



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Návrh směrového kormidla malého
sportovního letounu**

Design of small sport aircraft rudder

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Jiří NĚMEC

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem

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

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Němec** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **466523**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh směrového kormidla sportovního letounu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of small sport aircraft rudder

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Rešerši konstrukčního provedení směrových kormidel
- 2) Předběžný návrh konstrukce
- 3) Stanovení zatížení kormidla
- 4) Předběžné dimenzování kormidla

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 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 bakalářskou práci na téma „Návrh směrového kormidla malého sportovního letounu“ vypracoval samostatně a s použitím podkladů literatury a zdrojů pod vedením pana Ing. Jiřího Brabce, Ph.D.

V Praze _____

Jiří Němec _____

Poděkování

Velmi děkuji panu Ing. Jiřímu Brabcovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, jeho vřelost, vstřícnost a cenné rady, bez kterých by zhotovení této práce bylo velmi obtížné.

Jméno autora: Jiří NĚMEC
Název BP: Návrh směrového kormidla malého sportovního letounu
Rok: 2020
Studijní program: B2341 Strojírenství
Obor studia: 3901R051 Konstruování podporované počítačem
Ústav: Ústav letadlové techniky
Vedoucí BP: Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

Bibliografické údaje:	počet stran	53
	počet obrázků	29
	počet tabulek	9
	počet příloh	2

Klíčová slova: Směrové kormidlo, zatížení, dimenzování, hmotnostní rozbor

Anotace:

Úkolem této práce je navržení směrového kormidla dle profilu a ploch poskytnutých z práce koncepčního návrhu rychlostního letounu. Po krátkém a obecném rozpisu konstrukčních prvků směrových kormidel jsou počítána zatížení na kormidle a následně z vypočtených hodnot provedeno dimenzování. Dále byla provedena pevnostní kontrola a hmotový rozbor.

Author: Jiří NĚMEC
Bachelor thesis title: Design of small sport aircraft rudder
Academic year: 2020
Study programme: B2341 Strojírenství
Field of study: 3901R051 Konstruování podporované počítačem
Department: Aerospace Engineering
Supervisor: Ing. Jiří Brabec, Ph.D.

Bibliographic data:	number of pages	53
	number of pictures	29
	number of tables	9
	number of attachments	2

Keywords: Aircraft rudder, loads, design, mass analysis

Annotation:

The task of this work is to design an aircraft rudder by the profile and surfaces provided from the work "Conceptual design of racing airplane". After a short and general summary of rudder design parts, loads of the rudder are calculated, which are then used to design the rudder. In parallel factor of safety is calculated and then mass analysis is done.

Obsah

1. Úvod	14
2. Rozbor současného stavu.....	15
2.1. Technologie a materiály	15
2.1.1. Výrobní metody.....	15
2.1.2. Použité materiály	15
2.2. Příprava uhlíkových vláken.....	16
2.3. Konstrukce směrového kormidla	17
2.3.1. Potahy	17
2.3.1.1. Nosné potahy	17
2.3.1.2. Nenosné potahy	18
2.3.2. Nosníky.....	18
2.3.3. Podélníky.....	18
2.3.4. Žebra.....	18
2.3.5. Zavěšení kormidla	18
3. Stanovení zatížení kormidla	19
3.1. Součinitel bezpečnosti podle předpisu UL2:	20
3.1.1. Obratová zatížení	20
3.1.2. Poryvová zatížení.....	21
3.1.3. Setrvačná zařízení.....	21
3.2. Pevnostní požadavky.....	21
3.2.1. Pevnostní vlastnosti materiálů a výpočtové hodnoty	22
3.2.2. Pevnost a deformace.....	22
3.2.3. Průkaz pevnosti konstrukce	22
3.3. Zatížení řídicích ploch.....	23
3.3.1. Obratová zatížení	23
3.3.2. Poryvová zatížení.....	24
3.4. Výpočet maximálního zatížení	25
3.4.1. Geometrie svislé ocasní plochy	25
3.4.2. Výpočet zatížení při vychýlení kormidla.....	26
3.4.3. Zatížení při bočním poryvu.....	27
3.5. Spojité zatížení	28
3.6. Výpočet reakcí a jejich umístění.....	31
3.7. Posouvající síla a ohybový moment	32
3.8. Kroutící moment	33
4. Předběžné dimenzování kormidla.....	35

4.1.	Největší hodnoty z provozních zatížení.....	35
4.2.	Dimenzování stojiny a pásnic	35
4.2.1.	Zjednodušení geometrie tvaru pásnic.....	35
4.2.2.	Dimenzování pásnice.....	36
4.2.3.	Kontrola pásnice.....	37
4.3.	Smykové zatížení směrového kormidla.....	37
4.3.1.	Dimenzování potahu	37
4.3.2.	Stabilita smykově namáhaných částí.....	40
4.3.2.1.	Stabilita potahu	41
4.3.2.2.	Stabilita stojiny nosníku	42
4.3.2.3.	Jistota potahu a stojiny nosníku.....	42
4.4.	Kontrola závěsů a zavěšení ostruhového podvozku	42
4.4.1.	Kontrola horního zavěšení	42
4.4.2.	Kontrola spodního zavěšení	43
5.	Předběžný návrh konstrukce.....	45
5.1.	Potah	45
5.2.	Nosník.....	46
5.3.	Žebra	47
5.3.1.	Žebro koncové	47
5.3.2.	Žebro kořenové	47
5.4.	Zavěšení.....	48
5.4.1.	Horní zavěšení	48
5.4.2.	Spodní zavěšení.....	48
5.5.	Uchycení ostruhového podvozku.....	49
6.	Hmotový rozbor	50
6.1.	Tabulka hodnot	51
	Závěr.....	53
	Zdroje	54

Seznam obrázků

Obrázek 1-1 – Svislá ocasní plocha.....	14
Obrázek 2.3-1 – Konstrukce SOP.....	17
Obrázek 3-1 – Typy SOP	19
Obrázek 3-2 – Obrazec zatížení při vychýlení kormidla	23
Obrázek 3-3 – Obrazec zatížení při bočním poryvu	24
Obrázek 3.4-1 – Geometrie SOP	25
Obrázek 3.4-2 – Obrazec zatížení při vychýlení kormidla	26
Obrázek 3.4-3 – Obrazec zatížení při bočním poryvu	27
Obrázek 3.5-1 – Ekvivalentní síly.....	29
Obrázek 3.6-1 – Reakce závěsů	31
Obrázek 4-1 - Rozměry pásnice.....	35
Obrázek 4.3-1 – Uvažované silové uspořádání pro dimenzování pásnic	37
Obrázek 4.3-2 – Naznačení kroutícího momentu elastické osy	37
Obrázek 4.3-3 – Naznačení smykových toků.....	38
Obrázek 4.3-4 – Rozměry potahu.....	40
Obrázek 4.3-5 – Součinitel skladby materiálu [4]	40
Obrázek 4.3-6 – Součinitel velikosti K_s [4]	41
Obrázek 4.3-7 – Síly a reakce působící na čep	43
Obrázek 4.3-8 - Rozměry čepu pro zavěšení	44
Obrázek 5-1 – Rozbor dílů směrového kormidla.....	45
Obrázek 5-2 – Část potahu s naznačeným pěnovým jádrem.....	45
Obrázek 5-3 - Nosník směrového kormidla.....	46
Obrázek 5-4 - Rozložení prvků v řezu nosníku	46
Obrázek 5-5 - Koncové žebro	47
Obrázek 5-6 - Přední a zadní část kořenového žebra s březovou překližkou.....	47
Obrázek 5-7 - Konstrukce horního zavěšení.....	48
Obrázek 5-8 - Konstrukce spodního zavěšení	48
Obrázek 5-9 - Skořepinová dutina ostruhového podvozku.....	49
Obrázek 5-10 - Detail vložky s čepem	49

Seznam grafů

Graf 1 – Průběh spojitého zatížení	29
Graf 2 – Průběh posouvající síly	32
Graf 3 – Průběh ohybového momentu	32
Graf 4 – Průběh spojitého zatížení v krutu.....	34
Graf 5 – Průběh kroutícího momentu	34

Seznam tabulek

Tabulka 3.1 – Hodnoty zatížení v poryvu	24
Tabulka 3.4.1 – Geometrie SOP [6]	25
Tabulka 4.1 - Maximální hodnoty provozních zatížení směrového kormidla	35
Tabulka 4.2 - Početní zatížení směrového kormidla	35
Tabulka 4.3.1 – Smykové napětí provozní.....	39
Tabulka 4.3.2 – Smykové napětí početní	39
Tabulka 4.3.3 Koeficienty bezpečnosti.....	39
Tabulka 4.3.4 – Jistoty potahu a nosníku	42
Tabulka 6.1 – Hmotnostní rozbor a polohy těžišť	51

Seznam příloh

Příloha 1 – CAD model

Příloha 2 – Výpočty

Seznam použitých programů

Autodesk Inventor 2020

Microsoft Office 365

Savage Interactive Procreate

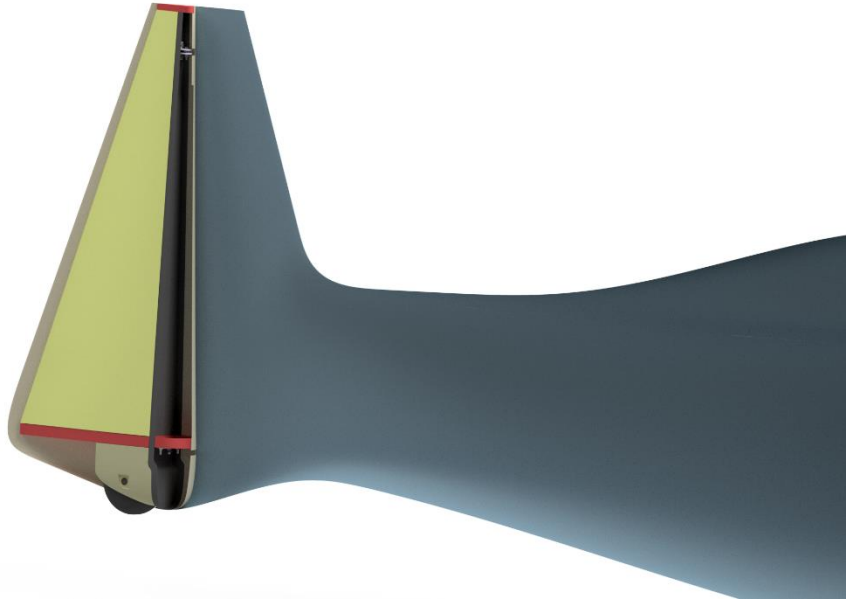
Seznam použitých symbolů

G	hmotnost letounu	[kg]
W	velikost měrného zatížení	[-]
$W^=$	průměrné provozní zatížení plochy	[Pa]
S	obsah plochy křídla SOP	[m ²]
F	síla	[N]
M_o	ohybový moment	[N*m]
M_k	kroucí moment	[N*m]
$M_{kE.O.}$	kroucí moment elastické osy	[Nm]
T	posouvající síla	[N]
Q	spojité zatížení	[N]
p	lineární člen kroucího momentu	[-]
k	lineární člen spojitého zatížení	[-]
r	lineární člen rovnice ramene	[-]
M_{MTOW}	maximální vzletová hmotnost	[kg]
b	hloubka SOP	[mm]
L	délka SOP	[mm]
o	odsazení osy otáčení	[mm]
P_{SOP}	síla na svislé ocasní plochy	[N]
p_0	<i>hustota vzduchu při hladině moře</i>	[1,225 kg/m ³]
k_{SOP}	<i>zmírňující součinitel</i>	[-]
S_{SOP}	<i>plocha svislých ocasních ploch</i>	[m ²]
a_{SOP}	<i>sklon křivky vztlaku SOP</i>	[1/rad]
U	<i>rychlost poryvu</i>	[m/s]
V	<i>rychlost letu</i>	[m/s]
b_t	<i>šířka pásnice</i>	[mm]
t_p	<i>tloušťka pásnice</i>	[mm]
h	výška nosníku	[mm]
h_s	střední výška nosníku	[mm]
h_k	koncový rozměr výšky nosníku	[mm]
h_0	počáteční rozměr výšky nosníku	[mm]
z	hloubka kormidla	[mm]
σ_D	pevnost v tlaku	[MPa]
M_{oMax}	maximální hodnota kroucího momentu	[Nm]
W_o	Průřezový modul v ohybu	[m ³]
J_z	Kvadratický moment	[m ⁴]
S_p	plocha řezu pásnice	[mm ²]
σ_{max}	maximální napětí	[MPa]
K_p	koeficient bezpečnosti pásnice	[-]
T^*, T^{**}	náhradní hodnoty pro T	[N]
X_{NH}	vzdálenost nosníku od osy otáčení	[mm]
$X_{E.O.}$	vzdálenost elastické osy od osy otáčení	[mm]
q_1	smykový tok přední dutiny	[N/m]
q_2	smykový tok zadní dutiny	[N/m]
q_s	smykový tok ve stojině nosníku	[N/m]
q_{SC}	celkový smykový tok	[N/m]
τ	smykové napětí	[MPa]
τ_K	smykové napětí kritické	[MPa]
τ_P	smykové napětí početní	[MPa]
τ_S	smykové napětí ve stojině nosníku	[MPa]
K_s	jistota	[-]
P_D	působící tlak	[MPa]

P_{DK}	dovolený tlak	[MPa]
σ	napětí v tlaku	[MPa]
ρ	hustota	[kg/m ³]
m	hmotnost	[g]
m_{CELK}	celková hmotnost	[g]

1. Úvod

V této práci se budeme zabývat návrhem směrového kormidla malého sportovního letounu, které bude tvořit část sportovního letounu podle návrhu práce „Koncepční návrh rychlostního letounu“. Součástí této práce bude připojení ostruhového podvozku na směrové kormidlo.



Obrázek 1-1 – Svislá ocasní plocha

Směrové kormidlo letounu je součástí svislé ocasní plochy, která se nachází v zádi letadla a spolu s kýlovou plochou tvoří svislou stabilizační plochu, která udržuje letadlo ve směru, respektive řídí směr letadla. V této práci budeme rozebírat prvky směrového kormidla z hlediska konstrukce (potah, nosník, žebra a zavěšení). Návrh směrového kormidla a jeho zavěšení se řídí předpisy UL-2. Dále budeme tyto prvky dle zatížení, které na kormidlo působí, dimenzovat a provedeme kontrolu pevnosti. U nosníku a potahu kormidla, tedy částí, které jsou namáhány krutem, budeme kontrolovat stabilitu, kde v případě nedostatečné stability bude přidáno pěnové jádro, aby nedošlo ke zkroucení či zvlnění potahu. Dále provedeme kontrolu horního zavěšení na otláčení a kontrolu spodního zavěšení na pevnost čepu a na závěr bude provedena hmotnostní analýza podle CAD modelu. [5] [6]

2. Rozbor současného stavu

2.1. Technologie a materiály

2.1.1. Výrobní metody

Výrobní metody musí zaručovat průběžně bezchybné pevnostní spoje s ohledem na uchování požadované pevnosti v normálních, v provozu očekávaných podmínkách. Pokud výrobní postupy k tomuto účelu vyžadují přesnou kontrolu, musí být doprovázeny podle schválených pracovních metod. Nekonenční výrobní metody musí být prokázány odpovídajícími zkouškami. Navrhovaný letoun má klasickou koncepci uspořádání vzhledem k jednoduchosti a lepší aerodynamické účinnosti, a především vezmeme-li v potaz převahu nevýhod nad výhodami u jiných uspořádání.

Konstrukce letounů se dělí na jednonosíkové konstrukce, které jsou nejčastější u malých sportovních letounů. Dále na poloskořepiny s nosnou skříňí či vícenosíkové panelové konstrukce, které se uplatňují především u větších dopravních letadel. Segmentováním konstrukce horizontální můžeme docílit snížením deformací u kýlových ploch při větších rychlostech letounu. U vertikálního segmentování, myšleno například dvojitě kormidlo, zvýšíme aerodynamickou účinnost a efektivnější zakřivení a větší výchylky kormidla pro odtržení v různých rychlostech. [1] [5]

2.1.2. Použité materiály

Vzhledem k velikosti navrhovaného letounu a zaměření se snažíme docílit co nejmenší hmotnosti letounu. Směrové kormidlo tedy bude vyrobeno převážně z kompozitních materiálů, konkrétně z uhlíkových vláken. Závěsy budou vyrobeny z letecké oceli a duralu. Pro spojení zavěšení s uhlíkovým kompozitem bude využita březová překližka.

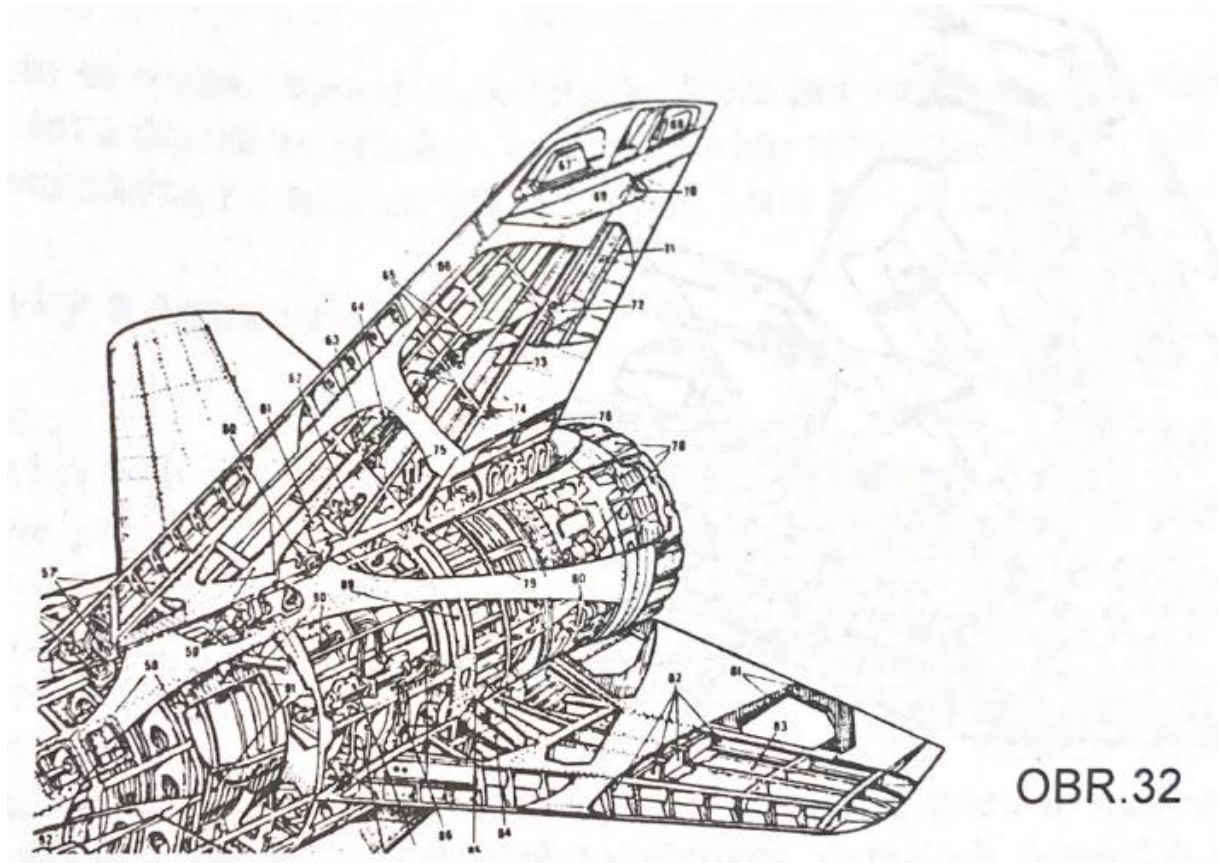
Výroba kompozitních skořepin z uhlíkových vláken se dělí na dva možné výrobní postupy. Buďto přes vakuové balení do formy s pryskyřicí a uhlíkovými vlákny, nebo na výrobu pomocí takzvaných prepreg kompozitních vláken. Jsou to vlákna, na které je předem aplikována pryskyřice. Novější prepreg materiály mají tu výhodu, že nepotřebují vytvrdit v autoklávech, takové vytvrzení je však nutné pro potřeby leteckého průmyslu. Při tvorbě složitějších modelů je nutné udržet při takzvaném „over-lappingu“ směr kompozitních vláken u jednotlivých vrstev, naopak různé vrstvy by měly být překládány o 90°. [4] [3]

2.2. Příprava uhlíkových vláken

V případě použití předem impregnované tkaniny je použití velmi jednoduché, ale v případě vakuového balení jde o složitější postup. Technika vakuového balení vytvoří na povrchu laminátu velký tlak, který na laminát, nejčastěji v negativní formě, působí po celou dobu vytvrzovacího cyklu. Vakuové balení laminátového kompozitu představuje rovnou několik funkcí. Jednak odstraní vzduch, který se nachází mezi jednotlivými vrstvami uhlíkových vláken, ale i stlačí k sobě všechny vrstvy, tím zabrání pohybu a rotaci jednotlivých vrstev vůči sobě. Díky odsátí vzduchu se z velké části také zbavíme vlhkosti. Jelikož při odsátí vzduchu se na sebe více nalepí jednotlivé vrstvy uhlíkových vláken, zapříčiníme tak, že pryskyřice, která se nachází mezi jednotlivými vrstvami se rovnoměrně rozprostře a dosáhneme tak požadovaného poměru pryskyřice a uhlíkových vláken. Jelikož je kompozit tvořen právě těmito dvěma prvky, a to uhlíkovými vlákny a pryskyřicí jejich vzájemný poměr slučuje jejich vlastnosti. Samotná uhlíková vlákna nejsou moc pevná v jejich textilní podobě a samotná pryskyřice je moc křehká po tom, co se vytvrdí. Pokud v laminátu bude přebytek pryskyřice, bude mít tato část spíše vlastnosti pryskyřice a může tak v těchto místech dojít k popraskání materiálu. Naopak v místech, kde pryskyřice bude málo, může dojít k tvorbě míst, která budou velmi měkká a slabá. Tento poměr tkaniny vůči pryskyřici velmi závisí na daném využití finálního materiálu. Například k výrobě modelů se většinou používá 1:1 poměru vláken a pryskyřice. V leteckém průmyslu je to 1:0.6-1:0.4. Tento poměr by měl být vyšší, pokud vyrábíme model, který má hodně ostrých hran a je geometricky velmi složitý. Pokud vytvrzujeme formu v autoklávu, poměr pryskyřice může být o něco vyšší. Pro metodu s vakuovým balením je nutné dbát na to, abychom měli k dispozici dostatečně výkonnou vakuovou pumpu, dvousměrný přetlakový ventil pro případ selhání pumpy nebo v případě protržení vnější fólie. Dále je nutné mít připravenou formu, na kterou budeme aplikovat směs lepidla a pryskyřice s uhlíkovými vlákny. Dále formu, o které víme, že se dá na tento způsob výroby použít. Do formy vyplněné pryskyřicí a uhlíkovými vlákny se může vložit speciální fólie, která zajistí lepší družbu pryskyřice na povrchu laminátu. Dále se aplikuje vrstva odděľující. Na tuto vrstvu přijde prodyšná výplň, která zachytí přebytečnou pryskyřici a zbylý vzduch z povrchu laminátu. Zajistí tak ideální poměr pryskyřice k uhlíkovým vláknům. Jako poslední přijde vakuová fólie, která se nalepí na strany a kompletně překryje celou část formy, ze které se následně přes pumpu odsaje vzduch. Zpevněná forma, ze které byl odsát vzduch, se nechá ve vakuu, dokud pryskyřice nebude zcela vytvrzena. Vznikne tak kompozitní materiál, který je velmi lehký, ale zároveň má vysokou pevnost. [4] [3]

2.3. Konstrukce směrového kormidla

Konstrukce směrových kormidel a obecně ocasních ploch je přibližně stejná jako konstrukce klasického křídla. Od toho se také bude vyvíjet následující popis. Křídlo obsahuje prvky nosné konstrukce podélného systému a zároveň příčného systému, potahem je poté nazýván vnější obal konstrukce, který tvoří tvar křídla. [1] [2]



Obrázek 2.3-1 – Konstrukce SOP

2.3.1. Potahy

Dělí se primárně na nenosné potahy a nosné potahy. Potah tvoří část konstrukce, zajišťuje aerodynamické vlastnosti a přenáší smykové zatížení. [1]

2.3.1.1. Nosné potahy

Hlavní rozdíl od nenosných potahů je, že nosné potahy přenášejí zároveň nejen smykové zatížení, ale zatížení od krutu a tím pádem jsou nosníky méně zatěžovány. Dále se odlišují dělením na samonosné a vyztužené potahy. Samonosné potahy jsou myšleny takové, které udrží svůj tvar bez vzpěry či jiné podpory. Nejlepší příklad samonosného potahu by tak byl monolitní či sendvičový typ konstrukce potahu. Ty vyztužené, jak již název napovídá jsou vyztužené příčným a podélným silovým systémem křídla. [1]

2.3.1.2. Nenosné potahy

Nenosný potah je schopný přenést pouze tlakové síly, které vznikají z aerodynamického zatížení na vnitřní konstrukci křídla. Příkladem nenosného potahu by byl plátěný či látkový potah, používaný například u letounů v první světové válce. [1]

2.3.2. Nosníky

Spolu s podélníky tvoří podélný systém konstrukce křídla. Jejich hlavním smyslem je přenést ohybový moment nebo alespoň většinu ohybového momentu. Kvůli rychlému poklesu ohybového momentu směrem od trupu, je důležité navrhnout systém ubírání těžkých pásnic podél rozpětí křídla. Tvar je tak mnohdy určen průběhem ohybového momentu. U menších letadel je vnější část nosníků s obráběnými pásnicemi nebo z monolitních nosníků běžně nahrazována pouze pomocným nosníkem. Nebo se nepoužívají vůbec, jelikož k přenosu ohybu i krutu postačí žebry podepřený práh. [1]

2.3.3. Podélníky

Stejně jako nosníky tvoří podélný systém. Jinak se podélníky nazývají stingery a slouží obdobně jako nosníky k přenosu ohybu momentu. Jedná se o obdobu žeber v podélném směru. Na rozdíl od nosníků bývají méně robustní. [1]

2.3.4. Žebra

Žebra tvoří obrysotvorné elementy v křídle a slouží k podpoře potahu a udržení tvaru křídla za letu. Spolu s obrysovými výztuhami tvoří příčný systém. Slouží k přenosu zatížení z podélníků a polí potahu na nosníky. Žebra se dělí na čtyři skupiny:

- a) příhradové
- b) plnostěnné
- c) obrysové výztuhy
- d) monolitní

Nejběžnější jsou plnostěnná žebra vylisovaná z plechu. U velmi lehkých letadel tvoří plnostěnné žebro výztuhu pro místa, kde působí osamělé síly (uložení podvozku, závěsy křídel atd.) mezi těmito místy je potah podepírán obrysovými výztuhami.

Monolitní a frézovaná žebra z tlustších plechů dokáží přenést velké smykové síly a nesou příruby spojovacích systémů pro křídla a konzole pro připojení řízení. [1]

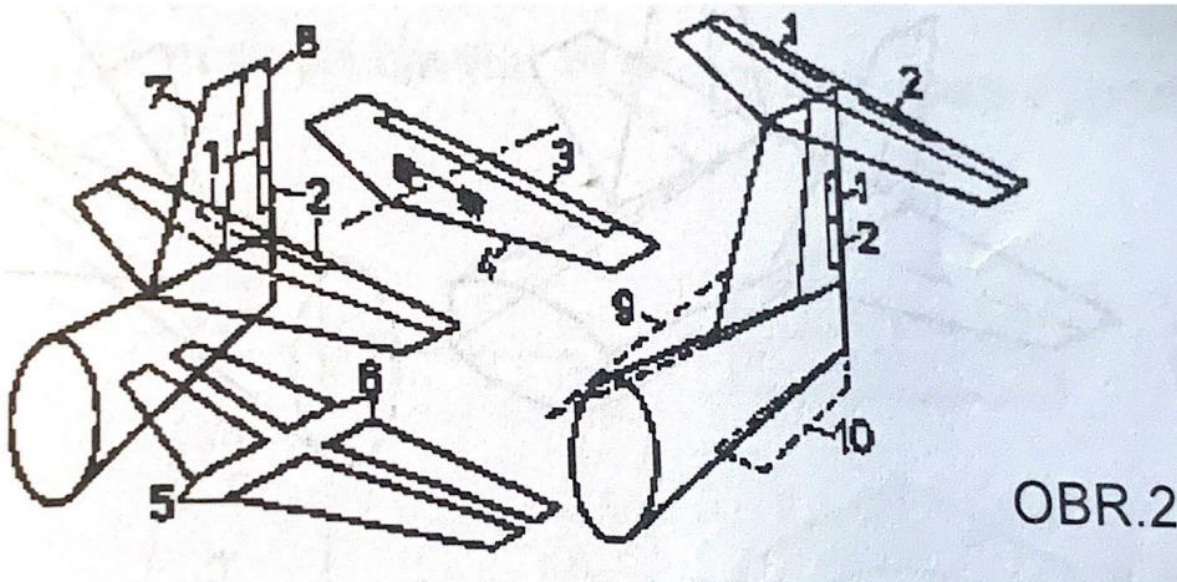
2.3.5. Zavěšení kormidla

Směrové kormidlo je na svislou ocasní plochu připojeno přes závěsy. Tyto závěsy bude tvořit deska s čepy pro závěs a řízení a duralový plech s ložiskem. Na čepy umístíme ložisko pro lepší pohyb směrového kormidla. [1]

3. Stanovení zatížení kormidla

Jelikož směrové kormidlo je součástí svislé ocasní plochy, budou pro něj platit stejná zatížení.

Tyto zatížení se dělí na obrátové (manévrovací) a poryvové.



Obrázek 3-1 – Typy SOP

Vyvažovací zatížení svislých ocasních ploch by mělo být v rovnováze se zatáčivými momenty letounu, které mají SOP vně i mimo osu Y ve všech ustálených režimech přímočarého letu. U konzervativně koncipovaných letounů je tato složka malá, a při počátečním navrhování se proto neřeší. Pro konstrukci a dimenzování bude nejdůležitější prvek manévrovací zatížení nebo poryvové zatížení.

Všechny SOP musí být navrženy tak, aby odolaly v následujících případech zatížení konkrétně pro předpis UL2:

- a) Pevnostní požadavek bude stanoven provozním zatížením, tedy nejvyšším očekávaným zatížením a početním zatížením, tedy zatížením, které pracuje s předepsaným součinitelem bezpečnosti. Pokud není určeno jinak, stanovená zatížení jsou provozní.
- b) Vzdušná zatížení a pozemní zatížení musí být vždy uvedena do rovnováhy setrvačnými silami, kde je nutné uvážit všechny osamělé síly. To znamená, že zatížení musí být rozložena tak, aby odpovídala skutečným podmínkám anebo se velmi blížila těmto zatížením z bezpečné strany.
- c) Pokud dojde k deformaci, je možné že rozložení vnějšího zatížení a vnitřních sil bude změněno, je poté nutné uvažovat nové rozložení. [1] [5]

3.1. Součinitel bezpečnosti podle předpisu UL2:

- a) Pokud není uvedena jiná hodnota, musí být použit součinitel bezpečnosti 1,5.
- b) Součinitele bezpečnosti je nutno zvýšit na dále uvedené hodnoty, jestliže:
 - I. Existuje nejistota o pevnosti součásti (dílu)
 - II. Je očekávána ztráta pevnosti v čase do výměny
 - III. Nejsou k dispozici přesné pevnostní hodnoty vzhledem k neznámým výrobním a zkušebním metodám. Velikosti tohoto doplňkového součinitele bezpečnosti, pokud není v dalším uvedeno jinak, musí být stanovena pro každý typ zvlášť. Požadovaná doba do výměny těchto dílců musí být udána v Letové a provozní příručce.
 - IV. Především je stanoveno pro:

Odlitky:	2,0
Šroubové spoje:	2,0
Závěsy kormidel:	6,7
-(mimo valivých ložisek)	
Kování:	1,2
Uchycení upevňovacích pásů:	1,5
- X násobek z nouzových podmínek podle kapitoly D, bod IX.1 b) 1)	
Lana řídicí:	2,0
Lana nosná:	2,0
Ložiska v táhlovém řízení na styčné ploše měkčí části:	3,3
Ložiska v lanovém řízení na styčné ploše měkčí části:	2,0
Sedačkové (i pilotní závěsy):	2,0

Pro kompozitní materiál z uhlíkových vláken se musí počítat se základním součinitelem bezpečnosti 1,5 a dále násobený součinitelem vlhkosti 1,25 tvořící koeficient bezpečnosti pro kompozitní materiály $k = 1,875$. Tento koeficient může být rozšířen o součinitel vlivu teploty $k_t = 1,2$. V této práci ale budeme počítat pouze s vlivem vlhkosti. [1] [5] [2]

3.1.1. Obratová zatížení

Svislé ocasní plochy musí být navrženy na obratová zatížení, která se mohou vyskytnou při následujících podmínkách [1]

- a) Náhlá výchylka směrového řízení na maximální výchylku při rychlosti V_a
- b) Jedna třetina plné výchylky směrového řízení při rychlosti V_a

3.1.2. Poryvová zatížení

- Svislé ocasní plochy musí být navrženy na boční poryvová zatížení až do hodnot podle kapitoly C, oddíl III, bod 1 c).
- Pokud není k dispozici přesnější, skutečným podmínkám odpovídající výpočet, musí se síly působící na svislé ocasní plchy počítat následujícím způsobem:

$$P_{SOP} = 0,5 * p_0 * S_{SOP} * a_{SOP} * U * k_{SOP} * V$$

kde

P_{SOP} = síla na svislé ocasní plochy [N]

p_0 = hustota vzduchu při hladině moře [1,225 kg/m³]

k_{SOP} = zmírňující součinitel, lze dosadit 1,2

S_{SOP} = plocha svislých ocasních ploch [m²]

a_{SOP} = sklon křivky vztlaku SOP $\left[\frac{1}{rad}\right]$

U = rychlost poryvu $\left[\frac{m}{s}\right]$

V = rychlost letu $\left[\frac{m}{s}\right]$

3.1.3. Setrvačná zařízení

Pokud nejsou použity posilovače jsou setrvačné síly od obrátů, působící na kormidla (směrová kormidla, výšková kormidla i křídélka) velmi malé, prakticky v mezích obratové obálky letounu. Přesto častá poškození ocasních ploch způsobují setrvačná zatížení, která působí v ose závěsů kormidel, jejichž velikost nelze při navrhování dost dobře odhadnout. [1]

3.2. Pevnostní požadavky

- Pevnostní požadavky jsou v provozu stanoveny formou nejvyššího očekávaného zatížení a provozního zatížení násobeného předepsanými součiniteli bezpečnosti. Pokud není určeno jinak, jsou stanovená zatížení provozní.
- Pokud není uvedeno jinak, musí být vzdušná a pozemní zatížení vždy uváděna do rovnováhy setrvačnými silami, přičemž je nutno uvážit všechny větší osamělé hmotnosti letounu. Zatížení musí být rozložena tak, že tato rozložení musí buď odpovídat skutečným podmínkám nebo se jim blížit z bezpečné strany.
- Jestliže rozložení vnějšího zatížení a vnitřních sil je vlivem deformací při zatížení podstatně změněno, musí být uváženo takovéto nové rozložení. [1] [5]

3.2.1. Pevnostní vlastnosti materiálů a výpočtové hodnoty

- a) Pevnostní vlastnosti používaných materiálů musí být doloženy dostatečným počtem zkoušek, tak aby výpočtové hodnoty bylo možné stanovit na základě statistiky.
- b) Výpočtová hodnota musí být zvolena tak, aby pravděpodobnost nedostačující pevnosti jakékoliv části nosné konstrukce včetně uváženého rozptylu materiálových vlastností byla velmi nízká.
- c) Pokud je při normálních podmínkách na nějaké části nosné konstrukce nebo pevnostním spoji dosaženo takové teploty, který má významný vliv na pevnost, je nutno tento vliv vzít v úvahu [1] [5]

3.2.2. Pevnost a deformace

- a) Konstrukce musí být schopna přenést provozní zatížení bez trvalých deformací. Při všech zatíženích až do početního zatížení nesmí vzniklé deformace omezit bezpečný provoz. To platí především pro soustavu řízení
- b) Konstrukce musí být schopna přenášet početní zatížení nejméně tři sekundy, aniž by došlo k poruše. Třísekundový limit ovšem neplatí, jestliže je pevnostní průkaz prováděn dynamickou zkouškou, při níž jsou prokazovány skutečné zatěžovací podmínky. [1] [5]

3.2.3. Průkaz pevnosti konstrukce

- a) Splnění pevnostních a deformačních podmínek podle kapitoly C, oddíl I, bod 3 musí být prokázáno pro všechny kritické případy zatížení. Teoretický, početní průkaz může být uznán pouze tehdy, jestliže je o zvoleném typu konstrukce na základě zkušeností známo, že použité výpočtové metody dávají spolehlivé výsledky. Jinak musí být proveden průkaz pevnostní zkouškou.
- b) V kapitole C nejsou uvedeny všechny pevnostní požadavky pro průkaz. Určité díly konstrukce musí být prokázány tak, jak je uvedeno v kapitole D tohoto předpisu. [1] [5]

Letové násobky jsou dány poměrem složky vzdušných sil, která působí kolmo na dráhu letu letounu k tíži letounu. Při kladném násobku je vzdušná síla orientována vzhledem k letounu nahoru.

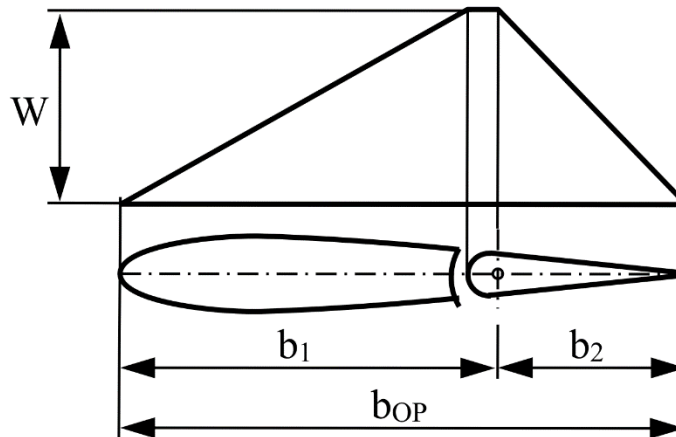
3.3. Zatížení řídicích ploch

V následující kapitole budou vypočítány zatížení, působící od obratu a od poryvu.

3.3.1. Obratová zatížení

U obratového zatížení je nutné vypočítat zatěžovací obrazec. Z dostupných rozměrů, které máme je možné dopočítat chybějící rozměr W , který se vypočítá za pomoci průměrné hodnoty $W^{\bar{}}$.

Obrázek vychází z předpisu.



Obrázek 3-2 – Obrazec zatížení při vychýlení kormidla

průměrná hodnota $W - W^{\bar{}}$

$$W^{\bar{}} = 220 + 20,5 * \frac{G}{S}$$

hmotnost letounu $G = 345 \text{ kg}$

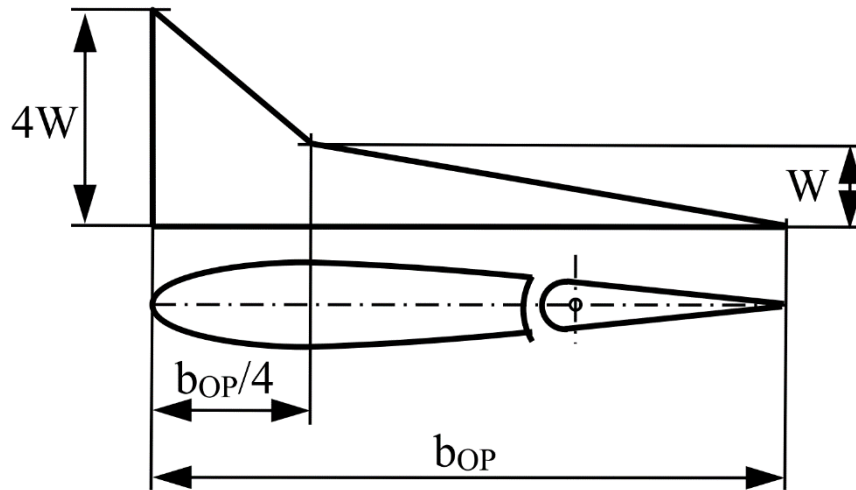
plocha křídla $S = 5,029 \text{ m}^2$

$$W^{\bar{}} = 220 + 20,5 * \frac{345}{5,029} = 1626,343 \text{ Pa}$$

$$W^{\bar{}} \geq 575 \text{ Pa} \rightarrow \text{Splňuje}$$

3.3.2. Poryvová zatížení

Pokud není k dispozici přesnější výpočet, použijeme následující, který je převzat ze zdroje [5]



Obrázek 3-3 – Obrazec zatížení při bočním poryvu

ρ_0	1,225	$\frac{kg}{m^3}$
k_{SOP}	1,2	[-]
S_{SOP}	0,4399	m^2
a_{SOP}	5,556	$\frac{1}{rad}$
$U(v)$	15 a 7,5	$\frac{m}{s}$
v	22,48 a 116,9	$\frac{m}{s}$

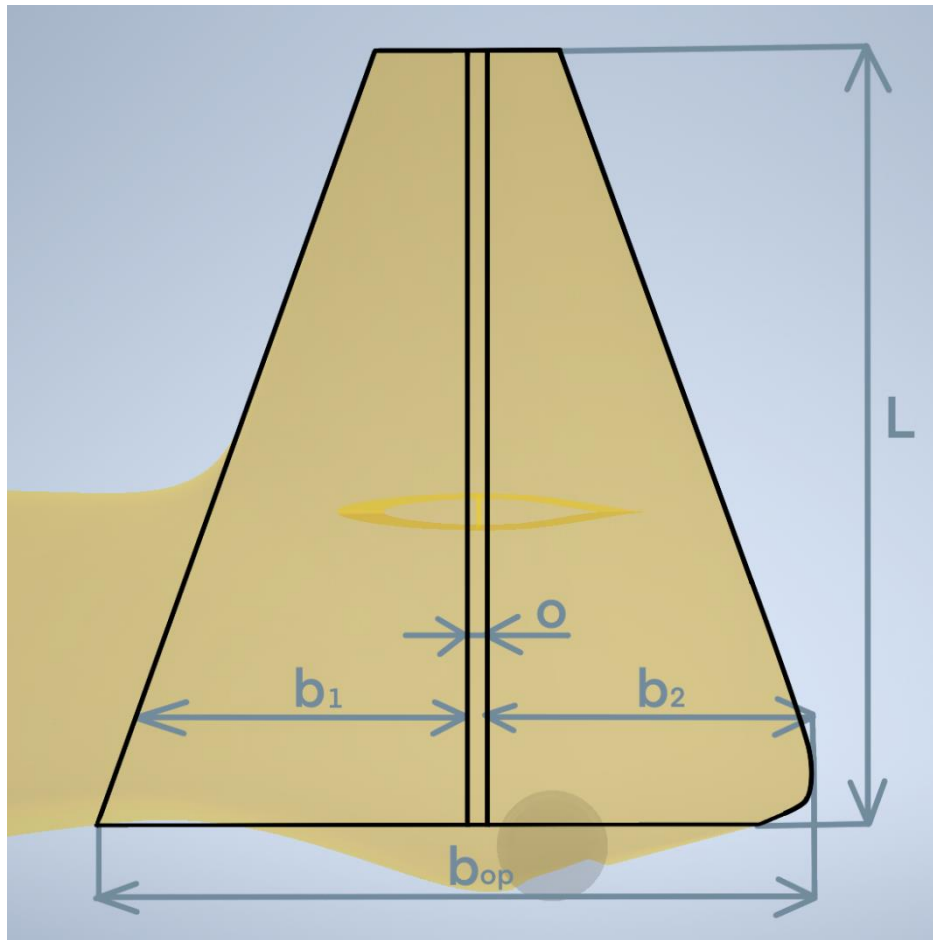
Tabulka 3.1 – Hodnoty zatížení v poryvu

$$P_{SOP1} = 0,5 * 1,225 * 1,2 * 0,4399 * 5,556 * 15 * 22,48$$

$$P_{SOP2} = 0,5 * 1,225 * 1,2 * 0,4399 * 5,556 * 7,5 * 116,9$$

3.4. Výpočet maximálního zatížení

3.4.1. Geometrie svislé ocasní plochy



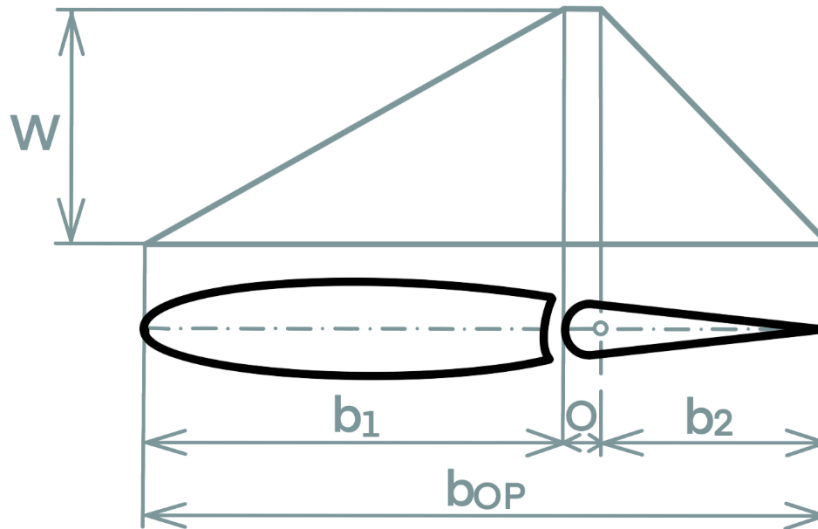
Obrázek 3.4-1 – Geometrie SOP

Geometrie				
kořen			konec	
b_1	500,3	mm	125	mm
b_2	464,2	mm	125	mm
o	25	mm	25	mm
b_{op}	964,5	mm	250	mm
L	1050			mm

Tabulka 3.4.1 – Geometrie SOP [6]

3.4.2. Výpočet zatížení při vychýlení kormidla

Dále je nutné vypočítat síly, které působí na kormidlo při jeho vychýlení. Pomocí průměrné hodnoty $W^=$ a obsahu plochy vypočteme hledanou hodnotu W . [5]



Obrázek 3.4-2 – Obrazec zatížení při vychýlení kormidla

$$\frac{1}{2}W * b_1 + \frac{1}{2}(b_2 - o) * W + o * W = W^= * b$$

$$W = \frac{W^= * b_{op}}{\frac{1}{2} * b_1 + \frac{1}{2} * (b_2 - o) + o}$$

Velikost zatěžovacího obrazce pro kořen kormidla:

$$W_1 = \frac{1626,343 * 0,9645}{0,5 * 0,5003 + 0,5 * (0,4642 - 0,025) + 0,025} = 3170,51 \text{ Pa}$$

Velikost zatěžovacího obrazce pro konec kormidla:

$$W_2 = \frac{1626,343 * 0,250}{0,5 * 0,125 + 0,5 * (0,125 - 0,025) + 0,025} = 2956,99 \text{ Pa}$$

Plochu zatěžovacího obrazce S následně vypočítáme dle vzorce:

$$S = o * W + \frac{1}{2}(b_2 - o) * W$$

Plocha zatěžovacího obrazce S_1 působící u kořene kormidla:

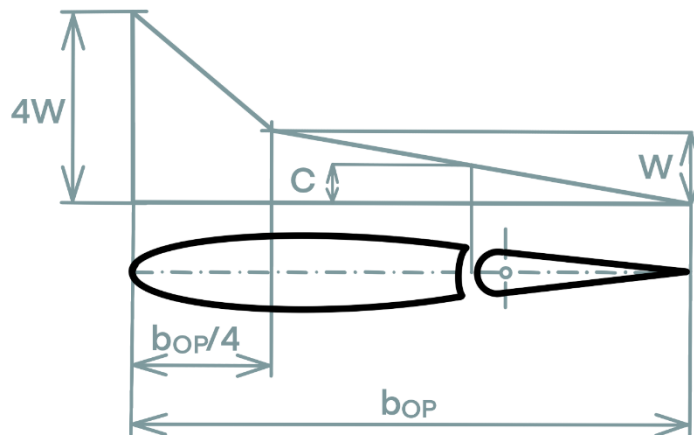
$$S_1 = 0,025 * 3170,51 + \frac{1}{2}(0,4642 - 0,025) * 3170,51 = 775,51 \frac{N}{m}$$

Plocha zatěžovacího obrazce S_2 působící u konce kormidla:

$$S_2 = 0,025 * 2956,99 + \frac{1}{2}(0,125 - 0,025) * 2956,99 = 221,77 \frac{N}{m}$$

3.4.3. Zatížení při bočním poryvu

Obdobně jako při výpočtu zatížení při vychýlení kormidla i v tomto případě je nutné vypočítat nejprve výšku zatěžovacího obrazce jak pro kořen, tak pro konec kormidla. [5]



Obrázek 3.4-3 – Obrazec zatížení při bočním poryvu

Tento rozměr získáme ze vztahu:

$$\frac{3}{8} b_{op} * W + \frac{1}{4} b_{op} * W + \frac{3}{8} b_{op} * W = W^= * b_{op}$$

$$\frac{3}{8} W + \frac{1}{4} W * \frac{3}{8} W = W^=$$

$$W = W^=$$

$$W = W^= = 1626,343 Pa$$

Pro výpočet obsahu plochy u kormidla můžeme využít podobnosti trojúhelníku a využít tak následujícího vztahu, pro výpočet chybějícího rozměru pro kořen kormidla:

$$C = \frac{W * b_2}{\frac{3}{4} * b_{op}}$$

$$C_1 = \frac{1626,343 * 0,4642}{\frac{3 * 0,9645}{4}} = 1043.65 Pa$$

Poté jsme schopni vypočítat obsah trojúhelníku pro kořen kormidla:

$$S_1 = \frac{1}{2} * C * b_2$$

$$S_1 = \frac{1}{2} * 104365 * 0,4645 = 242,39 \frac{N}{m}$$

A respektive pro konec kormidla:

$$C_2 = \frac{1626,343 * 0,125}{\frac{3}{4} * 0,250} = 884,229 \text{ Pa}$$

$$S_2 = \frac{1}{2} * 884,229 * 0,125 = 55,26 \frac{N}{m}$$

Z výsledků je zjevné, že zatížení při obratu bude větší než vychýlení při bočním poryvu a při zkoumání grafu zatížení vychází, že poryvové zatížení je daleko menší než při vychýlení kormidla.

3.5. Spojité zatížení

Za pomoci ploch zatěžovacích obrazců S_1 a S_2 působících u kořene a konce kormidla můžeme dopočítat průběh spojitého zatížení. Tyto hodnoty použijeme jako výchozí hodnoty pro výpočet směrnice lineárního členu a určení spojitého zatížení funkce $q(z)$ po celé délce kormidla. [5]

$$q(z) = q_1 - k * z$$

Nejdříve vypočítáme směrnici lineárního členu:

$$k = \frac{q_1 - q_0}{L}$$

$$q_1 = S_1 = 775,51 \frac{N}{m}$$

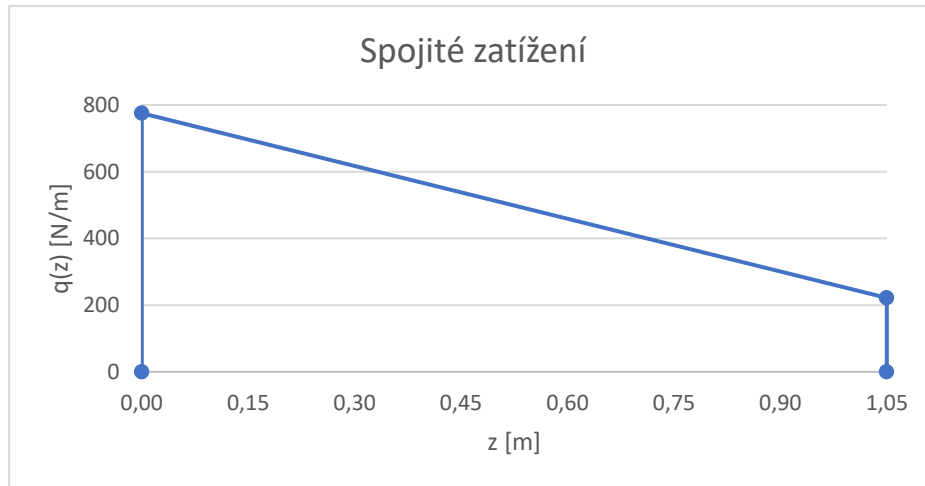
$$q_0 = S_2 = 221,77 \frac{N}{m}$$

$$k = \frac{775,51 - 221,77}{1,05} = 527,36$$

Následně dosadíme do vztahu a získáme rovnici spojitého zatížení:

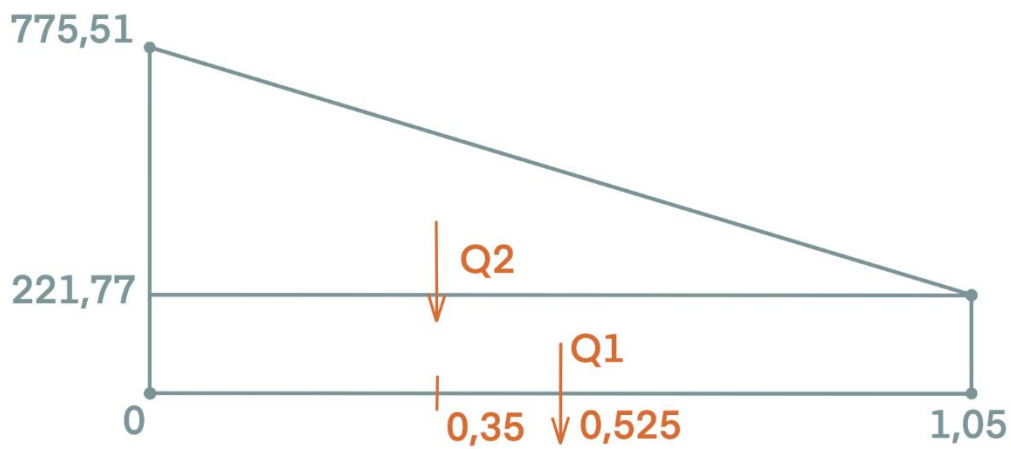
$$q(z) = 775,51 - 527,36 * z$$

A z rovnice vytvoříme graf spojitého zatížení:



Graf 1 – Průběh spojitého zatížení

Následně pomocí vytvořeného čtverce a trojúhelníku dopočítáme ekvivalentní síly a jejich vzdálenost od kořene kormidla.



Obrázek 3.5-1 – Ekvivalentní síly

Výpočet a vzdálenost ekvivalentních sil:

$$L * q_0 = Q_1$$

$$1,05 * 221,77 = 232,86 \text{ N}$$

$$\frac{L}{2} = L_{Q1}$$

$$\frac{1,05}{2} = 0,525 \text{ m}$$

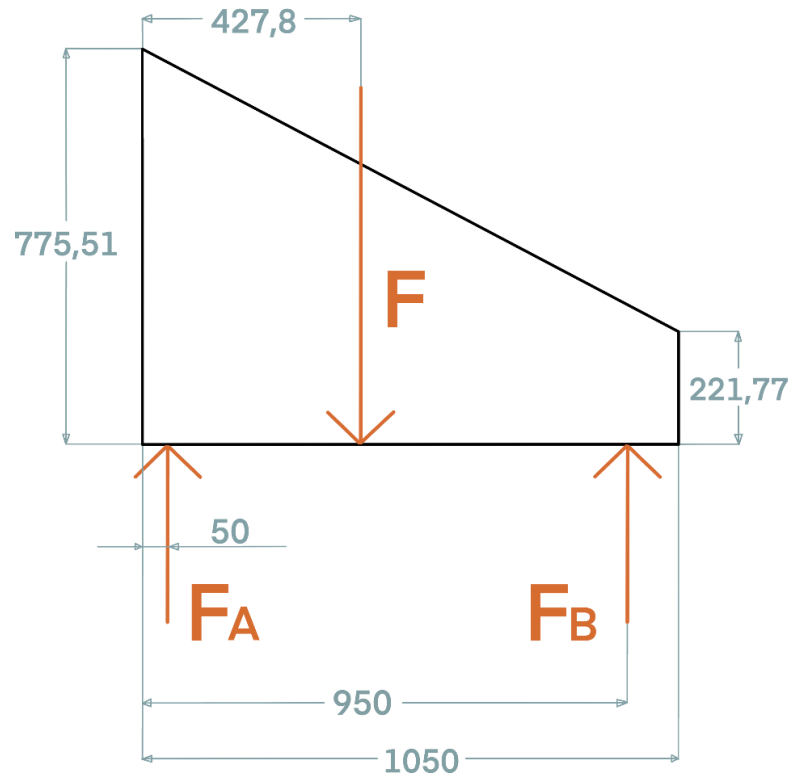
$$\frac{L}{2} * (q_1 + q_0) = Q_2$$

$$\frac{1,05}{2} * (775,51 + 221,77) = 290,71 \text{ N}$$

$$\frac{L}{3} = L_{Q2}$$

$$\frac{1,05}{3} = 0,350 \text{ m}$$

3.6. Výpočet reakcí a jejich umístění



Obrázek 3.6-1 – Reakce závěsů

Určení reakcí závěsů:

$$F = \frac{S_1 - S_2}{2} * L + S_2 * L = \frac{775,51 - 221,77}{2} * 1,05 + 221,77 * 1,05 = 523,57 \text{ N}$$

$$L_F = \frac{\frac{S_1 - S_2}{6} * L^2 + \frac{S_2}{2} * L^2}{F} = \frac{\frac{775,51 - 221,77}{6} * 1,05^2 + \frac{221,77}{2} * 1,05^2}{523,57} = 0,428 \text{ m}$$

$$F_A = F - F_B$$

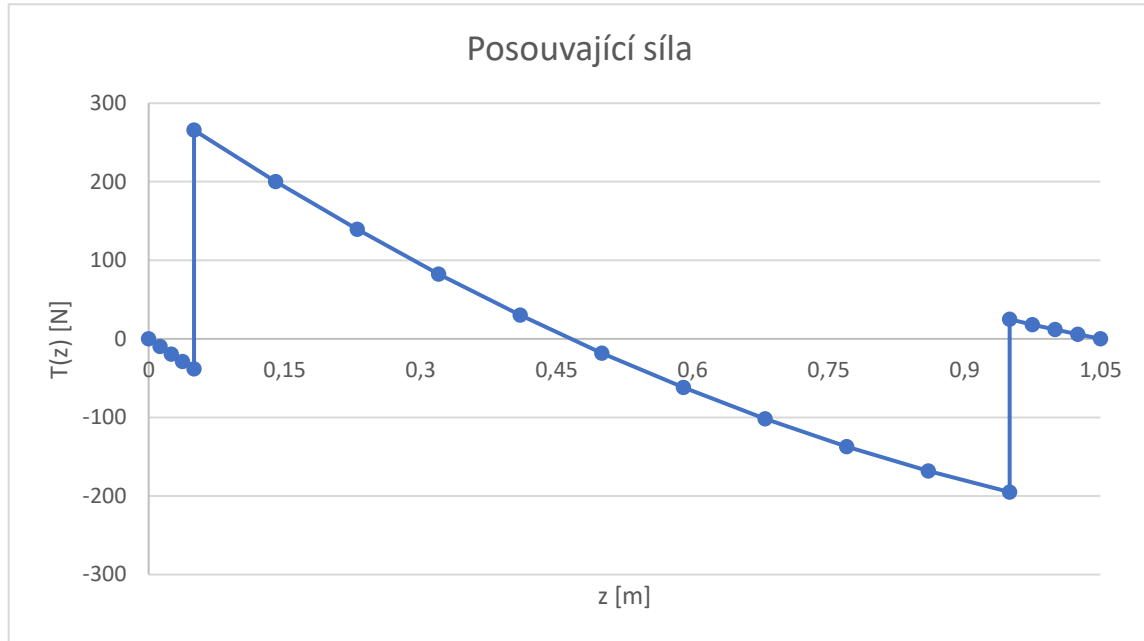
$$F_B = \frac{F * (L_{FA} - L_F)}{L_{FA} - L_{FB}} = \frac{523,57 * (0,06 - 0,428)}{0,05 - 0,95} = 219,8 \text{ N}$$

$$F_A = 523,57 - 219,8 = 303,77 \text{ N}$$

3.7. Posouvající síla a ohybový moment

Průběh posouvající síly T určíme dle Schwedlerovy věty:

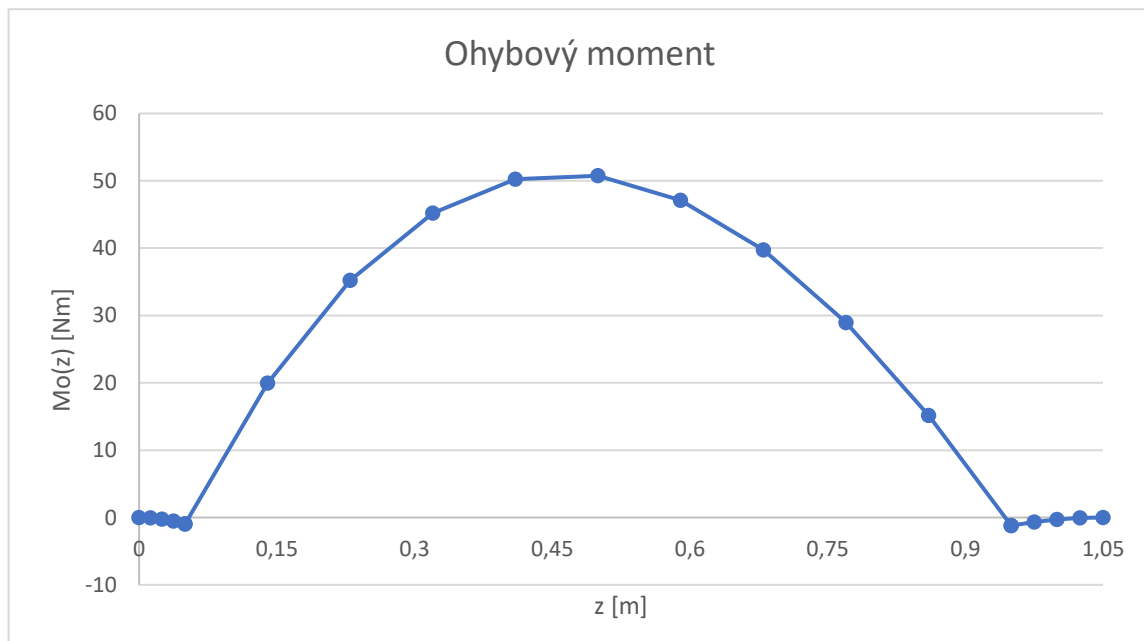
$$T = \int_0^L q(z) dz$$



Graf 2 – Průběh posouvající síly

Následně určíme průběh ohybového momentu ze Schwedlerovy věty integrací smykové síly:

$$M_o = \int_0^L T(z) dz$$



Graf 3 – Průběh ohybového momentu

3.8. Kroutící moment

Průběh kroutícího momentu získáme tak, že vynásobíme směrnicí ramene se směrnicí spojitěho zatížení. Směrnice ramene je závislá na vzdálenosti z a bude mít lineární průběh.

Rovnice směrnice ramene:

$$r(z) = r_1 - p * z$$

Jelikož se snažíme určit směrnicí lineárního členu, je třeba zjistit výchozí hodnoty pro kořen a pro konec kormidla.

Výslednou hodnotu r_1 a r_2 určíme ze vztahu:

$$r(z) = \frac{-\frac{o}{2} * (o * W) + \frac{1}{6} * (b_2 - o)^2 * W}{o * W + \frac{(b_2 - o) * W}{2}}$$

Tedy pro kořen:

$$r_1 = \frac{-\frac{0,025}{2} * (0,025 * 3170,51) + \frac{1}{6} * (0,4642 - 0,025)^2 * 3170,51}{0,025 * 3170,51 + \frac{(0,4642 - 0,025) * 3170,51}{2}} = 130,16 \text{ mm}$$

A respektive pro konec:

$$r_2 = \frac{-\frac{0,025}{2} * (0,025 * 2956,99) + \frac{1}{6} * (0,125 - 0,025)^2 * 2956,99}{0,025 * 2956,99 + \frac{(0,125 - 0,025) * 2956,99}{2}} = 18,06 \text{ mm}$$

Následně můžeme určit směrnicí lineárního členu p :

$$p = \frac{r_1 - r_2}{L}$$

$$p = \frac{0,1302 - 0,0181}{1,05} = 0,107$$

Po dosazení do rovnice získáme směrnicí ramene.

$$r(z) = 0,1302 - 0,107 * z$$

Vynásobením směrnice ramene se směrnicí spojitěho zatížení získáme:

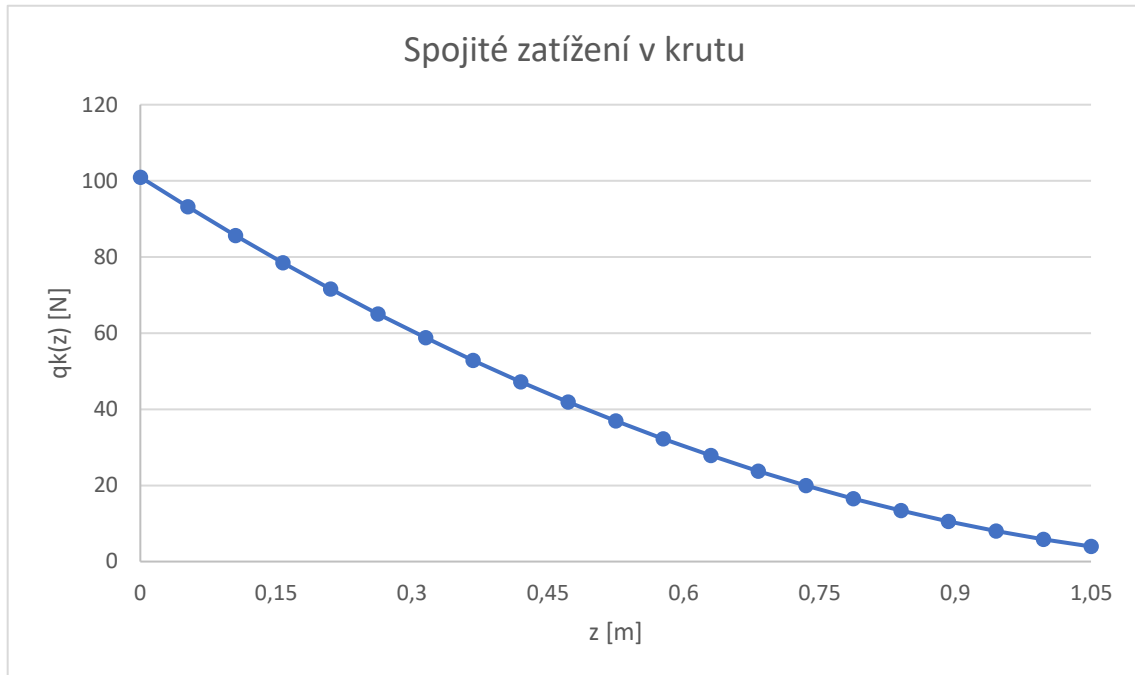
$$q_k(z) = q(z) * r(z) = 56,43z^2 - 151,64z + 100,97$$

Rovnici kroučícího momentu získáme tak, že zaintegrováme směrnicí spojitěho zatížení v krutu.

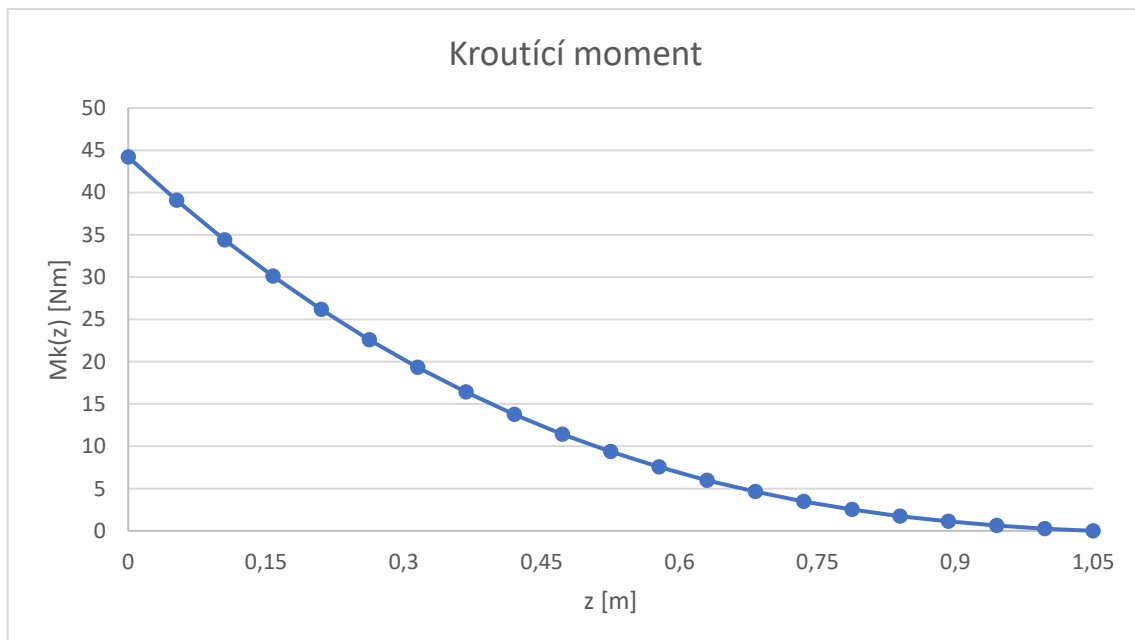
$$M_K = \int_0^L q(z) * r(z) dz$$

$$M_k = 18,81z^3 - 75,82z^2 + 100,97z - 44,2$$

Následně můžeme graficky určit průběh spojitěho zatížení v krutu a kroučícího momentu



Graf 4 – Průběh spojitěho zatížení v krutu



Graf 5 – Průběh kroučícího momentu

4. Předběžné dimenzování kormidla

V této kapitole budeme z vypočtených hodnot dimenzovat prvky kormidla.

4.1. Největší hodnoty z provozních zatížení

Z předchozích výpočtů budou uvažovány pouze maximální hodnoty z provozních zatížení pro směrové kormidlo. Detailnější souhrn výpočtů je uveden v příloze.

Maximální hodnoty provozních zatížení směrového kormidla			
Posouvající síla	T	265,65	N
Ohybový moment	M_o	50,74	Nm
Kroutící moment	M_k	44,20	Nm

Tabulka 4.1 - Maximální hodnoty provozních zatížení směrového kormidla

Tyto hodnoty budou pro další výpočty násobeny koeficientem bezpečnosti pro kompozit. Jedná se o součinitel bezpečnosti 1,5 násobný koeficientem vlivu vlhkosti 1,25.

$$k = 1,5 * 1,25 = 1,875$$

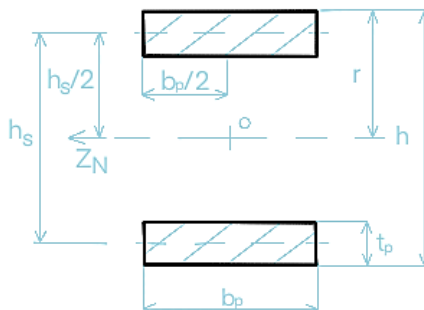
Početní zatížení směrového kormidla			
Posouvající síla	T	498,10	N
Ohybový moment	M_o	95,15	Nm
Kroutící moment	M_k	82,88	Nm

Tabulka 4.2 - Početní zatížení směrového kormidla

4.2. Dimenzování stojiny a pásnic

4.2.1. Zjednodušení geometrie tvaru pásnic

Pásnice nosníku přejímají tvar potahu a tím dochází k mírnému zakřivení, nicméně pro snazší výpočet budeme toto zakřivení zanedbávat. Stejně tak budeme zanedbávat ohyb mezi stojinou a pásnicemi ze stejného důvodu. Tvar průřezu pásnice tedy budeme uvažovat jako obdélníkovou plochu, tak jak je znázorněno na obrázku.



Obrázek 4-1 - Rozměry pásnice

Jelikož výška nosníku se v průběhu délky kormidla zužuje, určíme směrnici přímky ze známých hodnot výšky nosníku na konci a u kořene kormidla. Z těchto hodnot vyjádříme směrnici v závislosti na délce kormidla z .

$$h(z) = \frac{h_k - h_0}{L} * z + h_0$$

4.2.2. Dimenzování pásnice

Pro pevnostní výpočet pásnice nejprve určíme provozní ohybové napětí, které je předepsáno vztahem:

$$\sigma_D = \frac{M_{0max}}{W_O}$$

Dále určíme průřezový modul v ohybu W_O , který získáme z rovnice:

$$W_O = \frac{J_Z}{x_P}$$

Kde x_P je vzdálenost těžiště průřezu pásnice od osy z procházející středem nosníku a J_Z je kvadratický moment průřezu, který se určí z následujícího vztahu:

$$J_Z = 2 * \left[\frac{1}{12} * b_p * t_p^3 + 2 * S_p * x_p^2 \right]$$

$$S_p = b_p * t_p$$

$$x_p = \frac{h_S}{2}$$

Dále si z pevnosti uhlíkového kompozitu v tlaku určíme početní zatížení. Pásnice je při obratu kormidla namáhána na obě strany, jedná se tak o zatížení tlakem i tahem. Proto při výpočtu musíme uvažovat menší hodnotu, která činí $G_{pd} = 900 \text{ MPa}$.

$$\sigma_D = \frac{\sigma_{Pd}}{k} = \frac{900}{1,875} = 480 \text{ MPa}$$

Následně z předešlých vztahů můžeme určit rozměr b_p z rovnice:

$$b_p = \frac{M_O * h}{\sigma_D * \left(\frac{1}{3} * t_p^3 + t_p * h_S^2 \right)}$$

Rozměr t_p udává počet vrstev tkaniny. V našem případě se jedná o 1 vrstvu tkaniny s celkovou tloušťkou 0,13 mm.

Šířku pásnice budeme určovat podle místa největšího namáhání. Detailní výpočty jsou uvedeny v příloze.

$$b_p = \frac{46794,34 * 60,09}{480 * \left(\frac{1}{3} * 0,13^3 + 0,13 * 29,94^2 \right)} = 12,55 \text{ mm} \rightarrow \text{Zvoleno } b_p = 15 \text{ mm}$$

4.2.3. Kontrola pásnice

Následně zjistíme početní zatížení pásnice rozměru 15 mm šířky a 0,13 mm tloušťky dle vztahu

$$\sigma_{max} = \frac{M_k * k}{h_s * b_p * t_p} = \frac{51031,23 * 1,875}{107,393 * 15 * 0,13} = 456,91 \text{ MPa}$$

Tuto hodnotu následně porovnáme s pevností materiálu v tlaku

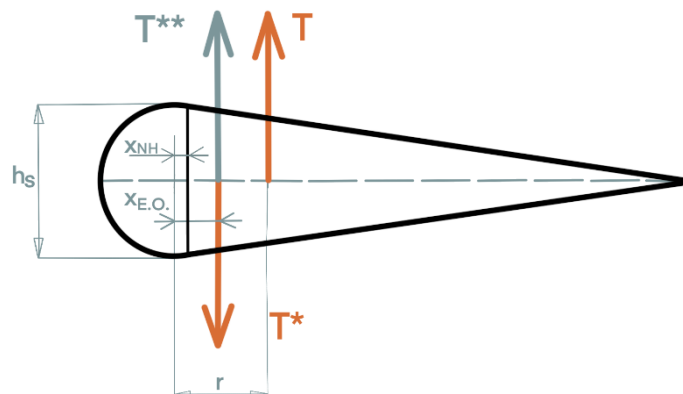
$$k_p = \frac{\sigma_d}{\sigma_{max}} = \frac{900}{456,91} = 1,97$$

4.3. Smykové zatížení směrového kormidla

4.3.1. Dimenzování potahu

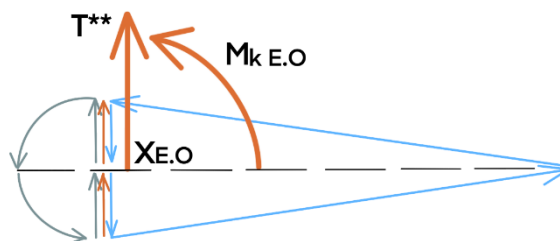
Potah bude vyroben z uhlíkové tkaniny dvou vrstev, kde jedna vrstva má tloušťku 0,2 mm a celková tloušťka potahu tak činí 0,4 mm. Dále je potah rozdělen na dvě části, které k sobě budou slepeny. V této kapitole budeme zjišťovat smyková napětí v potahu a následně stabilitu potahu. Pokud bude zjištěna nevyhovující stabilita potahu, bude potah vyztužen pěnovým jádrem.

Kormidlo je namáhané krutem, který přejímá potah. Potah budeme uvažovat jako uzavřený dvoudutinový průřez oddělený stojinou nosníku a na tento průřez bude působit krut.



Obrázek 4.3-1 – Uvažované silové uspořádání pro dimenzování pásnic

Z důvodu uvažování působení posouvající síly v elastické ose budou zavedeny síly T' a T''



Obrázek 4.3-2 – Naznačení kroucího momentu elastické osy

Tyto síly se rovnají posouvající síle T. Silová dvojice T a T'' vytváří moment vzhledem k elastické ose $M_{k E.O.}$ pokud budeme uvažovat sílu T' jako sílu posouvající.

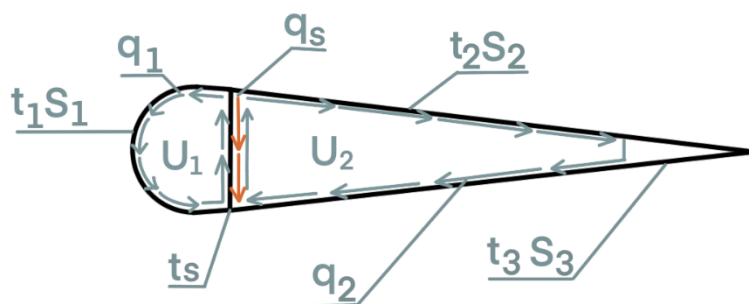
Následně podle obrázku můžeme odvodit vztah pro výpočet kroutícího momentu vzhledem k elastické ose

$$M_{kE.O.} = T * (r - x_{NH} - x_{E.O.}) = M_k - T * (x_{NH} + x_{E.O.})$$

Kroutící moment figurující v tomto vzorci je stejný jako v kapitole 4.8.

Rozměr $x_{E.O.}$, jediná neznámá z rovnice uvedené výše, určíme ze vztahu převzatého ze zdroje [7]

$$x_{E.O.} = \frac{-2 * [s_1 * (s_1 * U_2 + U_1 * h_s + U_2 * h_s)]}{(s_1 + h_s) * (s_1 * s_2 + s_1 * h_s + s_2 * h_s)} + \frac{2 * U_1}{s_1 + h_s}$$



Obrázek 4.3-3 – Naznačení smykových toků

Výpočet smykového toku q_1 a q_2 převzatý ze zdroje [7]

$$q_1 = \frac{-(U_1 * s_2 + U_1 * h_s + U_2 * h_s) * \frac{M_{kE.O.}}{2 * U_2} - (U_1 + U_2) * h_s * q_s}{U_2 * s_1 + U_2 * h_s + 2 * U_1 * h_s + \frac{U_1}{U_2} * (U_1 * s_2 + U_1 * h_s)}$$

$$q_2 = \frac{-M_{kE.O.} - 2 * U_1 * q_1}{2 * U_2}$$

Jedinou neznámou je smykový tok q_s přenášený stojinou nosníku, který určíme vzorcem:

$$q_s = \frac{T}{h_s}$$

Celkový smykový tok se vypočítá součtem orientovaných toků následovně

$$q_{sc} = q_1 + q_s - q_2$$

Smykové napětí následně vypočítáme přes vzorec:

$$\tau = \frac{q}{t}$$

Tyto výpočty jsou detailně uvedeny v příloze.

Část výsledků smykového napětí

Smykové napětí	Kořen kormidla	Horní závěs	Konec kormidla
$\tau_1 [MPa]$	-3,6	0,35	-0,0003
$\tau_2 [MPa]$	-3,31	-4,41	0,0025
$\tau_s [MPa]$	-0,29	-10,54	0,0087

Tabulka 4.3.1 – Smykové napětí provozní

Tyto hodnoty následně vynásobíme koeficientem bezpečnosti $k = 1,875$ a dostaneme početní smykové napětí.

Smykové napětí početní	Kořen kormidla	Horní závěs	Konec kormidla
$\tau_{1p} [MPa]$	-6,75	0,66	-0,0006
$\tau_{2p} [MPa]$	-6,2	-8,28	0,0048
$\tau_{sp} [MPa]$	-0,55	-19,75	0,0164

Tabulka 4.3.2 – Smykové napětí početní

Koeficient bezpečnosti pevnosti ve smyku získáme podělením početních smykových napětí s pevností ve smyku vícesměrné tkaniny $\tau_{ps} = 120 MPa$, čili vztahem:

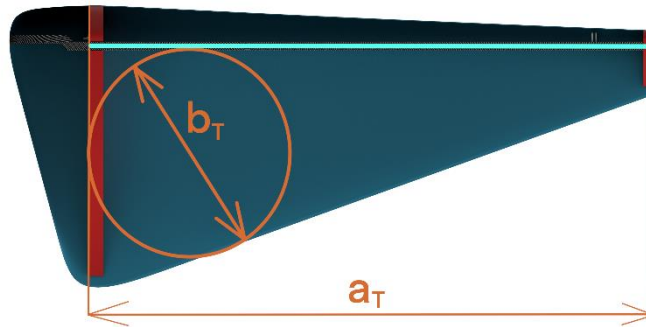
$$k_p = \frac{\tau_{ps}}{\tau_p}$$

Koeficient bezpečnosti	Kořen kormidla	Horní závěs	Konec kormidla
$k_{1p} [MPa]$	17,77	182,80	202742,43
$k_{2p} [MPa]$	19,35	14,50	25194,56
$k_{sp} [MPa]$	217,59	6,07	7331,30

Tabulka 4.3.3 Koeficienty bezpečnosti

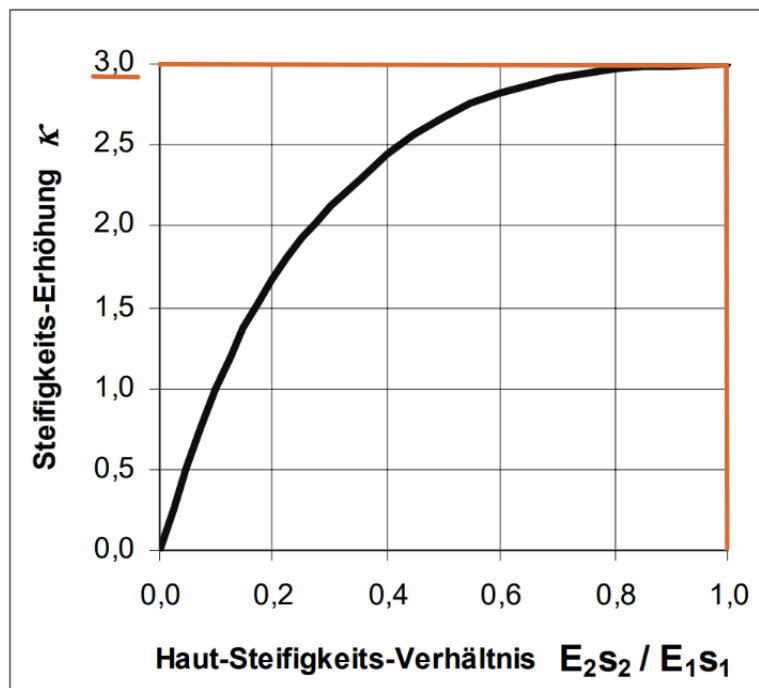
4.3.2. Stabilita smykově namáhaných částí

Potahové prvky a nosníky jsou z celé konstrukce nejvíce ohroženy ztrátou stability. Ztráta stability se projevuje deformací a zvlněním potahu v případě, že dojde k překročení kritického napětí ve smyku.



Obrázek 4.3-4 – Rozměry potahu

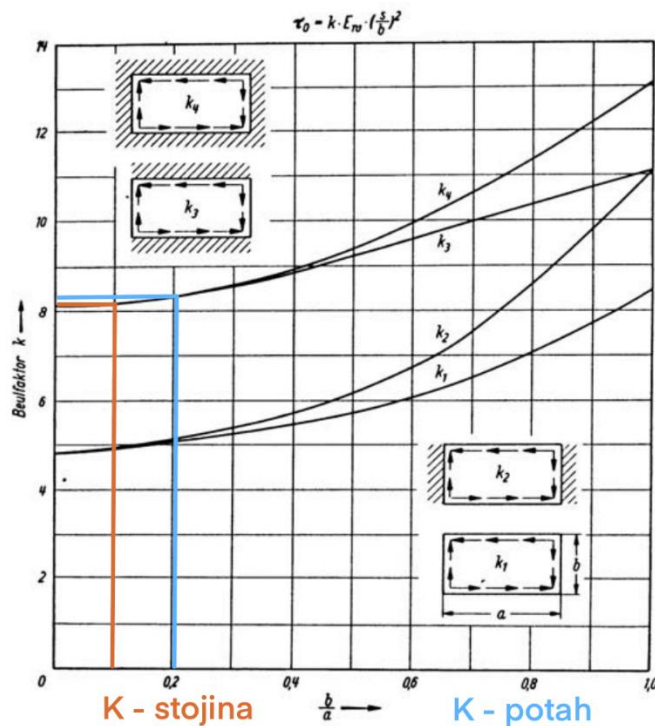
Pro kompletní výpočet musíme stanovit stabilitu potahu a stojiny nosníku. Tu stanovíme zjištěním koeficientů, které odvodíme z grafů a porovnáním kritických napětí vůči napětím početních. Pro tyto výpočty budeme uvažovat potah jako rovinnou desku. [4]



Obrázek 4.3-5 – Součinitel skladby materiálu [4]

4.3.2.1. Stabilita potahu

Podle obrázku byly určeny rozměry pro potah b_T a a_T . Z obrázku č.5.3-5 zase koeficient součinitele skladby materiálu $k = 3$ pro symetricky složený uhlíkový kompozit. Z následujícího obrázku č.5.3-6 určíme koeficient K_S odečtem hodnot dle funkce $f(K_S) = \frac{b_T}{a_T}$. Hodnoty těchto koeficientů a rozměrů jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 4.3-6 – Součinitel velikosti K_S [4]

Následně můžeme tyto hodnoty použít pro výpočet kritických smykových napětí následujícím vzorcem:

$$\tau_K = \kappa * K_S * E * \left(\frac{t}{b_T}\right)^2$$

Hodnotu kritického smykové napětí budeme určovat dle největšího rozměru b_T na potahu

$$\tau_K = 3 * 8,47 * 74160 * \left(\frac{0,4}{419,986}\right)^2 = 1,71 \text{ MPa}$$

Pokud porovnáme kritické a početní napětí, zjistíme, že stabilita potahu nevyhovuje. Bude proto nutné přistoupit k vyztužení potahu pěnovým jádrem. Z konstrukčních důvodů bylo přistoupeno na tloušťku pěnového jádra 3 mm. Celková tloušťka potahu tak činí 3,4 mm. Nyní znovu spočítáme kritické napětí s novou hodnotou tloušťky potahu.

$$\tau_K = 3 * 8,47 * 74160 * \left(\frac{3,4}{419,986}\right)^2 = 123,50 \text{ MPa}$$

Tento postup výpočtu počítá se stabilitou zadní části dutinové konstrukce, která má největší rozměr. Vzhledem k vyhovujícím výsledkům stability potahu zadní dutinové konstrukce po přidání pěnového jádra, můžeme vyvodit, že přední část dutinové konstrukce bude také splňovat stabilitu potahu i bez přidání pěnového jádra z důvodu zakřivení potahu.

4.3.2.2. Stabilita stojiny nosníku

U toho výpočtu budeme postupovat analogicky využitím předchozích vzorců a uvažováním nosníku jako rovinnou desku. Hodnoty budou opět odpovídat největšímu rozměru stojiny nosníku.

$$\tau_K = 3 * 8,2 * 74160 * \left(\frac{0,13}{107,393} \right)^2 = 2,67 \text{ MPa}$$

Pokud porovnáme tuto hodnotu s hodnotou početní, vyjde nám, že stojina podmínku stability splňuje. Takový výsledek je očekávaný.

4.3.2.3. Jistota potahu a stojiny nosníku

Vypočtené kritické hodnoty porovnáme s početními pro zjištění jistoty dle vzorce:

$$K_S = \left| \frac{\tau_{PJK}}{\tau_{2P}} \right|$$

Jistota	Potah	Stojina nosníku
K_S	19,91	4,85

Tabulka 4.3.4 – Jistoty potahu a nosníku

4.4. Kontrola závěsů a zavěšení ostruhového podvozku

Zde budeme kontrolovat pevnost závěsných prvků směrového kormidla. Konkrétně kontrola otláčení horního závěsu kudy povede spojovací šroub a dále kontrola na ohyb u spodního závěsu na čepu, kde bude umístěné ložisko a budou zde působit síly od řízení a síly od ostruhového podvozku.

4.4.1. Kontrola horního zavěšení

Pro výpočet kontroly na otláčení u horního závěsu budeme potřebovat znát plochu, kterou bude spojovací šroub otláčovat a velikost působící reakce v místě zavěšení. Tento závěs vyrobený z duralu budeme mít pevnost $\sigma_p = 434 \text{ MPa}$. Pro výpočet působícího tlaku v místě zavěšení použijeme tento vzorec:

$$p_D = \frac{R_2}{S}$$

Kde $R_2 = 303,77 \text{ N}$ je reakce do závěsu z kapitoly 4.6 a S je plocha místa, kterou šroub bude otláčovat. V tomto případě pro díru 5 mm a tloušťku duralu 2,5 mm vychází $S = 5 * 2,5 = 12,5 \text{ mm}^2$. Jelikož duralový plech je v tomto místě dvakrát, bude i hodnota plochy vynásobena dvakrát.

$$p_D = \frac{303,77}{12,5 * 2} = 12,15 \text{ MPa}$$

Následně určíme p_{dk} dovolené dle vztahu:

$$p_{dk} = \sigma_p * k$$

kde $k = 0,55$ je součinitel pro závěsy kormidel

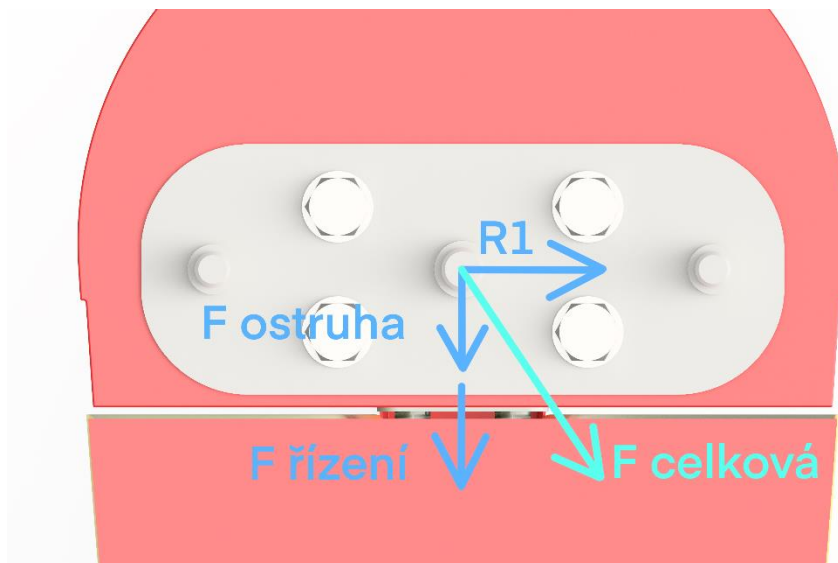
$$p_{dk} = 434 * 0,55 = 238,7 \text{ MPa}$$

Následně pro výpočet jistoty, tyto hodnoty porovnáme:

$$k = \frac{p_{dk}}{p_d} = \frac{238,7}{12,15} = 19,64$$

4.4.2. Kontrola spodního zavěšení

Dolní závěs budeme kontrolovat na ohyb. Je tedy nutné určit si rozměry čepu z obrázku, působící reakce v prostředku ložiska do závěsu, reakce od ostruhy a reakce vyvozená řízením.



Obrázek 4.3-7 – Síly a reakce působící na čep

Reakce $R_1 = 219,80 \text{ N}$ z kapitoly 4.6

Síla od ostruhy $F_{os,pod} = 1378 \text{ N}$, převzato ze zdroje [8]

Síla od řízení $F_{\check{r}} = Mk_{max} * vzdálenost \text{ čepu pro uchycení řízení od čepu zavěšení}$

$$F_{\check{r}} = \frac{44,2}{0,035} = 1262,91 \text{ N}$$

Následně určíme celkovou reakci dle obrázku:

$$F_{celk} = \sqrt{R_1^2 + (F_{os,pod} + F_{\check{r}})^2} = \sqrt{219,8^2 + (1378 + 1262,91)^2} = 2650,04 \text{ N}$$

Následně v místech, které jsou vyznačeny v obrázku určíme ohybové momenty násobeny koeficientem pro závěsy.

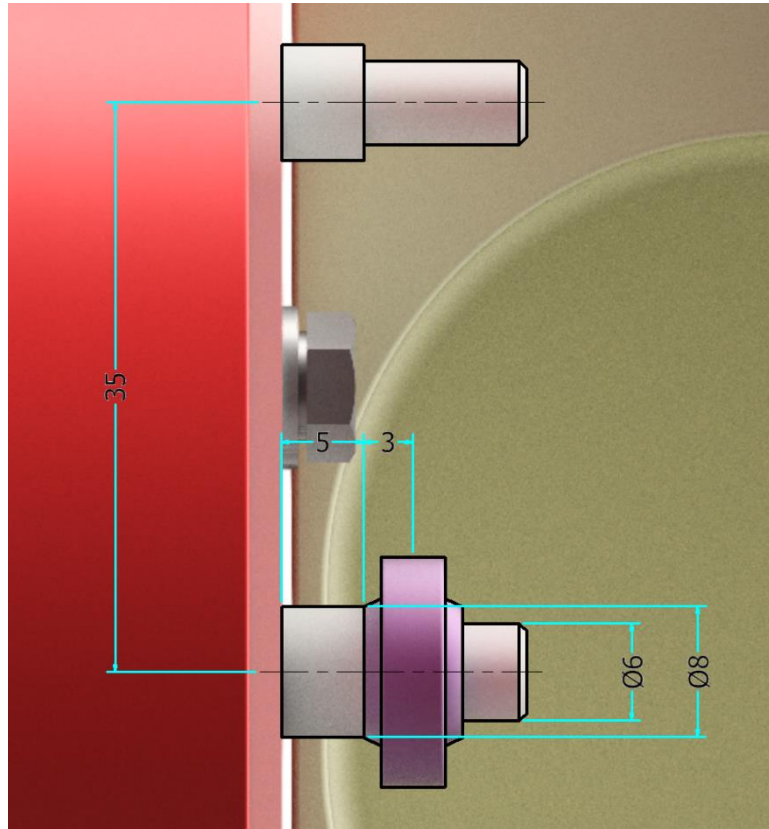
$$M_{O1} = h * F_{celk} * k = 0,008 * 2650,04 * 1,5 = 31,8 \text{ Nm}$$

$$M_{O2} = 0,005 * 2650,04 * 1,5 = 11,93 \text{ Nm}$$

Působící napětí:

$$\sigma_1 = \frac{M_{O1}}{\frac{\pi * d_1^3}{32}} = \frac{31,8}{\frac{\pi * 0,008^3}{32}} = 617,84 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{M_{O2}}{\frac{\pi * d_2^3}{32}} = \frac{11,93}{\frac{\pi * 0,006^3}{32}} = 549,19 \text{ MPa}$$



Obrázek 4.3-8 - Rozměry čepu pro zavěšení

A následně stříhová napětí násobeny koeficientem pro závěsy:

$$\tau_1 = \frac{F_{celk} * k}{\frac{\pi * D_1^2}{4}} = \frac{2650,04 * 1,5}{\frac{\pi * 8^2}{4}} = 79,08 \text{ MPa}$$

$$\tau_2 = \frac{F_{celk} * k}{\frac{\pi * D_2^2}{4}} = \frac{2650,04 * 1,5}{\frac{\pi * 6^2}{4}} = 140,59 \text{ MPa}$$

Pro porovnání a určení koeficientu bezpečnosti budeme počítat σ_{red} metodou HMH, a tedy s koeficientem materiálu $\alpha = \sqrt{3}$.

$$\sigma_{red1} = \sqrt{\sigma_1^2 + (\alpha * \tau_1)^2} = \sqrt{617,84^2 + (\sqrt{3} * 79,08)^2} = 661,83 \text{ MPa}$$

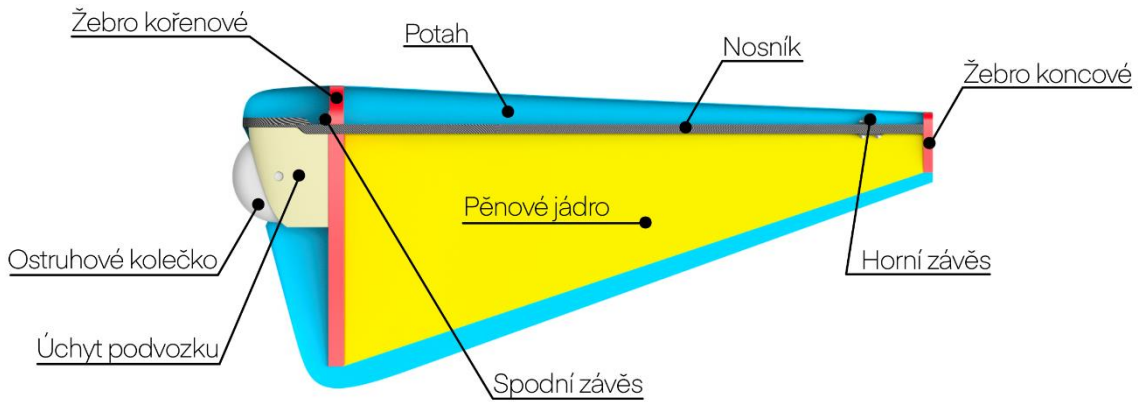
$$\sigma_{red2} = \sqrt{\sigma_2^2 + (\alpha * \tau_2)^2} = \sqrt{549,19^2 + (\sqrt{3} * 140,59)^2} = 692,47 \text{ MPa}$$

Porovnáním maximální hodnoty $\sigma_{red_{max}} = 632,84$ proti pevnosti ocelového materiálu vychází koeficient bezpečnosti.

$$k = \frac{\sigma_D}{\sigma_{red_{max}}} = \frac{880}{632,84} = 1,47$$

5. Předběžný návrh konstrukce

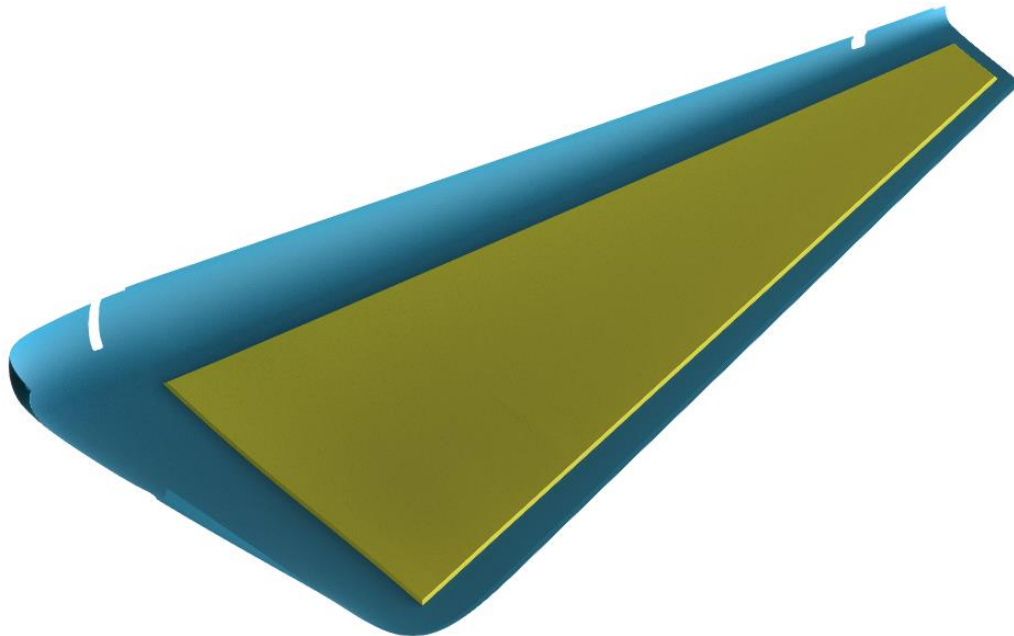
V této kapitole budou vyobrazena veškerá konstrukční řešení všech hlavních dílů směrového kormidla.



Obrázek 5-1 – Rozbor dílů směrového kormidla

5.1. Potah

Potah je navržen z vícesměrného prepregu o tloušťce jedné vrstvy 0,2 mm. Tyto vrstvy jsou dvě. Potah je rozdělen na dvě části, které se k sobě v přední části slepí pomocí zámků a v zadní části se styčné plochy slepí k sobě do šípu. Jelikož stabilita potahu nevyhověla, bylo nutné přidat pěnové jádro, které má tloušťku 3 mm.



Obrázek 5-2 – Část potahu s naznačeným pěnovým jádrem

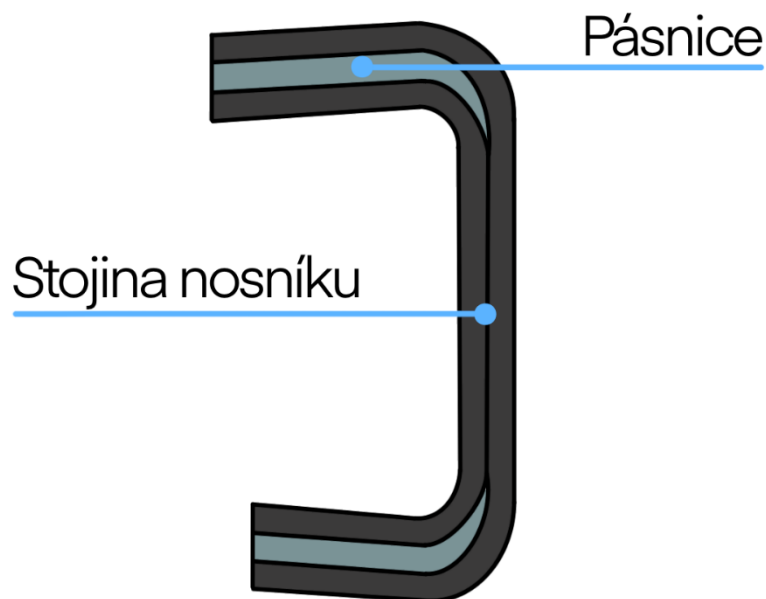
5.2. Nosník

Nosník, který je tvořen pásnicemi a stojinou, je umístěn 20 mm za osou otáčení z důvodu polohy závěsů v ose otáčení a zároveň odkloněn u kořenové části z důvodu polohy ostruhového podvozku. Pásnice nosníku jsou tvořené jednosměrnou prepreg tkaninou. Jedna vrstva jednosměrné tkaniny má tloušťku 0,13 mm, pro potřeby pásnice byla použita pouze jedna vrstva. Stojina nosníku je tvořena vícesměrnou prepreg tkaninou dvojí vrstvy o tloušťce jedné vrstvy 0,2 mm. Tvar nosníku je typ „C“ směrem k náběhové hraně kormidla. Díry v horní části nosníku slouží k uchycení horního závěšení, kde v místě uchycení, je zalaminované jádro z březové překližky mezi vrstvami nosníku.



Obrázek 5-3 - Nosník směrového kormidla

Jelikož stojina a pásnice nosníku jsou každé z jiného materiálu, je nutné vyřešit spoj, mezi těmito materiály. Pásnice nosníku se tak vloží mezi dvě vrstvy stojiny, tak jak je znázorněno na obrázku níže.



Obrázek 5-4 - Rozložení prvků v řezu nosníku

5.3. Žebra

Ve směrovém kormidle se nacházejí dvě žebra, žebro kořenové a koncové. Jsou navržena ze stejné tkaniny jako stojina nosníku o dvou vrstvách.

5.3.1. Žebro koncové

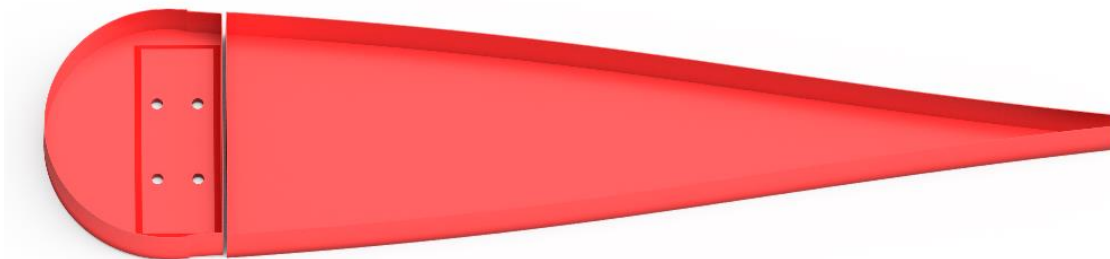
Koncové žebro směrového kormidla slouží jako zakončení a kryt kormidla a zároveň jako pevnostní spoj mezi díly potahu pro lepidlo.



Obrázek 5-5 - Koncové žebro

5.3.2. Žebro kořenové

Kořenové žebro slouží obdobně jako koncové k přilepení potahu. Toto žebro je však rozdělené do dvou částí z důvodu procházejícího nosníku, kde k přední části kořenového žebra je uchycen dolní závěs kormidla s čepy pro řízení a zavěšení. V místě pro šroubové spojení žebra se závěsem je obdobně jako u nosníku mezi vrstvami žebra zalaminované jádro z březové překližky.

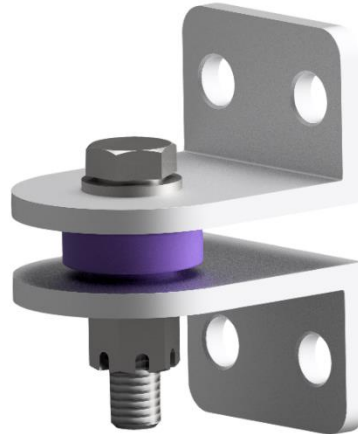


Obrázek 5-6 - Přední a zadní část kořenového žebra s březovou překližkou

5.4. Zavěšení

5.4.1. Horní zavěšení

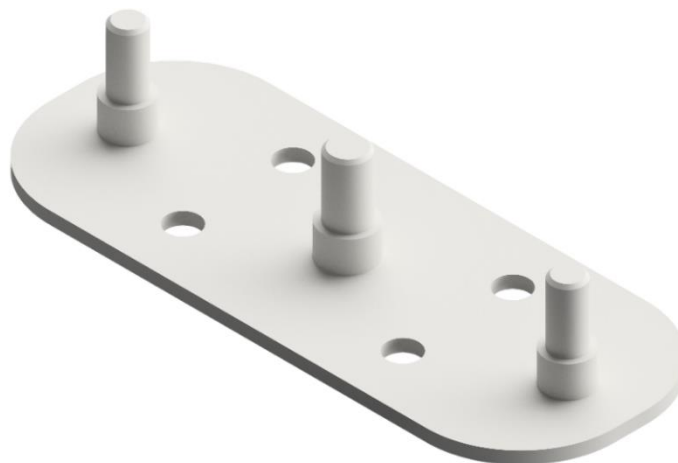
Pro potřeby horního zavěšení byl zvolen duralový L profil s rozměry 30X17,5X2,5 mm. Profil je zde umístěn dvakrát a dírou v L profilu je veden ONL šroub na kterém je ložisko GE 5 E SKF, které je umístěno mezi L profily. ONL šroub je zajištěn korunovou maticí. Celé zavěšení je pak uchyceno šroubovým spojením s nosníkem v místě, kde je zalaminována březová překližka. Z důvodu následné nepřístupnosti místa po slepení potahu, je pro zajištění šroubů volena samojistná matice DIN 985.



Obrázek 5-7 - Konstrukce horního zavěšení

5.4.2. Spodní zavěšení

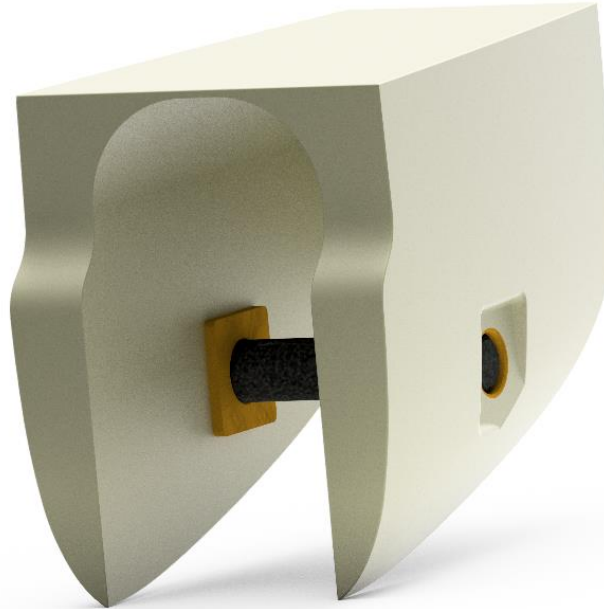
Spodní závěs je vyroben z konstrukční oceli ČSN 15130. Závěs obsahuje dva čepy na uchycení řízení vzdálené od osy otáčení 35 mm. Na středový závěsový čep je umístěno ložisko GE 6 E SKF. Závěs je přichycen ke kořenovému žebru šroubovým spojením v přední části, kde je místo vyztuženo zalaminovanou březovou překližkou. Stejně jako v případě horního závěsu jsou zde použity samojistná matice.



Obrázek 5-8 - Konstrukce spodního zavěšení

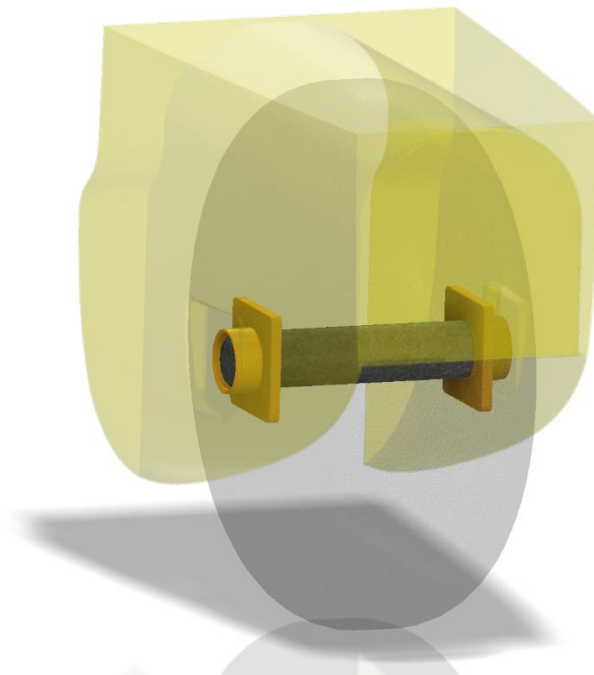
5.5. Uchycení ostruhového podvozku

V rámci této práce bylo řešeno i připojení ostruhového podvozku, kde pro potřeby podvozku, byla navržnuta dutinová skořepina s otvory pro vložku na čep, na kterém bude umístěno ložisko a následně ostruhové kolečko.



Obrázek 5-9 - Skořepinová dutina ostruhového podvozku

Dutina je navržnuta z vícesměrného prepreg materiálu o dvou vrstvách obdobně jako například stojina či žebra směrového kormidla. Tato dutina bude přilepena zepředu k nosníku kormidla, z boků k potahu a z horní části ke kořenovému žebru.



Obrázek 5-10 - Detail vložky s čepem

6. Hmotový rozbor

Pro 3D model byl vytvořen hmotový rozbor, který spočívá v určení hmotnosti a nalezení těžišť všech dílčích částí směrového kormidla od potahu přes šrouby až po lepidlo, kterým je spojena většina konstrukčních prvků. Z těchto hodnot je možné, zároveň určit nejen celkovou hmotnost, ale i těžiště celého směrového kormidla.

Hodnoty hmotnosti získáme znalostí hustoty použitých materiálů a rozměrů z programu Autodesk Inventor 2020. Ze stejného programu určíme i polohy těžišť vůči absolutnímu souřadnicovému systému letadla.

Hustoty použitých materiálů

Vícesměrná uhlíková pre-impregovaná tkanina $\rho_{vsp} = 1600 \frac{kg}{m^3}$

Jednosměrná uhlíková pre-impregovaná tkanina $\rho_{jsp} = 1269 \frac{kg}{m^3}$

Dural $\rho_d = 2870 \frac{kg}{m^3}$

Ocel $\rho_o = 7850 \frac{kg}{m^3}$

Pěnové jádro $\rho_{pj} = 50 \frac{kg}{m^3}$

Lepidlo Heisol 9394 $\rho_l = 1360 \frac{kg}{m^3}$

Březové dřevo $\rho_l = 480 \frac{kg}{m^3}$

Výpočty hmotnosti jsou provedeny dle znalosti hustoty a objemu materiálu dle vzorce:

$$m_i = \rho * V$$

6.1. Tabulka hodnot

Zde jsou uvedeny všechny dílčí hmotnosti a polohy těžišť k určení celkového těžiště směrového kormidla a celkové váhy. Všechny hodnoty získány z přiloženého CAD modelu.

-	x[mm]	y[mm]	z[mm]	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$V[mm^3]$	$m[g]$
Potah	5882,046	2258,9575	0	1600	313752,41	502
Nosník	5775,644	2295,378	0	1600	36797,27	58.89
Pásnice	5768,144	2295,378	0	815	4633,26	3,78
Žebro kořenové – přední dutina	5753,508	1934,426	0	1600	19725,48	31.56
Žebro kořenové – zadní dutina	5969,3065	1934,426	0	1600	17645,4	28.23
Žebro koncové	5786,362	2918,262	0	1600	1858,02	2.97
Spodní závěs	5757,514	1928,35	0	7850	6949,32	54.55
Horní závěs – horní	5766,999	2827,487	0	2870	2498,28	7,17
Horní závěs – dolní	5766,999	2813,513	0	2870	2498,28	7,17
Dutina ostruh. podvozku	5842,623	1881,993	0	1600	38642,32	61.83
Pěnové jádro	5908,331	2317,182	0	50	1273869,62	63,69
Překližka stojiny	5779,284	2822,205	0	480	3080,35	1,48
Překližka žebra	5757,514	1932,400	0	480	9087	4,36
Kolečko	5847,927	1846,5	0	-	-	1249

Tabulka 6.1 – Hmotnostní rozbor a polohy těžišť

Plošná hustota byla přepočítána na objemovou dle vztahu:

$$\rho = \frac{\rho_s}{t}$$

Kde ρ_s je plošná hustota a t je tloušťka tkaniny.

Přepočet pro vícesměrnou tkaninu:

$$\rho = \frac{320}{0,2} = 1600 \frac{kg}{m^3}$$

A respektive pro jednosměrnou tkaninu:

$$\rho = \frac{163}{0,2} = 815 \frac{kg}{m^3}$$

Celková hmotnost se určí součtem všech dílčích hmotností, připočtením spojovacích prvků včetně šroubů a čepů a lepidla použitého na lepené spoje. Tyto výpočty a údaje jsou uvedeny v příloze

$$m_{celk} = 2473,92 \text{ gramů}$$

Závěr

V rámci bakalářské práce byl proveden rozbor současného stavu konstrukce směrových kormidel. Obsahem práce jsou zároveň výpočty zatížení, které byly provedeny v souladu s předpisem UL-2. V této kapitole byl zjištěn průběh krouťícího a ohybového momentu. Dále dle výsledků zatížení bylo provedeno předběžné dimenzování konstrukčních částí kormidla, kde byla volena dvoudutinová konstrukce oddělená nosníkem. Od toho se také odvíjí různé výpočty v kapitole dimenzování. Pro většinu lepených ploch, a to včetně pásnic, i přes vyhovující menší rozměr šířky, bylo voleno minimálně 15 milimetrů šířky styčné plochy. Dále byl dimenzován potah, kde byly počítány hodnoty smykového napětí, které byly porovnávány s hodnotou početních smykových napětí pro vyjádření jistot. Potah byl následně kontrolován na ztrátu stability, kde pro nevyhovující výsledek bylo přistoupeno k použití pěnového jádra o tloušťce 3 mm. U stojiny nosníku dle předpokladů stabilita vyhověla. Po přidání pěnového jádra byla spočítána jistota potahu a stojiny nosníku s velmi uspokojivým výsledkem. Na závěr kapitoly dimenzování byla provedena kontrola horního a spodního závěsu kormidla, kde oba závěsy vyhověly s dostatečnou jistotou. V případě čepů pro řízení kontrola provedena nebyla, jelikož čepy mají stejný rozměr jako závěsný čep a působí na ně tudíž pouze síla od řízení, která je menší. Můžeme tak určit, že čepy pro uchycení řízení vyhovují. Následně v kapitole předběžného konstrukčního návrhu jsou vyobrazeny konstrukční prvky tvořící směrové kormidlo s krátkým komentářem, odůvodňujícím určitá konstrukční řešení a výběr materiálu. Tyto obrázky byly vyhotoveny v programu Autodesk Inventor 2020, kde byl zároveň vyhotoven 3D CAD model směrového kormidla, dle výsledných parametrů určených v kapitole dimenzování. V závěrečné části práce byl vyhotoven hmotový rozbor, kde je uvedena poloha těžiště jednotlivých dílů včetně objemu dílu a hustoty daného materiálu, z čehož byla nakonec určena hmotnost jednotlivých dílů. Tyto hodnoty byly zjištěny z modelu z programu Inventor. Z hmotnosti jednotlivých dílů byla po započtení lepidla, šroubových spojů, ložisek a ostruhového kolečka určena celková hmotnost směrového kormidla.

V rámci této práce nebyla provedena pevnostní analýza skořepinové dutiny pro ostruhový podvozek, v rámci jiné bakalářské práce by tak mohla být provedena MKP analýza uložení ostruhového kolečka pro dané směrové kormidlo. Dále jako návrh dalšího tématu vycházející z této práce by se mohlo jednat o náhon kormidla, který v této práci nebyl řešen, nicméně byly v CAD modelu vyhotoveny rozměry čepů pro ložiska řízení. Dále jako poslední navrhované téma by se mohlo jednat o vyhotovení forem a popsání přesné technologie výroby všech součástí směrového kormidla.

Zdroje

- [1] Ing. Mikula, Jan. *Konstrukce a projektování letadel II.*, Praha 6, ČVUT, 2005, ISBN 80-01-03338-4
- [2] Šulženko, M. N. *Konstrukce letadel*. Praha, SNT literatury, 1954. DT 629.13
- [3] Slavík, Svatomír. *Stavba letadel*. Praha: ČVUT, 1997.
- [4] Funke, Herbert. *Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges*. Paderborn: Laboratorium für Konstruktionslehre [online] 2001 [citace 03.08.2020] Dostupné z: https://www.rg.de/w/imagenes/9/99/Dissertation_von_Herbert_Funke.pdf
- [5] *Letecká amatérská asociace ČR. UL2 – I. část*. [Online] znění 2019 [citace 04.08.2020] Dostupné z: http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL%202%20%C4%8D%C3%A1st%20I_26.3.2019.pdf
- [6] Valenta, Jakub. *Koncepční návrh rychlostního letounu* [online] Praha, ČVUT, 2019 Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84757>
- [7] Valenta Jakub. *Návrh vztlakové klapky malého sportovního letounu* [online] Praha ČVUT 2017 Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73137>
- [8] Široký Richard. *Návrh říditelné ostruhy pro sportovní letoun* [online] Praha ČVUT 2019 Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84900>