

# **STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST**

**Obor č. 9: Strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový  
design**

## **Návrh a výroba vrtulí pro dron s využitím 3D tisku**

**Ivan Tomashek  
Jihomoravský kraj**

**Brno 2021**

# **STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST**

Obor č. 9: Strojírenství, hutnictví, doprava a průmyslový design

## **Návrh a výroba vrtulí pro dron s využitím 3D tisku**

### **Concept of 3D printed drone propellers**

Autor: Ivan Tomaschek  
Škola: Gymnázium Brno, Křenová, příspěvková organizace  
Kraj: Jihomoravský kraj  
Konzultant: Ing. Tomáš Goldmann

Brno 2021

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně a použil jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů. Některá vyznačená měření byla provedena společně s Jakubem Cintulou z důvodu omezení návštěv v době pandemie COVID-19, avšak vyhodnocení jednotlivých měření je mým autorským dílem.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem 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 Brně dne 9. 4. 2021 .....

Ivan Tomaschek

## Poděkování

Děkuji Ing. Tomáši Goldmannovi za obětavou pomoc, ochotu mně se vším seznámit a pomoci. Po dobu tvorby jsem tématu nejen porozuměl a úspěšně dokončil tuto práci, ale hlavně jsem získal velký zájem o toto téma. Děkuji ji mu, také za poskytnuté zázemí na FIT VUT a podnětné podmínky, které mi během práce poskytoval. Tato práce byla vypracována za finanční podpory JMK.



## **Anotace**

Tato práce se zabývá návrhem vrtule dronu v 3D modelovacích programech, zkoumáním dostupnosti modelů na internetu a následným tiskem na 3D tiskárně. Cílem práce bylo vytvořit nebo najít vhodný model a následně zkoumat vhodnost jednotlivých metod tisku, materiálů a využití rozdílných postprocesingových metod pro zlepšení vlastností už vytištěné vrtule. Za pomoci několika připravených experimentů jsem v závěru srovnal vytištěné vrtule s těmi kupovanými a zhodnotil jejich ekonomický potenciál. Poznatky získané v práci mohou být použity nejen pro tisk vrtulí v budoucnu, ale i jako odrazový můstek pro další práce řešící problematiku 3D tisku.

## **Klíčová slova**

FFF 3D tisk, dron, vrtule, klady a zápory 3D tisku

## **Annotation**

This work deals with the design of a drone propeller in 3D modeling programs, examining the availability of models on the Internet and subsequent printing on a 3D printer. The aim of the work was to create or find a suitable model on the Internet and then investigate the suitability of individual printing methods, materials and the use of different post - processing methods to improve the properties of already printed propellers. With the help of several prepared experiments, in the end I compared the printed propellers with those bought and evaluated their profitability. The knowledge gained in the work can be used not only for the printing of propellers in the future, but also as a springboard for other work addressing the issue of 3D printing.

## **Keywords**

FFF 3D printing, drone, propeller, pros and cons of 3D printing

## Obsah

1	Úvod .....	7
2	3D tisk .....	8
2.1	Princip .....	8
2.1.1	SLA ( <i>Stereolitography</i> ) .....	8
2.1.2	SLS ( <i>Selective laser sintering</i> ) .....	9
2.1.3	FDM ( <i>Fused Depositon Modeling</i> )/FFF ( <i>Fused Filament Fabrication</i> ) .....	9
2.2	Filamenty .....	11
2.2.1	PLA ( <i>kyselina polyléčná</i> ) .....	11
2.2.2	ABS ( <i>akrylonitril-butadién-styrén</i> ) .....	14
2.2.3	ASA ( <i>Akrylonitril-styren-akrylát</i> ) .....	16
2.2.4	PETG ( <i>Polyethylentereftalát glykol</i> ) .....	18
2.3	Klady a zápory 3D tisku .....	21
2.4	3D skenery .....	22
2.4.1	Měření doby letu světla ( <i>Time of Light</i> ) .....	22
2.4.2	Strukturované světlo ( <i>Structured light</i> ) .....	23
2.4.3	Fotogrammetrie ( <i>Photogrammetry</i> ) .....	23
2.5	Nastavení parametrů pro 3D tisk .....	24
3	Letecká vrtule .....	27
3.1	Princip fungování vrtule a vztlak .....	27
3.2	Zkroucení vrtulového listu .....	28
4	Realizace 3D tisku a experimenty .....	29
4.1	Dostupnost modelů na internetu .....	29
4.2	Skenování vrtule .....	30
4.3	Příprava tisku .....	32
4.4	Zhodnocení kvality tisku .....	33
4.5	Testování prototypů .....	35
4.5.1	Testování pružnosti .....	35
4.5.2	Testování vztlaku .....	36
4.5.3	Měření otáček za minutu .....	37
5	Závěr .....	38
	Přílohy .....	39
5.1	Laboratorní protokol č. 1 .....	39

5.2	Laboratorní protokol č. 2 .....	40
5.3	Laboratorní protokol č. 3 .....	42
6	Zdroje .....	44
6.1	Použitá literatura.....	44
6.2	Další zdroje.....	44
6.3	Seznam obrázků.....	47

# 1 ÚVOD

Historie 3D tisku se začíná psát v roce 1986 [28], kdy si Chuck Hull nechal patentovat metodu stereolitografie, která využívá tekutý fotopolymer a zdroj záření. O dva roky později si S. Scott Crump [29] nechal patentovat metodu FDM (*Fused Deposition Modeling*), která nepotřebuje fotopolymer a spoléhá se na natavování plastové struny, což je nejen bezpečnější, ale i jednodušší na manipulaci. Rok 2005 byl pravděpodobně nejdůležitějším rokem v novodobé historii 3D tisku. Na University of Bath byl doktorem Adrianem Bowyerem založen projekt RepRap. Jeho cílem bylo navrhnout 3D tiskárnu do 100 000 Kč, která by dokázala vytisknout co nejvíce svých částí. Od začátku byl projekt koncipován v duchu open source, což z něj udělalo nejrozšířenější druh 3D tiskárny na světě [24]. V této práci se budu věnovat především metodě FFF (stejná jako FDM, název však není ochrannou známkou), která se hodí nejvíce pro domácí použití, jak jsem shrnul v práci níže.

Hlavní výhodou FFF 3D tisku je téměř neomezená paleta tvarů a křivek, bohatá nabídka materiálů a nejnižší cena v porovnání se zbylými technologiemi. Jediným limitem je velikost podložky, na kterou se tiskne.

Provozování dronů se stalo vyhledávanou činností a s rostoucím zájmem roste také poptávka po levných plastových vrtulích. Při každém letu a přistání se vrtule může roztříštit o překážku a proto přijde vhod možnost si vrtule předtisknout pro případ potřeby. Tisknutí vrtulí také otevírá možnosti pro individuální úpravy na míru a zlepšování jejich vlastností.

V této práci jsem si vytyčil cíl, kterým je prozkoumat co nejvíce dostupných materiálů a 3D modelů vhodných pro tisk. Jejich vhodnost ověřím fyzikálními pokusy, měřeními a zpracováním dat. Výsledky této práce mohou být použity jako základ pro další inovace v této oblasti.



## 2 3D TISK

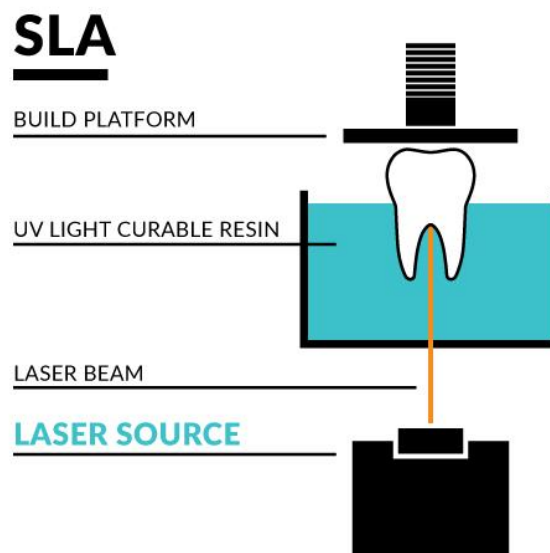
3D tisk je aditivní výrobní metoda, která původně sloužila pouze pro rychlé prototypování, ale dnes si s širší nabídkou dostupných zejména FFF tiskáren nachází čím dál častěji své místo v dílnách kutilů a na školách, kde si práci s ní mohou vyzkoušet i studenti. Vedle široké nabídky tiskáren je na internetu nepřehledné množství článků, rad a vychytávek, které můžeme většinou zdarma zpracovat do své tiskárny. A jaká je budoucnost 3D tisku? Svě místo má už dnes 3D tiskárna na ISS, která je speciálně upravená pro stav beztlíže, kde tiskne rozličné součástky na místě, čímž v budoucnu zredukuje objem a cenu dopravovaného materiálu ze země a současně ušetří drahocenné místo, které by jinak zabíraly náhradní díly.

### 2.1 Princip

3D tiskárny dokáží z digitální předlohy vyrábět fyzické trojrozměrné předměty. Proces vzniku nového produktu, při kterém dochází k vrstvení materiálu na sebe, se označuje jako aditivní – výsledný produkt je modelován z materiálu, který je postupně přidáván. Jedná se vlastně o opačný proces, než který k výrobě využívají například obráběcí stroje, kdy je z celistvého kusu materiál postupně odebírán [1]. Materiál lze vrstvit několika různými technologiemi [2].

#### 2.1.1 SLA (Stereolitography)

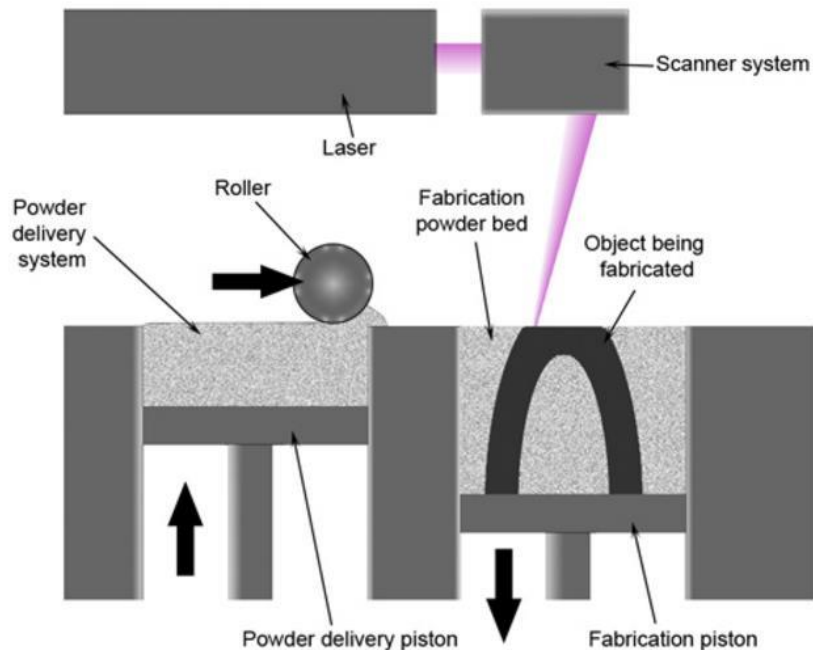
SLA je první patentovaná technologie 3D tisku z 80. let minulého století. K vytváření objektů využívá UV paprsek nebo laser, který vytvrzuje polymerovou pryskyřici do požadovaného tvaru. Jedná se o velmi přesnou techniku 3D modelování, současně je ale velmi nákladná, což způsobuje hlavně drahý fotopolymer a komplikace s jeho zacházením a likvidací. Není tak masově rozšířena jako FDM/FFF technologie.



Obrázek 1: Schéma SLA tiskárny, převzato z [30].

### 2.1.2 SLS (*Selective laser sintering*)

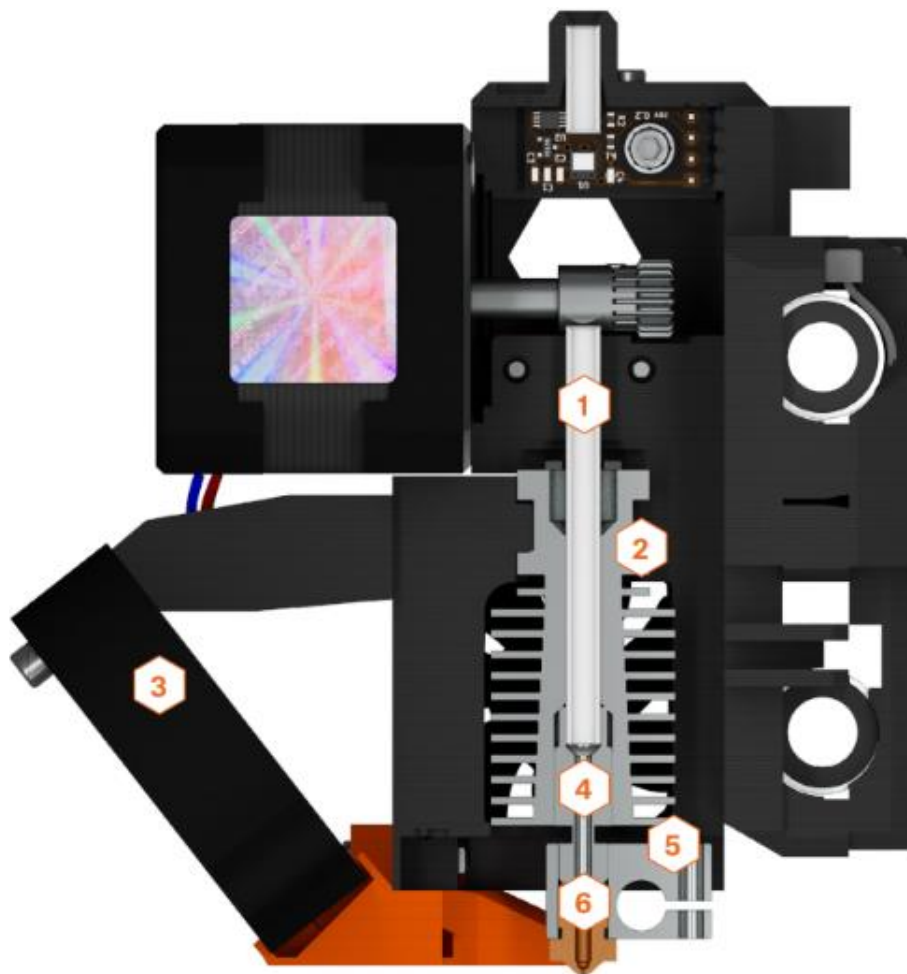
SLS, v překladu selektivní spékání laserem, někdy označované také jako laserové sintrování, je technologie 3D tisku, kdy objekt vzniká tavením práškového materiálu a jeho spékání po jednotlivých vrstvách pomocí laseru. Laser vytvrzuje požadovaný tvar objektu do materiálu ve formě pevného prachu, který je umístěný na tiskové desce. Po vytvrzení jedné vrstvy stroj nanese další tenkou vrstvu prachu a tu laser opět vytvrdí. Výsledkem jsou velmi přesné a odolné výtisky. Tiskárny fungující na principu laserového sintrování jsou profesionální stroje, které nachází využití pouze v oblasti průmyslové výroby a výrobě prototypů k funkčnímu testování.



Obrázek 2: Schéma SLS tiskárny, převzato z [31].

### 2.1.3 FDM (*Fused Depositon Modeling*)/FFF (*Fused Filament Fabrication*)

Obě technologie jsou si identické a fungují na principu natavování materiálu, nejčastěji plastové struny, které se říká filament, v extruderu (Obrázek 3) a následném vrstvení na sebe, až vznikne trojrozměrný model. FFF technologie 3D tisku je nejlevnější technologií 3D tisku, což je hlavní důvod, proč je tolik rozšířená. FFF stolní 3D tiskárnu pro použití v domácnosti pořídíte do 10 tisíc korun. Nevýhodou této technologie je dlouhý čas tisku, široký rozptyl kvality tisku, která je závislá na modelu tiskárny i použitém materiálu, a různá konstrukční omezení, například nemožnost tisku do volného prostoru na rozdíl od SLA, kdy musíme k modelu přidat podpěry, které se po tisku odlámou. Mnohdy si lidé myslí, že tisk na 3D tiskárně je stejně snadný jako na té inkoustové a pokaždé dostaneme stejný výsledek. U této technologie je důležité myslet na rychlost tisku a další důležité parametry. Při vysoké rychlosti budeme materiál tisknout na ne zcela ztuhnutý materiál a model se zborší, nebo při pomalém tisku se vrstvy dobře nepojí.



Obrázek 3: FFF tiskárna: detail extruderu, převzato z [24].

Části extruderu:

1. Teflonová (PTFE) trubička
2. Chladič
3. Tiskový ventilátor
4. Izolátor
5. Heater Block
6. Tryska

## 2.2 Filamenty

Filament je struna, nejčastěji z plastu, která se natavuje a slouží jako zdroj materiálu pro 3D tisk metodou FFF. Na trhu je mnoho různých druhů plastů a příměsí, které se do nich přidávají. V této práci projdu ty nejhojněji používané, které jsou volně dostupné.

### 2.2.1 PLA (*kyselina polyléčná*)

PLA je nejrozšířenější filament do 3D tiskáren. Vděčí za to své poměrně nízké teplotě tavení (180 °) a dobré soudržnosti při tisku.

#### VÝROBA

„Ze škrobu (nejčastěji obilného) se vyrábí enzymatickou hydrolýzou glukóza, ze které se fermentací získává kyselina mléčná. Tato se mění speciální polymerizací na polyléčnou kyselinu. Vlákná PLA se obvykle vyrábějí z taveniny polyléčné kyseliny suchým nebo i mokřím zvláknováním.“ [3]

#### TISK

Jak jsem již výše zmínil, PLA má poměrně nízkou teplotu tavení, což znamená, že má i nízkou tepelnou odolnost (pouze 60 °C), proto musíme dbát zvýšené opatrnosti při broušení a brousit za mokra, aby se nám výtisk nezačal tavit. Výtisky z PLA nejsou odolné vůči UV záření a povětrnostním podmínkám, proto se využívají spíše ve vnitřních prostorech. Nejčastěji z něj tiskneme dekorace, koncepty a prototypy, které nebudou vystaveny mechanické zátěži [4].

TEPLOTA TRYSKY	TEPLOTA PODLOŽKY	MAX. RYCHLOST TISKU
215 °C	50 - 60 °C	200 mm/s

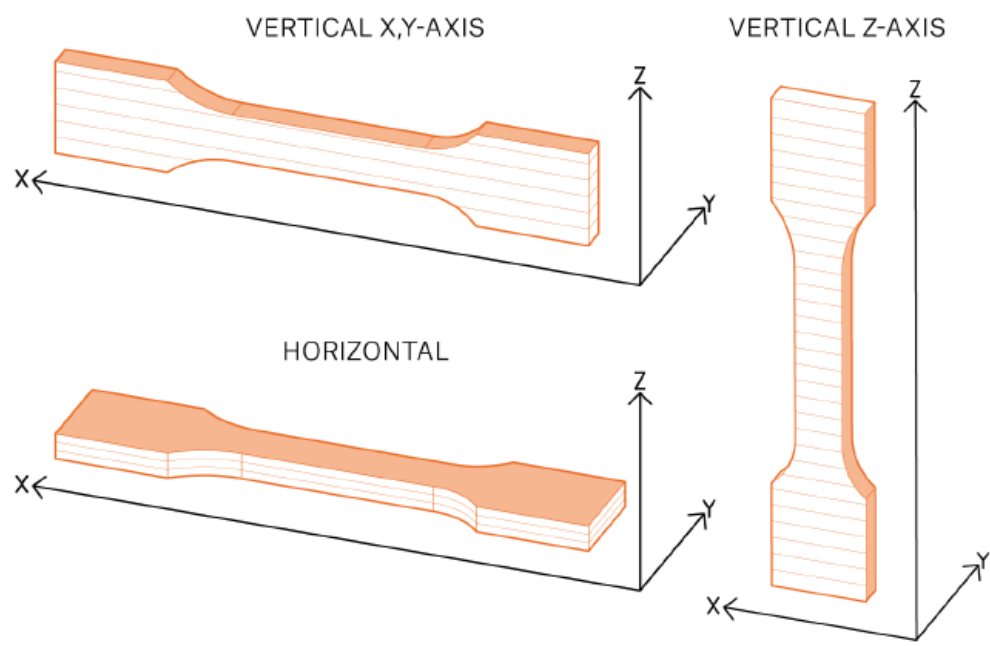
Tabulka 1

## MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Vlastnost/směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Y	Vertikální osa Z	Metoda
Modul pružnosti v tahu [GPa]	$2,2 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,1$	ISO 527 - 1
Napětí na mezi kluzu [MPa]	$50,8 \pm 2,4$	$59,3 \pm 1,9$	$37,6 \pm 4,0$	ISO 527 - 1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	$2,9 \pm 0,3$	$3,2 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,3$	ISO 527 - 1
Rázová houževnatost Charpy (4) [kJ/ m <sup>2</sup> ]	$12,7 \pm 0,7$	$13,7 \pm 0,7$	$5,0 \pm 1,4$	ISO 179 - 1

Tabulka 2: Souhrn mechanických vlastností [5].

Hodnoty v tabulce se vztahují k Obrázku 4



Obrázek 4: Vytištěný vzorek, převzato z [5].

## SHRNUTÍ

KLADY	ZÁPORY
snadný tisk	křehkost
tiskne drobné detaily	nízká teplotní odolnost
vhodné na tisk velkých modelů	obtížnější broušení a opracování
tvrdost a houževnatost	sporná ekologie [6]
nedeformuje se	

Tabulka 3: Souhrn mechanických vlastností.

## 2.2.2 ABS (*akrylonitril-butadién-styrén*)

Objekty tištěné s ABS se mohou pyšnit mírně vyšší pevností, pružností a odolností než objekty vyrobené z PLA, avšak za cenu trochu komplikovanějšího tisku.

### VÝROBA

„Akrylonitril-butadién-styrén (ABS) je amorfní polymer vyráběný s pomocí emulzní nebo blokové polymerace akrylonitrilu a styrénu při přítomnosti polybutadiénu. Nejdůležitějšími vlastnostmi ABS jsou odolnost proti nárazu a pevnost.“ [7]

### TISK

ABS je termoplast, to znamená, že jej můžeme opakovaně roztavit a on se přitom neznehodnotí a neztratí své mechanické vlastnosti. Je vysoce tepelně odolný, do 98 °C se neprojevují známky deformace, s tím také souvisí jeho vysoká tepelná roztažnost, která může značně zkomplikovat tisk. I s vyhřívanou podložkou mají zejména větší výtisky tendenci se kroutit, lze to částečně eliminovat tiskem v boxu nebo dobře vytopené místnosti. Tisk v boxu se doporučuje také proto, že se při tisku uvolňuje nepříjemný zápach. ABS se rozpouští v acetonu, toho se dá využít pro spojování výtisků k sobě, stačí plochy potřít acetonem, ty se rozleptají a následně spojí, nebo vyhlazování povrchu pomocí acetonových výparů, kdy se výtisk umístí do uzavřeného boxu na rošt, dospou se nalije aceton a výpary za pár hodin povrch dokonale vyhladí a propůjčí mu lesklou texturu. Díky své tvrdosti a houževnatosti se hodí zejména pro výrobu prvních funkčních vzorků před sériovou výrobou pro funkční prototyp, výrobní nástroje a výrobky určené nejen do interiéru ale i exteriéru [8] [9].

TEPLOTA TRYSKY	TEPLOTA PODLOŽKY
255 °C	80-110°C

Tabulka 4

## MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Yongův model (GPa)	2,4
Modul pružnosti (GPa)	2,2
Pevnost v ohybu (MPa)	65
Poměr pevnosti k hmotnosti (kN. m/kg)	31 - 80
Pevnost v tahu (MPa)	37 - 110
Odolnost proti nárazu (J/m)	70 - 370

Tabulka 5: Souhrn mechanických vlastností [10].

## SHRNUTÍ

KLADY	ZÁPORY
vysoká odolnost proti teplu a nárazům	nepříjemný zápach
pevný a univerzální	horší v drobných detailech
možnost lepení acetonem a vyhlazení acetonem	deformace při neřízeném chladnutí
zdravotně nezávadný	vyžaduje vyšší teplotu okolního prostředí
patří mezi nejlevnější	nutnost vyhřívané podložky

Tabulka 6



### 2.2.3 ASA (Akrylonitril-styren-akrylát)

ASA lze považovat za skutečného nástupce ABS. Je oproti ABS UV stabilní, při tisku se méně smršťuje a rovněž zápach při tisku je mnohem slabší.

#### VÝROBA

Akrylátový kaučuk se liší od kaučuku na bázi butadienu absencí dvojných vazeb, což dává materiálu asi desetkrát větší odolnost proti povětrnostním vlivům a odolnost proti ultrafialovému záření než u ABS. ASA lze vyrobit buď reakčním procesem všech tří monomerů (styren, akrylonitril, ester kyseliny akrylové), nebo roubováním, i když roubování je typickou metodou. Během kopolymerace styrenu a akrylonitrilu se zavede roubovaný akrylový esterový elastomer. Elastomer se zavádí jako prášek [11].

#### TISK

ASA je považováno za nástupce ABS, protože se mu podařilo eliminovat, některé z největších nevýhod ABS. Stejně jako ABS je ASA vysoce tepelně odolný materiál, který neprojevuje známky deformace až do 93 °C, ale na rozdíl od něj lépe odolává kroucení při tisku, ale pořád se mu nevyhne u rozměrnějších modelů, proto se stejně jako u ABS doporučuje tisk v boxu, také zapáchá při tisku, ale méně než ABS. Na rozdíl od něj je UV - stabilní, proto se hodí i pro venkovní použití, kde se nemusíme bát změny barvy (zejména žloutnutí) nebo mechanických vlastností. Je to vysoce pevný a houževnatý materiál, který je zejména využíván pro tisk a prototypování výrobních nástrojů, ale také pro výrobu předmětů do domácnosti včetně venkovních aplikací (držák lahve na kolo). Povrch můžeme dále lepit acetonem, nebo ho vyhladit acetonovými výparry. Nemusíme se bát ani broušení za sucha [12].

TEPLOTA TRYSKY	TEPLOTA PODLOŽKY	RYCHLOST TISKU
260 ± 5 °C	110 ± 5 °C	až 200 mm/s

Tabulka 7

## MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Vlastnost/směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Z	Metoda
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1,7 ± 0,1	1,7 ± 0,1	ISO 527 - 1
Napětí na mezi kluzu [MPa]	64 ± 1	69 ± 1	ISO 178
Prodloužení na mezi kluzu [%]	3,4 ± 0,2	3,8 ± 0,2	ISO 527 - 1
Rázová houževnatost Charpy (4) [kJ / m <sup>2</sup> ]	25 ± 3	38 ± 11	ISO 179 - 1

Tabulka 8: Souhrn mechanických vlastností [13].

Hodnoty v tabulce se vztahují k vytištěnému vzorku na Obrázku 4

## SHRNUTÍ

KLADY	ZÁPORY
Vhodné pro venkovní použití - UV stabilní	Velké modely mají tendenci se deformovat
Dobrá přilnavost mezi vrstvami	Zapáchá během tisku (méně než ABS)
Vysoká odolnost proti nárazu a opotřebení	Hygroskopický
Detailní výtisky bez stringování	
Vysoká tepelná odolnost	

Tabulka 9

## 2.2.4 PETG (*Polyethylentereftalát glykol*)

Jde o skvělou volbu pro tisk mechanicky namáhaných částí. Ve srovnání s PLA má vyšší teplotní odolnost, je pružnější a méně křehký.

### VÝROBA

PET-G je upravená verze PET. "G" znamená "modifikovaný glykol", který se přidává k materiálové kompozici během polymerace. V chemii se tento materiál označuje jako (polyethylentereftalát-1,4-cyklohexylendimethylentereftalát).

### TISK

PETG je houževnatý plast s vysokou tepelnou odolností až 68 °C, proto se hodí na tisk mechanických částí. Na rozdíl od ABS má malou tepelnou roztažnost, tudíž se počas tisku nekrotí a neodlepje od podložky a můžeme ho tedy využít i pro tisk větších modelů. Dobře se spojují jednotlivé vrstvy, takže výtisky jsou vodotěsné. Často dochází při tisku k tzv. stringování (viz Obrázek), je to jev kdy tryska po přejezdu hrany má tendenci vytahovat tenounká vlákna. Můžeme tomu předejít zvýšením retrakce. Retrakce je speciální typ pohybu extruderu, kdy před pohybem mezi tiskovými plochami extruder částečně vytáhne filament z trysky a po návratu na další tiskovou plochu extruder opět zasune filament do trysky. Tímto „vytáhnutím“ se sníží tlak v trysce a z trysky se přestane vytlačovat roztavený filament [14]. Také je nutné při tisku použít větráček a materiál při tisku chladit, pro zachování detailů. Jestliže se přece nevyhneme stringování, můžeme hotový výrobek přejet rychle horkovzdušnou pistolí. PETG můžeme brousit za mokra i za sucha. Je recyklovatelný, ale není biologicky odbouratelný [15].



Obrázek 5: Stringování PETG

TEPLOTA TRYSKY	TEPLOTA PODLOŽKY	RYCHLOST TISKU
260 ± 5 °C	110 ± 5 °C	až 200 mm/s

Tabulka 10

## MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Vlastnost/směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Y	Vertikální osa Z	Metoda
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1,5 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,4 ± 0,1	ISO 527 - 1
Napětí na mezi kluzu [MPa]	47 ± 2	50 ± 1	30 ± 5	ISO 527 - 1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	5,1 ± 0,1	5,1 ± 0,1	2,5 ± 0,5	ISO 527 - 1
Rázová houževnatost Charpy (3) [kJ/m <sup>2</sup> ]	Bez přerušení	Bez přerušení	5 ± 1	ISO 179 - 1

Tabulka 11: Souhrn mechanických vlastností [16].

Hodnoty v tabulce se vztahují k vytištěnému vzorku na Obrázku 4

## SHRNUTÍ

KLADY	ZÁPORY
Vysoká tepelná odolnost	Není vhodné pro tisk malých částí
Malá tepelná roztažnost	Možnost stringování
Houževnatost	Slabé přemostování
Dobré propojování vrstev	Obtížnější odstraňování podpor
Neabsorbuje vodu	Náchylnější k poškrábání (v porovnání s PLA)

Tabulka 12

### 2.3 Klady a zápory 3D tisku

3D tisk je jedním z nejefektivnějších výrobních postupů, co se týče spotřeby materiálu a možnosti tisku velice komplikovaných struktur. Při výrobě s použitím 3D tiskáren není potřeba velkého technického zázemí různých vstřikovacích forem a dalších strojů, protože u výtisku většinou jen lehce vyhladíme povrch a odstraníme podpěry a to velice snižuje počáteční náklady na výrobu [17]. Je proto ideální pro domácí kutily, kteří s jeho pomocí mohou modelovat a tisknout předměty přesně na míru v menším množství. Tím se dostávám k největší nevýhodě 3D tisku. Ten je totiž při masové výrobě nejenže pomalejší, ale začíná se s narůstajícím množstvím výrobků také nesnesitelně prodražovat. Proto se hlavně využívá k vytváření prototypů před zahájením sériové výroby, nikoliv k produkci samotné. Velkou nevýhodou 3D tisku je omezená tolerance a přesnost výsledného výrobku. Ta je dána především konstrukcí 3D tiskárny, technologií tisku, kalibrací tiskárny a dalšími nezanedbatelnými vlivy.

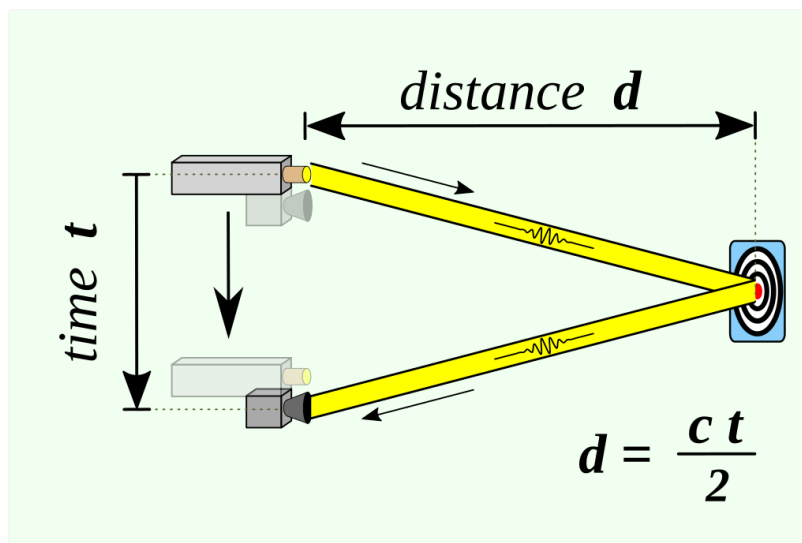
Celkově si myslím, že pro tisk vrtulí, které si bude každý tisknout podle vlastní potřeby je tato metoda ideální. Při létání s dronem se vrtule často ničí a možnost tisknout si svoje vlastní může v porovnání s kupovanou variantou ušetřit značné finanční prostředky.

## 2.4 3D skenery

3D skener je přístroj, který snímá trojrozměrné objekty a převádí je do počítačového modelu. Výstupem ze skenování je tzv. mrak bodů, který obsahuje informace o vzdálenosti a úhlech jednotlivých bodů. „Často jde o velký soubor obsahující řádově i miliony bodů umístěných v prostoru. Z mračka bodů je poté možné vytvořit za pomoci speciálních algoritmů tzv. polygonální síť tj. síť tvořenou mnoha polygony (mnohoúhelníky) s uzlovými body odpovídajícími bodům získaných skenerem. V optimálním případě jsou polygony definovány jako trojúhelníky. Tato síť s odpovídající přesností kopíruje skutečný povrch tělesa a je základním stavebním kamenem při následném zpracování dat.“ [34]

### 2.4.1 Měření doby letu světla (*Time of Light*)

Měření doby letu světla je metoda skenování, při které se využívá princip TOF ke změření přesné vzdálenosti jednotlivých bodů od kamery a zaznamenání dat do modelu v počítači. TOF je princip, při kterém se měří čas, který potřebuje částice nebo vlna, k dosažení objektu a odrazení se zpátky do kamery (viz obrátek níže). Jako zdroj může sloužit laser nebo speciální LED dioda. TOF patří do rodiny bezdotykových skenerů LIDAR (Light Detection And Ranging), které se používají od roku 2000 pro civilní účely. TOF skener je schopen snímat objekty v rozsahu od několika centimetrů až po několik kilometrů. Jejich rozlišení je podstatně nižší než u běžných 2D kamer [18].

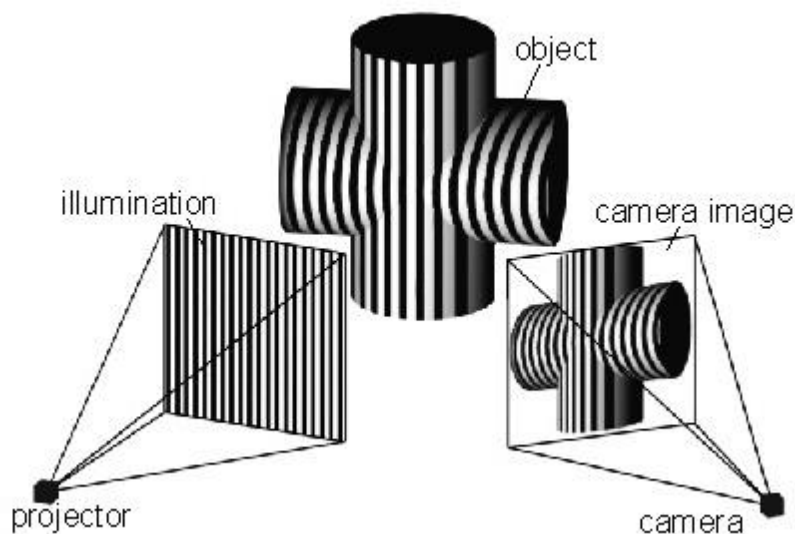


Obrázek 6: Princip fungování TOF skeneru, převzato z [32].

Mezi hlavní výhody patří rychlost (provede až 160 snímků za sekundu), kompaktnost a nižší požadavky na výpočetní výkon v porovnání se stereovizí nebo s jinými laserovými metodami. S jejich pomocí lze celou snímanou oblast zaznamenat už v jediném snímku a jejich velká rychlost se dá uplatnit pro práci v reálném čase. Jako nevýhodu lze uvést problém se stíny a odlesky světla od snímané plochy.

## 2.4.2 Strukturované světlo (*Structured light*)

Promítání úzkých pásů světla na trojrozměrně tvarovaný povrch vytváří linie osvětlení, které jsou zkreslené z jiného úhlu, než se nachází projektor a mohou být použity pro přesnou geometrickou rekonstrukci tvaru povrchu [19]. K projekci lze využít mnoho vzorů a obrazců, avšak nejpoužívanější jsou rovnoběžné pruhy, z jejichž deformace se dá nejsnáze vytvořit model. Výsledné rozlišení lze zvýšit změnou šířky pruhů, ale je zároveň limitováno rozlišením kamery. Problémem při snímání, jako u mnoha jiných optických metod, je lesklost povrchu a následné odlesky.



Obrázek 7: Princip technologie strukturovaného světla, převzato z [33]

## 2.4.3 Fotogrammetrie (*Photogrammetry*)

Fotogrammetrie se zabývá rekonstrukcí tvarů, velikosti a vzájemné polohy objektů na základě jednoho či více snímků. Fotogrammetrie je mimo vytváření 3D modelů důležitou součástí dálkového průzkumu Země nebo tvorby topografických map [20].

Na trhu je několik fotogrammetrických softwarů jako např. Autodesk Recap<sup>1</sup> nebo Agisoft Photoscan<sup>2</sup>, oba jsou to však profesionální nástroje s vysokou cenovkou. 3DF Zephyr je jedním z freeware fotogrammetrických programů, který umožňuje 3D rekonstrukci jak z fotografií, tak z videa automatickým extrahováním snímků a výběrem těch, které jsou nejvhodnější pro výpočet [21].

---

<sup>1</sup> <https://www.autodesk.com/products/recap/overview>

<sup>2</sup> <https://www.agisoft.com/>



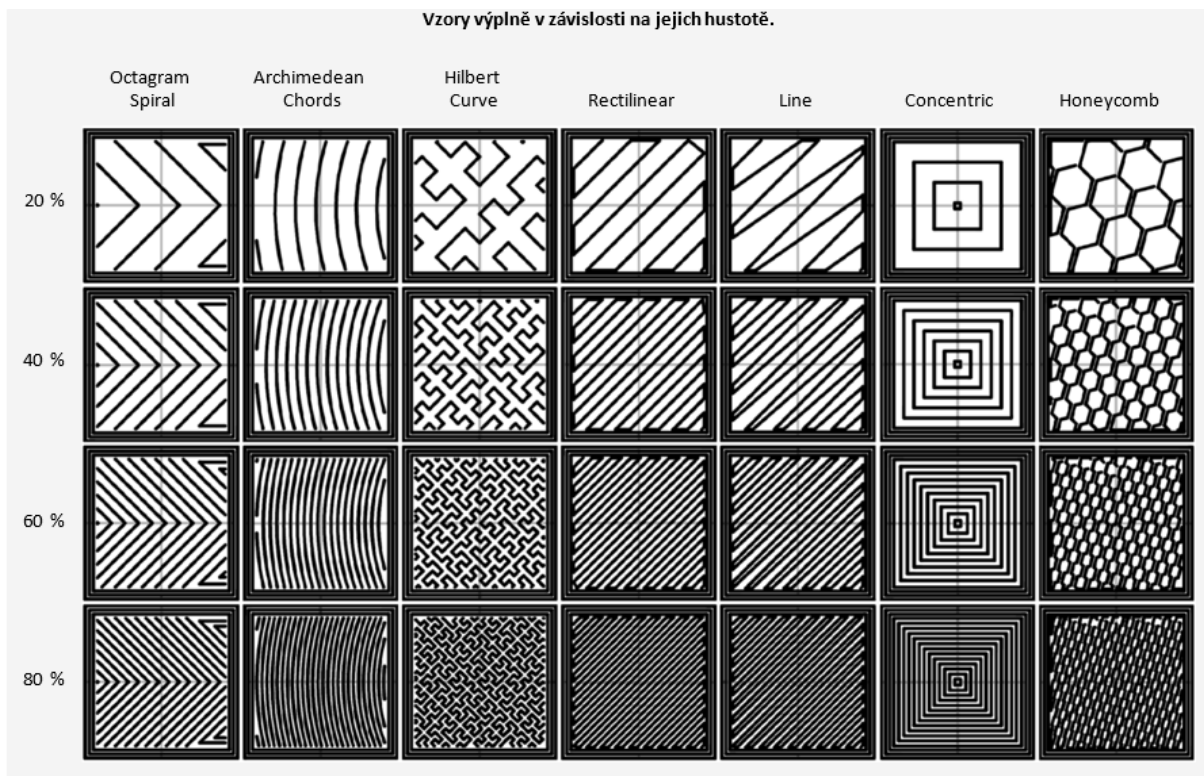
## 2.5 Nastavení parametrů pro 3D tisk

Před exportem modelu do g-code ve sliceru je zapotřebí nastavit parametry. Nepatrná změna zásadně ovlivní výsledek, proto se obvykle jeden model tiskne několikrát s různými nastaveními, které mnohdy spoléhají na princip pokusů a omylů. Většinou jsou však uvedeny přímo na modelu, nebo v diskuzi pod ním. V tabulce níže [22] [23] [24] shrnu ty nejpodstatnější spolu s tím, jaký mají vliv na výsledný model.

<b>Výběr materiálu</b>	Každý materiál je určen pro jiné aplikace. Vhodnost jednotlivých materiálů je shrnuta v práci výše.
<b>Rychlost</b>	Rychlý tisk je vhodný především k tisku návrhu, naopak pomalý tisk dosahuje vysoké úrovně detailu, ale za cenu výrazného navýšení času tisku.
<b>Kvalita tisku</b>	Tím určíme, jak silná bude každá vrstva. Nižší číslo znamená více vrstev a vyšší kvalitu tisku, ale za cenu pomalejšího tisku. Běžná výška vrstvy: 0,15 až 0,2 mm. Kompromisem je zmenšit výšku vrstvy pouze v oblastech s náročnějšími detaily.
<b>Orientace modelu</b>	Pro každé těleso je individuální. Správnou orientací můžeme dosáhnout vyšší pevnosti, potřeby méně podpěr a tím urychlení tisku.
<b>Podpěry</b>	Přidáme pouze v případě tisku s výraznými převisy a přesahy.  Bez této funkce bychom tiskli „do vzduchu“.  Zapneme automatické generování podpor ve sliceru.
<b>Tloušťka stěn</b>	Stěny musí být dostatečně silné, aby se nezhroutili.  Pro mechanicky vytížené modely můžeme zvětšit jejich tloušťku ve sliceru.
<b>Vrchní a spodní plné vrstvy</b>	Kolik plných vrstev model začíná a ukončuje. Zvětšením počtu se model zpevní za cenu většího množství použitého materiálu. První vrstvu

	je lepší dát trochu silnější kvůli lepší stabilitě.
<b>Hustota výplně (infill)</b>	Ovlivňuje dobu tisku, pevnost výtisku a spotřebu materiálu.  V procentech (0% dutý model, 100% plný).  Běžný infill: 10-20%  Mnoho vzorů (viz Obrázek 8)
<b>Raft</b>	Speciální typ podpěry.  Pod celým objektem vytváří „podstavec“, aby se objekt nedotýkal podložky.  Používá se zejména u ABS.
<b>Použití ventilátoru</b>	Chladí model během tisku s vyšší rychlostí, kdy předchozí vrstva nestačí ztuhnout.
<b>Teplota podložky</b>	Zabraňuje kroucení a odlepování objektů od podložky.  U každého materiálu individuální.
<b>Šířka extruze (mm)</b>	Lze přizpůsobit výměnou trysky na konci extruderu.  Běžný průměr trysky: 0,4 mm  Rozsah velikostí: 0,25- 0,6 mm
<b>Retrakce a její rychlost</b>	Extruder částečně vytáhne filament z trysky a po návratu na další tiskovou plochu extruder opět zasune filament do trysky. Tímto „vytáhnutím“ se zamezí stringování.
<b>Odstup první vrstvy raftu (mm)</b>	Jak lehko bude objekt přichycen k podložce.

Tabulka 13: Nastavení 3D tiskárny a jejich vliv



Obrázek 8: Výplně v závislosti na hustotě, převzato z [24].

### 3 LETECKÁ VRTULE

#### 3.1 Princip fungování vrtule a vztlak

List vrtule si můžeme představit jako silně zkroucené křídlo, které vykonává rotační pohyb a současně pohyb dopředný s celým strojem. Výsledkem je potom šroubovitý pohyb kteréhokoliv řezu vrtulového listu [25].

Proudící vzduch přitéká jednak proti dopřednému pohybu letadla rychlostí letu  $V$  a také proti smyslu pohybu řezu listu rychlostí  $U$ . Rychlost přitékajícího vzduchu určíme ze vztahu:

$$U = \omega r = 2\pi r \frac{n}{60}$$

$\omega$ ... úhlová rychlost otáčení vrtule

$n$ ... otáčky vrtule za minutu.

$r$ ... poloměr vrtule

Rychlost  $U$  leží v rovině otáčení vrtule, které se obvykle říká rovina vrtulového disku. Výsledná rychlost přitékajícího vzduchu v daném řezu vrtulového listu je pak vektorovým součtem rychlostí  $V$  a  $U$ .

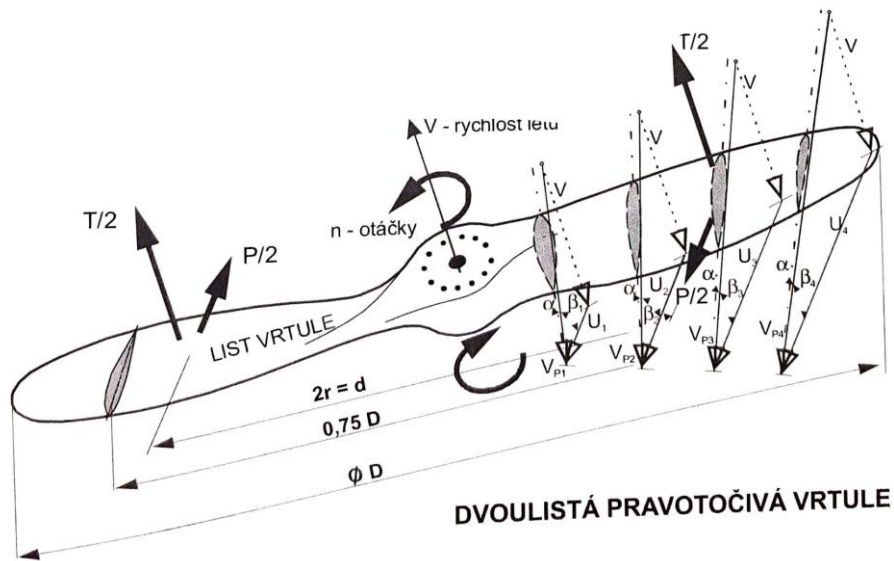
Ve sledovaném řezu vrtule vznikne při popsaném obtékání výsledná aerodynamická síla, která se rozkládá stejně jako u profilu na vztlak  $Y$  a odpor  $X$ , které můžeme dále rozložit na tah řezu  $T$  a odpor  $P$ . Odpor proti otáčení je krouticí moment  $M$ , který je dán vztahem:

$$M = P \cdot r$$

Výsledný krouticí moment vrtule  $M$  je pak dán opět aritmetickým součtem všech krouticích momentů jednotlivých elementů vrtule.

### 3.2 Zkroucení vrtulového listu

Každá část listu se pohybuje stejnou úhlovou rychlostí, ale díky rozdílné vzdálenosti od osy otáčení poloměru jinou obvodovou rychlostí [26]. To znamená, že se rychlost proudění vzduchu  $U$  zvětšuje od středu, zatímco rychlost  $V$  je všude stejná. To se kompenzuje zmenšením úhlu náběhu  $\varphi$ , aby se zachoval úhel náběhu  $\alpha$  [25].



Obrázek 9: Zkroucení dvoulisté vrtule, převzato z [25].

## 4 REALIZACE 3D TISKU A EXPERIMENTY

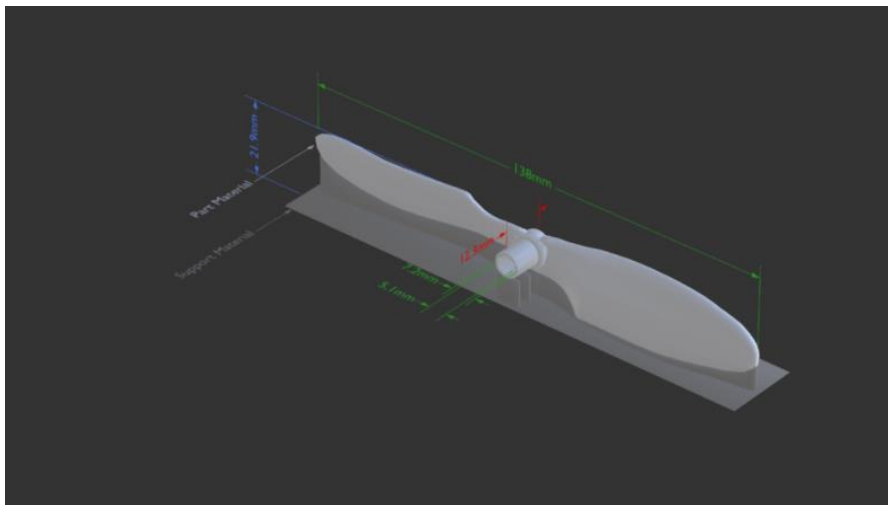
V této části se zaměřím na to, jakým způsobem jsem postupoval při řešení tisku a jak jsem zkoumal jeho výsledky. Pokoušel jsem se vytvořit modely již prodávaných vrtulí pomocí 3D skenování a poté jsem i hledal hotové modely na internetu. Až jsem měl model vhodný k tisku, nastavil jsem tiskárnu a zahájil tisk. Nakonec jsem tištěné a průmyslově vstříkované vrtule porovnal na základě tří připravených pokusů.

### 4.1 Dostupnost modelů na internetu

3D tiskárny opustily průmyslové areály a jsou dnes již běžnou součástí dílen zapálených kutilů a inovátorů. S rostoucím počtem uživatelů je dnes na internetu množství internetových stránek a online tržišť, kde lidé sdílejí své 3D modely a dělí se o zkušenosti. Níže uvedu seznam těch nejpopulárnějších stránek, kde jsem hledal modely pro svou práci [27]. Zjistil jsem, že je jich dostatečné množství s vyhovující kvalitou.

#### **Thingiverse.com**

Vedle samostatných modelů a jejich kolekcí nabízí Thingiverse.com také stovky bezplatných lekcí pro všechny úrovně škol. Nacházejí se zde asi dva miliony volně dostupných 3D modelů.



Obrázek 10: Příklad vrtule dostupné na stránce Thingiverse.com

#### **Grabcad.com**

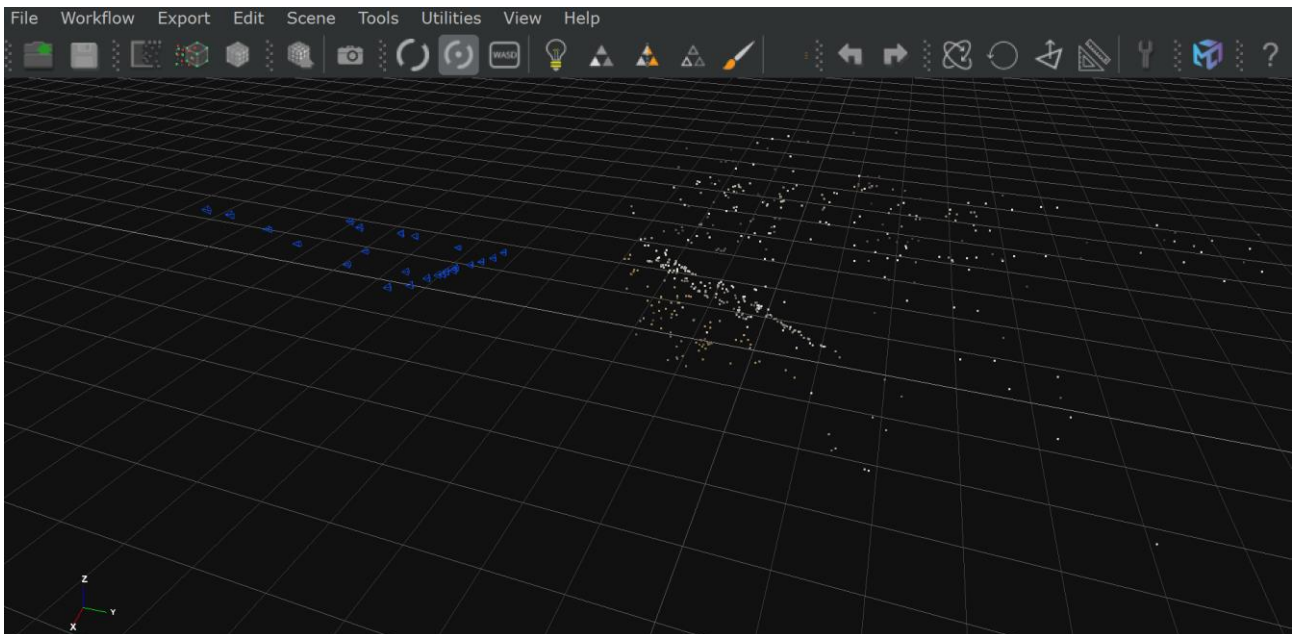
S takřka 7 miliony registrovanými členy je pravděpodobně největší on-line komunitou s tímto zaměřením. Nabízí propojení mezi jednotlivými konstruktéry a kolem 10 tisíc objektů v různých CAD formátech.

#### **3Dwarehouse.sketchup.com**

Naleznete zde nejen tisíce různých modely z oblasti strojů a jejich částí, ale také z oblasti architektury, nábytkářství a infrastruktury. Tato stránka doprovází velice populární freeware program Google SketchUp, který lze použít k přípravě modelu na tisk.

## 4.2 Skenování vrtule

Sken vrtule jsem prováděl za pomoci ručního skeneru 3D Sense a pomoci fotogrammetrie. Obě metody mají problém s lesklými objekty a ostrými stíny. Na vrtuli jsem nanesl texturu za pomoci spreje a umístil jsem ji na čtverečkovanou podložku. Přesto se mi nepodařilo dosáhnout uspokojivých výsledků, zejména kvůli velice tenké hraně a malému zakřivení. 3DF Zephyr nedokázal identifikovat vrtuli a poskytl pouze změť bodů (viz Obrázek 11). Největší zmatení programu pocházelo z nedostatečné hloubky fotografií, na kterých nebylo dobře patrné zakřivení. Na obrázcích 12, 13 a 14 (které byly součástí sady 30 fotografií, ze kterých se tvořil model v programu) je vidět, jak rychle se mění silueta vrtule. To působilo zmatení, které program nedokázal zpracovat a uvědomit si, že jde o jeden a ten samý objekt. Výsledek z 3D Sense skeneru byl totožný - taktéž nedokázal vrtuli vůbec rozpoznat.



Obrázek 11: Screenshot z programu 3DF Zephyr.



Obrázek 12: Fotografie ze sady.



Obrázek 13: Fotografie ze sady.



Obrázek 14: Fotografie ze sady



### 4.3 Příprava tisku

Pro samotný tisk jsem vybral metodu FFF, protože je nejrozšířenější a zároveň nejlevnější. Zároveň je již na trhu mnoho dostupných a kvalitních tiskových strun, které jsou ze stejného materiálu, jako vrtule kupované v obchodech. Níže uvedu postup, jakým jsem tisk připravil.

#### 1. krok

Po dokončení modelu v CAD programu (např. AutoCAD, SketchUp, Fusion 360) ho musíme exportovat v jednom z běžně používaných formátů, nejčastěji **.obj** nebo **.stl**.

#### 2. krok

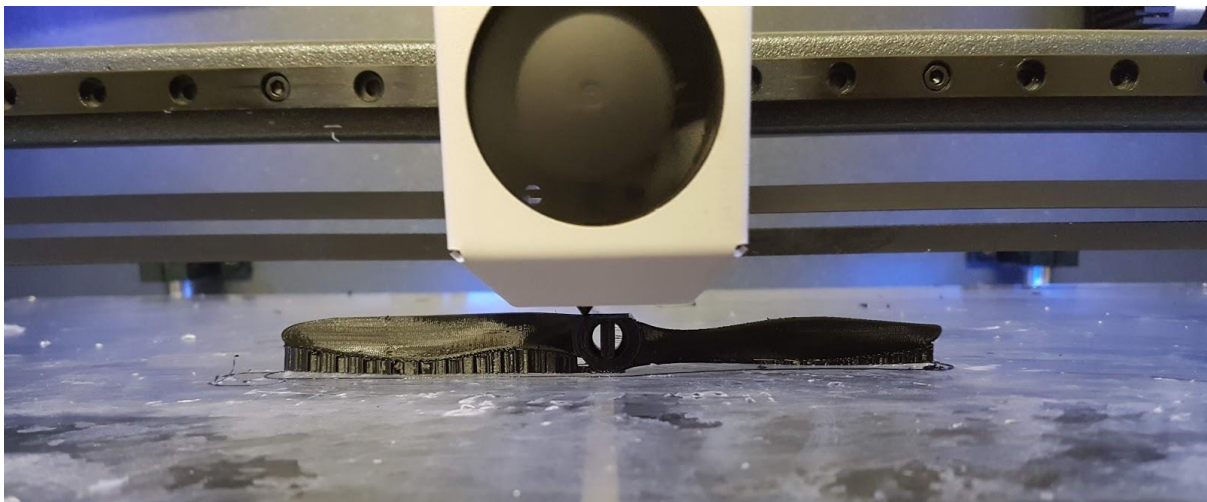
Za pomoci **sliceru** (např. Simplify3D, PusaSlicer, Slic3r) převedeme model na **g-code**. G-code je sada instrukcí, které udávají tiskárně přesnou polohu hlavičky, teplotu extruderu a množství protlačovaného materiálu. Ve **sliceru** nastavíme nejdůležitější parametry jako teplotu trysky a podložky, rychlost tisku, z kolika procent chceme model vyplnit (*infill*) a přidáme podpory nezbytné pro tisk, protože u komplikovanějších modelů nemůžeme začít tisknout do vzduchu. Pro co nejlepší výsledek musíme do programu vložit parametry naší tiskárny (šířka trysky, kalibrace, model) a použitý materiál. Některé materiály vyžadují nastavení **retrakce**, kvůli setrvačnosti protlačované hmoty a jako prevenci stringování.

#### 3. krok

Nahrajeme **g-code** na paměťové médium (SD karta, USB disk), vložíme do tiskárny a zahájíme tisk.

#### 4. krok

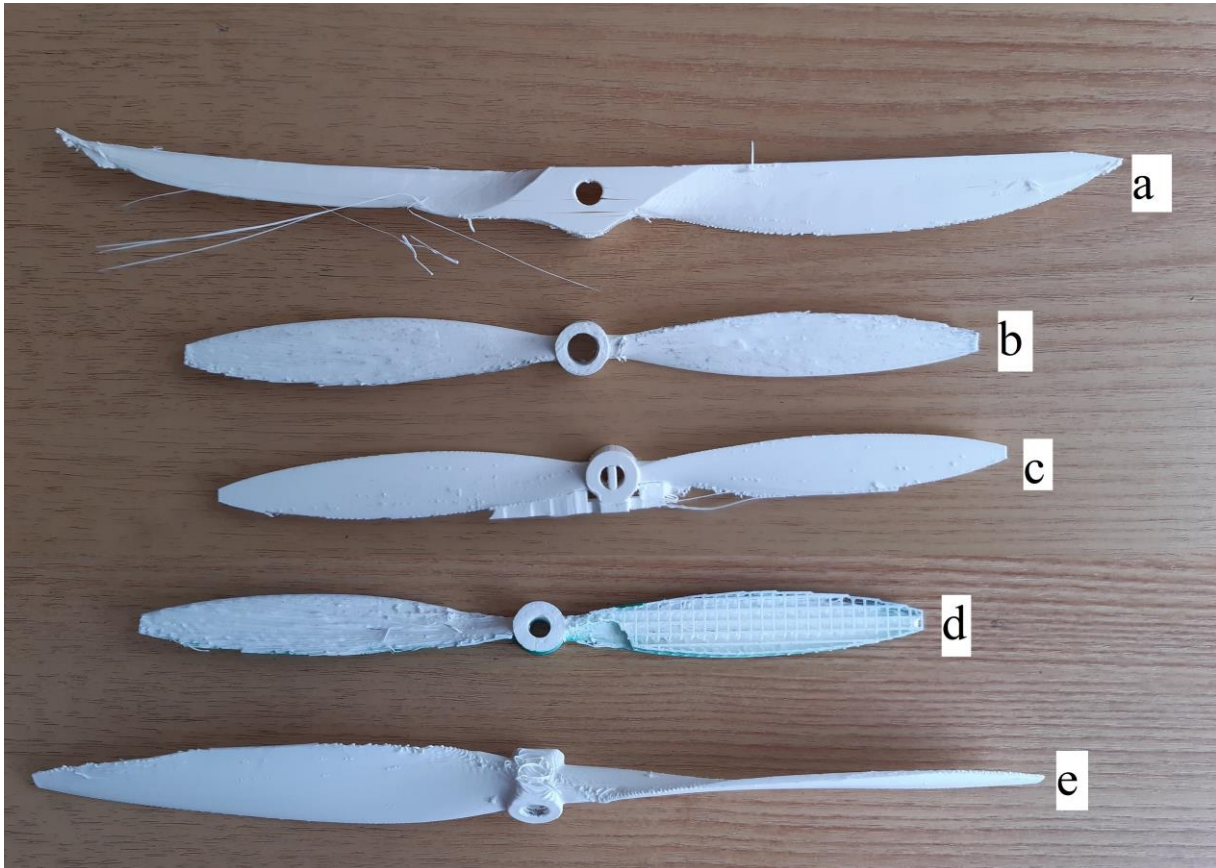
Po vychladnutí odlámeme podpěry a zahladíme ostré hrany a vady jemným smirkovým papírem.



Obrázek 15: Průběh tisku

#### 4.4 Zhodnocení kvality tisku

- a) Nedostatečné propojení vrstev a následné rozpadávání se po vrstvách.
- b) Materiál na spodní straně nestačil ztuhnout a vytvořili se kapky.
- c) Zubatá hrana na pravé straně, drobné kapičky na povrchu a podpěra, která se snadno odlomí a následně vyhladí smirkovým papírem.
- d) Vrtule tištěná na ležato s podpěrou, kterou nelze odlomit, bez toho aniž by se celá vrtule zlomila.
- e) Nedostatečně propojené první vrstvy, zejména kolem středu.



Obrázek 16: Nepovedené výtisky z PLA



Obrázek 17: Povedené výtisky z PLA

- f) Dobré propojení prvních vrstev, hrana je bez kapek.
- g) Ostré hrany a povrch bez nedokonalostí.
- h) Detail povrchu listu.



Obrázek 18: Zamykací mechanismus

- i) Detail zamykacího mechanismu kupované vrtule. Za provozu se listy pevně uzamknou v letové pozici, při nárazu však mechanismus umožňuje sklopení listů, čímž je chrání proti zlomení. Tento díl je natolik malý a obsahuje kovové osy, že jej nelze vytisknout.

## 4.5 Testování prototypů

### 4.5.1 Testování pružnosti

Na každou leteckou vrtuli je potřeba materiál, který by byl dostatečně tuhý, aby se při vysokých otáčkách nekroutil a dostatečně pružný, aby se za letu neroztříštil o větev, nebo drobné kamínky při přistání. Připravil jsem experiment, kdy jsem vrtuli připevnil k desce a tahem simuloval zátěž při letu. Ze všech materiálů uvedených v teoretické části obstálo pouze PLA, které přesvědčilo hlavně svými dobrými vlastnostmi při tisku, což z něj udělalo jediného kandidáta na testování. Po ukončení testu se kupovaná vrtule navrátila do původního tvaru, na rozdíl od vrtule tištěné z PLA. Naměřené údaje a podrobnější popis naleznete v Laboratorním protokolu č. 1.

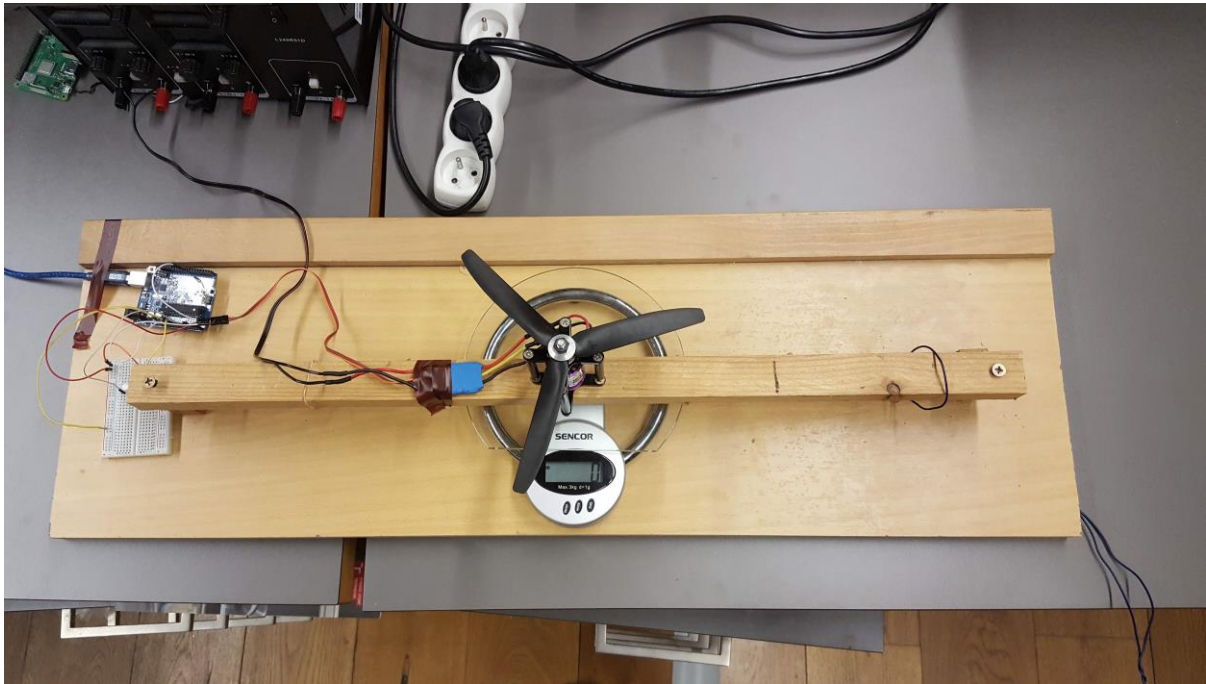


Obrázek 19: Ohnutá vrtule z PLA



## 4.5.2 Testování vztlaku

Pro určení vztlaku jsem využil aparaturu postavenou na FIT VUTBR pro realizaci SOČ, která sestává ze dvou na sobě volně položených dílů. Na horním dílu byl motorek s vrtulí a spodní díl byl tvořen deskou a digitální váhou. Když byla vrtule v provozu, generovala vztlak, který se projevil jako zvýšení hodnoty na váze. (viz Obrázek 20).

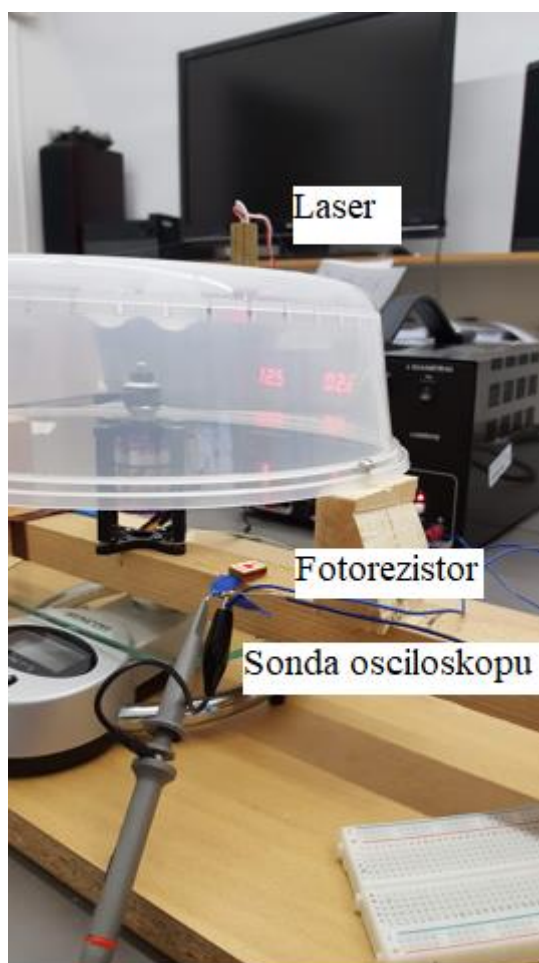


Obrázek 20: Aparatura pro měření vztlaku

Testoval jsem kupovanou třílistou vrtuli, dvoulistou vrtuli z PLA a dvoulistou vrtuli z PLA s příměsí uhlíkových vláken. Všechny měly shodný průměr 23 cm. Z hlediska tahu je nejoptimálnější vrtule tištěná z PLA, díky vysokému náběhu vrtule, daleko vyššímu než u kupované varianty. Nižší tah vrtule z PLA s příměsí uhlíku mohly způsobit nedokonalosti povrchu zapříčiněné náročnějším tiskem než v případě čistého PLA. Podrobnější informace naleznete v Laboratorním protokolu č. 2.

### 4.5.3 Měření otáček za minutu

V tomto experimentu jsem měřil otáčky vrtule pomocí laseru a fotorezistoru, které jsem umístil tak, že při každé otáčce vrtule přeruší laserový paprsek (viz Obrázek 21). Každé přerušení paprsku se projeví jako změna odporu na fotorezistoru. Fotorezistor je zapojený sériově s rezistorem s pevnou hodnotu a tak při změně napětí na fotorezistoru se mění i napětí na v sérii zapojeném rezistoru, které lze zaznamenávat pomocí osciloskopu. Z naměřených period lze přímou úměrou dopočítat počet otáček za minutu. Naměřené hodnoty jsem zanesl do tabulky, kde slouží k přiřazení otáček k jednotlivým výkonnostním stupňům. Podrobnější informace naleznete v Laboratorním protokolu č. 3.



Obrázek 21: Aparatura na měření otáček

## 5 ZÁVĚR

Na začátku práce jsem si vytyčil cíl, který jsem se, v posledním půlroku, snažil plnit. Prozkoumal jsem možnosti, kterými můžeme tisknout včetně filamentů, dostupnost modelů vrtulí na internetu i možnost skenování. Vybral jsem nejvhodnější metodu FFF, kvůli její rozšířenosti a dostupnosti. Jako nejvhodnější filament jsem určil PLA, kvůli nejsnadnějšímu tisku. Ostatní filameny jako například ABS měly tendenci se kroutit nebo u PETG byl velký problém se stringováním a množství kazů na povrchu výtisku.

Pomocí fyzikálních experimentů jsem dokázal, že o vytištěných vrtulích můžeme začít uvažovat jako o alternativě k těm kupovaným. Během tvorby jsem však narazil i na několik problémů. Skenování je prakticky nemožné, takže jsem se musel omezit pouze na modely volně dostupné na internetu a tím se zúžil jejich výběr. Druhým problémem je přesnost s jakou je současná generace tiskáren schopna vytisknout velice tenké a ostré hrany, které by nebyly roztřepené a drsné. Pro tyto důvody se tisk nevyplatí ani majitelům 3D tiskáren, když uvážíme nízké ceny a bohatý výběr vrtulí dostupných na trhu. Kupované vrtule se také mohou pochlubit mechanismy na sklopení listů při nárazu, které nelze tisknout ani svépomocí vyrobit.

Součástí mé práce byly i experimenty, kterými jsem porovnával vlastnosti mezi tištěnými a kupovanými vrtulami. Vzhledem k tomu, že vrtule měly jiný úhel stoupání, nelze přesně vyčíslit rozdíly. To bylo zapříčiněno, absencí 3D modelu ke stažení u vrtulí vyrobených vstříkovaním. Vytištěná vrtule při stejném průměru jako kupovaná dokázala produkovat srovnatelný vztlak. Dále se tištěná vrtule při nejvyšších otáčkách strukturálně nerozpadla a odolala i malým kamínkům. Kvůli nekvalitním hranám může docházet k ovlivnění aerodynamických vlastností, které se mohou projevit vibracemi zachycenými na zpomaleném videu. Proto jsou tištěné vrtule vhodné zejména pro použití u hobby dronu, kde nejsou vysoké nároky na stabilitu.

Nabízí se ale možnost, že v blízké budoucnosti s přesnějšími tiskárnami a širším výběrem 3D modelů přímo od výrobců budou mezi často tištěné předměty patřit i vrtule pro drony.

## PŘÍLOHY

### 5.1 Laboratorní protokol č. 1

**Teorie:** Na každou leteckou vrtuli je potřeba materiál, který by byl dostatečně tuhý, aby se při vysokých otáčkách nekroutil a dostatečně pružný, aby se za letu neroztříštil o větev, nebo drobné kamínky při přistání. Připravil jsem experiment, kdy jsem vrtuli připevnil k desce a tahem simuloval zátěž při letu.

**Pomůcky:** digitální siloměr (max. 50 N), speciálně upravená deska, vrtule s předvrtanou dírou na háček

**Postup:** Připevnil jsem šroubem vrtuli k desce a ujistil se, že je dobře zajištěná. Poté jsem siloměrem měřil sílu potřebnou ke zlomení vrtule.

**Měření a zpracování výsledků:**

materiál	měření č.	max. dosažená síla	zlomení
PLA	1	50 N	ne
	2	50 N	ne
	3	50 N	ne
kupovaná vrtule	1	50 N	ne
	2	50 N	ne
	3	50 N	ne

**Závěr:** Ani jedna z vrtulí se nezlomila, avšak vrtule z PLA vykazovaly značné zkroucení a samy se nevrátily do původního stavu.

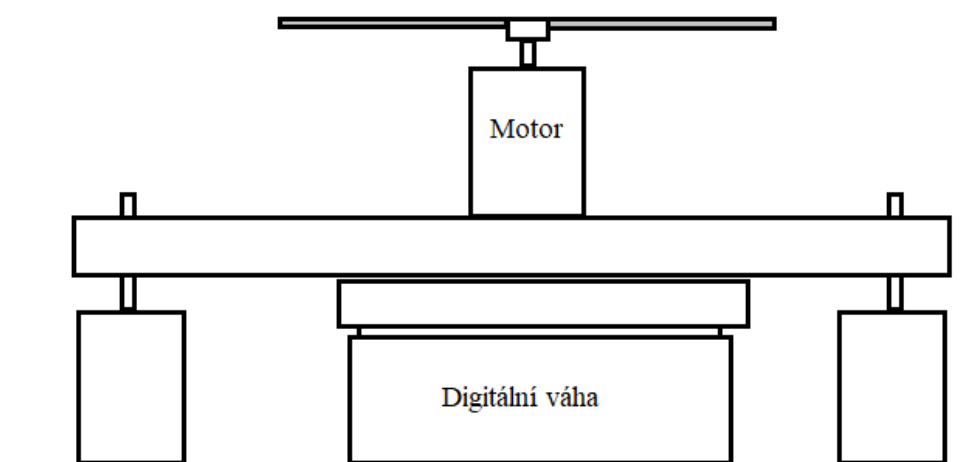


## 5.2 Laboratorní protokol č. 2

**Teorie:** V tomto experimentu jsem měřil a porovnával tah vrtule pomocí sestavené aparatury. Vztlak, který generuje vrtule, se projeví jako snížení hmotnosti vrchní části aparatury, kterou naměřím na váze. Jejím porovnáním lze určit, která z vrtulí produkuje vyšší vztlak.

**Pomůcky:** třífázový motor MIG RC 400/10, Arduino UNO platforma s mikrokontrolérem, nepájivé pole, regulátor, digitální váha, sestavená aparatura pro měření

**Postup:**



Tato aparatura pro měření sestává z vrchní části, která volně leží na dvou kolíčkách se dvěma vruty, které ji jistí, ale nijak nebrání v pohybu, a z části dolní, kde je umístěna váha po odečet hmotnosti. Pomocí Arduina s regulátorem zapojeným v nepájivém poli se dávkuje potřebný výkon motoru.

**Měření a zpracování výsledků:**

výkon	vztlak [g]		
	třílístá vrtule Ø23 cm	Dvoulístá vrtule PLA Ø23 cm	Dvoulístá vrtule PLA+carbon Ø23 cm
15%	38	76	80
20%	80	144	147
25%	111	215	210
30%	150	265	257

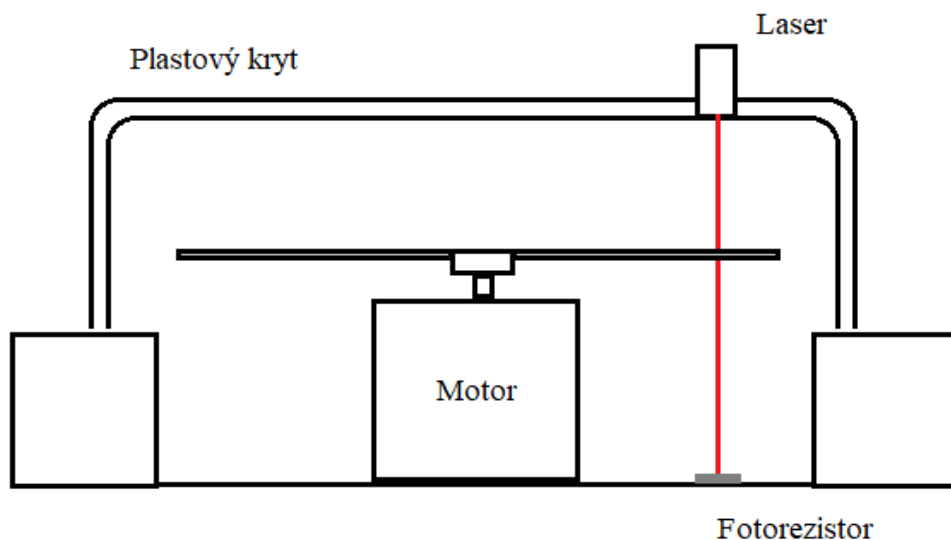
**Závěr:** Z hlediska tahu je neoptimálnější vrtule tištěná z PLA, díky vysokému náběhu vrtule. Nižší tah vrtule z PLA s příměsí carbonu mohly způsobit nedokonalosti povrchu zapříčiněné náročnějším tiskem než v případě čistého PLA.

### 5.3 Laboratorní protokol č. 3

**Teorie:** V tomto experimentu jsem měřil otáčky vrtule pomocí laseru a fotorezistoru, které jsem umístil tak, že při každé otáčce vrtule přeruší laserový paprsek. Každé přerušení paprsku se projeví jako změna odporu na fotorezistoru. Fotorezistor je zapojený sériově s rezistorem s pevnou hodnotou a tak při změně napětí na fotorezistoru se mění i napětí na v sérii zapojeném rezistoru, které lze zaznamenávat pomocí osciloskopu. Z naměřených period lze přímou úměrou dopočítat počet otáček za minutu. Naměřené hodnoty jsem zanesl do tabulky, kde slouží k přiřazení otáček k jednotlivým výkonnostním stupňům.

**Pomůcky:** třífázový motor MIG RC 400/10, Arduino UNO platforma s mikrokontrolérem, nepájivé pole, regulátor, laser, fotorezistor, oscilometr, plastový kryt, program Arduino

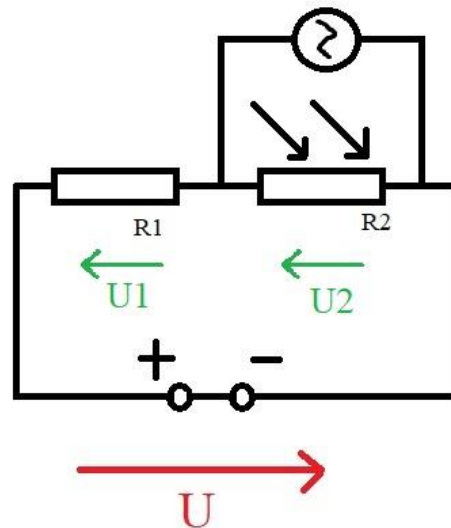
**Postup:**



Pro měření otáček vrtule jsem použil stejnou aparaturu z laboratorního protokolu číslo 2, kterou jsem doplnil o plastový kryt s předvrtanou dírkou na laser. V ose paprsku jsem na vrchní díl přilepil fotorezistor, který snímal paprsek a výsledek jsem odečítal na oscilometru.

### Měření a zpracování výsledků:

třílistá vrtule		
výkon	Perioda [ms]	otáčky [rpm]
15%	5,0	4000
20%	3,5	5714
25%	3,1	6452
30%	2,8	7143



$$U=U_1+U_2$$

$$rpm = \frac{\frac{1000}{T} \times 60}{n}$$

$n$ ...počet listů vrtule

$T$ ...perioda

$rpm$ ...počet otáček za minutu

**Závěr:** Hodnoty jsem měřil pouze po 30% výkonu motoru, kvůli rychlosti s jakou je fotorezistor schopen reagovat a také s ohledem na bezpečnost při práci.

## 6 ZDROJE

### 6.1 Použitá literatura

25. KELLER, Ladislav. Učebnice pilota: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost. Cheb: Svět křídel, 2006. ISBN 80-85280-89-2.

24. STŘÍTESKÝ, Ondřej. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. Praha: Prusa Research, 2019. ISSN 1802-4785

### 6.2 Další zdroje

1. Jak funguje stolní 3D tiskárna: Základní technologie 3D tisku | TonerPartner.cz. Tonery a cartridge za super ceny | TonerPartner.cz [online]. Copyright © 2021 TonerPartner.cz [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.tonerpartner.cz/clanky/jak-funguje-stolni-3d-tiskarna-zakladni-technologie-3d-tisku-24967cz39332/>
2. Typy 3D tiskáren – MakersLab | 3D tiskárny, 3d tisk Praha, firemní školení a workshopy. MakersLab | 3D tiskárny, 3d tisk Praha, firemní školení a workshopy [online]. Copyright © 2016 [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>
3. Příspěvatelé Wikipedie, Vlákno PLA [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 3. 11. 2020, 19:01 UTC, [citováno 16. 01. 2021] <[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=VI%C3%A1kno\\_PLA&oldid=19132189](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=VI%C3%A1kno_PLA&oldid=19132189)>
4. Prusament PLA Azure Blue 1kg - Prusa Research. [online]. Copyright © Prusa Research a.s. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/716-prusament-pla-azure-blue-1kg.html>
5. Prusa Research [online]. Copyright © [cit. 21.09.2020]. Dostupné z: [https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA\\_TechSheet\\_CZE.pdf](https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA_TechSheet_CZE.pdf)
6. Bioplasty - Polylaktid (PLA) - Bioplasty. Bioplasty - Blog o bioplastech [online]. Dostupné z: <http://www.bio-plasty.cz/bioplasty-polylaktid-pla/>
7. ABS | Polymerové typy - Resinex. Resinex - Distribuce plastů a kaučuků [online]. Copyright © 2020 RESINEX Group, Czech Republic [cit. 28.09.2020]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/abs.html>
8. [online]. Dostupné z: [https://shop.prusa3d.com/cs/filamenty/134-oranzova-easyabs-tiskova-struna-filament-1kg.html?search\\_query=ABS+filament&results=78](https://shop.prusa3d.com/cs/filamenty/134-oranzova-easyabs-tiskova-struna-filament-1kg.html?search_query=ABS+filament&results=78)

9. Rozdíl mezi ABS, PLA a PETG. Materiály a doplňky pro 3D tisk - filameny - Materialpro3d.cz [online]. Copyright © Materialpro3d.cz, všechna práva vyhrazena [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
10. Rozdíl mezi ABS, PLA a PETG. Materiály a doplňky pro 3D tisk - filameny - Materialpro3d.cz [online]. Copyright © Materialpro3d.cz, všechna práva vyhrazena [cit. 28.09.2020]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
11. Acrylonitrile styrene acrylate - Wikipedia. [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_styrene\\_acrylate](https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_styrene_acrylate)
12. Prusament ASA | Prusament. Homepage | Prusament [online]. Copyright © Prusa Polymers a.s. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-asa/>
13. Prusament ASA | [online]. Copyright © [cit. 23.02.2021]. Dostupné z: [https://shop.prusa3d.com/fotky/ASA\\_DataSheet\\_CZE.pdf](https://shop.prusa3d.com/fotky/ASA_DataSheet_CZE.pdf)
14. Retrakce - nastavení a kalibrace - 3D tisk návody, rady a tipy. Domů - 3D tisk návody, rady a tipy [online]. Copyright © 2021 Lukáš Pomykal [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://3dtisknavody.cz/zaklady-3d-tisku/kalibrace/nastaveni-a-kalibrace-retrakce/>
15. Prusament PETG | Prusament. Homepage | Prusament [online]. Copyright © Prusa Polymers a.s. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
16. Homepage | Prusament [online]. Copyright © [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: [https://prusament.com/media/2020/05/PETG\\_TechSheet\\_CZ\\_22052020.pdf](https://prusament.com/media/2020/05/PETG_TechSheet_CZ_22052020.pdf)
17. Vysoké učení technické v Brně [online]. Copyright © [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=191231](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=191231)
18. WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Wikipedia [online]. [cit. 31.1.2021]. Dostupný na WWW: [https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight\\_camera#Principle](https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_camera#Principle)
19. Structured-light 3D scanner - Wikipedia. [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Structured-light\\_3D\\_scanner](https://en.wikipedia.org/wiki/Structured-light_3D_scanner)
20. Fotogrammetrie – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotogrammetrie>
21. 3DF Zephyr - Wikipedia. [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/3DF\\_Zephyr](https://en.wikipedia.org/wiki/3DF_Zephyr)
22. Základní a pokročilé parametry tisku | IT služby Masarykovy univerzity. IT služby Masarykovy univerzity [online]. Copyright © 2021 [cit. 06.03.2021]. Dostupné

- z: <https://it.muni.cz/sluzby/3d-tisk/dalsi-informace/zakladni-a-pokrocile-parametry-tisku>
23. Jak nastavit 3D tiskárnu, nastavení tisku | FutLab.cc. FutLab.cc | Umělecká dílna a slévárna [online]. Dostupné z: <https://futlab.cc/nastaveni-3d-tiskarny/>
26. Vrtule – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vrtule>
27. 12 nejlepších webů, kde hledat modely pro 3D tisk, obrábění a vizualizace – Konstrukter.cz. Konstrukter.cz – CAD/CAM, 3D tisk a konstruování výrobků [online]. Copyright © 2019 [cit. 02.02.2021]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/12-nejlepsich-webu-kde-hledat-modely-pro-3d-tisk-obrabeni-a-vizualizace/>
28. 3D tisk – Wikipedie. [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/3D\\_tisk](https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk)
29. FUSED FILAMENT FABRICATION [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fused\\_filament\\_fabrication#History](https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication#History)
30. 3D Printing & Dentistry - Burkhart Dental Supply. Providing Quality Dental Products & Service - Burkhart Dental Supply [online]. Copyright © 2021 Burkhart Dental Supply [cit. 20.03.2021]. Dostupné z: <https://www.burkhartdental.com/3d-printing-dentistry/>
31. Better for Business: FDM 3D Printing over SLS 3D Printing | CADimensions. CADimensions, Inc. | SOLIDWORKS - 3D Printing - Training - Consulting [online]. Copyright © 2021 CADimensions. [cit. 20.03.2021]. Dostupné z: <https://www.cadimensions.com/blog/fdm-3d-printing-vs-sls-3d-printing/>
32. RCRAIG09. Wikipedia [online]. [cit. 31.1.2021]. Dostupný na WWW: [https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of\\_flight\\_camera#/media/File:20200501\\_Time\\_of\\_flight.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of_flight_camera#/media/File:20200501_Time_of_flight.svg)
33. *Bitfab* – Professional online 3D printing service [online]. [cit. 31.1.2021]. Dostupný na WWW: <https://bitfab.io/wp-content/uploads/2020/03/luz-estructurada.png>
34. VYUŽITÍ 3D SKENOVÁNÍ V OBLASTI PŘESNÉHO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ [online]. [cit. 21.3.2021]. Dostupný na WWW: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=128015](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=128015)

### 6.3 Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma SLA tiskárny, převzato z [30].	8
Obrázek 2: Schéma SLS tiskárny, převzato z [31].	9
Obrázek 3: FFF tiskárna: detail extruderu, převzato z [24].	10
Obrázek 4: Vytisknutý vzorek, převzato z [5].	12
Obrázek 5: Stringování PETG.	18
Obrázek 6: Princip fungování TOF skeneru, převzato z [32].	22
Obrázek 7: Princip technologie strukturovaného světla, převzato z [33].	23
Obrázek 8: Výplně v závislosti na hustotě, převzato z [24].	26
Obrázek 9: Zkroucení dvoulisté vrtule, převzato z [25].	28
Obrázek 10: Příklad vrtule dostupné na stránce Thingiverse.com.	29
Obrázek 11: Screenshot z programu 3DF Zephyr.	30
Obrázek 12: Fotografie ze sady.	31
Obrázek 13: Fotografie ze sady.	31
Obrázek 14: Fotografie ze sady.	31
Obrázek 15: Průběh tisku.	32
Obrázek 16: Nepovedené výtisky z PLA.	33
Obrázek 17: Povedené výtisky z PLA.	34
Obrázek 18: Zamykací mechanismus.	34
Obrázek 19: Ohnutá vrtule z PLA.	35
Obrázek 20: Aparatura pro měření vztlaku.	36
Obrázek 21: Aparatura na měření otáček.	37