{F \cdot (L_{FA} - L_F)}{L_{FA} - L_{FB}} = \frac{155,266 \cdot (0,05 - 0,417)}{0,05 - 0,95} = 63,652 \text{ N} \quad (5.40)$$

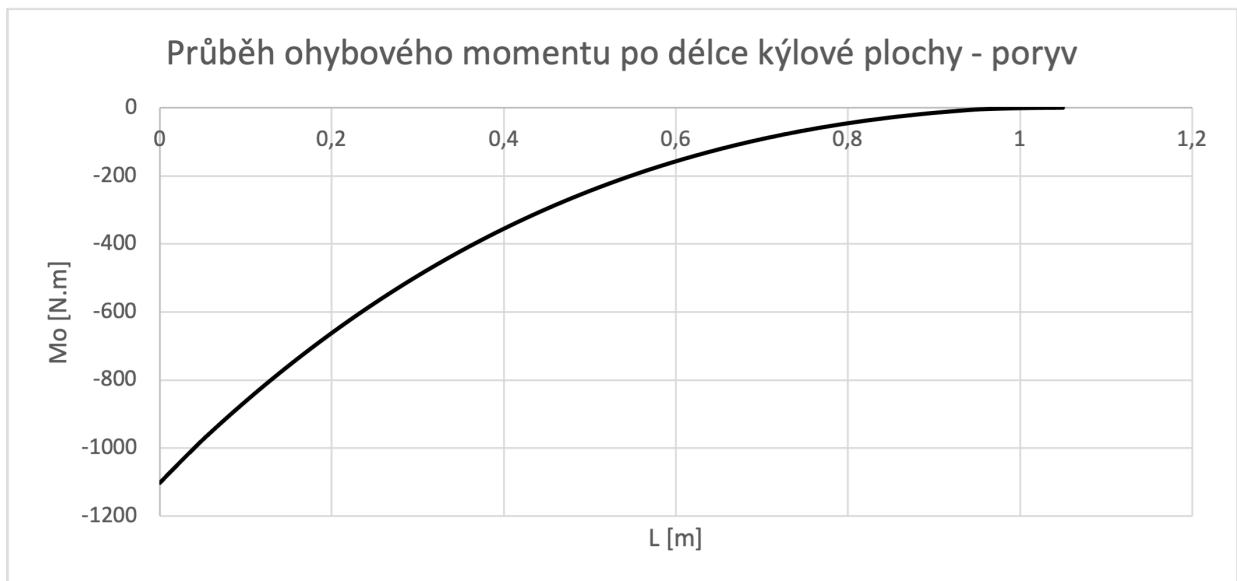
$$F_A = F - F_B = 156,266 - 63,652 = 92,615 \text{ N} \quad (5.41)$$



Obr. 21: Reakce v závěsech - poryv



Graf 9: Průběh posouvající síly po délce kýlové plochy - poryv

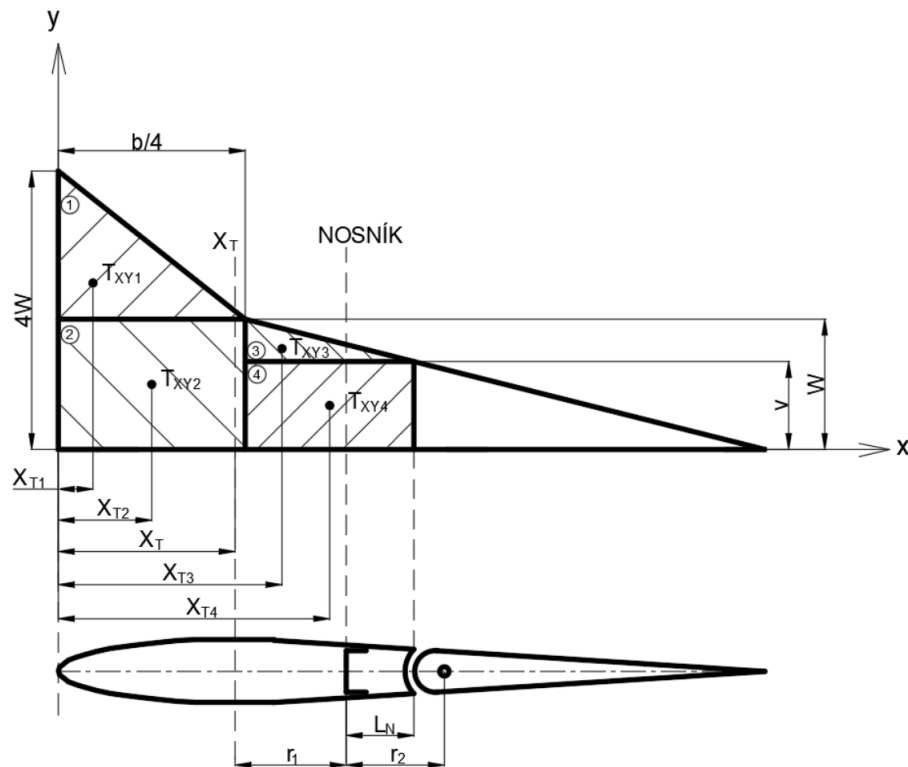


Graf 10: Průběh ohybového momentu po délce kýlové plochy - poryv

5.10.6 Průběh kroutícího momentu při poryvu

Výpočet kroutícího momentu při poryvu je skoro stejný jako u manévru. Rozdílnost je zde jen v použitých silách a spojitým zatížení.

Nejprve je opět nutné stanovit těžiště zatěžujícího obrazce, ve kterém působí výslednice spojitého zatížení.



Obr. 22: Poloha výslednice spojitého zatížení - poryv [15]

Z obr. 22 je patrné, že pro geometrickou složitost zatěžovacího obrazce se musí obrazec rozdělit na jednodušší geometrické útvary a následně se vypočte těžiště a plocha každého obrazce, pomocí nichž se určí těžiště výsledné.

Hodnota značená na obr. 22 jako V je stejná jako hodnota C , která již byla vypočtena v kapitole 5.10.4.

Výpočty pro kořen

Těžiště a plocha prvního obrazce:

$$x_{T1o} = \frac{1}{3} \cdot \frac{b_{opo}}{4} = \frac{0,964}{12} = 80,3 \text{ mm} \quad (5.42)$$

$$S_{1o} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3 \cdot W_o^P}{4} \cdot \frac{b_{opo}}{4} = \frac{3 \cdot 12 \cdot 682,025 \cdot 964}{32} = 1 \, 146 \, 138 \text{ mm}^2 \quad (5.43)$$

Těžiště a plocha druhého obrazce obrazce:

$$x_{T2o} = \frac{1}{2} \cdot \frac{b_{opo}}{4} = \frac{964}{8} = 120,5 \text{ mm} \quad (5.44)$$

$$S_{2o} = \frac{W_o^P}{4} \cdot \frac{b_{opo}}{4} = \frac{12\,682,025 \cdot 964}{16} = 746\,092 \text{ mm}^2 \quad (5.45)$$

Těžiště a plocha třetího obrazce obrazce:

$$x_{T3o} = \frac{1}{3} \cdot (b_{1o} - \frac{b_{opo}}{4}) + \frac{b_{opo}}{4} = \frac{1}{3} \cdot (500,3 - \frac{964}{4}) + \frac{964}{4} = 327,4 \text{ mm} \quad (5.46)$$

$$\begin{aligned} S_{3o} &= \frac{1}{2} \cdot (\frac{W_o^P}{4} - V) \cdot (b_{1o} - \frac{b_{opo}}{4}) = \frac{1}{2} \cdot (\frac{12\,682,025}{4} - 2\,035,614) \cdot (500,3 - \frac{964}{4}) = \\ &= 147\,138,8 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (5.47)$$

Těžiště a plocha čtvrtého obrazce obrazce:

$$x_{T4o} = \frac{1}{2} \cdot (b_{1o} - \frac{b_{opo}}{4}) + \frac{b_{opo}}{4} = \frac{1}{2} \cdot (500,3 - \frac{964}{4}) + \frac{964}{4} = 370,7 \text{ mm} \quad (5.48)$$

$$S_{4o} = V \cdot (b_{1o} - \frac{b_{opo}}{4}) = 2\,035,614 \cdot (500,3 - \frac{964}{4}) = 527\,834,7 \text{ mm}^2 \quad (5.49)$$

Výpočet celkové plochy S_o :

$$\begin{aligned} S_o &= S_{1o} + S_{2o} + S_{3o} + S_{4o} = 1\,146\,138,009 + 746\,092,006 + \\ &+ 147\,138,780 + 527\,834,710 = 2\,567\,203,5 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (5.50)$$

Výpočet celkového těžiště:

$$\begin{aligned}
 x_T &= \frac{x_{T1o} \cdot S_{1o} + x_{T2o} \cdot S_{2o} + x_{T3o} \cdot S_{3o} + x_{T4o} \cdot S_{4o}}{S_o} = \\
 &= \frac{80,333.1\ 146\ 138,009 + 120,5.746\ 092,006 + 327,433.147\ 138,780 + \\
 &\quad + 370,65.527\ 834,710}{2\ 567\ 203,505} = 165,9\ mm
 \end{aligned} \tag{5.51}$$

Hodnoty L_{No} , L_{Nk} , r_{2o} a r_{2k} jsou stejné jako pro výpočet při manévru.

Vzdálenost od nosníku k těžišti zatěžovacího obrazce u kořene:

$$r_{1o} = b_{1o} - x_{To} - L_{No} = 500,3 - 165,860 - 78,815 = 255,6\ mm \tag{5.52}$$

Výpočty pro volný konec

Těžiště a plocha prvního obrazce:

$$x_{T1k} = \frac{1}{3} \cdot \frac{b_{opk}}{4} = \frac{250}{12} = 20,8\ mm \tag{5.53}$$

$$S_{1k} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3 \cdot W_k^P}{4} \cdot \frac{b_{opk}}{4} = \frac{3 \cdot 11\ 827,951 \cdot 250}{32} = 277\ 217,6\ mm^2 \tag{5.54}$$

Těžiště a plocha druhého obrazce:

$$x_{T2k} = \frac{1}{2} \cdot \frac{b_{opk}}{4} = \frac{250}{8} = 31,3\ mm \tag{5.55}$$

$$S_{2k} = \frac{W_k^P}{4} \cdot \frac{b_{opk}}{4} = \frac{11\ 827,951 \cdot 250}{16} = 184\ 811,7\ mm^2 \tag{5.56}$$

Těžiště a plocha třetího obrazce obrazce:

$$x_{T3k} = \frac{1}{3} \cdot \left(b_{1k} - \frac{b_{opk}}{4} \right) + \frac{b_{opk}}{4} = \frac{1}{3} \cdot \left(125 - \frac{250}{4} \right) + \frac{250}{4} = 80,3 \text{ mm} \quad (5.57)$$

$$\begin{aligned} S_{3k} &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{W_k^P}{4} - V \right) \cdot \left(b_{1k} - \frac{b_{opk}}{4} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{11\,827,951}{4} - 1\,971,325 \right) \cdot \left(125 - \frac{250}{4} \right) = \\ &= 30\,801,9 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (5.58)$$

Těžiště a plocha čtvrtého obrazce obrazce:

$$x_{T4k} = \frac{1}{2} \cdot \left(b_{1k} - \frac{b_{opk}}{4} \right) + \frac{b_{opk}}{4} = \frac{1}{2} \cdot \left(125 - \frac{250}{4} \right) + \frac{250}{4} = 93,8 \text{ mm} \quad (5.59)$$

$$S_{4k} = V \cdot \left(b_{1k} - \frac{b_{opk}}{4} \right) = 1\,971,325 \cdot \left(125 - \frac{250}{4} \right) = 123\,207,8 \text{ mm}^2 \quad (5.60)$$

Výpočet celkové plochy S_k :

$$\begin{aligned} S_k &= S_{1k} + S_{2k} + S_{3k} + S_{4k} = 277\,217,602 + 184\,811,734 + 30\,801,961 + 123\,207,813 = \\ &= 616\,039,1 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (5.61)$$

Výpočet celkového těžiště:

$$\begin{aligned} x_T &= \frac{x_{T1k} \cdot S_{1k} + x_{T2k} \cdot S_{2k} + x_{T3k} \cdot S_{3k} + x_{T4k} \cdot S_{4k}}{S_k} = \\ &= \frac{20,833 \cdot 277\,217,602 + 31,25 \cdot 184\,811,734 + 80,333 \cdot 30\,801,961 + 93,75 \cdot 123\,207,813}{616\,039,11} = \\ &= 41,5 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.62)$$

Vzdálenost od nosníku k těžišti zatěžovacího obrazce na volném konci:

$$r_{1k} = b_{1k} - x_{Tk} - L_{Nk} = 125 - 41,516 - 20,264 = 63,2 \text{ mm} \quad (5.63)$$

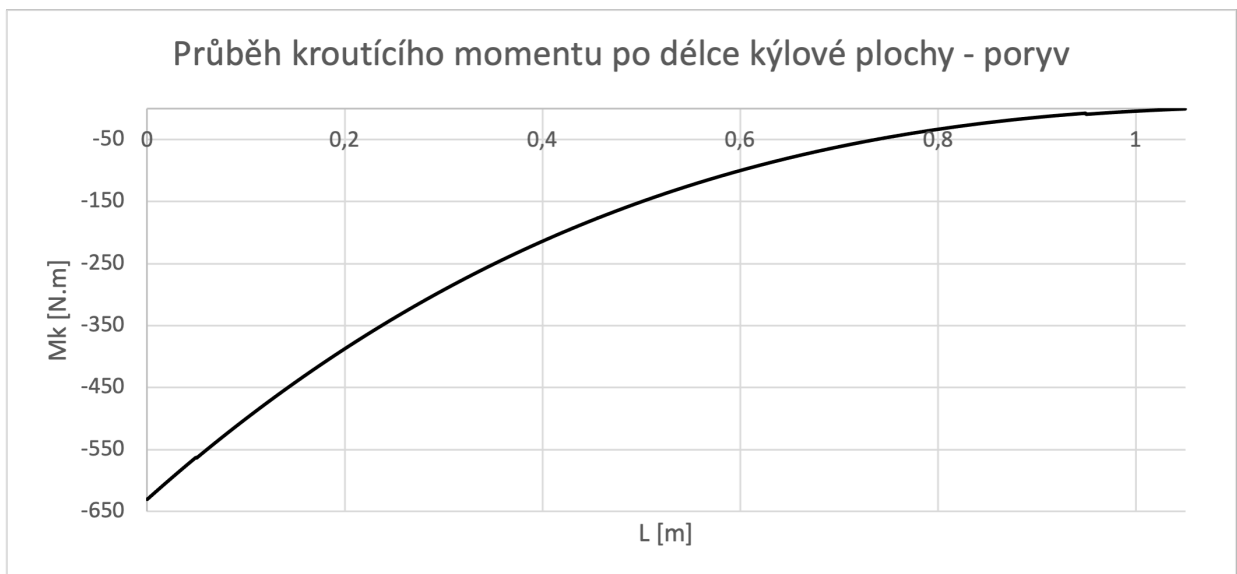
Lineární funkce popisující průběh ramene $r_1(x)$ po délce kýlové plochy:

$$r_1(x) = 255,625 - 0,183 \cdot x \quad (5.64)$$

Lineární funkce popisující průběh ramene $r_2(x)$ po délce kýlové plochy je stejná jako rovnice 5.24.

Tímto byly stanoveny veškeré funkce a potřebné hodnoty pro zjištění krouťícího momentu po délce kýlové plochy, jehož působení je blíže popsáno na obr. 20.

Sestavení rovnic pomocí metody řezu pro jednotlivé intervaly nosníku je ekvivalentní s jejich sestavením pro manévr, viz kapitola 5.10.3.



Graf 11: Průběh krouťícího momentu po délce kýlové plochy - poryv

5.10.7 Shrnutí maximálního (provozního) zatížení na SOP

V tabulce 3 jsou uvedeny provozní hodnoty zatížení, které působí na SOP.

Tab. 3: Provozní zatížení na SOP

	Směrové kormidlo		Kýlová plocha	
	Manévr	Poryv	Manévr	Poryv
T_{max}	265,650 <i>N</i>	41,806 <i>N</i>	-1 036,975 <i>N</i>	-2 632,325 <i>N</i>
Mo_{max}	50,740 <i>N.m</i>	3,998 <i>N.m</i>	-437,649 <i>N.m</i>	-1 101,516 <i>N.m</i>
Mk_{max}	44,200 <i>N.m</i>	3,731 <i>N.m</i>	-35,883 <i>N.m</i>	-629,924 <i>N.m</i>

6 Předběžný návrh konstrukce

Konstrukce ocasních ploch navazuje na konstrukce jednotlivých dílů, navrhovaných kolegy v minulých letech, což má vliv na zvolení materiálu a na různá konstrukční uspořádání. Ve výsledku to znamená, že součásti budou vytvořeny z prepregu a budou slepeny lepidlem o tloušťce $0,6 \text{ mm}$. V CAD modelu je to promítnuto tak, že jsou součásti vazbeny k sobě s mezerou $0,6 \text{ mm}$, která je ponechána pro toto lepidlo. Dále bylo na základě konstrukční volby kolegů pro možnost ohybu vláken do formy ponecháno minimální zaoblení 3 mm .

6.1 Řešení smontovatelnosti jednotlivých částí OP

Konstrukce kýlové plochy a jednotlivé konstrukční úpravy stávajících dílů ocasních ploch byly navrženy tak, aby mohlo dojít k hladké montáži a případné demotáži. Ve finále byl navržen následující koncept postupu montáže:

6.1.1 Smontování stabilizátoru s kýlem

Stabilizátor byl převzat od kolegy Větrovce s tím, že je proveden s průběžným nosníkem. Pro smontování to znamená, že se stabilizátor bude nasazovat jako první ze všech ocasních ploch, a to zezadu letounu, kde po usazení do konečné pozice, bude zajištěn dvěma maticemi ke stojině nosníku kýlu.

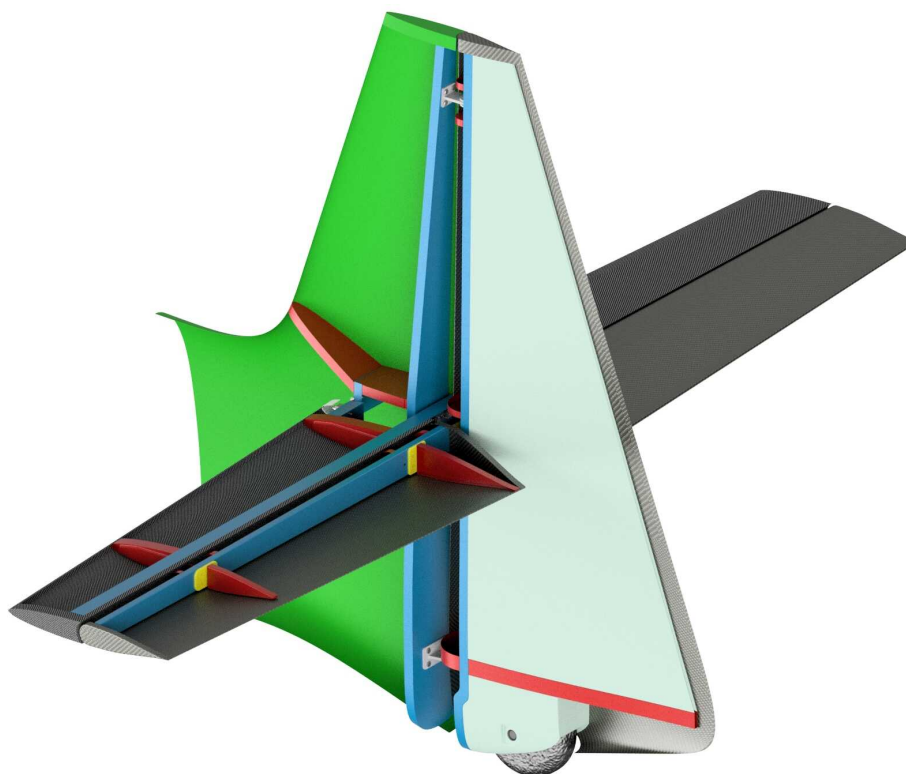
6.1.2 Smontování výškového kormidla se stabilizátorem

Výškové kormidlo, které bylo navrženo kolegou Hofrichterem, bude nasazeno v pořadí montáže ocasních ploch jako druhé a to opět zezadu letounu, přičemž se spojí závěsy výškového kormidla se závěsy stabilizátoru a připojí se řízení tak, aby mohlo docházet k vychylování tohoto kormidla.

6.1.3 Smontování směrového kormidla s kýlem

Směrové kormidlo navržené kolegou Němcem bude nasazeno při montáži ocasních ploch jako poslední a jeho závěsy budou usazeny do závěsů umístěných na stojině kýlu, přičemž bude opět připojeno řízení, aby bylo umožněno vychylování kormidla.

Na obr. 23 jsou vidět smontované ocasní plochy jako celek. Pro názornost smontování a uspořádání jsou ocasní plochy na obr. 23 zobrazeny bez levého potahu kýlu, levého potahu směrového kormidla, levého horního potahu výškového kormidla a stabilizátoru.



Obr. 23: Smontované ocasní plochy

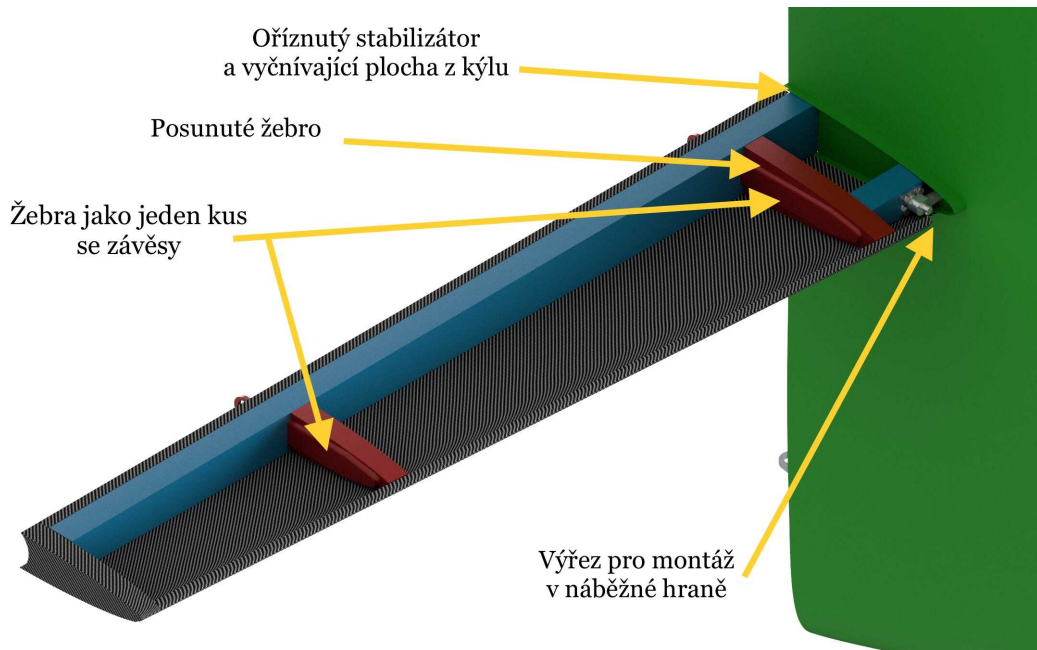
6.2 Konstrukční úpravy stabilizátoru

Pro smontování stabilizátoru s kýlem, musely být ve stabilizátoru zavedeny následující konstrukční úpravy:

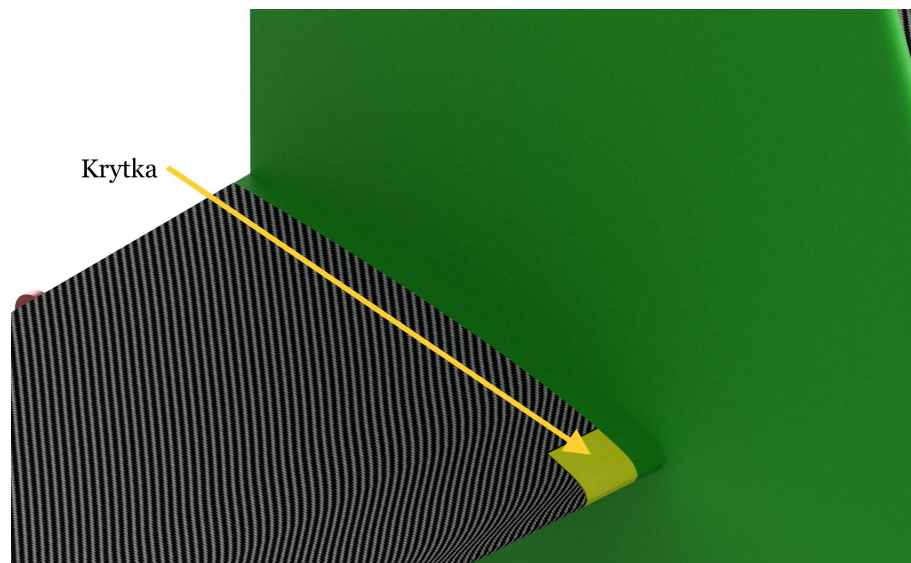
- První úpravou, která byla provedena, bylo oříznutí stabilizátoru kolmo na jeho příčnou osu tak, aby bylo při montáži zajištěno dosednutí této oříznuté plochy na plochu vyčnívající z kýlu. Plocha vyčnívající z kýlu kopíruje geometrii stabilizátoru a je na konci, kde má dojít k dosednutí, taktéž oříznuta kolmo na příčnou osu stabilizátoru, viz obr. 24.
- Druhá úprava je na náběžné hraně stabilizátoru u jeho kořenu, kde je proveden výřez umožňující průchod stabilizátoru přes přední závěs v kýlu. Tento výřez bude po montáži stabilizátoru zalepen krytkou viz obr. 24 a obr. 25.
- Třetí úprava, která musela nastat, byla změna polohy kořenového žebra stabilizátoru. To bylo posunuto směrem k volnému konci stabilizátoru (toto posunutí bylo způsobeno první úpravou) viz obr. 24.
- Čtvrtá úprava provedená na stabilizátoru je sjednocení žeber a závěsů, které budou vyrobeny jako jeden kus. Nebude tak použit spojovací materiál, čímž dojde ke snížení

hmotnosti, viz obr. 24.

- Pátá a poslední úprava byla provedena také pro úsporu hmotnosti: zmenšení pásnic nosníku z 30 mm na 25 mm (minimální šířka pásnic byla v práci pana Větrovce spočítána na 24,1 mm a zmenšení na 25 mm tak vyhovuje) a následné zarovnání nosníku s odtokovou hranou stabilizátoru.



Obr. 24: Montáž stabilizátoru

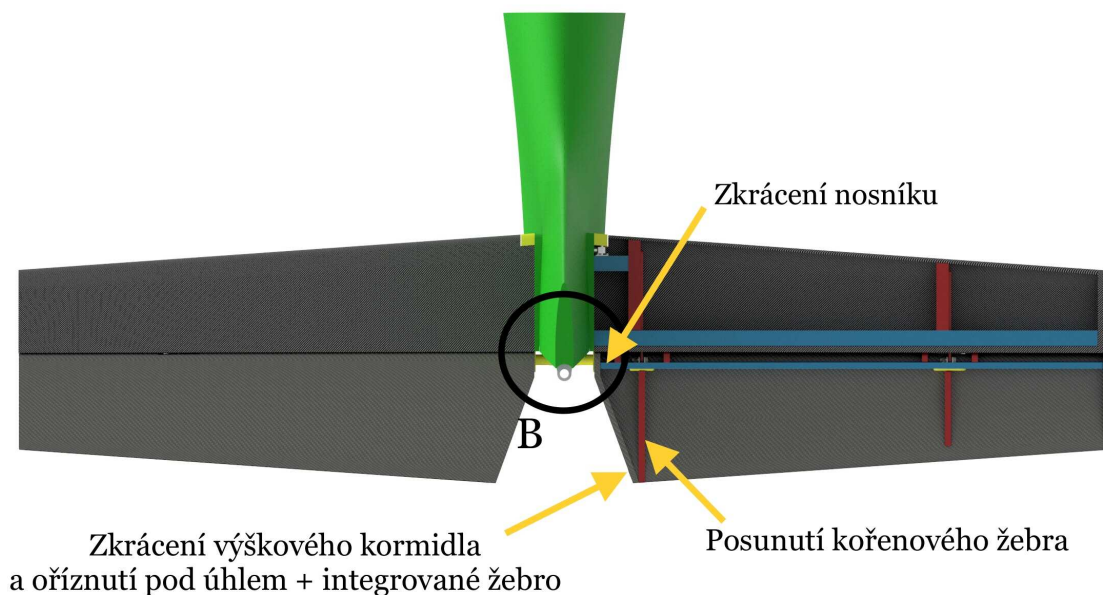


Obr. 25: Krytka stabilizátoru

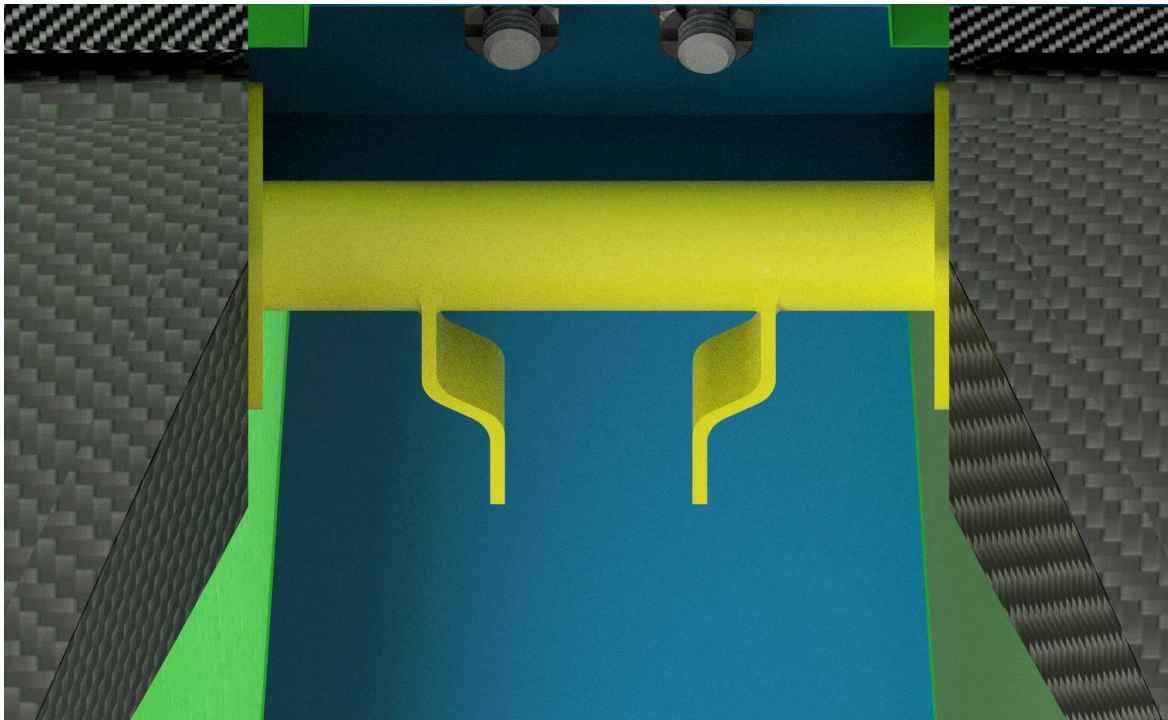
6.3 Konstrukční úpravy výškového kormidla

Pro smontování výškového kormidla se stabilizátorem a pro následné hladké vychylování směrového kormidla byly ve výškovém kormidle provedeny následující konstrukční úpravy:

- První úpravou je zkrácení výškového kormidla a jeho oříznutí pod úhlem 20° od jeho příčné osy, tak aby mohlo dojít k jeho vychylování, viz obr. 26.
- Druhá úprava je posunutí kořenového žebra směrem k volnému konci výškového kormidla (toto posunutí bylo způsobeno první úpravou) viz obr. 26.
- Třetí úprava je zkrácení nosníku, který musel být zkrácen vzhledem ke zkrácení celého výškového kormidla viz obr. 26.
- Čtvrtá úprava je spojena s oříznutím výškového kormidla a je to vytvoření integrovaného kořenového žebra jako součást dolního potahu, viz obr. 26.
- Pátá úprava je spojení trubek s pákami řízení v jeden kus, viz obr. 27. Dojde tak k vynechání spojovacího materiálu a úspoře hmotnosti.



Obr. 26: Montáž výškového kormidla

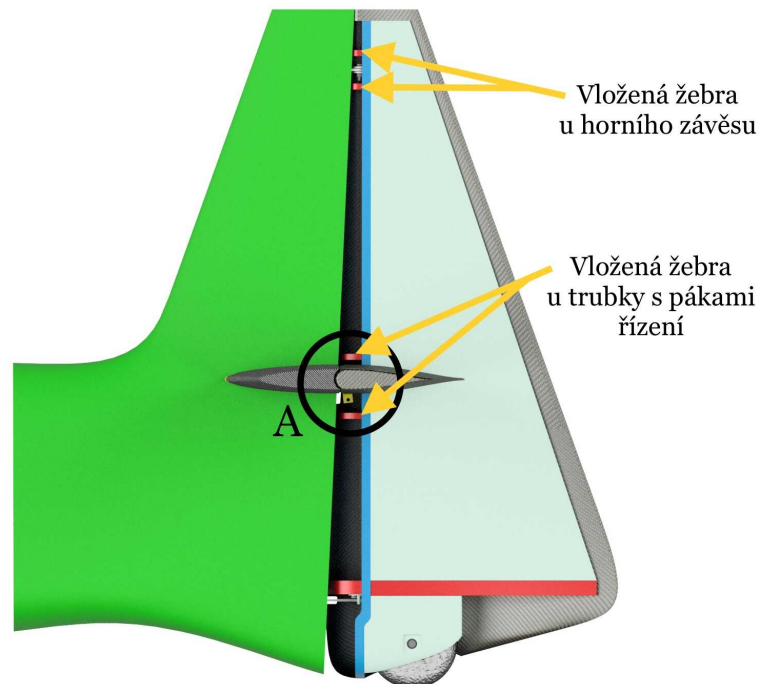


Obr. 27: Detail B-Úprava trubek s pákami řízení

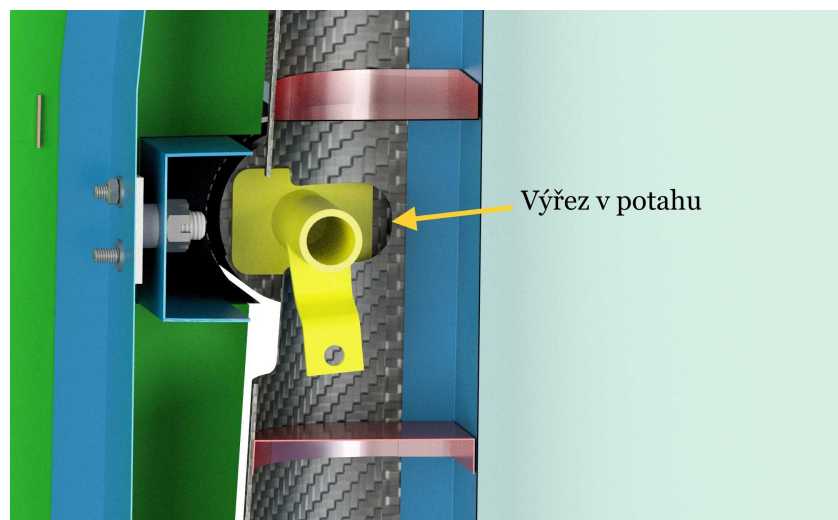
6.4 Konstrukční úpravy směrového kormidla

Pro smontování směrového kormidla bylo potřeba následujících úprav:

- První úprava je výřez v potahu pro průchod trubky s pákami řízení. Tato konstrukční úprava je vidět v detailu obr. 28 na obr. 29, který je pro názornost ukazovaného výřezu proveden v řezu symetrie celého letounu.
- Druhá úprava je vložení dvou žeber v místě výřezu do potahu pro zvýšení tuhosti potahu v místě jeho narušení viz obr. 28.
- Třetí úprava je vložení dvou žeber k hornímu závěsu směrového kormidla do potahu, což způsobí opět větší tuhost potahu viz obr. 28.
- Čtvrtá a poslední konstrukční úprava je odebrání žebra na konci směrového kormidla a jeho následné nahrazení integrovaným žebrem, které je součástí pravého potahu. Tímto řešením dojde k úbytku lepidla, což má opět vliv na výslednou hmotnost letounu.



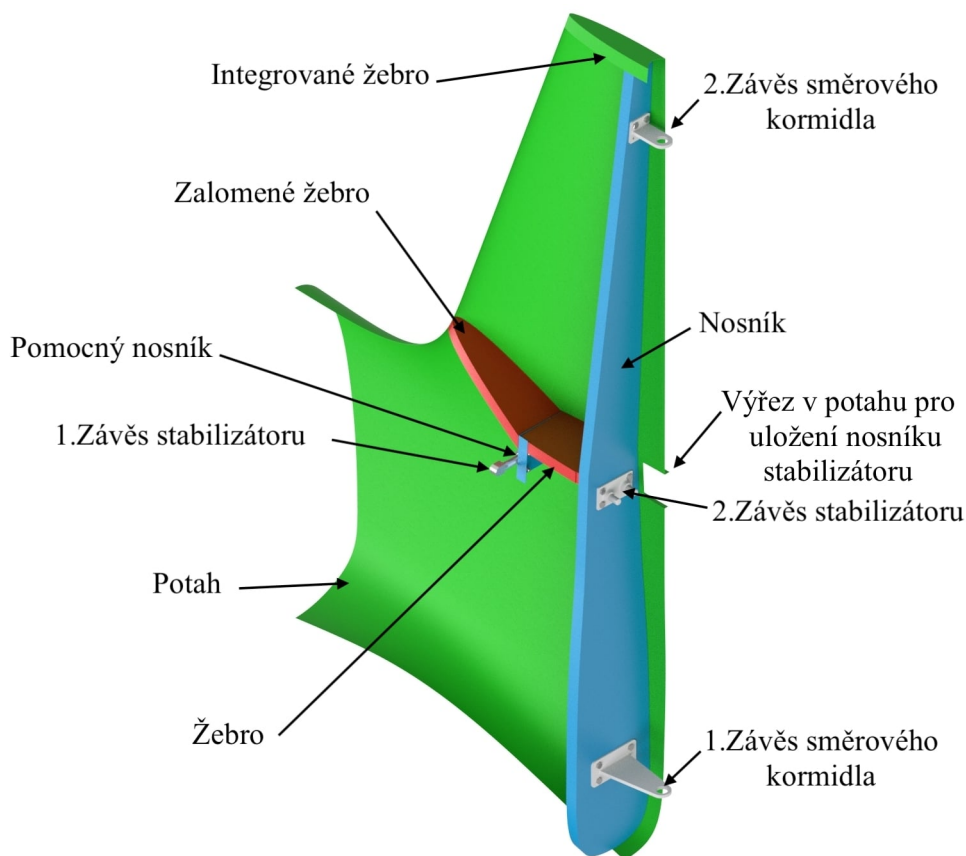
Obr. 28: Montáž směrového kormidla



Obr. 29: Detail A

6.5 Návrh kýlové plochy

Při návrhu kýlové plochy byly zohledňovány všechny dílčí části ocasních ploch tak, aby mohlo dojít k hladkému smontování. Jednotlivé díly kýlové plochy jsou vyrobeny z prepregu, což je předem naimpregnovaná výztuž napuštěná vytvrzenými pryskyřicemi. Pro návrh v této práci bude zvolena epoxidová pryskyřice. Konstrukční provedení je blíže popsáno v následujících podkapitolách.



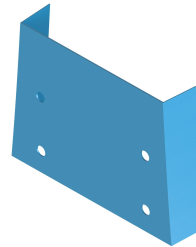
Obr. 30: Popis součástí kýlové plochy

6.5.1 Nosníky

V konstrukci kýlu se nacházejí dva nosníky průřezu tvaru C, jeden hlavní a jeden pomocný. Oba nosníky kýlu se skládají z pásnic kopírujících potah a stojiny. Při následné montáži je hlavní a pomocný nosník spolu s žebry nasazen do jedné poloviny potahu. Nato se na lem potahu nanese lepidlo a spojí se druhá polovina potahu s první. Hlavní nosník má kromě specifika své montáže ještě odlišnost ve své konstrukci, a to konkrétně v konstrukci stojiny, která je zhruba od poloviny své délky zalomená. Oba nosníky (jak již bylo nastíněno v minulé kapitole) budou vyrobeny z prepregu. Na pásnice působí jen ohybový moment, proto stačí použít jednosměrnou tkaninu s orientací vláken po délce pásnic, a na stojiny působí napětí smykové, což vyžaduje použití vícesměrných tkanin s orientací vláken ve směru hlavních napětí ($\pm 45^\circ$). V hlavním i pomocném nosníku jsou také vytvořené otvory pro upevnění závěsů viz obr. 31 a obr. 32.



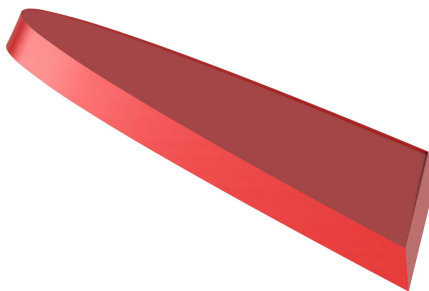
Obr. 31: Hlavní nosník



Obr. 32: Pomocný nosník

6.5.2 Žebra

Žebra kýlové plochy jsou dohromady tři a všechna jsou z důvodu působení smykového napětí vyrobena z vícesměrné tkaniny se stejnou orientací jako u stojiny. Jedno žebro je součástí pravé poloviny potahu, druhé žebro je umístěno mezi stojinou pomocného nosníku a stojinou nosníku kýlu a třetí žebro je od stojiny pomocného nosníku zalomeno pod úhlem směrem nahoru.



Obr. 33: Zalomené žebro

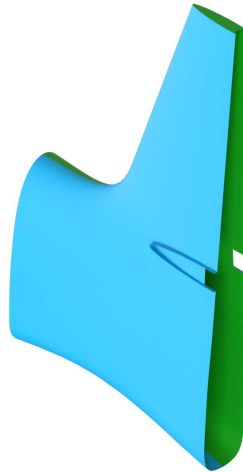


Obr. 34: Žebro

6.5.3 Potah

Potah je navržen jako nosný a skládá se ze dvou polovin. Při montáži se levá polovina slepí s pravou, ve které je u integrovaného žebra připraven lem pro spojení obou polovin k sobě. Pokud jde o volbu tkaniny, z důvodu zatížení potahu smykovým napětím je zvolena vícesměrná tkanina se stejnou orientací vláken jako u stojiny nosníků nebo u žeber.

V potahu je z montážních důvodů udělán výřez pro nosník stabilizátoru.

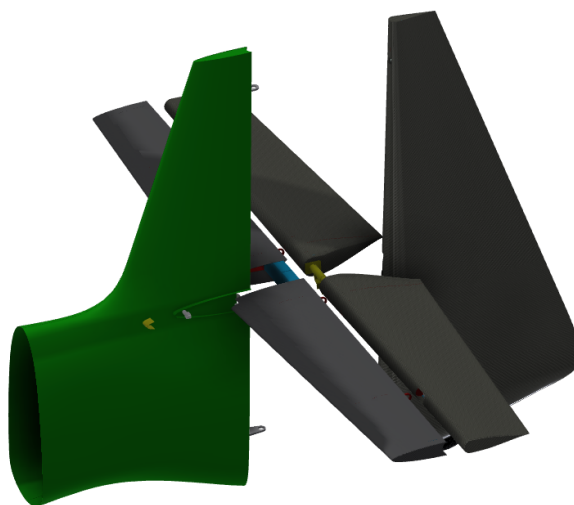


Obr. 35: Potah

6.5.4 Závěsy

Závěsy jsou v kýlové ploše dohromady čtyři, dva pro zavěšení směrového kormidla a dva pro zavěšení stabilizátoru. Všechny jsou vyrobené z konstrukční oceli AISI 4130, která je dobře obrobitelná a svařitelná. Závěsy jsou blíže vidět na obr. 30.

Pořadí a postup montáže je vidět na obr. 36



Obr. 36: Montáž OP

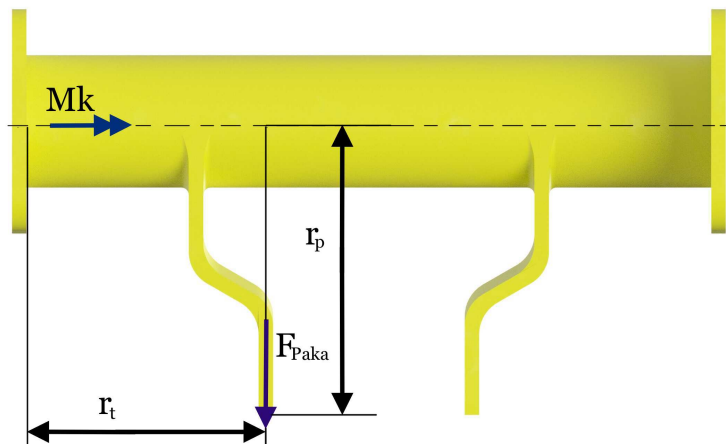
7 Předběžné dimenzování

V této kapitole bude provedeno dimenzování některých prvků VOP a SOP.

7.1 Úprava výpočtů ve výškovém kormidle

Ve výškovém kormidle byly spojeny trubky s pákami řízení v jeden kus. V práci kolegy Hofrichtera nebyla provedena kontrola trubek na kombinované namáhání. Tato kontrola bude provedena pro trubku jako jeden kus níže.

Při výpočtu je zohledňována HMH hypotéza, u které je součinitel $\alpha = \sqrt{3}$, dále je součinitel bezpečnosti $k = 1,5$ a $\sigma_{max} = 670 \text{ MPa}$ pro materiál AISI 4130, z něhož je vyrobena trubka s pákami řízení. Při výpočtu trubky je uvažován vnější průměr $D = 18 \text{ mm}$ a vnitřní průměr $d = 14 \text{ mm}$. Pro kontrolu bude stanoveno napětí ve smyku od Mk na VK a napětí v ohybu od síly v páce řízení F_{Paka} . Schéma sil a jejich působení na trubku s pákami řízení je na obr. 37. Síla v páce řízení je dána poměrem Mk na VK a vzdáleností páky řízení od osy trubky r_p :



Obr. 37: Schéma sil působících na trubku s pákami řízení

$$F_{Paka} = \frac{Mk}{r_p} = \frac{19}{0,0392} = 484,694 \text{ N} \quad (7.1)$$

Provozní napětí ve smyku:

$$\tau_{Provoz.} = \frac{Mk}{W_k} = \frac{19}{\frac{\pi}{16} \cdot \left(\frac{0,018^2 - 0,014^2}{0,018} \right)} = 26,169 \text{ MPa} \quad (7.2)$$

Provozní napětí v ohybu:

$$M_{O_{Provoz.}} = F_{Paka} \cdot r_t = 484,694.0,0335 = 16,237 \text{ N.m} \quad (7.3)$$

$$\sigma_{Provoz.oh.} = \frac{M_{O_{Provoz.}}}{W_O} = \frac{16,237}{\frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{0,018^2 - 0,014^2}{0,018} \right)} = 44,727 \text{ MPa} \quad (7.4)$$

Výpočet σ_{red} s využitím hypotézy HMM, kde $\alpha = \sqrt{3}$:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_{Provoz.oh.}^2 + (\sqrt{3} \cdot \tau_{Provoz.})^2} = \sqrt{44,727^2 + (\sqrt{3} \cdot 26,169)^2} = 63,679 \text{ MPa} \quad (7.5)$$

$$\sigma_{red} = \sigma_{Provoz.} \quad (7.6)$$

Početni napětí:

$$\sigma_{Pocet.} = k \cdot \sigma_{Provoz.} = 1,5 \cdot 63,679 = 95,518 \text{ MPa} \quad (7.7)$$

Výpočet jistoty trubky s pákami řízení:

$$j_{paky} = \frac{\sigma_{max AISI4130}}{\sigma_{Pocet.}} = \frac{670}{95,518} = 7,01 [-] \quad (7.8)$$

Z provedeného výpočtu vyplývá, že tloušťka stěny trubky 2 mm (která je daná vnějším a vnitřním průměrem) je vyhovující, neboť jistota vyšla vyšší než 1.

7.2 Dimenzování pásnic kýlové plochy

Pro dimenzování pásnic kýlové plochy se vychází z hodnot provozního zatížení při poryvu z tab. 3, které je vynásobeno součinitelem bezpečnosti, který je roven 1,5, a součinitelem vlivu vlhkosti, který je roven 1,25, viz rovnice 7.9.

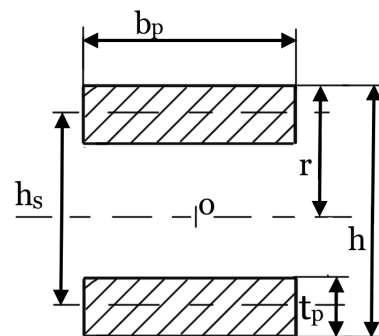
$$k = 1,5 \cdot 1,25 = 1,875 [-] \quad (7.9)$$

Vynásobené hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4: Hodnoty početního zatížení - kýlová plocha

	Početní zatížení kýlové plochy
T_D	-3 948,488 N
M_{oD}	-1 652,274 N.m
M_{kD}	-1 004,804 N.m

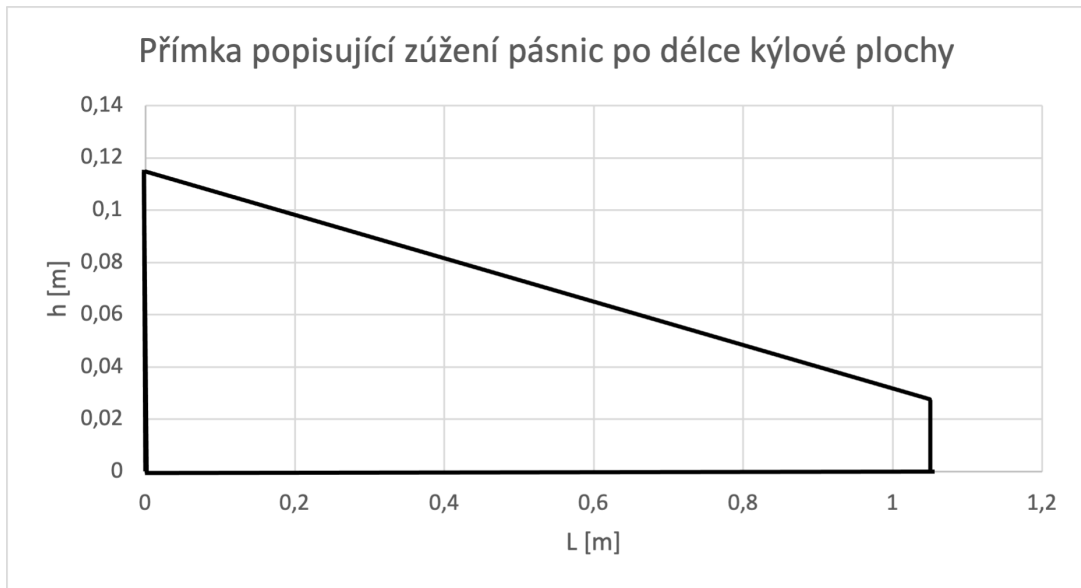
Pásnice nosníku mají zakřivený tvar, jelikož kopírují tvar potahu. Pro snazší výpočet však budou pásnice tento tvar zanedbávat, tudíž budou pouze obdelníkového průřezu, kde bližší popis je na obr. 38.



Obr. 38: Zjednodušená geometrie pásnic

Dalším specifickým je jejich sbíhavost po délce kýlové plochy, takže se musí určit rovnice přímky, která pásnice popisuje. Rovnice přímky se určí ze znalosti výšky nosníku u kořene a u konce kýlové plochy viz rovnice 7.10.

$$h(x) = 0,114 - 0,083 \cdot x \quad (7.10)$$



Obr. 39: Rovnice zúžení pásnic po délce kýlové plochy

Pásnice jsou, jak již bylo řečeno v kapitole 3, zatěžovány ohybovým momentem, takže se nejdříve stanoví dovolené napětí za pomoci maximální hodnoty ohybového momentu viz rovnice 7.11.

Počtení napětí je menší nebo rovno než σ_{pt} viz rovnice 7.11, a jelikož jsou pásnice při manévru zatěžovány na jednu stranu na tah a na druhou na tlak, do výpočtu bude vybrána menší z těchto hodnot, což je $\sigma_{Pd} = 900 \text{ MPa}$.

$$\sigma_{pt} \geq \sigma_{Pocet.} \geq \frac{M_{oD}}{W_o} \quad (7.11)$$

Při výpočtu se nemůže použít standardní průřezová charakteristika v ohybu W_o , jelikož těžiště pásnic neleží v jejich průřezu, což znamená, že ji musíme stanovit skrze kvadratický moment průřezu v ohybu J_z viz rovnice 7.12, který se vypočítá za pomoci Steinerovi věty a kvůli dvěma průřezům je násoben dvěma, viz rovnice 7.13.

$$W_o = \frac{J_z}{x_p}, \quad kde \quad (7.12)$$

$$J_z = 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot b_p \cdot t_p^3 + b_p \cdot t_p \cdot x_p^2 \right] \quad (7.13)$$

$$x_p = \frac{h_s}{2} \quad (7.14)$$

Pásnice budou vyrobeny z deseti vrstev jednosměrné tkaniny, která má tloušťku 0,130 mm, takže $t_p = 10 \cdot 0,13 = 1,3 \text{ mm}$.

Výška nosníku v místě maximálního ohybového momentu odečtena z CAD modelu:

$$h_s = 117,19 \text{ mm} \quad (7.15)$$

Vzdálenost težiště průřezu pásnice od osy z procházející středem pásnice:

$$x_p = \frac{117,19}{2} = 58,595 \text{ mm} \quad (7.16)$$

$$b_p = \frac{1\,652\,274 \cdot 117,19}{480 \cdot \left[\frac{1,3^3}{3} + 1,3 \cdot 117,19^2\right]} = 22,594 \text{ mm} \quad (7.17)$$

Šířka pásnice byla zvolena 25 mm.

7.2.1 Výpočet jistoty pásnice

Výpočet jistoty pásnice se již provádí na zvolenou šířku pásnice 25 mm a její tloušťku 1,3 mm.

Počtení zatížení:

$$\sigma_{Pocet.} = \frac{M_{oD}}{h_s \cdot t_p \cdot b_p} = \frac{1\,652\,274}{117,19 \cdot 1,3 \cdot 25} = 433,819 \text{ MPa} \quad (7.18)$$

Následuje výpočet jistoty pásnic j_p pro toto zatížení:

$$j_p = \frac{\sigma_{Pd}}{\sigma_{Pocet.}} = \frac{900}{433,819} = 2,075 [-] \quad (7.19)$$

Jistota $j_p = 2,075$ vyhovuje, neboť je větší než 1.

7.3 Dimenzování závěsů

V této podkapitole budou dimenzovány zadní závěsy kýlové plochy, které zajišťují spojení stabilizátoru s kýlovou plochou.

Dimenzování zadních závěsů stabilizátor-kýlová plocha vychází za prvé z maximálního (provozního) kroutícího momentu VOP, který je počítán vzhledem k hloubce VOP ke střižné rovině čepů (zadních závěsů), viz obr. 20, a za druhé z nesymetrického zatížení VOP.

7.3.1 Síla působící na závěs od kroutícího momentu

Kroutící moment je, jak již bylo řečeno, situovaný ke střižné rovině čepů (zadních závěsů). Pro jeho výpočet se použijí posouvající síla na stabilizátoru a reakce v závěsech VK v případě poryvu (rovnice 7.20, 7.21 a 7.22).

Pro interval $\langle 0; 0, 128 \rangle$:

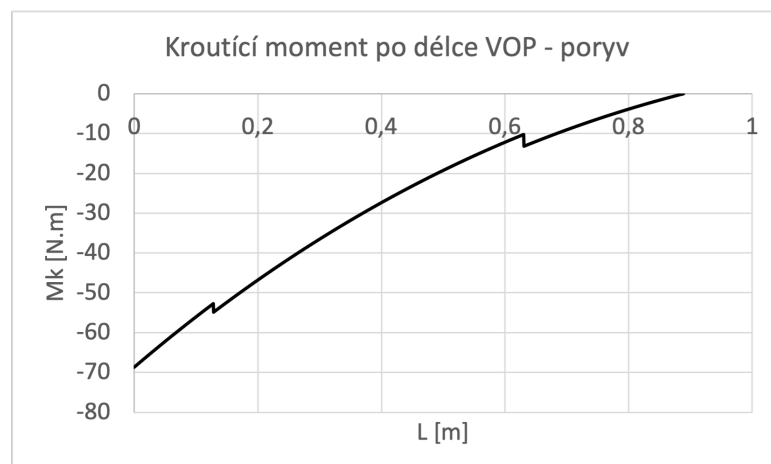
$$Mk_{maxVOP}(x) = T_{St}^P \cdot r_{1St}(x) - F1 \cdot r_{2St}(x) - F2 \cdot r_{2St}(x) \quad (7.20)$$

Pro interval $\langle 0, 1285; 0, 630 \rangle$:

$$Mk_{maxVOP}(x) = T_{St}^P \cdot r_{1St}(x) - F2 \cdot r_{2St}(x) \quad (7.21)$$

Pro interval $\langle 0, 6305; 0, 8885 \rangle$:

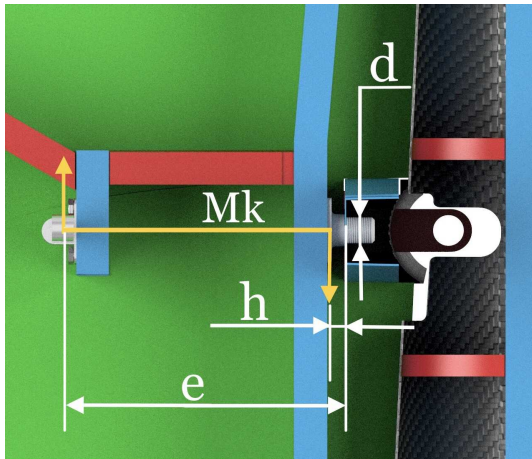
$$Mk_{maxVOP}(x) = T_{St}^P \cdot r_{1St}(x) \quad (7.22)$$



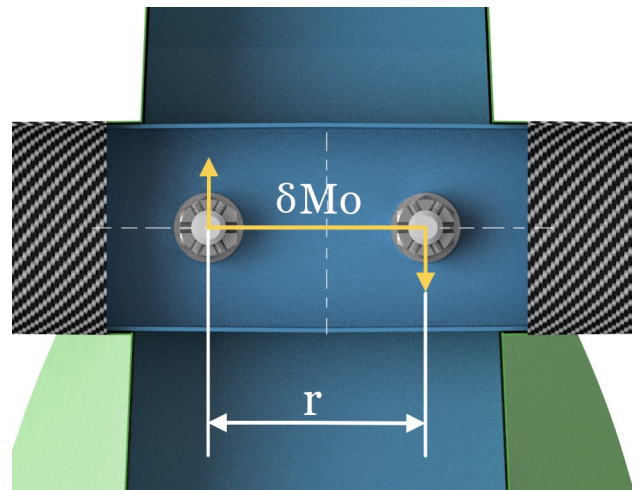
Graf 12: Průběh kroutícího momentu po délce VOP

Maximální kroutící moment ve střižné rovině zadního závěsu:

$$M_k = -68,667 \text{ N.m} \quad (7.23)$$



Obr. 40: M_k na zadních závěsech



Obr. 41: δM_o

Síla působící v závěsech od M_k viz obr. 40:

$$F_{Mk} = \frac{M_k}{e} = \frac{-68,667}{0,1254} = -547,584 \text{ N} \quad (7.24)$$

7.3.2 Síla působící na závěs od nesymetrického zatížení

Jak již bylo řečeno v kapitole 7.3, na zadní závěsy působí ohybový moment δM_o , který vzniká nesymetrickým zatížením.

Z tohoto ohybového momentu se vypočte síla $F_{NES.}$ působící na rameni $\frac{r}{2}$ viz obr. 41.

$$\delta M_o = -120,588 \text{ N.m} \quad (7.25)$$

$$F_{NES.} = \frac{\delta M_o}{\frac{r}{2}} = \frac{-120,588}{\frac{0,05}{2}} = -4823,52 \text{ N} \quad (7.26)$$

7.3.3 Ohyb závěsu

K ohybu závěsu dochází od síly $F_{CELKOV.}$ na rameni h viz obr. 40.

$$F_{CELKOV.} = F_{Mk} + F_{NES.} + T_{Zaves} = -547,584 + (-4823,52) + (-41,382) = -5\,412,486\,N \quad (7.27)$$

$$M_o = F_{CELKOV.} \cdot h = -5\,412,486 \cdot 0,006 = -32,475\,N.m \quad (7.28)$$

Průřezový modul v ohybu:

$$W_o = \frac{\pi \cdot d_{osazeni}^3}{32} [m^3] \quad (7.29)$$

Provozní napětí v ohybu:

$$\sigma_{Prov.oh.} = \frac{M_o}{W_o} = \frac{32\,475}{\frac{\pi \cdot 10^3}{32}} = 330,788\,MPa \quad (7.30)$$

7.3.4 Střih závěsu

Při střihu působí jako střižná síla opět $F_{CELKOV.}$.

Střižná plocha:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} [m^2] \quad (7.31)$$

Provozní napětí ve smyku:

$$\tau_{Prov.} = \frac{F_{CELKOV.}}{S} = \frac{4.5\,412,486}{\pi \cdot 8^2} = 107,678\,MPa \quad (7.32)$$

Výpočet σ_{red} , pro kterou je použita hypotéza HMH, kde $\alpha = \sqrt{3}$:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_{Prov.oh.}^2 + (\alpha \cdot \tau_{Prov.})^2} = \sqrt{(330,788)^2 + (\sqrt{3} \cdot 107,678)^2} = 379,742 \text{ MPa} \quad (7.33)$$

$$\sigma_{red} = \sigma_{Provoz.} \quad (7.34)$$

7.3.5 Výpočet jistoty závěsů

Pro materiál závěsů AISI 4130 je maximální napětí v tahu $\sigma_{maxAIS14130} = 670 \text{ MPa}$.

Počtení napětí $\sigma_{Pocet.}$:

$$\sigma_{Pocet.} = k \cdot \sigma_{Provoz.} = 1,5379,742 = 569,614 \text{ MPa} \quad (7.35)$$

Výpočet jistoty závěsů:

$$j_{Zaves} = \frac{\sigma_{maxAIS14130}}{\sigma_{Pocet.}} = \frac{670}{569,614} = 1,176 [-] \quad (7.36)$$

Výpočet jistoty závěsu vyšel dobře: výsledek je vyšší než 1, tudíž jsou takto nadimenzované závěsy vyhovující.

Vypočtená jistota zároveň nemá příliš vysokou hodnotu, což znamená, že závěsy nejsou předimenzované a po stránce hmotnosti jsou tedy vyhovující.

8 Hmotový rozbor

V této kapitole jsou uvedeny hmotnosti a těžiště jednotlivých dílů OP.

8.1 Hmotnosti

Hmotnosti jsou uvedeny v gramech, viz tab. 5. Byly vypočteny díky rovnici 8.1, kde se počítá s jednotlivými objemy odečtenými pro každou součást z programu Autodesk Inventor Professional 2020 a hustotami materiálů jednotlivých součástí.

$$m_i = \rho_i \cdot V_i [g] \quad (8.1)$$

8.2 Hustoty materiálů

- Plošná hustota uhlíkového vícesměrného prepregu $\rho_{Svs} = 320 \text{ g/m}^2$
- Plošná hustota uhlíkového jednosměrného prepregu $\rho_{Sjs} = 163 \text{ g/m}^2$

Objemové hustoty pro jednosměrnou a vícesměrnou tkaninu se z těch plošných vypočtou díky rovnicím 8.2 a 8.3, kde se plošná hustota dělí tloušťkou jedné vrstvy tkaniny.

$$\rho_{Vvs} = \frac{\rho_{Svs}}{t_p} = \frac{320 \cdot 10^{-3}}{0,13 \cdot 10^{-3}} = 2\,461,538 \text{ kg/m}^3 \quad (8.2)$$

$$\rho_{Vjs} = \frac{\rho_{Sjs}}{t_p} = \frac{163 \cdot 10^{-3}}{0,13 \cdot 10^{-3}} = 1\,253,846 \text{ kg/m}^3 \quad (8.3)$$

Součtem hmotností všech dílů je následně získána hmotnost celých OP viz tab. 5.

Těžiště je určeno pro jednotlivé díly i pro celou konstrukci OP opět z programu Autodesk Inventor Professional 2020 viz tab. 5 a je vztahováno k počátku souřadnicového systému celého letounu z diplomové práce Ing. Valenty [14], který je vidět na obr. 42.

Tab. 5: Tabulka hmotností a těžišť 1/2

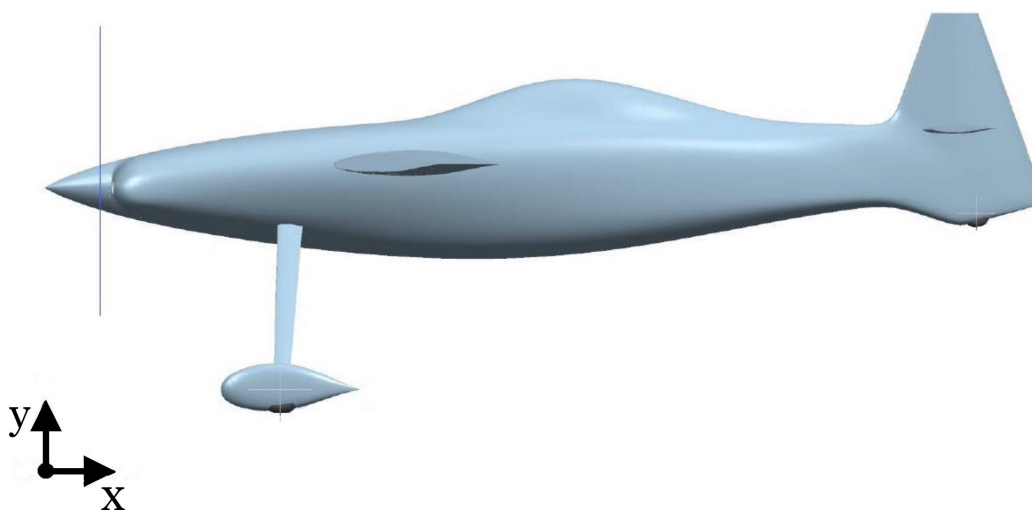
	Součást	Hmotnost dílu m [g]	x	y	z
1/2 Stab.					
	Nosník	201,7	5 695	2 299	0
	Horní potah	145,2	5 635	2 314	448
	Dolní potah	199,4	5 655	2 289	461
	Žebro (kořen)	69,8	5 637	2 299	5
	Žebro (konec)	36,2	5 659	2 299	626
	Krytka	1,3	5 537	2 299	60
	Malý nosník	11,4	5 576	2 299	86
	Závěs u malého nosníku	11,5	5 557	2 299	61
1/2 VK					
	Nosník	31,5	5 746	2 299	447
	Dolní potah	120,2	5 805	2 287	446
	Horní potah	124,7	5 810	2 310	460
	Žebro (kořen)	8,9	5 823	2 299	124
	Žebro (konec)	3,6	5 803	2 298	627
	1. Žebro u závěsu (kořen)	2,7	5 731	2 299	91
	2. Žebro u závěsu (kořen)	2,7	5 732	2 299	166
	1. Žebro u závěsu (konec)	1,4	5 734	2 299	589
	2. Žebro u závěsu (konec)	1,3	5 734	2 299	666
	1. Závěs (kořen)	11,5	5 743	2 299	121
	2. Závěs (kořen)	11,5	5 743	2 299	135
	1. Závěs (konec)	11,5	5 743	2 299	620
	2. Závěs (konec)	11,5	5 743	2 299	635
	Překližka (kořen)	2,3	5 749	2 300	128
	Překližka (konec)	2,4	5 750	2 299	628
SK					
	Nosník	98,2	5 775	2 299	0
	1/2 Potahu	381,4	5 884	2 266	-21
	2/2 Potahu	379,8	5 882	2 261	26
	1. Malé žebro	35,7	5 751	1 937	0
	2. Malé žebro	4,7	5 748	2 241	0
	3. Malé žebro	5,6	5 750	2 334	0
	4. Malé žebro	2,4	5 759	2 798	0
	5. Malé žebro	2,1	5 759	2 850	0
	Žebro (kořen)	43,5	5 929	1 938	0
	Dolní závěs	55,4	5 757	1 931	0
	1. Horní závěs	19,6	5 766	2 831	0
	2. Horní závěs	19,6	5 766	2 817	0
	Pěnové jádro	63,7	5 908	2317	0
	Dutina ostr. podvozku	61,8	5 843	1 882	0
	Kolo	1 249	5 848	1847	0

Tab. 6: Tabulka hmotností a těžišť 2/2

	Součást	Hmotnost dílu m [g]	x	y	z
Kýl					
	Nosník	120,3	5 685	2 303	0
	Pomocný nosník	7,6	5 564	2 307	0
	Zalomené žebro	14,5	5 509	2 360	0
	Žebro	13,4	5 619	2 332	0
	Zadní závěs	55,6	5 683	2 299	0
	Přední závěs	124,5	5 556	2 299	0
	Dolní závěs	123	5 704	1 924	0
	Horní závěs	43,2	5 735	2 824	0
	1/2 Potahu	432,4	5 498	2 258	-45
	2/2 Potahu	430,1	5 497	2 250	45
	Celková hmotnost m [g] OP		Celkové těžiště OP [mm]		
	4 384,5		5 728	2 217	0

V hmotovém rozboru bylo zjištěno, že celková hmotnost OP (m_{OP}) je rovna 4,385 kg, přičemž návrhová hmotnost OP z diplomové práce Ing. Valenty [14] je rovna 4,65 kg.

Konečná váha OP stanovená v této práci je tedy menší, avšak do hmotového rozboru nebyla zahrnuta hmotnost lepidla a spojovací materiál, což ve výsledku znamená, že reálná hmotnost bude o trochu větší.



Obr. 42: Souřadnicový systém letounu [14]

9 Závěr

V této bakalářské práci proběhl návrh konstrukce OP pro ultralehké letadlo, přičemž se vycházelo z konstrukce jednotlivých částí OP navržených pány Větrovcem [15], Hofrichterem [2] a Němcem [7].

Na začátku proběhlo přiblížení základních prvků letecké konstrukce spolu s konvenčním uspořádáním OP a také rozdělení leteckých materiálů.

Následně bylo v kapitole 5 popsáno zatížení působící na OP podle předpisu UL 2, které bylo v podkapitole 5.7 vypočteno pro nesymetrické zatížení VOP a pro kýlovou plochu při manévru a při poryvu. Spolu s těmito zatíženími byly uvedeny i provozní zatížení vypočtené v pracích již zmíněných pánů.

Následně byl proveden a popsán předběžný návrh konstrukce OP a průběh montáže, kde se dospělo k následujícímu řešení. OP budou smontovány tak, že se nejdříve zezadu letounu nasadí stabilizátor s průběžným nosníkem, poté VK, a jako poslední bude nasazeno SK. Konstrukce kýlové plochy se skládá z hlavního a pomocného nosníku tvaru C, tří žeber, závěsů a levé a pravé poloviny potahu. Všechny součásti kromě závěsů jsou vyrobeny z uhlíkového kompozitu s pojivem z epoxidové pryskyřice. Závěsy jsou vyrobeny z konstrukční oceli AISI 4130.

Na takto navrženou konstrukci bylo pro pásnice hlavního nosníku a pro zadní závěsy provedeno v kapitole 7 dimenzování. Díky němu byla stanovena tloušťka pásnic $t_p = 1,3 \text{ mm}$ a šířka pásnic $b_p = 25 \text{ mm}$, přičemž jistota j_p vyhovuje. Zadní závěsy se zvoleným průměrem čepu 10 mm taktéž vyhovují, protože jejich jistota j_{Zaves} je vyšší než 1.

V poslední kapitole byl proveden hmotový rozbor, ve kterém byla zjištěna celková hmotnost OP a to $m_{OP} = 4,385 \text{ kg}$ a zároveň byly zjištěny souřadnice těžiště. Ve srovnání s návrhovou hmotností z diplomové práce Ing. Valenty [14] ($m_{OP} = 4,65 \text{ kg}$) je hmotnost stanovená v této práci nižší, avšak v této hmotnosti není zahrnuta hmotnost lepidla a hmotnost spojovacího materiálu.

Pro další pokračování tohoto návrhu by bylo vhodné krytku stabilizátoru implementovat přímo do předního závěsu, došlo by tak k ušetření jednoho z dílů a z hlediska náběžné hrany by byla zachována větší aerodynamická hladkost.

Reference

- [1] Libor Beneš. *OLR-uvod.pdf*. Praha, 2016. URL: <http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/OLR-Uvod.pdf>.
- [2] Lukáš Hofrichter. *Návrh výškového kormidla rychlostního letounu*. Bakalářská práce. Praha, 2020.
- [3] Karel Macek a Petr Zuna. *Strojírenské materiály*. 2003. vyd. Praha: ČVUT, 2003. ISBN: 9788001027981.
- [4] Jan Mikula. *Konstrukce a projektování letadel II*. 1. vydání. Praha: ČVUT, 2005. ISBN: 80-01-03338-4.
- [5] *Navíjení*. Praha, 2020. URL: <https://polymer-composites.cz/filament-winding/>.
- [6] *Nejčastější uspořádání ocasních ploch*. 2018. URL: [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).
- [7] Jiří Němec. *Návrh směrového kormidla malého sportovního letounu*. Bakalářská práce. Praha, 2020.
- [8] *Ruční laminace*. Dolní Vlčkovice, 2017. URL: http://plastic.cz/technologie-rucni_laminace.
- [9] *Ruční laminace*. Brno, 2019. URL: <https://www.prefa-kompozity.cz/rucni-laminace-moznosti-teto-technologie/>.
- [10] Kateřina Rusňáková. *Prepregy s termoplastickou maticí*. Diplomová práce. Praha, 2019.
- [11] Svatomír Slavík. *Stavba letadel*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN: 80-01-01671-4.
- [12] M.N. Sul'ženko. *Konstrukce letadel*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953.
- [13] *UL 2 - Část I. Požadavky letové způsobilosti SLZ, Ultralehké letouny řízené aerodynamicky*. Praha, 2019.
- [14] Jakub Valenta. "Koncepční návrh rychlostního letounu". Diplomová. Praha: ČVUT, 2019.
- [15] Michal Větrovec. *Návrh stabilizátoru rychlostního letounu*. Bakalářská práce. Praha, 2020.
- [16] D. Vojtěch. *Kovové materiály*. 1. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006. ISBN: 80-7080-600-1.
- [17] F Zálešák. *Konstrukce a projektování letadel*. Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1956.