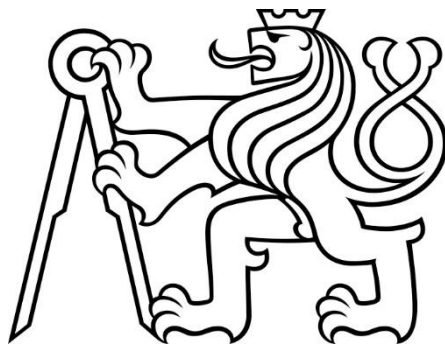


**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2020

**LUKÁŠ
HOFRICHTER**



**FAKULTA
ŠTROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Návrh výškového kormidla rychlostního
letounu**

Design of elevator for racing airplane

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Lukáš HOFRICHTER

Studijní program: B2341 STROJÍRENSTVÍ

Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem

Vedoucí práce: Ing. Jiří Brabec Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hofrichter** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **470020**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh výškového kormidla rychlostního letounu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of elevator for racing airplane

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

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

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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


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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce:


Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis 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 s názvem: „Návrh výškového kormidla rychlostního letounu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Brabce Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Brabcovi Ph.D za odborné vedení, pomoc a rady, které mi pomohly tuto bakalářskou práci zkompletovat. Mé poděkování patří též mé velké rodině, za neutuchající podporu.

Anotační list

Jméno autora: Lukáš HOFRICHTER

Název bakalářské práce: Návrh výškového kormidla rychlostního letounu

Anglický název: Design of elevator for racing airplane

Rok vyhotovení: 2020

Studijní program: B2341 Strojírenství

Obor studia: 3901R051 Konstruování podporované počítačem

Universita: České vysoké učení technické v Praze – fakulta strojní

Ústav: Ústav letadlové techniky

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

Bibliografické údaje:	počet stran	53
	počet obrázků	26
	počet tabulek	11
	počet příloh	2

Klíčová slova: Výškové kormidlo, rychlostní letoun, UL 2, stabilita, hmotnost, zatížení

Keywords: elevator, racing airplane, UL 2, stability, weight, load

Anotace:

Úkolem této bakalářské práce je navrhnout výškové kormidlo pro rychlostní letoun. Na začátku práce se nachází seznámení s různými způsoby ovládání a udržování stability s následným popisem nosných prvků pro výškové kormidlo. Dále práce obsahuje materiály vhodné pro konstrukci výškového kormidla. Po určení zatížení následuje dimenzování nosníku a potahu s kontrolou. Práce je zakončena hmotovým rozbořem a kontrolou šroubů.

Abstract:

The task of this bachelor's thesis is to design an elevator for a racing airplane. At the beginning of the work, there is an introduction to various methods of control and upkeep of stability with a subsequent description of the load-bearing elements for the elevator. Furthermore, the work contains materials suitable for the construction of the elevator. After determining the load, the beam and the cover are dimensioned with control calculations. The work ends with a mass analysis and control calculations of screws.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů.....	1
1 Úvod	4
2 Popis současného stavu	5
2.1 Druhy řízení	5
2.2 Ocasní plochy	6
2.2.1 Rozdělení VOP dle uspořádání	6
2.3 Nosné prvky konstrukce VOP	7
2.3.1 Podélný systém	7
2.3.2 Příčný systém	7
2.3.3 Potahy	8
2.4 Výškové kormidlo	8
2.5 Závěsy výškového kormidla	8
2.6 Materiály používané při konstrukci VOP pro UL.....	9
2.6.1 Sendvičový materiál	9
2.6.2 Kompozit	10
2.6.3 Kovové materiály	12
2.6.3.1 Ocel	12
2.6.3.2 Hliníkové slitiny	12
3 Stanovení zatížení.....	14
3.1 Požadavky předpisu.....	14
3.1.1 Součinitel bezpečnosti	14
3.1.2 Zatížení působící na VOP	15
3.2 Výpočet zatížení	17
4 Návrh konstrukce	23
4.1 Nosník.....	23

4.2	Žebra	24
4.3	Potah	25
4.4	Závěsy.....	26
5	Předběžné dimenzování.....	27
5.1	Dimenzování a kontrola pásnic nosníku na ohyb	27
5.1.1	Dimenzování pásnic nosníku	28
5.1.2	Kontrola pásnic po délce nosníku	29
5.2	Dimenzování stojiny a potahu	30
5.2.1	Výpočet smykového namáhání	31
5.2.2	Kontrola stability potahu.....	35
5.2.3	Kontrola stability stojiny nosníku	36
6	Hmotový rozbor prvků.....	37
6.1	Hustota materiálu	37
6.2	Určení hmotností a těžišť	38
7	Kontrola šroubového spoje.....	39
7.1	Vnější závěs	39
7.2	Vnitřní závěs	40
7.3	Páka ovládání	41
8	Závěr	42
9	Reference	43
	Seznam obrázků	45
	Seznam grafů	46
	Seznam tabulek.....	46
	Seznam příloh	46

Seznam zkratek a symbolů

b	[mm]	Hloubka úzké strany desky namáhané na smyk
b_{0H}	[m]	Hloubka VOP pro kořenový řez
b_1	[m]	Hloubka stabilizátoru VOP
b_2	[m]	Hloubka od náběžné hrany VK po osu otáčení
b_3	[m]	Hloubka VK od osy otáčení po odtokovou hranu
b_{KH}	[m]	Hloubka VOP pro koncový řez
b_p	[mm]	Hloubka pásnice nosníku
b_p návrh	[mm]	Navrhnutá hloubka pásnice nosníku
$d_{dířku}$	[mm]	Průměr dířku šroubu
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
e_x	[mm]	Vzdálenost okrajového vlákna od neutrální osy
f	[–]	Součinitel bezpečnosti
f_p	[–]	Bezpečnost vůči pevnosti ve smyku
f_u	[–]	Doplňkový součinitel bezpečnost
G_1	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku první dutiny
G_2	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku druhé dutiny
G_s	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku stojiny dutiny
h_{sk}	[mm]	Výška střednice stojiny nosníku
J_{Zn}	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu k ose z_n
K_s	[–]	Součinitel vzpěru
l_{TC}	[m]	Rameno síly nahrazující spojité zatížení
l_{VK}	[m]	Délka pravého VK
l_{Z1}	[m]	Vzdálenost prvního závěsu od roviny symetrie letadla
l_{Z2}	[m]	Vzdálenost druhého závěsu od roviny symetrie letadla
M_1	[Nm]	Moment působící v první dutině
M_2	[Nm]	Moment působící v druhé dutině
m_{celkem}	[g]	Celková hmotnost pravého výškového kormidla
M_K	[Nm]	Kroutící moment působící v ose otáčení
$M_{kE.O.}$	[Nmm]	Kroutící moment působící v elastické ose
$m_{lepidla}$	[g]	Hmotnost lepidla
M_o	[Nm]	Ohybový moment
$M_{o max}$	[Nmm]	Maximální ohybový moment
M_{TOM}	[kg]	Maximální vzletová hmotnost

q_1	[N/mm]	Smykový tok v přední dutině
q_2	[N/mm]	Smykový tok v zadní dutině
q_s	[N/mm]	Smykový tok ve stojině nosníku
q_{sc}	[N/mm]	Celkový smykový tok
q_{stab}	[N/m]	Spojité zatížení na stabilizátoru
q_{VK}	[N/m]	Spojité zatížení na výškovém kormidle
$q_{VK(0)}$	[N/m]	Spojité zatížení na výškovém kormidle u kořene
$q_{VK(1)}$	[N/m]	Spojité zatížení na výškovém kormidle na volném konci
$r(z)$	[m]	Rameno působíště spojitěho zatížení k ose otáčení
r_1	[mm]	Rozteč závěsu
r_2	[mm]	Tloušťka závěsu
r_3	[mm]	Rameno od osy otáčení do ložiska v páce
r_4	[mm]	Tloušťka závěsu ze stabilizátoru
r_5	[mm]	Vzdálenost od závěsu ze stabilizátoru do poloviny závěsu na Výškovém kormidle
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
S	[m ²]	Plocha křídla
s_1	[mm]	Délka střednice přední dutiny
s_2	[mm]	Délka střednice zadní dutiny
S_ξ	[mm ²]	Střižná plocha lícovaného šroubu
SOP		Svislá ocasní plocha
T^*, T^{**}	[N]	Síly rovny síle T
t_1	[mm]	Tloušťka potahu přední dutiny
t_{1V}	[mm]	Tloušťka jedné vrstvy potahu
t_2	[mm]	Tloušťka potahu zadní dutiny
T_C	[N]	Síla nahrazující spojitě zatížení
t_p	[mm]	Tloušťka pásnice
t_s	[–]	Tloušťka stojiny nosníku
T_t	[N]	Síla z táhla
T_{VK}	[N]	Posouvající síla
T_{Z1}	[N]	Reakce kořenového závěsu
T_{Z2}	[N]	Reakce vnějšího závěsu
T', T''	[–]	Síly rovny síle T
U_1	[mm ²]	Plocha přední dutiny
U_2	[mm ²]	Plocha zadní dutiny
UL		Ultra rychlí letoun

VOP		Vodorovná ocasní plocha
W	[Pa]	Měrné zatížení plochy
$W^=$	[Pa]	Průměrné provozní zatížení plochy
W_o	[mm ³]	Modul průřezu
x_a	[m]	Souřadnice v absolutní souřadnicovém systému v náběžné hraně stabilizátoru u trupu
y_a	[m]	Souřadnice v absolutní souřadnicovém systému v náběžné hraně stabilizátoru u trupu
z_a	[m]	Souřadnice v absolutní souřadnicovém systému v náběžné hraně stabilizátoru u trupu
z_p	[mm]	Vzdálenost mezi osou otáčení a stojinou
$z_{e. o.}$	[mm]	Vzdálenost elastické osy od stojiny
k	[–]	Faktor zvýšení tuhosti
r_{Sjs}	[g/m ²]	Plošná hustota jednosměrného prepregu
r_{SVs}	[g/m ²]	Plošná hustota vícesměrného prepregu
r_{Vl}	[g/m ³]	Objemová hustota lepidla
r_{Vvs}	[kg/m ³]	Objemová hustota vícesměrného prepregu
σ_D	[MPa]	Dovolené ohybové napětí
σ_{Dd}	[MPa]	Dovolené ohybové napětí v tlaku
σ_{Dt}	[MPa]	Dovolené ohybové napětí v tahu
σ_o	[MPa]	Ohybové napětí
σ_{Pd}	[MPa]	Pevnost kompozitu v tlaku
σ_{Pt}	[MPa]	Pevnost kompozitu v tahu
σ_{red}	[MPa]	Redukované napětí
τ_{PS}	[MPa]	Pevnost kompozitu ve smyku
t	[MPa]	Smykové napětí
t_K	[MPa]	Kritické smykové napětí
t_p	[MPa]	Početní smykové napětí
t_s	[MPa]	Smykové střižné napětí
t_{sk}	[MPa]	Kritické smykové napětí ve stojině
θ_1	[1/m]	Zkrut přední dutiny
θ_2	[1/m]	Zkrut přední dutiny

1 Úvod

V této bakalářské práci se řeší problematika výškového kormidla ultralehkého letounu, který byl navržen pro překonání světových rychlostních rekordů, jenž udává Mezinárodní letecká federace FAI.

V druhé kapitole se nachází popis prvků řízení a ovládání stability s podrobnějším zaměřením na vodorovné ocasní plochy a jejich dělení. Pro návrh konstrukce je dále potřebné popsat si nosné prvky, jako jsou nosníky, žebra a potahy. Dále pro konstrukci je důležitá volba materiálu, tudíž byly zvoleny a popsány nejčastější typy moderních materiálů v letectví.

V další kapitole se práce věnuje popsání požadavků předpisu UL2 pro vodorovné ocasní plochy a stanovení zatížení a průběhů ohybových a kroutících momentů.

Následně je nastíněn způsob výroby komponentů a řešení návrhu konstrukce komponentů včetně zvolených materiálů a orientace vláken kompozitu.

Dále proběhne dimenzování pásnic a stojin nosníku s následnou kontrolou stojin a potahu na ztrátu stability, ve které je porovnáváno početní smykové napětí s kritickým napětím.

Pro zpřesnění výpočtů, které navrhl pan Ing. Jakub Valenta v jeho diplomové práci [9] byl vyhotoven hmotový rozbor, včetně určení polohy těžišť z důvodu správného rozložení hmotností.

Závěsy, včetně páky náhonu, budou spojeny s protikusem pevnostním lícovaným šroubem, který je potřebné kontrolovat na stříh a ohyb. Tato kontrola probíhá porovnáním redukovaného napětí s mezí pevnosti.

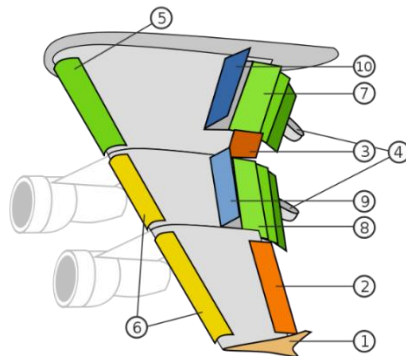
2 Popis současného stavu

2.1 Druhy řízení

Bude-li na samotné křídlo působit například kladný poryv, tak se křídlo naklopí náběžnou hranou vzhůru na záda. Abychom tomu zamezili a zajistili podélný rovnovážný stav, je na konec trupu umístěna vodorovná ocasní plocha, která vybudí opačný klopivý moment pomocí vztlakové síly.

Schopnost provést ostatní manévry nám umožňují aerodynamické síly, které vyvozují prvky jsou svislé ocasní plochy, křídélka a speciální ústrojí. Každý z prvků udržuje jinou stabilitu viz následující tabulka [2;7]:

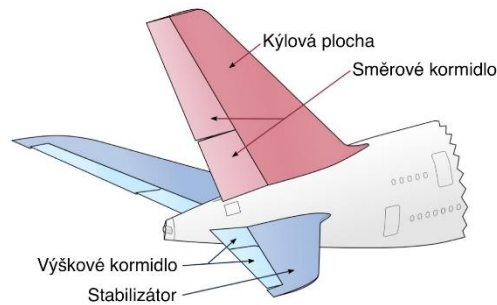
- Řídící plochy na křídle
 - Křídélka
 - Zajišťují příčnou ovladatelnost
 - Speciální ústrojí
 - Obsahují spoilery, sloty a klapky
 - Zajišťují příčnou stabilitu a ovladatelnost [7]



Obr. 1.: Křídlo dopravního letounu kde: 1.winglet, 2.křídélko, 3.vysokorychlostní křídélko, 4.gondola, 5.vnitřní slot, 6.vnější slot, 7.vnitřní vztlaková klapka, 8.vnější vztlaková klapka, 9.spoiler [6]

- Ocasní plochy
 - Vodorovné ocasní plochy (VOP)
 - Obsahují stabilizátor a výškové kormidlo
 - Zajišťují podélnou stabilitu a ovladatelnost

- Svislé ocasní plochy
 - Obsahují Kýl a směrové kormidlo
 - Zajišťují směrovou stabilitu a ovladatelnost [7]



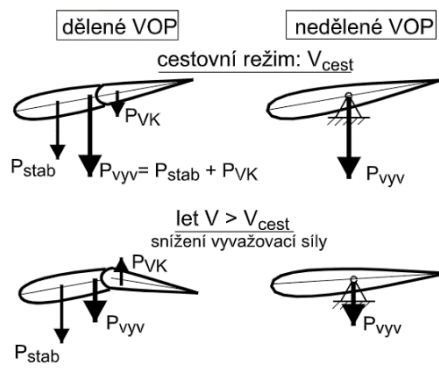
Obr. 2.: Ocasní plochy dopravního letadla [6]

2.2 Ocasní plochy

Ocasní plochy umísťujeme na konec trupu a slouží k zajištění podélné a směrové statické stability letounu. Dělíme je na vodorovné (VOP) a svislé (SOP). Vlastnosti letu hlavně ovlivňuje výšková poloha VOP. Jsou-li VOP umístěny pod SOP, tak je důležitá i jejich poloha ve směru letu. [8]

2.2.1 Rozdělení VOP dle uspořádání

Vodorovné ocasní plochy většinou zaujímají obdélníkový, lichoběžníkový nebo trojúhelníkový půdorys. VOP se dále dělí dle způsobu uchycení ke trupu na dělené a nedělené.



Obr. 3.: Rozdělení VOP [8]

Dělené uspořádání se skládá z pevného a většinou průběžného stabilizátoru a pohyblivého výškového kormidla. Další varianta představuje nastavitelný stabilizátor a výškové kormidlo, ale tato varianta je spíše používána u dopravních letadel.

Nedělené uspořádání je jednotný, plynule nastavitelný stabilizátor bez výškového kormidla. Hlavní výhodou je jednodušší konstrukce, která umožňuje pevnější otočné uchycení k trupu. [8]

2.3 Nosné prvky konstrukce VOP

2.3.1 Podélný systém

K přenosu ohybového momentu slouží podélný systém, do kterého patří nosníky, pomocné nosníky a podélníky.

Nosníky se skládají z pásnic a tenké stojiny. Stojiny přenáší smykový tok od posouvající síly. Pásnice přenášejí ohybový moment, který se rozkládá dle smyslu ohybového momentu na tahové a tlakové napětí. U tohoto typu systému je problém přizpůsobit nosník vnějšímu profilu z důvodu větší tloušťky pásnic, a tudíž menší tvárnosti. Tento problém u letounu s kovovým potahem lze obejít plechovou vložkou z tenčího plechu přivařenou na pásnici. U letounu z kompozitního materiálu, jako v našem případě, si skládáme pásnice do tvaru daného formou, tudíž nám tento problém odpadá.

Pomocné nosníky jsou používány pro zlepšení vyztužení a lepší přenos ohybového momentu. Konstrukce, ve které jsou pomocné nosníky používány, se nazývají poloskořepinové.

Podélníky jsou určeny pro přenos sil mezi potahem a žebrem. Konstrukci s tímto typem výztuhy nazýváme nosníková poloskořepina. [2;7]

2.3.2 Příčný systém

Pro udržení potahu a tvaru ocasní plochy se uplatňují žebra a obrysové výztuhy. U lehkých letadel se nejčastěji objevují žebra plnostěnná, která umísťujeme do míst největšího příčného zatížení, jako bývají například závěsy výškového kormidla. Tyto žebra obsahují otvory pro snížení hmotnosti a zároveň slouží k vedení ovládání výškového kormidla. [2;8]

2.3.3 Potahy

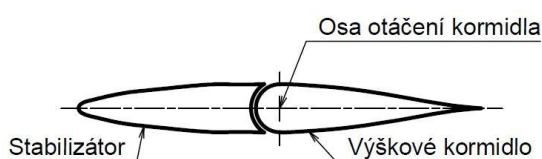
Potah vytváří vnější povrch potřebný pro zachycení vzdušného zatížení. Na aerodynamickém profilu se proto také projeví drsnost a nerovnost potahu. Nýtový otvor nejenže vytváří nerovnost potahu, ale zároveň i možnost tvorby únavové trhliny. Proto v dnešní době máme snahu, je-li to možné, se těmto spojům vyhnout a spíše jako v naše případě volit kompozitní konstrukci.

Potahy dělíme na nenosné (plátno, tkanina) a na nosné. Nosné potahy dále dělíme na:

- Vyztužené
 - Obsahují podélný, nebo příčný systém výztuhy
- Samonosné
 - Bez jakéhokoliv systému výztuhy udrží svůj tvar
 - Například ze sendvičového a monolitního materiálu [2;7;8]

2.4 Výškové kormidlo

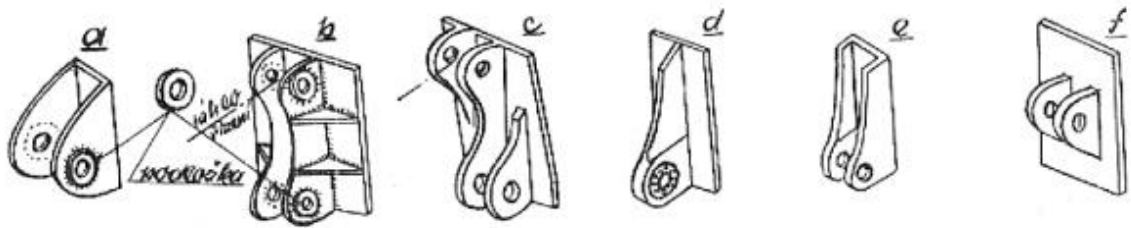
Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, výškové kormidlo slouží k zajištění říditelnosti a ovladatelnosti. Při vychýlení kormidla kolem osy otáčení vznikne přídavná aerodynamická síla, která zapříčiní změnu výšky letu. Svoji konstrukcí se hodně podobá konstrukci křídélka.



Obr. 4.: Výškové kormidlo

2.5 Závěsy výškového kormidla

Výškové kormidlo je ke stabilizátoru připevněno pomocí závěsného kování. Kování umožňuje rotaci kolem osy čepu. Čep je v ose zatížen osamělou silou. Spojení je prováděno šroubovým nebo nýtovým spojem. Na obrázku č. 5 můžeme vidět svařovaná kování (a, b) a kování odlévaná nebo kovaná (c, d, e, f). Kování (c, d) obsahují již páku sloužící k ovládání výškového kormidla.



Obr. 5.: Závěsné kování na výškovém kormidle [12]

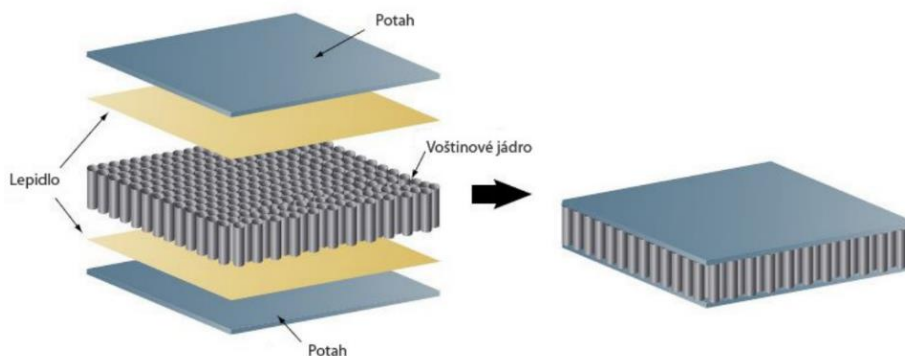
Další možností je frézované kování z lehkých slitin. Závěsná kování umístěná na stabilizátoru jsou obdobná a umísťují se buď na zesílenou konstrukci žeber, nebo na koncový (zadní) nosník stabilizátoru.

2.6 Materiály používané při konstrukci VOP pro UL

Na materiály použité pro ultralehké letouny jsou kladeny vysoké nároky, zejména na hmotnost, vysokou pevnost, odolnost proti opotřeбенí a tvarovou stálost. Na druhou stranu je nutno přihlížet i na finanční stránku výroby a materiálu jako takového.

2.6.1 Sendvičový materiál

Jde o vrstvenou konstrukci skládající se z dvou nosných potahů, které přenášejí tahové i tlakové síly a voštinového jádra, nebo pěny přenášející smykové síly mezi potahy, viz. obr. 1. Nejčastějšími kombinacemi v letectví jsou duralové nebo kompozitní potahy v kombinaci s hliníkovými voštinami. V našem případě při konstrukci ultralehkého



Obr. 6.: Sendvičová konstrukce [4]

letounu bychom spíše použili pěnu z důvodu lehčího zpracování, manipulaci a výrazně menším nákladům [8].

Výhody/Nevýhody sendvičové konstrukce

- | | |
|-------------------------------------|--|
| + Vysoká tuhost při nízké hmotnosti | – Složitá a nákladná výroba voštiny |
| + Dobrá tlaková a ohybová tuhost | – Kontrola spojení možná jedině nedestruktivními zkouškami |
| + Odolnost proti šíření trhlin | – Drahá výroba tvarově složitých kovových konstrukcí [8] |
| + Odolnosti při únavě | |
| + Tepelný a akustický izolátor | |

2.6.2 Kompozit

Kompozitem nazýváme materiál, který je složen z více oddělených fází. Jedná se o nehomogenní materiál skládající se z pojiva (matrice) a z výztuže. Pro výškové kormidlo je vhodné použít polymerní matrici na bázi pryskyřice vyztuženou uhlíkovým nebo skelným vláknem [2;8].

Mezi polymerní matrice na bázi pryskyřice řadíme:

- Epoxidové pryskyřice
 - Tepelná stálost až do 200 °C
 - Chemická odolnost
 - Nízké smrštění a vnitřní napětí i při nízkých teplotách a tlacích
 - Dobré mechanické vlastnosti [5]
- Fenolické pryskyřice
 - Tepelná odolnost do 250 °C (do 280 °C za sucha)
 - Nižší mechanické vlastnosti než u epoxidové pryskyřice (až na modul pružnosti v tahu/tlaku)
 - Cenově výhodná [8]

Výztuž přenáší zatížení a významně ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti. Výztuže vhodné pro VOP jsou následující:

- Skelné vlákno
 - Vyrábí se tažením z taveniny. Skelné vlákno má větší houževnatost než uhlíkové vlákno.
 - Typ E je nejlevnější typ s dobrými mechanickými vlastnostmi, odolností vůči vysokým teplotám a s chemickou stálostí.
 - Typ S je skelné vlákno s větším podílem oxidu křemíku a hliníku. Vyšší cenu zapříčiňuje vyšší teplota tavení. Používá se spíše pro konstrukci listů rotorů.
 - Typ H je duté skelné vlákno s nízkou měrnou hmotností. Vyznačuje se dobrou elasticitou a pevností v tlaku [9].

- Uhlíkové vlákno
 - Vysoká pevnost a modul pružnosti při nízké měrné hmotnosti
 - Je křehké
 - Výrobou odlišujeme grafitizovaná vlákna (HM-High Modulus) s vysokým modulem pružnosti v tahu/tlaku ale nižší pevností v tahu od karbonizovaných vláken (HS-High Strength), která mají vyšší pevnost v tahu a menší modul pružnosti v tahu/tlaku. Pro výškové kormidlo je vhodnější typ HM z důvodu namáhání potahu a stojin smykem, a tudíž i větší potřeby modulu pružnosti v tahu/tlaku u důvodu ztráty stability [8].

- Kevlarové (Aramidové) vlákno
 - Nejnižší měrná hmotnost s výztuží i při zachování dobrých hodnot pevnosti v tahu
 - Cenově nákladná varianta => využití v kombinaci s uhlíkovými vlákny
 - Nízká pevnost v tlaku
 - Odolné proti rázům [8]

Výhody/Nevýhody kompozitní konstrukce

- + Nízká měrná hmotnost
- + Výborné mechanické vlastnosti (závisí na orientaci a uspořádání vláken)
- + Vysoká mez únavy
- + Menší počet dílů => eliminace netěsností a spojujících součástí
- + Možnost použití jako potahu pro sendvičové konstrukce
- + Absolutní odolnost vůči korozi
- Často složitá a specifická výroba
- Kontrola výrobních vad možná jedině nedestruktivními zkouškami
- Složité výpočty tvarově složitých konstrukcí
- Obtížné opravy poškození [8]

2.6.3 Kovové materiály

2.6.3.1 Ocel

Oceli používané v letectví musí obsahovat co nejméně nečistot a splňovat přísnější speciální letecké normy. I přes velkou hmotnost je hojně používaná na silně namáhané díly jako jsou závěsy, podvozky a spojovací součásti i u letadel s kompozitní konstrukcí.

- AISI 4130
 - Dobrá obrobitelnost pomocí konvenčních metod
 - Vysoká pevnost v tahu (880-1 030) MPa
 - Dobrá svařitelnost bez potřeby speciálních metod
 - Po tepelném zpracování (kalení, žíhání s následným chlazením na vzduchu) pevnost až 1 240 MPa
 - Po tepelném zpracování se zhoršuje obrobitelnost [13,14]

2.6.3.2 Hliníkové slitiny

Hliníkové slitiny jsou nejpoužívanějším konstrukčním materiálem, a to zejména kvůli mechanickým vlastnostem a nízké měrné hmotnosti.

Dural je nejrozšířenější slitina hliníku, mědi, hořčíku a manganu. Jedná se nesvařitelnou slitinu, která vytvrzováním dosahuje dobré pevnosti. Označuje se 2xxx.

➤ 2024 T3

- T3 značí teplené zpracování, konkrétně rozpouštěcí žíhání + kalení + tvárění za studena + přirozené stárnutí
- Dobrá únavová odolnost a cenová dostupnost
- Vhodná pro konstrukci trupu, žeber, plechů

➤ 2026 T351

- T351 značí rozpouštěcí žíhání + kalení + uvolnění vnitřního napětí řízenou deformací a přirozené stárnutí
- Oproti 2024 vyniká větší odolností proti porušení, únavě a lepší obrobiteľností

Al-Zn-Mg se označuje 7xxx. Jedná se o nejpevnější hliníkovou slitinu s vysokou odolností proti korozi. Přidáním dalších přísadových prvků je možné i zamezit vznik trhlin při svařování.

➤ 7040 T76

- T76 značí rozpouštěcí žíhání + kalení + umělé přestárnutí
- Umělé přestárnutí pomáhá zlepšit odolnost proti vrstevnaté korozi
- Dosahuje vysoké pevnosti, houževnatosti, rozměrové stálosti i po obrábění bez potřeby rovnání
- Vhodné pro monolitní prvky jako jsou vzpěry, nosníky, žebra

➤ 7075 T6

- T6 značí rozpouštěcí žíhání + přirozené stárnutí + umělé stárnutí
- Pevnější o 80 až 130 MPa než slitina duralu 2024
- Pod velkým napětím je náchylná na korozi
- Vysoká cena je nepříznivá pro použití v ultralehkých letadlech, avšak je hojně používána
- Vhodné pro tenkostěnné díly [8;11].

3 Stanovení zatížení

3.1 Požadavky předpisu

Letoun bude uvolněn do provozu podle předpisu UL 2 z jara roku 2019. V kapitolách 3.1.1 a 3.1.2 si popíšeme podmínky a vztahy z kterých konstrukce vychází.

3.1.1 Součinitel bezpečnosti

Součinitel bezpečnosti f udává kolikrát je početní zatížení větší než provozní zatížení.

$$f = \frac{\text{početní zatížení}}{\text{provozní zatížení}} \quad (1)$$

Provozní zatížení je maximální zatížení, které se může při normálním provozu na konstrukci letounu vyskytnout bez trvalých deformací.

Početní zatížení musí být vždy větší než provozní zatížení, jelikož při něm vzniká nechtěné rozrušení konstrukce. Konstrukce letounu musí být schopna snášet toto zatížení minimálně po dobu 3 sekund.

Vyšší součinitel bezpečnosti značí spolehlivější konstrukci, ale zároveň i nadbytečnou hmotnost a cenu [7].

UL2 část I. dále udává:

- bezpečnostní součinitel f se rovná 1,5 není-li známa jiná hodnota
- Pro součásti vyrobené z kompozitu je součinitel roven 1,875 až 2,25. Skládá se z násobku vlivu vlhkosti (1,25) a teploty (1,2)
- Je nutné použít doplňkový součinitel pro části:
 - Vyrobené novou metodou, a tudíž s nejistými mechanickými vlastnostmi
 - S menší životností, než je potřeba (je očekávána ztráta pevnosti do doby výměny)
 - Uvedené v následující tabulce:

Tabulka č. 1: Doplnkový součinitel bezpečnosti [10]:

Aplikace	Doplnkový součinitel bezpečnosti	Výsledný součinitel bezpečnosti
Spoje rázově namáhané, s vůli nebo vibracemi	2	$f_u = 2 \times 1,5 = 3$
Závěsy kormidel	2,44	$f_u = 2,44 \times 1,5 = 6,67$
Ložiska v kloubech při řízení táhly	2,2	$f_u = 2,2 \times 1,5 = 3,3$
Ložiska v kloubech při řízení lany	1,33	$f_u = 1,33 \times 1,5 = 2$
Odlitky	2	$f_u = 2 \times 1,5 = 3$
Výklovky	1,15	$f_u = 1,15 \times 1,5 = 1,725$
Sedačky a bezpečnostní pásy sedaček	1,33	$f_u = 1,33 \times 1,5 = 2$

3.1.2 Zatížení působící na VOP

Paragraf UL2 [10] z roku 2019 rozeznává čtyři různá zatížení pro vodorovné ocasní plochy

a) Vyvažovací zatížení

Vyskytnou-li se náhlá zatížení v jakémkoliv bodě obálky při kladně i záporně zasunutých či vysunutých klapkách, musí být schopny vodorovné plochy zachovat rovnováhu při jakýchkoliv podmínkách [10].

b) Obratová zatížení

Zatížení vyvolána pilotem za konstantní rychlosti a poloze při očekávaném obratu při maximální, nebo třetinové maximální výchylce výškového kormidla [10].

c) Poryvová zatížení

Poryvová zatížení se počítají dle následujícího vztahu (2), který je převzat ze zdroje [10]:

$$P_{VOP} = p_0 + 0,5 \cdot \rho_0 \cdot a_{VOP} \cdot S_{VOP} \cdot U \cdot k_{VOP} \cdot V \cdot \left(1 - \frac{d\varepsilon}{d\alpha}\right) \quad (2)$$

P_{VOP} ... síla působící na vodorovnou ocasní plochu [N]

p_0 ... vyvažovací síla působící před poryvovým zatížením na vodorovnou ocasní plochu [N]

ρ_0 ... hustota vzduchu je brána při 0 m.n.m., kde je rovna 1,225 kg/m³

a_{VOP} ... sklon vztakové čáry vodorovných ocasních ploch [1/rad]

S_{VOP} ... plocha vodorovné ocasní plochy [m²]

U ... rychlost poryvu [m/s]

k_{VOP} ... můžeme použít ekvivalentní hodnotu jako u křídla, pokud není znám přesnější výpočet za našich podmínek

V ... rychlost letu [m/s]

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

d) Nesymetrická zatížení

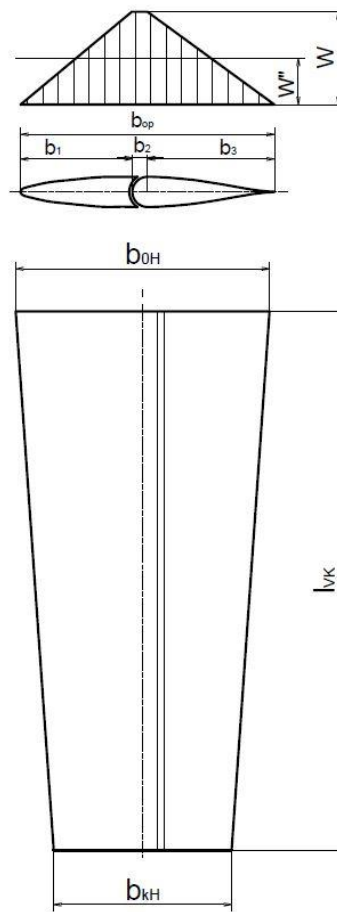
Pokud předpokládáme, že bude na vodorovné ocasní plochy působit velké zatížení z vrtulového proudu, je třeba tento typ zatížení vypočítat podrobněji. Pokud zatížení bude pouze klasické, tak budeme počítat se 100 % zatížením jedné poloviny VOP a se 70 % zatížením druhé poloviny. V tomto případě předpokládáme symetrické letové podmínky [10].

3.2 Výpočet zatížení

Použité hodnoty budou vycházet z diplomové práce [9]. Výškové kormidlo budeme počítat dle UL 2 část I [10] pro případ vychýlení kormidla – manévr.

Tabulka č. 2: Použité hodnoty pro výpočet zatížení

Maximální vzletová hmotnost	M_{TOM}	345 kg
Plocha křídla	S	5,029 m ²
Hloubka VOP pro koncový řez	b_{kH}	0,293 m
Hloubka VOP pro kořenový řez	b_{0H}	0,418 m
Hloubka stabilizátoru VOP pro kořenový řez	$b_1(0)$	0,184 m
Hloubka od náběžné hrany po osu otáčení VK pro kořenový řez	$b_2(0)$	0,025 m
Hloubka kormidla od osy otáčení po odtokovou hranu VK pro kořenový řez	$b_3(0)$	0,209 m
Délka výškového kormidla	l_{VK}	0,8885 m



Obr. 7.: Schéma výškového kormidla s používanými rozměry

Průměrná hodnota zatížení působící na VOP musí být větší než 525 Pa:

$$W^= = 220 + 20,5 \cdot \left(\frac{M_{\text{TOM}}}{S} \right) = 220 + 20,5 \cdot \left(\frac{345}{5,029} \right) = 1\,626,34 \text{ Pa} > 525 \text{ Pa} \quad (3)$$

Výpočet měrného zatížení pro koncový řez:

$$W = \frac{W^= \cdot b_{0H}}{\frac{1}{2} \cdot b_1 + b_2 + \frac{1}{2} \cdot b_3} = \frac{1\,626,343 \cdot 0,418}{\frac{1}{2} \cdot 0,184 + 0,025 + \frac{1}{2} \cdot 0,209} = 3\,069,126 \text{ Pa} \quad (4)$$



Graf č. 1: Velikost měrného zatížení na ploše vodorovných ocasních ploch

Výpočet spojitého zatížení:

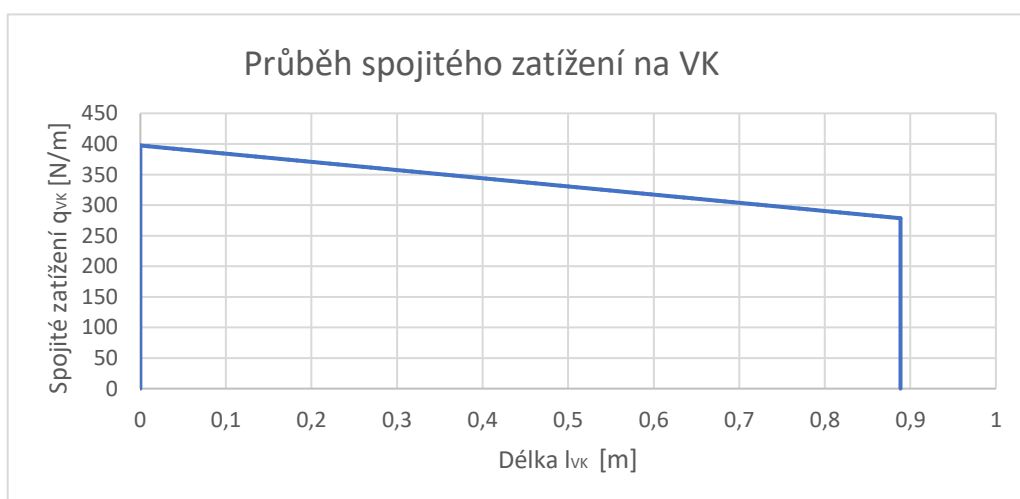
$$q(z) = W \cdot b(z) \quad (5)$$

Ukázkový výpočet spojitého zatížení na stabilizátoru pro koncový řez:

$$q_{\text{stab}} = W \cdot \frac{b_1}{2} = 3\,069,126 \cdot \frac{0,184}{2} = 282,360 \text{ N/m} \quad (6)$$

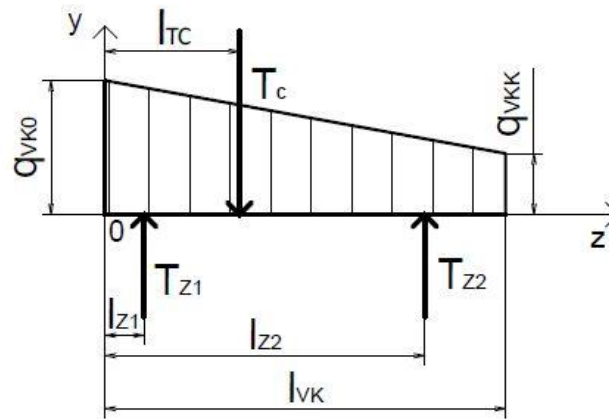
Ukázkový výpočet spojitého zatížení na výškovém kormidle pro koncový řez:

$$q_{\text{VK}} = W \cdot \left(b_2 + \frac{b_3}{2} \right) = 3\,069,126 \cdot \left(0,025 + \frac{0,209}{2} \right) = 397,452 \text{ N/m} \quad (7)$$



Graf č. 2: Průběh spojitého zatížení na výškovém kormidle

Výpočet reakci probíhá dle schématu v následujícím obrázku 8:



Obr. 8.: Schéma spojitého zatížení na výškovém kormidle s reakcemi v závěsech

$$\begin{aligned}
 T_C &= \frac{q_{VK(0)} - q_{VK(1)}}{2} \cdot l_{VK} + q_{VK(1)} \cdot l_{VK} = \\
 &= \frac{397,452 - 278,545}{2} \cdot 0,888\ 5 + 278,545 \cdot 0,888\ 5 = 300,312\ \text{N}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$T_C \cdot l_{TC} = \frac{q_{VK(0)} - q_{VK(1)}}{2} \cdot l_{VK} \cdot \frac{1}{3} \cdot l_{VK} + q_{VK(1)} \cdot l_{VK} \cdot \frac{1}{2} \cdot l_{VK} \Rightarrow \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 l_{TC} &= \frac{\frac{q_{VK(0)} - q_{VK(1)}}{6} \cdot l_{VK}^2 + \frac{q_{VK(1)}}{2} \cdot l_{VK}^2}{T_C} = \\
 &= \frac{\frac{397,452 - 278,545}{6} \cdot 0,888\ 5^2 + \frac{278,545}{2} \cdot 0,888\ 5^2}{300,312} = \\
 &= 0,418\ \text{m}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Reakce v závěsech určíme po úpravě ze silových (11) a momentových (12) rovnic rovnováhy vycházejících z Obr. 8.

$$\sum F_y: -T_C + T_{Z1} + T_{Z2} = 0 \Rightarrow T_{Z1} = T_C - T_{Z2} \quad (11)$$

$$\sum M_0: T_{Z1} \cdot l_{Z1} + T_{Z2} \cdot l_{Z2} - T_C \cdot l_{TC} = 0 \quad (12)$$

$$(T_C - T_{Z2}) \cdot l_{Z1} + T_{Z2} \cdot l_{Z2} - T_C \cdot l_{TC} = 0$$

$$T_C \cdot l_{Z1} - T_{Z2} \cdot l_{Z1} + T_{Z2} \cdot l_{Z2} - T_C \cdot l_{TC} = 0$$

$$T_{Z2} \cdot (l_{Z2} - l_{Z1}) + T_C \cdot (l_{Z1} - l_{TC}) = 0 \Rightarrow T_{Z2} = \frac{-T_C \cdot (l_{Z1} - l_{TC})}{(l_{Z2} - l_{Z1})}$$

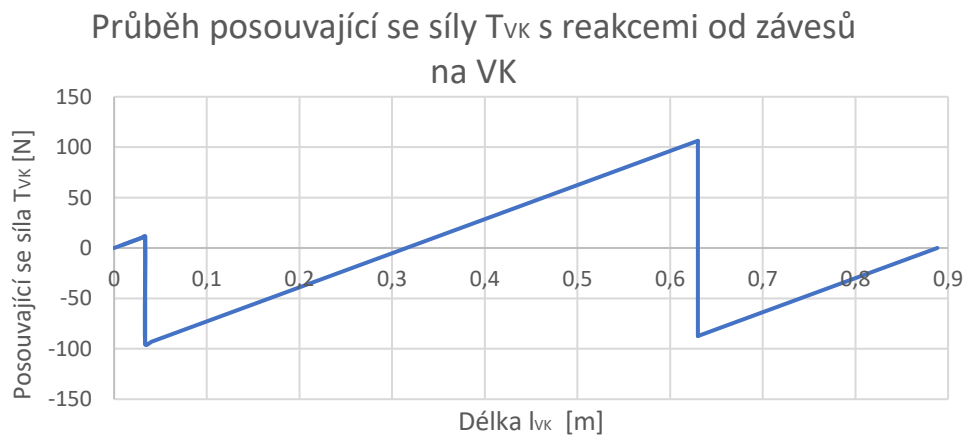
$$T_{Z2} = \frac{-T_C \cdot (l_{Z1} - l_{TC})}{(l_{Z2} - l_{Z1})} = \frac{-300,312 \cdot (0,0335 - 0,418)}{(0,63 - 0,0335)} = 193,681 \text{ N}$$

$$T_{Z1} = T_C - T_{Z2} = 300,312 - 193,681 = 106,631 \text{ N}$$

Dle Schwedlerovy věty určíme posouvající sílu jako:

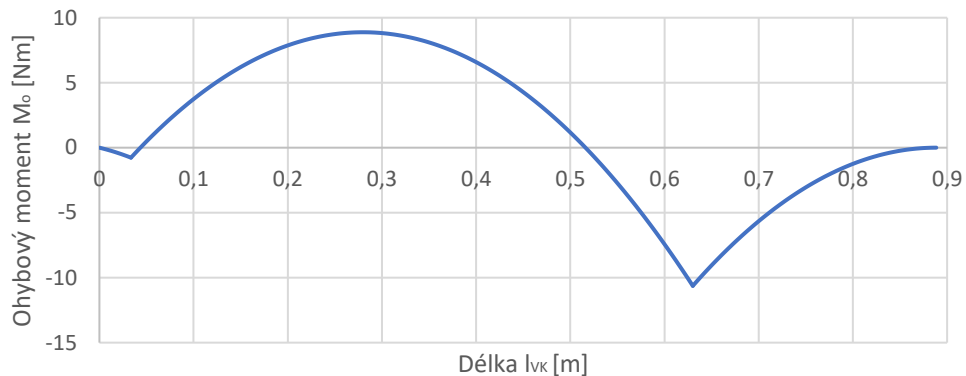
$$\frac{dT_{VK}(z)}{dz} = -q_{VK}(z) \Rightarrow T_{VK} = \int_0^{l_{VK}} q_{VK}(z) dz \quad (13)$$

Kde q_{VK} je proměnné spojité zatížení působící po délce výškového kormidla. Do výpočtu zavedeme i síly v závěsech určené v minulém kroku.



Graf č. 3: Průběh posouvající síly s reakcemi od závěsů na výškovém kormidle

Průběh ohybového momentu na VK



Graf č. 4: Průběh ohybového momentu na výškovém kormidle

Ohybový moment určíme integrací rovnice posouvající síly (1) po délce výškového kormidla:

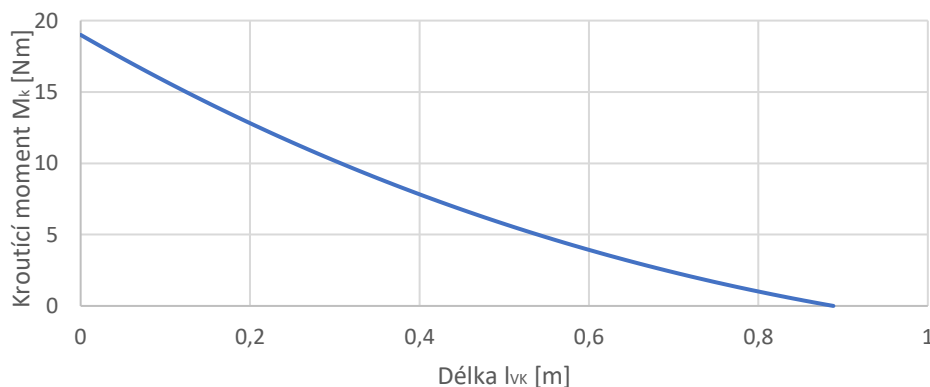
$$M_o = \int_0^{l_{VK}} T_{VK}(z) dz$$

Kroutící moment je dán integrací rovnice (14) ohybového momentu jako:

$$M_K = \int_0^{l_{VK}} q_{VK} \cdot r(z) \cdot dz \quad (15)$$

Kde $r(z)$ je rameno působící síly spojitého zatížení v závislosti na hloubce výškového kormidla. V průběhu kroutícího momentu nepočítáme s reakcemi tvořenými závěsy z důvodu zavedení kroutícího momentu do osy otáčení výškového kormidla, ve kterém působí reakce závěsů.

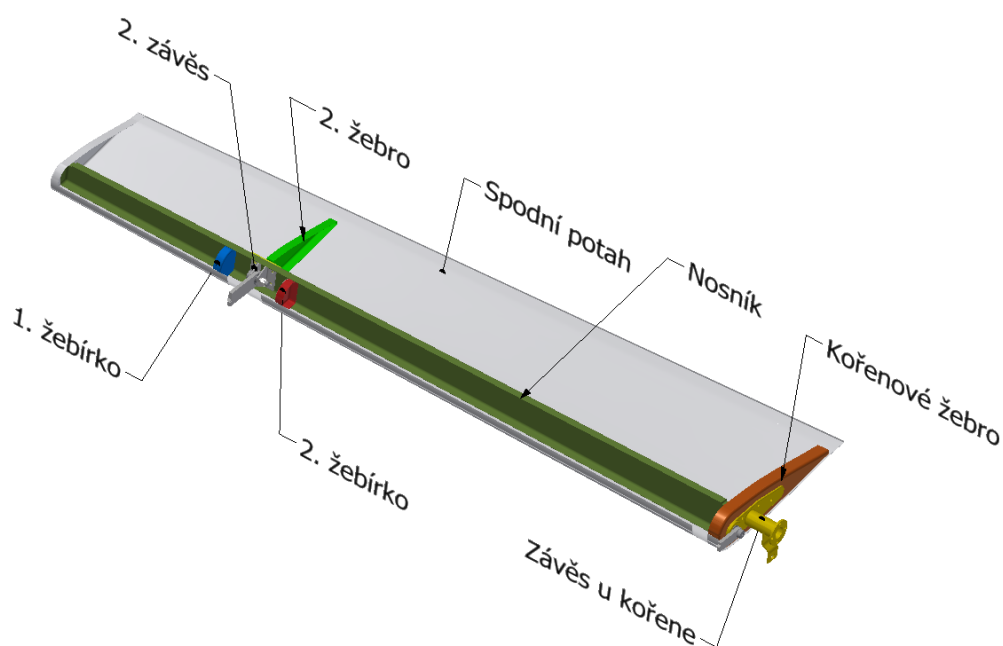
Průběh kroutícího momentu na VK



Graf č. 5: Průběh kroutícího momentu na výškovém kormidle

4 Návrh konstrukce

Součásti jsou vytvořeny z prepregu. Prepreg je polotovar sloužící k výrobě vláknových kompozitů, jejich složkou je předimpregnovaná výztuž napuštěná částečně vytvrzenými pryskyřicemi (v našem případě epoxidovou pryskyřicí). Takto se systémy na sebe vrství do doby, než vznikne požadovaná tloušťka, poté se vloží do formy a dotvarují se. Forma se následně vloží do autoklávu, kde proběhne vakuování dílu. Tím se vrstvy spojí. Po spojení a ohřátí autoklávu na danou teplotu začne proces vytvrzování, který je následován dalším zvýšením tlaku, které zapříčiní kvalitnější spojení vrstev a menší množství pryskyřice. Komponenty budou k sobě slepeny lepidlem o tloušťce 0,6 mm. V sestavě je tento spoj naznačen pouze odsazením. Na komponenty je aplikováno zaoblení o velikosti minimálně 3 mm, aby bylo možné vlákna ohnout do formy.

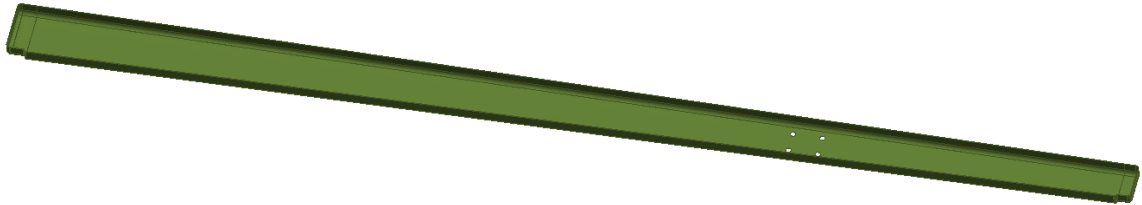


Obr. 9.: Popis součástí výškového kormidla

4.1 Nosník

Průřez nosníku je zvolen typ C, který se skládá se ze dvou symetrických pásnic a stojiny které kopírují tvar potahu. Na konci nosníku je snížení z důvodu „vložení“ do žeber. Jak již bylo napsáno v kapitole 2.3.1, pásnice přenáší ohybové momenty a z tohoto důvodu stačí pro jejich výrobu použít jednosměrnou tkaninu s orientací po

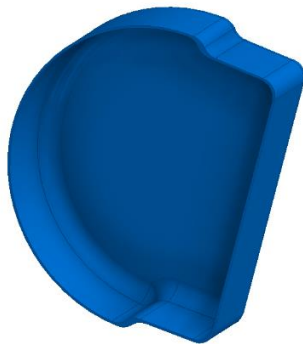
délce nosníku, zatímco stojina je vyrobena z vícesměrné tkaniny s orientací vláken $\pm 45^\circ$ jelikož přenáší smykové napětí. Do nosníku jsou vytvořeny otvory pro připevnění závěsu.



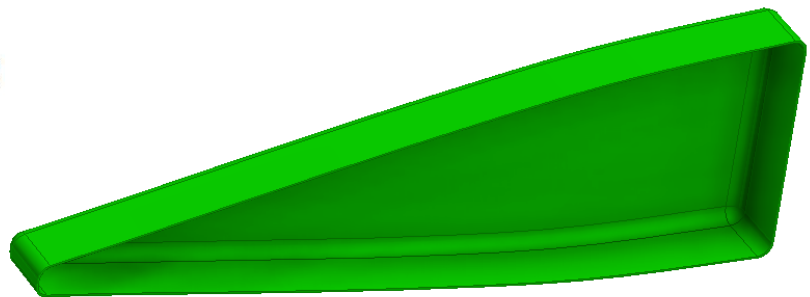
Obr. 10.: Nosník

4.2 Žebra

Žebra jsou vytvořena též z vícesměrné tkaniny se stejnou orientací vláken jako u stojiny

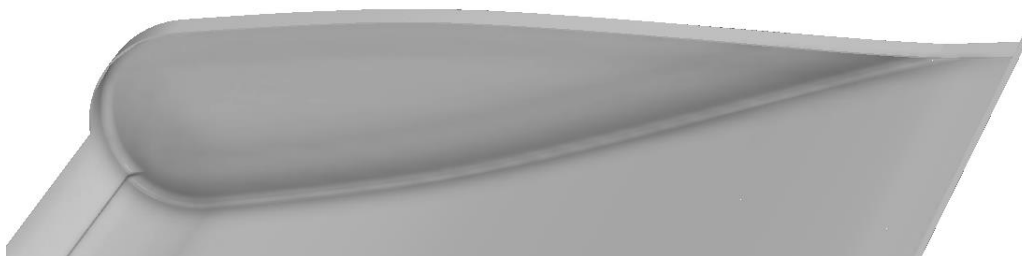


Obr. 13.: Žebírko



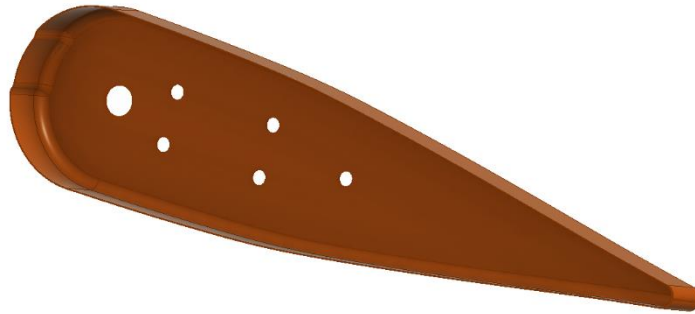
Obr. 12.: 2. žebro

nosníku. K druhému závěsu jsou vytvořena dvě žebírka, aby nevznikal volný potah a uzavřela se přední dutina. Zadní dutinu pak uzavírá druhé žebro. Vnější žebro je součástí spodního potahu, což setří hmotnost za lepený spoj a zároveň je vytvořen lepší přenos zatížení.



Obr. 11.: Spodní potah s detailem na vnější žebro

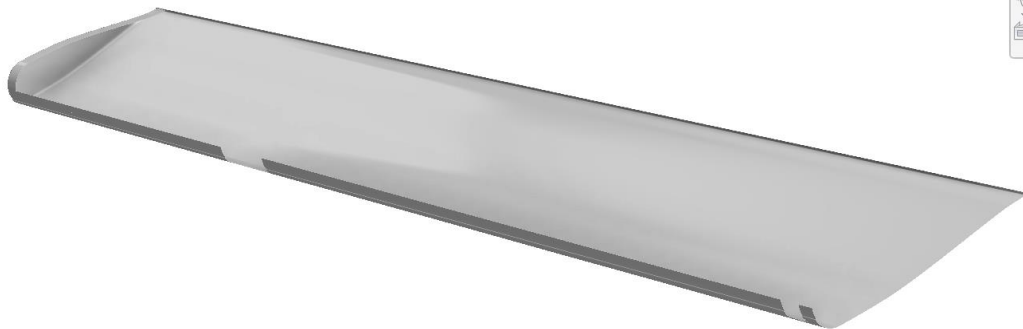
Kořenové žebro obsahuje otvory pro připevnění kořenového závěsu s překližkou a otvor na průchod šroubu z kulového ložiska a kořenového závěsu.



Obr. 14.: Kořenové žebro

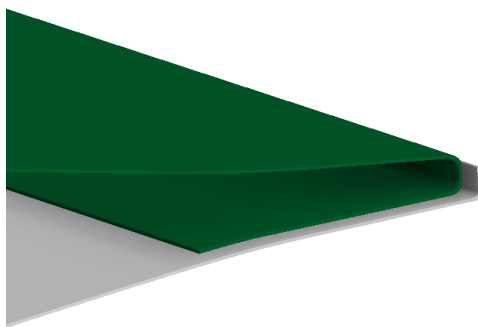
4.3 Potah

Na potahu jsou vytvořeny otvory na průchod závěsu a prostoru k vložení šroubu, korunní matice a podložky včetně následného utáhnutí.

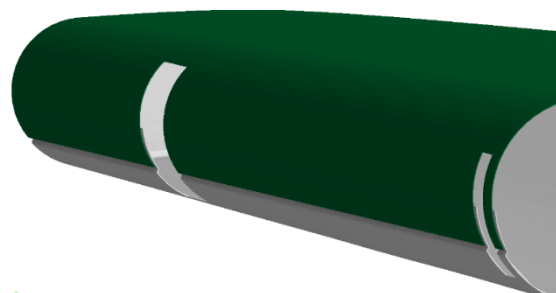


Obr. 15.: Spodní potah s vnějším žebrem

Na náběžné hraně a odtokové hraně je vytvořen lem pro spojení horního potahu se spodním. I když jde o samonosný typ potahu, je vyztužen již zmíněnými žebry a nosníkem.



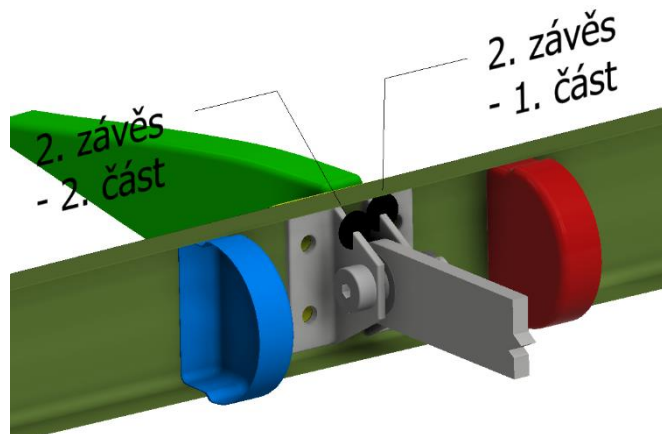
Obr. 17.: Lem na odtokové hraně



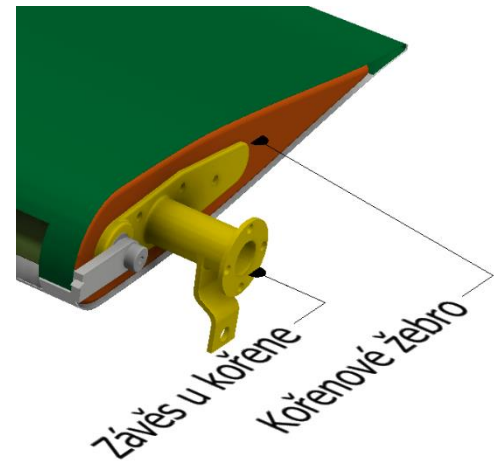
Obr. 16.: Lem na náběžné hraně

4.4 Závěsy

Závěs u kořene je vyroben z oceli AISI 4130 která je dobře svařitelná, a tudíž je možné páku náhonu rovnou přivařit na trubku, čímž se ušetří hmotnost. Zároveň je možné volit poloviční tloušťku materiálu oproti závěsu z duralu. Závěs je přišroubován skrz kořenové žebro a překližku.



Obr. 19.: 2. závěs



Obr. 18.: Závěs u kořene

2. závěs je vytvořen z dvou L profilů a též přišroubován skrz nosník a překližku. Mezi L profily umístěné na výškovém kormidle bude pomocí šroubu spojena zbylá část závěsu putující ze stabilizátoru, která bude obsahovat kulové ložisko.

5 Předběžné dimenzování

Materiál použitý pro výrobu výškového kormidla bude kompozit v takzvaném křehkém stavu. Jako matrice bude sloužit epoxidová pryskyřice a jako výztuž uhlíkové vlákno. Křehké materiály mají rozdílnou pevnost v tahu a tlaku.

Bude-li použita jednosměrná tkanina, bude mít kompozit následující vlastnosti:

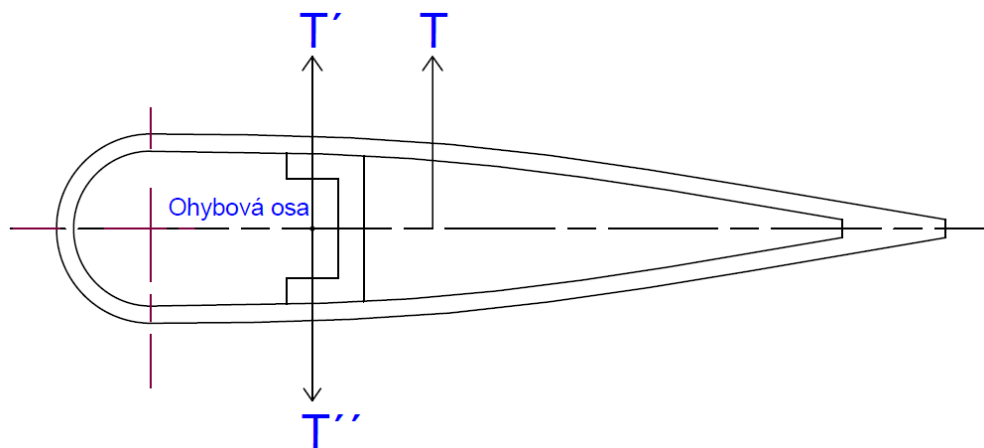
- Pevnost kompozitu v tahu: $\sigma_{Pt} = 1\,700\text{ MPa}$
- Pevnost kompozitu v tlaku: $\sigma_{Pd} = 900\text{ MPa}$

Bude-li použita vícesměrná tkanina, bude mít kompozit následující vlastnosti:

- Pevnost kompozitu ve smyku: $\tau_{PS} = 120\text{ MPa}$
- Youngův modul pružnosti v tahu: $E = 74\,160\text{ MPa}$

5.1 Dimenzování a kontrola pásnic nosníku na ohyb

Metoda použitá pro výpočet se nazývá metoda superpozice a je převzatá ze zdroje [15,18]. Metoda udává, že síly T'' a T' působící v ohybové ose a vyobrazené na Obr. 9 mají stejnou velikost jako posouvající síla T . Dvojice sil T a T'' vytváří kroutící moment, který zatěžuje kormidlo čistým krutem a je určen v kapitole 4.2, zatím co síla T' zatěžuje kormidlo bezkrutovým ohybem. Za sílu T' budeme považovat sílu T , a tudíž můžeme počítat s ohybovým momentem určeným v kapitole 4.2.



Obr. 20.: Silové uspořádání

5.1.1 Dimenzování pásnic nosníku

Pásnice nosníku, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.1.2, je namáhána na ohyb. Ohybové napětí vypočítáme dle vztahu (16):

$$\sigma_D = \frac{M_{o_{\max}}}{W_o} \quad (16)$$

Průřezový modul pro namáhání ohybem je dán vztahem (17), kde e_x je vzdálenost okrajového vlákna plochy od neutrální osy, a tudíž v našem případě $e_x = \frac{h}{2}$:

$$W_o = \frac{J_{ZN}}{e_x} \quad (17)$$

Kvadratický moment (18) plochy celého průřezu k hlavní centrální ose vychází ze Steinerovy věty a je pro náš případ dvojnásobný, jelikož namáhání je přenášeno dvěma průřezy:

$$J_{ZN} = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot b_p \cdot t_p^3 + b_p \cdot t_p \cdot \left(\frac{h_s}{2} \right)^2 \right) \quad (18)$$

V kapitole 2.1.2.1 se zmiňujeme, že pásnice přenášejí ohybový moment, který se rozkládá dle smyslu ohybového momentu na tahové a tlakové napětí. Dovolené ohybové napětí v tahu σ_{Dt} (19) a tlaku σ_{Dd} (20) je pro náš případ:

$$\sigma_{Dt} = \frac{\sigma_{Pt}}{f} = \frac{1700}{1,875} = 906,667 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$(20)$$

$$\sigma_{Dd} = \frac{\sigma_{Pd}}{f} = \frac{900}{1,875} = 480 \text{ MPa} \quad (21)$$

Jak se již můžeme přesvědčit, tak dovolené napětí na tlak je menší, a tudíž důležitější bude kontrolovat pásnici na tlak než na tah. Pro dimenzování budeme používat maximální hodnoty ohybového momentu určené Příloze 1 a zobrazené v Kapitole 4.2.

$$b_p = \frac{M_{o\max} \cdot h}{\sigma_D \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot t_p^3 + t_p \cdot h_s^2 \right)} \quad (22)$$

Poslední neznámá potřebná k výpočtu je tloušťka pásnice, kterou zvolíme jako počet vrstev tkaniny. Jedna vrstva je rovna 0,13 mm, tudíž po zvolení dvou vrstev:

$$t_p = 0,26 \text{ mm}$$

Pásnice jsou symetrické a z toho vyplývá že hodnota pro horní i dolní pásnici je stejná:

$$b_{Pn\text{ávrh}} = 2,39 \text{ mm}$$

Hodnota, která vyšla, sice splňuje požadavky ze strany pásnice, ale již ne ze strany lepeného spoje. Počet vrstev tkaniny není možné snížit, jelikož minimální počet vrstev jsou dvě. Rozměr potřebný ke kvalitnímu spojení musí být minimálně 10 mm.

$$b_p = 10 \text{ mm}$$

5.1.2 Kontrola pásnic po délce nosníku

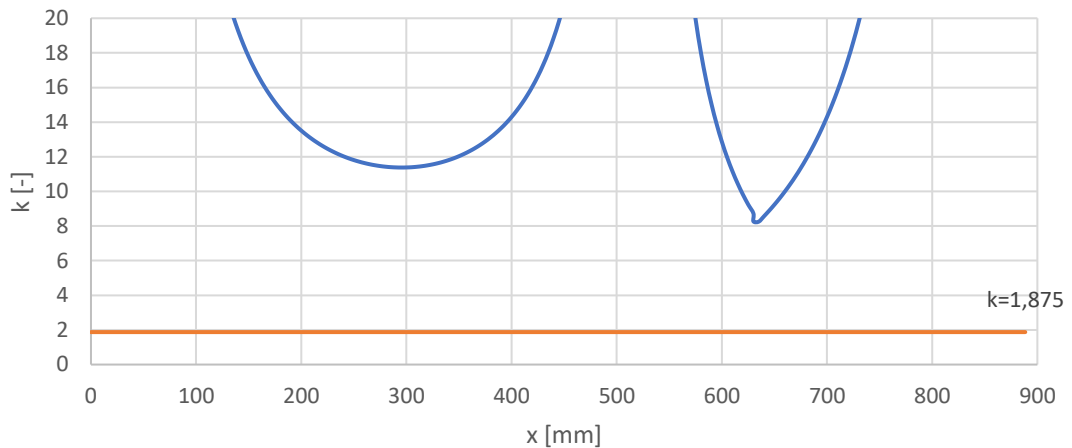
Kontrola probíhá obdobně jako návrh tloušťky pásnice, jedinou výjimku tvoří ohybový moment M_o . Ten se nebude dosazovat jako absolutní maximum na výškovém kormidle, ale přímo určitý pro danou vzdálenost, a to z důvodu, že výška nosníku klesá rychleji než hodnoty ohybového momentu, jak se můžete přesvědčit v Příloze 1. Ohybové napětí tedy vypočítáme jako:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (23)$$

Pro určení bezpečnosti f máme následující vztah (24), který je dán jako poměr dovoleného napětí v tahu ku vypočtenému ohybovému napětí.

$$f = \frac{\sigma_{Dt}}{\sigma_o} \quad (24)$$

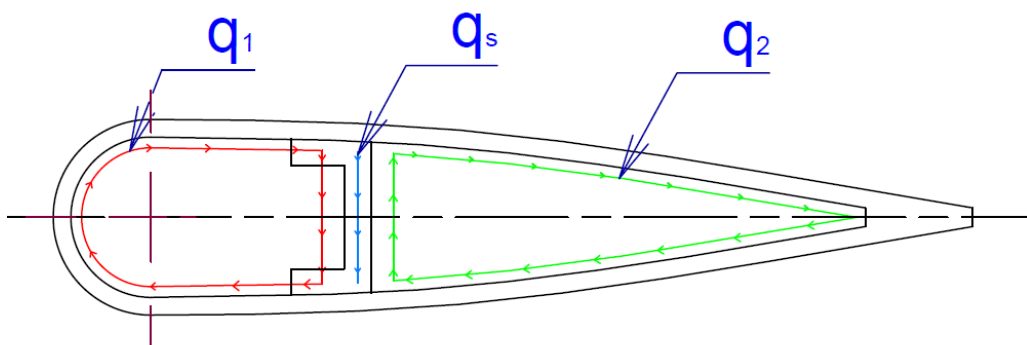
Bezpečnost pásnic po délce nosníku



Graf č. 6: Průběh bezpečnosti pásnic po délce nosníku

5.2 Dimenzování stojiny a potahu

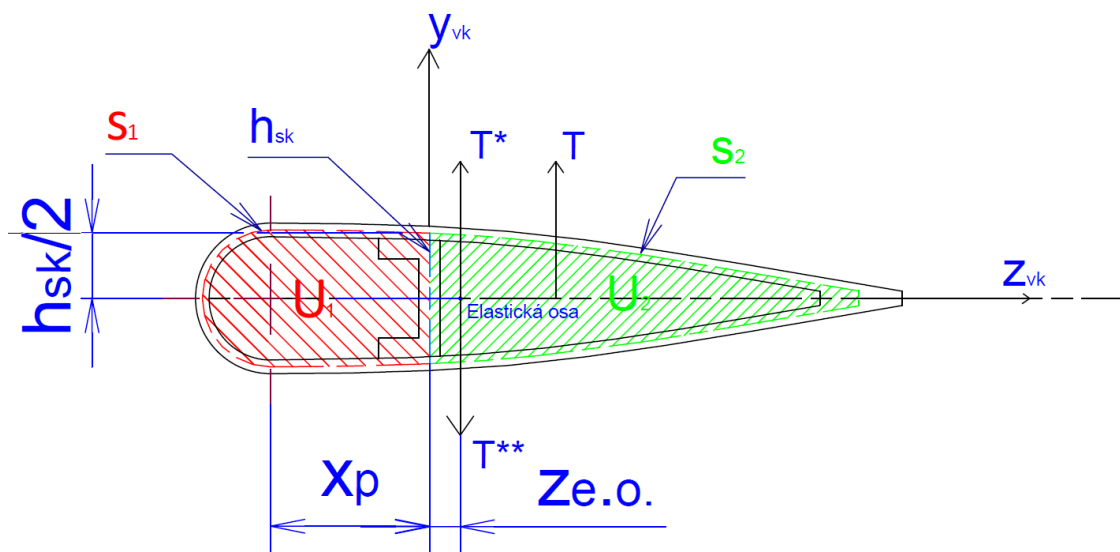
Naše konstrukce se bude skládat z jednoho nosníku, pevného potahu a tří žebér (koncové žebro uvažujeme jako součást spodního potahu). Jak se můžeme přesvědčit na obrázku č. 10, tak konstrukce vytváří dvě torzní skříně (dutiny).



Obr. 21.: Schéma výškového kormidla se smykovými toky

Torzní skříň je schopná zachytit krutové zatížení, které nevytváří pouze ohybový moment ale i posouvající síla. Abychom zjistili, jak velký zkrut a jestli ho vůbec síla vykonává, tak musíme určit elastickou osu výškového kormidla. Elastická osa $z_{e.o.}$ nemusí být pouze přímka, ale může být i křivka. Budeme-li na osu působit silou kolmou k ploše kormidla, budeme kormidlo pouze ohýbat. Zavedeme-li sílu mimo tuto osu, tak budeme kormidlo nejen ohýbat, ale i zkroucovat. Smysl zkroucení závisí na tom, zda kormidlo zatěžujeme před nebo za elastickou osu.

5.2.1 Výpočet smykového namáhání



Obr. 22.: Silové působení a zobrazení použitých rozměrů

Postup výpočtu je téměř identický jako v kapitole 5.1 až na předpoklad působení posouvající síly v elastické ose. Z toho vyplývá, že silová dvojice T^* a T^{**} vytváří kroutící moment $M_{kE.O}$ vzhledem k elastické ose (viz. následující vzorec (25)). Kroutící moment M_k použitý ve vzorci (25) je vztažen k ose otáčení a je určen v kapitole 4.2. Rozměr x_p byl odečten z programu Inventor z Přílohy (2). Způsob výpočtu byl inspirován zdrojem [15,18].

$$M_{kE.O} = M_k - T \cdot (z_p + z_E) \quad (25)$$

Vzorec určený pro výpočet elastické osy (26) byl převzat z [16].

$$z_{E.O} = \frac{-2 \cdot s_1 (s_1 \cdot U_2 + U_1 \cdot h_{SK} + U_2 \cdot h_{sk})}{(s_1 + h_{SK}) \cdot (s_1 \cdot s_2 + s_1 \cdot h_{SK} + s_2 \cdot h_{SK})} + \frac{2 \cdot U_1}{s_1 + h_{SK}} \quad (26)$$

Pro momentovou rovnováhu platí podmínka, že:

$$M_{kE.O} + M_1 + M_2 = 0 \quad (27)$$

Budeme-li předpokládat, že dutiny jsou izolované a uzavřené, můžeme použít Bredtův vztah (28).

$$M_i = q_i \cdot 2 \cdot U_i \quad (28)$$

Po dosazení Bredtova vztahu do momentové rovnováhy vznikne rovnice (27)

$$M_{kE.O} + 2 \cdot U_1 \cdot q_1 + 2 \cdot U_2 \cdot q_2 = 0 \quad (29)$$

Statická neurčitost je rovna počtu dutin, tudíž v našem případě je dvoudutinová konstrukce dvakrát staticky neurčitá. Jako deformační podmínky nám postačí rovnost zkrutů dutin (30).

$$\vartheta_1 = \vartheta_2 \quad (30)$$

$$\frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot \oint_{(1)} \frac{q}{G \cdot t} \cdot ds = \frac{1}{2 \cdot U_2} \cdot \oint_{(2)} \frac{q}{G \cdot t} \cdot ds \quad (31)$$

Materiály obou dutin jsou totožné, proto bude tedy i modul pružnosti ve smyku G totožný

$$G_1 = G_2 = G_s. \quad (32)$$

Obě dutiny jsou vytvořeny z dvou vrstev uhlíkové tkaniny a epoxidové pryskyřice, mají tedy stejnou tloušťku

$$t_1 = t_2 = t_s. \quad (33)$$

Po úpravě a integraci získáme rovnici č. (34):

$$\frac{1}{U_1} \cdot (q_1 \cdot s_1 + (q_1 + q_s - q_2) \cdot h_{sk}) = \frac{1}{U_2} \cdot (q_2 \cdot s_2 + (-q_1 - q_s + q_2) \cdot h_{sk}) \quad (34)$$

Spojením rovnic (29) a (34) můžeme docílit výsledných vztahů smykových toků q_1 a q_2 .

$$q_1 = \frac{-(U_1 \cdot s_2 + U_1 \cdot h_{SK} + U_2 \cdot h_{SK}) \cdot \frac{M_{KE,0}}{2 \cdot U_2} - (U_1 + U_2) \cdot h_{SK} \cdot q_s}{U_2 \cdot s_1 + U_2 \cdot h_{SK} + 2 \cdot U_1 \cdot h_{SK} + \frac{U_1}{U_2} \cdot (U_1 \cdot s_2 + U_1 \cdot h_{SK})} \quad (35)$$

$$q_2 = \frac{-M_{KE,0} - 2 \cdot U_1 \cdot q_1}{2 \cdot U_2} \quad (36)$$

Smykový tok působící ve stojině q_s (37) je dán poměrem posouvající síly T a střední výšky nosníku h_{SK}

$$q_s = \frac{T}{h_{SK}} \quad (37)$$

Celkový smykový tok v dutině je popsán rovnicí (38)

$$q_c = q_1 + q_s - q_2 \quad (38)$$

Smykové napětí τ (39) je obecně dáno jako poměr smykového toku a tloušťky stěny.

$$\tau = \frac{q}{t} \quad (39)$$

Tabulka č. 3: Výsledné hodnoty smykového napětí na VK

	Místo řezu na VK x [mm]	Provozní smykové napětí v přední dutině τ_1 [MPa]	Provozní smykové napětí v zadní dutině τ_2 [MPa]	Provozní smykové napětí ve stojině τ_s [MPa]
Kořen VK	33,5	-2,730	-5,590	-4,786
Polovina VK	444,25	-3483	-1,914	2,522
2. závěs	630	-4,042	-0,079	6,743
Konec VK	888,5	0	0	0

Roznásobením provozního smykového napětí τ z Tabulky č. 3 vznikne početní smykové napětí τ_p viz Tabulka 4.

Tabulka č. 4: Výsledné hodnoty početního smykového napětí na VK

	Místo řezu na VK x [mm]	Početní smykové napětí v přední dutině τ_{1p} [MPa]	Početní smykové napětí v zadní dutině τ_{2p} [MPa]	Početní smykové napětí ve stojině τ_{sp} [MPa]
Kořen VK	33,5	-5,119	-10,481	-8,974
Polovina VK	444,25	-6,531	-3,589	4,729
2. závěs	630	-7,35	-0,149	12,643
Konec VK	888,5	0	0	0

Pro zjištění bezpečnosti (jistoty) vzhledem k mezi pevnosti ve smyku je potřeba podělit pevnost ve smyku τ_{ps} početním smykovým napětím τ_p z Tabulky č. 4 jak je naznačeno ve vztahu (40).

$$f_p = \frac{\tau_{ps}}{\tau_p} \quad (40)$$

Tabulka č. 5 Bezpečnost ve smyku na VK

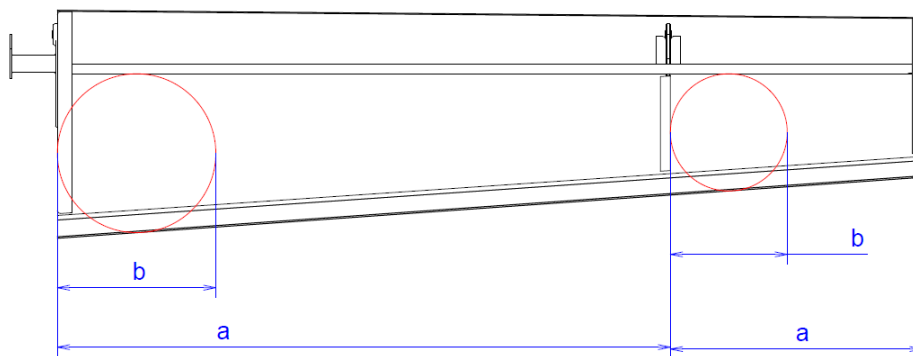
	Místo řezu na VK x [mm]	Bezpečnost přední dutiny f_{1p} [-]	Bezpečnost zadní dutiny f_{2p} [-]	Bezpečnost stojiny f_{sp} [-]
Kořen VK	33,5	23,442	11,449	13,371
Polovina VK	444,25	18,373	33,433	25,375
2. závěs	630	15,717	806,003	9,491
Konec VK	888,5	—	—	—

5.2.2 Kontrola stability potahu

Vznikne-li malá změna napjatosti deformace, která bude napomáhat vzniku poruchy, může dojít k překročení kritické velikosti zatížení a zároveň i k velké změně tvaru. Avšak tvar, který vznikne nemusí být konstruován na přenos daného namáhání a může dojít k okamžité materiálové poruše. Způsob výpočtu kritického smykového napětí (41) je přebrán z [17].

$$\tau_K = \kappa \cdot K_s \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (41)$$

Faktor zvýšení tuhosti κ pro symetrickou sendvičovou konstrukci s identickými moduly pružnosti je roven třem. Součinitel vzpěru pro rovinou izotropní desku K_s se odečítá ze zdroje [17, str. 108] konkrétně z grafu č. 4.42. Desky jsou ze všech stran přilepeny k dalším součástím, tudíž typ případu upnutí v grafu č. 4.42 bereme s pevným upnutím dlouhých i krátkých stran, konkrétně k_4 . Rozhodujícím faktorem je brán poměr stran b/a , kde strana a je dlouhá strana a strana b je strana úzká. Vzdálenost b odečteme pomocí vepsané kružnice do pole řešeného potahu. Jak se můžeme přesvědčit v následujícím Obr. 12 tato metoda vylučuje okraje které jsou vyztužené žebrem a způsobují vetknutí.



Obr. 23.: Způsob odečtení rozměrů potahu

Problematická část z pohledu stability při kroucení je zadní část potahu. Důvodem je velká plocha a malé zakřivení. Díky symetrii profilu lze počítat pouze spodní či horní potah.

Tabulka č. 6: Kritická smyková napětí zadní části potahu

Kritické smykové napětí v zadní části potahu τ_{2k} [MPa]	
Vnitřní pole	Vnější pole
3,384	6,286

Po porovnání Tabulky č. 6 s Tabulkou č. 4 musí být početní smykové napětí menší než kritické. Jediným místem, kde se blížíme limitu je v místě druhého žebra, avšak tam bude potah podepřen a přilepen k žeburu. Jelikož problematická zadní část potahu obstála, tak musí obstát i přední část potahu.

5.2.3 Kontrola stability stojiny nosníku

Způsob výpočtu probíhá obdobně jako v předchozí kapitole 5.3.2

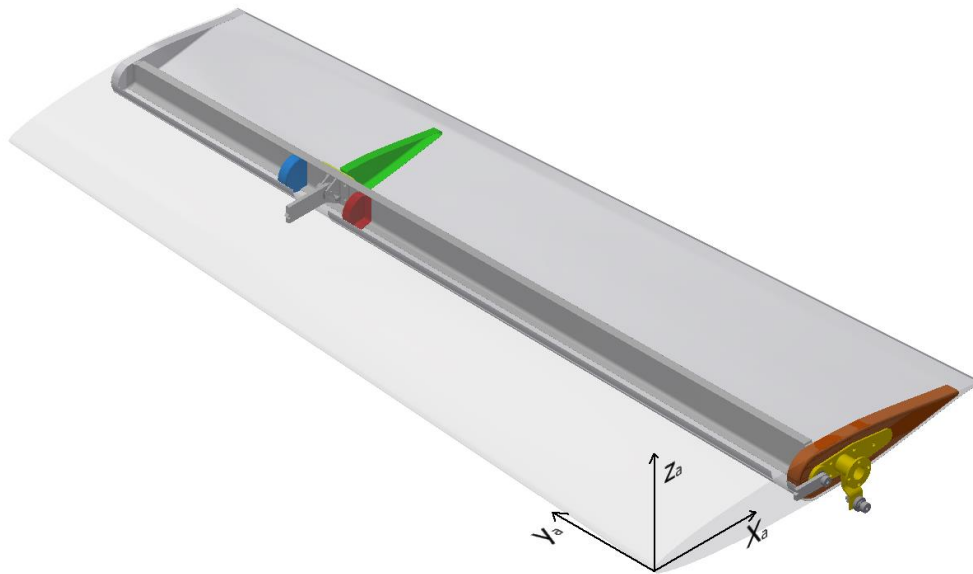
Tabulka č. 7: Kritické smykové napětí ve stojině

Kritické smykové napětí ve stojině τ_{sk} [MPa]	
Vnitřní pole	Vnější pole
53,005	85,536

Po přezkoumání, zda početní smykové napětí v Tabulce č. 4 není vyšší než kritické smykové napětí v Tabulce č. 7 můžeme říct, že stojina při své funkci stabilitu neztratí.

6 Hmotový rozbor prvků

Hmotnost součásti určuje nejen ekonomický, ale i bezpečnostní a funkční aspekt celého letadla. Pro tento důvod byl zhotoven model výškového kormidla v programu Inventor (viz. Příloha 1), ze kterého byly následně odečteny hmotnosti a polohy těžišť. Poloha těžiště je dále potřebná pro správné rozložení hmotnosti z důvodu letových vlastností. Poloha těžiště je vztahována k souřadnému systému na Obr. 13.



Obr. 24.: Použitý souřadnicový systém

6.1 Hustota materiálu

- Plošná hustota uhlíkového vícesměrného prepregu $\rho_{Svs} = 320 \text{ g/m}^2$
- Plošná hustota uhlíkového jednosměrného prepregu $\rho_{Sjs} = 163 \text{ g/m}^2$
- Objemová hustota lepidla Henklel Hylos EA 9394 $\rho_{Vl} = 1\,360 \text{ g/m}^3$

Pro zjištění objemové hustoty vícesměrného prepregu použijeme vztah (42) ve kterém dělíme plošnou hustotu tloušťkou jedné vrstvy

$$\rho_{Vvs} = \frac{\rho_{Svs}}{t_{1V}} = \frac{320 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 1\,600 \text{ kg/m}^3 \quad (42)$$

6.2 Určení hmotností a těžišť

Součet všech ploch, na které bude lepidlo aplikováno, vynásobíme tloušťkou lepidla 0,6 mm a takto získáme hodnotu objemu. Objem následně vynásobíme hustotou lepidla, čím nám vznikne hmotnost lepidla:

$$m_{\text{lepidla}} = 42,413 \text{ g.}$$

Tabulka č. 8: Hmotnosti a těžiště komponent

	Hmotnost [g]	Poloha těžiště		
		x [mm]	y [mm]	z [mm]
2. žebro	2,368	277,221	627,253	0
Kořenové žebro	5,604	277,401	3,948	0
Nosník	21,432	220,501	427,137	0
Závěs u kořene	90	242,856	-18,816	-1,676
2. závěs -1. část	12	217,765	620,339	0,6
-2. část	12	217,765	635,061	0,6
Spodní potah	81	283,659	430,317	-12,569
Horní potah	90	287,648	419,716	11,077
1. žebírko	0,894	208,439	589,089	0
2. žebírko	0,854	209,644	666,223	0
Překližka u kořene	4,521	243,427	1,26	0,6
Překližka u 2. závěsu	4,576	223,982	627,7	0,6
Ložiska	12			
Lepidlo	42,413			
Spojovací prvky(šrouby)	19,71			
Celkem	356,959	248,289	-0,717	248,334

Celková hmotnost výškového kormidla i s lepidlem:

$$m_{\text{celkem}} = 399,373 \text{ g}$$

7 Kontrola šroubového spoje

Šroubový spoj bude použit jako spoj závěsu výškového kormidla se závěsem stabilizátoru a dále páky ovládání se systémem ovládáním. Pro zajištění přenosu příčného zatížení a zajištění vzájemné polohy součásti použijeme lícované šrouby třídy pevnosti 8.8 se závitem M5 průměrem dříku $d_{\text{dříku}} = 6 \text{ mm}$.

7.1 Vnější závěs

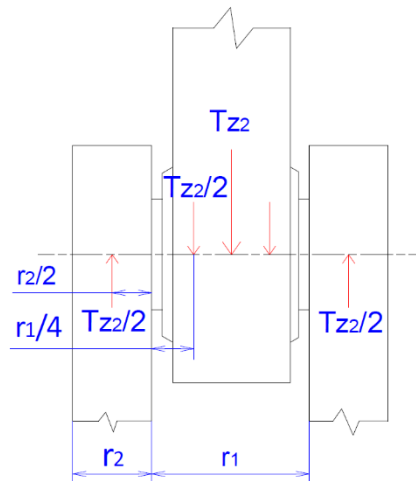
Pevnostní rovnice (43) na ohybový moment:

$$\sigma_o = \frac{M_{o \max}}{W_o} = \frac{399,466}{21,206} = 18,837 \text{ MPa} \quad (43)$$

Modul průřezu pro kruhový průřez je dán rovnicí (44).

$$W_o = \frac{\pi \cdot d_{\text{dříku}}^3}{32} = \frac{\pi \cdot 6^3}{32} = 21,206 \text{ mm}^3 \quad (44)$$

Při kontrole šroubového spoje se při namáhání ohybem uvažuje o šroubu jako o nosníku uloženém na dvou podporách, jako je vyobrazeno na Obr. 13. Maximální ohybový moment je určen rovnicí (45), kde k je koeficient bezpečnosti a je roven 1,5.



Obr. 25.: Silové působení a zobrazení použitých rozměrů na vnějším závěsu

$$M_{o \max} = \frac{T_{z2} \cdot f}{2} \cdot \left(\frac{r_2}{2} + \frac{r_1}{4} \right) = \frac{193,681 \cdot 1,5}{2} \cdot \left(\frac{2}{2} + \frac{7}{4} \right) = 399,466 \text{ Nmm} \quad (45)$$

Jelikož je šroub zatížen příčnou silou, je třeba provést pevnostní výpočet i na smyk. Plocha S je ve jmenovateli dvakrát z důvodu dvou střížných ploch.

$$\tau_s = \frac{T_{z2} \cdot f}{2 \cdot S_s} = \frac{193,681 \cdot 1,5}{2 \cdot 28,274} = 5,138 \text{ MPa} \quad (46)$$

Pevnostní kontrolu provedeme podle Guestovy pevnostní teorie, kterou nebudeme porovnávat s dovoleným napětím, ale provedeme porovnání s mezí pevnosti:

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma_o^2 + 4 \cdot \tau_s^2} = \sqrt{18,838^2 + 4 \cdot 5,138^2} = 21,458 \text{ MPa} \quad (47)$$

$$\sigma_{\text{red}} < R_m$$

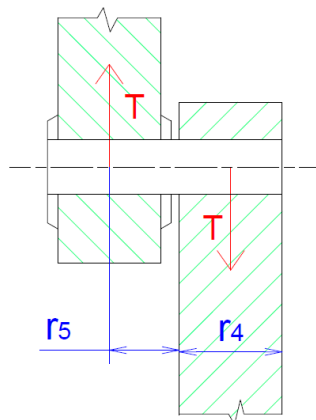
$$21,458 \text{ MPa} < 800 \text{ MPa}$$

Podmínka je splněna a šroub zatížení s velkou rezervou bez deformace odolá.

7.2 Vnitřní závěs

Výpočet probíhá obdobně jako v kapitole 7.1. Působící síla, která vzniká vektorovým součtem reakce ze závěsu T_{z1} a silou vyvolanou ovládáním táhla T_t viz. rovnice (48).

$$T = \sqrt{T_{z1}^2 + T_t^2} = \sqrt{106,631^2 + 633,342^2} = 633,342 \text{ N} \quad (48)$$



Obr. 26.: Silové působení a zobrazení použitých rozměrů na kořenovém závěsu

Sílu v táhle vypočteme jako poměr kroutícího moment působícího v ose otáčení a ramena r_3 do místa ložiska v páce.

$$T_t = \frac{M_k}{r_3} = \frac{19,000}{0,03} = 633,342 \text{ N} \quad (49)$$

Maximální ohybový moment dle Obr. 15 vypočteme jako:

$$M_{o \max} = \frac{T \cdot f}{2} \cdot \left(r_5 + \frac{r_4}{2} \right) = \frac{633,342 \cdot 1,5}{2} \cdot \left(3,5 + \frac{4}{2} \right) = 5\,298,609 \text{ Nmm} \quad (50)$$

Zbytek výpočtu probíhá stejně jako v kapitole 7.1 až na počet střížných ploch, která je v tomto případě pouze jedna.

Tabulka č. 9: Kontrolní hodnoty pro kořenový závěs

	σ_o [MPa]	τ_k [MPa]	σ_{red} [MPa]	R_m [MPa]	Podmínka
Vypočtené hodnoty	249,866	34,073	256,741	800	Vyhovuje

7.3 Páka ovládání

Způsob výpočtu je totožný jako v kapitole 7.1. Použitá reakční síla, na kterou budeme závěs kontrolovat je rovna síle vyvolané ovládním táhla T_t . Hodnoty použité pro výpočet jsou dány v Tabulce č. 9.

Tabulka č. 10: Vstupní hodnoty pro páku ovládání

	T_t [N]	r_1 [mm]	r_2 [mm]	$M_{o \max}$ [MPa]
Vstupní hodnoty	633,342	7	2	2 612,536

Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce č. 10.

Tabulka č. 11: Výsledné hodnoty pro kontrolu páky ovládání

	σ_o [MPa]	τ_k [MPa]	σ_{red} [MPa]	R_m [MPa]	Podmínka
Vypočtené hodnoty	123,199	16,800	126,589	800	Vyhovuje

8 Závěr

V této bakalářské práci proběhl návrh výškového kormidla pro ultralehké letadlo. Bylo provedeno rozdělení řídicích ploch a seznámení se s nejpoužívanějšími materiály na konstrukci výškového kormidla. Byly představeny požadavky předpisu, které byly následně použity při návrhu konstrukce. Dále byly určeny základní rozměry výškového kormidla včetně rozměrů umístění závěsů, které byly navrhnuty tak, aby namáhání bylo co nejlépe rozloženo na oba závěsy.

V páté kapitole proběhlo dimenzování a kontrola pásnic nosníku na ohyb. Nejmenší bezpečnost pásnic vyšla v místě druhého závěsu s hodnotou 8,25 což s velkou rezervou splňuje požadavky předpisu UL-2. Pro dimenzování a kontrolu potahu se stojinou bylo zapotřebí určit elastickou osu výškového kormidla, která byla použita k výpočtu kroutícího momentu vztaženého k elastické ose. Následně byly vypočteny smykové toky ve stojině a přední a zadní dutině. Po výpočtu početního napětí se určila bezpečnost dutin a stojiny, která ve všech vyhovuje. Dále následovala kontrola stability potahu a stojiny, která též bez potřeby vyztužení pěnovým jádrem vyhovuje.

Jako další bod byl zhotoven hmotový rozbor prvků sloužící pro určení polohy těžišť a správného rozložení hmotností v letadle. Celková hmotnost výškového kormidla včetně spojujících prvků vyšla 399,373 g.

Nakonec proběhla kontrola pevnostních lícovaných šroubů o velikosti M5 na smyk a ohyb, která též bez problému vyhovuje.

Předmětem dalších studií by mohla být kontrola oka závěsu na utržení a kontrola komponentů metodou konečných prvků. V této bakalářské práci byla sice zmíněna výroba komponentů, ale v praxi jde o dost komplikovanější výrobu, pro kterou je nezbytné navrhnout formu a čas působení teploty a tlaku.

9 Reference

- [1] Mikula J, České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. Konstrukce a projektování letadel I. Vyd. 1. ed. Praha: Vydavatelství ČVUT; 2004.
- [2] Mikula J, České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. Konstrukce a projektování letadel II. Vyd. 1. ed. V Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT; 2005.
- [3] SLAVĚTINSKÝ, Dušan. Konstrukce a stavba letadel. O letadlech, [cit. 11.02.200]. Dostupné z: <http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/Konstrukcekridla.aspx>
- [4] Nonmetallic Aircraft Materials – Part Three (Fiber Reinforced Materials, Laminated Structures, Reinforced Plastic). Flight Mechanic — Aircraft Mechanic School Study Supplement for Future Aviation Maintenance Technicians [online]. [cit. 09.02.2020]. Dostupné z: <https://www.flight-mechanic.com/composite-materials-part-two-fiber-reinforced-materials-laminated-structures-reinforced-plastic/>
- [5] BENEŠ, L. Kompozity. [Online], [cit. 11.02.2020] . Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/07_Kompozity.ppt
- [6] Arne Nordmann (user:norro), 2006 [CC BY-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)]
- [7] ŠULŽENKO, Michail Nikolajevič. Konstrukce letadel. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953. Knižnice kovoprůmyslu.
- [8] SLAVÍK, Svatomír. Stavba letadel. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01671-4.
- [9] ZITEK. Adam. Vlákna. [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79503/F2-BP-2018-Zitek-Adam-priloha-vlakna.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. ČVUT DSpace [online].
- [10] Letecká amatérská asociace ČR. UL 2 – Část I [online]. Praha: Letecká amatérská asociace ČR, 2019. [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2%20%C4%8D%C3%A1st%20I_26.3.2019.pdf

- [11] PRZECZEK, J. Nové slitiny hliníku v konstrukci letadel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. [cit. 14.07.2020] 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Klement, CSc
- [12] ZÁLEŠÁK F. Konstrukce a projektování letadel: Kapitola 6. Kormidla příčného řízení. Skripta. Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1956.
- [13] BENEŠ. L. Letecké konstrukční oceli. [Online], [cit. 14.07.2020]
<http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/OCELI.pdf>
- [14] Carbon Steel Flange, Stainless Steel Flange, Open Die Forging - DHDZ [online]. Dostupné z: <https://www.shdhforging.com/cs/forged-cylinders.html>
- [15] ŠPUNDA, Jaromír. Stavebná mechanika a pevnost letounu: Část IV. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1971. [cit. 18.07.2020]
- [16] BARÁK, Karel. Teoretické podklady pro stanovení smykových toků vícedutinové konstrukce. Praha: Ústav letadlové techniky ČVUT v Praze, 2012. [cit. 18.07.2020]
- [17] FUNKE, Herbert. Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges. Rheda-Wiedenbrück, 2001. Disertační práce (Dr.-Ing.). Universität-GH Paderborn, Laboratorium für Konstruktionslehre, [cit. 20.07.2020].. Dostupné z: http://www.r-g.de/w/images/9/99/Dissertation_von_Herbert_Funke.pdf
- [18] VALENTA, Jakub. Návrh vzlakové klapky malého sportovního letounu. Praha, 2016 [cit. 20.6.2020]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73137>. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Ing. Jiří Brabec Ph.D.

Seznam obrázků

Obr. 1.: Křídlo dopravního letounu [6]	5
Obr. 2.: Ocasní plochy dopravního letadla [6].....	6
Obr. 3.: Rozdělení VOP [8].....	6
Obr. 4.: Výškové kormidlo	8
Obr. 5.: Závěsné kování na výškovém kormidle [12].....	9
Obr. 6.: Sendvičová konstrukce [4].....	9
Obr. 7.: Schéma výškového kormidla s používanými rozměry.....	18
Obr. 8.: Schéma spojitého zatížení na výškovém kormidle s reakcemi v závěsech	20
Obr. 9.: Popis součástí výškového kormidla	23
Obr. 10.: Nosník.....	24
Obr. 11.: Spodní potah s detailem na vnější žebro	24
Obr. 12.: 2. žebro	24
Obr. 13.: Žebírko.....	24
Obr. 14.: Kořenové žebro	25
Obr. 15.: Spodní potah s vnějším žebrem	25
Obr. 16.: Lem na náběžné hraně	25
Obr. 17.: Lem na odtokové hraně	25
Obr. 18.: Závěs u kořene	26
Obr. 19.: 2. závěs	26
Obr. 20.: Silové uspořádání	27
Obr. 21.: Schéma výškového kormidla se smykovými toky	30
Obr. 22.: Silové působení a zobrazení použitých rozměrů.....	31
Obr. 23.: Způsob odečtení rozměrů potahu.....	35
Obr. 24.: Použitý souřadnicový systém	37
Obr. 25.: Silové působení a zobrazení použitých rozměrů na vnějším závěsu.....	39
Obr. 26.: Silové působení a zobrazení použitých rozměrů na kořenovém závěsu.....	40

Seznam grafů

Graf č. 1: Velikost měrného zatížení na ploše vodorovných ocasních ploch	19
Graf č. 2: Průběh spojitého zatížení na výškovém kormidle	19
Graf č. 3: Průběh posouvající síly s reakcemi od závěsů na výškovém kormidle	21
Graf č. 4: Průběh ohybového momentu na výškovém kormidle	22
Graf č. 5: Průběh kroutícího momentu na výškovém kormidle	22
Graf č. 6: Průběh bezpečnosti pásnic po délce nosníku	30

Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Doplnkový součinitel bezpečnosti [10]:	15
Tabulka č. 2: Použité hodnoty pro výpočet zatížení	17
Tabulka č. 3: Výsledné hodnoty smykového napětí na VK	33
Tabulka č. 4: Výsledné hodnoty početního smykového napětí na VK	34
Tabulka č. 5: Bezpečnost ve smyku na VK	34
Tabulka č. 6: Kritická smyková napětí zadní části potahu	36
Tabulka č. 7: Kritické smykové napětí ve stojině	36
Tabulka č. 8: Hmotnosti a těžiště komponent	38
Tabulka č. 9: Kontrolní hodnoty pro kořenový závěs	41
Tabulka č. 10: Vstupní hodnoty pro páku ovládání	41
Tabulka č. 11: Výsledné hodnoty pro kontrolu páky ovládání	41

Seznam příloh

Příloha 1: CAD model výškového kormidla

Příloha 2: Soubor výpočtů