

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

KONSTRUKČNÍ NÁVRH SMĚROVÉHO KORMIDLA  
MALÉHO SPORTOVNÍHO LETOUNU

LETADLOVÁ TECHNIKA

PAVEL NOVOTNÝ

2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Novotný Jméno: Pavel Osobní číslo: 434237  
Fakulta/ústav: Fakulta strojní  
Zadávací katedra/ústav: Ústav letadlové techniky  
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství  
Studijní obor: bez oboru

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Konstrukční návrh směrového kormidla malého sportovního letounu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of rudder for light sport aircraft

Pokyny pro vypracování:

- Pro vypracování proveďte:
- konstrukční návrh směrového kormidla
  - stanovení zatížení kormidla
  - stanovení dimenze základních nosných prvků
  - provedení hmotový rozbor směrového kormidla

Seznam doporučené literatury:

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: 30.04.2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 13.08.2018

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

Jméno autora:	Pavel Novotný
Název bakalářské práce:	Konstrukční návrh směrového kormidla malého sportovního letounu
Rozsah bakalářské práce:	55 str., 34 obr., 11 tab., 7 grafů
Rok:	2018
Univerzita	České vysoké učení technické v Praze - Fakulta strojní
Ústav	Ústav letadlové techniky
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
Klíčová slova	Směrové kormidlo, zatížení, dimenzování, konstrukce,

**Anotace:**

Bakalářská práce se věnuje problematice návrhu směrového kormidla ultralehkého letounu řízeného aerodynamicky. Začátek práce je věnován teoretickým popisem konstrukce, který přechází ke konkrétnímu konstrukčnímu řešení směrového kormidla. Následuje stanovení zatížení a určení dimenzí základních prvků kormidla. Závěr práce je věnován hmotovému rozboru.

Author:	Pavel Novotný
Title of bachelro thesis:	small sport aircraft rudder desing
Extent:	55 pg., 34 fig., 11 tab., 7 graphs
Academic year:	2018
University:	Czech technical university in Prague
Department:	Department of Aerospace Engineering
Supervisor	Ing. Jiří Brabec, Ph.D
Key words:	Rudder, load, dimensioning, construction

### **Anotation:**

The bachelor thesis i focused on desing of rudder of small sport airplane. Beginning of work describes typical construction of rudder and its elements. Next part is about a load and dimensioning of basic elements of rudder. End of this work describes mass analysis.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Konstrukční návrh směrového kormidla malého sportovního letounu“ vypracoval samostatně a použil jsem pouze literární prameny uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne .....

.....

podpis

## Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Brabcovi, Ph.D. za jeho ochotu a cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za její podporu.

# Obsah

Seznam obrázků .....	9
Seznam tabulek .....	10
Seznam grafů.....	10
Seznam příloh.....	10
<b>1</b> Úvod.....	11
<b>2</b> Směrové kormidlo .....	12
<b>3</b> Konstrukce směrového kormidla .....	12
<b>3.1</b> Podélná soustava.....	14
3.1.1 Podélná stěna.....	14
3.1.2 Výztuhy (podélníky) .....	14
3.1.3 Nosníky .....	15
<b>3.2</b> Příčná soustava .....	17
3.2.1 Žebra.....	18
<b>3.3</b> Potah .....	20
3.3.1 Nenosné potahy .....	20
3.3.2 Nosné potahy.....	20
<b>3.4</b> Zavěšení kormidla .....	22
<b>4</b> Použitý materiál.....	24
4.1 Uhlíkový kompozit .....	24
4.2 Dural 2024-T3 .....	24
4.3 Ocel L-CM3.7.....	24
<b>5</b> Zatížení.....	24
5.1 Účel.....	25
5.1.1 Použití.....	25
5.2 Součinitele bezpečnosti .....	25
5.3 Součinitel bezpečnosti uhlíkového kompozitu .....	26
5.4 obálka obrátů (V-n diagram) .....	26
5.5 Zjednodušení výpočtového modelu.....	27
5.6 Jednotková zatížení zadní části letounu.....	28
5.7 Zatížení řídicích ploch .....	28
5.8 Obratová zatížení .....	28
5.9 Poryvová zatížení .....	29

5.10	Maximální zatížení.....	30
5.10.1	Zatížení při vychýlení kormidla .....	31
5.10.2	Zatížení při bočním poryvu .....	32
5.11	Spojité zatížení.....	33
5.12	Kroutící moment .....	34
5.13	Posouvající síla a ohybový moment .....	36
6	Dimenzování .....	39
6.1	Dimenzování pásnic nosníku.....	39
6.1.1	Zjednodušení geometrie pásnic a výška nosníku .....	39
6.1.2	Pevnostní výpočet .....	40
6.2	Dimenzování potahu.....	42
6.2.1	Smykové namáhání potahu .....	42
6.2.2	Stabilita.....	45
6.3	Kontrola ostatních namáhaných částí .....	48
6.3.1	Horní závěs.....	48
6.3.2	Spodní závěs.....	49
7	Hmotový rozbor .....	51
8	Závěr.....	54
9	Použité zdroje.....	55



## Seznam obrázků

obr. 1 umístění směrového kormidla [2] .....	12
obr. 2 Konstrukčně-silové uspořádání křídel [1].....	13
obr. 3 Směrové kormidlo.....	14
obr. 4 profily kovových výztuh [4] .....	15
obr. 5 průřez nosníku.....	16
obr. 6 Nosník .....	16
obr. 7 tvarování nosníku.....	17
obr. 8 orientace vláken v nosníku.....	17
obr. 9 Horní žebro .....	19
obr. 10 Spodní žebro .....	20
obr. 11 hlavní typy sendvičů [1].....	21
obr. 12 spoje sendvičových potahů [1].....	21
obr. 13 Rozdělení potahu .....	22
obr. 14 výřez v potahu.....	22
obr. 15 souměrný závěs výškového kormidla s omezujícími dorazy [4] .....	23
obr. 16 spodní závěs.....	23
obr. 17 horní závěs kormidla.....	23
obr. 18 Obálka obrátů [7] .....	26
obr. 19 Poryvová obálka [7].....	27
obr. 20 zjednodušení výpočtového modelu.....	27
obr. 21 zatěžovací obrazec při vychýlení kormidla [7].....	28
obr. 22 zatěžovací obrazec od poryvového zatížení [7] .....	29
obr. 23 Rozměry kormidla .....	30
obr. 24 zatěžovací obrazec působící na kormidlo při vychýlení kormidla.....	31
obr. 25 zatěžovací obrazec od bočního poryvu působící na kormidlo .....	32
obr. 26 těžiště spojitého zatížení .....	34
obr. 27 uvolnění směrového kormidla.....	36
obr. 28 zjednodušení geometrie pásnic .....	39
obr. 29 Uvažované silové poměry při dimenzování pásnic.....	40
obr. 30 Uvažované rozložení sil při dimenzování potahu .....	42
obr. 31 Smykové toky .....	42
obr. 32 rozměry pro stabilitu .....	45
obr. 33 plocha kontrolovaná na otlačení .....	48
obr. 34 Ohyb spodního závěsu .....	49

## Seznam tabulek

tab. 1 členění nosníků [4] .....	15
tab. 2 členění žeber [4] .....	18
tab. 3 smykové napětí .....	44
tab. 4 početní smykové napětí .....	44
tab. 5 Výsledky bezpečnosti .....	44
tab. 6 Jistoty kritického napětí .....	47
tab. 7 hmotový rozbor prvků z vícesměrné tkaniny .....	51
tab. 8 hmotový rozbor prvků z jednosměrné tkaniny .....	51
tab. 9 hmotový rozbor prvků z duralu .....	52
tab. 10 hmotový rozbor prvku vyrobeného z oceli .....	52
tab. 11 hmotový rozbor prvků z pěny .....	52
tab. 12 hmotnost spojovacího materiálu .....	53

## Seznam grafů

graf 1 průběh spojitého zatížení .....	33
graf 2 průběh spojitého zatížení v krutu .....	35
graf 3 průběh kroutícího momentu .....	36
graf 4 Průběh posouvající síly .....	38
graf 5 průběh ohybového momentu .....	38
graf 6 závislost $\kappa = fE1 \cdot s1E2 \cdot s2$ [10] .....	46
graf 7 závislost $K = fba$ [10] .....	46

## Seznam příloh

Příloha 1 CAD model směrového kormidla

Příloha 2 Soubor výpočtů

# 1 Úvod

Bakalářská práce se zabývá návrhem směrového kormidla. V první části najdeme teoretický popis konstrukce kormidla a jeho jednotlivých prvků, které pozvolna přechází v jeho konkrétní návrh, návrh jeho základních prvků a jejich uspořádání v konstrukci. Navržené kormidlo je dvoudutinové a sestaveno z nosníku, žeber a potahu. Tyto komponenty jsou vytvořeny z uhlíkového kompozitu. V bakalářské práci jsou také zmíněny předpisy, které letadlo pro svou způsobilost musí splňovat.

Druhá část byla věnována stanovení zatížení působícího na kormidlo dle předpisu UL-2. Jde především o stanovení posouvající síly, ohybového a kroutícího momentu. V této části bylo také zavedeno zjednodušení výpočtového modelu.

V následující části je řešeno dimenzování základních částí kormidla. Zde nejprve byly řešeny pásnice nosníku, které přenášejí ohybový moment stanovený v předchozí části. V této části je také řešena poloha elastické osy. Potah je dimenzován tak, aby vydržel přenos kroutícího momentu k elastické ose, a aby neztratil stabilitu.

Poslední část je pak věnována hmotovému rozboru, jehož základem je 3D model. Model slouží k zajištění objemů jednotlivých částí kormidla, ze kterého jsou pak stanoveny hmotnosti pomocí hustot jednotlivých materiálů. Pomocí modelu jsou také zjištěny polohy těžišť jednotlivých komponentů a také těžiště celého kormidla.

## 2 Směrové kormidlo

Ocasní plochy letounu dělíme na svislé (dále jen SOP) a vodorovné ocasní plochy (dále jen VOP). Toto dělení mluví samo za sebe, nicméně existují i ocasní plochy, které se tomuto členění vymykají. VOP bývají zpravidla rozděleny na nepohyblivý stabilizátor a pohyblivé výškové kormidlo. Obdobně SOP na nepohyblivou kýlovou plochu a na pohyblivé směrové kormidlo. [1]



obr. 1 umístění směrového kormidla [2]

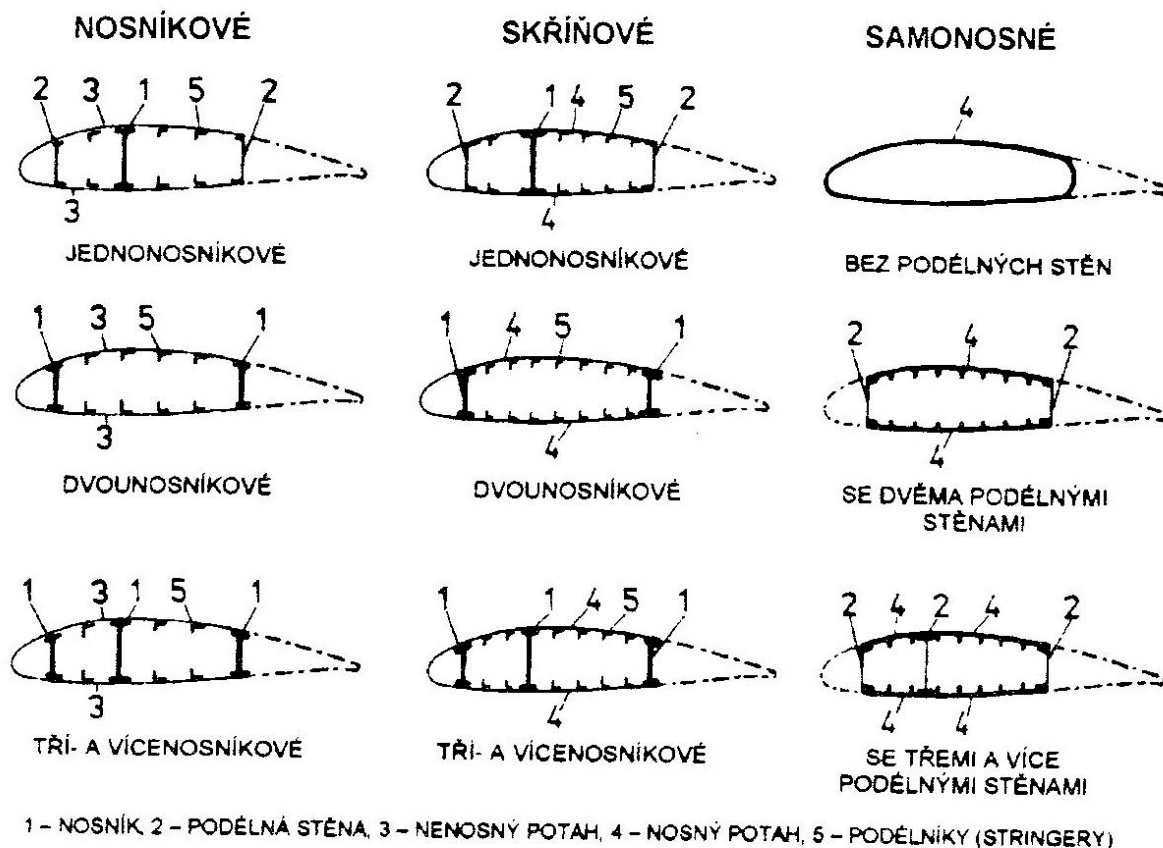
Na obr.1 je znázorněno časté umístění směrového kormidla, nicméně umístění a vzájemná poloha nejen ocasních ploch může být různá. [1]

Směrové kormidlo má značný vliv na vlastnosti letu. Hlavním účelem směrového kormidla je změna směru letounu, popřípadě při zapojení výškových kormidel letoun dokáže opisovat různé křivky letu. Výchylky kormidel bývají v rozmezí  $\pm 30^\circ$ , protože při větším vychýlení značně stoupá odpor. [3]

## 3 Konstrukce směrového kormidla

V této kapitole budou uvedeny používané konstrukce kormidel a konstrukce prvků, ze kterých se skládá. Také zde bude popsáno konkrétní řešení, jak celého kormidla, tak jeho jednotlivých prvků, pro letoun UL-39 Albi.

Pro konstrukci směrového kormidla platí to samé, co pro konstrukci křídla, protože směrové kormidlo, stejně jako ocasní plochy, jsou v podstatě jen zmenšenina křídla. Konstrukce směrového kormidla, potažmo křídla se dělí na potah a kostru. Celou konstrukci lze členit podle uspořádání jednotlivých prvků kostry podle obr.2. [1]



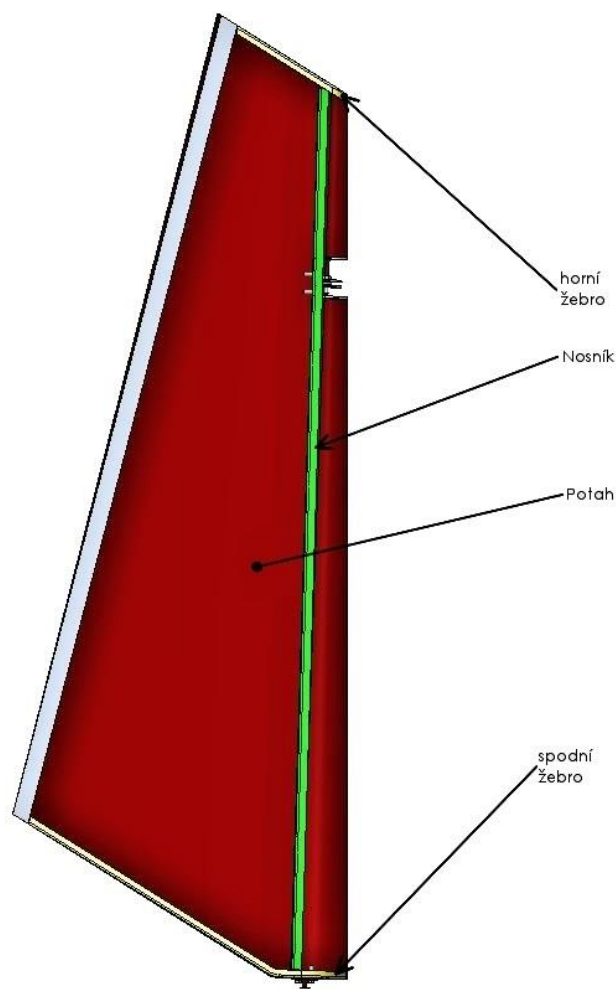
obr. 2 Konstrukčně-silové uspořádání křídel [1]

Jednonosníkové konstrukce jsou oproti dvou a vícenosníkovým konstrukcím krutově měkké, z tohoto důvodu je nutné kombinovat nosník s nosným potahem, popřípadě je nutno krut zachytit vnějšími výztuhami. Naopak oproti vícenosníkovým konstrukcím v nich bývá více místa pro umístění jiných systémů, jako je podvozek, nádrž apod. [1]

U skříňových konstrukcí krut zachycuje skříň tvořená nosníky, podélnými stěnami, podélníky a nosným potahem. [4]

Samonosné konstrukce mají výhodu ve vnitřním prostoru, který vznikne, protože křídlo je konstruováno bez vnitřních spojů. Tento prostor se může využít pro různé náklady, zároveň rozložením nosných prvků po obrysu křídla vzniká možnost dosáhnout lehčí konstrukce. [4]

V případě kormidla pro UL-39 Albi (viz obr. 3) bylo přistoupeno ke konstrukci s jedním nosníkem, dvěma žebry a nosným potahem, který je tvořen pravou a levou částí.



obr. 3 Směrové kormidlo

Dále je pak konstrukce tvořena pěnou, která uzavírá otvory vzniklé výřezem pro horní závěs a také je přidána na odtokovou hranu kvůli zachování tvaru profilu a kvůli zvětšení plochy lepení. Mezi plochami jednotlivých částí kormidla, které jsou k sobě lepeny je vytyčen prostor o 0,6 mm. Průřez kormidla je odtoková část profilu NACA 0012.

### 3.1 Podélná soustava

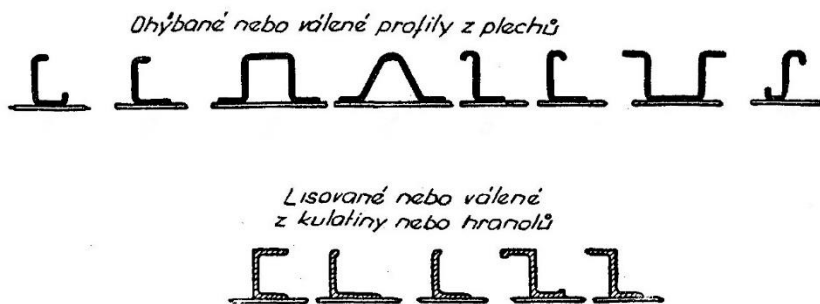
Podélnou soustavu konstrukce tvoří podélné stěny, výztuhy a nosníky. [4]

#### 3.1.1 Podélná stěna

Podélnou stěnou je část křídla, která má za úkol převzít posouvající sílu. Jsou to také prvky, které spojují spodní a vrchní část potahu křídla, v příčném průřezu tak vytvářejí komoru a díky tomu jsou schopny zachytit kroutící moment. [4]

#### 3.1.2 Výztuhy (podélníky)

Výztuhy jsou nejjednoduššími nosnými konstrukčními články. Dřevěné výztuhy bývají z latí s obdélníkovým nebo s lichoběžníkovým průřezem. Kovové výztuhy bývají zhotovovány lisováním nebo válením z plechů nejrůznějších profilů viz obr. 4. [4]



obr. 4 profily kovových výtuh [4]

V dnešní době jsou v oblibě kompozitové podélníky, a to zejména kvůli výborným mechanickým vlastnostem v kombinaci s malou hmotností.

### 3.1.3 Nosníky

Nosník je pevný nosný prvek, uložený podél křídla, který má za úkol převzít veškerou, nebo alespoň většinou část ohybového momentu a také posouvající sílu. Váha nosníků je závislá na typu konstrukce a na použitém materiálu, pohybuje se od 20 % do 50 % celkové váhy. Výška nosníku směrem od kořene ke konci bývá pozvolna snižována, protože tak respektuje průběh ohybového momentu. [4]

Co se týče konstrukce nosníku, může se dělit podle tabulky převzaté ze zdroje [4].

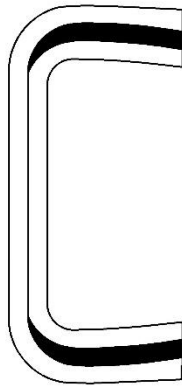
Plno- stěnné							
Přihra- ldové	Příčkové	Svislicové (s příčkami a svislicemi)			Mřížové		
Přihra- do-plno- stěnné							
Průřezy	S jednou stojinou				S dvěma stojinami		S několika stojinami
	tvary I	tvary E	trubkové	plné	skříňové	trubkové	

tab. 1 členění nosníků [4]

**Průřezy** používané se dělí na tvary I, nebo E (C), plné skříňové a trubkové. Průřez nosníku I, stejně jako C je tvořen jednou stojinou a dvěma pásnicemi, tento průřez je velice výhodný z hlediska charakteristiky rozložení napětí v průřezu při ohybu. Plný průřez je oproti nim právě z tohoto důvodu nevýhodný, protože prostřední část je zbytečně předimenzovaná a představuje nepotřebnou zátěž. Nosníky s plnostěnným průřezem byly používány v minulosti a byly zhotovovány ze dřeva. Skříňové nebo trubkové nosníky přebírají výhodný tvar I profilu a zároveň přidávají velký potenciál při přenášení krutu. [4]

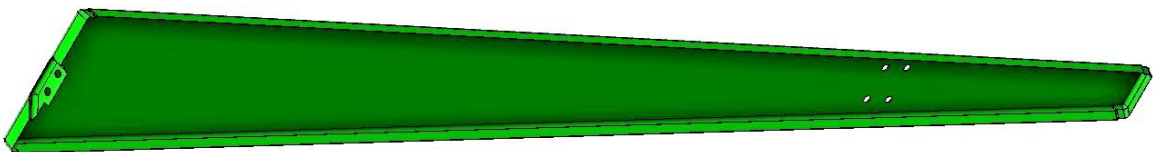
Dále se nosníky dělí na plnostěnné a příhradové. Příhradové nosníky bývají výhodné při velké výšce profilu, jinak se používají převážně plnostěnné. [4]

V našem případě se jedná o nosník plnostěnný s průřezem tvaru C. Nosník je zhotoven ze dvou vrstev vícesměrné tkaniny, mezi něž jsou vloženy pásnice, které jsou zhotoveny z jednosměrné tkaniny, jak je ukázáno na obr. 5.



obr. 5 průřez nosníku

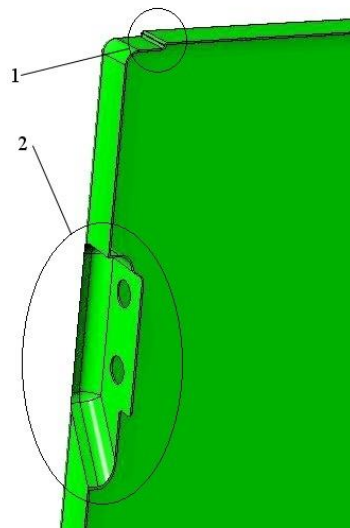
Černou barvou jsou znázorněny pásnice z jednosměrné tkaniny a bílou barvou je znázorněna vícesměrná tkanina.



obr. 6 Nosník

Celý nosník můžeme vidět na obr. 6. Co se týče tvaru nosníku, pásnice jsou tvarovány tak, aby kopírovaly tvar potahu v místě, kde na něj budou přilepeny. U kořene a na konci je stojina nosníku snížena z obou stran o 1 mm (viz obr. 6 místo 1) tak, aby zbyl dostatek místa pro žebra, která zabírají 0,4 mm a také na lepidlo, kvůli kterému jsou plochy od sebe odsazeny o 0,6 mm.

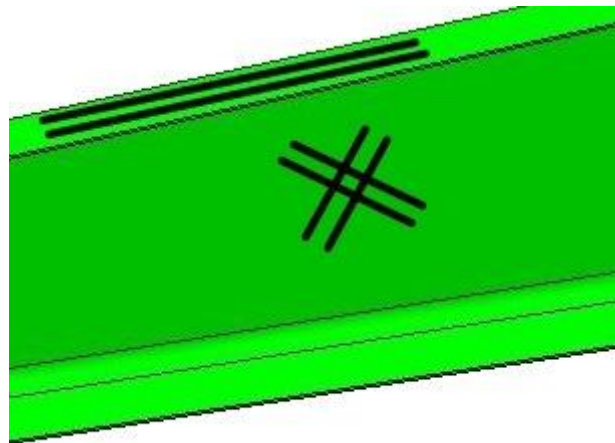




obr. 7 tvarování nosníku

Na obr. 7 v místě 2 je v nosníku vytvořen prostor pro páku a dva otvory pro šrouby, které připojují spodní závěs. Otvory v horní polovině nosníku jsou pro 4 šrouby, které připojují horní závěs kormidla.

Orientace vláken tkaniny, jak vícesměrné, tak jednosměrné, je znázorněn v obr. 8. Vlákná ve stojině jsou orientována pod úhlem  $45^\circ$  k délce nosníku, tedy co nejvýhodněji pro zachycení smykového namáhání. Vlákná pásnic jsou zas orientována tak, aby zachytila ohyb nosníku tedy ve směru jeho délky.



obr. 8 orientace vláken v nosníku

### 3.2 Příčná soustava

Příčná soustava se skládá ze zesílených a normálních žeber a z rozpěr. [4]

### 3.2.1 Žebra

Žebra jsou příčné prvky křídla, které spojují podélné prvky a potah a přenášejí aerodynamické síly z potahu [4]

Úkolem žebířek, je udržovat tvar profilu křídla, přenášet část posouvající síly, vzniklé aerodynamickým zatížením z potahu na nosníky a stěny, ale také přejímají síly způsobené krutem křídla a slouží jako podpory výztuhám. Váha soustavy žebířek se zpravidla pohybuje mezi 10 až 14 % váhy křídla. Žebra můžeme dělit, jak podle konstrukčních, tak i podle technologických znaků. Takovéto rozřídění je znázorněno v tabulce tab. 2, která je převzata ze zdroje [4]

Konstrukční schemata		Pinostěnná		Příhradová		Příhradoplnostěnná	
		<p><i>Panelová</i></p>	<p><i>Jedno- a dvoustěnná</i></p>	<p><i>S ořivkami a svislicemi s páskami</i></p>			
T y p y	podle konstrukce		nedělená				<p><i>Představuje jeden konstrukční celek po celé délce tělívky</i></p>
	dělená		po tělívě		<p><i>Přední Střední Zадní</i> <i>Skládá se z jednotlivých dílů, které se vestaví buď všechny nebo jen některé k místnímu zesílení</i></p>		
	po výšce a tělívě		<p><i>Skládá se z jednotlivých panelů</i></p>		Nepoužívá se		
	podle umístění		přímá				
		diagonální					
podle účelu		obyčejná		Skládají se z horního a dolního pásu, spojených stojinou nebo mříží, a slouží k zajištění tvaru profilu a k přenášení vzdušných zatížení na podélné články konstrukce			
zesílená				Umísťují se v místech, kde je zesílená konstrukce, spojovací kování, přípevnění podvozku, výzbroje a j.			

tab. 2 členění žebířek [4]

**Plnostěnná žebra** jsou většinou jednostojinová. Stojina žebra je většinou opatřena výřezy pro snížení váhy a pro vedení řízení. Otvory jsou pro větší stabilitu lemovány. Lem je vytvořen ohnutím okraje otvoru a často se přidávají i stojky. Plnostěnné žebro se dále skládá z pásnice, která tvoří profil žebra. [4]

**Příhradová žebra** mají ekvivalentní vlastnosti jako příhradové nosníky. Uplatňují se v křídlech, která mají velkou tloušťku profilu. U takových křídel vycházejí příhradová žebra lehčí než plnostěnná, avšak jsou složitější na výrobu. [4]

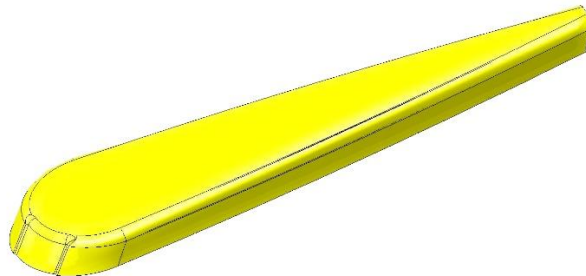
Žebra **příhradoplnostěnná** kombinují vlastnosti plnostěnných a příhradových žeber. Většinou jsou uspořádána tak, že v místě, kde má křídlo největší tloušťku profilu, je žebro příhradové a v místech, kde je tloušťka menší, je žebro plnostěnné. [4]

**Dělená žebra** se vyrábí zejména kvůli usnadnění výroby (lepší manipulace apod.). [4]

Žebra se také dělí na **obyčejná** a **zesílená**. Obyčejná žebra udržují tvar a přejímají síly působící na potah. Zesílená žebra k tomuto úkolu přejímají osamělá zatížení např. od podvozku, od hnací skupiny apod. [4]

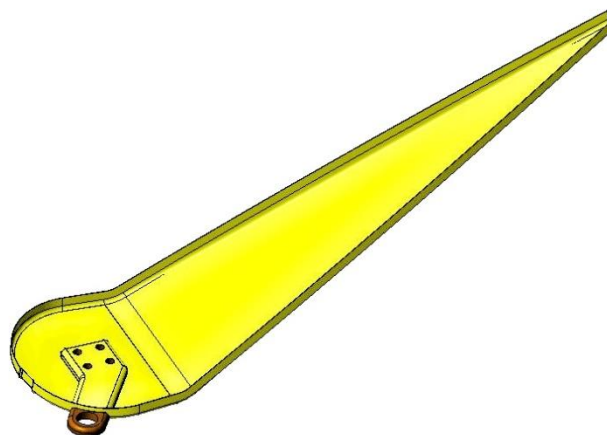
V našem případě jsou žebra vyrobena ze dvou vrstev vícesměrné tkaniny, stejně jako je použita u nosníků. Samotný tvar žeber je pak přizpůsoben tak, aby vyhovoval profilu a respektoval tvary ostatních součástí kormidla.

Obě žebra mají v přední části prostor, který je ponechán pro zámek levé části potahu, v zadní části jsou žebra seříznuta tak, aby byl ponechán prostor pro pěnu, tvořící odtokovou hranu. Žebro pak dále tvoří lem, který žebro spojí s potahem pomocí lepidla.



obr. 9 Horní žebro

Na obr. 9 je znázorněno horní žebro. Spodní žebro vyobrazené na obr. 10 je tvarově složitější. V přední části je žebro ohnuto tak, aby vzniklá plocha byla kolmá na osu otáčení kormidla. Na této kolmé ploše je mezi dvě vrstvy vícesměrné tkaniny vložena páka. Tato páka je vyrobena také z vícesměrné tkaniny, vrstvené do požadované tloušťky. V žebře jsou vyvrtány 4 díry, vedoucí skrz páku, sloužící k přichycení spodního závěsu. Páka tedy slouží také jako výztuha.



obr. 10 Spodní žebro

### 3.3 Potah

Potah pokrývá kostru křídla a tvoří jeho povrch. Jeho úkolem je tento povrch zachovat a zachytit aerodynamická zatížení. Důležitá je drsnost, aerodynamické charakteristiky křídla totiž značně ovlivňuje drsnost povrchu potahu. Drsnost, vlnitost, nebo nerovnosti potahu zvyšují odpor křídla mohou podstatně snížit maximální rychlost letounu. [4]

#### 3.3.1 Nenosné potahy

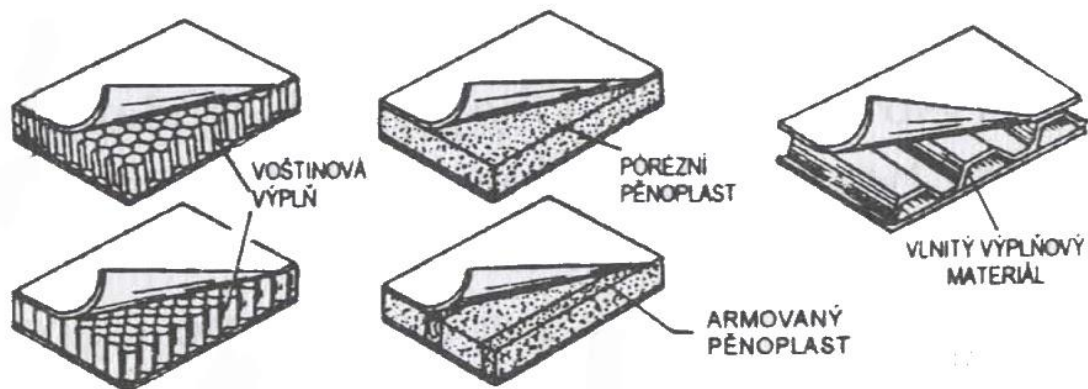
Nenosný potah je například plátno. Vzdušná zatížení jsou přenášena membránovým účinkem z polí, která jsou vytyčená žebry a výztuhami, na nosné elementy konstrukce. [1]

#### 3.3.2 Nosné potahy

Mohou se dále dělit na vyztužené a samonosné. Vyztužené potahy jsou podepřeny kostrou křídla (tzn. nosníky, výztuhy, žebra, ...). Samonosné potahy jsou potahy, které udrží svůj tvar bez kostry křídla. Samonosné se dále dělí podle typu zpracování na *monolitní* a *sendvičové*. [1]

Monolitní potahy jsou potahy tvořené jedním kusem, tedy bez veškerých spojů. Výhodou tohoto potahu je zvýšení únavové životnosti například oproti potahům s nýtovanými spoji. [1]

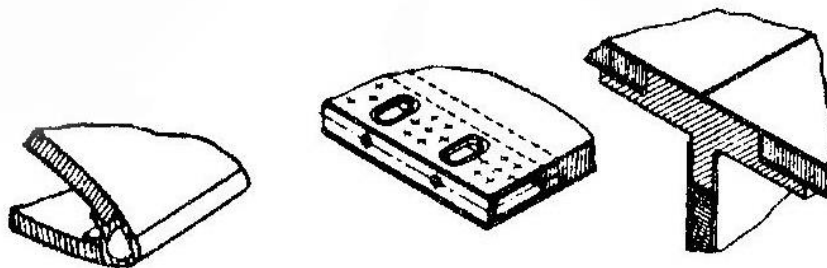
Vrstvené (sendvičové) potahy jsou tvořeny dvěma deskami, mezi které je vložena a přilepena výplň, čímž se zvýší kritické napětí ztráty stability tenkých desek, namáhaných tlakem, nebo smykem. Podle použité výplně se dělí na *voštinové*, *pěnové* a *s vlnitou výplní* viz obr. 11. [1]



obr. 11 hlavní typy sendvičů [1]

Voštinové sendviče se vyráběly převážně z hliníku (pro výplň i potah stejný materiál). Pěnové sendvičové potahy se vyráběly z pěnoplastu (výplň) a potahy z kovových slitin (slitiny hliníku nebo mědi). Pro sendviče s jádrem z vlnitého plechu se používají zejména oceli a slitiny titanu. [1]

U sendvičových potahů je nutno zdůraznit, že zatížení přenáší pouze potah, výplň jen drží tvar. Výplň nesmí být zatěžována ani silou spojovacích elementů (předpětí šroubů), působením této síly by se totiž zborčila. Důležité jsou také spoje těchto potahů, které musí být konstruovány tak, aby směr komurek voštiny nebyl shodný s působící silou viz obr. 12. [1]



obr. 12 spoje sendvičových potahů [1]

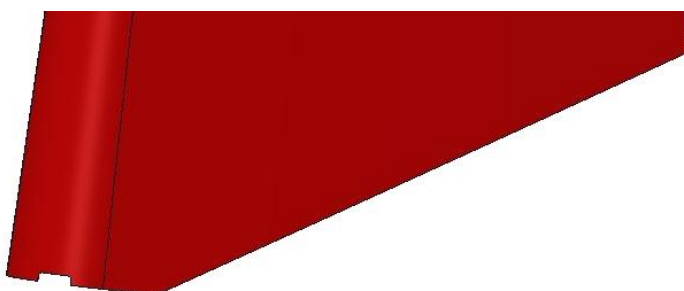
Výhody sendvičových potahů spočívají ve vlastnostech při zatížení. Potah nemění tvar, při zatížení je hladký a tuhý. Nevýhody sendvičových potahů jsou zejména ve složité výrobě, dále pak velmi složitá kontrola a téměř nemožná oprava v polním provozu. [1]

V našem případě je potah vytvořen ze dvou částí. Každá tato část tvoří jednu polovinu potahu kormidla. Na levé části je pak přidělán zámek, ke kterému se pomocí lepidla připojí pravá část.



obr. 13 Rozdělení potahu

V horní polovině potahu můžeme vidět výřez pro závěs. Výřez je tvořen tak, aby se do něj vešel závěs a zbyl dostatek místa i na demontáž.



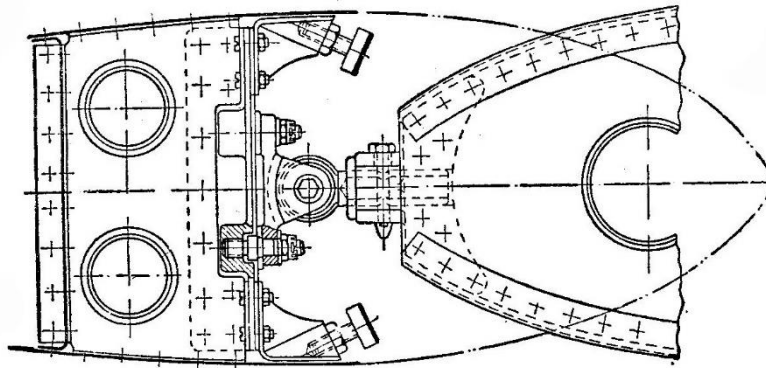
obr. 14 výřez v potahu

Co se týče spodní části, potah kopíruje tvar spodního žebra, v přední části je seříznut a také je zde vytvořen výřez pro páku.

### 3.4 Zavěšení kormidla

Kormidlo se připojuje ke kýlu přes naklápečí ložiska. Čelní závěsy se používají u velmi tuhých a také u velmi pružných kormidel. Pokud je kormidlo dlouhé bývá vhodné ho rozdělit na dvě nebo více částí, čímž se zamezí jeho vzpříčení. [4]

Závěs kormidla může vypadat například takto:



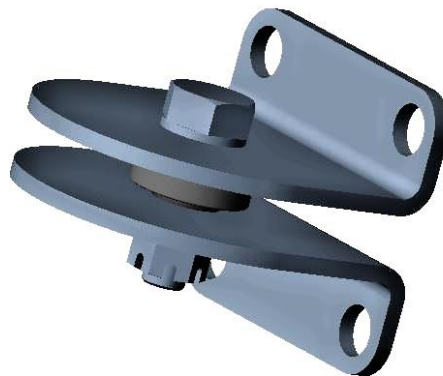
obr. 15 souměrný závěs výškového kormidla s omezujícími dorazy [4]

V případě našeho kormidla jsou použity závěsy dva. Spodní závěs je přichycen šrouby ke spodnímu žebrou. Závěs tvoří deska s čepem a na čep je pak dáno ložisko. Tento závěs je vytvořen z oceli L-CM3.7.



obr. 16 spodní závěs

Horní závěs tvoří dva ohnuté duralové plechy, mezi kterými je vložen lícovaný šroub, na který je vloženo ložisko, a který je zajištěn korunovou maticí.



obr. 17 horní závěs kormidla

Plechy jsou vytvořeny z duralu 2024-T3.

## 4 Použitý materiál

V této kapitole bude zmíněn materiál a jeho vlastnosti důležité pro provedení výpočtů v dalších kapitolách.

### 4.1 Uhlíkový kompozit

Většina dílů kormidla je vytvořena z kompozitu, tvořeného uhlíkovou tkaninou a epoxidovou pryskyřicí ve formě prepregu. Kompozit dosahuje výborných mechanických vlastností. Je to materiál v křehkém stavu, což znamená, že má odlišné chování při zatěžování tlakem a tahem.

Důležité vlastnosti jednosměrné tkaniny:

- Pevnost v tahu  $\sigma_{Pt} = 1700 \text{ MPa}$
- Pevnost v tlaku  $\sigma_{Pd} = 900 \text{ MPa}$

V našem případě je důležitá právě ta menší hodnota, na kterou bude nutné pásnice dimenzovat, protože kormidlo bude zatěžováno z obou stran, tudíž obě pásnice budou zatěžovány, jak tahem, tak i tlakem.

Důležité vlastnosti vícesměrné tkaniny:

- Pevnost ve smyku  $\tau_p = 120 \text{ MPa}$
- Youngův modul pružnosti v tahu  $E = 74160 \text{ MPa}$

Vlastnosti, jak jednosměrné, tak vícesměrné tkaniny byly získány ze zdroje [5].

**Technologie** výroby je takzvané kladení prepregů. Jednotlivé vrstvy prepregu jsou kladeny do otevřené formy. Vše je hermeticky uzavřené v elastomerním vaku a vloženo do autoklávu. V autoklavu se díl ohřeje na teplotu 120 °C až 200 °C, což zajistí vytvrzování pryskyřice. Zároveň se v autoklavu vyvodí přetlak, v hodnotách desetin MPa, což společně s odváděcí a sací vrstvou zajistí minimální obsah pryskyřice v součásti. [6]

### 4.2 Dural 2024-T3

Dalším použitým materiálem je dural 2024-T3. Tento materiál se používá jen ve vytvrzeném stavu. V případě tohoto materiálu bude nutné znát pouze mez pevnosti v tahu.

- Mez pevnosti v tahu  $\sigma_p = 434 \text{ MPa}$

### 4.3 Ocel L-CM3.7

Je to letecká konstrukční ocel s příměsí molybdenu a chromu.

- Mez pevností v tahu  $\sigma_p = 880 \text{ MPa}$

## 5 Zatížení

Na začátku této kapitoly budou zmíněny důležité předpisy, které musí UL-letoun splňovat. V další části budou stanovena zatížení, působící na kormidlo.



## 5.1 Účel

Stavební předpis určuje minimální požadavky ultralehkých letounů, které jsou řízeny aerodynamicky, k letové způsobilosti, které je nutné splnit kvůli bezpečnosti letového provozu. [7]

### 5.1.1 Použití

Tyto požadavky se podle zdroje [7] týkají ultralehkých letounů:

- 1) jejichž vzletová hmotnost nepřevyšuje 450 kg u dvoumístných
- 2) jejichž vzletová hmotnost nepřevyšuje 300 kg u jednomístných
- 3) jejichž minimální rychlost  $V_{SO}$  není vyšší než 65 km/hod

[7]

UL letouny smějí být používány pouze pro neakrobatický provoz.

## 5.2 Součinitele bezpečnosti

Součinitele bezpečnosti tak, jak je uvádí zdroj [7]:

- 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 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 (mimo valivých ložisek)	6,7
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

[7]

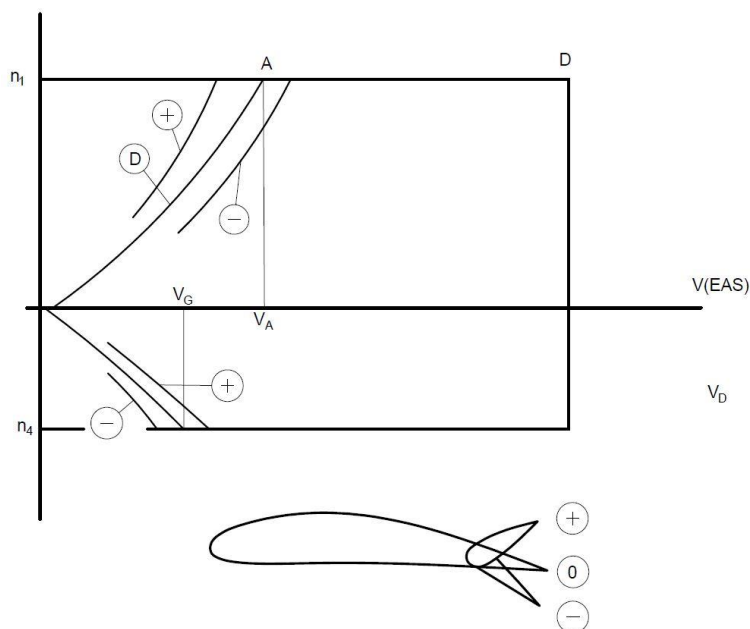
### 5.3 Součinitel bezpečnosti uhlíkového kompozitu

Celkový součinitel bezpečnosti uhlíkového kompozitu má dvě složky. Základní součinitel bezpečnosti 1,5 a součinitel vlivu vlhkosti. 1,25. Pokud se tyto dva součinitele vynásobí, vznikne celkový součinitel bezpečnosti 1,875.

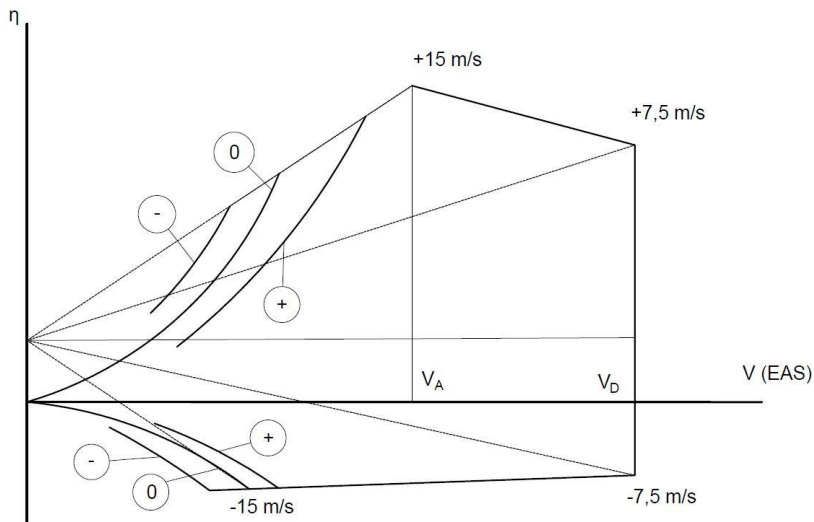
### 5.4 obálka obrátů (V-n diagram)

Obálka obrátů a poryvová obálka dle zdroje [7]:

- a) splnění požadavků na pevnost konstrukce musí být prokázáno pro všechny kombinace rychlostí letu a násobků zatížení, nacházejících se na hraniční křivce a uvnitř obálky zatížení popsané v bodě b)
- b) obálka obrátů  
konfigurace obrátů:  
vztlakové klapky v cestovní poloze
- c) poryvová obálka  
konfigurace:
  - 1) Při návrhové rychlosti  $v_A$  musí být UL-letoun schopen snést kladný poryv (nahoru) a negativní poryv (dolů) do velikosti 15 m/s, který působí kolmo na dráhu letu.
  - 2) Při návrhové rychlosti  $v_D$  musí být UL-letoun schopen snést kladný poryv (nahoru) a negativní poryv (dolů) do velikosti 7,5 m/s, který působí kolmo na dráhu letu.



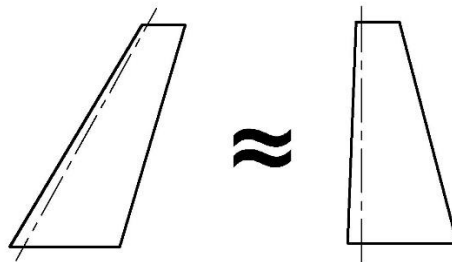
obr. 18 Obálka obrátů [7]



obr. 19 Poryvová obálka [7]

## 5.5 Zjednodušení výpočtového modelu

Před samotným zahájením výpočtů je nutné zmínit zjednodušení výpočtového modelu, který spočívá v zanedbání „úhlu šípu“.



obr. 20 zjednodušení výpočtového modelu

Slovní spojení úhel šípu bylo dáno do uvozovek, protože úhel šípu se měří od čtvrtinové čáry křídla, kdežto v tomto případě bylo kormidlo narovnáno podle osy otáčení kormidla. Toto zjednodušení bude mít za následek zanedbání malé části délky osy otáčení a také malé části plochy kormidla, nicméně tyto rozdíly by na zatížení a následné dimenzování neměly mít větší dopad.

## 5.6 Jednotková zatížení zadní části letounu

Není-li přístup k přesnějším výpočtům letounů, lze provést výpočty zatížení jednotlivých částí konstrukce podle níže uvedených náhradních metod. [7]

## 5.7 Zatížení řídicích ploch

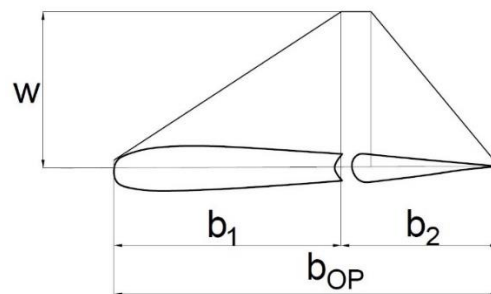
Dle zdroje [7] musí být všechny soustavy řízení včetně dorazů a jejich upevňovací konstrukce s řídicí plochou navrženy na zatížení, které odpovídá přinejmenším 125 % zatížení řídicích ploch.

## 5.8 Obratová zatížení

SOP musí vydržet obratová zatížení, která se vyskytují při následujících podmínkách:

- Náhlá maximální výchylka směrového řízení v rychlosti  $V_A$ .
- Jedna třetina maximální výchylky směrového řízení při rychlosti  $V_D$ .

Výpočet síly působící na SOP, která je způsobena vychýlením kormidla, je dána vztahem (5.1), který je uveden ve zdroji [7] v příloze I:



obr. 21 zatěžovací obrazec při vychýlení kormidla [7]

$$W^{\text{=}} = 220 + 20,5 \cdot \frac{G}{S} \quad (5.1) [7]$$

$W^{\text{=}}$  – průměrná hodnota  $W$

$G = 472,5 \text{ kg}$  – hmotnost letounu

$S = 8,9 \text{ m}^2$  – plocha křídla

$$W^{\text{=}} = 220 + 20,5 \cdot \frac{472,5}{8,9} = 1308,34 \text{ Pa}$$

## 5.9 Poryvová zatížení

- SOP musí vydržet boční a poryvová zatížení (jde o zatížení způsobené změnou úhlu náběhu).
- Pokud není k dispozici přesnější výpočet, použijeme následující, který je převzat ze zdroje [7]:

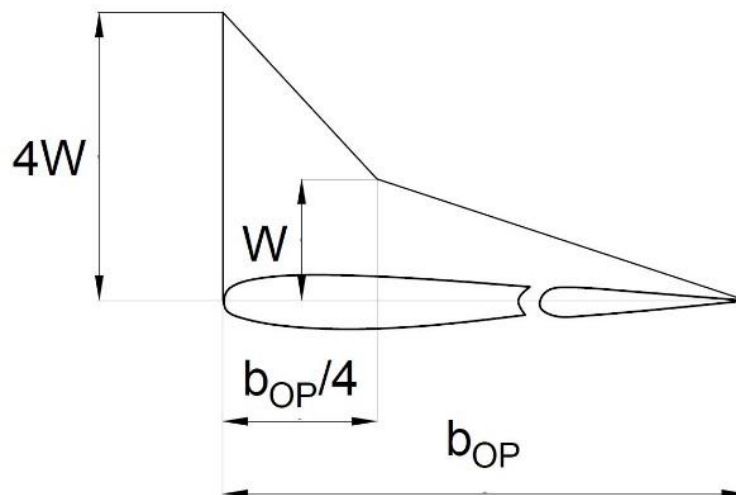
$$Y_{SOP_{obr}} = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S_{SOP} \cdot \Delta c_y \cdot k_{SOP} \quad (5.2) [7]$$

- $P_{SOP}$  Síla na svislé ocasní plochy
- $p_0 = 1,225 \frac{kg}{m^3}$  hustota vzduchu při hladině moře
- $k_{SOP} = 1,2$  zmírňující součinitel
- $S_{SOP} = 1,2 m^2$  plocha SOP
- $a_{SOP} = 2,55 \frac{1}{rad}$  sklon křivky vztlaku SOP
- $U(v_A) = 15 \frac{m}{s}, U(v_B) = 7,5 \frac{m}{s}$  Rychlost poryvu
- $v_A = 44,4 \frac{m}{s}, v_D = 95 \frac{m}{s}$  Návrhové rychlosti letu

$$P_{SOP}(v_A) = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 1,2 \cdot 2,55 \cdot 1,2 \cdot 15 \cdot 44,4 = 1497,9 N$$

$$P_{SOP}(v_B) = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 1,2 \cdot 2,55 \cdot 1,2 \cdot 7,5 \cdot 95 = 1602,5 N$$

- Zatěžovací obrazec působící na SOP při poryvovém zatížení, zdroj [7] příloha I.

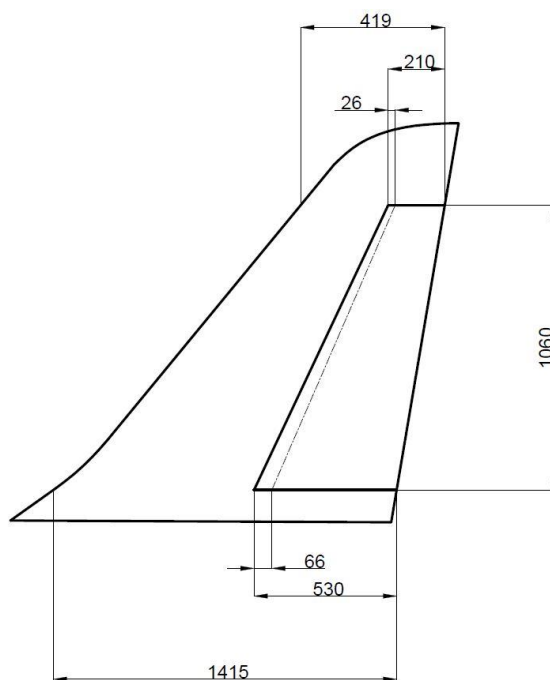


obr. 22 zatěžovací obrazec od poryvového zatížení [7]

## 5.10 Maximální zatížení

Nejprve je nutné vybrat zatížení, které působí na kormidlo a podle kterého budou určeny dimenze základních prvků v kapitole dimenzování. Vzhledem k tomu, že výše byly definovány dvě varianty zatížení, je nutné zjistit, při které je zatížení kormidla větší.

Pro výpočet zatížení bude nutné znát geometrii ocasních ploch.

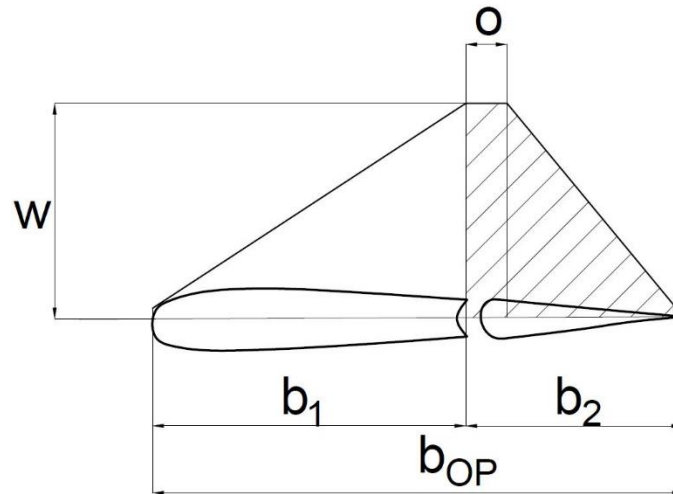


obr. 23 Rozměry kormidla

Pro parametrizaci byla doplněna tabulka doplnil tabulku.

Geometrie				
kořen			konec	
b1	921	mm	209	mm
b2	530	mm	210	mm
o	66	mm	26	mm
b <sub>op</sub>	1451	mm	419	mm
L	1060			mm

### 5.10.1 Zatížení při vychýlení kormidla



obr. 24 zatěžovací obrazec působící na kormidlo při vychýlení kormidla

Vyšrafovaná část na obrázku značí část zatěžovacího obrazce, která působí na kormidlo. V tomto obrázku je však neznámý rozměr  $W$ , ten vypočteme pomocí průměrné hodnoty  $W^=$  a pomocí obsahu plochy.

$$\frac{1}{2} W \cdot b_1 + \frac{1}{2} \cdot (b_2 - o) + o \cdot w = W^= \cdot b \quad (5.3)$$

$$W = \frac{W^= \cdot b_{op}}{\frac{1}{2} \cdot b_1 + \frac{1}{2} \cdot (b_2 - o) + o} \quad (5.4)$$

$$W = \frac{1308,3 \cdot 0,419}{\frac{1}{2} \cdot 0,921 + \frac{1}{2} \cdot (0,921 - 0,066) + 0,066}$$

- $W_1 = 2503 \text{ Pa}$  je výška zatěžovacího obrazce u kořene kormidla
- $W_2 = 2464 \text{ Pa}$  je výška zatěžovacího obrazce na konci kormidla a vypočte se obdobně.

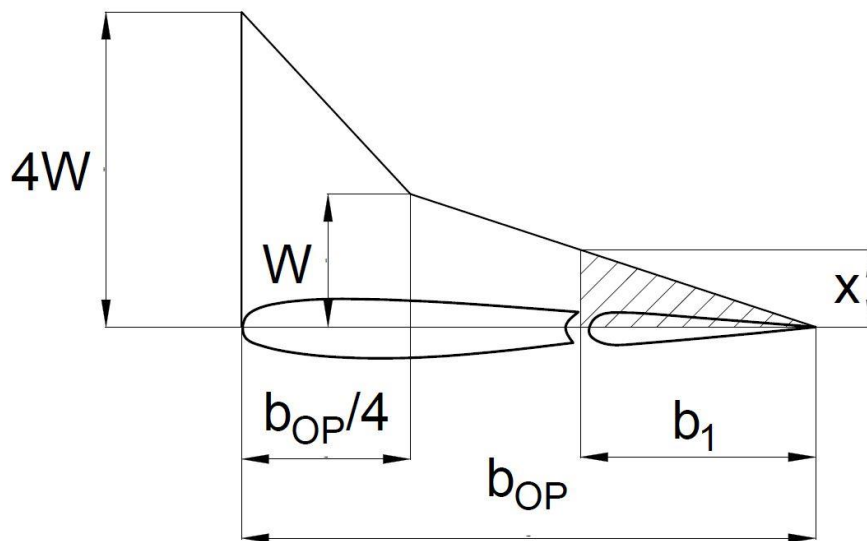
$S$  je plocha zatěžovacího obrazce působící na kormidlo a určí se dle vztahu (5.5).

$$S = o \cdot W + \frac{1}{2} (b_2 - o) \cdot W \quad (5.5)$$

$S_1$  je plocha zatěžovacího obrazce působící na kormidlo u kořene.

$$S_1 = 0,066 \cdot 2503 + \frac{1}{2} \cdot (0,921 - 0,066) \cdot 2503 = 745,8 \frac{N}{m}$$

### 5.10.2 Zatížení při bočním poryvu



obr. 25 zatěžovací obrazec od bočního poryvu působící na kormidlo

Tento případ se bude řešit obdobně jako předchozí. Již z rozložení sil dle obrázku lze předpokládat, že zatížení kormidla touto variantou bude menší než variantou vychýlení kormidla.

Zde, stejně jako v předchozí variantě, je také nejprve nutné určit rozměr  $W$ , který lze získat ze znalosti rozměru  $W^=$ , tedy pomocí vztahu:

$$\frac{3}{8} \cdot b_{OP} \cdot W + \frac{1}{4} b_{OP} \cdot W + \frac{1}{8} \cdot b_{OP} \cdot W = W^= \cdot b_{OP} \quad (5.6)$$

Z čehož vyjádříme, že  $W = W^= = 1308,3 \text{ Pa}$ .

Pro zjištění obsahu plochy byl zaveden nový rozměr  $x$ , který bude vyjádřen z podobnosti dvou trojúhelníků, tedy dle vztahu:

$$x = \frac{W \cdot b_2}{\frac{3}{4} \cdot b_{OP}} \quad (5.7)$$

$$x = \frac{1308,34 \cdot 0,530}{\frac{3}{4} \cdot 1,451} = 637 \text{ Pa}$$

Následně určíme obsah trojúhelníku:

$$S = \frac{1}{2} \cdot x \cdot b_1 \quad (5.8)$$

$$S_1 = \frac{1}{2} \cdot 637 \cdot 0,921 = 168,9 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (5.9)$$

Při porovnání výsledků obou variant spojitého zatížení u kořene kormidla, je zřejmé, že zatížení kormidla při jeho vychýlení je větší než při zatížení bočním poryvem. Při lineárním průběhu



spojitého zatížení, které klesá úměrně se zmenšujícími se rozměry průřezu kormidla, je zřejmé, že poryvové zatížení je menší než zatížení při vychýlení kormidla.

## 5.11 Spojité zatížení

Pro určení průběhu spojitého zatížení, je nutné znát obsah zatěžujícího obrazce nejen u kořene kormidla, ale i na konci. Pro výpočet bude použit vztah (5.5) z kapitoly 5.10.1, ve které byla určena velikost spojitého zatížení u kořene kormidla. Dále je nutno dopočítat zatížení na konci kormidla.

$$S_2 = 0,021 \cdot 2464 + \frac{1}{2} \cdot (0,209 - 0,026) \cdot 2464 = 241,5 \frac{N}{m} \quad (5.10)$$

Tyto dvě plochy zatěžujícího obrazce jsou výchozí hodnoty pro stanovení spojitého zatížení.

Následně bude určeno spojité zatížení po celé délce kormidla jako funkce  $q(z)$ .

$$q(z) = q_1 - k \cdot z \quad (5.11)$$

- $q_1 = S_1$
- $q_0 = S_2$
- $k$  je směrnice lineárního členu a vypočte se podle vztahu (6.13)

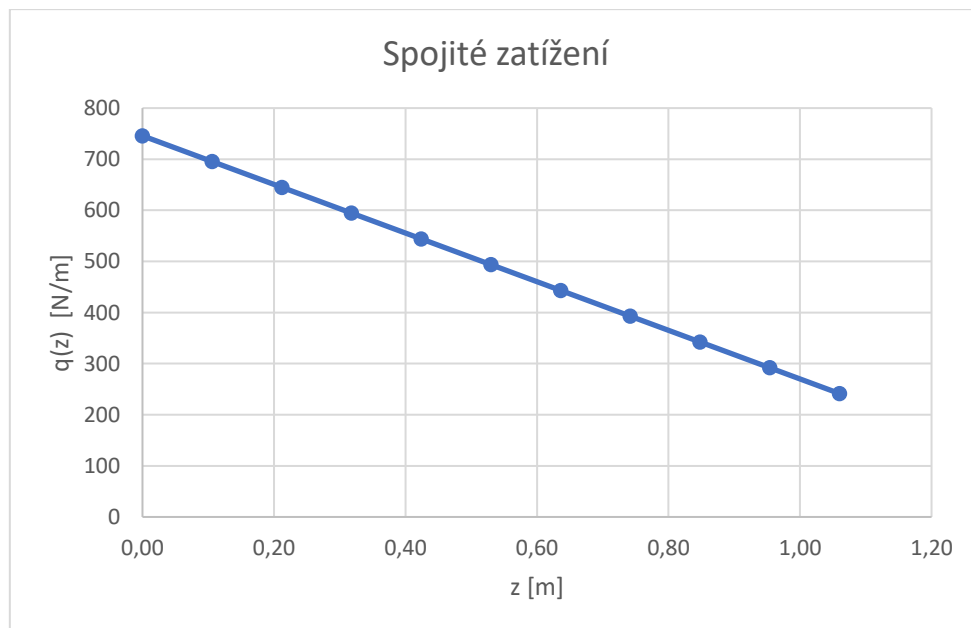
$$k = \frac{q_1 - q_0}{L} \quad (5.12)$$

$$k = \frac{745,8 - 241,5}{1,060} = 475,8 \quad (5.13)$$

Pokud pak dosadíme do vztahu (5.12), dostaneme směrnici spojitého zatížení.

$$q(z) = 745,8 - 475,8 \cdot z \quad (5.14)$$

Graf spojitého zatížení pak vypadá takto:

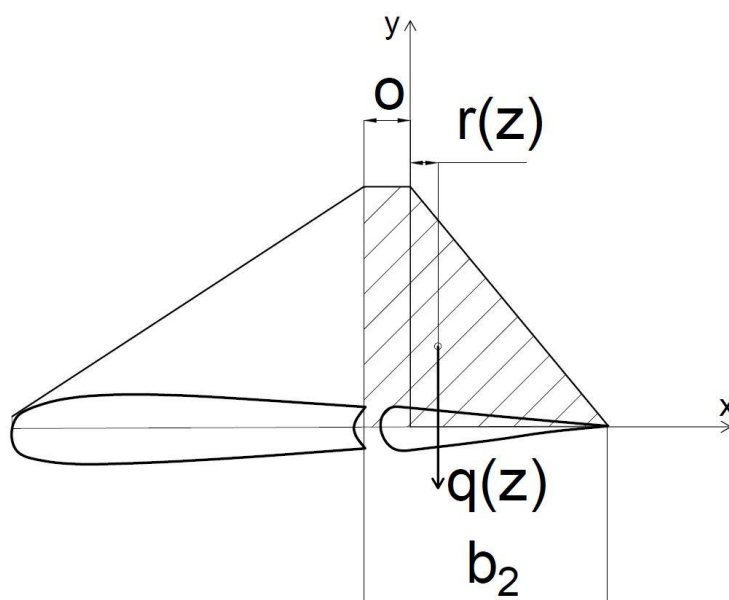


graf 1 průběh spojitého zatížení

## 5.12 Kroutící moment

K určení průběhu kroutícího momentu je nutné nejprve určit vzdálenost (rameno) mezi osou otáčení a působištem výslednice  $q(z)$  v každém řezu, které bude v jeho těžišti. Rameno  $r(z)$  je vyobrazeno na obr. 28.

Rameno bude závislé na souřadnici  $z$  a vzhledem k povaze spojitého zatížení a ke geometrii kormidla zle předpokládat lineární průběh, který se bude směrem ke konci kormidla zmenšovat.



obr. 26 těžiště spojitého zatížení

Funkce  $r(z)$  ramene bude vypadat následujícím způsobem:

$$r(z) = r_1 - p \cdot z \quad (5.15)$$

- $r_1$  je rameno u kořene kormidla a  $r_2$  je rameno na konci kormidla a určí se dle vztahu (5.16).

$$r = \frac{-\frac{o}{2} \cdot (o \cdot W) + \frac{1}{6} \cdot (b_2 - o)^2 \cdot W}{o \cdot W + \frac{(b_2 - o) \cdot W}{2}} \quad (5.16)$$

$$r_1 = 113 \text{ mm}$$

$$r_2 = 42 \text{ mm}$$

- $p$  je směrnice lineárního členu a určí se:

$$p = \frac{r_1 - r_2}{L} \quad (5.17)$$

$$p = \frac{113 - 42}{1060} = 0,067$$

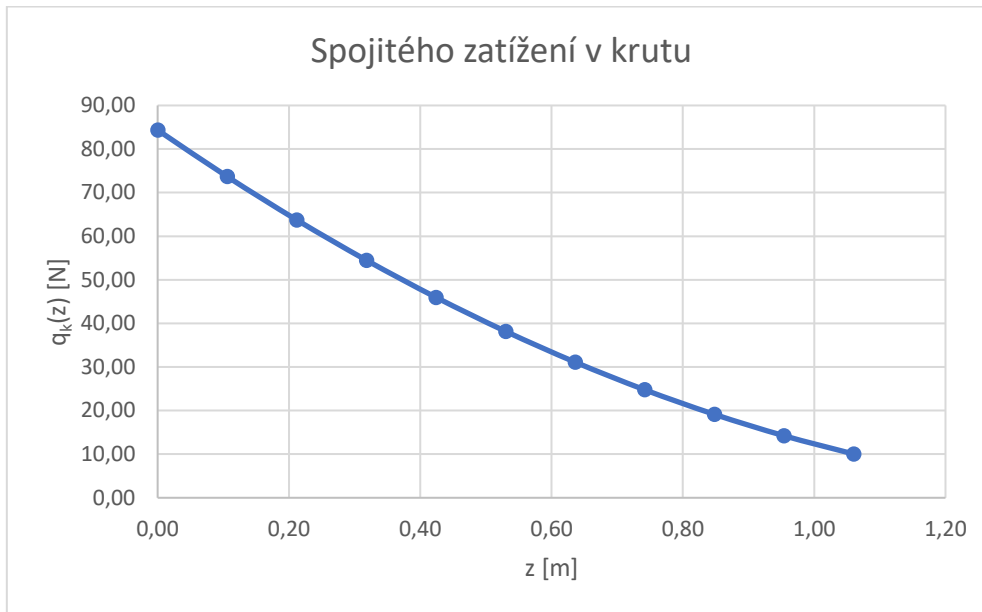
Po dosazení do vztahu (5.15) vznikne směrnice ramene.

$$r(z) = -0,067 \cdot z + 0,113 \quad (5.18)$$

Spojité zatížení v krutu  $q_k(z)$  bude získáno vynásobením směrnice ramene se směrnici spojitěho zatížení.

$$q_k(z) = 32 \cdot z^2 - 104 \cdot z + 84 \quad (5.19)$$

Graf  $q_k(z)$  pak vypadá takto:

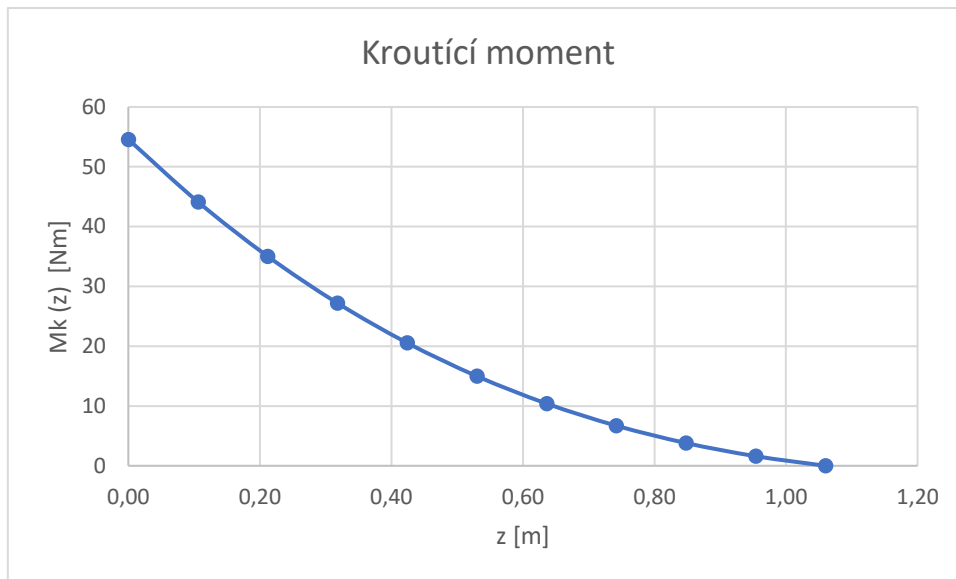


graf 2 průběh spojitěho zatížení v krutu

Integrací směrnice spojitěho zatížení v krutu  $q_k(z)$  bude získán kroučící moment, který se podle podkapitoly 6.3 navýší na hodnotu 125 %. Jeho směrnice pak bude vypadat takto:

$$M_k = -13,4 \cdot z^3 + 65,1 \cdot z^2 - 105,4 \cdot z + 54,6 \quad (5.20)$$

Průběh kroučícího momentu graficky:



graf 3 průběh krutícího momentu

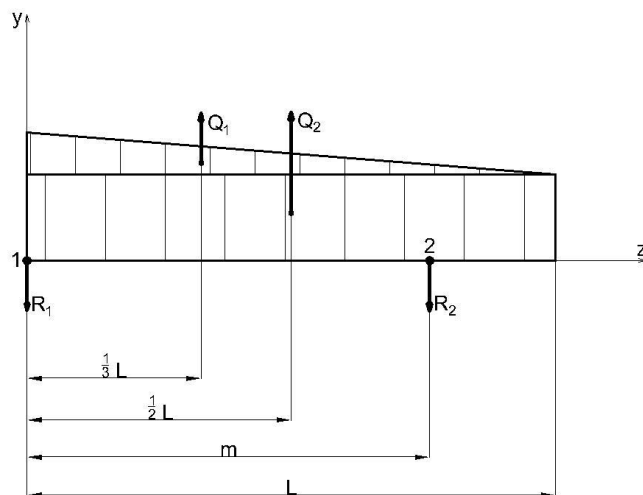
### 5.13 Posouvající síla a ohybový moment

Posouvající sílu a ohybový moment získáme ze Schwedlerovy věty.

$$\frac{dT(z)}{dz} = -q(z) \quad (5.21)$$

$$\frac{dM_o(z)}{dT} = T(z) \quad (5.22)$$

Nejprve je nutné zjistit reakce od závěsů tak, že kormidlo uvolníme.



obr. 27 uvolnění směrového kormidla

Na obr. 29 je vidět, že spojité zatížení bylo rozděleno na dva obrazce, které následně byly nahrazeny silami  $Q_1$  a  $Q_2$ . Tyto síly působí v těžištích těchto obrazců a odpovídají jejich obsahu.

$$Q_1 = 267,3 \text{ N}$$

$$Q_2 = 255,9 \text{ N}$$

Rovnovážné rovnice ve směru osy y:

$$\sum y: Q_1 + Q_2 - R_1 - R_2 = 0 \quad (5.23)$$

Ze které se vyjádří vyjádří reakce  $R_1$ .

$$R_1 = Q_1 + Q_2 - R_1 - R_2 \quad (5.24)$$

Momentová rovnováha v bodu 1:

$$\sum M: Q_1 \cdot \frac{1}{3} \cdot L + Q_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot L - R_2 \cdot m = 0 \quad (5.25)$$

Ze které se vyjádří reakce  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{\frac{1}{3} \cdot Q_1 \cdot L + \frac{1}{2} \cdot Q \cdot L}{m} \quad (5.26)$$

$$R_2 = 278,9 \text{ N}$$

Dosazením  $R_2$  do rovnice (5.24) bude určena reakce  $R_1$ .

$$R_1 = 244,4 \text{ N}$$

Nyní se kormidlo rozdělí na 2 výpočtová pole. První pole bude mít platnost  $z \in (0; m)$ . Průběh posouvající síly a ohybového momentu, které budou stejně jako hodnoty kroutícího momentu zvýšeny na hodnotu 125 %, pak budou vypadat následovně.

$$T^I(z) = -\frac{1}{2} \cdot k \cdot z^2 + q_1 \cdot z + C_1 \quad (5.27)$$

$$M_o^I(z) = -\frac{1}{6} \cdot k \cdot z^3 + \frac{1}{2} \cdot q_1 \cdot z^2 - C_1 \cdot z + C_2 \quad (5.28)$$

Konstanta  $C_1$  se určí z okrajové podmínky, tedy z vědomí, že posouvající síla na souřadnici  $z = 0$  je rovna reakci  $-R_1$ , tím pádem  $C_1 = -R_1$ .

Konstanta  $C_2$  bude určena z okrajové podmínky nulového ohybového momentu na souřadnici  $z = 0$ , tedy  $C_2 = 0$ .

Po dosazení konstant hodnot do rovnic (5.27) a (5.28) budou získány průběhy posouvající síly a ohybového momentu v poli I.

$$T^I(z) = -244,4 \cdot z^2 + 745,8z - 244,4 \quad (5.29)$$

$$M_o^I(z) = -79,3 \cdot z^3 + 372,9 \cdot z^2 - 244,4 \cdot z \quad (5.30)$$

Druhé pole bude mít platnost na souřadnicích  $z \in (m; l)$ .

$$T^{II}(z) = -\frac{1}{2} \cdot k \cdot z^2 + q_1 \cdot z + \overline{C}_1 R_1 = Q_1 + Q_2 - R_1 - R_2 \quad (5.31)$$

$$M_o^{II}(z) = -\frac{1}{6} \cdot k \cdot z^3 + \frac{1}{2} \cdot q_1 \cdot z^2 - \overline{C}_1 \cdot z + \overline{C}_2 \quad (5.32)$$

Konstanta  $\overline{C}_1$  bude určena z okrajové podmínky:  $T^{II}(L) = 0$ , dle vztahu:

$$\bar{C}_1 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot L^2 - q_1 \cdot LY_{SOP_{obr}} = 0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S_{SOP} \cdot \Delta c_y \cdot k_{SOP} \quad (5.33)$$

Konstanta  $\bar{C}_2$  pak bude určena z okrajové podmínky  $M_o^H(L) = 0$ .

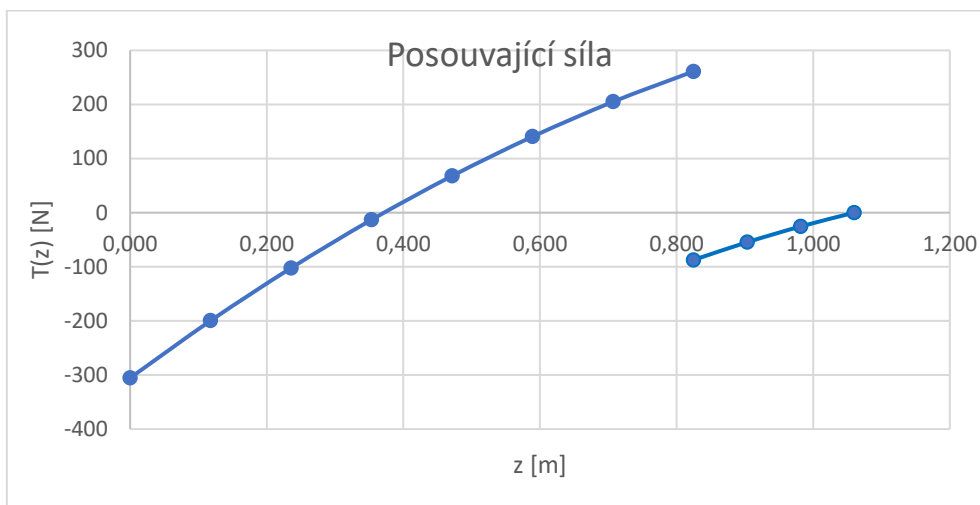
$$\bar{C}_2 = \frac{1}{2} \cdot q_1 \cdot L^2 + \frac{1}{3} \cdot k \cdot L^3 \quad (5.34)$$

Po vyčíslení vztahů (5.31) a (5.32) bude určen průběh posouvající síly a ohybového momentu v poli II. Tyto hodnoty stejně jako v předchozích případech budou zvýšeny na hodnotu 125 %.

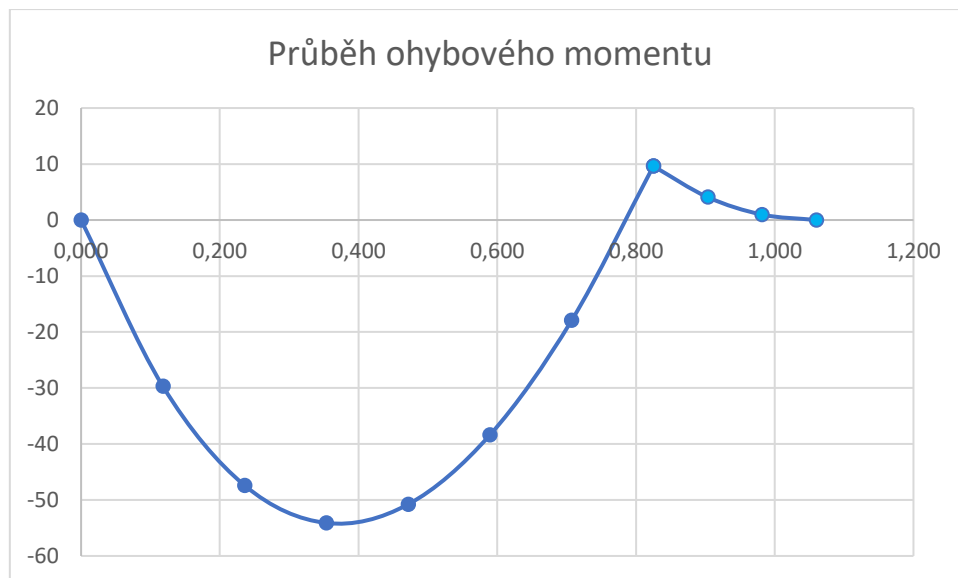
$$T^H(z) = -297,4 \cdot z^2 + 932,3 \cdot z - 654,1 \quad (5.35)$$

$$M_o^H(z) = -99,1 \cdot z^3 + 466,2 \cdot z^2 - 654,1 \cdot z + 287,6 \quad (5.36)$$

Průběhy ohybového momentu a posouvající síly jsou pak znázorněny v grafech 4 a 5.



graf 4 Průběh posouvající síly



graf 5 průběh ohybového momentu

## 6 Dimenzování

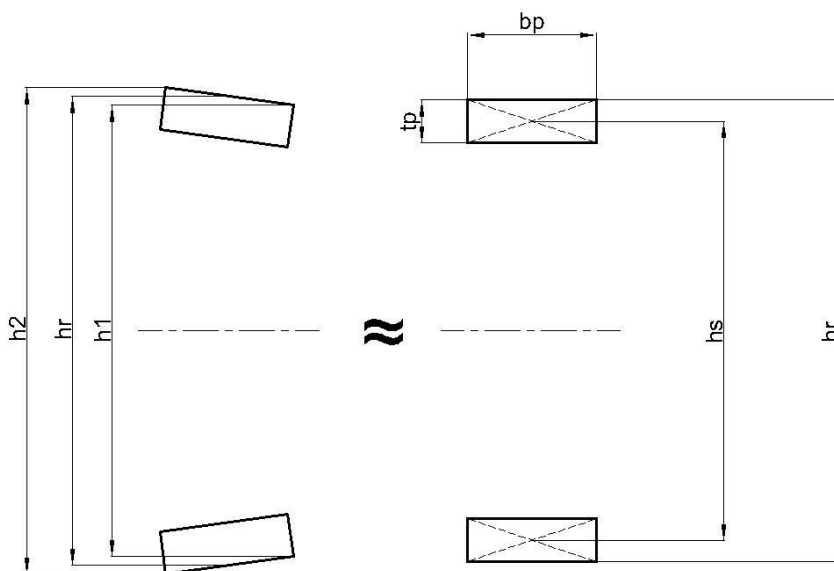
Tato kapitola se věnuje dimenzování základních prvků kormidla. Budou zde stanoveny dimenze pásnic nosníku a také zde bude dimenzován potah. Ostatními prvky, u kterých bude provedena pevnostní kontrola, se zabývá poslední část této kapitoly.

### 6.1 Dimenzování pásnic nosníku

V této podkapitole budou stanoveny rozměry průřezu pásnic nosníku tak, aby vydržely ohybová namáhání určené v předchozí kapitole.

#### 6.1.1 Zjednodušení geometrie pásnic a výška nosníku

Pásnice nosníku přejímají tvar potahu kormidla v místě jejich spojení. Pásnice budou zjednodušeny podle obr. 28.



obr. 28 zjednodušení geometrie pásnic

Takovéto výpočtové zjednodušení pásnic nebude mít na výsledek zásadní vliv, zato výhodou bude značné zjednodušení výpočtu.

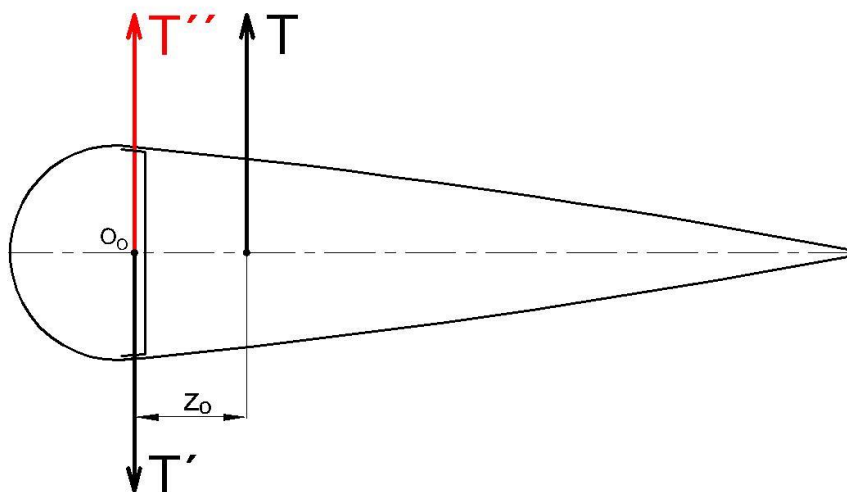
Výška nosníku se mění lineárně s měnící se souřadnicí  $z$ . V takovém případě nám stačí znát jeho výšku na začátku a na konci, z těchto znalostí už jednoduše vyjádříme předpis pro výšku nosníku v závislosti na souřadnici  $z$ .

$$h_r = h_{r1} - \frac{h_{r1} - h_{r2}}{L} \cdot z \quad (6.1)$$

- $h_{r1}$  je výška nosníku u kořene kormidla
- $h_{r2}$  je výška nosníku na konci kormidla

## 6.1.2 Pevnostní výpočet

Základem pevnostního výpočtu je rozdělení namáhání na bezkrutový ohyb a čistý krut.



obr. 29 Uvažované silové poměry při dimenzování pásnic

Jak je vidět na obr. 29, jsou v místě osy ohybu nosníku  $o_o$  připojeny dvě protichůdné síly  $T''$  a  $T'$ , které mají stejnou velikost jako posouvající síla  $T$ . Síly  $T$  a  $T'$  vytváří kroutící moment, který zatěžuje kormidlo čistým krutem a síla  $T''$  vytváří v nosníku ohybový moment, který zatěžuje nosník bezkrutovým ohybem. Kroutící a ohybové momenty byly odvozeny v kapitole 7. Tento způsob superpozice namáhání byl převzat od zdroje [8].

Základem výpočtu bude pevnostní podmínka (6.2)

$$\frac{\sigma_{pt}}{k} = \sigma_D \geq \frac{M_o}{W_o} \quad (6.2)$$

- $M_o$  je ohybový moment z podkapitoly 5.13
- $W_o$  je průřezový modul v ohybu

$$W_o = \frac{J_z}{Y_{tp}} \quad (6.3)$$

- $Y_{tp}$  je vzdálenost těžiště průřezu pásnice od osy  $z$  procházející středem nosníku.

Kvadratický moment  $J_z$  se určí ze Steinerovy věty.

$$J_z = 2 \cdot \left[ \frac{1}{12} \cdot b_p \cdot t_p^3 + 2 \cdot S_p \cdot y_{tp}^2 \right] \quad (6.4)$$

Po dosazení vztahu (6.4) do vztahu (6.3) a následně vztahu (6.3) do vztahu (6.2) bude vyjádřen rozměr  $b_p$ , který získá tvar:

$$b_p = \frac{M_o \cdot \frac{h_r}{2}}{\sigma_D \cdot \left( \frac{1}{6} \cdot t_p^3 + 2 \cdot t_p \cdot y_s^2 \right)} \quad (6.5)$$



Nyní je nutné zjistit šířku pásnice  $b_p$  v místě největšího namáhání. Potřebné výpočty byly provedeny v programu excel a veškerá data jsou přiložena v příloze pod záložkou dimenzování nosníku.

Výsledná hodnota  $b_p$ :

$$b_p = 7,9 \text{ mm}$$

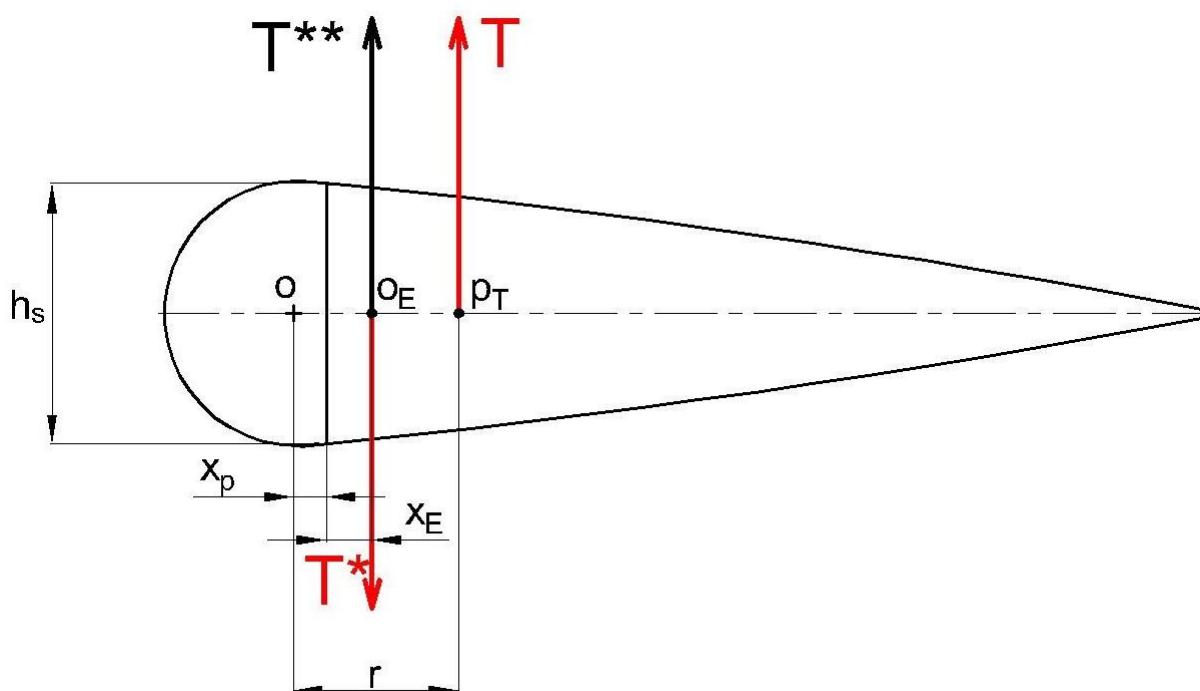
Ačkoliv je při vychýlení jedna pásnice zatěžována na tah a druhá na tlak, tak vzhledem k tomu, že se kormidlo může vychylovat na obě strany, je nutné obě pásnice dimenzovat na menší hodnotu ze  $\sigma_{pt}$  a  $\sigma_{pd}$ . V tomto případě byla použita hodnota  $\sigma_{pt}$ .

## 6.2 Dimenzování potahu

V této podkapitole budou stanoveny dimenze potahu, který pak následně bude zkontrolován na stabilitu.

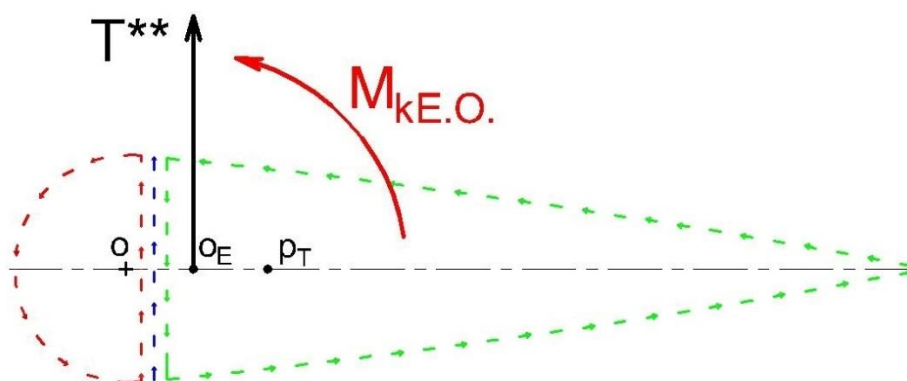
### 6.2.1 Smykové namáhání potahu

Podobně jako v kapitole 7.1, zde také bude využita superpozice namáhání. Nyní se ovšem zaměříme na namáhání kormidla krutem, které bude přejímat potah.



obr. 30 Uvažované rozložení sil při dimenzování potahu

Jak můžeme vidět na obr. 30, zde byly připojeny síly  $T^*$  a  $T^{**}$ , stejně velké jako posouvající síla  $T$ , které ale tentokrát budou připojeny v místě elastické osy. Z obrázku je jasné, že síly  $T$  a  $T^*$  vytváří moment vzhledem k elastické ose  $M_{kE.O.}$ , a síla  $T^{**}$  je uvažována jako posouvající síla. Tento postup byl převzat od zdroje [8].



obr. 31 Smykové toky

Na obr. 31 je znázorněn moment působící k elastické ose  $M_{kE.O.}$ , síla  $T$  na rameni  $r$  pak tvoří kroutící moment  $M_k$ , který je odvozen v podkapitole 6.8.  $M_{kE.O.}$  pak vyjadřuje rovnice (6.6).

$$M_{kE.O.} = T \cdot (r - x_p - x_E) = M_k - T \cdot (x_p + x_E) \quad (6.6)$$

V této rovnici je však neznámá souřadnici elastické osy  $x_E$ . Elastická osa prochází místem v průřezu, ve kterém je úhel natočení od působení kroutícího momentu nulový, vždy leží na ose symetrie a závisí čistě na geometrii průřezu. Souřadnice elastické osy  $x_E$  se pak vypočítá podle vztahu (6.7), který je převzat ze zdroje [8].

$$x_E = \frac{-2 \cdot s_1 \cdot (s_1 \cdot U_2 + U_1 \cdot h_s + U_2 \cdot h_s)}{(s_1 + h_s) \cdot (s_1 \cdot s_2 + s_1 \cdot h_s + s_2 \cdot h_s)} + \frac{2 \cdot U_1}{s_1 + h_s} \quad (6.7) [8]$$

Na obr. 33 jsou také znázorněny smykové toky jednotlivými dutinami a stojinou nosníku.

Dále je pak nutné si uvědomit, že dvoudutinové konstrukce jsou  $2 \times$  staticky neurčité, tudíž je nutné doplnit 2 deformační podmínky. První deformační podmínkou je, že deformace obou komor se musí rovnat. Následující vyjádření smykových toků společně se smykovým napětím byl převzat ze zdroje [9], ve kterém byl řešen obdobný problém.

$$\vartheta_1 = \frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot \oint_{\textcircled{1}} \frac{q_v}{G \cdot t} \cdot ds = \vartheta_2 = \frac{1}{2 \cdot U_2} \cdot \oint_{\textcircled{2}} \frac{q_v}{G \cdot t} \cdot ds \quad (6.8)$$

Po úpravě dostaneme:

$$\frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot \left[ \frac{q_1 \cdot s_1}{G_1 \cdot t_1} + \frac{(q_1 + q_s - q_2) \cdot h_s}{G_s \cdot t_s} \right] = \frac{1}{2 \cdot U_2} \cdot \left[ \frac{q_2 \cdot s_2}{G_2 \cdot t_2} + \frac{(q_1 - q_s + q_2) \cdot h_s}{G_s \cdot t_s} \right] \quad (6.9)$$

Materiál použitý pro obě dvě komory a stojinu je stejný, proto se moduly pružnosti ve smyku musí rovnat.

$$G_1 = G_2 = G_s \quad (6.10)$$

Stejně jsou také tloušťky stěn komor, které tvoří dvě vrstvy vícesměrného prepregu, tedy  $0,4 \text{ mm}$ .

$$t_1 = t_2 = t_s \quad (6.11)$$

Z tohoto důvodu se vztah (6.9) značně zjednoduší.

$$\frac{1}{2 \cdot U_1} \cdot [q_1 \cdot s_1 + (q_1 + q_s - q_2) \cdot h_s] = \frac{1}{2 \cdot U_2} \cdot [q_2 \cdot s_2 + (q_1 - q_s + q_2) \cdot h_s] \quad (6.12)$$

Druhou rovnicí je momentová rovnováha.

$$M_{kE.O.} + 2 \cdot U_1 \cdot q_1 + 2 \cdot U_2 \cdot q_2 = 0 \quad (6.13)$$

Pomocí rovnic (6.12) a (6.13) můžeme vyjádřit smykové toky  $q_1$  a  $q_2$ .

$$q_1 = \frac{-(U_1 \cdot s_2 + U_1 \cdot h_s + U_2 \cdot h_s) \cdot \frac{M_{kE.O.}}{2 \cdot U_2} - (U_1 + U_2) \cdot h_s \cdot q_s}{U_2 \cdot s_1 + U_2 \cdot h_s + 2 \cdot U_1 \cdot h_s + \frac{U_1}{U_2} \cdot (U_1 \cdot s_2 + U_1 \cdot h_s)} \quad (6.14)$$

$$q_2 = \frac{-M_{kE.O.} - 2 \cdot U_1 \cdot q_1}{2 \cdot U_2} \quad (6.15)$$

Smykový tok  $q_s$  ve stojně nosníku vzniká působením posouvající síly  $T$ .

$$q_s = \frac{T}{h_s} \quad (6.16)$$

Z obr. 33 je však patrné, že smykový tok ve stojně je tvořen smykovými toky  $q_1$ ,  $q_2$  a  $q_s$ .

$$q_c = q_1 + q_s - q_2 \quad (6.17)$$

Smykové napětí se pak vypočte:

$$\tau = \frac{q}{t} \quad (6.18)$$

Výsledky v řezech u kořene a na začátku kormidla jsou zapsány do následující tabulky.

smykové napětí	řez u kořene	řez na konci
$\tau_1$ [MPa]	-0,06	-2,71
$\tau_2$ [MPa]	-2,17	3,03
$\tau_s$ [MPa]	-3,74	13,94

tab. 3 smykové napětí

V tuto chvíli je nutné dopočítat takzvaná početní napětí, která jsou důležitá pro následující výpočty. Početní napětí se vypočte z hodnot uvedených v tabulce tab. 3, které se vynásobí součinitelem bezpečnosti.

početní smykové napětí	řez u kořene	řez na konci
$\tau_{1p}$ [MPa]	-0,11	-5,08
$\tau_{2p}$ [MPa]	-4,07	5,68
$\tau_{sp}$ [MPa]	-7	26,14

tab. 4 početní smykové napětí

Jistota k mezi pevnosti je poměr pevnosti ve smyku materiálu, v našem případě vícesměrného prepregu a početního napětí.

$$k_p = \frac{\tau_{PS}}{\tau_p} \quad (6.19)$$

bezpečnost	řez u kořene	řez na konci
$k_{1p}$ [MPa]	1080,65	23,62
$k_{2p}$ [MPa]	29,42	21,11
$k_{sp}$ [MPa]	17,13	4,58

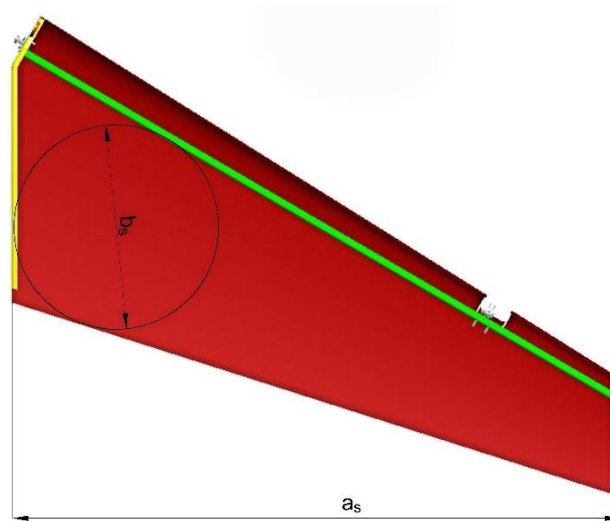
tab. 5 Výsledky bezpečnosti

## 6.2.2 Stabilita

Stabilita potahu se stanoví tak, že se nejprve určí kritická napětí, ta jsou pak porovnána s početními napětími, která jsou známá z předchozí podkapitoly.

Při smykovém namáhání se kritická napětí  $\tau_k$  počítá podle vztahu (6.20), který je převzat ze zdroje [10].

$$\tau_k = \kappa \cdot K_S \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b_s}\right)^2 \quad (6.20) [10]$$

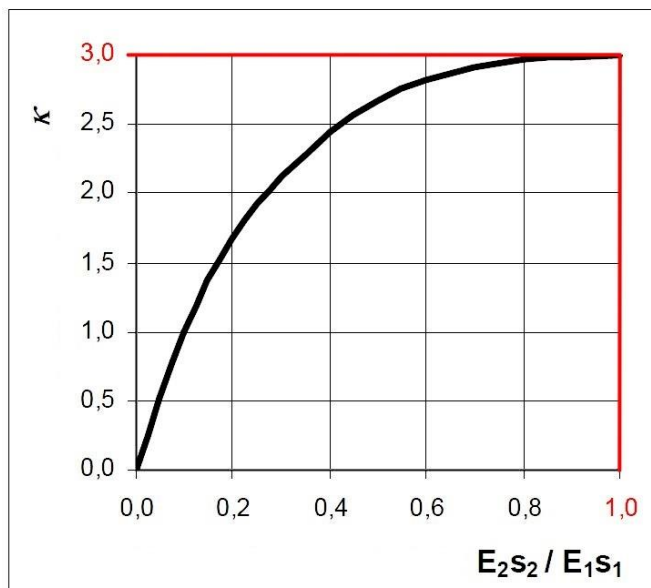


obr. 32 rozměry pro stabilitu

Na obr. 32 jsou vidět rozměry  $b_s$  a  $a_s$ , které jsou nutné pro určení součinitele skladby materiálu  $\kappa$ , jak můžeme vidět v grafu 5. Rozměr  $b_s$  je dále nutný pro výpočet samotného kritického smykového napětí.

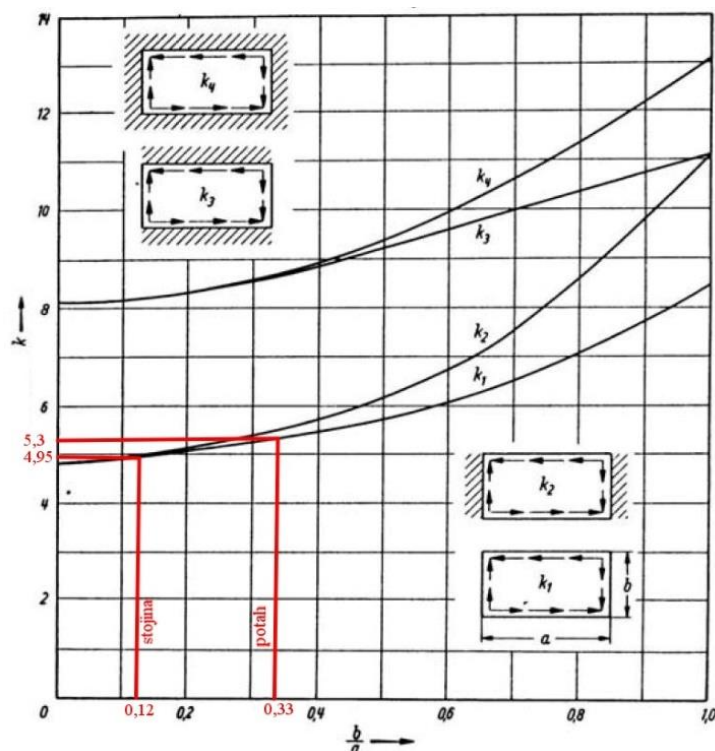
Rozměr  $b_s$  je měřen jako průměr kružnice vepsané do pole, tvořeného potahem za nosníkem. Takto měřený rozměr by měl kompenzovat část potahu, který je v blízkosti žebra a který bude tímto žebrem vyztužen.

$\kappa$  je součinitel skladby materiálu, který se určí z diagramu níže.



graf 6 závislost  $\kappa = f\left(\frac{E_1 \cdot s_1}{E_2 \cdot s_2}\right)$  [10]

$K_S$  je součinitel velikosti který se určí z následujícího diagramu.



graf 7 závislost  $K = f\left(\frac{b}{a}\right)$  [10]

Youngův modul pružnosti je známý z kapitoly 4. Šířku  $b_s$  a délku  $a_s$  zjistíme z modelu, který je přiložen v příloze.

Oba diagramy jsou převzaty ze zdroje [10] a byly do nich vyznačeny hodnoty pro náš případ.

Kritická hodnota potahu v místě největšího rozměru  $b_s$  je:

$$\tau_{pk} = 1,47 \text{ MPa}$$

Při porovnání kritického a početního napětí převyšuje napětí početní. Z tohoto důvodu byl potah vyztužen pěnovým jádrem o tloušťce 1 mm, který byl vložen mezi dvě vrstvy vícesměrné tkaniny a vznikl tak potah sendvičového typu. Tloušťka potahu se tak zvětší na 1,4 mm.

Tento sendvičový potah pak dosahoval v místě největšího rozměru  $b_s$  následující kritické hodnoty.

$$\tau_{pk} = 18,03 \text{ MPa}$$

V tomto případě již kritické napětí jasně převyšuje to početní.

U stojiny nosníku bylo kritické napětí vypočítáno obdobným způsobem jako u potahu.

$$\tau_{pk} = 10,24 \text{ MPa}$$

Toto kritické napětí je při porovnání s početním napětím dostačující.

V následující tabulce jsou vyjádřeny jistoty stability potahu, které se byly získány jako poměr kritických a početních napětí.

Jistota	potah	Stojina
$K_{ST}$	4,420867376	1,46246798

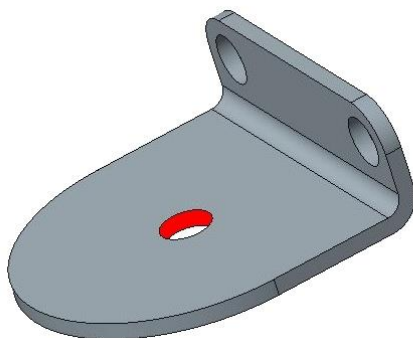
tab. 6 Jistoty kritického napětí

## 6.3 Kontrola ostatních namáhaných částí

Tato kapitola se bude zabývat ostatními prvky kormidla, u kterých je vhodné zkontrolovat jejich pevnost.

### 6.3.1 Horní závěs

U vrchního závěsu bude provedena kontrola na otláčení v místě, kudy prochází ONL šroub, na kterém je umístěno ložisko.



obr. 33 plocha kontrolovaná na otláčení

Plochu kontrolovanou na otláčení můžeme vidět na obr. 35, na kterém je zvýrazněna červeně.

Kontrola bude vycházet ze vzorce (6.21), který je převzat ze zdroje [11].

$$p_D = k_{otl} \cdot \sigma_P \quad (6.21) [11]$$

- $k_{otl} = 0,18$  je součinitel pro závěsy kormidel uvedený ve zdroji [11]
- $\sigma_P$  je pevnost duralového plechu uvedeného v kapitole 4

$$p_D = 78,12 \text{ MPa} \quad (6.22)$$

Tuto hodnotu dovoleného tlaku budeme následně porovnávat s tlakem vyvozeným reakcí  $R_2$ , která byla určena v podkapitole 5.13. Pro určení tohoto tlaku je nutné znát rozměry plochy, na kterou bude tlak působit. Průměr ONL šroubu je  $d = 5 \text{ mm}$  a tloušťka plechu je  $t = 2 \text{ mm}$ . Je nutné si uvědomit, že závěs je tvořen dvěma plechy a plocha se tedy zdvojnásobí.

$$p = \frac{R_2}{S} \quad (6.23)$$

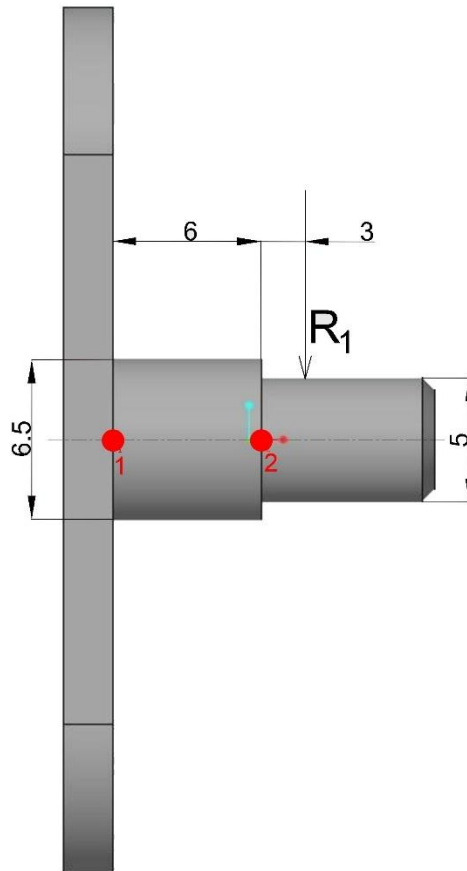
$$p_D = 13,9 \text{ MPa} \quad (6.24)$$

Při porovnání výsledků (6.22) a (6.24) je vidět, že kontrola vyhovuje.



### 6.3.2 Spodní závěs

V případě spodního závěsu je vhodná kontrola na ohyb.



obr. 34 Ohyb spodního závěsu

Na obr. 36 jsou vidět rozměry závěsu a reakci  $R_1$ , která má působíště uprostřed ložiska.

Nejprve je nutné zjistit ohybový moment působící v bodech 1 a 2 na závěs

$$M_{o1} = 2,196 \text{ Nm} \quad (6.25)$$

$$M_{o2} = 0.732 \text{ Nm} \quad (6.26)$$

Hodnoty momentů budou použity k výpočtu namáhání v bodech 1 a 2

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} = \frac{M_o}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} \quad (6.27)$$

$$\sigma_1 = 81,5 \text{ MPa} \quad (6.28)$$

$$\sigma_2 = 59,7 \text{ MPa} \quad (6.29)$$

Dále je nutné určit stříhové napětí v bodech 1 a 2.

$$\tau = \frac{R_1}{S} \quad (6.30)$$

$$\tau_1 = 7,4 \text{ MPa} \quad (6.31)$$

$$\tau_1 = 12,5 \text{ MPa} \quad (6.32)$$

Následuje vyjádření redukovaného napětí

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} \quad (6.33)$$

Kde  $\alpha = 3$  podle metody HMM.

Z čehož bylo zjištěno, že vyšší hodnota napětí je v bodě 1.

$$\sigma_{red} = 82,6 \text{ MPa} \quad (6.34)$$

Tato hodnota bude použita k vypočítání jistoty vůči mezi pevnosti  $\sigma_p$ , kterou známe z kapitoly 4.

$$k = \frac{\sigma_p}{\sigma_1} \text{ MPa} \quad (6.35)$$

$$k = 4,3 \text{ MPa} \quad (6.36)$$

## 7 Hmotový rozbor

Hmotový rozbor spočívá v nalezení souřadnic těžišť a v určení hmotností všech součástí, ze kterých je kormidlo sestaveno. V tomto případě se jedná o nosník, obě části potahu, žebra, páky, závěsy a v neposlední řadě spojovací materiál. Po zjištění těchto skutečností bude získána celková hmotnost a také výsledné těžiště kormidla. Z těchto informací pak lze posoudit, jaký dopad bude mít kormidlo na celkovou hmotnost a těžiště letounu v souřadnicovém systému celého letounu.

Hmotnost potahu, stojiny nosníku, žeber, a páky, které jsou vyrobeny z vícesměrné tkaniny, budou získány ze znalosti její hustoty, která udává hmotnost v závislosti na jednotku plochy. U páky je nutné zjistit počet vrstev, ze kterých byla vyrobena.

$$\rho_{vt} = 320 \text{ gm}^{-2} \quad (7.1)$$

vícesměrná tkanina				
Součást	Hmotnost [kg]	Těžiště [mm]		
		X	Y	Z
Levá část potahu	0,269	7574	-28	2474
Pravá část potahu	0,281	7569	26	2478
Nosník	0,085	7462	0	2481
Horní žebro	0,006	7843	0	3077
spodní žebro	0,031	7312	-1	2028
Páka	0,026	7178	-25	2049

tab. 7 hmotový rozbor prvků z vícesměrné tkaniny

Hmotnost pásnic bude zjištěna obdobně za použití hustoty jednosměrné tkaniny.

$$\rho_{jt} = 163 \text{ gm}^{-2} \quad (7.2)$$

jednosměrná tkanina				
Součást	Hmotnost [kg]	Těžiště [mm]		
		X	Y	Z
pásnice	0,00196	7498	42	2556
pásnice	0,00196	7498	42	1481

tab. 8 hmotový rozbor prvků z jednosměrné tkaniny

Dural, ze kterého jsou vyrobeny závěsy kormidla, má hustotu:

$$\rho_D = 2870 \text{ kgm}^{-3} \quad (7.3)$$

Dural				
Součást	Hmotnost [kg]	Těžiště [mm]		
		X	Y	Z
Horní vrchní závěs	0,0098	7663	0	2851
dolní vrchní závěs	0,0098	7658	0	2842

tab. 9 hmotový rozbor prvků z duralu

Hustota oceli, ze které je vyroben spodní závěs:

$$\rho_o = 7850 \text{ kgm}^{-3} \quad (7.4)$$

Součást	Hmotnost [kg]	Těžiště		
		X	Y	Z
spodní závěs	0,02064	7184	0	2039

tab. 10 hmotový rozbor prvku vyrobeného z oceli

Hmotnost pěny je také získána pomocí její hustoty.

$$\rho_p = 55 \text{ kgm}^{-3} \quad (7.5)$$

Součást	Hmotnost [kg]	Těžiště [mm]		
		X	Y	Z
Horní pěna	0,0106	7672	0	2879
Spodní pěna	0,0116	7645	0	2834
odtoková hrana	0,2385	7787	0	2549
Pěnové jádro potahu levé	0,0448	7601	27	2459
Pěnové jádro potahu pravé	0,0448	7601	-27	2459

tab. 11 hmotový rozbor prvků z pěny

Je také nutné započítat váhu lepidla, protože většina jednotlivých částí kormidla je jím spojena. Lepidlo má hustotu:

$$\rho_l = 1360 \text{ kgm}^{-3} \quad (7.6)$$

Hmotnost lepidla pak bude:

$$m_l = 0,0865 \text{ kg} \quad (7.7)$$

Objemy, popřípadě plochy jednotlivých částí jsou získány z 3D modelu, který je přiložen v příloze. Předpokladem pro výpočet objemu lepidla je, že vyplní objem, který je mu v konstrukci vyčleněn. Jednotlivé plochy, které k sobě budou přilepeny, jsou od sebe odsazeny o 0,6 mm.

Nakonec zbývá zjistit hmotnosti spojovacího materiálu, který je normalizovaný a jednotlivé hmotnosti lze najít v příslušných normách. Hmotnost je zaznamenána do následující tabulky.

Název	ks	hmotnost [kg]
ŠROUB DIN 933 -M5x12	4	0,0029
ŠROUB DIN 933 -M5x20	4	0,0038
KORUNOVÁ MATICE DIN 935	1	0,23
PODLOŽKA DIN 125	16	0,00044
SAMOJISTNÁ MATICE	8	0,1
LOŽISKO GE5E	2	0,004
ŠROUB ONL 3241 M5x20	1	0,0059

tab. 12 hmotnost spojovacího materiálu

Celková hmotnost kormidla bude stanovena sečtením všech komponentů a uvedena v tabulce níže společně s těžištěm celého kormidla.

Hmotnost [kg]	Těžiště [mm]		
	X	Y	Z
1,92	7503	-2	2441

## 8 Závěr

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním řešením směrového kormidla malého sportovního letounu. Konstrukce se skládá ze dvou plnostěnných žeber, nosníku, potahu, páky, závěsů a spojovacího materiálu. Žebra, nosník a potah jsou vytvořeny z vícesměrné tkaniny uhlíkového kompozitu, pásnice nosníku jsou pak tvořeny jednosměrnou tkaninou. Celková konstrukce kormidla je dvoudutinová, od čehož se odvíjí následující výpočty zatížení a dimenzování základních konstrukčních prvků.

Výpočty zatížení byly stanoveny v souladu s předpisem UL-2. V kapitole zatížení byly zjištěny ohybový a kroutící moment, které byly použity jako výchozí hodnoty pro dimenzování základních prvků kormidla. V případě pásnic bylo, vzhledem k malému rozměru, který byl stanoven při dimenzování, přistoupeno k jednotné šířce pásnice po celé délce nosníku. Při dimenzování potahu, bylo v první fázi vypočítáno početní napětí a jeho bezpečnosti vzhledem k mezi pevnosti v krutu. Následovala kontrola na stabilitu potahu, při které zadní pole potahu nevyhovovalo, a proto bylo přistoupeno k jeho vyztužení pěnovým jádrem o tloušťce 1 mm. Tato tloušťka byla stanovena jako více než dostačující z hlediska stability, nicméně z technologických důvodů by při výrobě bylo nejspíše přistoupeno k jádru o tloušťce 3 mm. Stojina nosníku, která byla kontrolována obdobně jako potah kontrolou prošla. Přední pole potahu, vzhledem k jeho malému rozměru, na stabilitu kontrolováno nebylo.

V poslední části byl vyhotoven hmotový rozbor, ve kterém byly analyzovány všechny prvky kormidla. U každého prvku byla zjištěna hmotnost a jeho těžiště. Z hmotností jednotlivých prvků pak byla stanovena celková váha kormidla. Pro zjišťování těžišť objemů a ploch všech prvků byl použit 3D model.

V této práci nebylo analyzováno umístění vrchního závěsu, což by mělo za následek snížení celkového extrému ohybového momentu a tím pádem zmenšení pásnic a to by se mohlo projevit úsporou hmotnosti. U páky by bylo dále vhodné provést pevnostní kontrolu, která v této práci provedena nebyla.

## 9 Použité zdroje

- [1] Mikulka, Jan. *Konstrukce a projektování letadel II*. Praha 6 : Česká technika, 2005. ISBN 80-01-03338-4.
- [2] Historie letounu L-39. *Letoun L-39*. [Online] 16. 7 2018. [Citace: 12. Červenec 2018.] [http://l-39.cz/L-39\\_historie.html](http://l-39.cz/L-39_historie.html).
- [3] Lněnička, Jaroslav. Ocasní plochy letadel. *e-magazín Akademie letectví*. [Online] 5. 5 2008. [Citace: 12. 11 2017.] [http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2008/05/ocasni\\_plochy.php](http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2008/05/ocasni_plochy.php).
- [4] Šulženko, M. N. *Konstrukce letadel*. Praha 2 : Státní nakladatelství technické literatury, 1954. DT 629.13.
- [5] Karel, Barák. *Materiálové podklady letounu UL-39 Albi II*. Praha : ČVUT v Praze, 2016.
- [6] Ing, Zdeněk Koříne, CSc. Technologie. *Kompozity*. [Online] [Citace: 24. 4 2018.] <http://mujweb.cz/zkorinek>.
- [7] Letecká amatérská asociace. *UL2 - první část*. [Online] 30. 3 2005. [Citace: 8. 12 2017.] <http://www.laacr.cz>.
- [8] Barák, karel. *Teoretické podklady pro stanovení smykových toků víceduvinové konstrukce*. Praha : Ustav letadlové techniky ČVUT v Praze, 2012, 2012.
- [9] Valenta, Jakub. *Návrh vztlakové klapky malého sportovního letounu*. Praha : autor neznámý, 2019.
- [10] Herbert, Funke. *Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges*. Rheda-Wiedenbrück : Universität-GH Paderborn, Laboratorium für Konstruktionslehre, 2001. ISBN 3-00-008670-6.
- [11] Špunda, Jaromír. *Stavební mechanika a pevnost letounu: Část IV*. Brno : Vojenská akademie Antonína Zápotockého,, 1971.