



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# NÁVRH MORFUJÍCÍHO FLAPERONU PRO ADITIVNÍ VÝROBU TECHNOLOGIÍ FDM

MORPHING FLAPERON DESIGN FOR FUSED DEPOSITION MODELLING TECHNOLOGY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Ryba

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Dubnický PhD.

BRNO 2025



## Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Bc. Filip Ryba**  
Studijní program: Letecká a kosmická technika  
Studijní obor: Stavba letadel  
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Dubnický PhD.**  
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Návrh morfujícího flaperonu pro aditivní výrobu technologií FDM

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem je rozpracovat návrh morfujícího flaperonu s poddajným potahem do demonstrátoru technického řešení, který bude zhotoven technologií 3D tisku. Základní geometrické rozvržení je součástí zadání, předmětem vypracování je následná konstrukce se zohledněním technologie, dimenzováním jednotlivých částí konstrukce, volbou materiálu a ověřením tisknutelnosti. Práce je částečně experimentálního charakteru.

#### Cíle diplomové práce:

Provést konstrukční návrh morfujícího flaperonu pro výrobu 3D tiskem (FDM) zahrnující:

- konstrukční návrh na základě dodaného rozvržení;
- volbu materiálu;
- pevnostní výpočet;
- 3D tisk a ověření kinematiky.

Seznam doporučené literatury:

MANDOLINI, Marco; PRADEL, Patrick a CICONI, Paolo, 2022. Design for Additive Manufacturing: Methods and Tools. Online. Applied Sciences. Roč. 12, č. 13. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app12136548>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

.....  
doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

.....  
doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem morfuujícího flaperonu určeného pro aditivní výrobu technologií FDM (Fused Deposition Modeling). Cílem práce je navrhnout typ filamentu, konstrukční řešení mechanizace flaperonu malých rozměrů a hmotnosti s poddajným potahem, které bude realizováno pomocí 3D tisku, a následně provést experimentální testování modelů. Postavené konstrukční řešení využívá RDS (Rotary Drive System) mechanismus a PETG filament.

### **KLÍČOVÁ SLOVA**

Morfování, flaperon, 3D tisk, aditivní výroba, RC letectví, rotary drive system

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the design of a morphing flaperon intended for additive manufacturing using FDM (Fused Deposition Modeling) technology. The objective of the work is to choose the right filament, develop a construction solution for the mechanization of a small and lightweight flaperon with a flexible wing skin, realized through 3D printing, followed by experimental testing of the models. The constructed design solution utilizes a RDS (Rotary Drive System) mechanism and PETG filament.

### **KEYWORDS**

Morphing, flaperon, 3D printing, additive manufacturing, RC aviation, rotary drive system

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

### ***Citace tištěné práce:***

*RYBA, Filip. Návrh morfujícího flaperonu pro aditivní výrobu technologií FDM. Diplomová práce Lukáš DUBNICKÝ (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025.*

### ***Citace elektronického zdroje:***

*RYBA, Filip. Návrh morfujícího flaperonu pro aditivní výrobu technologií FDM. Online, diplomová práce. Lukáš DUBNICKÝ (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165691>. [cit. 2025-05-15].*

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lukáše Dubnického PhD. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 22. května 2025

.....

Filip Ryba

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji svým rodičům za dlouhodobou podporu života při studiu, bez nich by tohoto vůbec nebylo možné dosáhnout. Dále panu Ing. Lukášovi Dubnickému PhD. za skvělé vedení této diplomové práce a za mnoho předaných znalostí. Děkuji také panu Ing. Radku Poliščukovi PhD. za asistenci s únavovými zkouškami.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Hlavní cíle</b> .....	<b>12</b>
2.1	Charakteristika výchozí geometrie .....	13
<b>3</b>	<b>3D tisk, použití v rc letectví, používané mechanizace</b> .....	<b>14</b>
3.1	3D tisk v RC letectví .....	14
3.2	Použitá tiskárna.....	16
3.3	Používané mechanizace křidélek a klapek v RC letectví .....	16
<b>4</b>	<b>Materiály – výběr filamentu</b> .....	<b>19</b>
4.1	FDM filamenty .....	19
4.2	Youngův modul pružnosti v tahu .....	20
4.3	Pevnost v ohybu.....	21
4.4	Lomová charakteristika – tažnost.....	21
4.5	Únava materiálu .....	22
4.6	Teplotní stabilita .....	23
4.7	Zhodnocení .....	24
<b>5</b>	<b>XFoil výpočet dynamického tlaku – síly – reakce</b> .....	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Návrhy řešení geometrie a mechanizace</b> .....	<b>28</b>
6.1	Řešení č. 1: Servomotor pohánějící táhlo, rotace a posun v šikmé drážce ..	28
6.1.1	Verze s lineárním aktuátorem .....	29
6.2	Řešení č. 2: Servomotor centrální v trupu, tažný bowden, vratná tlačná pružina.....	29
6.3	Řešení č. 3: šikmá drážka, servomotor v křídle, závitová tyč.....	30
6.4	Řešení 4: Ovládání krutem zavedeným na čep v drážce .....	32
6.5	Řešení 5: RDS – Rotary Drive system – otáčení lomenou hřídelí v kapse flaperonu.....	34
6.6	Vybrané řešení.....	35
<b>7</b>	<b>Pevnostní výpočet</b> .....	<b>36</b>
7.1	Reakční síly.....	36
7.2	Výsledné vnitřní účinky.....	38
7.2.1	Řez 1 .....	38
7.2.2	Řez 2 .....	38
7.2.3	Řez 3 .....	39
7.3	Výsledná napětí .....	40
7.4	Součinitel bezpečnostní rezervy.....	41
7.5	Zhodnocení .....	42
<b>8</b>	<b>Zpracování, výroba a montáž – model 1</b> .....	<b>43</b>
8.1	Servomotor.....	43
8.2	Spojka .....	44
8.3	3 mm hřídel .....	44

8.4	Kuličkové ložisko .....	44
8.5	Kapsa ovládání flaperonu.....	44
8.6	Montáž .....	45
8.6.1	Vůle, rozměry.....	46
<b>9</b>	<b>Model pro cyklické testování RDS – model 2 .....</b>	<b>47</b>
9.1	Model, použité komponenty, montáž.....	47
9.1.1	Motor.....	47
9.1.2	Model křídla .....	48
9.1.3	Montáž, spojovací materiál .....	49
9.1.4	Ověření přesnosti křivky ohybu.....	51
9.2	Testování .....	51
9.3	Výsledky testování .....	52
<b>10</b>	<b>Další výzkum.....</b>	<b>55</b>
<b>11</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>58</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>64</b>

# 1 Úvod

Morfování křídel neboli spojitá změna tvaru křídel v letectví je moderní koncepční přístup, který umožňuje měnit geometrii křídla nebo jeho částí během letu. To umožňuje křídlu vykonávat funkce nejen kormidel, ale i např. měnit vzepětí nebo prohnutí střední křivky. Tato technologie může nacházet uplatnění nejen u plnohodnotných letadel, ale výzkum pro potenciální aplikace se rozšiřuje i do oblasti RC modelů a dronů, kde je klíčové zajistit lehkou a kompaktní konstrukci při zachování dostatečné pevnosti. Zároveň drony také slouží jako vhodné testovací prostředí pro tuto technologii. Morfující flaperony, které kombinují funkci křidélek a klapek, přinášejí zlepšené aerodynamické vlastnosti pro efektivnější let a plynulejší ovládání.

V oblasti RC modelů jsou tradiční mechanizace (tzn. aktuátorové soustavy) flaperonů (nebo křidélek a dalších ploch) většinou realizovány pomocí táhel, servomotorů a kloubových mechanismů, které jsou často umístěny na povrchu křídla. Tento přístup sice poskytuje dostatečné řízení, ale negativně ovlivňuje aerodynamickou čistotu křídla. Proto je cílem této práce navrhnout a realizovat morfující flaperon s vnitřní mechanizací.

Aditivní výroba pomocí FDM (Fused Deposition Modeling) se v posledních letech stala klíčovou technologií pro konstrukci lehkých a tvarově složitých součástí v RC letectví. Tato metoda umožňuje výrobu přesných a pevnostně optimalizovaných komponent rychle, jednoduše a s minimální materiálovou spotřebou. Pro tuto aplikaci je potřeba filament schopný opakované ohybové deformace.

Práce se zabývá volbou materiálu, návrhem modelů křídla s morfovateľným flaperonem a interním mechanismem, dále tiskem, stavbou a testováním.

## 2 HLAVNÍ CÍLE

Tato diplomová práce se má zabývat návrhem funkčního mechanismu pohonu 3D tištěného morfovateľného flaperonu.

Začíná konstrukčním návrhem – ten obsahuje primárně řešení pohonu mechanismu flaperonu. Práce obsahuje hlavně výběr mezi servomotory, krokovými motory, táhly, bowdeny a dalšími možnými variantami. Hlavní limity jsou zde malý prostor uvnitř křídla a hmotnost. Cílem je zachovat co největší aerodynamickou čistotu profilu. Neměly by být žádné vystupující části mechanismu na vnějšku profilu křídla.

Pro návrh je nutné vybrat vhodný materiál, se kterým by byl proveden pevnostní výpočet určující geometrii. Hlavními požadavky jsou poddajnost, dobré únavové vlastnosti a pevnost.

Dále má být malá část demonstrátoru mechanizace flaperonu vytištěna a fyzicky testována. Testována má být spolehlivost mechanizace, geometrie, kinematika, únavové vlastnosti.

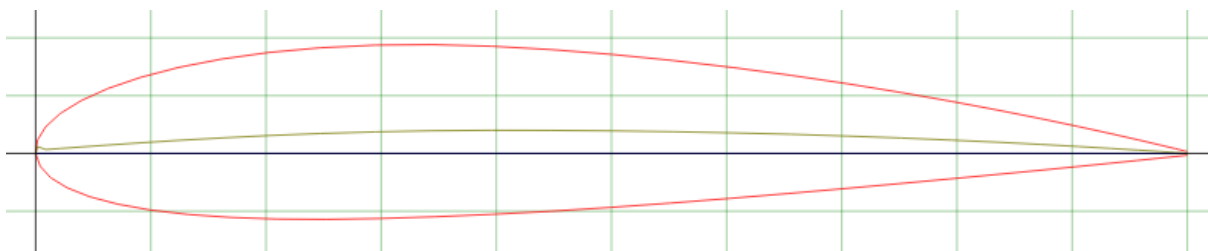
Projekt má být dimenzován pro letoun (**Obr. 1**) ze studentského spolku VUT Chickenwings, který může sloužit jako platforma pro letovou zkoušku mechanismu morfovateľného flaperonu.



Obr. 1 Dron z Chickenwings

## 2.1 CHARAKTERISTIKA VÝCHOZÍ GEOMETRIE

Křídlo pro tuto aplikaci má zvolený testovací profil NACA 2415 (**Obr. 2**) stejných rozměrů na kořeni i na konci křídla. Tětiva křídla je 200 mm. Uvažovaná lokace flaperonu je od kořene do poloviny délky křídla. Počáteční uvažovaná hloubka flaperonu je 10% tětivy, ale s tím, že dalších 20% tvoří morfovateľný potah, který se deformuje při pohybu flaperonu a tudíž tvoří jeho část. Zadaná výchylka je  $+20^\circ$   $-20^\circ$ . Křídlo má obsahovat interní strukturu tvořící žebra a také jeden nebo více nosníků.



Obr. 2 NACA 2415

Profil NACA 2415 má maximální tloušťku 15% v 29.5% délky tětivy. Pro tětivu 200 mm je to 30.27 mm. Tento rozměr je jedním z nejdůležitějších limitujících faktorů řešeního mechanismu s tím, že tloušťka potahu je zvolená 0.8 mm (vhodné pro 0.4mm trysku). Rozměry flaperonu, poddajného potahu a jejich hloubek jsou zvoleny na základě konzultace s vedoucím práce.

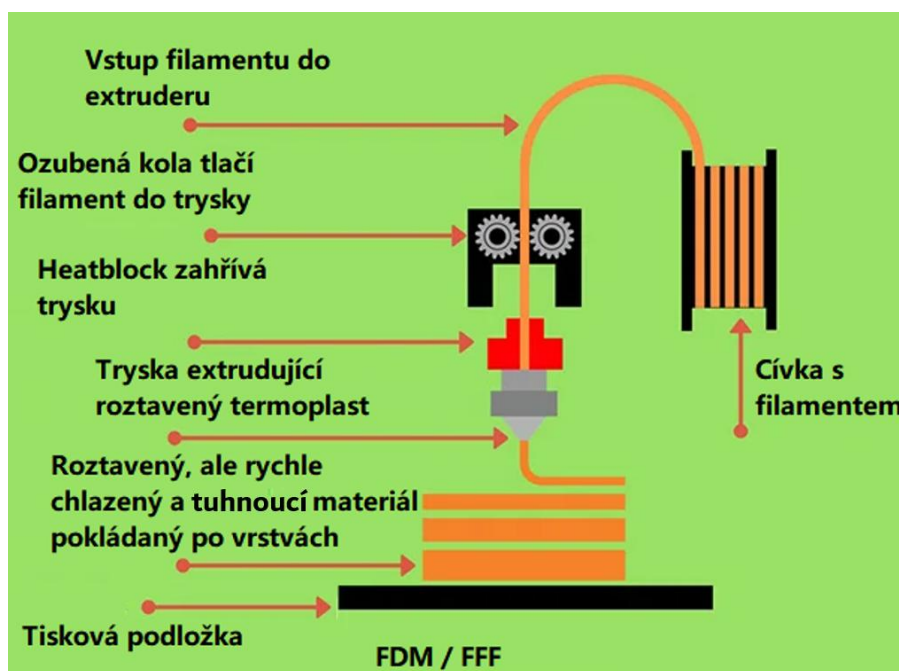
Morfovateľný flaperon ale nemůže konat pouze rotaci kolem nehybné osy v profilu křídla. Aby byl morfovateľný, musí být potah křídla i flaperonu spojený, bez aerodynamicky nevhodných přechodů mezi povrchy a vrubů. Velmi důležitou součástí tohoto řešení je aerodynamika křídla a její čistota, kterou se tento projekt snaží nezhoršit jakýmikoliv částmi vystupujícími ven z profilu. V RC letectví těchto a menších velikostí je většinou používáno ovládání aerodynamických řídicích ploch pomocí táhel a pák mimo potah. Cílem je se toho vyvarovat.

Flaperon s potahem spojeným s křídlem tedy musí konat translačně-rotační pohyb. Tím pádem není možné použít klasické rotační závěsy a panty. Samotný potah tvoří do určité míry jakýsi závěs. Právě kolem potahu (dle volby horního) a jeho ohýbání má být tvořen interní závěsový a ovládací mechanismus, který musí umožňovat a vytvářet tento pohyb.

### 3 3D TISK, POUŽITÍ V RC LETECTVÍ, POUŽÍVANÉ MECHANIZACE

V této kapitole je stručně vysvětlena aditivní výrobní metoda součástí – 3D tisk a dále základní úvod do nejpobulárnějších materiálů. Kapitola je převzata z vlastního průmyslového projektu: „Návrh technologie výroby a interní struktury 3D tištěného křídla dronu“ z předmětu Průmyslový projekt, který byl součástí studia. Kapitola problematiku rozvíjí a principy ověřené projektem jsou také uplatněny např. při výrobě modelů (kapitola 8) v této diplomové práci.

3D tisk je aditivní metoda výroby trojrozměrných součástí po vrstvách. Materiály jsou převážně polymery a kovy. Nejčastější technologií 3D tisku je FDM, také označován jako FFF (Fused Deposition Modeling a Fused Filament Fabrication). V této technologii tisku polymerů se využívá tisková struna (filament), o průměru 1.75 mm a v průmyslu i 2.85 mm. Filament je extrudérem tlačěn do zahřáté trysky, taven a ve 2D vrstvách extrudovaných na tiskovou podložku postupně tvoří 3D objekt. Na **Obr. 3** je zobrazen a popsán princip FDM 3D tisku [1].



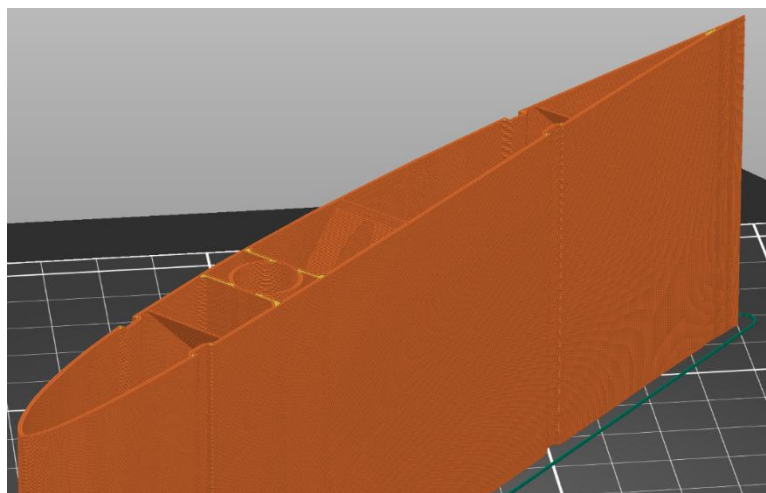
Obr. 3 Princip FDM 3D tisku (upraveno) [1]

#### 3.1 3D TISK V RC LETECTVÍ

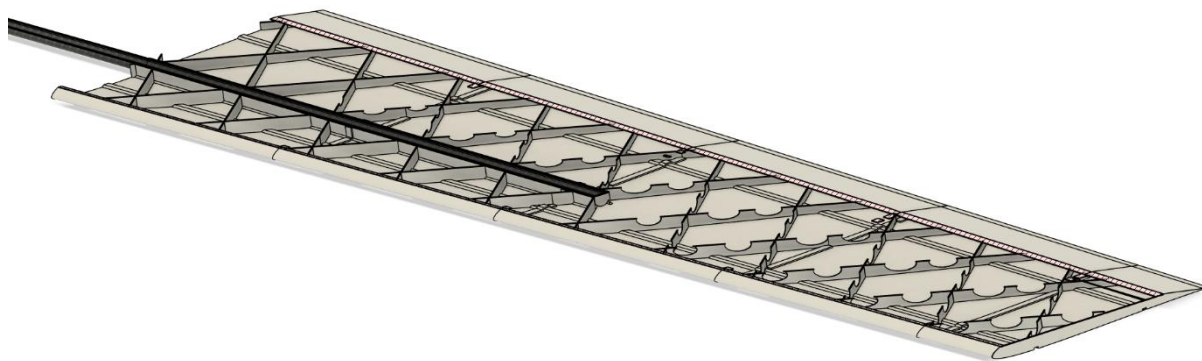
V letectví je u součástí třeba dosáhnout co nejnižší hmotnosti se zachováním pevnosti v požadovaných směrech, proto se nepoužívají žádné velké objemy s 100% výplní. Většinou se ani nepoužívají součásti vyplněné strukturou navrženou slicery, které, dle typu, mají poměrně izotropické pevnosti, pokud vynecháme důležitou vlastnost, kterou je adheze vrstev způsobující potenciální delaminace vrstev. Vnitřní struktura je tenkostěnná s vyztužením odlehčených žebér s různými typy potahu (jednovrstvé nebo s více vrstvami a výplní mezi nimi). Využívá se FDM tisk. SLS/SLA jsou určeny na menší součásti, a navíc vytvrzené pryskyřice jsou obecně mnohem

méně pevné než FDM filamentové součásti, dokud se používají levné tiskárny určené spíše pro hobby než pro průmysl. Tisk je ale skoro vždy omezen velikostí tiskového objemu, takže je třeba hlavně trup, křídlo dělit na části a spojovat. Možné je také přidávat struktury z jiných materiálů, nejvíce populární jsou trubky z uhlíkových kompozitů, hlavně ve křídlech, do kterých jsou vloženy a přenášejí tak většinu ohybového momentu jako hlavní nosníky. Potah se také může potříť epoxidovou pryskyřicí pro větší odolnost. Na **Obr. 4** je zobrazena vizualizace gcode – na vrstvy rozdělený 3D model připravený pro tisk na FDM 3D tiskárně. Jediná vhodná orientace modelu při tisku je tato zobrazená. Dodržet přesný tvar profilu a jeho hladkost nelze na malém měřítku nebo je to velmi složité, kdyby se tisklo v orientaci např. spodní plochou na tiskové podložce. Tudíž zvolená orientace tisku je tato na výšku, zobrazena v **Obr. 5**, přestože ohybová pevnost křídla není takto nejvyšší. Materiál je postupně vrstven ve směru podélné osy křídla.

Na **Obr. 5** je znázorněna interní struktura křídla z Průmyslového projektu, kterou tvoří 5 tištěných segmentů, kompozitová trubka do poloviny délky křídla pro přenášení většiny ohybového momentu a žebra, která mají k okraji křídla zvětšující se odlehčení (u kořene žádné). Na potahu také byly vytištěny drážky (2 na horním a 2 na dolním) a do nich epoxidovou pryskyřicí přilepeny pásy z uhlíkového kompozitu pro vyšší pevnost v ohybu tvořící stringery.



Obr. 4 Tisk segmentu křídla



Obr. 5 Žebra, interní struktura křídla

### 3.2 POUŽITÁ TISKÁRNA

Tiskárna použitá v této práci je Bambu Lab P1S. Je to tiskárna typu CoreXY, tudíž tisková podložka vykonává pohyb pouze v ose vertikální, a tak je vhodná pro tisk vysokých objektů např. segmenty křídel na výšku. Na tiskárnách, kde podložka vykonává pohyb v ose Y (horizontální) – bed slinger, se model hýbe, naklání a zhoršuje kvalitu tisku, případně ho může i pokazit tento nedostatek stability. Tiskárna vyobrazena na **Obr. 6** [2]. Použitá tryska je standardní 0.4 mm z důvodu rychlosti tisku a vhodnosti na předpokládané tloušťky stěn (0.8 mm).



Obr. 6 Bambu Lab P1S + AMS [2]

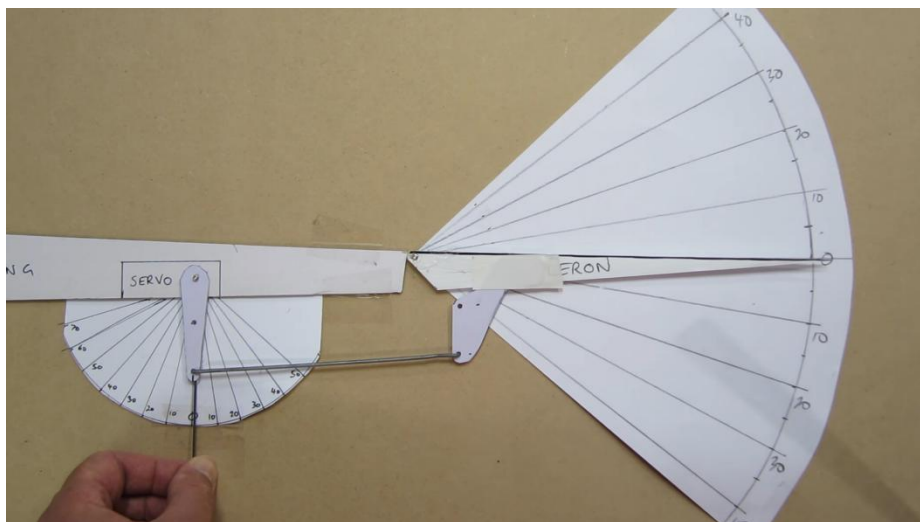
### 3.3 POUŽÍVANÉ MECHANIZACE KŘIDÉLEK A KLAPEK V RC LETECTVÍ

Zdaleka nejpoužívanější řešení rozpohybování křidélek RC letadel je skrz rotační servomotor částečně nebo úplně zapařčený v profilu křídla, který rotací výstupní hřídele přes rameno (páku) v závěsu vyvolá primárně translační pohyb táhla. Táhlo i obě páky jsou umístěné na vnější části křídla, nad horním nebo pod dolním potahem. Táhlo poté tlačí nebo tahá páku, které vystupuje z potahu křídélka nebo jiné ovládací plochy, a to rotuje kolem svého vlastního závěsu.

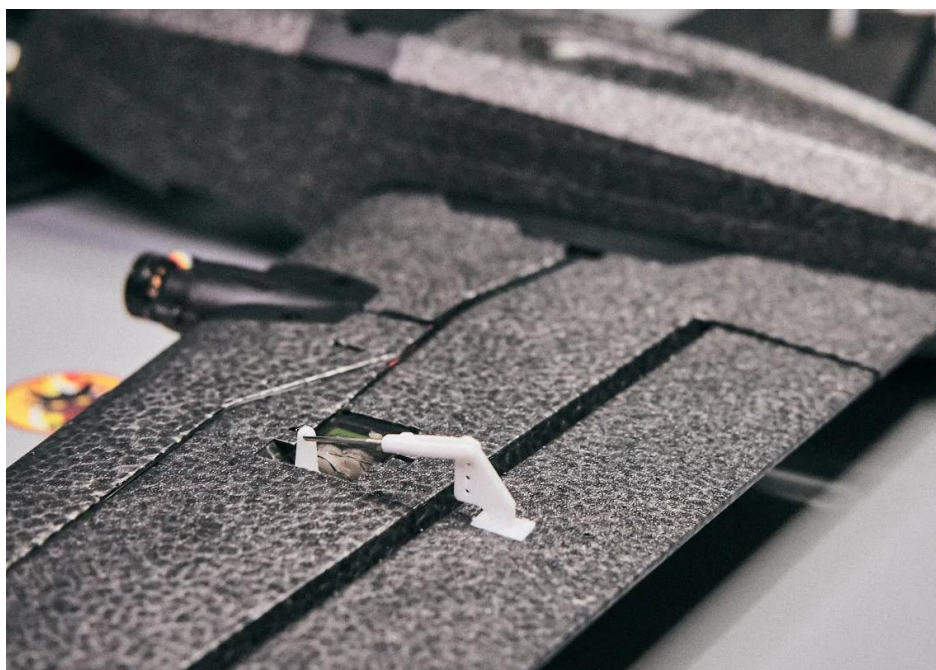
Na **Obr. 8** [3] je jednoduše znázorněn tento mechanismus. Také zobrazuje závislost délek ramen, kde když např. páka křídélka je kratší než rameno výstupu servomotoru, tak při malé výchylce servomotoru je velká výchylka křídélka (s potřebou většího kroutivého momentu). U menších letounů je také podobné řešení, které ale používá jeden centrální servomotor, který přenáší kroutivý moment uvnitř

křídél pomocí hřídelí souběžných s hlavními nosníky, ze kterých je moment vyveden do táhel taktéž umístěných mimo profil křídla.

Na **Obr. 7** [4] je tento mechanismus pohánějící křídélko vyhotovený na letounu. Jsou také viditelné různé montážní body na pákách křídélka a servomotoru.



Obr. 8 Vizualizace pohonu křídélka servomotorem přes táhlo [3]



Obr. 7 Mechanizace křidélek modelu Hee Wing T1 Ranger [5]

Servomotor a jeho hřídel také je někdy orientován pootočený o  $+90^\circ$  kolem podélné osy letounu do svislé orientace. Zobrazeno na **Obr. 9** [5] Takové řešení vystavuje ale větší plochu ramene proudu vzduchu, takže je méně aerodynamické. Jeho zástavba ale může být jednodušší.

Další možné způsoby ovládání aerodynamických ploch 3D modelů, hlavně pomocí mechanismů ukrytých uvnitř profilu, jsou popsány v kapitole (6).



Obr. 9 Servomotor pootočený [5]

## 4 MATERIÁLY – VÝBĚR FILAMENTU

V této kapitole je vybrán materiál pro 3D tisk křídla a flaperonu. Správný výběr je důležitý, protože příliš tuhý materiál by znamenal nutnost vyšších ovládacích sil pro dosažení výchylek. Dále jsou důležité únavové vlastnosti, teplotní stabilita, UV stabilita, tisknutelnost. Vlastnosti jsou popisovány ve smyslu relativních rozdílů mezi zmíněnými filamenti.

### 4.1 FDM FILAMENTY

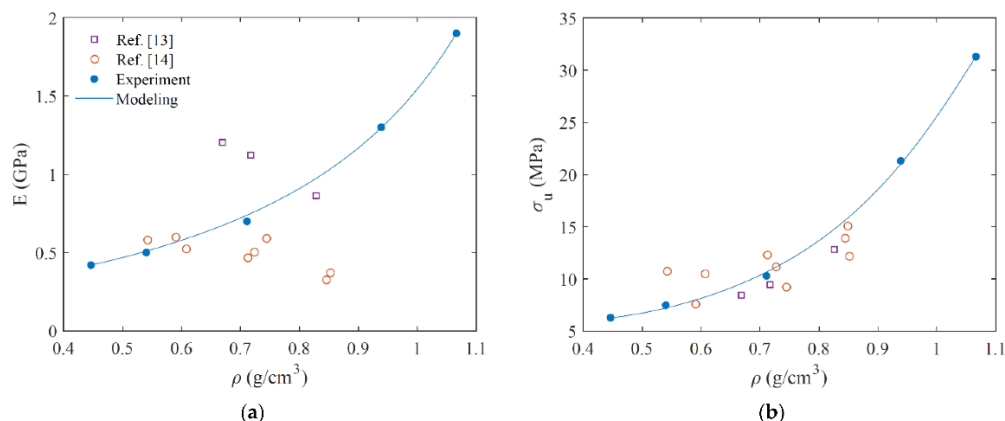
Nejpopulárnější polymery jsou PLA (Polylactic Acid), PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol), dále ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) a ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate). Popis materiálů v této subkapitole byl vytvořen pomocí vlastních zkušeností a popisů testů od CNC Kitchen [6] a All3DP [7].

PLA je nejméně náročný na tisk. Vyžaduje nízké teploty, má malé deformace při tisku, vysokou rychlost tisku, je levný, má nejvyšší modul pružnosti v tahu, ale je velmi křehký a nevydrží vysoké teploty – má teplotu skelného přechodu kolem 60 °C (teplota, při které ztrácí tvarovou stabilitu a začíná být měkký). Už i pod touto teplotou začne být znatelný creep PLA součástí. Hustota 1.24 g/cm<sup>3</sup>.

PETG vyžaduje vyšší teploty, a pomalejší tisk, také má vyšší hustotu, ale je méně tuhý a jeho teplota skelného přechodu je kolem 80 °C, takže se více hodí na venkovní aplikace na slunci a v teple. Oproti PLA je méně křehký a lépe upravovatelný po tisku – např. broušením. Má o 2% vyšší hustotu než PLA.

ABS má obecně vysokou pevnost, tvrdost, velmi vysokou rázovou houževnatost, více elastické i plastické deformace před lomem oproti PLA a oproti PETG o 19% nižší hustotu (1.05 g/cm<sup>3</sup>) a vydrží teploty do 100 °C. Nevýhodou je potřeba mít uzavřený tiskový prostor (enclosure), aby neunikalo teplo z tisknutého objektu, což by způsobilo odlepování od podložky a změnu tvaru již při tisku (warping, elephant foot). Dále také tavení ABS produkuje toxické výpary jako formaldehyd, takže je třeba mít filtrační systém / separovanou větranou místnost.

Poslední populární filament, ASA, je velmi podobný ABS, ale má lepší stabilitu v UV záření a je taky více tvarově stabilní v různých teplotách. Výhodou ABS i ASA je také díky obsahu styrenu možnost rozleptat povrch výtisků acetonovými výpary pro velmi hladký a lesklý povrch. Je považován prakticky za lepší, ekologičtější nástupce ABS.



Graf 1 Youngův modul a mez pevnosti v tahu v závislosti na hustotě LW PLA

Dále existují speciální filamenty. Lightweight PLA a Lightweight ASA. Tyto filamenty jsou pěnové, mají v sobě endotermickou pěnovou složku, která se začne mezi v teplotách 220-250°C (LW PLA) rozkládat a produkovat plyn, vytvářející bubliny, snižující hustotu hned po opuštění trysky. LW PLA má hustotu o přibližně 60% nižší než obyčejné PLA. Objem se zvýší na 250 %. Dle pevnostních zkoušek ale s největším snížením hustoty ztrácí kolem 80% hodnoty meze pevnosti v tahu. To lze vidět na (**Graf 1**) [8]. Hustotu je možné již ve sliceru ovlivňovat teplotou a průtokem. Čím vyšší teplota a nižší průtok, tím víc tepla polymer přijme a tím víc bude pění. V průběhu tisku je možné tyto hodnoty nastavit různě na různé části součásti a dosáhnout tím např. velmi lehké a v požadovaných směrech pevné struktury, např. sendviče s lehkou voštinou a pevnou vnější vrstvou.

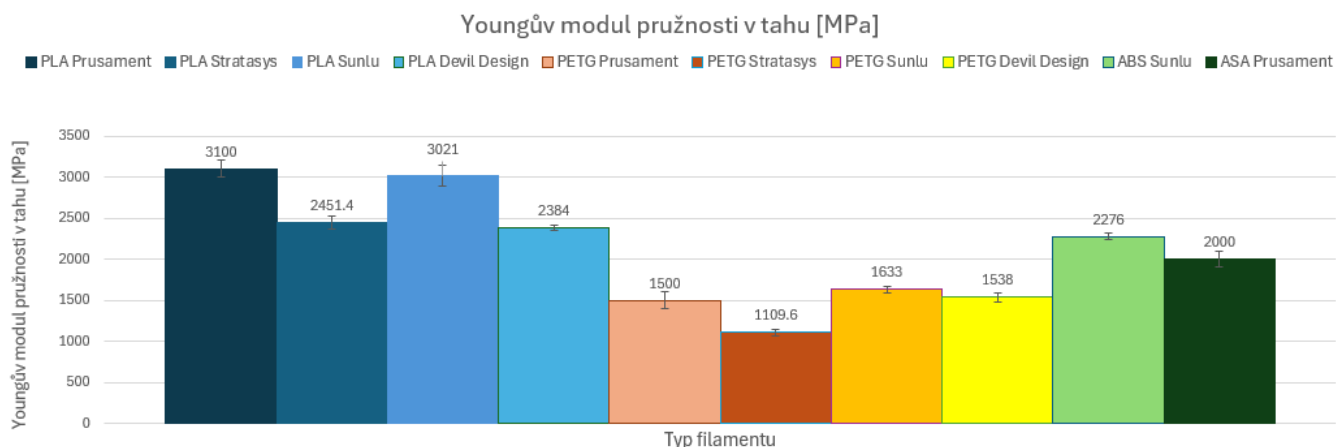
Hustota LW PLA je např. u ColorFabb LW PLA 1.210 g/cm<sup>3</sup> a po tisku pro co nejmenší hustotu je 0,403 g/cm<sup>3</sup>.

Hustota LW ASA je u ColorFabb LW ASA 1,07 g/cm<sup>3</sup> a po tisku pro co nejmenší hustotu je 0,43 g/cm<sup>3</sup>. [9]

## 4.2 YOUNGŮV MODUL PRUŽNOSTI V TAHU

Vyšší Youngův modul znamená tužší materiál, který se méně deformuje při stejné síle. Pro nižší ovládací síly je vhodný materiál s menší tuhostí. Zde byly porovnány výsledky různých studií testující různé druhy filamentů stejné značky a také materiálové charakteristiky udávané výrobcí. Testy jsou standardizované (ISO 527-1), pomocí zařízení na trhací zkoušky se aplikuje tahové zatížení na vzorek specifického tvaru (článekový vzorek / psí kost) se směrem tisku ve směru aplikace tahové síly.

První studie [10] se zabývá filamenty používanými spíše pro industriální 3D tiskárny, Stratasys. Porovnává PLA a PETG. Další studie se obsahuje testování stejného typu pro filamenty Sunlu PETG, PLA, ABS [11]. Tento článek obsahuje měření Devil Design PLA a PETG. [12] Poslední zdroj informací pro toto porovnání jsou data od výrobce tiskáren Prusa a filamentů Prusament [13]. Tato data jsou porovnána v grafu (**Graf 2**). Je zřejmé, že PLA má nejvyšší modul pružnosti v tahu: nad 2300 MPa, ASA a ABS poté mezi 2000 a 2300 MPa a nejnižší má PETG s přibližně 1100 až 1700 MPa. Variabilní pevnosti Lightweight filamentů (LW PLA, LW ASA) zobrazeny výše v (**Graf 1**).



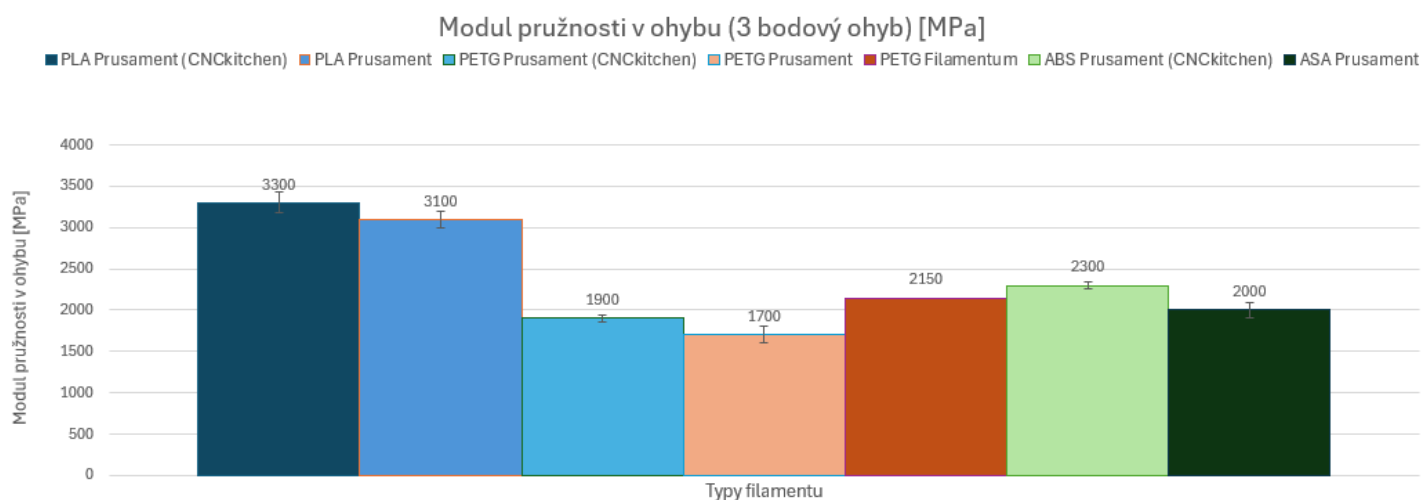
Graf 2 Youngův modul pružnosti v tahu PLA, PETG, ABS, ASA

### 4.3 PEVNOST V OHYBU

Pevnost v ohybu je dána modulem pružnosti v ohybu. Vyšší modul znamená vyšší schopnost materiálu odolávat ohybu. Zkouška je prováděna pomocí 3 – bodového ohybového testu. Testovací vzorek (obdélník) je na obou koncích položen na základny a uprostřed je v něm vyvoláván průhyb 3. kontaktní plochou, vzdálenost průhybu a potřebná síla jsou měřeny.

Jsou porovnány 3 zdroje dat. První je od CNCkitchen s filamenty Prusament: PLA, PETG, ABS [14]. Další je výrobce těchto filamentů: Průša s filamenty PLA, PETG a ASA (ABS se již nevyrábí, je zastoupen ASA) [13]. Poslední zdroj je technický list filamentu Filamentum PETG [15]. Kromě CNCkitchen nebyly nalezeny studie porovnávající více druhů filamentů dle této charakteristiky. Data zobrazena na (**Graf 3**).

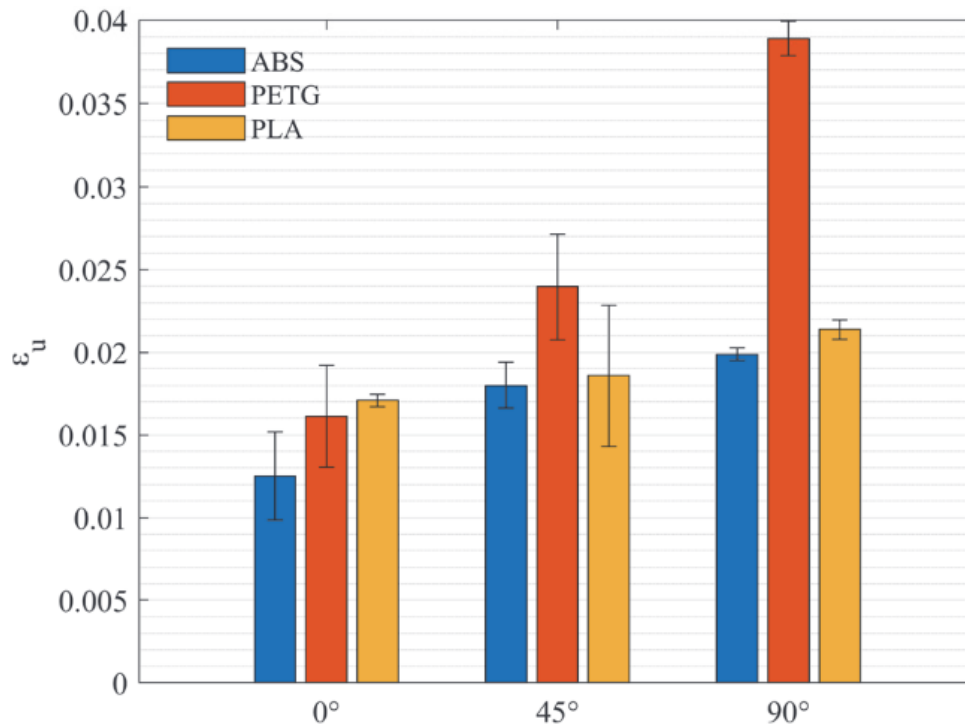
Podobně jako u modulu pružnosti v tahu, PLA má nejvyšší tuhost v ohybu s modulem pružnosti v ohybu nad 3000 MPa, po něm ASA a ABS nad 2000 MPa (ABS má vyšší o 300 MPa) a jako poslední je zase PETG s 1700 až 2150 MPa.



Graf 3: Modul Pružnosti v ohybu

### 4.4 LOMOVÁ CHARAKTERISTIKA – TAŽNOST

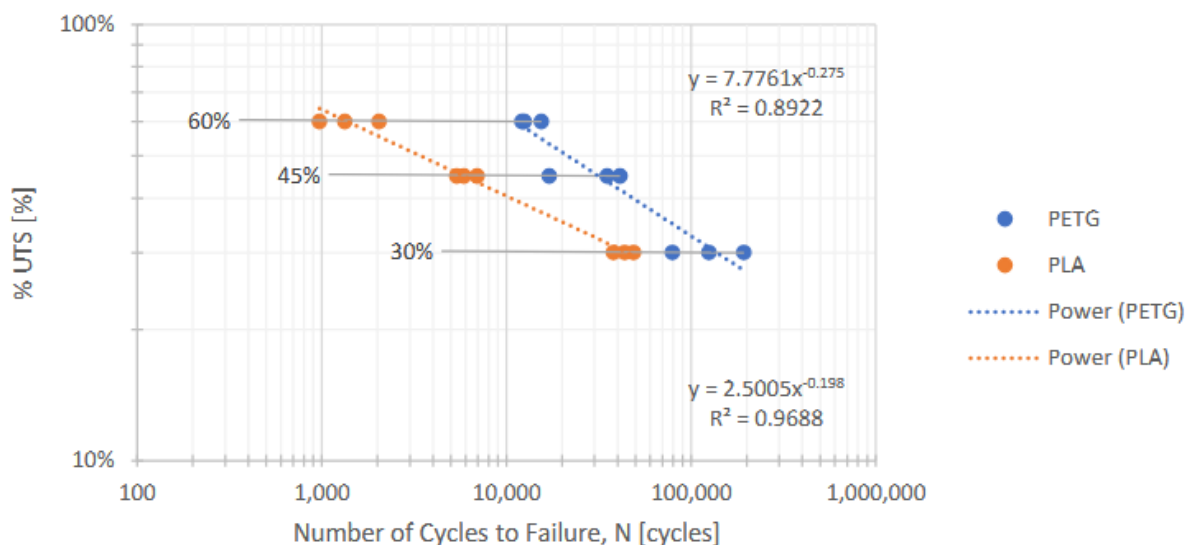
Charakteristika lomu a deformací je na letounu také důležitý parametr, příliš velká křehkost není žádoucí z důvodu rázů např. při nehodě. Dále je to také parametr spojený s požadavkem morfovateľnosti – možnost deformovat materiál co nejmenší silou. Výsledky z této studie [16] prokazují, že v tahu došlo k největší deformaci v relevantním směru (ve směru vláken) ve vzorku z PETG (**Graf 4**). Průměrná hodnota relativního prodloužení PETG (90° tzn. ve směru vláken) byla  $\epsilon = 0.039$ . Jsou ale také studie s opačnými výsledky. Obecně se ale pokládá PETG za filament s menší tahovou i ohybovou tuhostí oproti ostatním zmíněným, který před lomem viditelně deformuje. To je vhodné mimo morfování např. i pro opraviteľnost po plastické deformaci bez lomu.



Graf 4 Relativní prodloužení do selhání [16]

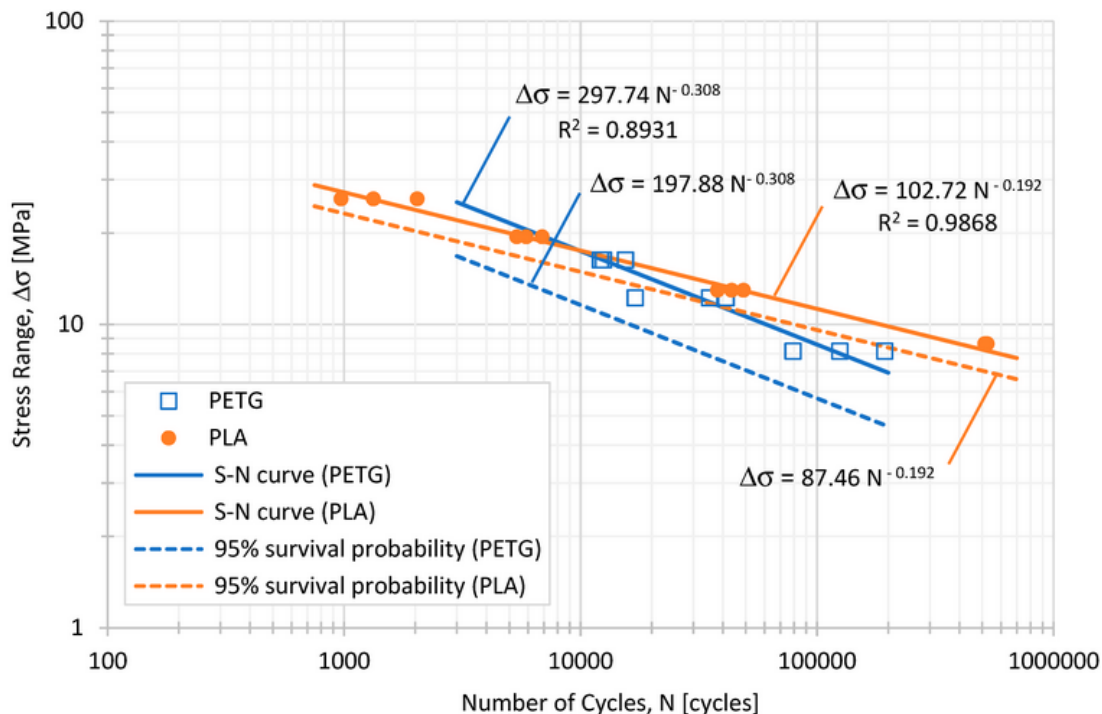
#### 4.5 ÚNAVA MATERIÁLU

Únavové charakteristiky FDM 3D tištěných vzorků stejného typu nejsou data volně dostupná v dostatečném množství, ale následující akademická práce [17] porovnávající PLA a PETG došla k závěru, že PLA dosáhne více cyklů na stejném procentu své meze pevnosti než PETG. (Graf 5) zobrazuje tuto charakteristiku pomocí Wöhlerovy křivky, kde jsou porovnávány křivky této charakteristiky po tahových únavových zkouškách.



Graf 5 Wöhlerova křivka PETG, PLA [18]

Dále tato publikace [18] došla k podobnému závěru, kde ve středně – vysokocyklovém zatěžování dosahuje PLA lepších výsledků (více cyklů při stejném zatížení) než PETG. Filamenty značky Stratasys. (**Graf 6**). Zatížení je také v procentech meze pevnosti pro oba materiály jednotlivě.



Graf 6 Wöhlerova křivka PETG, PLA [18]

#### 4.6 TEPLOTNÍ STABILITA

Letoun z PLA může být omezován horkými teplotami a zahříváním se v teplých letních dnech, hlavně kdyby byl natřený tmavou barvou, která by způsobila větší zahřívání. Na **Obr. 10** lze vidět, co se stane s LW PLA dronem po méně jak pár hodinách v létě v horkém automobilu. [19]



Obr. 10 RC letoun z LW PLA deformovaný po zahřátí v automobilu [19]

Teploty skelných přechodů jsou již popsány v subkapitole **4.1**. Nejlepší má ASA, která má také UV stabilitu oproti ABS, dále je pro venkovní použití vhodný PETG a PLA je nevhodné pro vyšší venkovní teploty.

## **4.7 ZHODNOCENÍ**

V tomto projektu je sice důležité se přiblížit ideální geometrii délky poddajného potahu a jeho ohybu, kterou by tento výpočet diktoval, ale to není možné bez výpočtu dedikovaného pro FDM tištěné materiály. Důležité jsou tedy reálné parametry jako schopnost deformace pro co nejmenší potřebné ovládací síly, nízká křehkost, teplotní stabilita, nízká hustota, tisknutelnost a další.

Pro tento projekt je zvolen primárně filament PETG z důvodu nejnižšího modulu pružnosti v tahu a hlavně v ohybu, dostatečné teplotní odolnosti (teplota skelného přechodu nad 70°C, na rozdíl od 45°C až 50°C, při kterých PLA měkne). Dále je PETG velmi vhodný technologicky, tisknout jej není problém, stejně jako PLA. Nepodléhá skoro žádné viditelné kontrakci při chladnutí během tisku a následného odlepování tištěného křídla od tiskové podložky. Tento problém je velmi znatelný u tisku ASA a ABS (popsáno v kapitole **4.1**). PETG také není křehký, případná nehoda letounu způsobí menší škody než u PLA. Má dobrou adhezi vrstev.

Nevýhodou ale je jeho nejvyšší hustota, použití PETG by ale v dalším výzkumu bylo možné lokalizovat, jak popisuje kapitola **10**.

Lightweight ASA je také dobrou variantou, ale je očekávána horší adheze vrstev (to je i prakticky demonstrováno na ASA testovacím modelu 2 v kapitole **9.3**). Dále by bylo třeba se více zabývat správnými parametry průtoku a rozměrovou přesností s variabilní pěnivostí, kterou lightweight ASA i PLA přináší.

## 5 XFOIL VÝPOČET DYNAMICKÉHO TLAKU – SÍLY – REAKCE

V této kapitole je proveden výpočet dynamického tlaku pomocí algoritmu Xfoil [20]. Pomocí tlaku je vypočítána teoretická síla na flaperonu a z ní reakční moment v závěsu.

Parametry pro výpočet:

profil křídla: NACA 2415

počet panelů: 102

vstupy podle ISA 0 msa:

hustota  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$

kinematická viskozita  $\vartheta = 1.461 \cdot 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$

dynamická viskozita  $\mu = 1.44189 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$

délka tětivy:  $c = 0.2 \text{ m}$

poměr tětivy flaperonu a křídla: 0.7

uvažovaná délka elementu křídla:  $L_w = 0.4 \text{ m}$

rychlost:  $v^\infty = 54 \text{ km/h} = 15 \text{ m/s}$

tlak vzduchu:  $p_\infty = 101325 \text{ Pa}$

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l_{Re}}{\vartheta} = \frac{1.225 \cdot 15 \cdot 0.2}{1.461 \cdot 10^{-5}} = 251540 \quad [-] \quad (5.1)$$

Číslo bylo použito pro výpočet Xfoil algoritmem v softwaru XFLR5 [21]. V něm byly vytvořeny profily s vychýlením klapky o  $-20^\circ$  a  $+20^\circ$ . Výsledné tlakové koeficienty  $C_p$  jsou znázorněny na **Obr. 11** a **Obr. 12**. Z výpočtu s negativní výchylnou byla získána maximální hodnota  $C_{p_{negD}}$  v grafu: 0.5, na horní straně potahu je negativní  $C_{p_{negH}} = -0.4$ . Z grafu s pozitivní výchylnou vychází největší  $C_{p_{posD}} = 0.4$  a  $C_{p_{posH}} = -0.2$ . Výpočet tedy je proveden s větší hodnotou:  $C_{pD} = 0.5$  a  $C_{pH} = -0.4$ . Pro přesnější, ale míň konzervativní výpočet by bylo také možné počítat s více segmenty s různými  $C_p$  anebo přes integrál výsledné křivky.

Tlakový koeficient pro libovolný bod na potahu křídla lze vypočítat takto [22]:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} = \frac{\frac{1}{2}\rho(V_\infty^2 - V^2)}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad [-] \quad (5.2)$$

z toho lze vyjádřit lokální tlak:

$$p = p_\infty + C_p \cdot \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 \quad [Pa] \quad (5.3)$$

z tlaku rozloženého na plochu lze získat síla:

$$F = (p_{\infty} + Cp \cdot \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2) \cdot A \quad [N] \quad (5.4)$$

Z ní se odebere tlak proudícího vzduchu, ten působí stejně i na opačnou stranu plochy:

$$F = Cp \cdot \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 \cdot A \quad [N] \quad (5.5)$$

Pro připočítání síly vytvořené podtlakem na horním potahu se  $C_p$  rozdělí na horní a dolní:

$$F = (Cp_D - Cp_H) \cdot \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 \cdot A \quad [N] \quad (5.6)$$

Výsledná maximální síla, která působí ve středu plochy flaperonu při negativní výchylce:

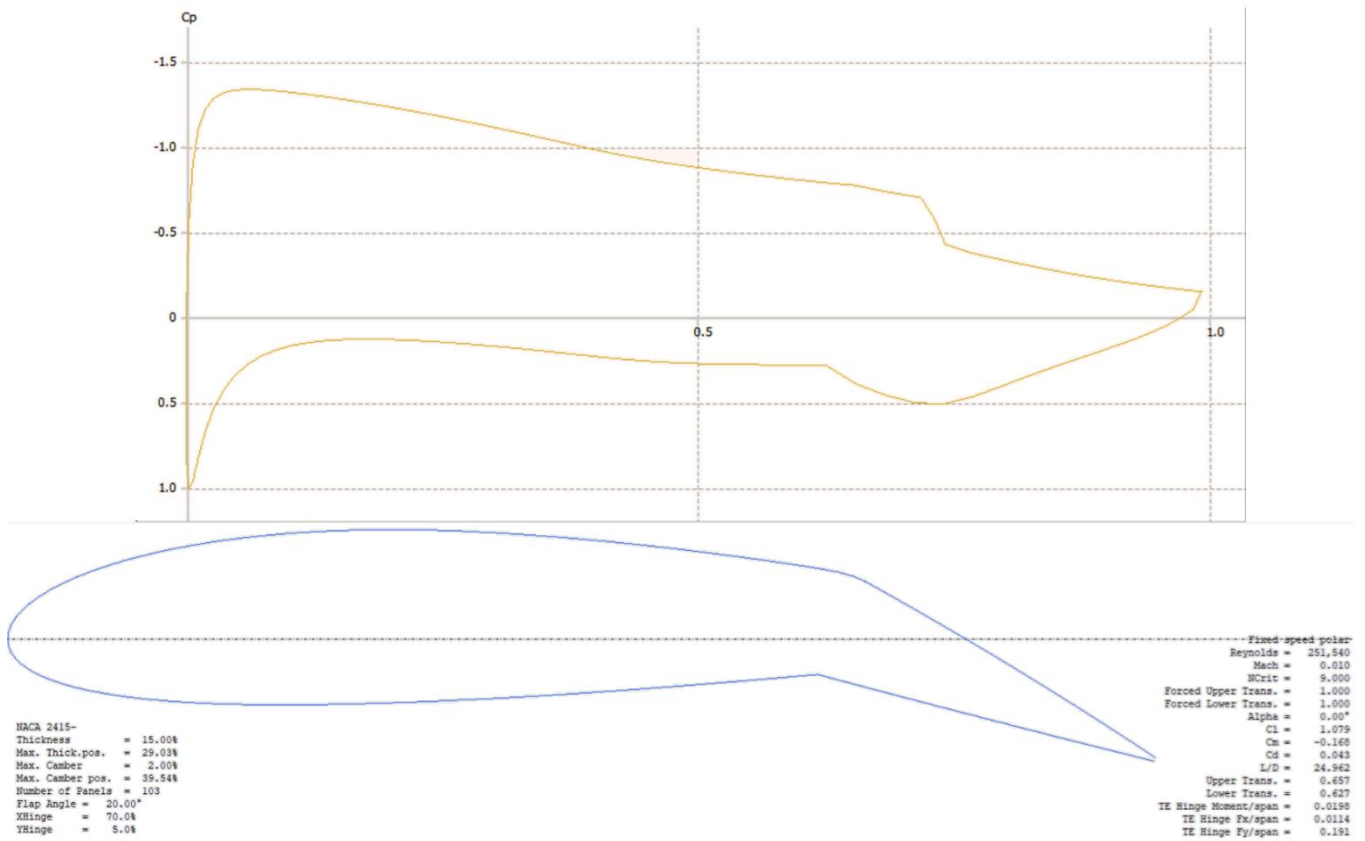
$$F_{FL} = (0.5 + 0.4) \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 15^2 \cdot 0.4 \cdot 0.06 = 2.97675 \text{ N}$$

Reakční moment v závěsu flaperonu z této síly, který „vrací“ flaperon zpět směrem k neutrální výchylce vzniklý pouze aerodynamicky:

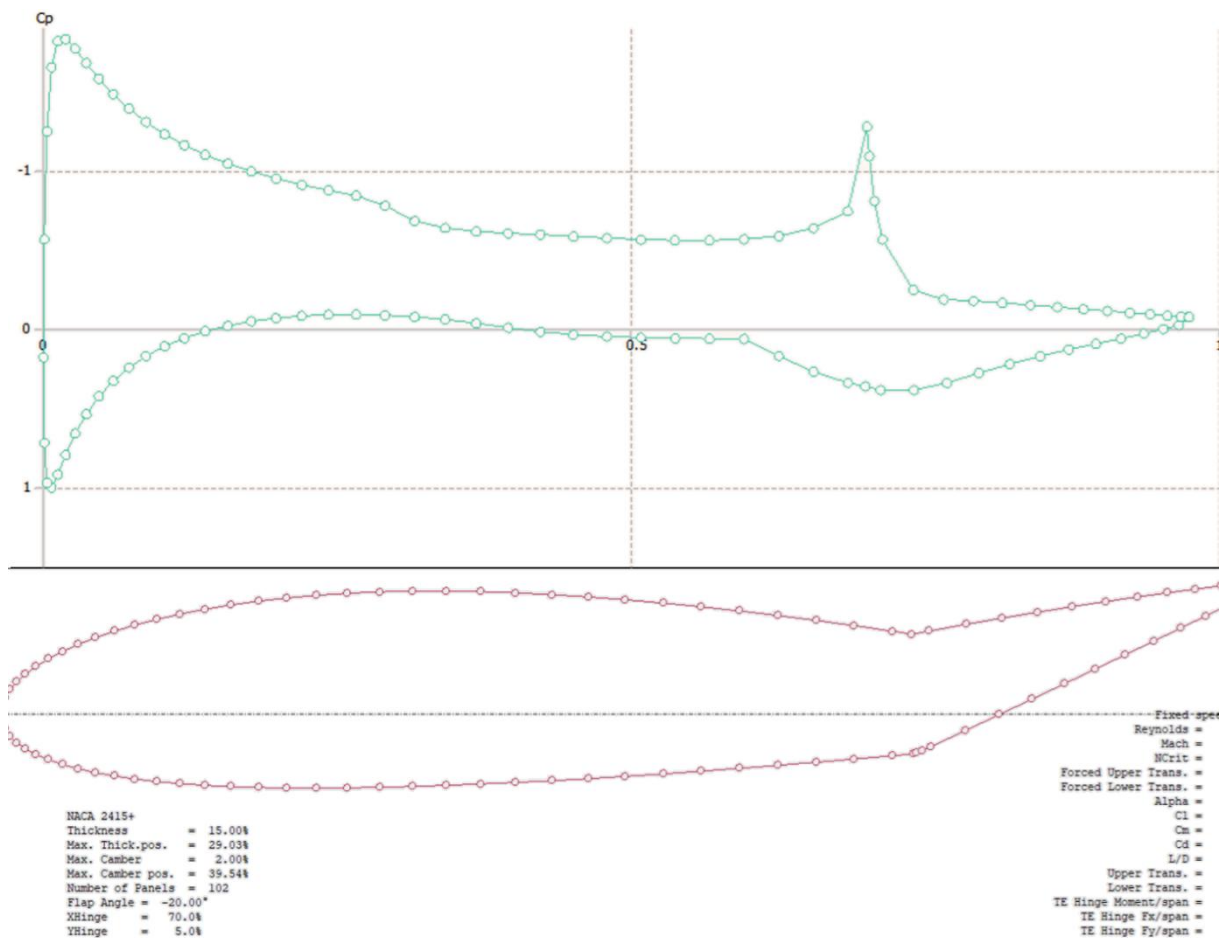
$$M_{Z\dot{A}} = F \cdot \frac{c \cdot 0.3}{2} \quad [Nm] \quad (5.8)$$

$$M_{Z\dot{A}} = 2.97675 \cdot \frac{0.06}{2} = 0.0893025 \quad [Nm]$$

Tyto hodnoty jsou dále použité v kapitole (7).



Obr. 11 XFLR5 CP výchylka -20°



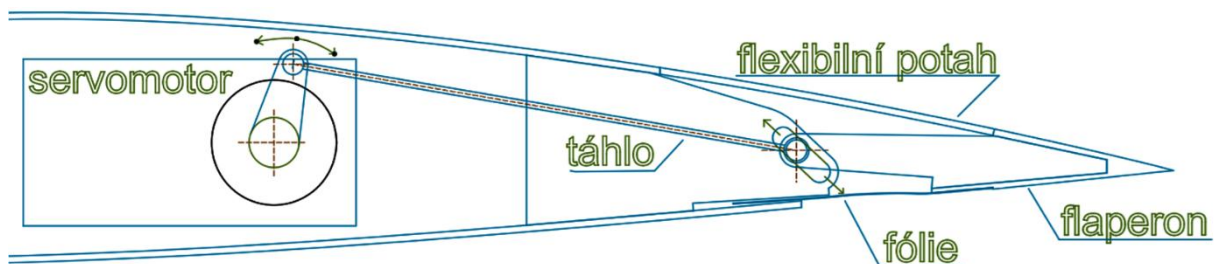
Obr. 12 XFLR5 CP výchylka +20°

## 6 NÁVRHY ŘEŠENÍ GEOMETRIE A MECHANIZACE

V této kapitole jsou popsány možné základní konfigurace, z některých z nich poté vychází konstrukční řešení. Jak bylo popsáno v kapitole (2.1), mechanizace musí zajišťovat rotačně-translační pohyb flaperonu a nevystupovat ven z profilu. Tudiž žádná klasická řešení přes páky a táhla vyvedená ven, popsána v kapitole (3.3) zde dále diskutována nejsou.

### 6.1 ŘEŠENÍ Č. 1: SERVOMOTOR POHÁNĚJÍCÍ TÁHLO, ROTACE A POSUN V ŠIKMÉ DRÁŽCE

V tomto možném řešení je servomotor kategorie standard (velikost 40x38x20 mm) umístěn uvnitř profilu křídla a přes malou páku tlačí nebo tahá táhlo, které působí na čep v šikmé drážce. Tento čep je součástí flaperonu a ten se v průběhu pohybu otáčí kolem tohoto čepu a zároveň posouvá po dráze dané drážkou. Výsledné pozice flaperonu jsou znázorněny v dalším řešení (6.3). Mechanismus je tedy typu tažný/tlačný. Zobrazeno s popisy na Obr. 13.



Obr. 13 Řešení č. 1: Servomotor, táhlo, šikmá drážka

Rozměr a úhel šikmé drážky byl dán ohybem potahu o konstantní délce. Délka drážky je 6 mm. Servomotor koná rotační pohyb pouze 32.3°. Páka servomotoru je pouze 10 mm.

Výhody:

- jednoduchost

Nevýhody:

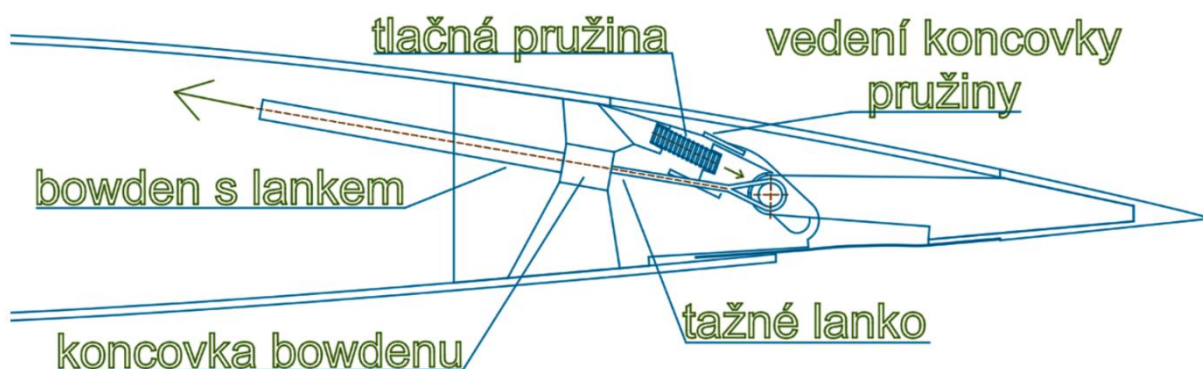
- malý pracovní rozsah servomotoru: 32.3°, tudíž vysoký kroutící moment
- mechanismus není samosvorný, servomotor by musel neustále odolávat reakčním silám v zavěšení z dynamického tlaku proudu vzduchu
- složitá zástavba – málo prostoru pro páku servomotoru
- nebezpečí otlacení drážky
- pro reálnou aplikaci na dlouhém křídle by bylo potřeba několik motorů (hmotnost)

### 6.1.1 VERZE S LINEÁRNÍM AKTUÁTOREM

Toto řešení také má variantu, kde místo rotačního servomotoru by byl použit lineární aktuátor, např. tento [23]. Tyto lineární servomotory, uložené na rotační vazbě na jednom konci pro umožnění translace drážkou, by přinesly velmi jednoduché řešení vhodné pro tenké profily křídel. Nabízejí posuny 10, 25, 50 mm a více, silou 26, 80, 122 N. Ceny aktuátorů jsou ale vysoké, nad 2500 Kč.

### 6.2 ŘEŠENÍ Č. 2: SERVOMOTOR CENTRÁLNÍ V TRUPU, TAŽNÝ BOWDEN, VRATNÁ TLAČNÁ PRUŽINA

Toto řešení využívá stejnou drážku jako řešení předchozí (6.1), je tedy taky tažné/tlačné. Pro tah je použitý bowden s lankem, které je přivázané k čepu v drážce a tahá ho. Bowden by byl vedený souběžně s jedním z nosníků v křídle a zavedený na jeden centrální servomotor pro dané křídlo (letoun by tedy měl 2). Tento servomotor by ovládal více tažných lanek najednou pro několik bodů mechanizace po délce křídla. Zpětný pohyb (kladná výchylka nebo vrácení se do neutrální polohy) způsobuje tlačná pružina, která tlačí čep do spodní části šikmé drážky. Zobrazeno s popisy na Obr. 14.



Obr. 14 Řešení č. 2: centrální servomotor, pružina, bowden

Výhody:

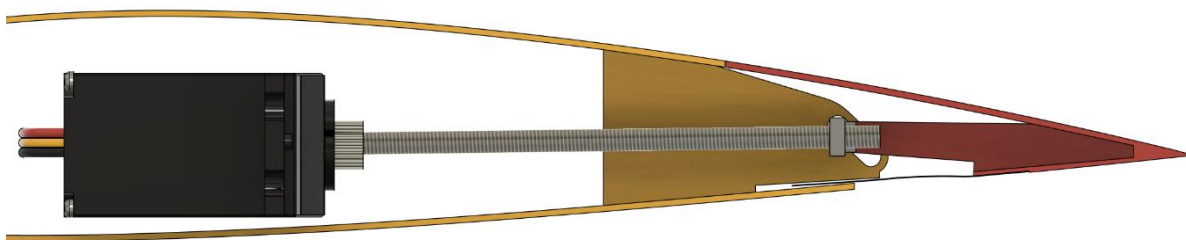
- Poměrná jednoduchost
- Malá hmotnost (pouze 1 servomotor na křídlo)
- Velmi malá velikost zástavby

Nevýhody:

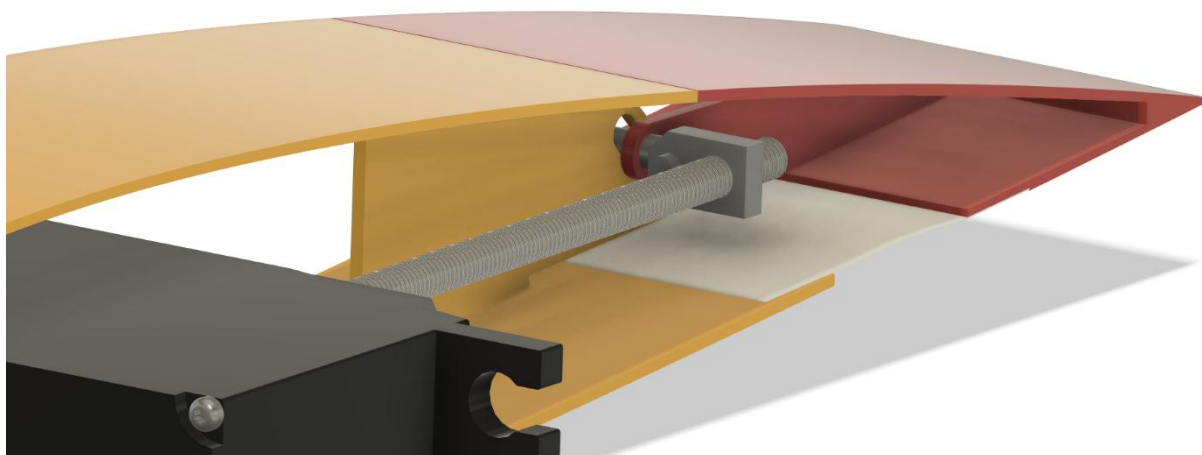
- Není samosvorný: servomotor by musel konstantně odolávat síle všech pružin v křídle
- Potenciálně nedostatečná tuhost

### 6.3 ŘEŠENÍ Č. 3: ŠIKMÁ DRÁŽKA, SERVO MOTOR V KŘÍDLE, ZÁVITOVÁ TYČ

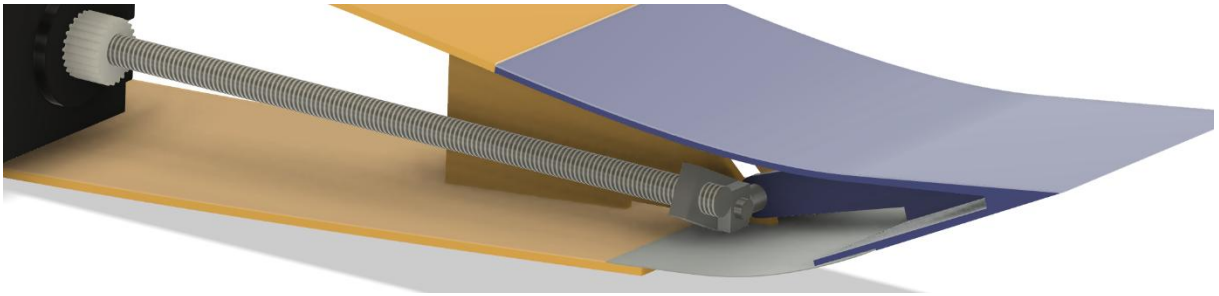
Toto řešení je komplexnější než předchozí, ale robustnější. Tažné/tlačné. Je užitá stejná drážka, v ní je čep, ten má na sobě připevněný další čep, umístěný radiálně a ten zapadá do hranaté matice na M3 závitové tyči spojené se servomotorem. Když se tyč otáčí, matice se posouvá dopředu nebo dozadu a k ní připevněný čep flaperonu se posouvá drážkou.



Obr. 16 Řešení č.3: servomotor se závitovou tyčí v křídle, drážka 2D



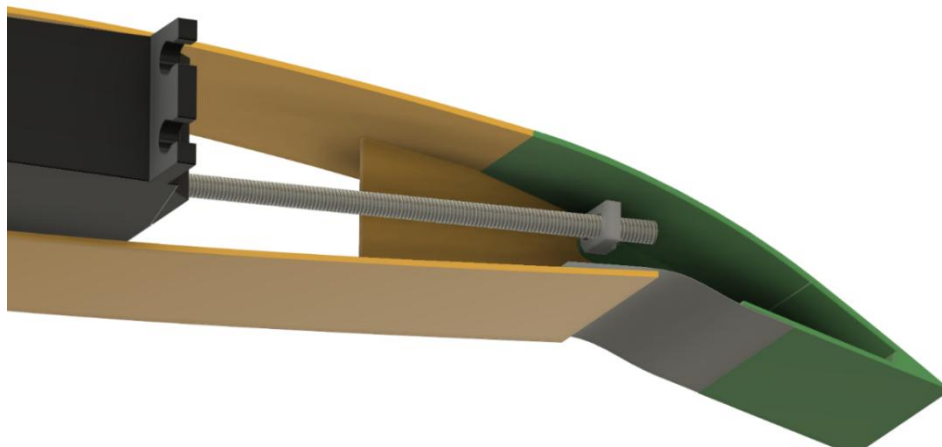
Obr. 15 Řešení č.3: servomotor se závitovou tyčí v křídle, drážka 3D



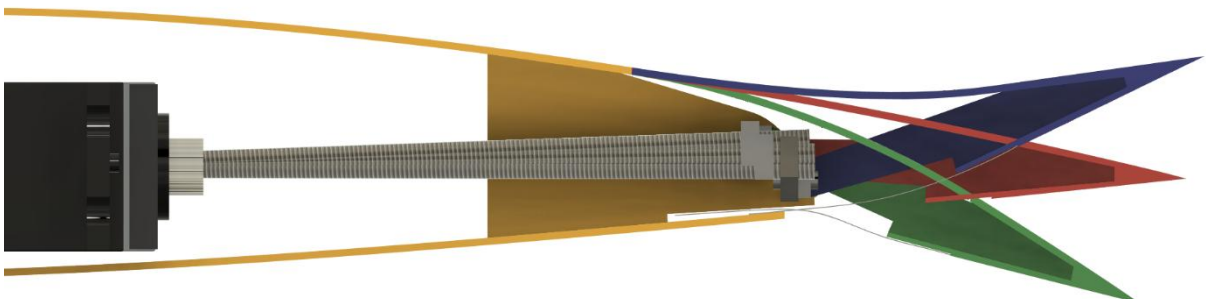
Obr. 17 Řešení č.3: servomotor se závitovou tyčí v křídle, drážka, vychýlení+ 3D

Na **Obr. 15** a **Obr. 17** je znázorněné řešení matice a čepů. Spojení matice s čepem má také funkci uzamknutí rotace matice k pozici flaperonu. Výsledkem je její otočení jen o  $25^\circ$  v závislosti na poloze čepu flaperonu v šikmé drážce. Toto spojení má také důsledkem malou vertikálně – horizontální variaci v poloze konce závitové tyče – dochází k průhybu. Průhyb M3 70 mm tyče je pouze 3 mm. To je velmi málo a M3 tyč má poměrně malou tuhost, takže to nevyvolá příliš velké nežádoucí reakční síly.

Axiální ustavení čepů v tomto 3D modelu není znázorněno, bylo by provedeno pojistnými kroužky a tvarově.



Obr. 19 Řešení č.3: servomotor se závitovou tyčí v křídle, drážka, vychýlení- 3D



Obr. 18 Řešení č.3: servomotor se závitovou tyčí v křídle, drážka, výchylky 3D

Na **Obr. 15, Obr. 17, Obr. 19, Obr. 18** lze vidět různé výchylky flaperonu. Pohyb je od  $-20^\circ$  do  $+20^\circ$  s translací bodu otáčení (čep v drážce) v rozsahu 6 mm.

Na stejných obrázcích je taky lépe vidět řešení spodního potahu, již znázorněné, ale jen ve 2D v kapitolách **6.1** a **6.2**. Řešení spočívá v plastové elastické fólii, která je nalepena k vnějšímu potahu flaperonu a je spojena se zbytkem křídla tak, že zapadá do drážky, ve které klouže podle pohybu flaperonu. Je to lehce vylepšené řešení toho, co se používá i na reálných kluzácích např. kde fólie překrývá zavěšení kormidel pro zamezení proudění vzduchu, např. ze spodní strany křídla na horní skrz závěsy. Fólie se většinou ale lepí na křídlo a přesahuje ke kormidlu, ke kterému se díky zvýšenému tlaku pod křídlem „přilepí“ sama za letu. Takové řešení je taky možné a podle testu této inovace by bylo možné to aplikovat.

Toto řešení ale používá servomotor velikosti standard. Je třeba použít kontinuální servomotor, který není ovládán pomocí signálu, který udává jeho pozici, ale signálu, který udává jeho rychlost (ve směru hodinových ručiček nebo proti podle velikosti hodnoty).

Výhody řešení č.3:

- Tuhost součástí
- Samosvornost díky závitu

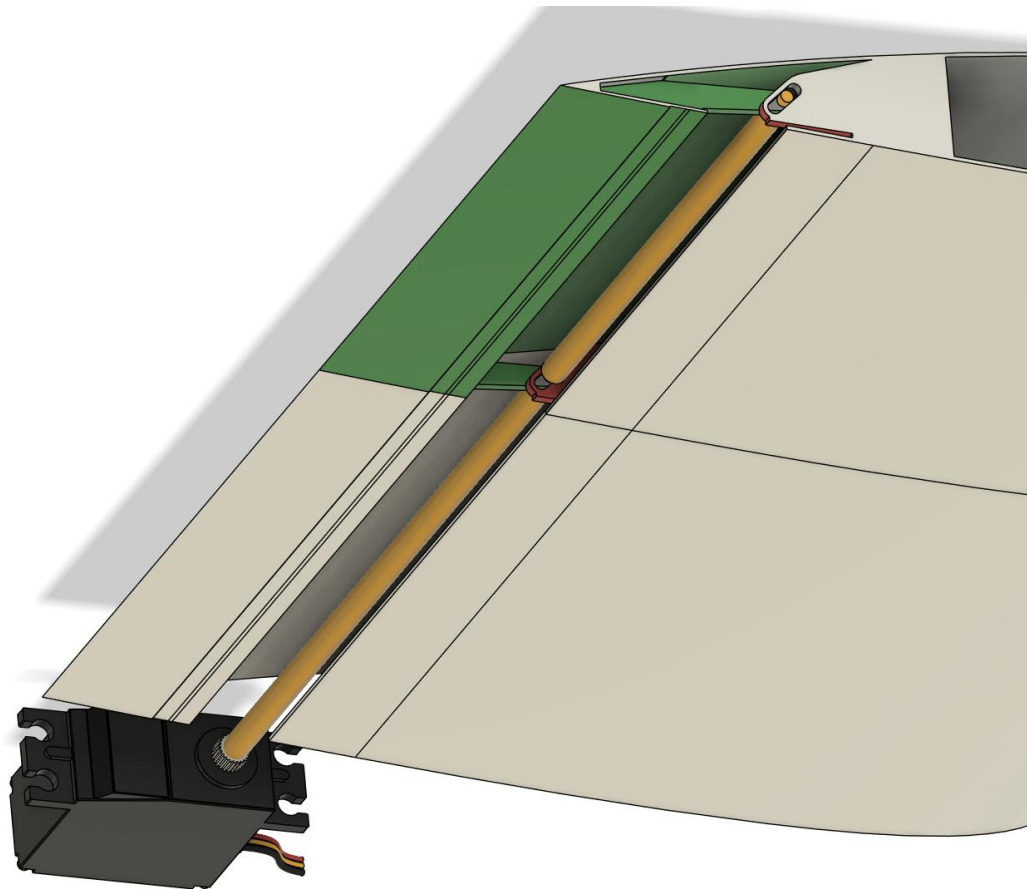
Nevýhody:

- Hmotnost tyčí a servomotorů, které by musely být rozmístěny v několika bodech po délce křídla
- Rychlost ovládání
- Složitější ovládání – nutnost sledovat polohu motoru kódem anebo pomocí rezistence = zvýšeného napětí při nárazu na end stop

#### **6.4 ŘEŠENÍ 4: OVLÁDÁNÍ KRUTEM ZAVEDENÝM NA ČEP V DRÁŽCE**

Dalším možným způsobem ovládání je přes krut. V jednodušších menších RC letounech je podobným způsobem řešeno ovládání, zde je ale nutnost umožnit bodu rotace 6 mm translace. Do čepu je tedy zaváděn krutivý pohyb přes trubku/tyč zavedenou z jednoho servomotoru v trupu. Ta otáčí čepem a kvůli reakci horního potahu na tuto silovou dvojici by měla vzniknout translace.

Nutností je umožnit trubce – hnacímu hřídeli tedy translaci. To by mělo být možné pomocí malé tuhosti hřídele. To ale přináší další problém ve formě rozdílných krutových deformací trubky v různých bodech její délky kvůli momentu, co přenáší. Dalším řešením by byl miniaturní kloub podobný kardanovému. Řešení znázorněno na **Obr. 20**, kde je flaperon (zelený) vzdálený od trupu.



Obr. 20 Řešení 4: krut přes hřídel do čepu závěsu flaperonu

Výhody:

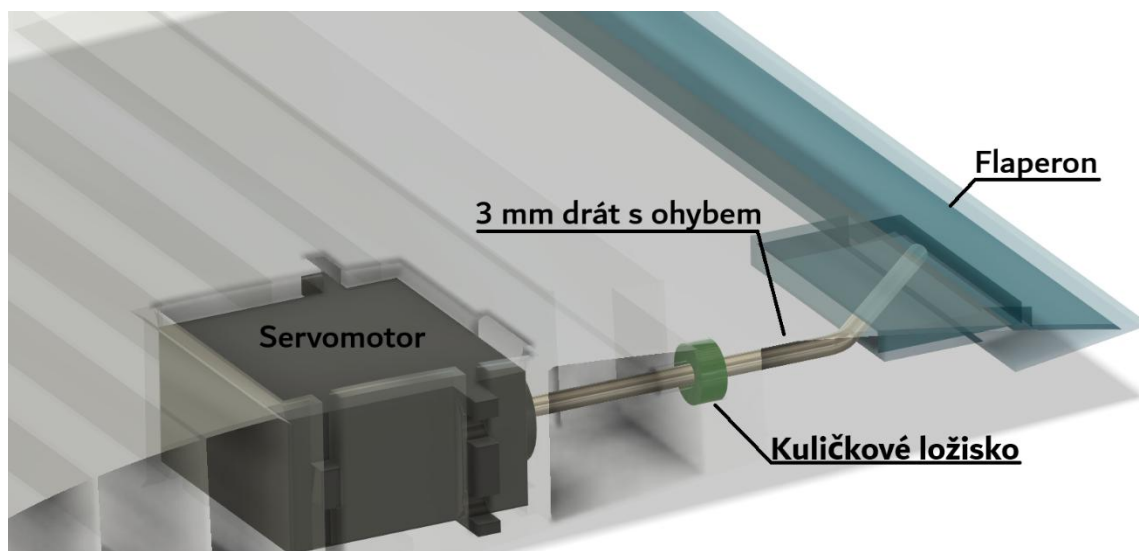
- Jednoduchost
- Velmi malý rozměr
- Nízká hmotnost (jen 1 servomotor a hřídel)

Nevýhody:

- Nutnost vyřešit translaci hřídele
- Různé pootočení hřídele v různých bodech délky → rozdílná výchylka flaperonu po jeho délce
- Kinematika, která by vyžadovala nejvíce reálných testů
- Malá tuhost, mohlo by dojít ke zborcení potahu

## 6.5 ŘEŠENÍ 5: RDS – ROTARY DRIVE SYSTEM – OTÁČENÍ LOMENOU HŘÍDELÍ V KAPSE FLAPERONU

Toto řešení lze nalézt pod názvem RDS, je občas používáno v RC letectví, když je cílem skrýt mechanizaci ploch dovnitř křídla. Video zobrazující funkci např. zde: [24]. Součástí, která je principiálně spíše excentrický aktuátor, bude dále nazývána hřídel.



Obr. 21 Řešení 5: RDS, výchylka 0°

Funguje na principu kovové hřídele (drátu), která je poháněna servomotorem a na konci ohnutá o úhel, který se rovná úhlu výchylky, pokud servomotor otočí hřídel o 90°. Konec hřídele, natočený o tento úhel, je umístěn ve flaperonu v placaté kapse. Touto kapsou během své rotace klouže a vychyluje jí. V tomto případě (**Obr. 21**), kde je hřídel servomotoru kolmá na osu otáčení flaperonu, je ohyb 45° a tím pádem by maximální výchylka flaperonu byla 45°. Hřídel je při pozitivní výchylce málo zasunutá do kapsy, v negativní výchylce naopak hluboko. To je dané translačně-rotacním pohybem flaperonu a konstantní délkou poddajného potahu.

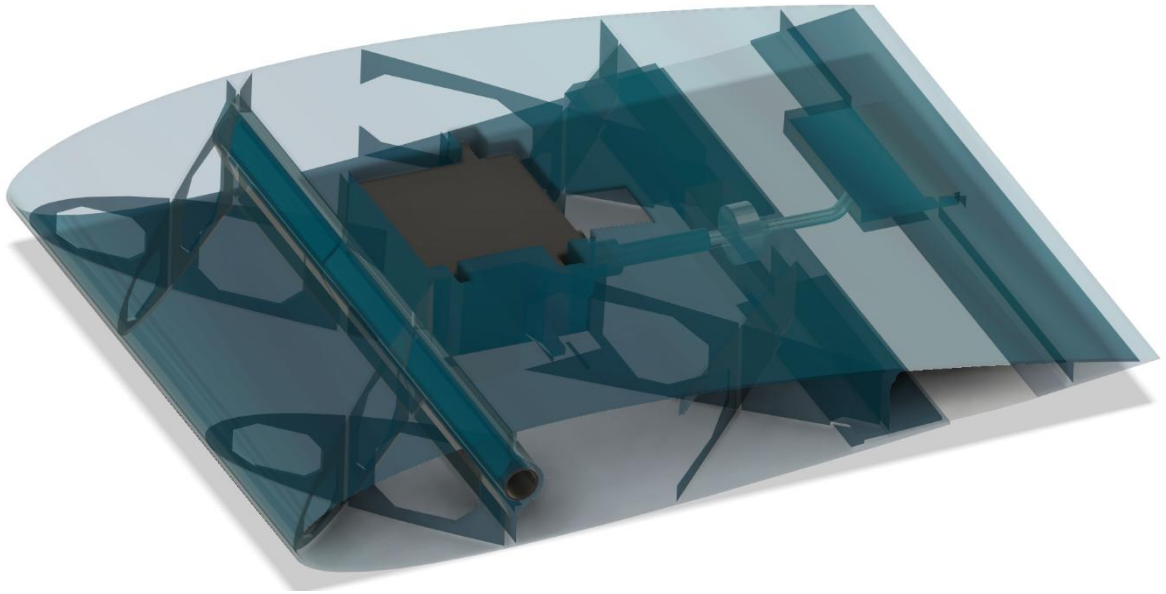
Pro zajištění stability části osy hřídele kolineární s hřídelí servomotoru je hřídel ustavena v kuličkovém ložisku. Jelikož dochází ke značnému tření v 3D tištěné kapse, obě styčné plochy můžou být polepeny plechem pro lepší otěruvzdornost hřídelí a také namazány. Kompletní možné řešení obsahující zástavbu servomotoru s odlehčenými žebry kolem jeho šachty znázorněno na **Obr. 22**.

Výhody:

- Velmi malý rozměr zástavby systému, možnost provedení v malé výšce profilu
- Jednoduchost
- Pouze 1 netištěná kovová součástka, velmi jednoduchá na výrobu: ohnutý drát = hřídel
- Hmotnost

Nevýhody:

- Tření
- Přímý náhon bez páky – je třeba velký kroutivý moment servomotoru
- Translace flaperonu je vynucená tlakovým nebo tahovým namáháním poddajného potahu, ne samotným ovládacím mechanismem. Pokud by měla např. kapsa velké vůle, flaperon se sám může nastavovat do nežádoucí polohy.



Obr. 22 Křídlo s RDS, kompletní žebra, trubkový nosník

## 6.6 VYBRANÉ ŘEŠENÍ

Vybráno bylo poslední řešení: **(6.5)** z důvodu jednoduchosti, vyrobitelnosti jen pomocí 3D tisku a jednoduché úpravy drátu pro tvorbu hřídele. Dále také kvůli malému rozměru, zajímavosti a inovativnosti řešení, které se liší od nejčastěji používaných pák s táhly. Zároveň ale jde o řešení, které se na malém měřítku používá, takže je částečně ověřené. Je to řešení, které je realizovatelné i v tenčích profilech.

## 7 PEVNOSTNÍ VÝPOČET

Tato kapitola pojednává o pevnostním výpočtu hřídele, o reakčních silách, potřebném točivém momentu a pevnosti hřídele. Pevnost poddajného potahu je téma probírané v disertační práci [25] vedoucího této diplomové práce. Výpočet rozměrů potahu v disertační práci ale byl určen primárně pro kompozity používané v letectví, ne 3D tištěné polymery, které jsou mnohem méně tuhé. Tudíž nebylo možné algoritmus správně použít se vstupními vlastnostmi filamentů jako PETG. Testy vzorků a výsledky výpočtu měly velmi rozdílné výsledky. Tudíž byly rozměry zvoleny s hodnotami zmíněnými v kapitole 2.

### 7.1 REAKČNÍ SÍLY

Na flaperon působí při letu dynamický tlak tvořený proudícím vzduchem. Zvětšuje se s rychlostí a výchylkou flaperonu. Jeho maximální hodnota byla vypočtena v kapitole (5).

Výsledný závěsový moment je  $M_{Z\dot{A}} = 0.0893025 \text{ Nm}$  a je tvořen silou uprostřed flaperonu:  $F_{FL} = 2.97675 \text{ N}$ . Tyto hodnoty jsou pro uvažovanou délku elementu křídla (a tedy i flaperonu)  $L_w = 0.4 \text{ m}$ . Uvažovaný poměr flaperonu a tětiny:  $0.3 \text{ c} = 0.06 \text{ m}$ .

Zvolená délka segmentu křídla pro Model 1 i 2 je  $L_w = 0.15 \text{ m}$ . Tato na tiskový prostor poměrně malá hodnota byla zvolena z důvodu šetření materiálu, protože bylo očekávána výroba několika prototypů (bylo vyrobeno 10 modelů, některé jen částečně z důvodu selhání tisku).

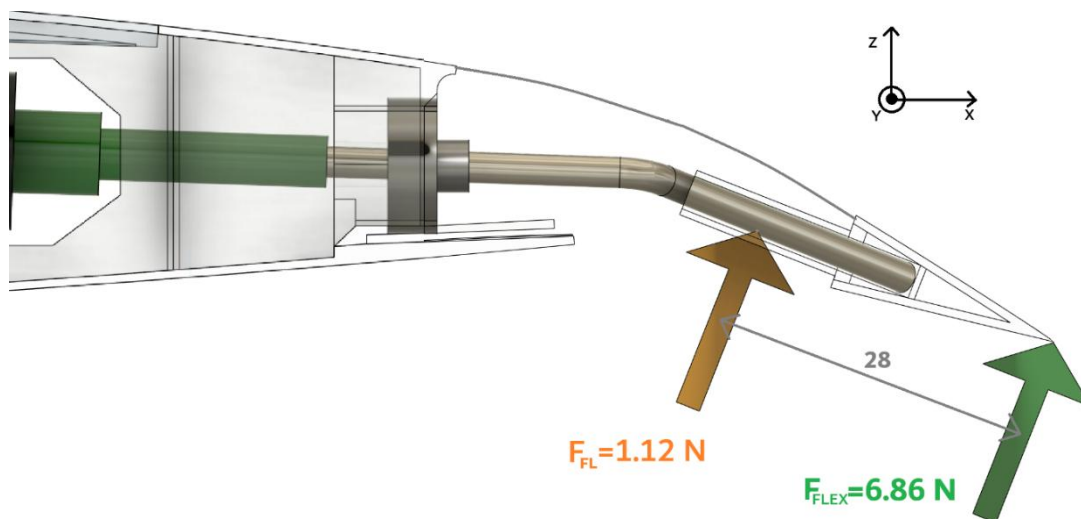
Reakční síla zmenšená na tuto délku segmentu je následující:

$F_{FL1} = 1.11628 \text{ N}$  na **Obr. 24** a **Obr. 23** oranžová.

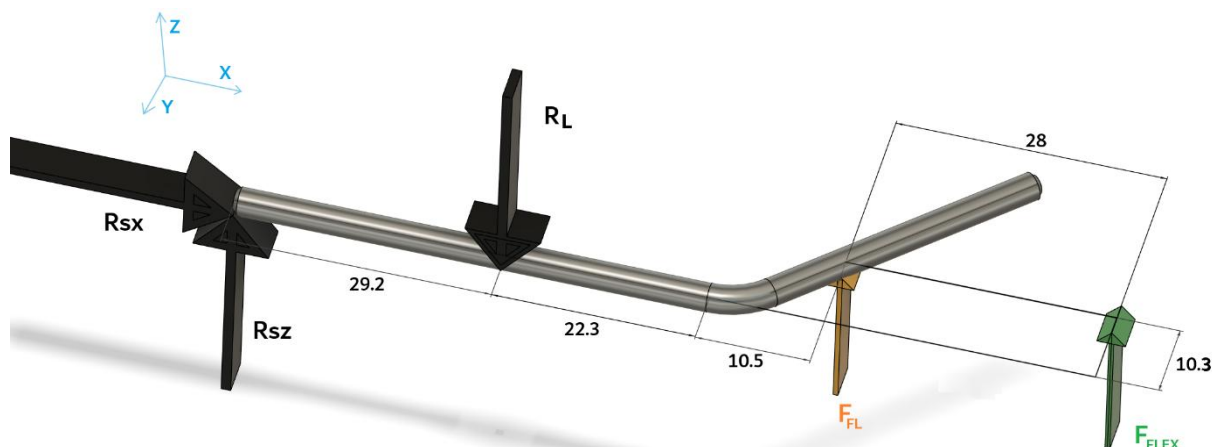
Další reakční síly jsou reakce potahu při prohýbání. U morfujících křídel mohou být tyto síly větší než aerodynamické. Tato hodnota byla změřena při výchylce dolů:  $F_{FLEX} = 6.86 \text{ N}$ . Změřeno pomocí váhy a přepočteno. Na **Obr. 24** a **Obr. 23** zelená. Délkové jednotky: mm. Její originální lokace je v bodě, ve kterém bylo fyzicky možné její velikost měřit. Tzn. konfigurace 3 – bodového ohybu. Přesnější by bylo měřit moment v bodě podléhajícím translaci = silovou dvojici tvořící 4 – bodový ohyb v lokacích 0.9c a 1c.

Na modelu 1 i 2 je hřídel stejná kromě 1 rozměru – délka přímé části  $L_h$ . Hřídel znázorněna na **Obr. 28** v kapitole 8.3. Pro model 1 je délka  $L_{h1} = 49 \text{ mm}$ , pro model 2  $L_{h2} = 86 \text{ mm}$  i s délkou M3 závitů na výstupu motoru pro konzervativnější přístup. Výpočet je proveden pouze pro model 1. Dostatečná pevnost byla potvrzena testováním u obou modelů.

Tření v kapse není zahrnuto ve výpočtu pro zjednodušení. Dále je výpočet zjednodušen tak, že přestože se počítá se silou z proudícího vzduchu při výchylce, (to znamená, že hřídel je natočena kolem osy servomotoru o  $20^\circ$ ), je orientace hřídele pokládána za tu v nevychýlené poloze. Tahové složky VVÚ získané bez tohoto zjednodušení by byly nepodstatné.



Obr. 24 Reakční síly bokorys



Obr. 23 Silové schéma hřídel 3D

Jak (**Obr. 23**) zobrazuje, pro výpočet ohybových napětí je umístění do spojky bráno jako rotační vazba z důvodu statické určitosti. Pro výpočet krutových namáhání ale je tento spoj brán jako vetknutí – brání hřídeli v rotaci kolem osy X.

Na základě momentové rovnováhy je vypočtena velikost síly v ložisku  $R_L$ :

$$R_L = \frac{F_{FLEX} \cdot 90 + F_{FL} \cdot 62}{29.2} \text{ [N]} \quad (7.1)$$

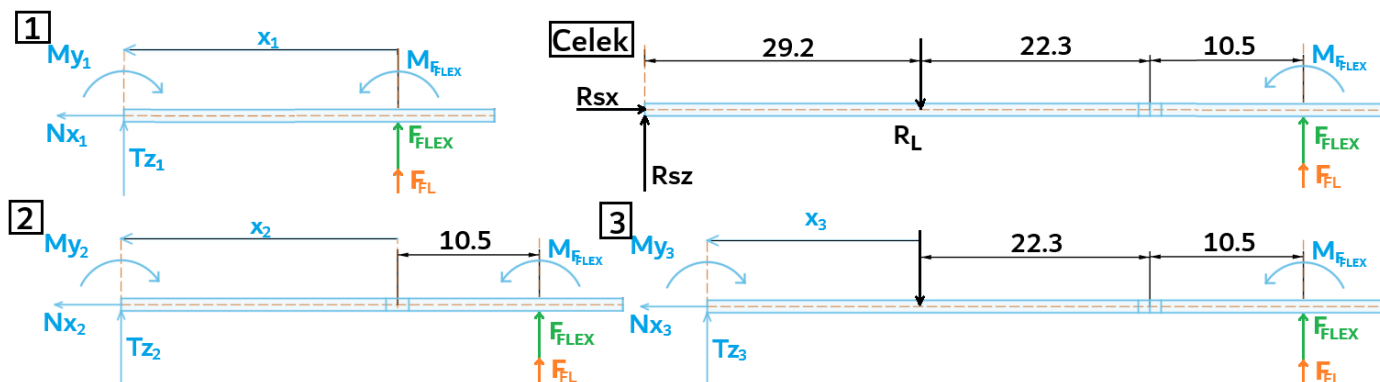
$$R_L = \frac{6.86 \cdot 90 + 1.12 \cdot 62}{29.2} = 23.52 \text{ [N]}$$

S ní lze vypočítat sílu ve spojce vertikální  $R_{sz}$ :

$$R_{sz} = R_L - F_{FLEX} - F_{FL} = 23.52 - 6.86 - 1.12 = 15.54 \text{ [N]} \quad (7.2)$$

## 7.2 VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY

Zde jsou provedeny výpočty výsledných vnitřních účinků uvnitř hřídele. Výpočet je proveden rozdělením na 3 řezy. Schémata zobrazena na **Obr. 25** s rozměry. Výpočet je proveden s délkovými jednotkami mm a momentovými jednotkami N/mm.



Obr. 25 Schéma řezů pro výpočet VVÚ

### 7.2.1 ŘEZ 1

Tento řez není zobrazen v rovině rovnoběžné s osami X a Z souřadného systému na **Obr. 25**. Je rovnoběžný s osou Z a osou hřídele, která je v této sekci pod úhlem 45° vůči rovině XZ. Normálová síla  $N_{x_1}$  není počítána na základě zjednodušení popsaného výše. Proto tedy, stejně jako pro tento řez nulová krutová složka VVÚ:  $M_{k_1}$ , není zapsána ve výpočtu.

$$x_1 \in \langle 0; 14.7 \rangle$$

Nositelka síly  $F_{FLEX}$  neprochází hřídelí, byla tedy posunuta do působíště síly  $F_{FL}$  (posunutí o 28 mm) a byl přidán moment  $M_{FLEX}$ . Tato konfigurace má konzervativním způsobem nahrazovat reálnou existenci silové dvojice při vychýlení.

$$M_{FLEX} = F_{FLEX} \cdot 28 = 192 \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (7.3)$$

VVÚ: Posouvající síla  $T_{Z_1}$ , ohybový moment  $My_1$

$$T_{Z_1} = -F_{FLEX} - F_{FL} = -6.86 - 1.12 = -7.98 \text{ [N]} \quad (7.4)$$

$$My_1 = M_{FLEX} + (F_{FLEX} + F_{FL}) \cdot (x_1) = 192 + (6.86 + 1.12) \cdot x_1 \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (7.5)$$

Krut v úseku 1 způsobený silou  $F_{FLEX}$  není uvažován, protože interakce kapsy a hřídele byla zjednodušena – není uvažováno tření.

### 7.2.2 ŘEZ 2

V tomto řezu přechází část ohybové složky VVÚ do krutové.

$$x_2 \in \langle 0; 22.3 \rangle$$

Posouvající síla  $T_{Z_2}$ , ohybový moment  $My_2$  krutící moment  $M_{k_2}$

$$T_{Z_2} = -F_{FLEX} - F_{FL} = -6.86 - 1.12 = -7.98 [N] \quad (7.6)$$

$$M_{y_2} = M_{FLEX} + (F_{FLEX} + F_{FL}) \cdot (10.5 + x_2) [N \cdot mm] \quad (7.7)$$

$$M_{y_2} = 192 + (6.86 + 1.12) \cdot (10.5 + x_2) [N \cdot mm]$$

$$M_{k_2} = 10.3 \cdot (F_{FLEX} + F_{FL}) = 10.3 \cdot (6.86 + 1.12) = 82.2 [N \cdot mm] \quad (7.8)$$

### 7.2.3 ŘEZ 3

V tomto řežu působí reakční síla  $R_L$  ložiska.

$$x_1 \in \langle 0; 29.2 \rangle$$

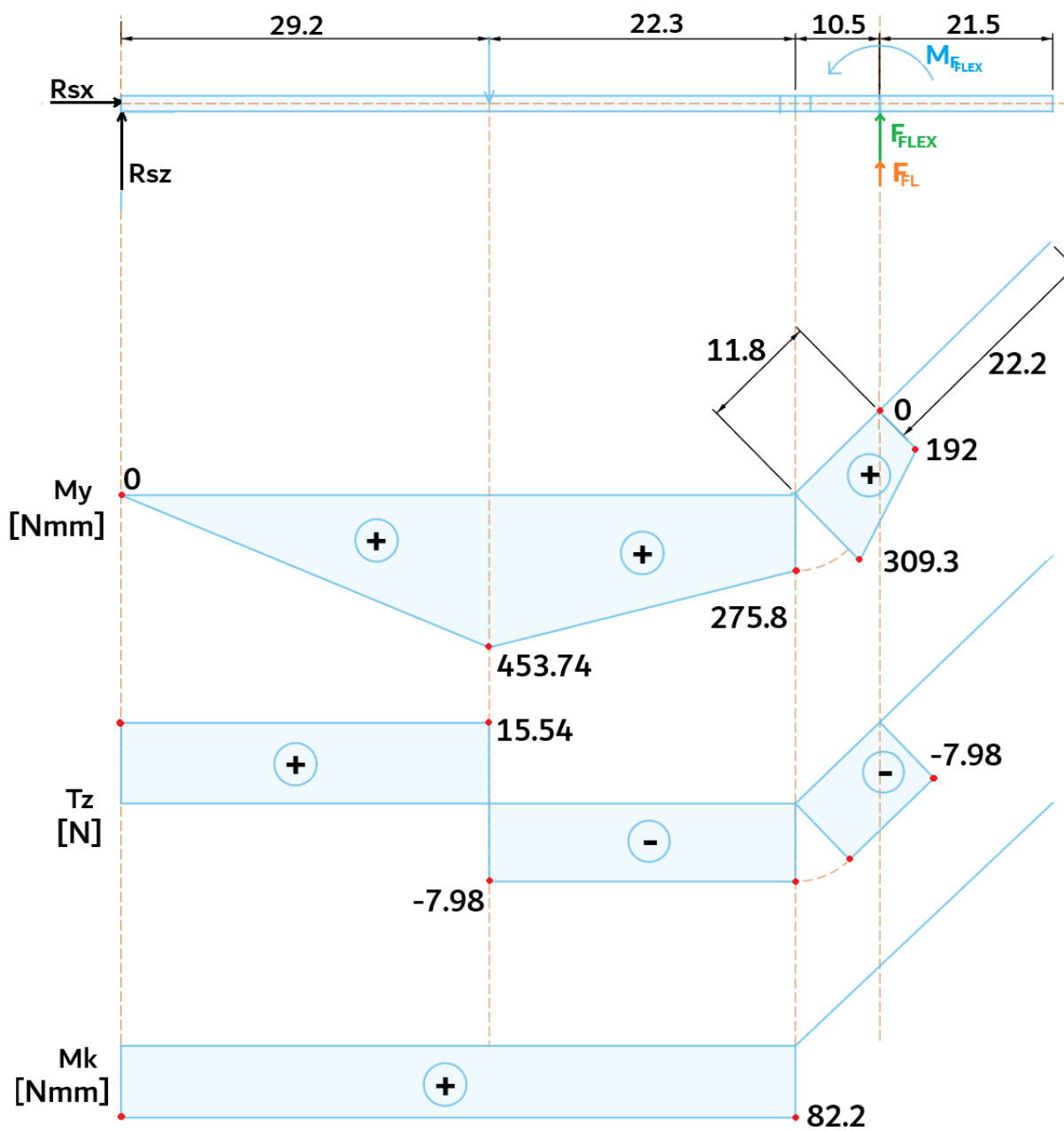
Posouvající síla  $T_{Z_3}$ , ohybový moment  $M_{y_3}$  kroutící moment  $M_{k_3}$

$$T_{Z_3} = -F_{FLEX} - F_{FL} + R_L = -6.86 - 1.12 + 23.52 = 15.54 [N] \quad (7.9)$$

$$M_{y_3} = M_{FLEX} + (F_{FLEX} + F_{FL}) \cdot (10.5 + 22.3 + x_3) - R_L \cdot x_3 [N \cdot mm] \quad (7.10)$$

$$M_{y_3} = 192 + (6.86 + 1.12) \cdot (10.5 + 22.3 + x_3) - 23.52 \cdot x_3 [N \cdot mm] \quad (7.11)$$

$$M_{k_3} = 10.3 \cdot (F_{FLEX} + F_{FL}) = 10.3 \cdot (6.86 + 1.12) = 82.2 [N \cdot mm] \quad (7.12)$$



Obr. 26 Výsledné vnitřní účinky sil hřídele

### 7.3 VÝSLEDNÁ NAPĚTÍ

Napětí v krutu je vypočteno z maximálního krouťícího momentu  $M_k$  a průřezového modulu v krutu  $W_k$ .

Průřezový modul v krutu pro hřídel průměru  $d = 3 \text{ mm}$ :

$$W_k = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \text{ [m}^3\text{]} \quad (7.13)$$

$$W_k = \frac{\pi \cdot 0.003^3}{16} = 5.30144 \cdot 10^{-9} [m^3]$$

Napětí v krutu:

$$\tau_K = \frac{Mk}{W_k} \quad (7.14)$$

$$\tau_K = \frac{0.0822}{5.30144 \cdot 10^{-9}} [Pa]$$

$$\tau_K = 15.505 \cdot 10^6 [Pa]$$

Napětí v ohybu je spočteno z průřezového modulu v ohybu pro kruhový průřez:

$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32} [m^3] \quad (7.15)$$

$$W_o = \frac{\pi \cdot 0.003^3}{32} = 2.65072 \cdot 10^{-9} [m^3]$$

Napětí v ohybu:

$$\sigma_o = \frac{My}{W_o} \quad (7.16)$$

$$\sigma_o = \frac{0.45374}{2.65072 \cdot 10^{-9}} [Pa]$$

$$\sigma_o = 171.18 \cdot 10^6 [Pa]$$

Protože je napětí kombinované, je třeba ohybové a krutové společně převést na celkově redukované HMM (Huber-Mises-Hencky) kritérium:

$$\sigma_{redHMH} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3 \cdot \tau_K^2} [Pa] \quad (7.17)$$

$$\sigma_{redHMH} = \sqrt{(71.18 \cdot 10^6)^2 + 3 \cdot (15.505 \cdot 10^6)^2} = 173.27 \cdot 10^6 [Pa]$$

#### 7.4 SOUČINITEL BEZPEČNOSTNÍ REZERVY

Hřídel je vyrobena z 3 mm drátu [26], jeho materiál ale není specifikován. Tyto modelářské dráty se většinou vyrábí z pružinové oceli, např. 60Si2Mn (ČSN 14 261). Tato ocel má smluvní mez kluzu  $R_{p0.2} \geq 1176 \text{ MPa}$  [27].

Součinitel bezpečnostní rezervy je spočítán z redukovaného napětí a maximální dovolené mezi kluzu materiálu.

$$k = \frac{Rp_{0.2}}{\sigma_{redHMH}} \quad [-] \quad (7.18)$$

$$k = \frac{1176 \cdot 10^6}{173.27 \cdot 10^6} = 6.788 \quad [-]$$

## 7.5 ZHODNOCENÍ

Součinitel bezpečnostní rezervy hřídele byl vypočten na základě krutu a ohybu, přičemž nebyly zohledněny úhel pootočení hřídele (20°), třecí síla a únava materiálu způsobená střídavým namáháním. Výsledná bezpečnostní rezerva činí 6,787. Při komplexnějším výpočtu, který by zahrnoval vynechané faktory, lze předpokládat, že tato bezpečnostní rezerva by byla stále dostatečná. Tento předpoklad je potvrzen fyzickými testy uvedenými v kapitole (9.3).

U modelu 2, který má delší přímý segment hřídele, se očekává podobně vysoká bezpečnostní rezerva jako v předchozím případě. Tento předpoklad byl také ověřen fyzickým testováním. Výsledný točivý moment pohonného motoru by tedy měl na základě tohoto výpočtu přesahovat hodnotu 0,082 N·m = 0.83 kg·cm. Je však třeba vzít v úvahu, že třecí síla zvýší napětí v krutu, a tím i požadovaný výkon motoru.

Výsledná síla na ložisko [28] je 23.52 N, základní dynamická únosnost ložiska je 480 N, ložisko tedy bez problému snese vypočtené zatížení.

## 8 ZPRACOVÁNÍ, VÝROBA A MONTÁŽ – MODEL 1

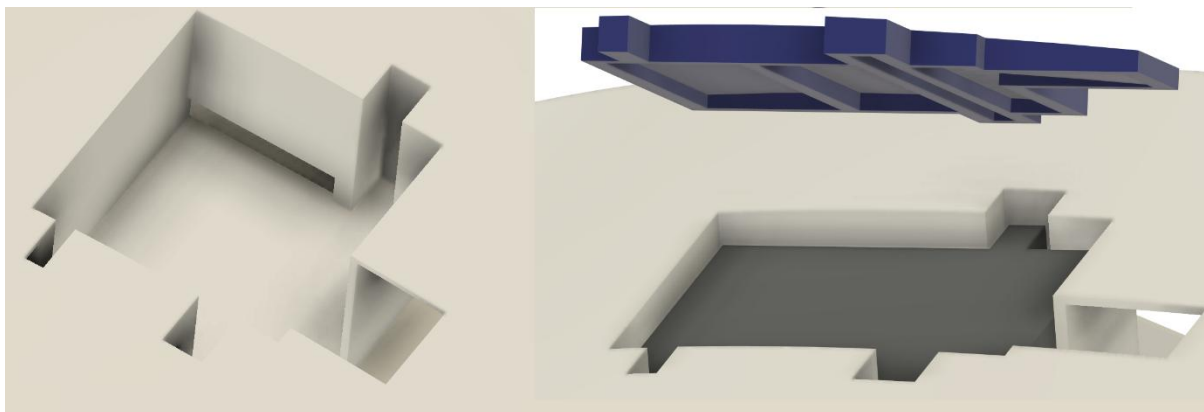
Zde je popsán výběr a volba komponent, jejich uspořádání, rozměry a způsob výroby a montáže flaperonu poháněného přes servomotor s RDS.

### 8.1 SERVOMOTOR

Do profilu NACA 2415 s třívou délkou 200 mm je možné vložit servomotor velikostní kategorie standard (40.5 x 38 x 20 mm). Vybrán byl servomotor SRT DL3017 [29]. Je to PWM digitální 6V servomotor s kovovými převody (měď, hliník), váží 56 g. Jeho operační rychlost je 60° / 0.15 sec na volno. Točivý moment 17 kg/cm. Tento servomotor je tedy spíše kvalitnější a silnější kategorie v tomto rozměru. Byl vybrán tedy primárně pro větší točivý moment a výdrž než jiné motory s plastovými převody.

Upevnění v křídle je znázorněno na **Obr. 27**. Je to jednoduchá šachta kopírující tvar servomotoru s dírou pro vývod napájecího kabelu. Vůle mezi motorem a šachtou jsou pro většinu stěn navrženy na poměrně velkou hodnotu 0.3 mm s užitím standardizovaného modelu jako předlohy, ale reálně tam servomotor drží velmi pevně bez jakýchkoliv prvků zajišťujících jeho polohu. Pro demontáž je přidána dlouhá díra v jedné ze stěn, kterou lze mnoha nástroji servomotor podebrat a vytlačit ven, dokud je přístup dovnitř křídla. Při kompletně sestaveném křídle se motor vytlačuje aplikací tlaku na jeho hřídel zespod a taháním za jeho ostatní části, což už je obtížnější, ale možné.

Šachta je překryta krytem (modrý na **Obr. 27**), který kopíruje její tvar a je upevněn pouze svým vlastním tvarovým spojem, slabým lepidlem po obvodu a oboustrannou lepicí páskou na servomotoru.



Obr. 27 Šachta pro servomotor

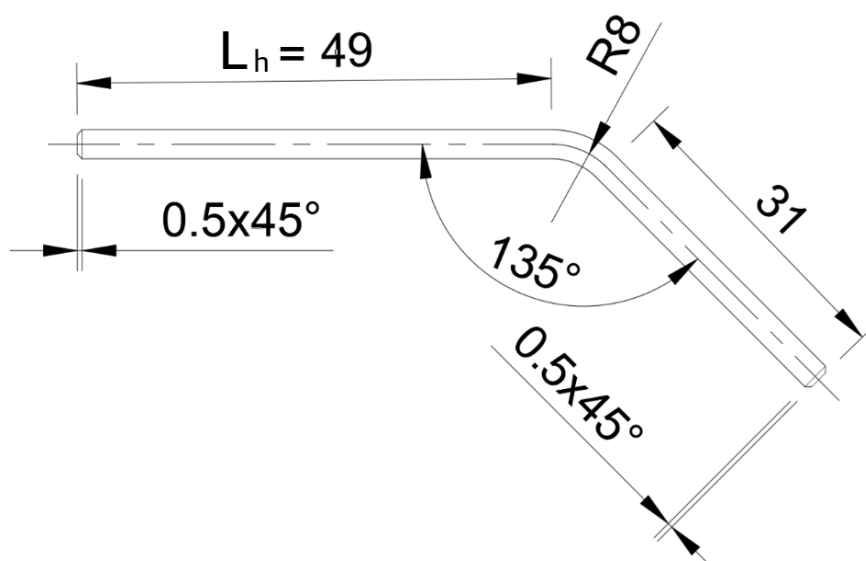
Servomotor je ovládán a napájen přes servotester [30], ten byl vybrán pro jednoduchost, bez potřeby jakéhokoliv programování, jen přímé ovládání potenciometrem. Servotester je napájen dvěma 3,6 V Li-ion akumulátory [31] zapojenými v sérii pro napětí 7.2 V. Dříve bylo napájení provedeno čtyřmi AA bateriemi v sérii (4 x 1.5 V), ale výsledné měřené napětí kolem 5.6 V nestačilo hlavně pro rychlé překonávání statického tření.

## 8.2 SPOJKA

Výstupní hřídel servomotoru je ve formě drážkované hřídele - 6 mm „tisícíhranu“ (25 zubů). Od výrobce MPjet byla zakoupena tato spojka: RDS collet, shaft OD 6 mm, 25 splines, 60°, length 27 (Futaba). [32]. Spojka obsahuje vnitřní ozubení a na druhé straně dutinu pro hladkou 3 mm hřídel.

## 8.3 3 MM HŘÍDEL

Hřídel ve formě ohnutého drátu průměru 3 mm z pružinové oceli byla vyrobena na základě schématu (Obr. 28). Byla zasunuta do díry ve spojce a zajištěna pomocí zajišťovače šroubů Kavan červený [33]. Konečná délka a její úpravy jsou dále zpracovány v kapitole 8.6.



Obr. 28 Schéma hřídele

## 8.4 KULIČKOVÉ LOŽISKO

Hřídel je dále ustavena v jednořadém kuličkovém ZVL ložisku  $d = 4$  mm,  $D = 13$  mm. [28]. Na hřídeli je umístěn adaptér – trubka o tloušťce stěny 0.4 mm s přírubou, pro ustavení 3 mm hřídele do 4 mm vnitřního průměru ložiska. Ložisko je umístěno v 3D tištěném bloku, který uzavírá dutinu ze zadní strany, dále znázorněno v kapitole 8.6.

## 8.5 KAPSA OVLÁDÁNÍ FLAPERONU

Kapsa je 3.3 mm široká, na obou vnitřních stěnách je nalepen mosazný 0.1 mm plech [34]. Plech je nalepen kyanoakrylátovým lepidlem Loctite 401 [35]. Plech slouží k snížení tření, které je mezi hřídelí a vrstvami filamentu vysoké, ale také hlavně

k zmenšení otěru těchto ploch. Kapsa je také namazána lubrikantem MOGUL LV 2 EP [36].

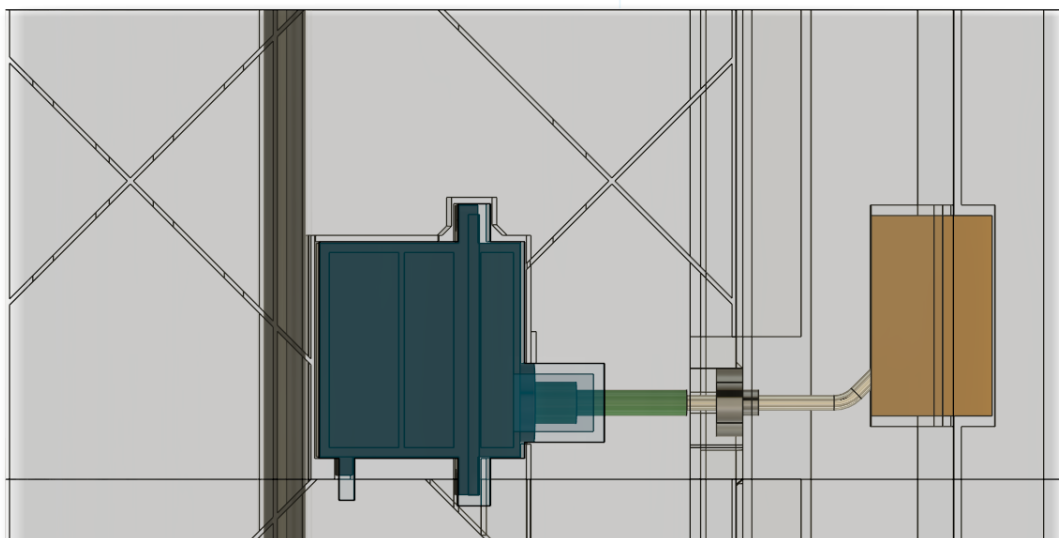
## 8.6 MONTÁŽ

Nejdříve byl servomotor vložen do křídla, poté dírou pro hřídel na něj nasunuta spojka. Do spojky poté byl vložena hřídel, nejdřív bez zajišťovače pro ověření délky. Ověření obsahovalo zajištění lokace lomu (ohybu) hřídele mimo kapsu flaperonu (hlavně při negativní výchylce) a dále ověření hloubky jejího konce uvnitř kapsy. Konec hřídele nemá být v kontaktu s koncem kapsy. Hřídel byla zkrácena o několik milimetrů, dokud nenarážela na konec kapsy. Tento krok nelze přesně předepsat a originální délku hřídele dle schématu (**Obr. 28**) dodržet, protože hřídel lze do spojky s přiměřenou silou zasunout pouze do určité hloubky, ne až na dno. Takto to je, pokud se její povrch neobrousí dostatečně, aby šel zasunout lehce až na konec, ale to není doporučováno, jelikož pak ani se zajišťovačem nemusí dostatečně dobře přenášet kroutící moment a může proklouznout. Je tedy třeba hřídel upravit délkově z obou stran podle potřeby.

Poté je na hřídel nasunutý adaptér (pokud by vůle nevyhovovala, je vhodné nahřát adaptér a poté nasunout na hřídel), na něj ložisko, to do bloku ložiska. Až tehdy je na hřídel a do spojky (zelená na **Obr. 29**) aplikován zajišťovač, hřídel je zasunutá do kapsy ve flaperonu a poté je celá sestava hřídele s ložiskem a jeho blokem zasunuta až do spojky a vše upevněno. Lepit blok ložiska není třeba, také by se tím znemožnila rozebíratelnost. Pro zaschnutí zajišťovače je třeba čekat alespoň 6 hodin.

Fólie tvořící spodní potah mezi flaperonem a křídlem je z PVC materiálu, tloušťky 0.2 mm. [37] Je nařezána do obdélníkového tvaru s malým výřezem pro ložisko. Je zasunuta do drážky v křídle a přilepena ke spodku flaperonu.

Dále už zbývá jen vložit kryt servomotoru, servomotor zapojit do testeru, do něj zapojit baterie pro napájení. Celková sestava je znázorněna na **Obr. 29** schematicky v půdorysu a kompletní se stojanem a napájením na **Obr. 30** a **Obr. 31**.



Obr. 29 Model 1 schéma náhonu

### 8.6.1 VŮLE, ROZMĚRY

Servomotor – rozměry šachty byly otestovány vkládáním ložiska a kontrolou jeho pohybu a deformací šachty na několika testovacích modelech samotné šachty, kvůli složitějšímu tvaru různých ložisek je doporučeno takto testovat rozměry.

Kryt servomotoru – vůle 0.05 mm mezi všemi stěnami doporučena, upravitelné broušením při montáži.

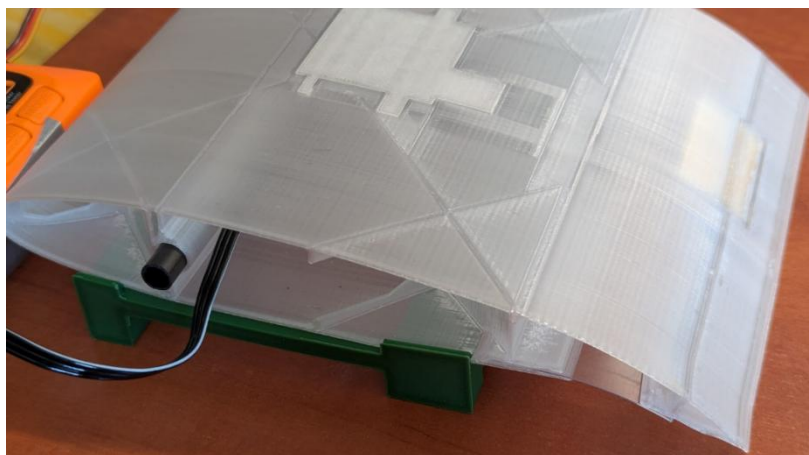
Ložisko má v bloku nulovou vůli, která je vhodná pro udržení pozice, přestože montáž vyžaduje tlak při vkládání. Adaptér má nulové vůle, ale bylo ho potřeba po zahřátí deformovat při montáži, vůle 0.1 mm doporučena.

Průměr šachty nosníku je o 0.5 mm větší než největší průměr nosníku, ale 0.2 mm by bylo také vhodné.

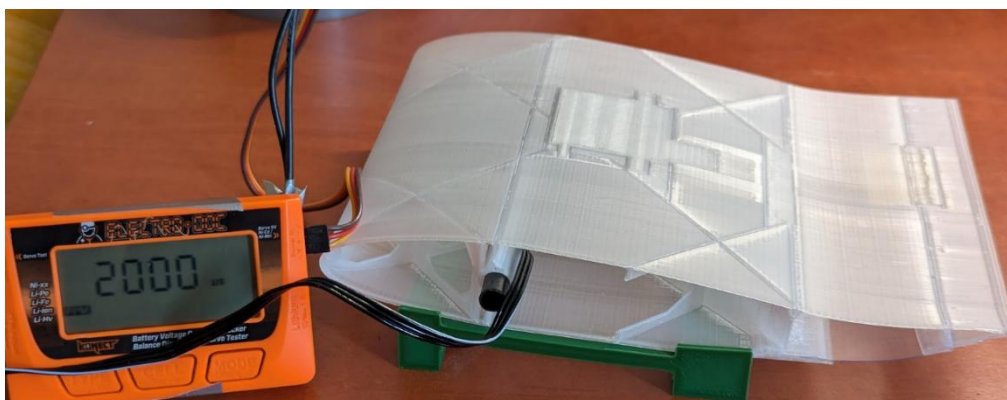
Kapsa flaperonu má rozměr 3.1 mm, 0.1 mm vůle mezi hřídelí a plechy.

Spodní potah – folie tl. 0.2 mm je v drážce 0.86 mm, to je vhodné pro zajištění větších rádiusů při jejím ohybu, ale pro hladší přechod mezi povrchem křídla a fólie, je vhodné tento rozměr zmenšit.

Všechny rozměry jsou změřitelné na modelu v příloze 1.



Obr. 30 Model 1 Flaperon vychýlený dolů



Obr. 31 Model 1 Flaperon vychýlený nahoru

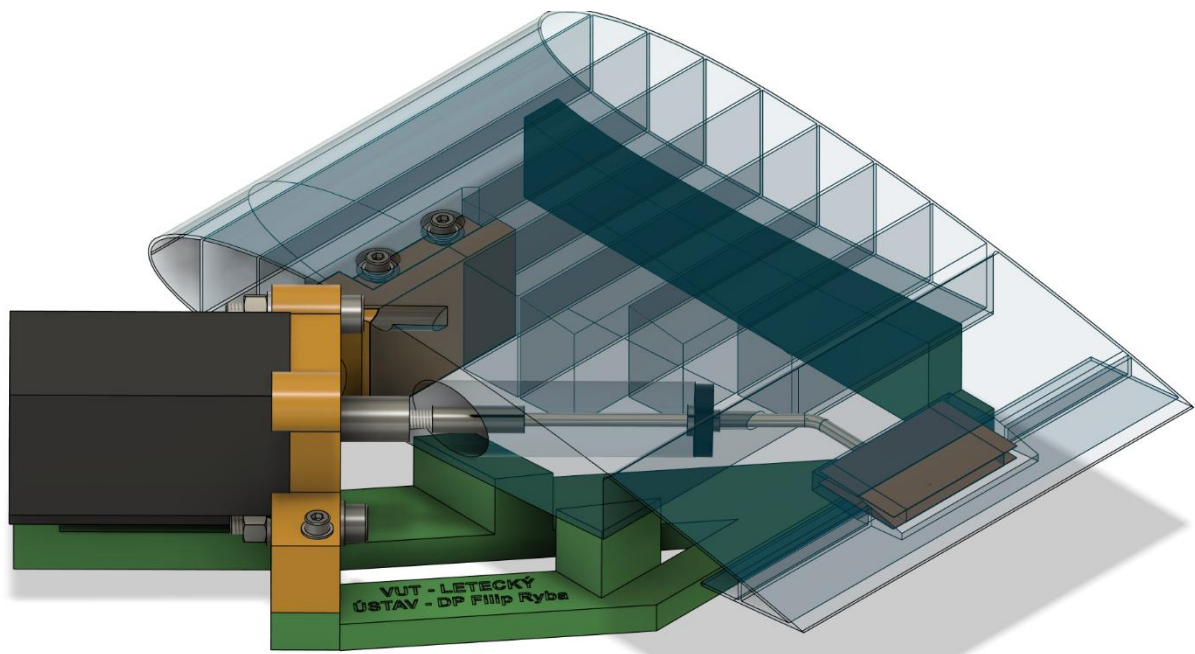
## 9 MODEL PRO CYKlickÉ TESTOVÁNÍ RDS – MODEL 2

Před hlavním modelem popisovaným v kapitole 8, byly také vyrobeny 3 prototypy pro únavovou zkoušku – zjištění přibližného počtu cyklů do vytvoření šířící se únavové trhliny a výdrž kapsy flaperonu. Materiály PETG přírodní, bílý, ASA černý. Podobnost tohoto testu a hlavního modelu se servomotorem uvnitř je geometrie a materiál flaperonu, potahu, kapsy. Úhel hřídele v kapse se liší, ale na pohyb flaperonu to nemá vliv.

Tyto modely byly vytvořeny také jako pomůcka pro cvičení ve výuce předmětu Řízení strojů a procesů [38]. V tomto cvičení bylo cílem studentů napsat PLC (Programmable Logic Controller) program pro ovládání servomotoru, který pohybuje flaperonem. Předmět je zajišťován Ústavem konstruování VUT FSI.

### 9.1 MODEL, POUŽITÉ KOMPONENTY, MONTÁŽ

3D model byl stejně jako ten hlavní, vytvořen ve Fusion 360, model má jen jednoduché přímé žebrování pouze pro zajištění tvaru. Použitý poskytnutý motor není umístěn uvnitř profilu kvůli jeho velikosti. Hřídel pohánějící flaperon byla tedy pootočená o 45° kolem vertikální osy a je zavedena dovnitř křídla z vnějšku. Konfigurace zobrazena na **Obr. 32**.



Obr. 32 Model 2 CAD

#### 9.1.1 MOTOR

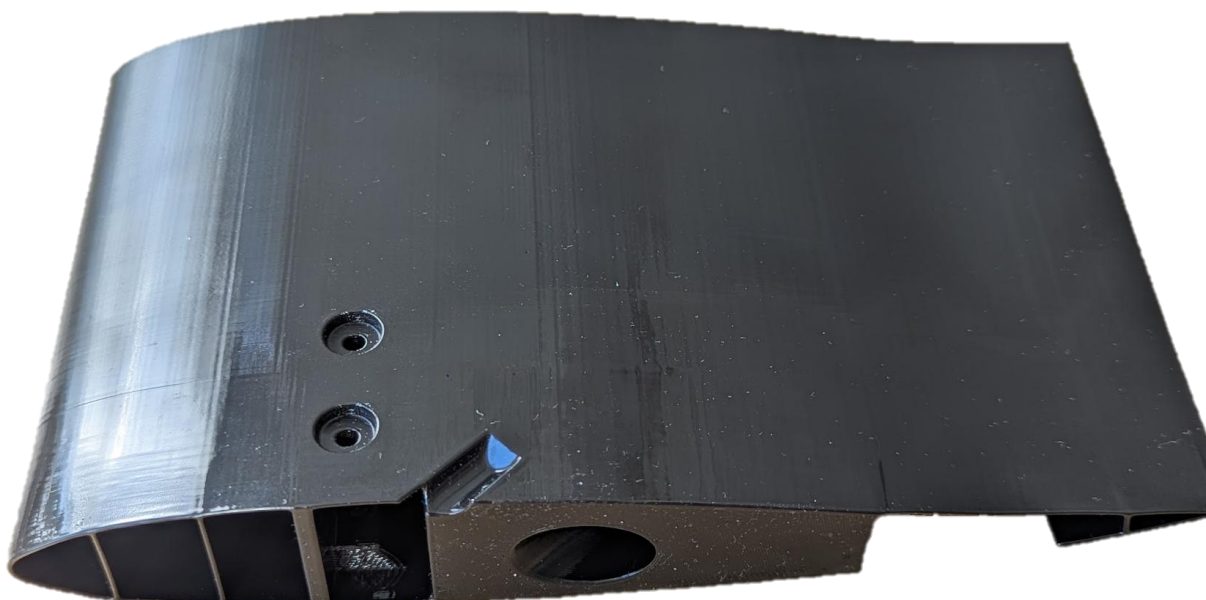
Použitý motor je třífázový synchronní servomotor B&R 8LVA velikosti 1 [39]. Motor dosahuje točivého momentu 1 Nm při otáčkách 1500 ot./min. Je tedy dostačující pro zajištění pohybu flaperonu při jakémkoliv typu pohonu v potenciální reálné aplikaci s rychlejšími motory. Pro porovnání se servomotorem uvnitř křídla (8.1) by moment a rychlost přepočítány na jednotky používané u modelářských servomotorů byly:

Rychlost 8LVA:	0.0067 sec/60°
Točivý moment 8LVA:	10.2 kg/cm
Rychlost SRT DL3017:	0.15 sec/60°
Točivý moment SRT DL3017:	17 kg/cm

Rychlost motoru je tedy mnohem vyšší než u standardních servomotorů. Motor má výstupní hřídel s dírou s vnitřním závitem M3.

### 9.1.2 MODEL KŘÍDLA

Primární model 2 byl tištěný ze stejného materiálu jako model 1 – PETG natural Filamentum [15], sekundární z PETG Devil Design white [40] a terciální, pro porovnání s jiným typem materiálu – Prusament ASA Jet Black [41]. Byl tištěn na stejné tiskárně (3.2). U terciálního modelu (**Obr. 33**) došlo k menšímu odlepení od tiskové podložky v oblasti flaperonu, z důvodu nejednotné tepelné kontrakce, důsledek je menší než u modelu 1 (**Obr. 30**). Terciální model sloužil také jako zkouška výrobních technologií pro aplikaci při výrobě 3D tištěného křídla – byla vyzkoušena technika acetonového vyhlazování ASA výtisků. Model byl uzavřen do prostředí se vzduchem nasyceným acetonovými výpary. (**Obr. 34**) Použita byla polypropylenová krabice s ubrousky nasáklými acetonem. Uprostřed této komory byl umístěn model křídla z ASA. ASA obsahuje styren, který je leptán / rozpouštěn acetonem. Výpary rozpustily povrch výtisku, přibližně po hodině byl model vyndán a nechán alespoň den na vysušení od acetonu. Rozpuštěním a následným vyschnutím a spojením se vrstvy lépe spojily. Toto zvyšuje adhezi vrstev, která je u ASA horší než u PLA a PETG a snižuje drsnost povrchu. Výsledkem je lesklejší povrch modelu, ale došlo k deformacím ve špatně podporovaných oblastech s malým průřezem – např. 70% až 90% těživy na poddajném potahu flaperonu.



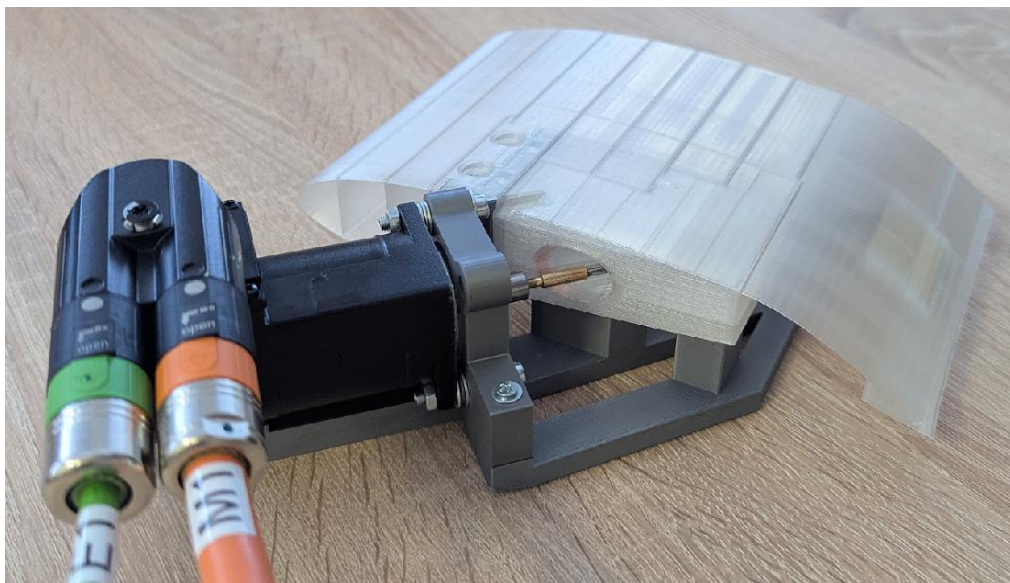
Obr. 33 Model 2: černý ASA model po částečném rozpuštění povrchu acetonem



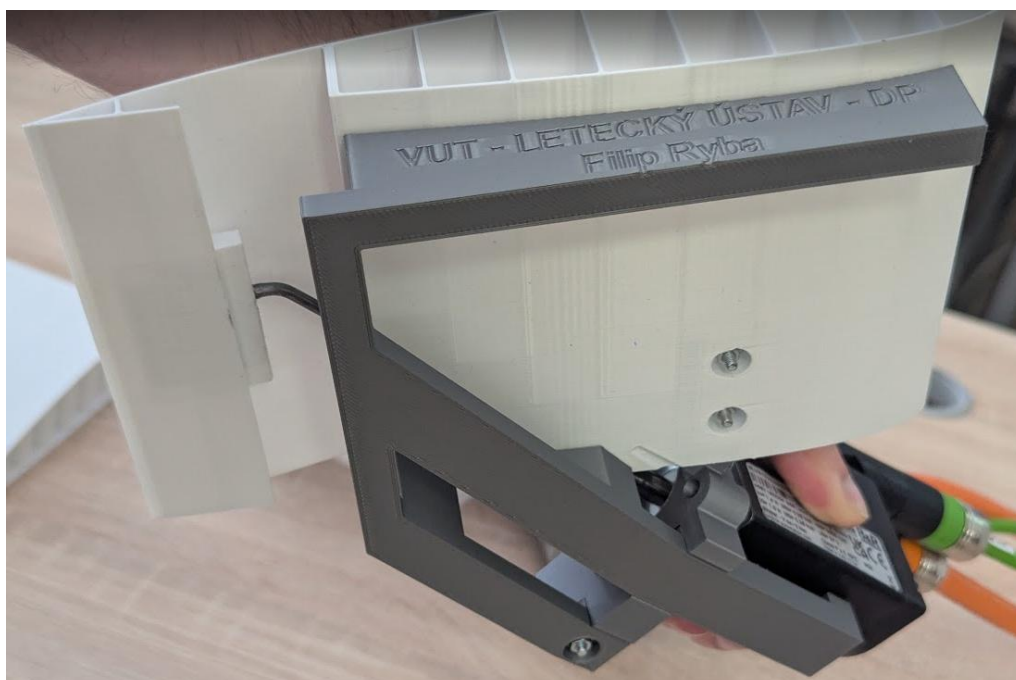
Obr. 34 Proces leptání ASA modelu 2 acetonem

### 9.1.3 MONTÁŽ, SPOJOVACÍ MATERIÁL

Montáž probíhala analogickým způsobem jako u modelu 1 (kapitola 8). Nejdříve přilepení mosazných plechů na obě strany kapsy. Dále příprava hřídele, tentokrát větší délky. Poté zasunutí hřídele do díry v profilu a do kapsy flaperonu. Do kapsy byl nanesen lubrikant pro model bílý, pro model průsvitný nebyl. Na ní se nasunula spojka [42], která je pro model 2 jiného typu. Obsahuje díru pro 3 mm hřídel a na druhé straně M3 vnější závit pro zašroubování do motoru. Po vyzkoušení hloubky zasunutí do spojky a délky zašroubování spojky do motoru byly také prováděny úpravy délky hřídele. Pro finální montáž byla hřídel znovu zajištěn ve spojnici zajišťovačem. [33] Rám sloužící jako držák motoru a zároveň jako podstavec pro celý model byl zasunut do profilu křídla, přišroubován 2x M3 šrouby a na něj byl přišroubován motor. Zajistit správnou délku sestavy hřídele je složité (problém stejný jako u modelu 1 s hloubkou zasouvání hřídele do spojky (8.6) tudíž bylo třeba vymezit vůli použitím více M3 podložek mezi motorem a držákem.



Obr. 35 Model 2 PETG natural pohled shora, flaperon dole  $-35^\circ$



Obr. 36 Model 2 PETG bílý pohled zdola, flaperon  $0^\circ$

Kompletní model 2 je zobrazen na **Obr. 35** s negativní výchylkou, kde byl otestován rozsah pohybu a bylo možné dosáhnout  $-35^\circ$  a na **Obr. 36** pohled zdola s nulovou výchylkou.

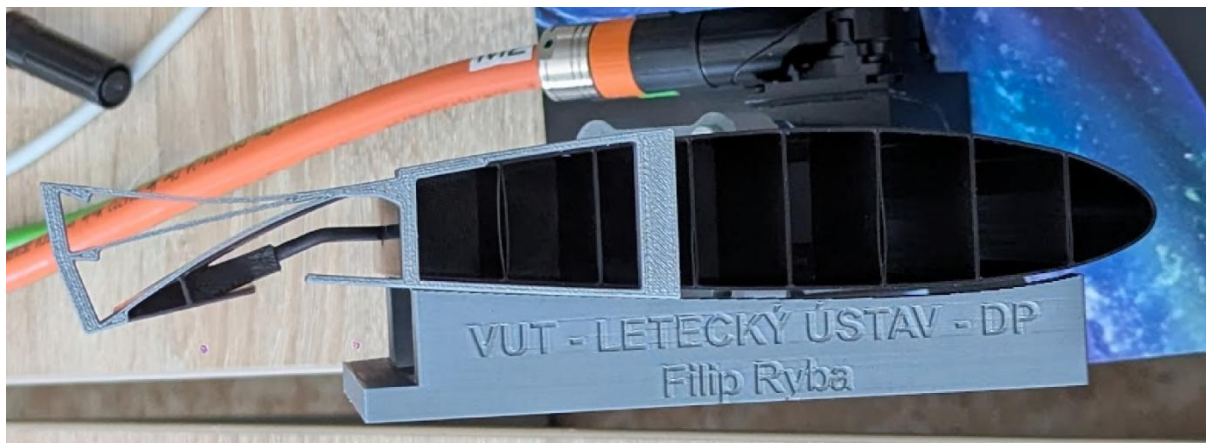
#### 9.1.4 OVĚŘENÍ PŘESNOSTI KŘIVKY OHYBU

Křivky poddajné části potahu byly ověřovány, aby se zajistila správná kinematika ohybu daná geometrií. Pokud křivka má správný tvar, konstantní rádius, znamená to, že napětí je po její délce konstantní. Životnost takové součásti by tedy byla maximalizována. Křivky byly konstruovány v CAD pomocí kružnice s tangenciálními vazbami na profil a flaperon s rovnající se délkou křivky před a po sklopení flaperonu. Tyto křivky byly vytištěny a přikládány na stranu profilu. Největší deviace byla měřena posuvným měřítkem s největší odchylkou od očekávaného tvaru do 2 mm. Tato deviace je daná vůlí v kapse hřídele a větším než žádoucím ohybem na začátku poddajného potahu (70% tětivy), kde se pak koncentruje přetvoření a dříve nastává porušení. Porovnání křivky zobrazeno na **Obr. 37**.

## 9.2 TESTOVÁNÍ

Všechny 3 modely byly testovány stejným způsobem. Nejprve byl nalezen úhel natočení hřídele pro dosažení úhlu flaperonu  $-20^\circ$  a  $+20^\circ$ . Dále byl napsán krátký kód v programu B&R Automation Studio 4.10. Kód byl napsán panem Ing. Radkem Poliščukem Ph.D. (**Obr. 38**)

Každý cyklus se skládal z natočení nahoru o  $20^\circ$  a pak natočení dolů o  $20^\circ$ . Doba trvání jednoho cyklu: 0.2 sekundy. Nejprve se byla ověřena funkčnost pomocí prvotních 35000 cyklů. Poté bylo plánem dosáhnout 1 000 000 cyklů. Výsledky jsou popsány dále.



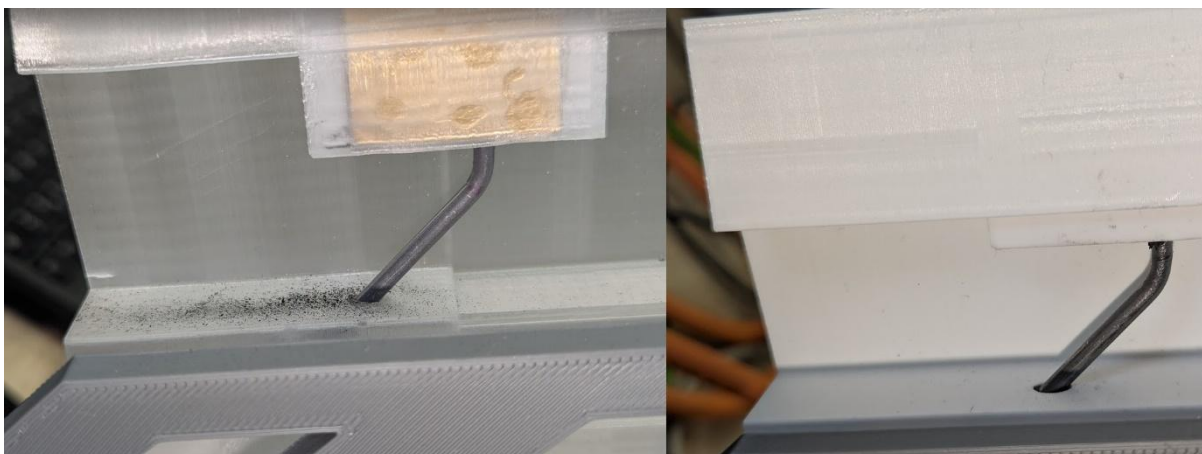
Obr. 37 Model 2 – černý ASA model pohled ze strany, porovnání křivky



Obr. 38 UI testovacího programu

### 9.3 VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ

- Primární – Průsvitný/Natural PETG model dosáhl největšího počtu cyklů. Po 345 000 cyklech na něm byla nalezena malá trhlina (**Obr. 39**) délky 4 mm v 70 % těživy na začátku poddajného potahu. Tato trhlina ale měla stejnou délku i po 435 000 cyklech, ale po 1 045 000 cyklů dosáhla trhlina délky 30 mm. (**Obr. 40**) Tento model neměl kapsu s lubrikantem, vzniklý prach z fragmentů hřídele a plechu viditelný na **Obr. 39**.



Obr. 39 Opatření kapsy Model 2 – primární, sekundární

- Sekundární – Bílý PETG model, na kterém již při ohybu rukou je patrné, že má vyšší ohybovou tuhost – dosáhl kratšího počet cyklů. Po přibližně 335 000 cyklech vznikla velká trhlina na stejném místě, jako u primárního modelu. Vznikla na začátku poddajného přechodu mezi flaperonem a křídlem. Trhlina

vznikla rychle, měla délku 30 mm. To by vykazovalo souvislost s populární myšlenkou, že barviva ve filamentech zhoršují mechanické vlastnosti, např. že černá má nejhorší vlastnosti. Existuje malé množství studií, např. tato [43] došla k závěru, že mechanické vlastnosti jsou velmi nepředvídatelné a rozdílné pro filamenty s různými typy pigmentů. Tento filament je ale jiné značky a chemického složení než primární model, tudíž lze pouze spekulovat, jaký přesně má barvivo vliv na vlastnosti.

Tento model měl kapsu namazanou lubrikantem, tudíž došlo k menšímu otěru plechů a hřídele a zároveň vzniklý prach byl zachycen lubrikantem. (**Obr. 39**)



Obr. 40 Finální trhlina Model 2 - primární

- Terciální – Černý ASA model: Na tomto modelu došlo k menší delaminaci v nekritických oblastech (žebra) již po vyschnutí acetonu ze struktury. Model dosáhl pouze přibližně 8 000 cyklů, než nastala zásadní delaminace a prasknutí vnějšího perimetru. (**Obr. 41**) Delaminace nastala v oblasti 70% těšity na začátku poddajného potahu flaperonu. Předpokládaný mechanismus poruchy: Při 3D tisku ASA modelu s negativní materiálovou vlastností – termální kontrakcí, vznikla zbytková napětí. Aceton poté tento napjatý materiál rozleptal, narušil a inicioval delaminaci tím, že umožnil těmto napětím způsobit mikro přetvoření. Ta poté při cyklické zkoušce vzrostla. Materiál ASA vykazuje tuto vlastnost nejhorší adheze vrstev i bez leptání. Delaminace před zatížením je viditelná také již před testováním na **Obr. 37**.



Obr. 41 Finální delaminace, trhliny Model 2 – terciální

Pro lepší výdrž by bylo vhodné zvětšit rádius na 70% tětivy, který byl u těchto testů malý (1.5 mm) a sloužil jako koncentrátor napětí. V jeho místě tedy vznikly trhliny. Dále, ASA leptání acetonem není vhodné pro takto tenkostěnné modely. Lze také usoudit, že přírodní PETG bez pigmentů má lepší poddajnost než bílé. Výsledné hodnoty cyklů na grafu (**Tab. 1**).

Tab. 1 Dosažené počty cyklů Modelu 2 do kritické poruchy: trhlina 30 mm

Model 2 materiál	Počet cyklů
Primární natural PETG	1 045 000
Sekundární bílé PETG	335 000
Terciální ASA	8 000

## 10 DALŠÍ VÝZKUM

Další výzkum by se mohl zaměřit na optimalizaci mechanického návrhu v oblasti montáže a demontáže.

Dále navržení lepších přechodů v oblasti 70% tětivy – přechod mezi křídlem a poddajným potahem, kde iniciovala všechna porušení. Možností jsou větší rádiusy nebo dlouhá oblast s postupně se ztenčujícím potahem. Na spodním potahu by také mohl být lépe navržen přechod mezi křídlem a fólií. Možností je např. tvorba spodní stěny drážky pro fólii ne 3D tiskem, ale jinou, tlustší fólií, která by byla menší tloušťky než současný přechod o tloušťce 0.8 mm.

Také by bylo možné navrhnout komplexnější model, který by využíval více filamentů najednou pro maximalizaci jejich optimálních charakteristik. Optimální řešení by pravděpodobně obsahovalo velmi lehký Lightweight ASA pro křídlo, zatímco tělo flaperonu a poddajný přechod by byly z PETG nebo jednoho z tužších TPU. Tyto materiály by k sobě mohly být slepeny, tvarově spojeny, případně vytištěny najednou za pomoci 3D tiskárny s kombinací materiálů / 2 extrudéry. Jejich spoj by byl proveden pomocí vzájemného tvarového propojení materiálů již při tisku, tzv. multimaterial interlocking. Ideální model by toto kombinoval s profilem s menší tloušťkou.

Dále by mohlo být vyrobeno celé křídlo dle návrhu mechanizace v této diplomové práci a otestováno v letu na zmíněném letounu Chickenwings. Pro zvýšení tuhosti je doporučeno užití kompozitových pásků ve spodním a horním potahu, případně i použití sekundárního nosníku menšího průměru.

## 11 ZÁVĚR

Diplomová práce popsala návrh a realizaci segmentu křídla s morfuujícím flaperonem s využitím aditivní výroby technologií FDM. V teoretické části byly analyzovány možnosti konstrukce mechanizace flaperonu, volba vhodných materiálů a jejich mechanické vlastnosti. Experimentální část se soustředila na výrobu a testování demonstračních modelů flaperonu a zkoumání funkčnosti mechanizace a zjednodušený test únavy modelů ze 3 různých filamentů. Výsledky experimentů potvrdily vhodnost PETG jako optimálního materiálu pro konstrukci morfovateľného flaperonu.

V teoretické části bylo provedeno srovnání tiskových materiálů PLA, PETG, ABS, ASA a malé nahlédnutí do charakteristik Lightweight filamentů. PETG se ukázalo jako nejlepší kompromis mezi pevností, pružností, tepelnou odolností a tisknutelností. Rozbory a porovnání koncepčních konstrukčních variant se zaměřily na optimální využití servomotorů a hlavně možnosti přenosu pohybu na výstupní hřídeli na translačně-rotaci pohybu flaperonu se správnou kinematikou. Probírány byly varianty s pákami a táhly uvnitř profilu, tažným bowdenem a tlačnou pružinou, s deformovatelnou přímou hřídelí, se závitovou tyčí a nakonec RDS (Rotary Drive System) – lomená hřídel tvořící excentrický aktuátor. Vybraná varianta mechanizace nakonec byla ta s RDS.

Teoretický pevnostní výpočet byl zaměřen na hřídel ve formě ohnutého drátu přenášející krouticí moment servomotoru na rotačně translační pohybu flaperonu. Bylo provedeno stanovení redukováného napětí z maximálního napětí z krutu a ohybu. Vstupní síly byly 2: síla určená dynamickým tlakem ze softwaru XFLR 5 při rychlosti letu 15 m/s a větší síla vzniklá reakcí ohýbaného morfuujícího potahu. Zjednodušené výpočty prokázaly dostatečnou pevnost včetně součinitele bezpečnostní rezervy dostatečně velké pro pokrytí zvýšených napětí generovaných např. třením, které nebylo ve výpočtu zahrnuto. Výsledný součinitel bezpečnostní rezervy činí 6,79.

Experimentální část práce zahrnovala design 3D modelu vhodného pro tisk FDM. Všechny modely byly provedeny v CAD software Autodesk Fusion 360. Poté bylo zajištěno dosažení úspěšného tisku tohoto modelu. Následně byla provedena montáž 2 podobných modelů s rozdílnými servomotory a orientacemi hřídele. Model 1 určený pro demonstraci funkčního RDS mechanismu ukrytého ve křídle. Model 2 (vytisknutý 3x z rozdílných filamentů: 2 různá PETG a 1 ASA) určený pro cyklické testování mechanismu a poddajného potahu.

Konstrukční řešení využívá tzv. RDS (Rotary Drive System), který není běžně využíván v RC letectví, ale jeho výskyt byl zaznamenán. Princip spočívá v použití ocelové hřídele, která je v jednom z bodů rotace flaperonu ohnutá. Na části hřídele za lomem je nasazen flaperon, který je nucen se vychylovat při rotaci hřídele. Hřídel může mít různé úhly ohybu, které podle kombinace s různými servomotory mohou vyvolávat různé velikosti vychylek. Hřídel je také usazena v malém ložisku ve křídle. Kapsa flaperonu je uvnitř pokryta mosazným plechem pro snížení tření a opotřebení. Pro Model 1 byl použitý modelářský standardní servomotor a pro model 2 třífázový servomotor B&R 8LVA s několikanásobně vyšší rychlostí pro cyklické zatěžování.

Modely 1 i 2 dosahují korektní kinematiky ověřené geometricky s největší deviací od optimální křivky ohybu poddajné části potahu 2 mm.

PETG byl vybrán jako hlavní materiál pro výrobu díky své vyšší pružnosti oproti PLA a ASA, tepelné odolnosti a dobré tiskové stabilitě. Testy prokázaly, že PETG vykazuje nižší náchylnost k praskání při opakovaném namáhání oproti ASA.

Testování modelu 1 s délkou flaperonu 0,15 m a poddajným spodním potahem z PVC fólie potvrdilo funkčnost mechanismu i se simulovaným zatížením dynamickým tlakem.

Výsledky testování modelu 2 ukázaly, že flaperon z přírodního PETG – primární snesl více než 300 000 cyklů bez porušení a poté s rostoucí trhlinou dosáhl 1 milion cyklů. Model 2 - sekundární z bílého PETG měl již při 300 000 cyklech trhlinu podobné délky jako primární model. Model vyrobený z ASA, na kterém taky byla otestována technologie rozleptávání acetonem, selhal již po 8000 cyklech.

Navržený morfující flaperon se ukázal jako vhodné a inovativní řešení pro řízení RC letounů. Díky využití technologie FDM a materiálu natural PETG s kompozitovým hlavním nosníkem byla dosažena vysoká pevnost křídla při zachování pružnosti v oblasti flaperonu, malé hmotnosti a tisknutelnosti i na neuzavřených tiskárnách. Konstrukční uspořádání s využitím RDS zajišťuje plynulý pohyb bez mechanických závad.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Význam
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
G	[MPa]	Modul pružnosti v smyku
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
$\vartheta$	[m <sup>2</sup> /s]	Kinematická viskozita
$l_{Re}$	[m]	Charakteristická délka
$\mu$	[N·s/m <sup>2</sup> ]	Dynamická viskozita
F	[N]	Síla
M	[Nm]	Točivý moment
M <sub>k</sub>	[Nm]	Točivý moment (krut)
T	[N]	Posouvající síla
c	[m]	Tětiva profile křídla
c <sub>p</sub>	[-]	Součinitel tlaku
$v^\infty$	[m/s]	Rychlost proudu vzduchu
p	[Pa]	Tlak
$\sigma_o$	[Pa]	Napětí v ohybu
$\tau_K$	[Pa]	Napětí v krutu
W <sub>k</sub>	[m <sup>3</sup> ]	Průřezový modul v krutu
W <sub>o</sub>	[m <sup>3</sup> ]	Průřezový modul v ohybu
$\sigma_{redHMH}$	[Pa]	Redukované napětí podle HMH kritéria

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Dron z Chickenwings.....	12
Obr. 2 NACA 2415 .....	13
Obr. 3 Princip FDM 3D tisku (upraveno) .....	14
Obr. 4 Tisk segmentu křídla .....	15
Obr. 5 Žebra, interní struktura křídla .....	15
Obr. 6 Bambu Lab P1S + AMS (1) .....	16
Obr. 7 Mechanizace křídélka modelu Hee Wing T1 Ranger (4) .....	17
Obr. 8 Vizualizace pohonu křídélka servomotorem přes táhlo (2) .....	17
Obr. 9 Servomotor pootočený (4).....	18
Obr. 10 RC letoun z LW PLA deformovaný po zahřátí v automobilu (18) .....	23
Obr. 11 XFLR5 CP výchylka -20° .....	27
Obr. 12 XFLR5 CP výchylka +20° .....	27
Obr. 13 Řešení č. 1: Servomotor, táhlo, šikmá drážka .....	28
Obr. 14 Řešení č. 2: centrální servomotor, pružina, bowden .....	29
Obr. 16 Řešení č.3: servomotor se závitovou tyčí v křídle, drážka 3D .....	30
Obr. 15 Řešení č.3: servomotor se závitovou tyčí v křídle, drážka 2D .....	30
Obr. 17 Řešení č.3: servomotor se závitovou tyčí v křídle, drážka, vychýlení+ 3D ...	31
Obr. 19 Řešení č.3: servomotor se závitovou tyčí v křídle, drážka, vychylky 3D.....	31
Obr. 18 Řešení č.3: servomotor se závitovou tyčí v křídle, drážka, vychýlení- 3D ...	31
Obr. 20 Řešení 4: krut přes hřídel do čepu závěsu flaperonu .....	33
Obr. 21 Řešení 5: RDS, výchylka 0° .....	34
Obr. 22 Křídlo s RDS, kompletní žebra, trubkový nosník .....	35
Obr. 23 Silové schéma hřidel 3D.....	37
Obr. 24 Reakční síly bokorys .....	37
Obr. 25 Schéma řezů pro výpočet VVÚ .....	38
Obr. 26 Výsledné vnitřní účinky sil hřídele.....	40
Obr. 27 Šachta pro servomotor .....	43
Obr. 28 Schéma hřídele .....	44
Obr. 29 Model 1 schéma náhonu .....	45
Obr. 30 Model 1 Flaperon vychýlený dolů .....	46
Obr. 31 Model 1 Flaperon vychýlený nahoru.....	46
Obr. 32 Model 2 CAD .....	47
Obr. 33 Model 2: černý ASA model po částečném rozpuštění povrchu acetonem....	48
Obr. 34 Proces leptání ASA modelu 2 acetonem .....	49
Obr. 35 Model 2 PETG natural pohled shora, flaperon dole -35° .....	50
Obr. 36 Model 2 PETG bílý pohled zdola, flaperon 0° .....	50
Obr. 37 Model 2 – černý ASA model pohled ze strany, porovnání křivky .....	51
Obr. 38 UI testovacího programu .....	52
Obr. 39 Opatřebení kapsy Model 2 – primární, sekundární.....	52
Obr. 40 Finální trhlina Model 2 - primární .....	53
Obr. 41 Finální delaminace, trhliny Model 2 – terciální.....	53

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DON IT1. *FDM vs SLA 3D printing which is right for you?* [online]. 2024 [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://www.donit.co.za/fdm-vs-sla-3d-printing-which-is-right-for-you/>
- [2] BAMBULAB. *P1S* [online]. 2024 [cit. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://eu.store.bambulab.com/en-cz/products/p1s?skr=yes>
- [3] @backyardrc6662. *Control link geometry demo* [online]. 2017 [cit. 2025-02-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=saVDLgrD0Ng>
- [4] OSCAR LIANG. *Hee Wing T1 Ranger* [online]. 2023 [cit. 2025-02-26]. Dostupné z: <https://oscarliang.com/hee-wing-t1-ranger-no-fc/>
- [5] *EP10: Aileron servo mount, Scratch building a Giant Scale Model Airplane* [online]. 2020 [cit. 2025-02-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=OlkxWD5OB14>
- [6] HERMANN, Stefan. CNC KITCHEN. *The BEST 3D printing material? Comparing PLA, PETG & ASA (ABS) - feat. PRUSAMENT by Josef Prusa* [video]. 2020, 1.2.2020 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ycGDR752fT0>
- [7] SLUMP, Gabriel. ALL3DP. *PLA vs ABS vs PETG: The Main Differences* [online]. 2023 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/pla-vs-abs-vs-petg-differences-compared/>
- [8] DAMANPACK, SOUSA a BODAGHI. Porous PLAs with Controllable Density by FDM 3D Printing and Chemical Foaming Agent. *Micromachines* 2021 [online]. 2021, **2021**(12), 8 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/mi12080866>
- [9] COLORFABB. *Colorfabb LW ASA* [online]. 2024 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://colorfabb.com/lw-asa-black>
- [10] MARTINS, RF, R BRANCO a M MARTINS. Mechanical Properties of Additively Manufactured Polymeric Materials-PLA and PETG-For Biomechanical Applications. *Polymers* [online]. USA, 2024, **2024**(16 (13)), 10 [cit. 2025-05-11]. Dostupné z: doi:[10.3390/polym16131868](https://doi.org/10.3390/polym16131868)
- [11] D'ANDREA, Danilo, Giacomo RISITANO, Marcello RAFFAELE, Filippo CUCINOTTA a Dario SANTONOCITO. Damage assessment of different FDM-processed materials adopting Infrared Thermography. *Frattura ed Integrità Strutturale* [online]. 2022, **2022**(16, 75-90), 90 [cit. 2025-05-11]. Dostupné z:

doi:10.3221/IGF-ESIS.62.06

- [12] VLĂȘCEANU, Daniel, Diana POPESCU, Florin BACIU a Constantin STOCHIOIU. Examining the Flexural Behavior of Thermoformed 3D-Printed Wrist–Hand Orthoses: Role of Material, Infill Density, and Wear Conditions. *Polymers* [online]. 2024, **16**(16), 55 [cit. 2025-05-11]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym16162359
- [13] PRUSA RESEARCH. *Prusament* [online]. 2025 [cit. 2025-05-11]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/kategorie/prusament/>
- [14] *CNC Kitchen* [online]. 2020 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ycGDR752fT0>
- [15] FILLAMENTUM. *PETG Filamentum Natural* [online]. 2025 [cit. 2025-04-27]. Dostupné z: <https://fillamentum.shop/collections/petg/products/petg-natural-1>
- [16] D'ANDREA, Danilo, Marcello RAFFAELE, Filippo CUCINOTTA a Dario SANTONOCITO. *Damage assessment of different FDM-processed materials adopting Infrared Thermography* [online]. Italy, 2022 [cit. 2025-01-03]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/364194072\\_Damage\\_assessment\\_of\\_different\\_FDM-processed\\_materials\\_adopting\\_Infrared\\_Thermography](https://www.researchgate.net/publication/364194072_Damage_assessment_of_different_FDM-processed_materials_adopting_Infrared_Thermography). Článek. University of Messina, Italy.
- [17] MARTINS, Miguel Confraria. *Mechanical Behaviour of Materials for External Biomechanics Applications: Study on the Fatigue of Polymers: Pla and Petg*. Portugal, 2024. Dostupné také z: <https://www.proquest.com/dissertations-theses/mechanical-behaviour-materials-external/docview/3086169691/se-2?accountid=17115>. Master Thesis. Universidade NOVA de Lisboa.
- [18] MARTINS, Rui F., Ricardo BRANCO, Miguel MARTINS, et al. Mechanical Properties of Additively Manufactured Polymeric Materials—PLA and PETG—For Biomechanical Applications. *Polymers* [online]. 2024, **16**(13), 6 [cit. 2025-05-11]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym16131868
- [19] BROWN, Kyle. *Don't leave your LW-PLA RC plane in the car on a hot day...* [online]. 2022 [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: [https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/vxplic/dont\\_leave\\_your\\_lwpla\\_rc\\_plane\\_in\\_the\\_car\\_on\\_a/](https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/vxplic/dont_leave_your_lwpla_rc_plane_in_the_car_on_a/)
- [20] MARK DRELA. *XFoil* [online]. 2000 [cit. 2025-02-21]. Dostupné z: <https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>
- [21] XFLR5 TECH. *XFLR5* [online]. 2019 [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://www.xflr5.tech/xflr5.htm>

- [22] ANDERSON, John D. *Fundamentals Of Aerodynamics 5th Edition* [online]. 5. McGraw-Hill Education, 2010 [cit. 2025-04-02]. ISBN 0073398101. Dostupné z: [https://ia600906.us.archive.org/14/items/FundamentalsOfAerodynamics5thEdition/Fundamentals\\_of\\_Aerodynamics\\_5th\\_edition.pdf](https://ia600906.us.archive.org/14/items/FundamentalsOfAerodynamics5thEdition/Fundamentals_of_Aerodynamics_5th_edition.pdf)
- [23] *Micro Linear Servo* [online]. 2025 [cit. 2025-04-16]. Dostupné z: [https://www.actuonix.com/P8-R-Micro-Linear-Servo--100mm--1651--12-volts\\_p\\_493.html](https://www.actuonix.com/P8-R-Micro-Linear-Servo--100mm--1651--12-volts_p_493.html)
- [24] @camnut. *RDS for Fury mk1* [online]. 2020 [cit. 2025-03-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qGmgnV1unX0>
- [25] DUBNICKÝ, Lukáš. *Konstrukce morfuujícího flaperonu s využitím předepjatého potahu*. Brno, 2024. Disertační práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [26] KAVANRC. *KAVAN ocelový drát 3 mm* [online]. 2025 [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://kavanrc.com/cs/item/ocelovy-drat-3-0mm-1000mm-152414>
- [27] GNEE OCEL (TIANJIN) CO., LTD. *Ocel 60Si2Mn* [online]. 2025 [cit. 2025-05-10]. Dostupné z: <https://cz.galvanized-sheets.com/spring-steel/60si2mn-spring-steel.html>
- [28] ZVL *ložisko* [online]. 2025 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: [https://www.zvlbearing-catalog.sk/createpdf/pdf\\_sk\\_01.php?IDcis=2](https://www.zvlbearing-catalog.sk/createpdf/pdf_sk_01.php?IDcis=2)
- [29] SRT-RC. *SRT DL3017* [online]. 2017 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://www.srt-rc.com/index.php?id=66>
- [30] REICHARD. *Servotester* [online]. 2025 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://www.reichard.cz/konect-balancer-a-servotester>
- [31] SVITILNY FENIX. *Akumulátor 21700 Fenix* [online]. 2025 [cit. 2025-05-01]. Dostupné z: <https://www.svitilny-fenix.cz/produkt/akumulator-21700-fenix-arb-l21-5000u/>
- [32] MPJET. *RDS shaft* [online]. 2025 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://mpjet.com/shop/gb/rds-drives-and-parts/1134-rds-collet-shaft-od-6-mm-25-spline-60-l27-futaba.html>
- [33] KAVAN RC. *Kavan Threadlocker Red* [online]. 2025 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://www.kavanrc.com/cs/item/kavan-threadlocker-red-10ml-154469>
- [34] REICHARD. *Mosazný Plech* [online]. 2025 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://www.reichard.cz/krick-plech-mosazny-0-1x200x100mm>

- [35] HENKEL ADHESIVES. *Loctite 401* [online]. 2025 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: [https://www.henkel-adhesives.com/cz/cs/produkt/instant-adhesives/loctite\\_4010.html](https://www.henkel-adhesives.com/cz/cs/produkt/instant-adhesives/loctite_4010.html)
- [36] PRUSA RESEARCH. *Prusa lubrikant s aplikátorem set (5g)* [online]. 2025 [cit. 2025-04-21]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusa-lubrikant-s-aplikátorem-set-5g/>
- [37] REICHARD. *Durofol folie* [online]. 2025 [cit. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://www.reichard.cz/durofol-0-2x500x1000mm-140g/bm>
- [38] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Řízení strojů a procesů* [online]. 2025 [cit. 2025-04-23]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/predmety/detail/278107>
- [39] BR AUTOMATION. *8LVA13.B1030D000-0* [online]. 2025 [cit. 2025-04-23]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/cs/produkty/8lva13b1030d000-0/>
- [40] SMART3D. *PETG Devil Design White* [online]. 2022 [cit. 2025-05-01]. Dostupné z: <https://www.smart3d.cz/p/filament-devil-design-petg-bila-1-75-mm-1-kg>
- [41] PRUSA RESEARCH. *Prusament ASA Jet Black* [online]. 2025 [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/product/prusament-asa-jet-black-850g/>
- [42] REICHARD. *Spojka 3 mm závit* [online]. 2025 [cit. 2025-04-25]. Dostupné z: <https://www.reichard.cz/spojka-m3-pr-3>
- [43] CASTRO, Francisco, Leonardo SANTANA a Jorge LINO ALVES. Colored PETG Filaments: Effects of Pigment on the Mechanical Properties of Heat-Treated FFF Parts. *Material Proceedings* [online]. Portugalsko, 2022, **2022**(8, 35), 2 [cit. 2025-05-01]. ISSN <https://doi.org/10.3390/materproc2022008035>. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/materproc2022008035>

---

## SEZNAM PŘÍLOH

### 1. Model 1 – sestava (Fusion 360)

DP Filip Ryba Morfující Flaperon Model.f3d

### 2. Výkres sestavy

FR\_DP\_A3\_1.pdf Křídlo morfující flaperon Model 1