

# Anténa připravená pomocí 3D tisku

Martin Možíš

---

Bakalářská práce  
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin Možíš**  
Osobní číslo: **T19226**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Anténa připravená pomocí 3D tisku**

## Zásady pro vypracování

1. Vypracujte podrobnou literární rešerši na zadané téma.
2. Zhodnoťte dosavadní stav v oblasti antén připravených pomocí 3D tisku.
3. Na základě vypracované literární rešerše vymodelujte anténu v CAD a připravte model vhodný pro převod do STL formátu.
4. Vyberte vhodný polymer případně u SLA tisku fotopolymer a připravte vzorky pomocí 3D tisku. V případě, že budete tisknout z polymerů bez elektricky vodivých plniv, tak upravte povrch vzorků a to tak, aby byl elektricky vodivý.
5. Vyberte několik vhodných vzorků a charakterizujte je. Proveďte měření dalších vlastností zejména vodivosti.
6. Vyhodnoťte naměřená data, popište provedená měření, všechny výsledky interpretujte pomocí grafů, případně i tabulek a textového popisu.
6. Uvedte možnosti aplikace a reálné možné použití připravených antén.
7. Vzniklé závěry dostatečně popište a diskutujte.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1]. GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second edition. London: Springer, [2015]. ISBN 1493921126.
- [2]. BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. Fourth edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, [2016]. ISBN 978-1-118-64206-1.
- [3]. REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, [2017]. ISBN 978-90-827485-0-5.
- [4]. SADASIVUNI, Kishor Kumar, Kalim DESHMUKH a Mariam Ali S A AL-MADEED. *3d and 4d printing of polymer nanocomposite materials: processes, applications, and challenges*. 1. San Diego: Elsevier, 2019. ISBN 9780128168059.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Matyáš, Ph.D.**  
Centrum polymerních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

L.S.

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

**prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá možností výroby antén pomocí technologie 3D tisku na tiskárně typu FDM (Fused Deposition Modeling). Teoretická část práce se zabývá technologií 3D tisku, její historií, druhy tiskáren a používanými materiály. Součástí je taky popis principu, rozdělení a typů antén. Praktická část se věnuje návrhu modelu antén v 3D CAD softwaru, využitým materiálům, průběhu samotného tisku antén, měření a porovnání zisku vytištěných antén.

Klíčová slova: anténa, 3D tisk, elektricky vodivý filament, ABS, PLA, Electrifi

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the possibility of manufacturing antennas using 3D printing technology on a FDM (Fused Deposition Modeling) printer. The theoretical part deals with the technology of 3D printing, its history, types of printers and materials used. It also includes a description of the principle, sorting and types of antennas. The practical part deals with the design of the antenna model in 3D CAD software, the materials used, the process of printing the antennas, measuring and comparing the gain of the printed antennas.

Keywords: antenna, 3D printing, electrically conductive filament, ABS, PLA, Electrifi

Rád bych poděkoval Ing. Jiřímu Matyášovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu při konzultacích a vypracování bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studiu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 3D TISK A MATERIÁLY</b> .....	<b>11</b>
1.1 HISTORIE 3D TISKU .....	12
1.2 TYPY 3D TISKÁREN .....	13
1.2.1 Stereolithography (SLA).....	14
1.2.2 Selective Laser Sintering (SLS).....	15
1.2.3 Fused Deposition Modeling (FDM).....	16
1.2.4 Digital Light Processing (DLP) .....	18
1.2.5 Multi Jet Fusion (MJF).....	18
1.2.6 PolyJet.....	18
1.2.7 Electron Beam Melting (EBM).....	18
1.3 MATERIÁLY .....	19
1.3.1 Obecně o materiálech pro 3D tisk.....	19
1.3.2 PLA .....	20
1.3.3 PETG.....	20
1.3.4 ASA/ABS.....	21
1.3.5 FLEX.....	22
1.3.6 CPE .....	22
1.3.7 Nylon.....	23
1.3.8 Kompozitní materiály.....	23
<b>2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY ANTÉN</b> .....	<b>25</b>
2.1 DEFINICE ANTÉNY .....	25
2.2 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ .....	25
2.3 TYPY ANTÉN.....	26
2.3.1 Elementární dipól.....	26
2.3.2 Skládání dipól.....	26
2.3.3 Unipól.....	26
2.3.4 Anténa Yagi .....	26
2.4 FRAKTÁLNÍ ANTÉNA.....	27
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>29</b>
<b>3 VYHOTOVENÍ ANTÉN POMOCÍ 3D TISKÁRNY A JEJICH MĚŘENÍ</b> .....	<b>30</b>
3.1 POUŽITÉ VYBAVENÍ.....	30
3.2 POUŽITÉ MATERIÁLY .....	32
3.2.1 ABS (Lankeda).....	32
3.2.2 Conductive PLA, Protopasta.....	35
3.2.3 Electrifi, Multi3D .....	38
3.3 NÁVRH A TISK ANTÉN.....	43
3.4 ANTÉNA Č. 1, UNIPÓL 20 MM .....	46

3.4.1	Rozměry antény .....	46
3.4.2	Conductive ABS, Lankeda.....	47
3.4.3	Conductive PLA, Protopasta.....	47
3.4.4	Electrifi, Multi3D.....	48
3.5	ANTÉNA Č.2 UNIPÓL 40 MM .....	48
3.5.1	Rozměry antény .....	48
3.5.2	Conductive ABS, Lankeda.....	49
3.5.3	Conductive PLA, Protopasta.....	49
3.5.4	Electrifi.....	50
3.6	ANTÉNA Č. 3, FRAKTÁL SIERPIŇSKÉHO KŘIVKA - 3 ITERACE .....	50
3.6.1	Rozměry antény .....	50
3.6.2	Conductive ABS, Lankeda.....	51
3.6.3	Conductive PLA, Protopasta.....	51
3.6.4	Electrifi.....	52
3.7	ANTÉNA Č. 4, FRAKTÁL SIERPIŇSKÉHO KŘIVKA – 4 ITERACE.....	52
3.7.1	Rozměry antény .....	52
3.7.2	Conductive ABS, Lankeda.....	53
3.7.3	Conductive PLA, Protopasta.....	53
3.7.4	Electrifi.....	54
3.8	ANTÉNA Č. 5.....	54
3.8.1	Rozměry antény .....	55
3.8.2	Conductive ABS, Lankeda.....	55
3.8.3	Conductive PLA, Protopasta.....	56
3.9	ANTÉNA Č. 6.....	56
3.9.1	Rozměry antény .....	57
3.9.2	Conductive ABS, Lankeda.....	57
3.9.3	Conductive PLA, Protopasta.....	58
3.10	POSTUP MĚŘENÍ.....	58
3.11	VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	59
3.11.1	Anténa č. 1, Unipól 20 mm .....	60
3.11.2	Anténa č. 2, Unipól 40 mm .....	62
3.11.3	Anténa č. 3, Sierpiňského křivka – 3 iterace.....	64
3.11.4	Anténa č. 4, Sierpiňského křivka – 4 iterace.....	66
3.11.5	Anténa č. 5, „Korál“ .....	68
3.11.6	Anténa č. 6, „Papaya“ .....	69
3.12	DISKUZE.....	70
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>72</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>73</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>82</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>84</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>87</b>



## ÚVOD

S anténami se v dnešní době setkáváme každý den, a to v různých velikostech, tvarech, provedeních a využívaných frekvencích, ať už se jedná o antény v telefonech, tabletech, počítačích, rádiích a dalších komunikačních zařízeních, u kterých je potřeba bezdrátového přenosu informací. Takto se využívá několik typů antén, například elementární dipól, skládaný dipól, unipól a Yagiho anténa. Využití našli i antény založené na fraktální geometrii, jež umožňují oproti standartním anténám, které jsou navrženy pouze na určité frekvence, přijímat nebo vysílat na vícero frekvencích. S nimi se můžeme potkat v již zmíněných telefonech, kde například Bluetooth a WiFi využívají jiných frekvenčních pásem, proto je využito fraktální antény, která dokáže pokrýt obě frekvenční pásma, tudíž je odstraněna potřeba dvou antén v jednom zařízení. Snaha o pokrok a neustálé vylepšování se týká i bezdrátového přenosu informací, tím pádem i antén, u nichž se zaměřuje zejména na jejich miniaturizaci, zvýšení výkonu a snížení nákladů.

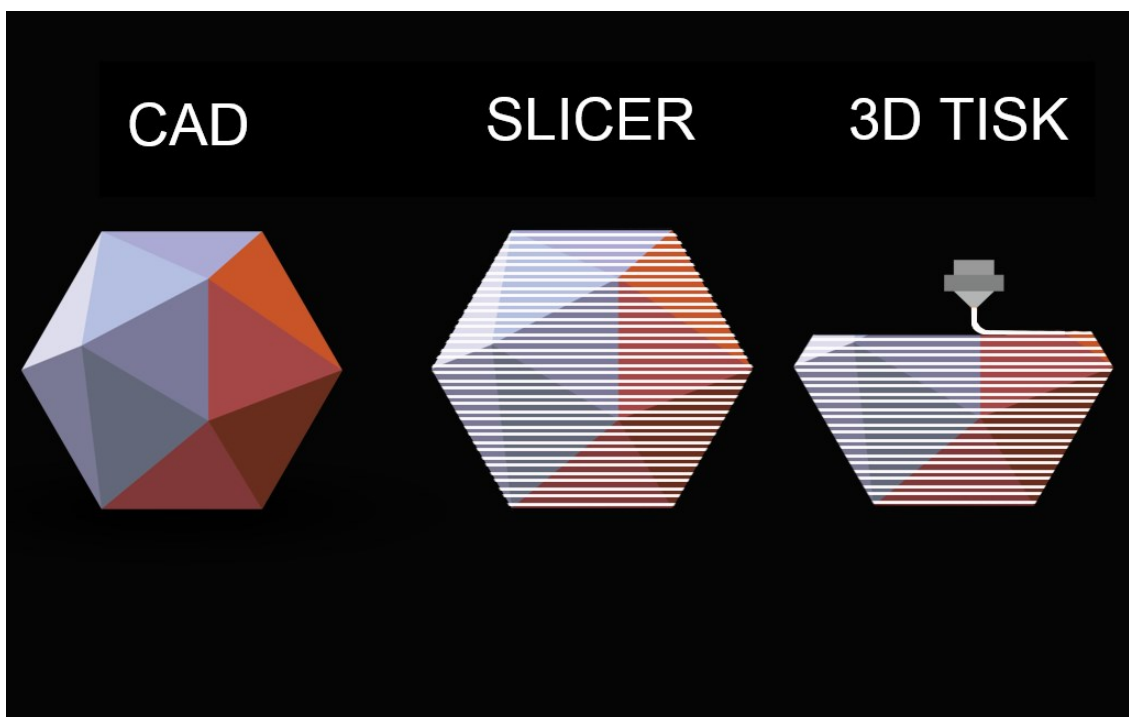
Vzhledem k značným pokrokům v technologiích 3D tisku a vývoji kompozitních polymerních materiálů, které s vhodným plnivem umožňují vést elektrický proud, jsou tyto technologie jedním ze směrů, kterým se může pokrok ubírat. 3D tiskárny, zažívají velký růst popularity nejen ve zdravotnictví, automobilovém či zbrojním průmyslu, ale i v domácnostech, čemuž napomohla hlavně cenová dostupnost FDM tiskáren. Nespornou výhodou 3D tisku je možnost tvorby tvarů, kterých konvenčními výrobními procesy lze dosáhnout poměrně složitě, což umožňuje velmi jednoduchou výrobu zmíněných fraktálních antén.

I přes neustálý pokrok, je výroba antén pomocí 3D tisku však stále ve svých počátcích. Hlavním cílem této práce je tedy ověření vyrobitelnosti antén a obtížnosti tisku pomocí vodivých filamentů na FDM tiskárně.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 3D TISK A MATERIÁLY

Během 3D tisku dochází k pokládání vrstev materiálu, čímž vzniká požadovaný objekt. Jedná se o aditivní proces, což znamená, že za účelem vytvoření výrobku se přidává materiál. Opakem je subtrakce, kdy dochází k odebírání materiálu z polotovaru pro dosažení požadovaných rozměrů. Subtraktivní proces se neobejde bez vzniku nevyužitého materiálu (např. piliny při opracování dřeva, tříska při obrábění). Tento problém není u aditivního procesu tak výrazný, jedná se například o podpory u technologie FDM (fused deposition modeling), které jsou tvořeny kvůli podepření klenutých částí tisknutého objektu. Jednoduchou analogií 3D tisku je například pokládání cihel za účelem postavení zdi. [1,2,3]



Obrázek 1 Průběh tisku [83]

Prvním krokem při vytváření objektu pomocí 3D tisku je návrh digitálního modelu objektu v CAD programu, například AutoCAD Inventor, Solid Edge a mnoho dalších. Následně je vytvořený model exportován z CAD softwaru ve formátu STL (Stereolithography/Surface Tessellation Language), což je formát, který obsahuje seznam trojúhelníků, které pokrývají povrch navrhovaného objektu. Tento soubor je poté importován do programu zvaný „slicer“. V tomto softwaru je možno nastavit řadu parametrů (výška vrstvy, teplota vytlačovaného filamentu, typ a množství infillu), ale jeho hlavní funkcí je „nařezání“ modelu na vrstvy, kde jejich výška udává detailnost vytisknutého výrobku. Ze sliceru je do tiskárny exportován soubor ve formátu G-KÓD, což je seznam příkazů, které se vykonávají sekvenčně. Jedná se

například o příkazy typu: zahřátí extruderu na určitou teplotu, příkazy pohybu na specifickou pozici, při kterém dochází k vytlačení určitého množství filamentu. Dále 3D tiskárna vykoná tyto příkazy, tzv. vytiskne požadovaný objekt, který je posléze odstraněn z tiskové podložky. Poté může dojít k post-processingu výtisku, jedná se většinou o povrchové úpravy. [1,2,3]

## 1.1 Historie 3D tisku

S prvním patentem na 3D tiskárnu, která fungovala na principu SLA, přišel v roce 1986 Charles W. Hull, který v roce 1988 založil společnost 3D Systems. Charles Hull není jediný, který v této době pracuje na této problematice, podobné úsilí v tomto oboru lze najít na Massachusettském Institutu Technologie a Texaské Univerzitě. Prvotním účelem technologie 3D tisku byl takzvaný „rapid-prototyping“. Jedná se o výrobu prototypů s použitím 3D tisku, která umožňovala předběžný náhled, testování a úpravu designu. V začátcích 90. let následovala registrace velkého množství patentů pracujících na principu SLA.



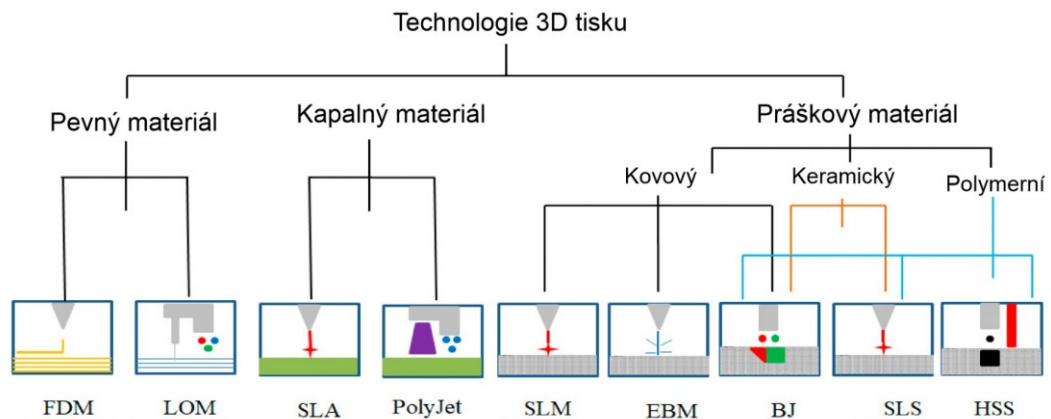
Obrázek 2 První patentovaná 3D tiskárna fungující na principu SLA [84]

Během této doby Steven Scott Crump a Lisa Crump patentují tiskárnu na principu Fused Deposition Modeling (FDM), kdy je taven plastický filament, který je následně pokládán na tiskovou podložku. V roce 2005 tento patent vypršel a díky tomu mohl vzniknout RepRap. Adrian Bowyer přišel s nápadem, že by FDM tiskárna mohla tisknout části na stavbu dalších

tiskáren. Návrhy těchto částí publikoval na internet a snažil se navést jiné, aby jeho návrhy vylepšili a poté zpětně tyto vylepšení publikovali. Tento open-source projekt, do kterého mohl kdokoliv přispět, nazval RepRap. První 3D tiskárnu, kterou Bowyer a jeho tým zkonstruovali v roce 2007, nazvali Darwin a jeho vylepšená verze publikovaná v roce nesla název Mendel. Návody, seznamy, výkresy a přímo i STL soubory tisknutelných součástí byli dostupné na internetových stránkách. Součásti, které nešli vytisknout, například ocelové části, trysky, krokové motory a elektrotechnika, bylo možné zakoupit online. Do tohoto open-source projektu se zapojil i Josef Průša, který zjednodušil Bowyerovu tiskárnu Mendel. Poté se více uživatelů začalo zapojovat do RepRap projektu, čímž byli publikovány nové vylepšení a modifikace stávajících tiskáren. Taktéž se začali prodávat stavebnice tiskáren, kdy mezi nejznámější patřil MakerBot Cupcake CNC. Díky vytvoření crowdfundingových platforem, které dovolily lidem přispět jednotlivcům nebo vývojářským týmům na vývoj nových tiskáren, byl urychlen rozvoj nových technologií 3D tisku. Nyní není 3D tisk omezen pouze na plastové materiály, tisknout lze z kovů, betonu, keramiky, a dokonce i jídla. Došlo také ke specializaci tiskáren, od malých domácích tiskáren přes velké průmyslové zařízení k tisku součástí do automobilů a letadel až po tiskárny určené k tisku staveb. [1,3,4]

## 1.2 Typy 3D tiskáren

Existuje mnoho 3D tiskových technologií a ne všechny fungují stejně, liší se například jakým způsobem jednotlivé technologie zhmotňují tisknutý objekt, využitým materiálem či povrchovými vlastnostmi finálního výtisku. Každá z těchto technologií má svoje výhody a nevýhody, a tím pádem je při návrhu tisknutého objektu důležité vzít v potaz tyto vlastnosti, aby byl výtisk vhodný pro zamýšlené použití. Vzhledem k množství technologií, jdou zde uvedeny pouze ty nejpoužívanější.



Obrázek 3 Technologie 3D tisku [85]

### 1.2.1 Stereolithography (SLA)

Stereolitografie je první patentovaná technologie 3D tisku. Byla patentována Charlesem W. Hullem v roce 1986, který i tiskárnu pracující na tomto principu sestrojil a posléze založil i vlastní společnost 3D Systems, která existuje dosud. Jedná se o velmi přesnou metodu tisku, jejíž přesnost se pohybuje v jednotkách  $\mu\text{m}$ . Kvalita a hladkost povrchu, kterou získáme při využití tiskáren pracujících na tomto principu, je jedna z nejlepších, které můžeme pomocí 3D tisku získat, což je hlavně díky malým výškám vrstev, které se pohybují od 15–100  $\mu\text{m}$ , díky tomu je vrstvení výtisku těžko znatelné. Díky těmto přednostem je tato technologie vhodná pro tisk součástí, u kterých je kladen důraz na přesnost rozměrů a kvality povrchu. [1,5,6,7,8,9]

Princip tohoto procesu spočívá ve vytvrzování fotopolymeru, což je polymer, který je citlivý na ultrafialové záření, a při vystavení tomuto záření tvrdne a stává se pevným. Tento fotopolymer je umístěn do vaničky, do které je posléze ponořena tisková podložka, která se zastaví ve vzdálenosti 1 vrstvy od separační fólie na skle. Pomocí rotujícího zrcátka a hranolu se zaměřuje paprsek do určitých míst na hladině a tím dochází k vytvrzení fotopolymeru. Po vytvrzení vrstvy se tisková podložka posune o výšku vrstvy a proces začíná znovu. Každá vrstva se během tisku odlepuje od separační fólie, což může způsobovat problémy, pokud se vrstva správně neodlepí. Čím menší je plocha, kterou se vrstva dotýká separační fólie, tím jednodušeji dochází k odlepení, proto je lepší tisknout v SLA tiskárně model pod úhlem 45°. SLA technologie vyžaduje použití podpor, které udržují vrstvy na místě, jestliže by mělo dojít k posunutí důsledkem působení gravitace. Po ukončení tisku je model ošetřen. Model je umístěn do izopropanové lázně, kde dochází k čištění, a poté je dotvrzován pod ultrafialovým zářením. Po ošetření je možné využít post-processing, který

dá výtisku nové vlastnosti. Objekty vytisknuté pomocí technologie SLA můžeme otryskávat, pískovat anebo galvanizovat. Díky galvanizaci se stává výtisk odolnější, rozměrově stabilnější ve vlhkém prostředí a také může učinit výtisk vodivý. Také je žádoucí tisknout na tiskové podložce co nejvíc objektů, a to hlavně kvůli tomu, že doba tisku pro jeden objekt je stejná jako doba tisku pro více objektů. Nevyužitý fotopolymer, který zůstane v nádobě po ukončení tisku, lze znovu použít ale je nutné ho přefiltrovat, kvůli drobným částem, které mohli v nádobě po tisku zůstat. [1,5,6,7,8,9]

### 1.2.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Technologie selektivního laserového spékání, na rozdíl od jiných aditivních výrobních procesů, využívá široké spektrum materiálů v podobě prášků. Nejčastěji se jedná o materiály plastové (nylon, polystyrén, polyamid 11), kovové (ocel, titan, hliník) keramické či skelné prášky. Tyto prášky jsou spékány vysoce výkonným laserem, v důsledku toho se malé částice materiálu spojují a spolu vytvářejí pevný objekt. U této technologie není potřeba tisku podpor, neboť nespečený materiál, který po celou dobu tisku obklopuje výtisk, funguje jako podporná struktura. [3,5,7,9,10,11,12]

Jak bylo zmíněno, technologie SLS funguje na principu spékání materiálu v podobě prášku a obdobně jako u ostatních technologií proces probíhá po jednotlivých vrstvách. Na tiskovou podložku se rovnoměrně nanese v tenké vrstvě práškovitý materiál, který je následně SLS zařízením zahřát lehce pod teplotu tavení, aby laser nemusel zahřívat prášek z pokojové teploty až na teplotu tavení. Laser poté speče prášek na požadovaných místech a tisková podložka se posune o výšku jedné vrstvy (50-200  $\mu\text{m}$ ) níž. Následně je nanesena další rovnoměrná tenká vrstva materiálu a proces se opakuje. Po dokončení procesu tisknutí, je potřeba tiskovou komoru zchladit. To probíhá uvnitř SLS zařízení a následně mimo zařízení, aby se zabránilo deformacím, nadměrnému smrštění, a taktéž aby se zajistili vhodné mechanické vlastnosti. U této technologie je post-processing nutností, výtisk je hrubý a pórovitý, a také je potřeba odstranit přebytečný prášek na výtisku. Tento prášek se dá znovu využít (stejně, jako prášek, který zbyl v SLS zařízení) na další tisk. Recyklovaný prášek může pak tvořit až 70-90 % materiálu v dalším tisku. Přebytečný prášek se odstraňuje stlačeným vzduchem. Povrch je také otryskáván plastovými kuličkami, tímto se odstraňuje nespečený prach na povrchu výtisku. Dodatečně k dosažení hladkého povrchu může být použito omílacích tělísek, které pomocí vibrace erodují povrchu výtisku. [3,5,7,9,10,11,12]

Tiskárny fungující na principu SLS jsou především určeny pro průmyslové využití. Začínají se objevovat i domácí SLS tiskárny, které ovšem nejsou moc cenově dostupné, pohybují se v řádech desítek až sta tisíc korun, a také mají velké nároky na bezpečnost. Obecně mají SLS tiskárny velké nároky na údržbu, ať už je to čištění stroje a výtisku od prášku, nebo složitá výměna materiálu, při které je potřeba kompletně vyčistit tiskárnu a její příslušenství. Proto jsou většinou v praxi jednotlivé tiskárny rezervované pro jeden určitý materiál. Mezi nevýhody také spadá vysoká pořizovací cena tiskáren i materiálu, časová náročnost, kvůli nutnosti dodatečného post-processingu z důvodu hrubosti a pórovitosti výtisku. Na druhou stranu je výhodou výběr ze široké škály materiálů, není potřeba podpor, výtisky jsou odolné, pevné a také mají slušnou chemickou odolnost. Výrobky vytisknuté pomocí této technologie nachází uplatnění například v kosmonautice, zdravotnictví (protézy) a průmyslu. Další varianty této metody jsou Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Electron Beam Melting (EBM) a Selective Heat Sintering (SHS), které fungují obdobně až na pár změn. [3,5,9,10,11,12]

### 1.2.3 Fused Deposition Modeling (FDM)

Jedná se o nejrozšířenější aditivní technologii, která využívá termoplastických materiálů v podobě tiskových strun (filamentů), jejichž tloušťka je většinou 1,75 mm nebo 2,85 mm, popřípadě 2,95 mm. Využívá se několik materiálů pro výrobu filamentů, kdy každý má nějaké výhody a nevýhody, podle nichž se určuje vhodnost pro konkrétní využití. Využívané materiály jsou například PLA, ABS, ASA, PETG, PEI. Jednotlivé materiály lze ještě doplňovat aditivami, které ovlivňují jejich vlastnosti jako třeba pevnost, pružnost, odolnost, vodivost atd. Kvalita povrchu, kterou získáme pomocí této technologie je velmi nízká, jelikož výška vrstev se u této technologie pohybuje mezi 50  $\mu\text{m}$  až 400  $\mu\text{m}$ , což zdaleka nedosahuje rozlišení, které umožňují SLA tiskárny. Z důvodu těchto nedostatků je u výtisků, po kterých se požaduje větší kvalita povrchu, nutné provést post-processing. U některých komplikovanějších součástí, které třeba obsahují převisy, je potřeba tisku podpor, které jsou odstraněny po ukončení tisku. Mezi její hlavní využití patří modelování, výroba prototypů a finálních produktů. Název „Fused Deposition Modeling (FDM)“ lze najít pouze na produktech od firmy Stratasys Inc., neboť FDM je registrovaná ochranná značka této společnosti. Technologie je také známá pod dalšími názvy, jako Thermoplastic extrusion nebo Fused Filament Fabrication (FFF). První patentování této technologie má na svědomí Scott Crump, který ji patentoval v roce 1988 pro svoji společnost Stratasys Inc. Tento patent vypršel v roce 2005, v důsledku čehož vznikl open-source projekt RepRap, který umožňoval



uživatelům bezplatný přístup k dokumentacím týkajících se tiskáren pracujících na tomto principu. Také bylo umožněno vylepšování nebo úpravy stávajících verzí tiskáren, avšak pod podmínkou, že musí být zpětně tyto vylepšení zveřejněny. Díky tomuto uskupení se technologie FDM stala velmi rozšířenou a populární. [1,2,4,7,9,10,14,15,16]

Prvním krokem tohoto procesu je zavedení tiskové struny (filamentu) z termoplastického materiálu do tiskové hlavy. Následně je filament zahřát nad teplotu tavení materiálu a tisková hlava je přesunutá do výšky jedné vrstvy od tiskové podložky. Jakmile je materiál zahřát na určitou teplotu, dojde k extruzi materiálu, který okamžitě po opuštění trysky vlivem teploty okolí a tiskové podložky chladne a tvrdne. Během extruze dochází i k posunu tiskové hlavy podle G-kódu, a tím vzniká první vrstva. Po dokončení první vrstvy se tisková hlava posune o výšku jedné vrstvy výš a proces tisknutí vrstvy začíná nanovo. Kvůli šetření materiálu a času, nebývá většinou prostor uvnitř výtisku celý vyplněn materiálem, ale pouze část, která je tištěna v podobě různých struktur. Tato struktura (tzv. infill) zabraňuje kolapsu výtisku a zabraňuje tvorbě dalších defektů výtisku. Po dokončení tisku, je výtisk odstraněn z tiskové podložky a dochází k odstranění podpor, pokud bylo nutné je tisknout. Dále je u některých výtisku potřeba provést post-processing, jenž se liší podle použitého materiálu (například u materiálu ABS můžeme vyhladit povrch acetonovými parami). Dále lze obecně výtisky zbrousit brusným papírem, natřít epoxidovou pryskyřicí, provést nástřík výtisku elektrovodivou barvou atd. Post-processing se také volí podle využití vytištěného předmětu (například u výtisku využívaném v potravinářství je důležité použít epoxidovou pryskyřici pro vyplnění mezer mezi vrstvami, kde by mohli vznikat kolonie bakterií). Během tisku můžou vznikat defekty na výtisku, jejichž původ se nachází například v různém chlazení na vícero místech (warping), čímž vzniká napětí uvnitř výtisku, které táhne vrstvy vzhůru, a nedostatečné adhezi tiskové podložky. Problémy, které nastávají během tisku, lze většinou řešit bližším hlídáním teploty, udržováním čistoty tiskové podložky a tiskové hlavy a zajištěním správného fungování tiskárny. [1,2,4,5,9,10,14,15,16,18]

Technologie FDM je velmi oblíbená a rozšířená. Tiskárny pracující na tomto principu jsou jednoduché a cenově dostupné, což platí i pro materiály, kterých je na výběr velké množství s různými vlastnostmi. Na rozdíl od SLA nebo SLS tiskáren jsou více čisté, proto jsou i vhodnější pro domácí využití. Bohužel kvalita a detail povrchu výtisků je v porovnání s ostatními tiskárnami, kvůli vyšší výšce vrstev a způsobu, jakým jsou vrstvy nanášeny nižší, z toho důvodu je u některých výtisků nutné provést nějakou formu post-processingu. [1,2,4,7,9,10,14,15,16,17]

#### 1.2.4 Digital Light Processing (DLP)

Digital Light Processing funguje na principu velmi podobném SLA tiskáren. Na rozdíl od zmíněných SLA tiskáren, kde naváděný laser vytvrzuje vrstvu postupně, DLP tiskárny využívají projektor, který vytvrdí rovnou celou vrstvu fotopolymeru. Díky tomu je tisk pomocí těchto tiskáren výrazně kratší než tisk u SLA tiskáren. Pomocí této technologie lze rychle vytvářet velmi komplexní výrobky s velkou kvalitou povrchu. Nevýhodou je zápach, který vzniká tavením fotopolymerů a vznik deformací u větších výtisků. Využití tyto tiskárny nacházejí především ve šperkařství, hračkářství a stomatologii. [43,44]

#### 1.2.5 Multi Jet Fusion (MJF)

Technologie 3D tisku, která podobně jak SLS, tvoří vrstvu spékáním prášku. Tyto tiskárny, na rozdíl od SLS tiskáren, nevyužívají laser ke spékání prášku. Na vrstvu prášku, jenž je předehřát těsně pod teplotu spékání, je nastříkovan do požadovaného tvaru speciální inkoust a následně je vrstva vytvrzena infračervenou lampou. Následně dojde k posuvu tiskové podložky o výšku jedné vrstvy a proces se opakuje. Post-processing je u této technologie kratší a jednodušší než u SLS. Podobně jako u SLS je nutné vyčkat na ochlazení výrobku. Prášek, který zbude po tisku, lze znovu použít a lze takto získat 80-85 % recyklovaného prášku na další tisk. [45,46]

#### 1.2.6 PolyJet

Výrobní proces fungující na principu vytvrzování fotopolymeru. Tisková hlava nanáší kapky fotopolymeru na tiskovou podložku, kde je následně fotopolymer vytvrzen UV světlem. Pomocí těchto tiskáren lze vytvořit velmi malé vrstvy o minimální tloušťce 16  $\mu\text{m}$ . Díky tomu jsou výtisky velmi přesné a kvalitní. Podobně jako zkratka FDM je název PolyJet ochrannou značkou firmy Stratasys, tím pádem lze označovat tímto názvem pouze tiskárny od této firmy. V případě tiskáren od firmy Stratasys jsou tisknuty podpůrné struktury z rozpustných materiálů jako třeba polyetylén, propylénu nebo glycerinu. Po tisku je odstraněno co nejvíc těchto podpor pomocí proudu vody a poté dojde k vložení výtisku do roztoku, kde dojde k rozpuštění zbytku podpůrných struktur. [47,48]

#### 1.2.7 Electron Beam Melting (EBM)

Tiskárny fungující na této technologii taví kovový prášek paprskem elektronů. Tento paprsek je naváděn pomocí magnetického pole, čímž se taví jednotlivé vrstvy kovového prášku. Komora, v níž tento proces probíhá, je kvůli oxidaci některých materiálů zbavena

vzduchu, tisk tím pádem probíhá ve vakuu. Tavením pomocí paprsku elektronu lze dosáhnout až 2000 °C, díky čemuž dokáže roztavit i kovy s vysokou teplotou tání jako třeba titan. Výhodou je rychlejší tisk než u SLM tiskáren, na druhou stranu jsou výtisky o trochu méně přesnější vzhledem k tomu, že elektronový paprsek širší než laserový paprsek. Využití EBM technologie nachází především v leteckém, automobilovém a zbrojním průmyslu, zdravotnictví a petrochemii. [53,54]

## 1.3 Materiály

### 1.3.1 Obecně o materiálech pro 3D tisk

Vzhledem k tomu, že materiálů využívaných v 3D tisku je velké množství a také fakt, že předmětem této bakalářské práce je tisk antén na FDM tiskárně, jsou zde uvedeny pouze nejpoužívanější materiály týkající se technologie FDM.



Obrázek 4 Porovnání materiálů [87]

Jak již bylo zmíněno, materiálů používaných k 3D tisku je velké množství a každý má svoje výhody a nevýhody, které je důležité vzít v potaz při rozhodování, který materiál využít. Při výběru materiálu je podstatné určit, jak a kde bude výtisk používán, například jak moc bude mechanicky namáhán, jestli bude vystaven UV záření nebo vnějším vlivům, v jakých

teplotách se bude nacházet atd. Jednotlivé materiály mají také vlastní tiskové podmínky, kterými jsou teplota trysky a teplota podložky. V dalších podkapitolách jsou proto uvedeny vlastnosti, výhody/nevýhody, využití a tiskové podmínky nejpoužívanějších FDM materiálů. [1,15,19,20]

### 1.3.2 PLA

Kyselina polymlečná (PLA) se vyrábí z přírodních materiálů, jako třeba kukuřičný škrob. Výroba PLA probíhá tak, že se kukuřice za vlhka rozemele, čímž se uvolní škrob, ten je posléze zahřát a smíchán s enzymy a dalšími chemikáliemi, které uvolní dextrózu. Při následné fermentaci vznikají monomery kyseliny mléčné, ze kterých vzniká polymerací kyselina polymlečná. Vzniklý polymer je granulován a pomocí speciálního extruderu, kde se granulát taví, je vytlačován a chlazen v podobě struny, jež se omotá kolem cívky. Díky využití přírodních materiálů se jedná o biologicky odbouratelný termoplast. [1,15,19,20,21]

S PLA se tiskne relativně jednoduše oproti ostatním materiálům, díky nízké teplotní roztažnosti se na tiskové podložce nedeformuje, dále jsou výtisky tvrdé a tuhé, také malé modely je možné tisknout detailně. Tisk je téměř bez zápachu a neuvolňují se žádné nebezpečné chemikálie. Mezi nevýhody tohoto materiálu patří křehkost, výtisky také ztrácejí mechanickou odolnost při zahřátí nad 60 °C. Kvůli nepříteli kvalitnímu povrchu vytisknutých objektů je pro speciální použití nutný post-processing, který může být pro obvyčejného uživatele složitý. Pokud je tento materiál vystaven ultrafialovému záření nastává degradace materiálu. Tento materiál je díky snadnému tisku a cenové dostupnosti vhodný pro začátečníky. PLA se využívá při tisku prototypů, hraček, šperků, architektonických modelů, vhodný je i pro potravinářské nádoby, u kterých je ovšem potřeba post-processing, aby se vyplnily mezery mezi vrstvami, kde se můžou množit bakterie. Teplota trysky se během tisku může pohybovat mezi 190–220 °C, teplota podložky se může nacházet mezi 40 až 60 °C. [1,15,19,20,21]

### 1.3.3 PETG

Polyethylentereftalát-modifikovaný glykolem je termoplastický polyester, který je na rozdíl od PLA pružnější, méně křehký a také má vyšší teplotní odolnost. Jedná se o vylepšený polyethylentereftalát, u kterého byl v řetězci nahrazen ethylenglykol cyklohexandimethanolem. Původnímu polyethylentereftalátu při vyšších teplotách zeslabovala struktura, kvůli jeho tendenci při těchto teplotách krystalizovat, z tohoto důvodu

byl nahrazen materiálem PETG, který má vyšší tepelnou odolnost a tímto problémem netrpí. Vyrábí se dvou krokovou tavnou polykondenzací, při které se uvolňuje malé množství vody. Podobně jako u PLA je tisk s PETG skoro stejně snadný, má malou teplotní roztažnost, takže se během tisku nedeformuje. Jednotlivé vrstvy se dobře spojují, takže povrch výtisku je velmi a lesklý. PETG je mnohem vhodnější na části, které jsou mechanicky namáhané než PLA, které je méně houževnaté a pevné. PETG během zahřívání na rozdíl od ABS neuvolňuje nebezpečné chemikálie a tisk je téměř bez zápachu. Také je recyklovatelný, bezpečný pro potraviny a neabsorbuje vodu. Přestože PETG v mnoha ohledech PLA předčí, taktéž má některé nevýhody, například má náchylnost ke „stringování“, což znamená, že tisková hlava při přejezdu za sebou tahá tenká vlákna plastu, které činí povrch méně kvalitní. Toto je způsobeno tím, že materiál, i přesto že není tlačěn skrz trysku, z trysky odkapává, což také znesnadňuje přemostění, tento jev se nazývá „oozing“. Povrch výtisku má tendenci se jednoduše poškrábat a obtížně se z něj odstraňují vytištěné podpory. Používá se především na mechanicky namáhané součásti, držáky a ochranné kryty. Díky jeho průhlednosti a chemické odolnosti s ním můžou být například tisknuty ochranné displeje a nádoby na tekutiny. Teplota trysky se může pohybovat v rozmezí 240-260 °C. Tisknout se může i na studenou tiskovou podložku, ale preferovaný je tisk na podložku o teplotě pohybující se od 70 až do 100 °C. [1,3, 15, 19, 20, 22,23,24,25,26,27,28]

#### 1.3.4 ASA/ABS

Pokud termoplasty Akrylonitril-styren-akrylát a Akrylonitril-butadien-styren porovnáme, zjistíme, že si jsou poměrně hodně podobné. V jistém smyslu lze říct, že ASA je nástupce ABS, kvůli jeho větší odolnosti proti vlivům, jako UV záření a povětrnostním podmínkám, a menšímu smrštění při tisku. ABS se vyrábí emulzní nebo blokovou polymerací akrylonitrilu, jenž je důvodem pro vyšší pevnost výrobků, a styrenu, který dává ABS dobrou zpracovatelnost, za přítomnosti polybutadiénu. Existují dvě možnosti, jakým lze ASA vyrobit, reakcí monomerů styren akrylonitrilu a ester kyseliny akrylové, nebo roubováním, které je preferovanou metodou. Roubování probíhá zavedením práškového elastomeru esteru kyseliny akrylové při kopolymeraci akrylonitrilu a styrenu. [15,17,19,28,29,30,31,32,33,34]

Mechanické vlastnosti mají oba tyto termoplasty stejné, jsou odolné proti nárazu a opotřebení. ASA je oproti ABS více odolné proti chemikáliím, vnějším vlivům a je UV stabilní, na druhou stranu povrch ABS lze snadněji uhladit acetonovými parami. Oba

materiály jsou velmi tepelně odolné, deformace se začínou na výtiscích objevovat až po 100 °C. Tisk s využitím těchto dvou materiálů je oproti PLA mnohem složitější, pokud není zajištěno rovnoměrné chladnutí, tak vznikají napětí uvnitř výtisku, které vedou k deformacím. Kvůli tomuto problému je doporučeno tisknout v uzavřeném krytu, kde nemůže dojít k náhlé změně teplot, třeba z důvodu průvanu. Během tisku se taky uvolňují toxické výpary, což je další důvod proč tisknout při využití těchto materiálů v uzavřeném krytu. Pomocí těchto materiálů lze například tisknout obaly, ochranné kryty, prototypy, díly s venkovními aplikacemi, díly pro automobilový průmysl. Teplota trysky při tisku musí být v rozmezí 245-265 °C a teplota podložky 90-110 °C. [15,17,19,28,29,30,31,32,33,34]

### 1.3.5 FLEX

Jedná se o velmi pružné a silné termoplastické elastomerní materiály, které lze využít v případě, kdy není tvrdý plast vhodný pro zamýšlené použití výtisku. Z několika druhů těchto termoplastických elastomerů se nejvíce využívá pro výrobu filamentů termoplastický polyuretan. Výhodou těchto materiálů je velká pružnost a elasticita a odolnost proti oděru. Během tisku dochází k minimálnímu smršťování a vrstvy velmi dobře přiléhají, což může zapříčinit přilepení na tiskovou podložku. Kvůli tomuto problému je doporučeno nanést před tiskem na tiskovou podložku separátor, například lepidlo. Tisk pomocí těchto materiálů je náročnější a složitější na přípravu, také je potřeba tisknout při nižší rychlosti a mají vyšší pořizovací cenu. Proto jsou tyto materiály vhodné spíše pro zkušené uživatele. Tryska musí být při tisku zahřátá na teplotu mezi 230 až 260 °C a teplota podložky se musí pohybovat v rozpětí 45-65 °C. Těmito materiály lze například tisknout tlumiče vibrací, obaly nebo pouzdra telefonů a kamer a madla na kolo. [19,35,36]

### 1.3.6 CPE

Jedná se o materiál využívaný na výrobu filamentů pro FDM tiskárny, který je velmi silný, odolný. Chemicky, teplotně a mechanicky je více odolný než PLA. Oproti ABS je více chemicky odolný, nenasakuje vodu a tisk je bezpečnější a jednodušší, jelikož se neuvolňují výpary a nedochází k tak velkým tepelným deformacím. Na rozdíl od ABS a PLA nelze povrch CPE vyhladit párami, vzhledem k jeho chemické odolnosti. Má výbornou přilnavost vrstev, proto je doporučeno před tiskem natřít tiskovou podložku separátorem. Mezi nevýhody také patří vysoká potřebná teplota trysky (255-275 °C), které nelze na všech tiskárnách dosáhnout. Lze ho využít na tisk namáhaných částí a prototypů. Doporučená

teplota trysky je 255-275 °C. Teplota podložky záleží na velikosti tisku, ale obecně se pohybuje v rozmezí 70-90 °C. [19,37,38]

### 1.3.7 Nylon

Flexibilní, silný a odolný materiál, který se využívá na filamenty pro FDM tiskárny a prášky do SLS tiskáren. Vyznačuje se vysokou přilnavostí k povrchu a tendencí k deformování na tiskové podložce. Tiskovou strunu je nutné udržovat v suchu, jelikož v případě, kdy by se tisklo s navlhkým materiálem, vznikají ve výtisku bublinky. Nároky na uchování a tisk jsou kvůli těmto skutečnostem vysoké. Výtisky mají hladký povrch a mají velkou odolnost proti poškrábání. Teplota trysky záleží na výrobci filamentu. Některé filamenty vyžadují teplotu trysky kolem 250 °C a některé 220 °C, obecný rozsah teplot se pohybuje od 220 do 260 °C. [19,39]

### 1.3.8 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály se skládají ze dvou částí, z matrice a výztuže. V případě materiálů pro výrobu filamentů je matrice plast a výztuž třeba uhlík nebo kov. Přidáním výztuže zlepšujeme a získáváme nové vlastnosti (chemická a tepelná odolnost, mechanické chování, magnetické vlastnosti, elektrická vodivost, vizuální vlastnosti) v materiálu. Výztuže se dělí na částicové, vláknové a strukturní. Výztuže se přidávají do matrice ve vláknech, které se dělí na kontinuální a diskontinuální. Roli výztuže může v kompozitu zastávat třeba uhlík, měď, bronz nebo aramid. Jako matrici se většinou volí obecně z používaných materiálů pro FDM tisk, jako třeba PLA, ABS nebo ASA. Kompozitní materiály jsou silně abrazivní, proto je doporučeno využití tvrzené trysky většího průměru (0,5 mm a větší). Tato práce se zabývá kompozitními materiály, které propůjčují výtisku vodivost, proto jsou zde rozebrány podrobně pouze tyto kompozity. [19,77]

#### 1.3.8.1 Elektricky vodivé filamenty

Pro dosažení elektrické vodivosti je nutné k matrici v podobě termoplastu přidat vodivou výztuž. Mezi tyto výztuže, které umožňují materiálu vést elektrický proud, lze řadit prakticky každý vodivý materiál, ale nejvíce využívaný je uhlík, a jeho strukturní varianty, a měď. V obou případech je důležité, aby byl vodivý materiál dostatečně v kompozitu zastoupen, na trhu se například nachází spousta metalfill filamentů, které, i přes kovovou výztuž, nejsou vodivé a využívají se především kvůli vzhledu a mechanickým vlastnostem. Mezi varianty uhlíku, které se liší strukturou, patří uhlíkové nanotrubičky (CNT), grafen

(Graphene), chemicky černý uhlík (Carbon Black) a uhlíková vlákna (Carbon fibers). [78,79]

#### ***Uhlíkové nanotrubičky (CNT)***

Jedná se o válcovité struktury, jejichž průměr se pohybuje od 1 nm do 100 nm a délka až do 100  $\mu$ . Stěny těchto struktur se skládají z atomů uhlíku. Největší předností těchto struktur je velmi vysoká pevnost a excelentní elektrická vodivost. Tuto výbornou elektrickou vodivost získávají uhlíkové nanotrubičky hlavně kvůli možnosti volného pohybu elektronů. Především vodivost závisí na struktuře nanotrubic a také tyto struktury, nezávisle na délce trubice, se vyznačují velmi malým odporem. Využívají se hlavně v elektrotechnice, například na senzory, sondy. [49,50,51]

#### ***Grafen (Graphene)***

Jedná se o velmi tenký, ale pevný, dvourozměrný krystal, z uhlíkových hexagonálních mřížek. Vyznačuje se excelentní tepelnou a elektrickou vodivostí, velkou pevností a pružností. Grafén lze vyrobit rozdělením trojrozměrného krystalu grafitu na jednotlivé vrstvy. Tohoto rozdělení grafitu na 1 monovrstvu lze docílit pomocí mikromechanického štípání, jenž spočívá v odstranění vrchní vrstvy krystalu grafitu lepící páskou a následně je tato vrstva přitlačena do vhodného substrátu, kdy v případě, že přilnavost mezi grafénovými vrstvami je menší než přilnavost spodní vrstvy k substrátu, dojde k odtržení grafénové monovrstvy od zbytku krystalu. [52]

#### ***Saze (Carbon Black)***

Skládá se z kulovitých uhlíkových částic, jejichž míra uspořádání v mřížce je mnohem nižší než u grafenu. Vzniká při nedokonalém spalování paliv a využívá se jako výztuž do pneumatik, pigment a také jako aditivum, které umožňuje vodivost. [80,81,82]

#### ***Uhlíková vlákna (Carbon fibers)***

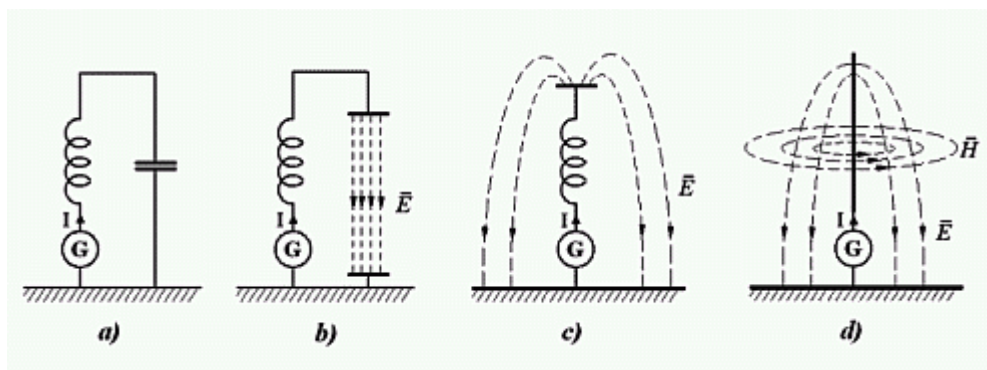
Jedná se o dlouhý typ vlákna, jehož průměr se pohybuje mezi 5 až 10  $\mu$ m. Strukturu vlákna vyplňují krystaly uhlíku, jenž jsou orientované ve směru osy vlákna, což poskytuje těmto vláknům, i přes relativně malý průměr, velkou pevnost. [75,76]



## 2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY ANTÉN

### 2.1 Definice antény

Antény jsou zařízení umožňující přenos bez přítomnosti drátového vedení pomocí elektromagnetického vlnění. V základu se dělí na přijímací a vysílací antény, kdy vysílací anténa mění energii elektrického proudu na elektromagnetické vlnění, které je zachyceno přijímací anténou a opět přeměněno na elektrický proud. Zdrojem tohoto elektromagnetického vlnění je elektromagnetický oscilátor, který se skládá z cívky a kondenzátoru a má přesně danou frekvenci. V podstatě si lze anténu představit jako LC obvod na vodivé desce. V případě, že desky kondenzátoru vzdálíme tak, že jedna z nich se stane totožnou s vodivou deskou, budou se siločáry elektrického pole šířit prostředím mezi deskami kondenzátoru. Vzhledem k tomu, že anténa je rovný vodič a ne cívka, se siločáry magnetického pole šíří do okolí. [55,56,57,58,59,60,61]



Obrázek 5 Princip antény [57]

V souvislosti s anténami lze najít několik pojmů. Jedná se o zisk antény, impedanci, činitele zkrácení, výstupní napětí a směrovost antény. Zisk antény je referenční hodnota, která porovnává účinnost antény s půlvlnným dipólem (dB), nebo se zdrojem záření, jehož záření má ve všech směrech stejnou intenzitu, (dBi). Impedance, která se skládá z reálné a imaginární složky, vyjadřuje odpor antény vůči elektrickému proudu. Aby došlo k účinnému přenosu energie, musí být impedance složena pouze z reálné složky, tzv. činného odporu. [56,57,58,59,60,61]

### 2.2 Elektromagnetické vlnění

Jedná se o vlnění, které se skládá ze dvou vzájemně kolmých neoddělitelných složek, elektrické a magnetické složky, které se během vlnění mění z jedné na druhou. Elektrická složka je definována vektorem intenzity elektrického pole a magnetická složka vektorem

magnetické indukce. Zdrojem tohoto vlnění je elektromagnetický oscilátor, který je složen v základu z cívky a kondenzátoru. V oscilátoru probíhá opakovaný děj, během něhož dojde k nabití kondenzátoru (energie elektrického pole), který je následovně připojen na cívku, kde dochází k zvyšování proudu a tím i k přeměně energie elektrického pole kondenzátoru na energii magnetického pole cívky. Jakmile dojde k vybití kondenzátoru, začne se proud zmenšovat, což způsobuje vznik indukovaného napětí a kondenzátor se znovu nabíjí tentokrát s opačnou polaritou. Mezi tato vlnění spadá také světlo, jenž je elektromagnetické vlnění o určité frekvenci. [61,62,63,64]

## 2.3 Typy antén

### 2.3.1 Elementární dipól

Jedná se o základní anténu, ze které ostatní antény vychází. Vznikne z dvojice vodičů, jejichž konce se ohnou o  $90^\circ$ , čímž vzniknou dvě ramena. Frekvence, na které anténa rezonuje, závisí na součtu délek těchto ramen, kdy v případě, že součet délek ramen je roven půlce vlnové délky, se jedná o půlvlnný dipól. [56,57,58]

### 2.3.2 Skládáný dipól

Skládaný dipól si lze představit jako spojení více elementárních dipólů. Skládáný dipól má stejný zisk jako elementární dipól, ovšem díky jeho větší impedanci (skládáný dipól má impedanci ve volném prostoru  $300 \Omega$ , elementární má  $75 \Omega$ ) ho lze využít v širším pásmu frekvencí. [56,57,58]

### 2.3.3 Unipól

Unipól vznikne nahrazením jednoho ramene dipólu za uzemněnou rovinu, na které dochází k odrazu vlnění. Používá se na dlouhých a středních vlnách, jelikož rozměry standartního dipólu by byli pro tyto vlnové délky příliš velké. [56,57,58]

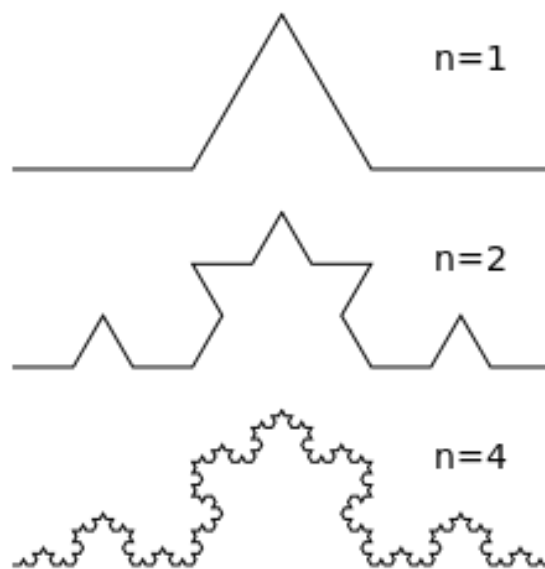
### 2.3.4 Anténa Yagi

Směrová anténní soustava, která se skládá z jednoho aktivního prvku (skládáný dipól) několika pasivních, které jsou napájeny vyzařovaným vlněním. Pasivní prvek, jenž je umístěný  $0,15$  délky vlny za aktivním prvkem a je o  $7\%$  delší než aktivní prvek, se nazývá reflektor. Na tomto prvku dochází k zesílení vlny putující v přímém směru a k zeslabení vlny putující zpětným směrem. Direktory jsou druhým pasivním prvkem, jenž jsou o  $7\%$  kratší

než aktivní prvek a vzdálenost mezi nimi je 0,1 délky vlny. První direktor zesílí tok energie v přímém směru tak, že se vytvoří ideální podmínky pro vybuzení druhého direktoru, tento proces se opakuje pro další direktory. Direktorů může být v takové soustavě 3 až 20, s tím že zisk Yagi antény s třemi direktory je cca 7 dB a zisk Yagi antény s 20 direktory je cca 14 dB. [56,57,58,65,66]

## 2.4 Fraktální anténa

Tyto antény využívají fraktálních geometrií, které se skládají z neustále se opakujících stejných malých částí, jež jsou matematicky nazvané iterace. Fraktál je tedy předmět s tvarem, který se nemění se zvětšujícím nebo zmenšujícím se měřítkem. Důvodem vzniku fraktální geometrie byl problém jednoduchého popisu složitých tvarů pomocí euklidovské geometrie. Využitím euklidovské geometrie lze jednoduše popsat primitivní tvary jako úsečka, trojúhelník, čtverec, obdélník, koule, krychle atd., ovšem problém začíná u různých křivek jako například Kochova křivka, kde by řešením v euklidovské geometrii byla komplikovaná a nepřehledná soustava rovnic, avšak pomocí fraktální geometrie lze tuto křivku popsat velmi jednoduše.

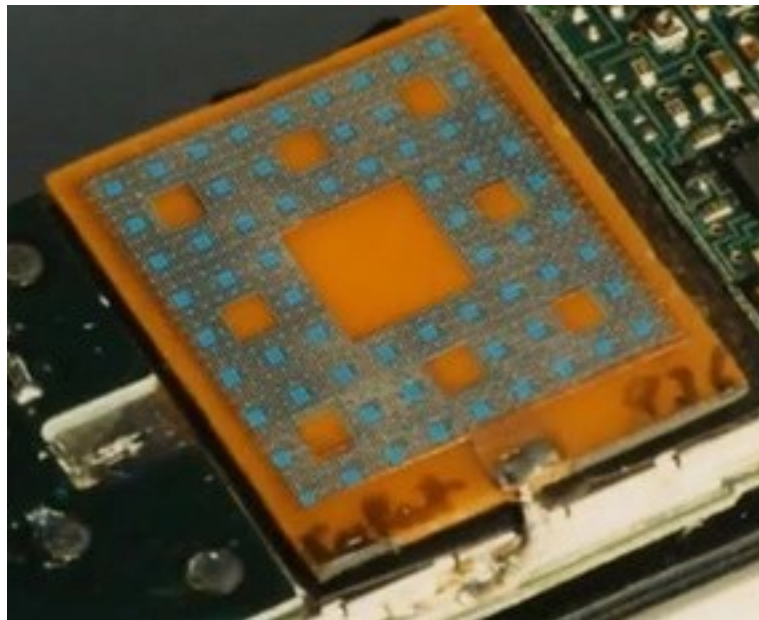


Obrázek 6 Kochova křivka [86]

Fraktály dělíme na dvě kategorie, soběpodobné, ve kterých dochází k opakování originálního motivu a při přiblížení nebo oddálení bude takový fraktál vypadat stejně jako před změnou měřítka, a soběpříbuzné, u nichž jakýkoliv výsek z tvaru není kopií originálního motivu, ale je mu pouze blízký, tedy příbuzný. Soběpodobné fraktály lze najít

jen v matematice, avšak soběpříbuzné jsou všude kolem nás, a to v podobě přírody. [67,68,69,70]

Standartní antény jsou navrhovány pro určité využití a frekvence. Fraktální antény na druhou stranu dokážou pracovat na vícero frekvencích, což se váže na opakující tvary o různých velikostích. Tyto antény jsou také menší a účinnější než standartní antény pracující na určité frekvenci, a nejsou tvarově omezeny, což znamená, že produkt se nepřizpůsobuje anténě, ale anténa produktu. Například WiFi a Bluetooth využívají rozdílné frekvence, což ale neznamená, že mají v telefonech samostatné antény. V tomto případě se využívá fraktálních antén, které jak již bylo řečeno, dokážou přijímat nebo vysílat na různých frekvencích, zejména se využívá takzvaného fraktálu „Sierpińského koberec“. [71,72,73,74]



Obrázek 7 Sierpińského koberec v telefonním zařízení [71]

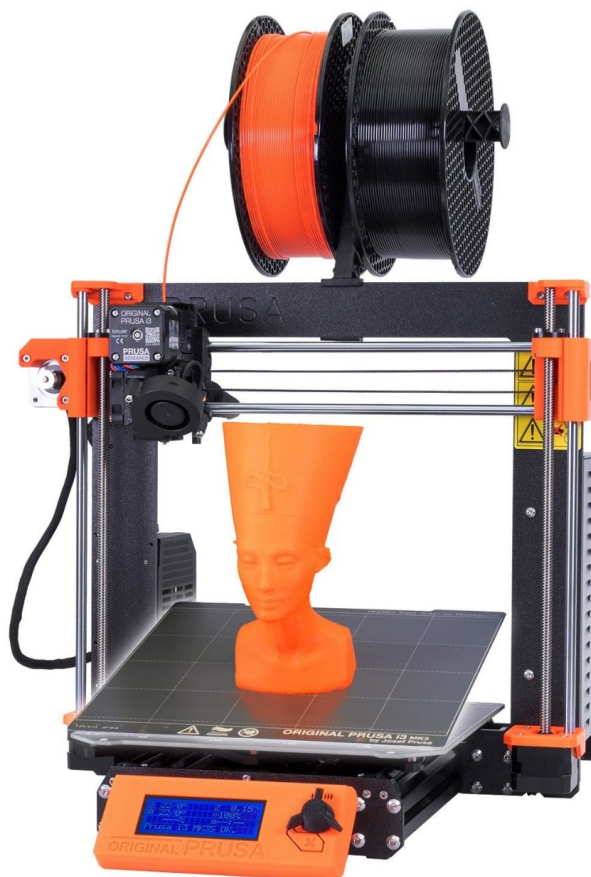
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 VYHOTOVENÍ ANTÉN POMOCÍ 3D TISKÁRNY A JEJICH MĚŘENÍ

Jak již bylo řečeno v úvodu, cílem této práce bylo zjištění proveditelnosti 3D tisku antén na FDM tiskárnách z vodivých kompozitních filamentů. Za tímto účelem bylo navrženo, vytištěno, změřeno a následně porovnáno několik antén, a to od nejjednodušších tvarů v podobě unipólů až po složitější antény, které využili geometrie fraktálů.

#### 3.1 Použité vybavení

Všechny antény byly zhotoveny technologií Fused Deposition Modeling na tiskárně Prusa MK3S+, jenž disponuje vyhřívanou podložkou a umožňuje tisk ze široké škály materiálů, ať už se jedná o PLA, PETG, ABS nebo ASA, tak také lze tisknout z HIPS, PVB, flexibilních filamentů a dalších. Prusa MK3S+ disponuje tiskovým prostorem o velikosti 250x210x210 mm a samotná tiskárna, při váze 7 kg, má rozměry 500x550x400. Také je možné k tiskárně přidat modul, který přidává možnost tisku s až 5 filamenty.



Obrázek 8 Tiskárna Prusa MK3S+ [88]

Vzhledem k abrazivní povaze využitých materiálů, bylo nutné původní trysku o průměru 0,4 mm nahradit ocelovou kalenou tryskou o průměru 0,6 mm.



Obrázek 9 Ocelová kalená tryska o průměru 0,6 mm [89]

Pro měření zisku vytištěných antény byl použit přenosný spektrální analyzátor FieldFox N9912A od firmy Keysight s rozsahem měřených frekvencí od 2 MHz až po 4 GHz.



Obrázek 10 Spektrální analyzátor FieldFox N9912A od firmy Keysight [90]

### 3.2 Použité materiály

Prvním krokem za účelem výběru vhodných materiálů byl průzkum trhu, z něhož bylo zjištěno, že existuje několik firem zabývajících se výrobou vodivých filamentů. Do těchto filamentů byl ve většině přidáván jako aditivum uhlík v různých strukturních podobách. Jedinou výjimkou byl materiál, u kterého pozici aditiva zastupovala měď. Nakonec byly vybrány 3 materiály, které v podstatě představují 3 cenové kategorie, a to od cenově dostupného ABS Conductive od firmy Lankeda, přes střední cenovou kategorii, kterou představuje Conductive PLA od firmy Protopasta až po vyšší cenovou kategorii, jež zastupuje Electrifi od firmy Multi3D. Poslední zmíněný, Electrifi, byl nejslibnější z hlediska vodivostních parametrů. Další materiál, který měl velký potenciál, byl Black Magic 3D s uhlíkem v podobě grafenu, avšak tento materiál byl v době vypracovávání této práce dlouhodobě nedostupný napříč různými tuzemskými a zahraničními dodavateli.

Z každého využitého filamentu bylo odebráno 10 cm struny, jež byly využity ke změření odporu a následnému vypočítání elektrické měrné vodivosti pomocí vzorce:

$$G = \frac{l}{R \cdot A}$$

Kde R je odpor, l je délka filamentu a A je plocha průřezu filamentu.

Tabulka 1 Měrná elektrická vodivost využitých materiálů

Materiál	Výrobce	Délka [cm]	Průměr [cm]	Odpor [ $\Omega$ ]	Měrný elektrický odpor [ $\Omega \text{ cm}$ ]	Měrná elektrická vodivost [ $\text{S cm}^{-1}$ ]
Conductive ABS	Lankeda	10	0,175	600000	5769,7500	0,0001733
Conductive PLA	Protopasta	10	0,175	1930	18,5594	0,0538812
Electrifi	Multi3D	10	0,175	23	0,2212	4,5213322

Tyto hodnoty byly následně porovnány s hodnotami, které uvádí výrobce. V případě PLA (Protopasta) a Electrifi (Multi3D) je toto porovnání možné, neboť výrobcem naměřené hodnoty jsou uvedené na jejich internetových stránkách, na druhou stranu výrobce ABS (Lankeda) neuvádí žádné hodnoty a není ani dostupný materiálový list. Materiálové listy také nejsou dostupné, nebo kompletní, ani u zbývajících dvou materiálů, a z toho důvodu nejsou uvedeny v příloze.

#### 3.2.1 ABS (Lankeda)

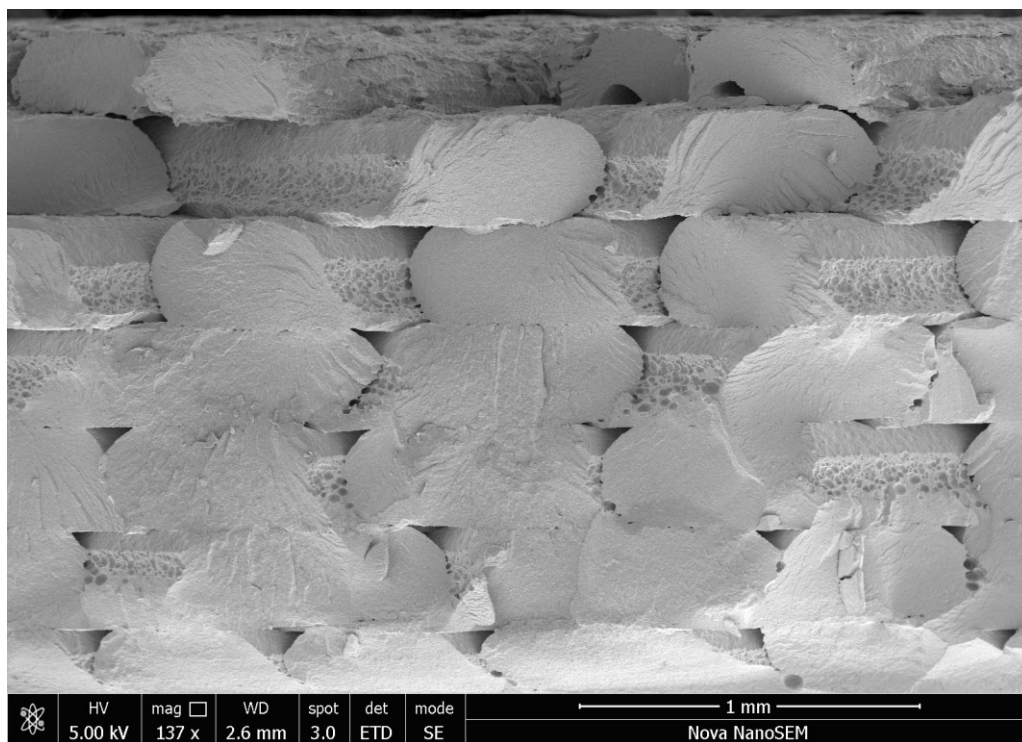
Matrice tohoto filamentu je složena z materiálu ABS, která je proložena plnivem ze sazí. Tento filament byl vyroben čínskou firmou Lankeda, která sídlí v Shenzhenu. Lankeda se



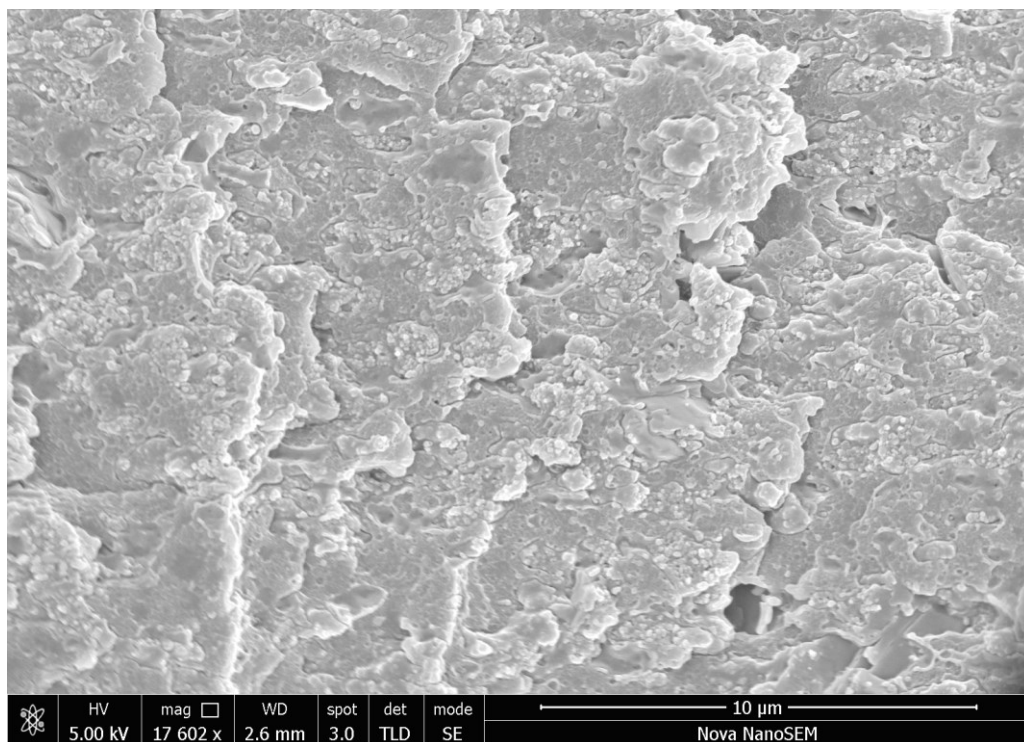
zabývá výrobou filamentů, 3D tiskáren a součástí k 3D tiskárnám. Jak bylo uvedeno v kapitole 3.2, pomocí zařízení Metriso byl na 10 cm filamentu o průměru 1,75 mm naměřen odpor 600 k $\Omega$ , bohužel nelze tuto hodnotu porovnat, neboť výrobce neposkytuje materiálový list. Materiál se prodává po 1kg balení a pořizovací cena za 1 kg materiálu byla v době vypracování práce 999 Kč s DPH, což je nejnižší cena ze 3 využitých materiálů.

### 3.2.1.1 SEM, Mikroskopie Lomu

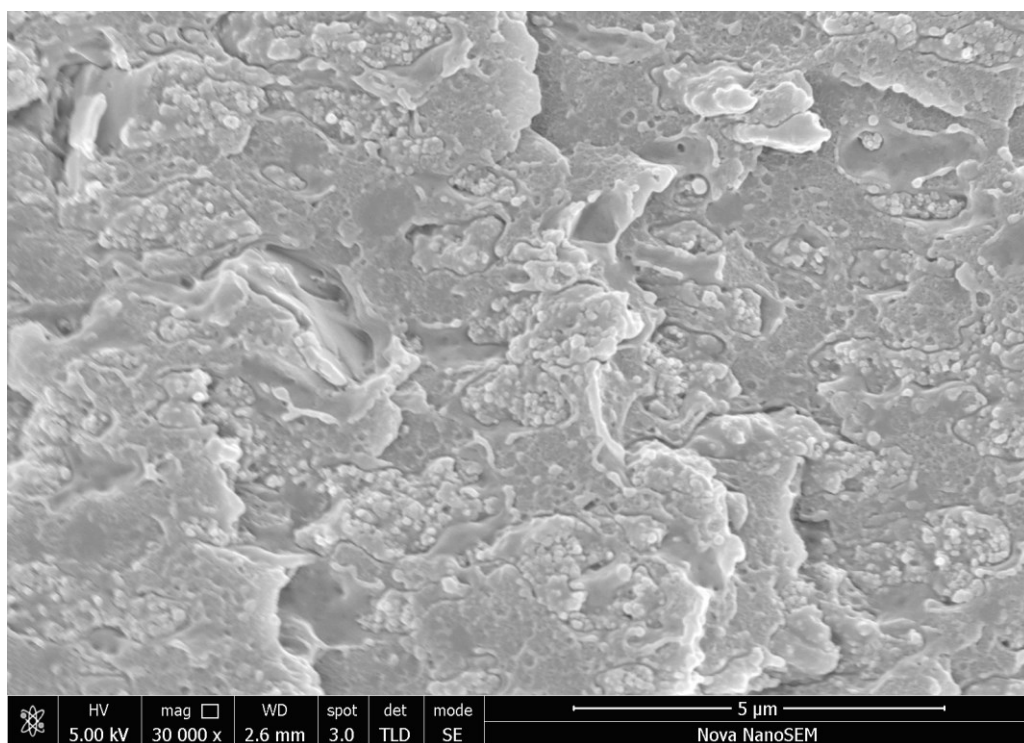
Byly pořízeny snímky lomu pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM). Na Obr. 11 lze vidět jednotlivé vrstvy, které byly vytvořeny procesem 3D tisku. Také si lze všimnout toho, že zmíněné vrstvy nejsou dokonale spojeny, což poukazuje na nízkou přilnavost vrstev, jedná se o klasický problém u ABS filamentů. Na Obr. 13 lze také zpozorovat plnivo v podobě aglomerátu sazí vyplňujících matrici ABS.



Obrázek 11 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive ABS, Lankeda (1 mm)



Obrázek 12 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive ABS, Lankeda (10 μm)



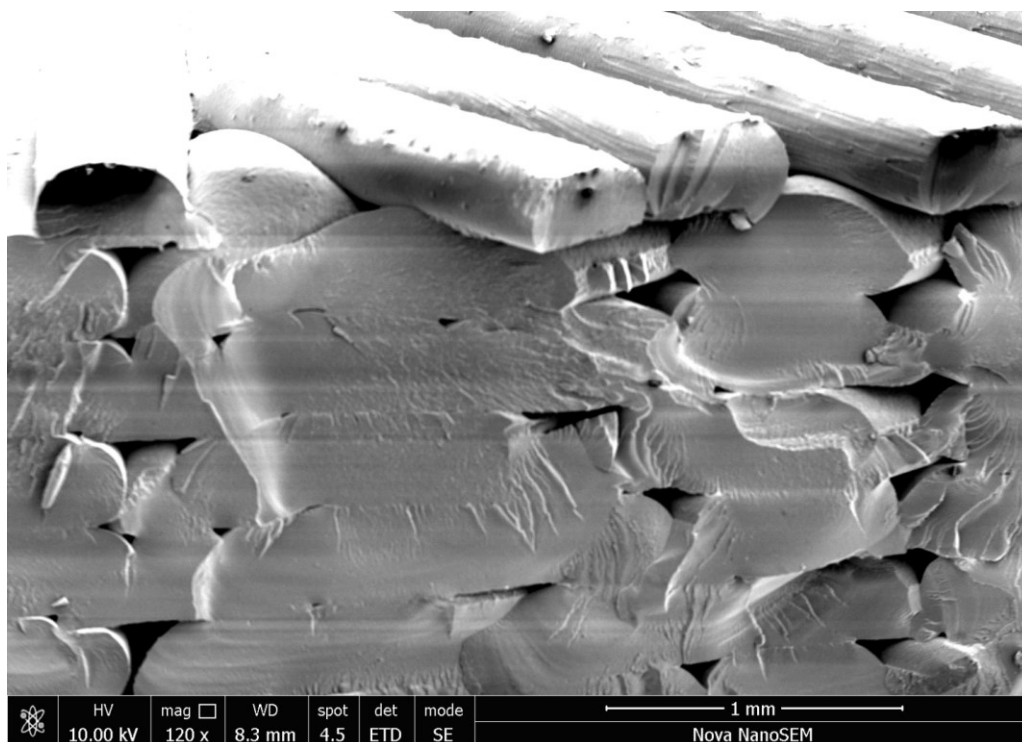
Obrázek 13 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive ABS, Lankeda (5 μm)

### 3.2.2 Conductive PLA, Protopasta

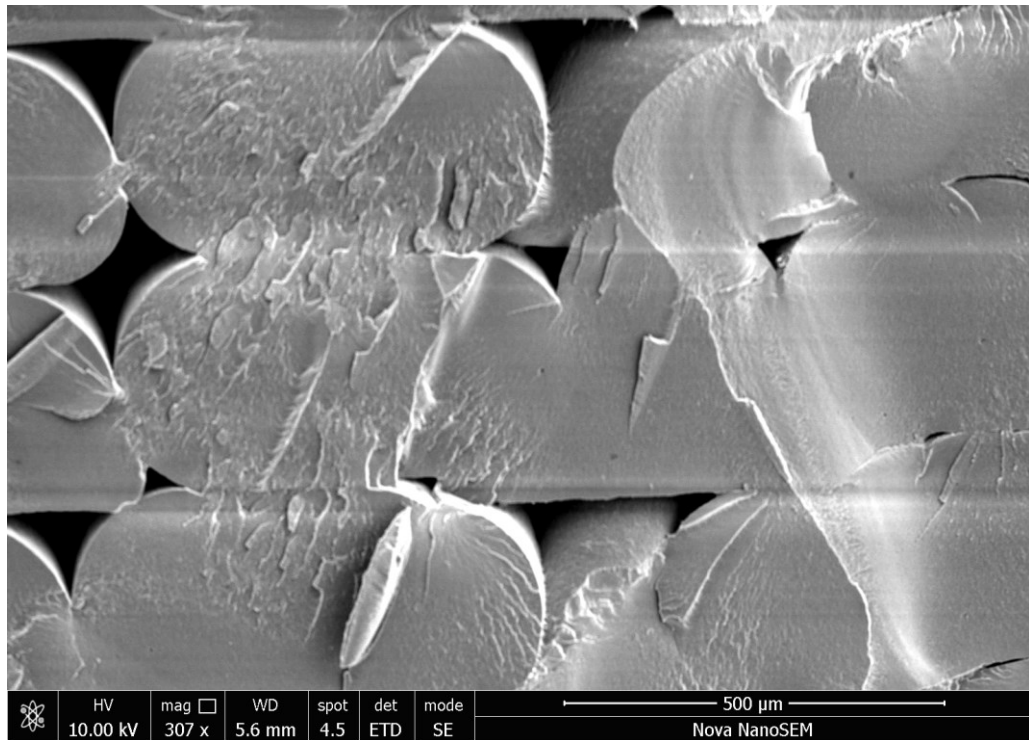
Kompozitní filament, jehož matrice je složena z PLA a plniva ze sazí, od firmy Protopasta. Přesné procentuální složení je obchodním tajemstvím a není uvedeno v materiálovém listě. Tato firma se také zabývá výrobou dalších kompozitních filamentů, například mezi jejich produkty spadá také magnetický filament, u kterého roli výztuže zastává železo, které propůjčuje výtiskům magnetické vlastnosti. V materiálovém listě je uvedeno, že 10 cm filamentu Conductive PLA o průměru 1,75 mm má odpor pohybující se od 2 do 3 k $\Omega$ . Toto bylo ověřeno měřením na zařízení Metriso, a z Tab. 1 lze vyplývá, že naměřený odpor je roven 1,93 k $\Omega$ , což přibližně odpovídá údajům od výrobce. Materiál se prodává po 0,5kg baleníh a pořizovací cena za 1 kg materiálu je 3180 Kč s DPH.

#### 3.2.2.1 SEM, Mikroskopie Lomu

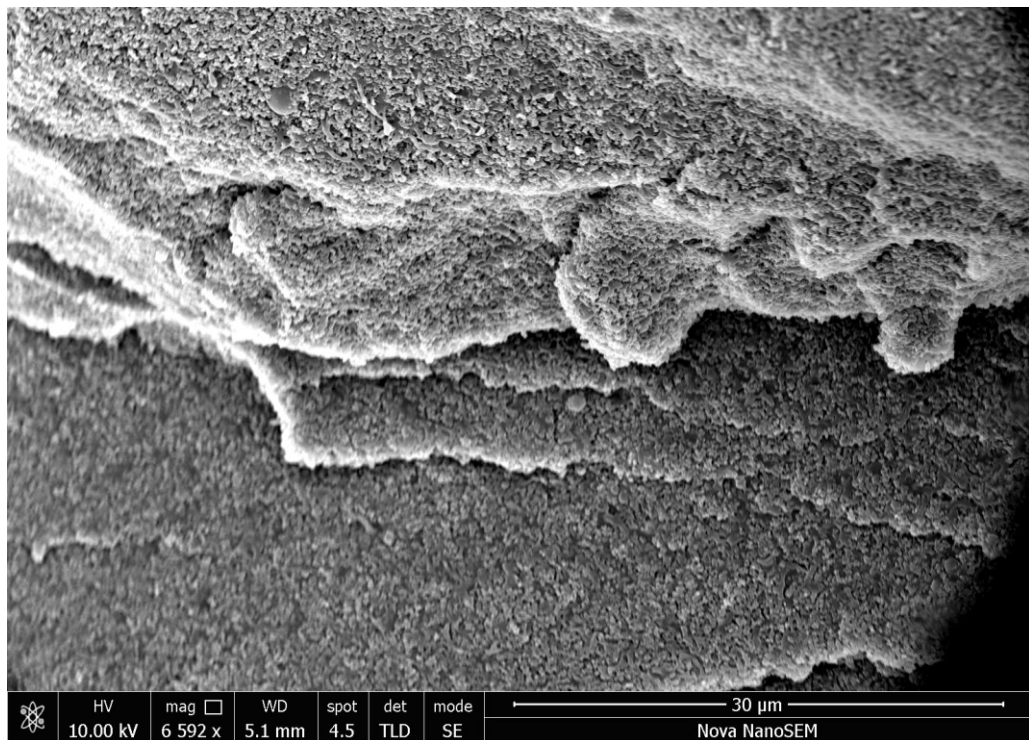
Opět byly pořízeny snímky lomu pomocí SEM a okamžitě si lze na Obr. 14 a Obr. 15 povšimnout, že vrstvy jsou mnohem lépe spojeny, než tomu bylo u materiálu ABS. Na těchto obrázcích si lze všimnout vrstvené struktury, která vzniká během procesu 3D tisku. Na Obr. 19 je možné rozpoznat plnivo v podobě aglomerátů sazí a matrici, jenž představuje PLA.



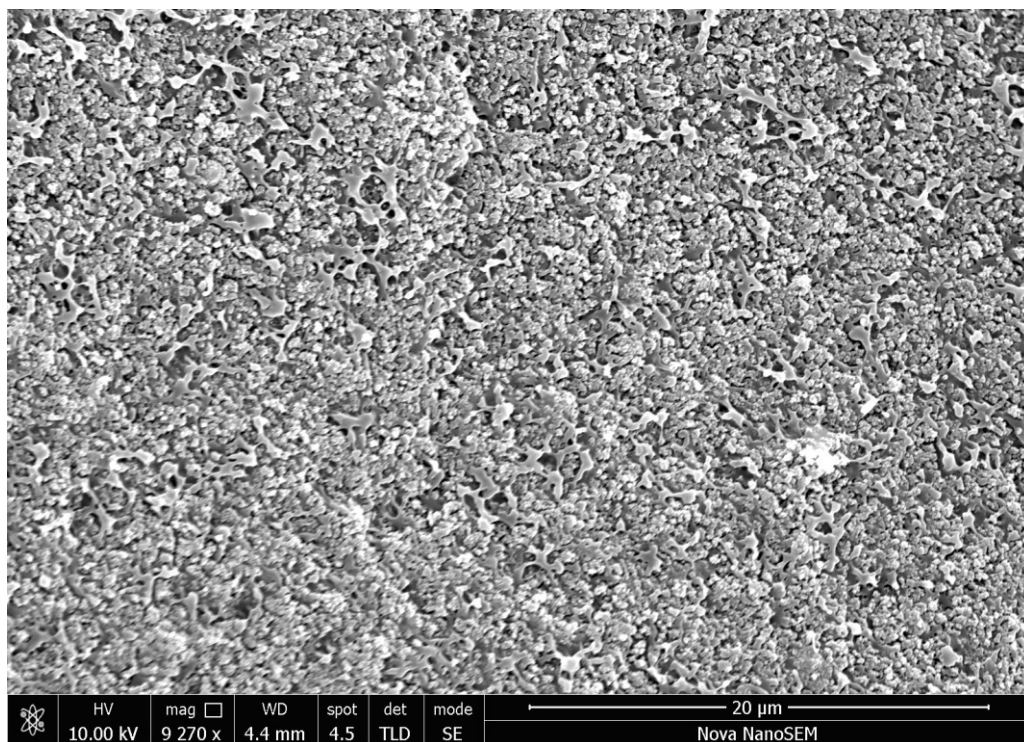
Obrázek 14 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (1 mm)



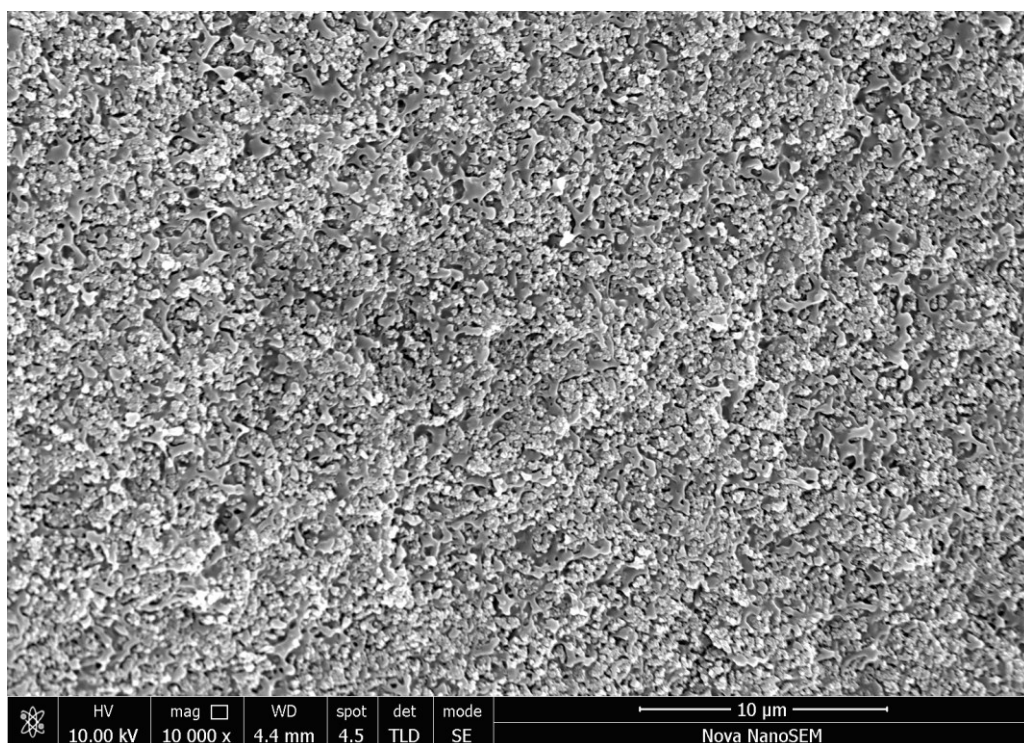
Obrázek 15 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (500 μm)



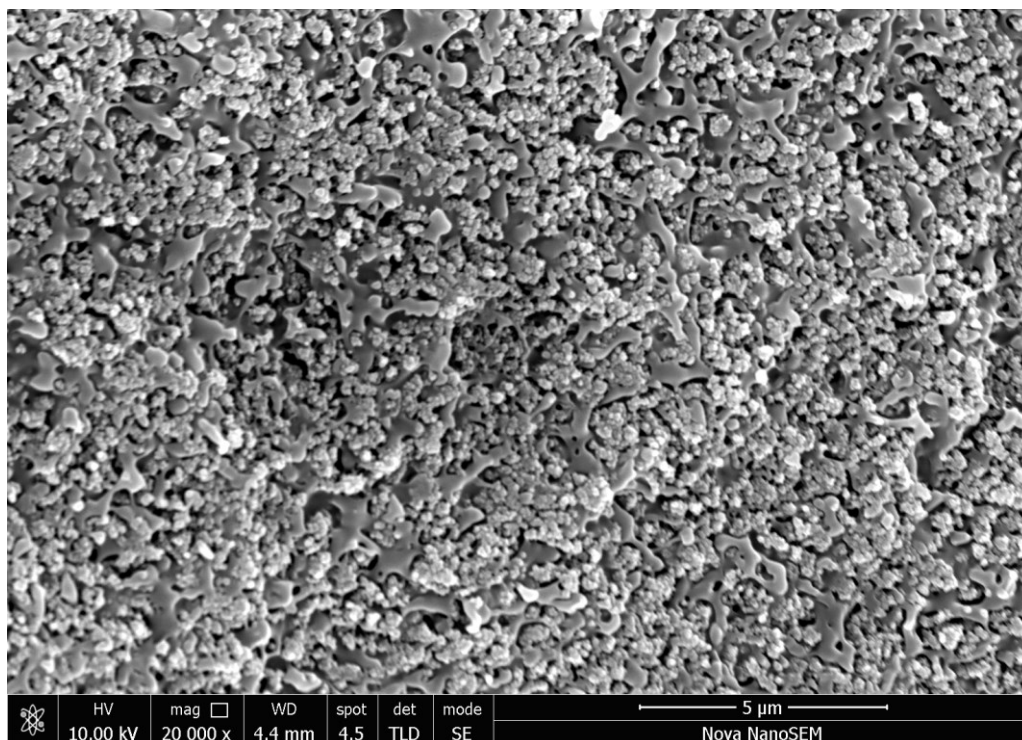
Obrázek 16 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (30 μm)



Obrázek 17 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (20 μm)



Obrázek 18 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (10 μm)



Obrázek 19 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (5  $\mu\text{m}$ )

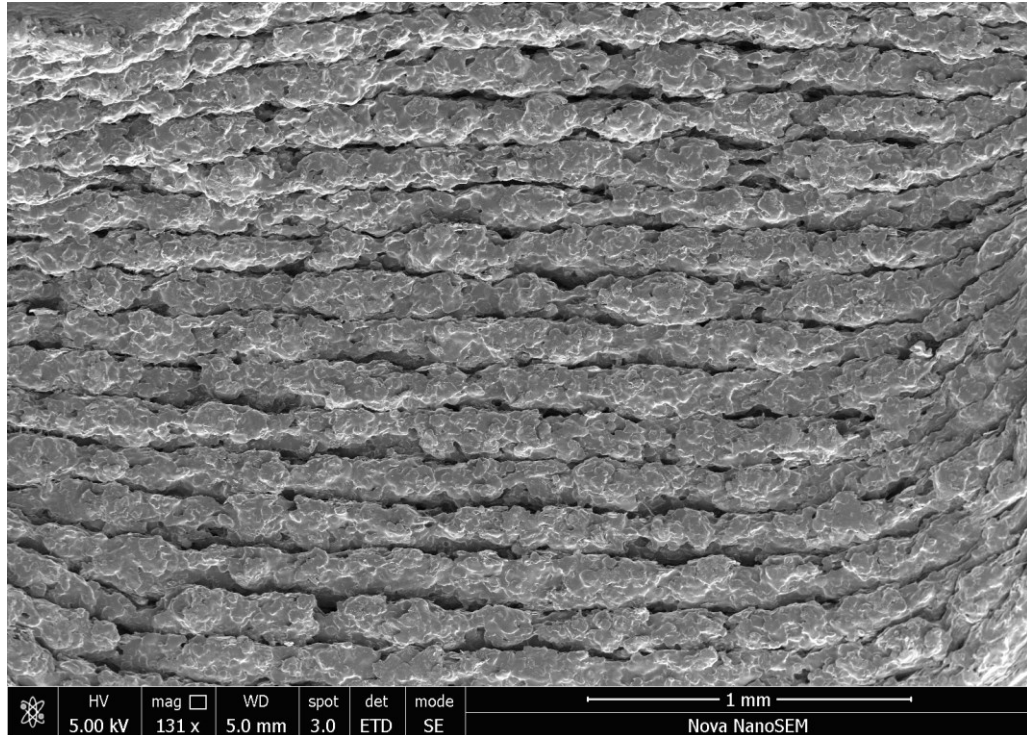
### 3.2.3 Electrifi, Multi3D

Electrifi je produktem firmy Multi3D, jehož matrici tvoří polyester, který je doplněn o plnivo v podobě mědi. Přesné procentuální složení je obchodním tajemstvím a není uvedeno. Opět byl pomocí zařízení Metriso změřen odpor na 10 cm filamentu o průměru 1,75 mm, a toto měření poskytlo výsledek 23  $\Omega$ , což je skoro 84krát méně, než Conductive PLA od firmy Protopasta a více jak 26000krát méně než ABS. Takový výsledek samozřejmě poukazuje na fakt, že Electrifi je opravdu nejvíce vodivý ze 3 materiálů využitých v této práci, nicméně na stránkách výrobce Multi3D uvádějí, že odpor na 10,9 cm filamentu o průměru 1,75 mm je 2,5  $\Omega$ . Tento rozdíl mohl být způsoben parazitním přechodovým odporem, jenž vzniká na spoji vodičů. Materiál se prodává po 100g balení, které vycházejí na 215 \$, což v přepočtu (při kurzu 1 \$ = 23,69 Kč) vychází na přibližně 5100 Kč za 100 g, tudíž 1 kg materiálu vyjde přibližně na 51 000 Kč.

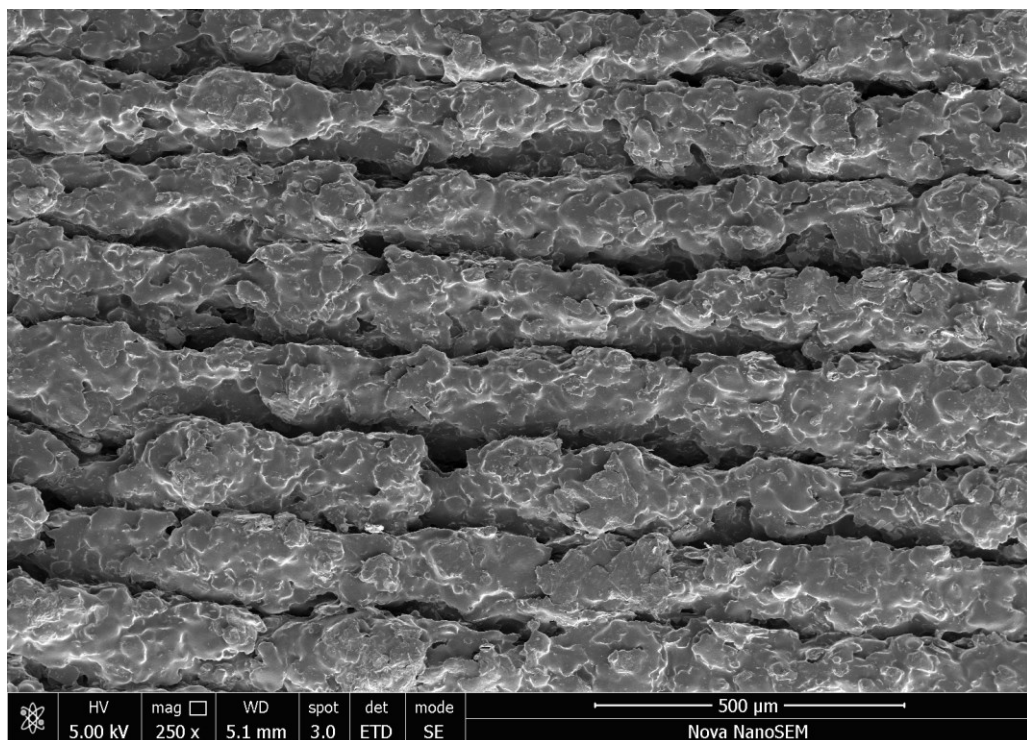
#### 3.2.3.1 SEM, Mikroskopie Lomu

Pomocí SEM byly i u tohoto materiálu pořízeny snímky lomu výtisku, kde například na Obr. 20 lze, podobně jako u ostatních materiálů, vidět jednotlivé vrstvy vzniklé během procesu 3D tisku. Na Obr. 26 lze vidět měděné plnivo v podobě povrchových nerovností.

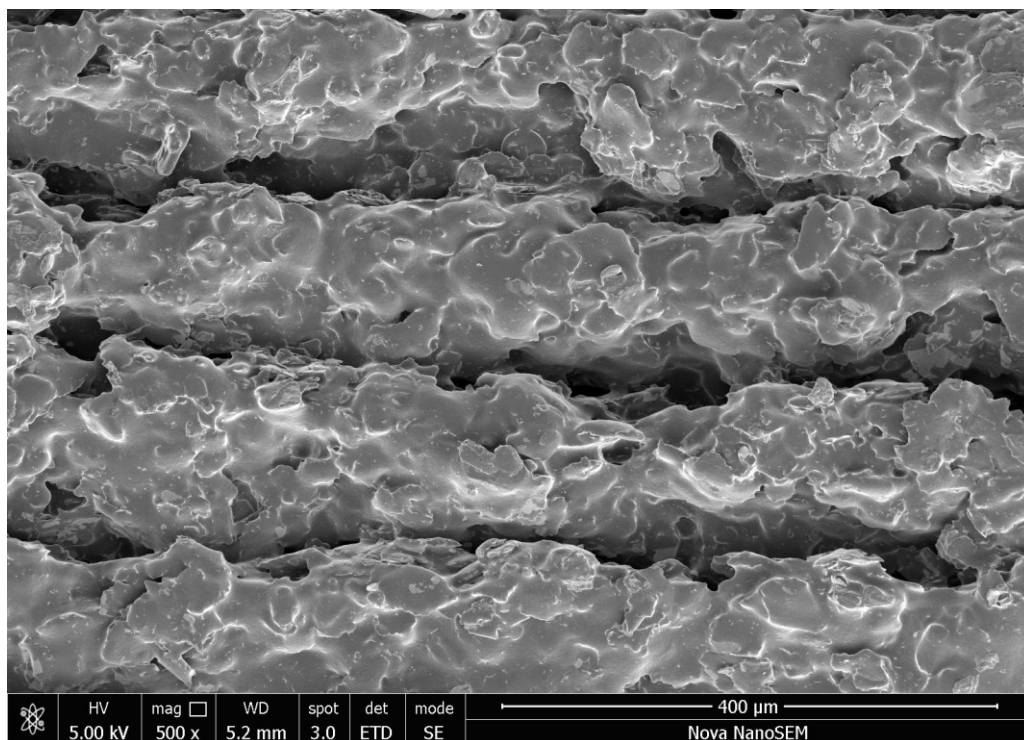
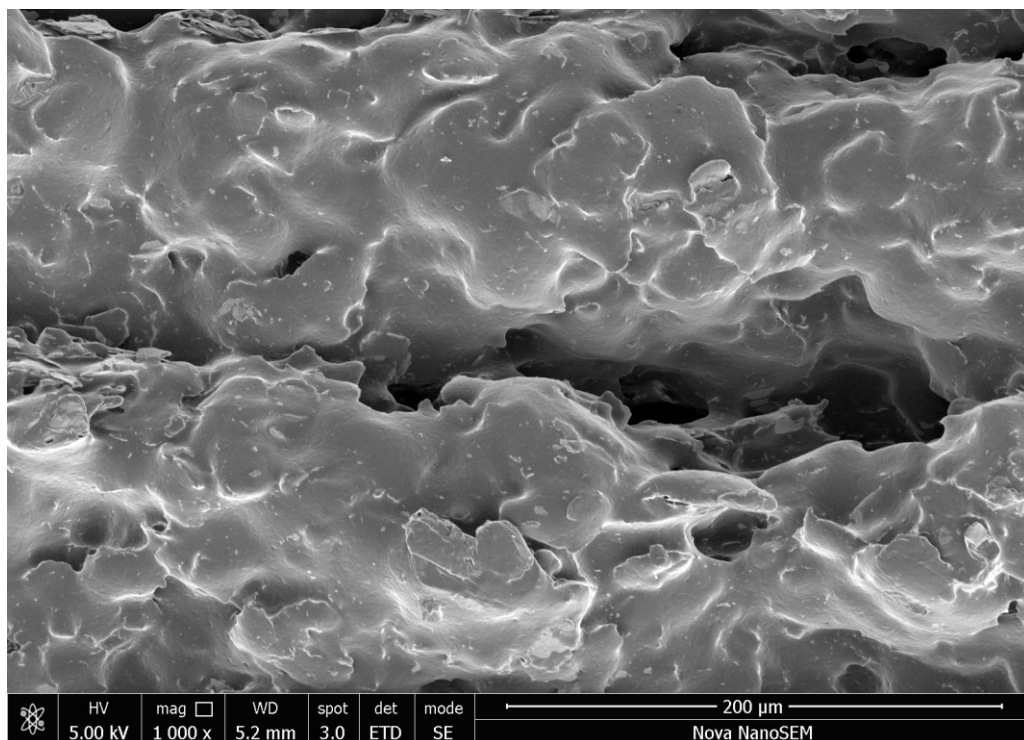
Tato měď je rovnoměrně distribuována v polymerní matrici, která je složena z polyesteru. Využitím materiálu s nízkým odporem byl taky snížen přechodový odpor mezi jednotlivými vrstvami.



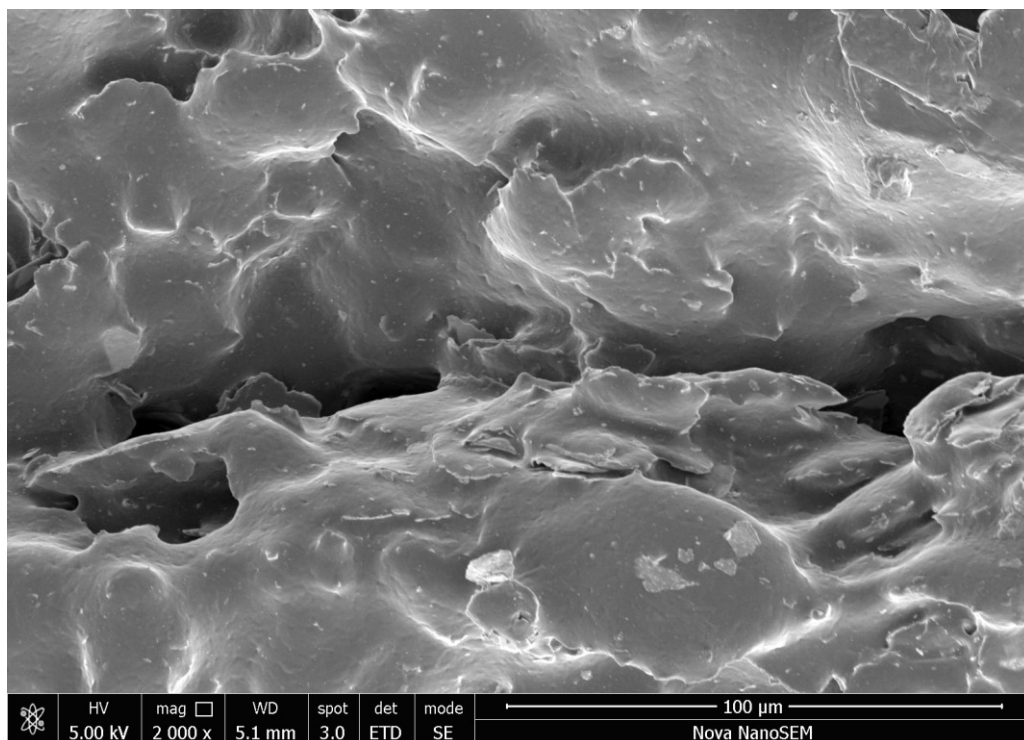
Obrázek 20 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (1 mm)



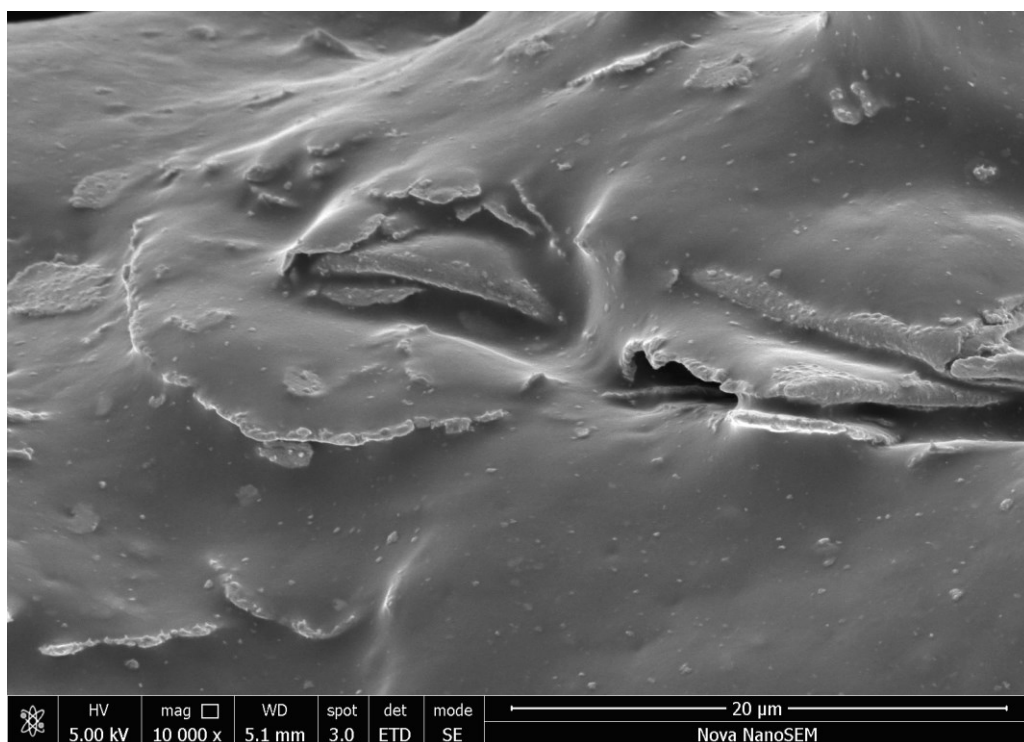
Obrázek 21 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (500 μm)

Obrázek 22 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (400  $\mu$ m)Obrázek 23 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (200  $\mu$ m)

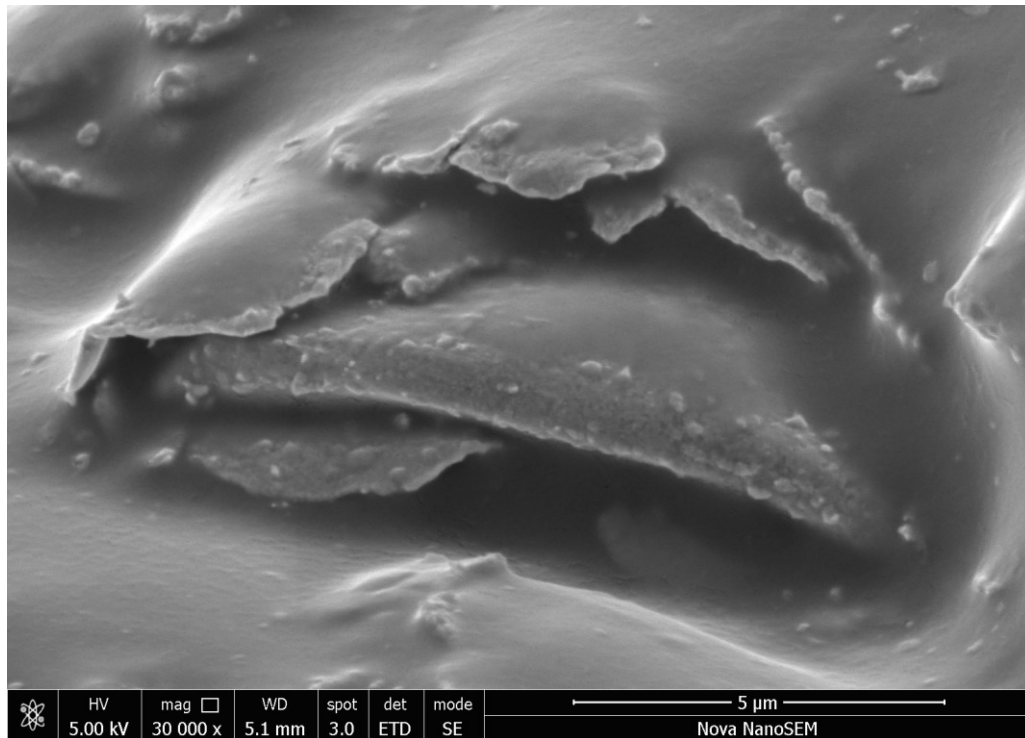
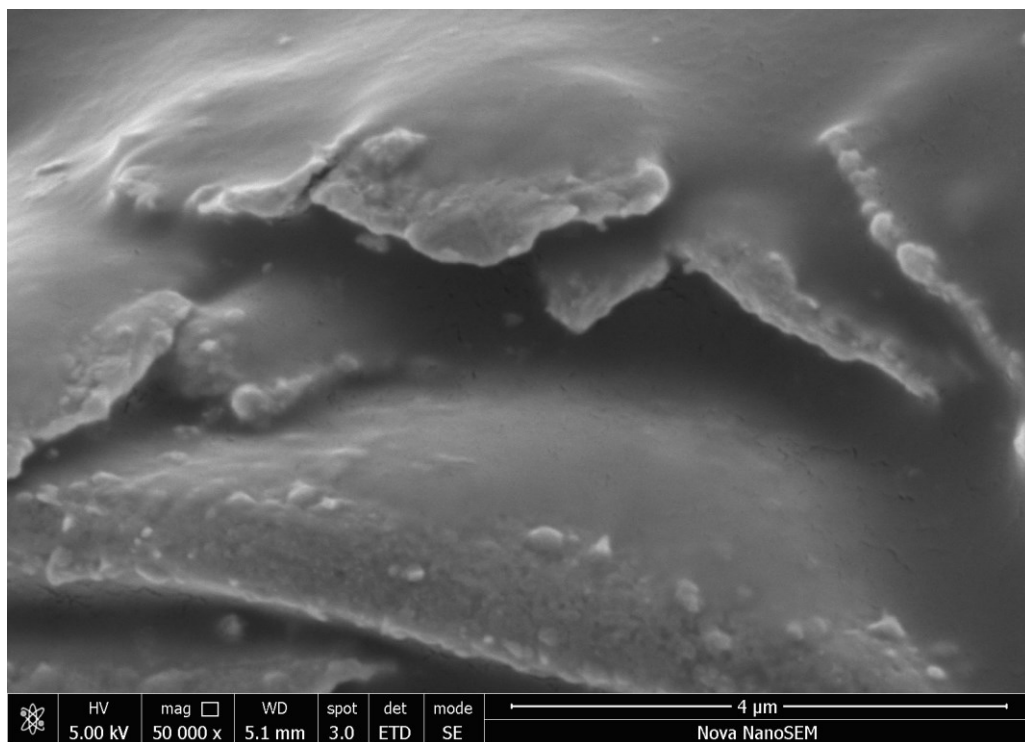


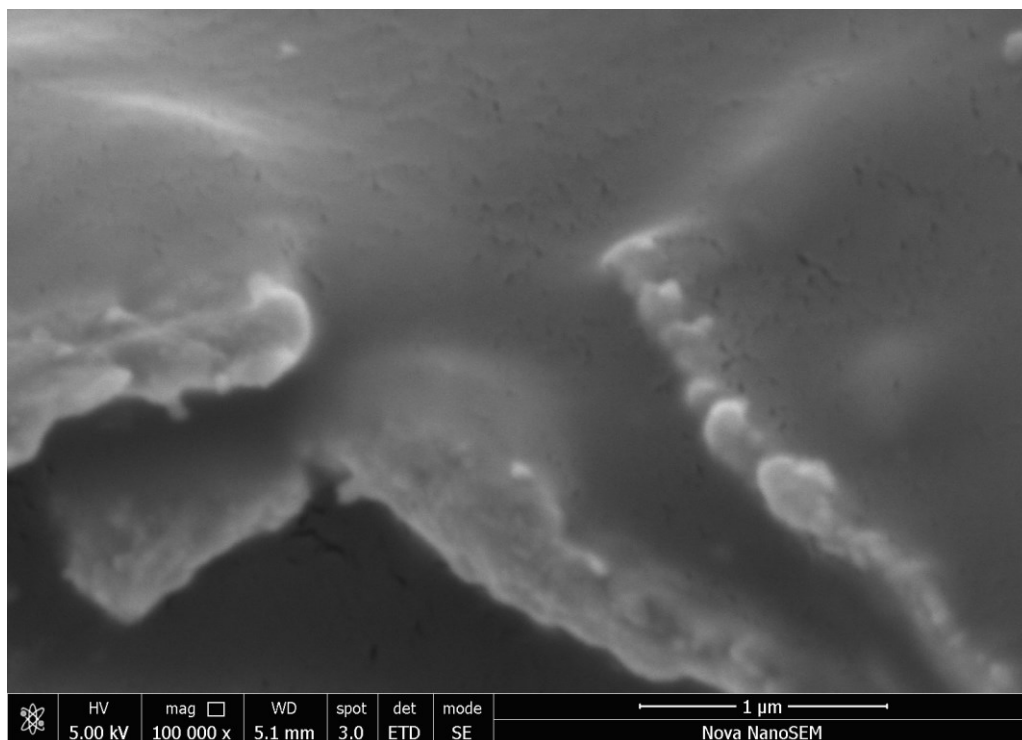


Obrázek 24 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (100 μm)



Obrázek 25 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (20 μm)

Obrázek 26 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (5  $\mu$ m)Obrázek 27 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (4  $\mu$ m)

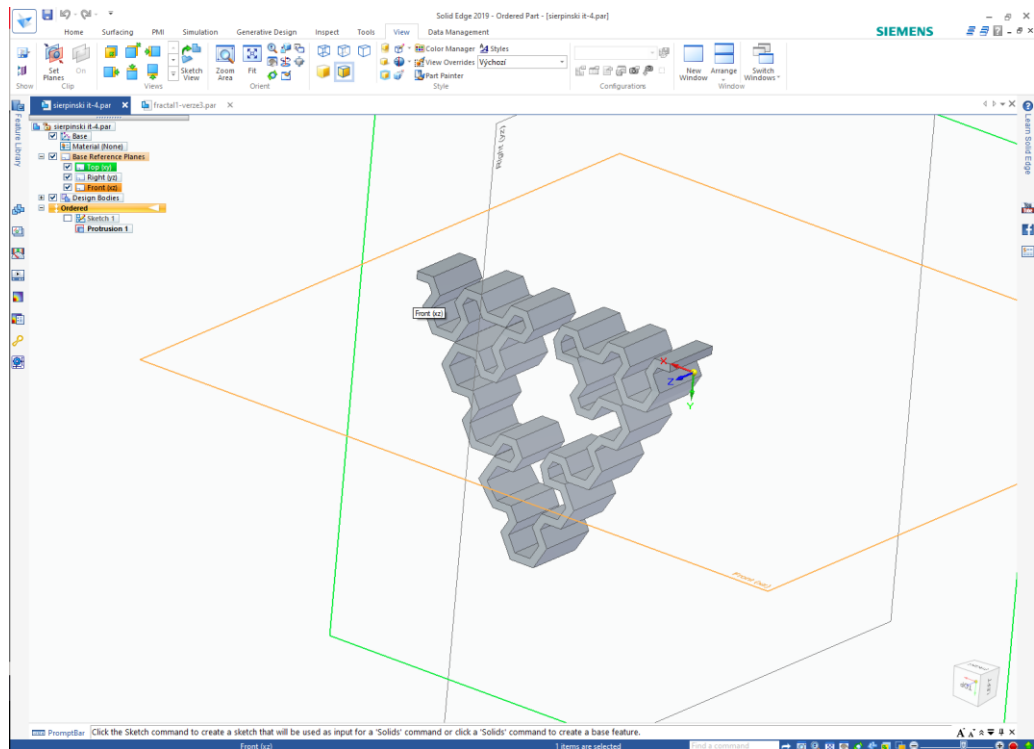


Obrázek 28 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (1  $\mu\text{m}$ )

### 3.3 Návrh a tisk antén

Bylo vybráno 6 tvarů, podle kterých budou jednotlivé antény vytištěny. Tyto tvary by se daly rozdělit do 3 skupin po 2, neboť každé dva tvary ze stejné skupiny spolu nějak souvisejí. Například první dva tvary jsou výhradně unipóly lišící se pouze délkou, dále třetí a čtvrtý tvar je založen na Sierpiňského křivce a odlišují se pouze rozdílnou iterací, a proto by bylo vhodné je porovnat v rámci skupiny a jednoho materiálu, ale také i napříč všemi využitými materiály, neboť například využití jiné iterace antény založené na Sierpiňského křivce může znamenat jiné frekvence, na kterých anténa rezonuje.

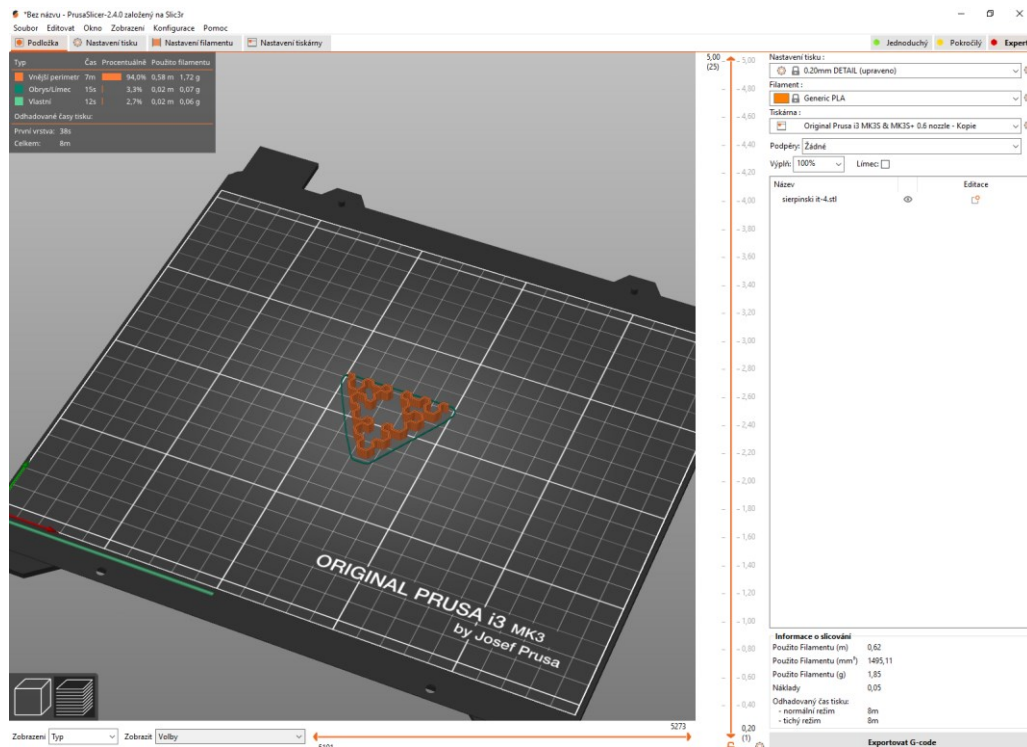
Prvotně bylo nutné pro každý tvar vytvořit 3D model. Toto umožňují různé 3D CAD programy, mezi ně se řadí například Autodesk Inventor, Autodesk Fusion 360, Solid Edge a CATIA. K tvorbě těchto modelů posloužil již zmíněný Solid Edge 2019, který vzhledem k jednoduchosti vybraných tvarů byl naprosto dostačující.



Obrázek 29 Solid Edge 2019

Jak již bylo zmíněno, kvůli jednoduchosti tvarů nebylo potřeba využít složitějších funkcí, a tudíž se během modelování využilo jen základních příkazů, jako třeba Vysunutí profilu, Vyříznutí profilem a Rotace profilu.

Dále bylo nutné převést jednotlivé modely z formátu .PAR na soubor s příponou .STL. Tuto konverzi umožňuje přímo v programu většina 3D CAD softwarů a Solid Edge 2019 není výjimkou. Tento soubor byl vložen do programu, jenž se obecně nazývá „slicer“. Tento software vložený model rozdělí na vrstvy, a tím i vytvoří seznam příkazů pro tiskárnu, jenž se nazývá „G-KÓD“. Opět existuje těchto programů nepřeberné množství, a patří mezi ně například patří PrusaSlicer, Cura, Slic3r, OctoPrint atd.



Obrázek 30 PrusaSlicer

Vzhledem k využití 3D tiskárny Prusa MK3S+ na tisk antén, byl v rámci této práce využit PrusaSlicer od stejné firmy, což zaručuje 100% kompatibilitu mezi slicerem a tiskárnou, tudíž i vytvořeným g-kódem. Pro každý materiál bylo v tomto programu vytvořeno nastavení, jenž se primárně skládá z teploty trysky a teploty podložky.

Tabulka 2 Podmínky tisku jednotlivých materiálů

Materiál	Výrobce	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]
Conductive ABS	Lankeda	255	100
Conductive PLA	Protopasta	215	50
Electrifi	Multi3D	150	30

Výtisky obvykle nejsou zcela vyplněné, obzvláště kvůli snížení spotřeby materiálu, avšak v tomto případě bylo 100% vyplnění žádoucí, neboť by mohlo dojít k negativnímu ovlivnění vodivosti výtisků. Po exportu g-kódu na SD kartu a vložení karty do tiskárny došlo k spuštění tisku.

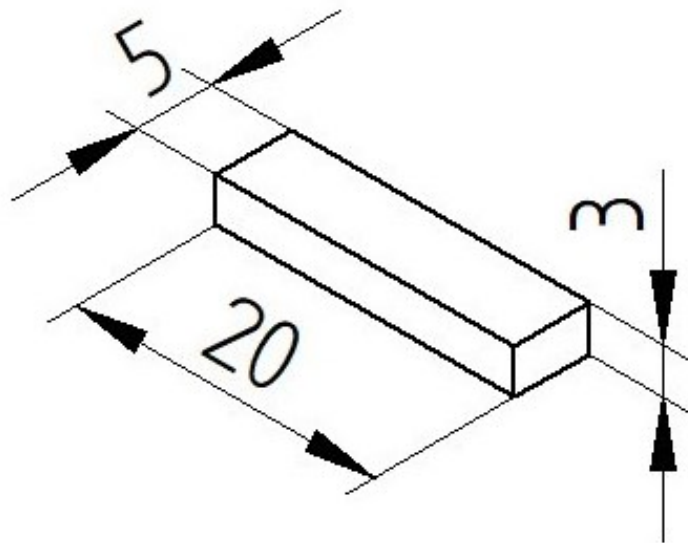
Během tisku s materiály ABS (Lankeda) a PLA (Protopasta) nevznikly žádné problémy a tisk probíhal stejně jako s materiály bez plniva. Výjimkou byl materiál Electrifi, kvůli kterému bylo nutné připsat jeden řádek do g-kódu, konkrétně „M302 S140“, který umožnil tisk při teplotách vhodných pro tisk s Electrifi (Multi3D), což podle Tab. 2 je 150 °C. Toto bylo nutné kvůli tomu, že tiskárna Prusa MK3S+ má ve svém zdrojovém kódu příkaz, který

zastavuje krokový motor, jenž otáčí BondTech kolečky (čímž se přeruší doprava filamentu do extruderu), v případě, že teplota klesne pod 190 °C. Kvůli měkkosti tohoto materiálu také při průchodu filamentu zmíněnými BondTech kolečky, které dopravují filament do extruderu, docházelo k přilehnutí filamentu k jednomu z koleček, čímž došlo k ucpání extruderu. Tento problém byl nakonec vyřešen zvýšením vzdálenosti mezi kolečky.

### 3.4 Anténa č. 1, Unipól 20 mm

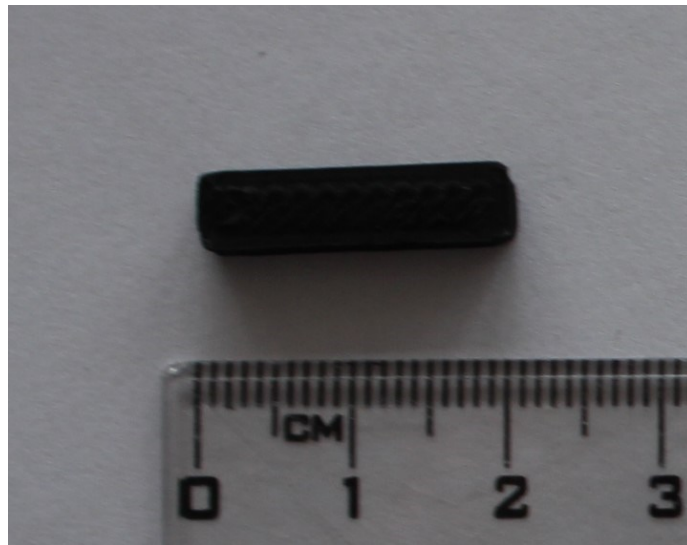
Anténa typu unipól byla připravena dle návrhu Obr. 31. Tvar a rozměry antény byly zvoleny z důvodů prověření možnosti tisku jednoduchých antén typu unipól z materiálů PLA (Protopasta), ABS (Lankeda) a Electrifi (Multi3D) předtím, než dojde k tisku složitějších tvarů, jako třeba Sierpiňského křivky. Jedná se také o velmi často používaný typ antén, který jak již bylo řečeno, je velmi snadný na výrobu.

#### 3.4.1 Rozměry antény



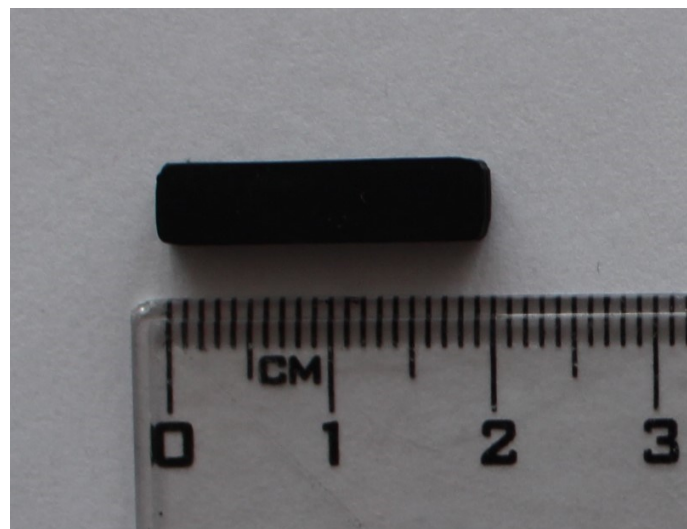
Obrázek 31 Rozměry Antény č. 1

### 3.4.2 Conductive ABS, Lankeda



Obrázek 32 ABS Anténa č. 1, Unipól 20 mm

### 3.4.3 Conductive PLA, Protopasta



Obrázek 33 PLA Anténa č. 1., Unipól 20 mm

### 3.4.4 Electrifi, Multi3D

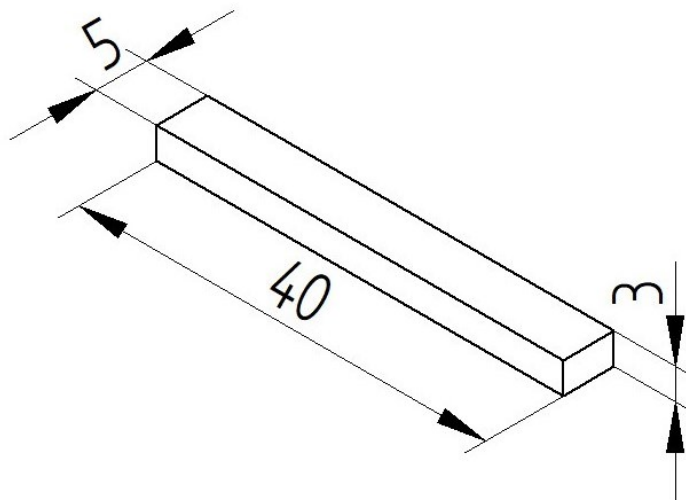


Obrázek 34 Electrifi Anténa č. 1, Unipól 20 mm

### 3.5 Anténa č.2 Unipól 40 mm

Anténa typu unipól byla připravena dle návrhu Obr. 35. Tvar a rozměry antény byly opět zvoleny z důvodů prověření možnosti tisku jednoduchých antén typu unipól z materiálů PLA (Protopasta), ABS (Lankeda) a Electrifi (Multi3D) předtím, než dojde k tisku složitějších tvarů, jako třeba Sierpiňského křivky. Oproti Anténě č. 1 je o 20 mm delší, což má vliv na zisk a frekvenci, na které anténa rezonuje nejvíce. Tento vliv délky na vyzařovací vlastnosti antény je popsán v kapitole Výsledky a diskuze.

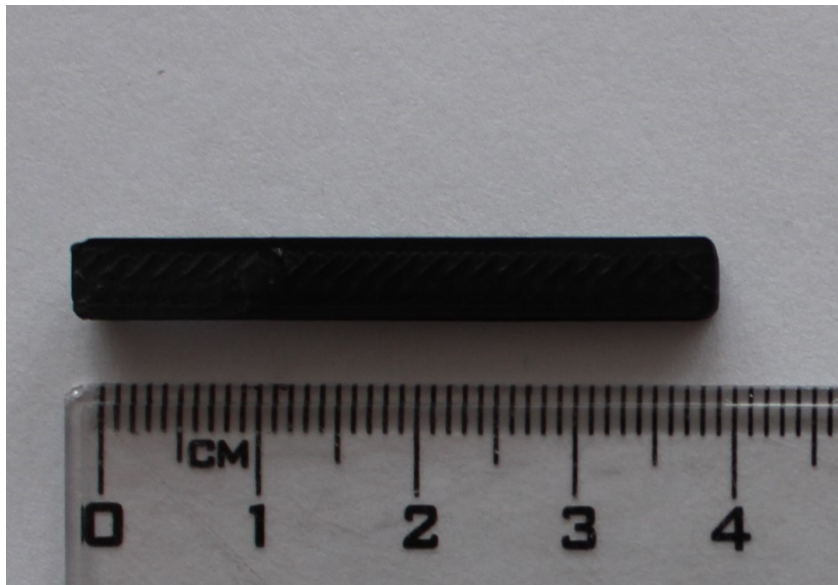
#### 3.5.1 Rozměry antény



Obrázek 35 Rozměry Antény č. 2

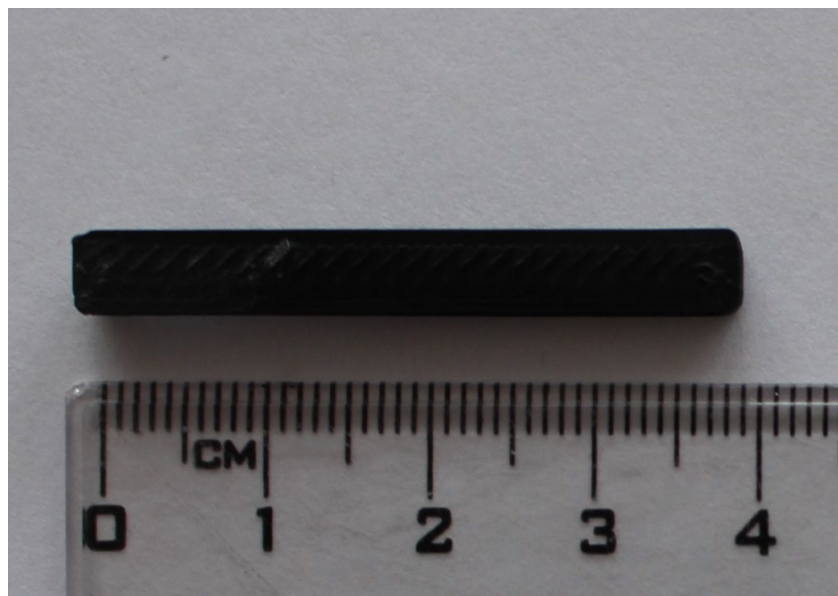


### 3.5.2 Conductive ABS, Lankeda



Obrázek 36 ABS Anténa č. 2, Unipól 40 mm

### 3.5.3 Conductive PLA, Protopasta



Obrázek 37 PLA Anténa č. 2, Unipól 40 mm

### 3.5.4 Electrifi

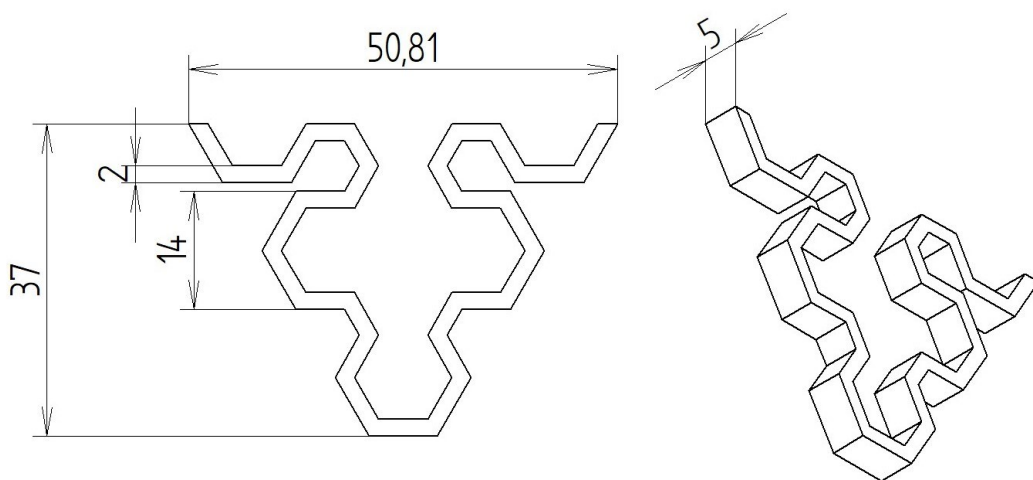


Obrázek 38 Electrifi Anténa č. 2, Unipól 40 mm

### 3.6 Anténa č. 3, fraktál Sierpiňského křivka - 3 iterace

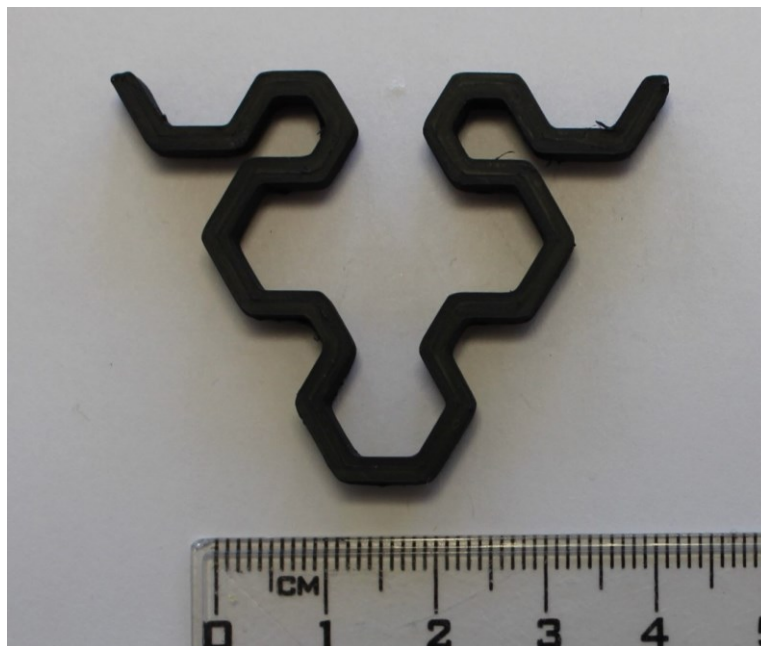
Tvar této antény, jejíž návrh a rozměry jsou na Obr. 39, je založený na takzvaném fraktálu Sierpiňského křivka, kdy v tomto případě se jedná o její 3 iteraci. Antény tvarově založené na fraktální geometrii jsou pomocí 3D tisku relativně jednoduché na výrobu. Také fakt, že fraktální antény jsou vícepásmové, což oproti standardním anténám, které jsou vhodné pouze pro určité frekvence, je důvodem pro zvolení tohoto tvaru.

#### 3.6.1 Rozměry antény



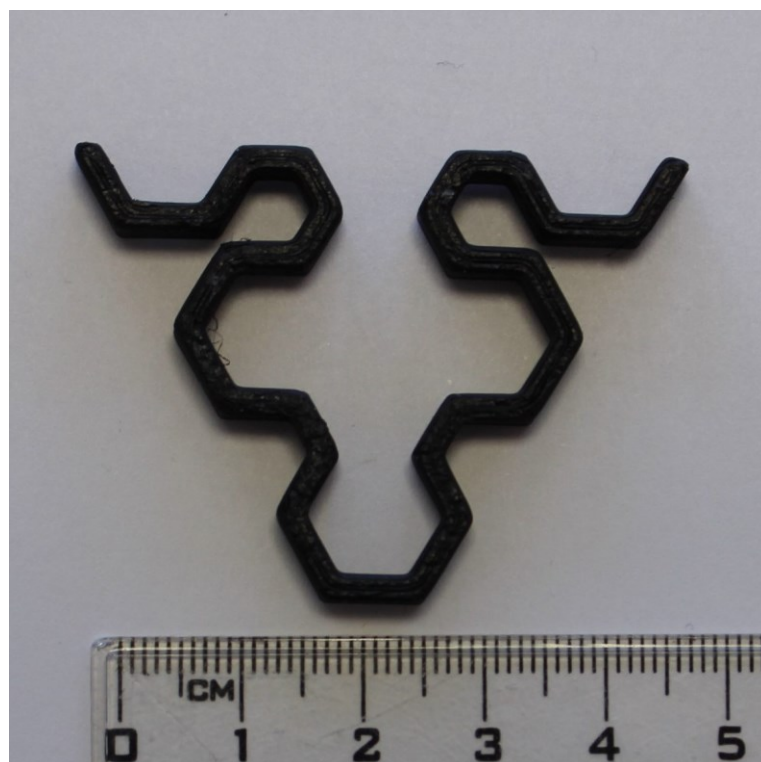
Obrázek 39 Rozměry Antény č. 3

### 3.6.2 Conductive ABS, Lankeda



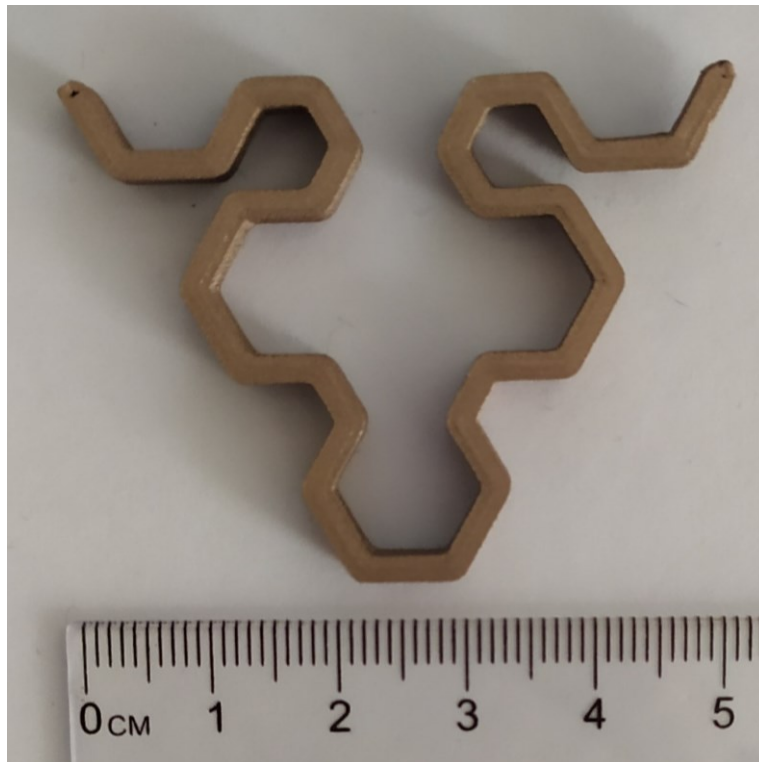
Obrázek 40 ABS Anténa č. 3, fraktál Sierpiňského křivka – 3 iterace

### 3.6.3 Conductive PLA, Protopasta



Obrázek 41 PLA Anténa č. 3, fraktál Sierpiňského křivka – 3 iterace

### 3.6.4 Electrifi

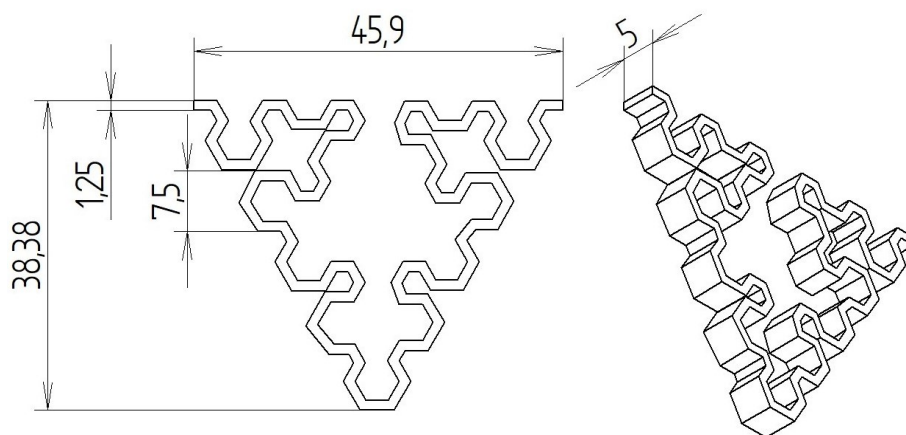


Obrázek 42 Electrifi Anténa č.3, fraktál Sierpiňského křivka – 3 iterace

### 3.7 Anténa č. 4, fraktál Sierpiňského křivka – 4 iterace

Tvar této antény, jejíž návrh a rozměry jsou na Obr. 43, je založený podobně jako Anténa č. 3 na takzvaném fraktálu Sierpiňského křivka, kdy v tomto případě se jedná o její 4 iteraci. Vliv jiné iterace fraktálu na vyzářovacích vlastnostech antény je popsán v kapitole Diskuze.

#### 3.7.1 Rozměry antény



Obrázek 43 Rozměry Antény č. 4

### 3.7.2 Conductive ABS, Lankeda



Obrázek 44 ABS Anténa č. 4, fraktál Sierpiňského křivka – 4 iterace

### 3.7.3 Conductive PLA, Protopasta



Obrázek 45 PLA Anténa č. 4, fraktál Sierpiňského křivka – 4 iterace

### 3.7.4 Electrifi

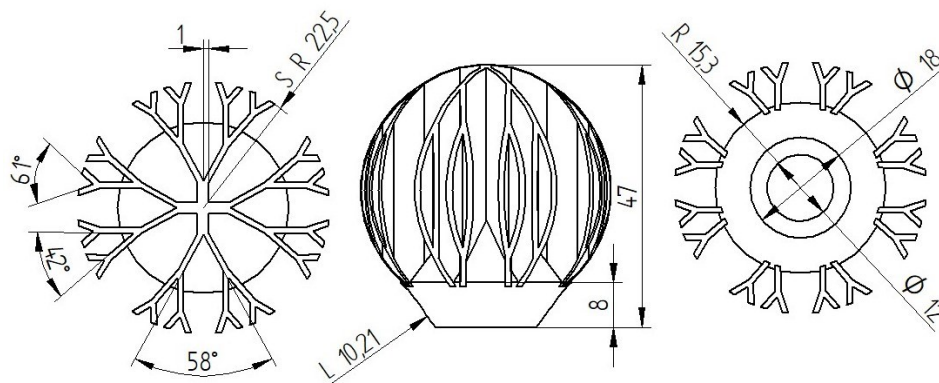


Obrázek 46 Electrifi Anténa č. 4, fraktál Sierpiňského křivka – 4 iterace

### 3.8 Anténa č. 5

Tvar této kulovité antény, jejíž návrh je na Obr. 47, je inspirován anténou od společnosti Fractal Antenna Systems [91]. Důvodem pro zvolení tohoto tvaru, bylo prověření tisknutelnosti více rozměrnějších a komplexních tvarů, než u předešlých 4 antén. Z důvodu absence STL souborů nebo výkresové dokumentace, bylo nutné anténu vymodelovat v CAD softwaru. Vzhledem k tomu, že byl materiál Electrifi (Multi3D) dostupný pouze v malém množství (celkově 100 g) a váha jednoho takového výtisku by byla kolem 50 g, byla anténa vytištěna pouze z Conductive ABS (Lankeda) a Conductive PLA (Protopasta).

### 3.8.1 Rozměry antény



Obrázek 47 Rozměry Antény č. 5

### 3.8.2 Conductive ABS, Lankeda



Obrázek 48 ABS Anténa č. 5

### 3.8.3 Conductive PLA, Protopasta



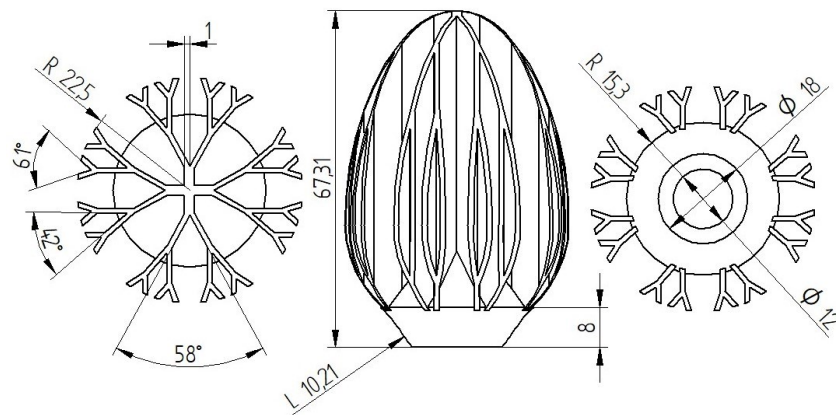
Obrázek 49 PLA Anténa č. 5

### 3.9 Anténa č. 6

Anténa č. 6, jejíž návrh je na Obr. 50, je inspirovaná anténou od společnosti Fractal Antenna Systems [91]. Anténě č. 5 je podobná, s tím rozdílem, že Anténa č. 5 je kulovitého tvaru, načež Anténa č. 6 spíše vypadá jako „tulipán“. Důvodem pro zvolení tohoto tvaru, bylo prověření tisknutelnosti více rozměrnějších a komplexních tvarů, než u předešlých 4 antén. Z důvodu absence STL souborů nebo výkresové dokumentace, bylo nutné anténu vymodelovat v CAD softwaru. Vzhledem k tomu, že byl materiál Electrifi (Multi3D) dostupný pouze v malém množství (celkově 100 g) a váha jednoho takového výtisku by byla kolem 50 g, byla anténa vytištěna pouze z Conductive ABS (Lankeda) a Conductive PLA (Protopasta).



### 3.9.1 Rozměry antény



Obrázek 50 Rozměry Antény č. 6

### 3.9.2 Conductive ABS, Lankeda



Obrázek 51 ABS Anténa č. 6

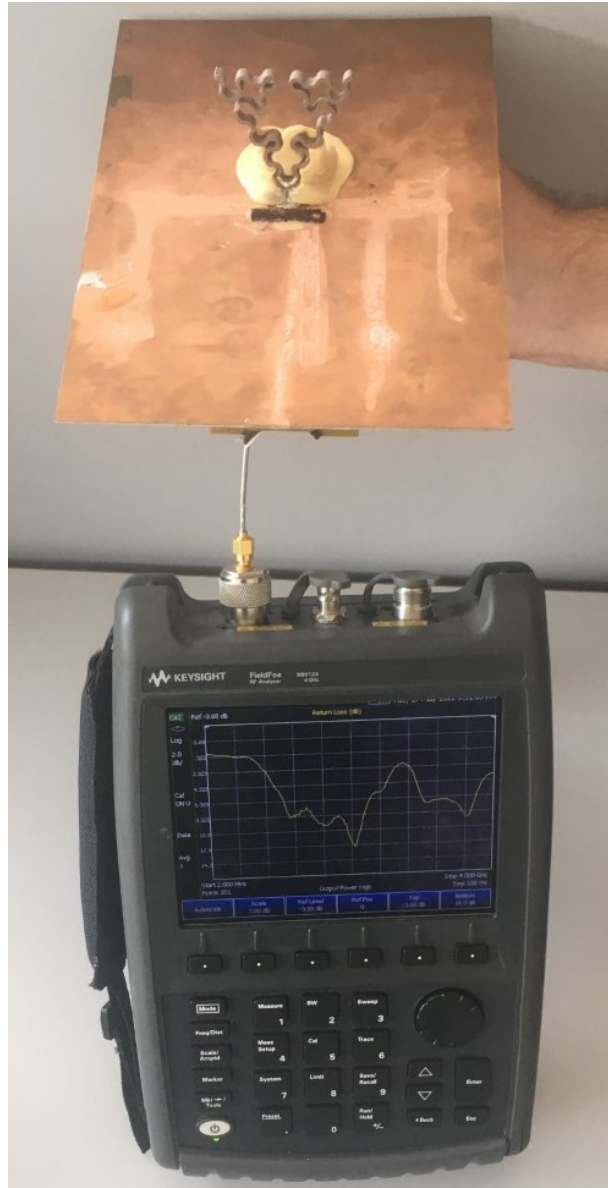
### 3.9.3 Conductive PLA, Protopasta



Obrázek 52 PLA Anténa č. 6

### 3.10 Postup měření

Prvotním krokem je upevnění antény na zemnicí rovinu. Kvůli přechodovému odporu, který vzniká ve spoji vodičů, je nutné přidat do místa spoje antény a koaxiálu stříbrnou pastu, která tento odpor mezi kontakty výrazně sníží, avšak je nutné před měřením nechat stříbrnou pastu několik hodin schnout. Před samotným měřením je zapotřebí spektrální analyzátor zkalibrovat pomocí kalibrační sady.



Obrázek 53 Měření Antény č. 4, Conductive PLA, Protopasta

Při měření dojde k zapojení koaxiálu s měřenou anténou, vyčká se na ustálení měření a je proveden záznam ve formátu .CSV na USB flash disk. Z těchto dat je následně v excelu vytvořen graf, který obsahuje na ose x frekvenci v GHz a na ose y zisk v dB.

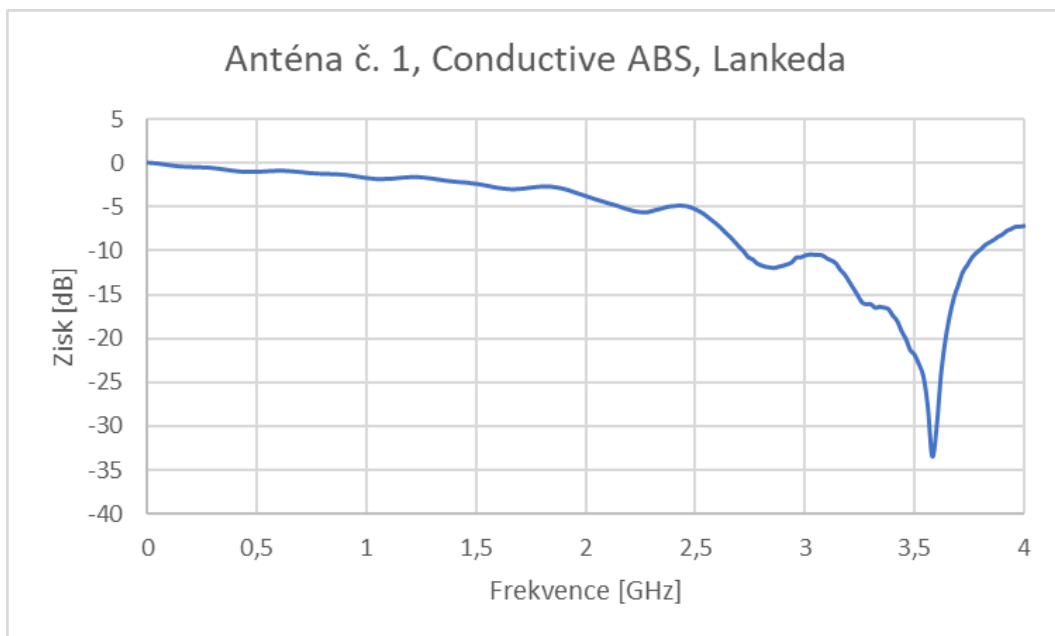
### 3.11 Výsledky měření

Tato kapitola se zabývá výsledky měření vytištěných antén. Jsou zde uvedeny grafy parametru S11 a z nich vyplývající popis frekvencí, na které jsou antény nejlépe přizpůsobeny.

### 3.11.1 Anténa č. 1, Unipól 20 mm

#### 3.11.1.1 *Conductive ABS, Lankeda*

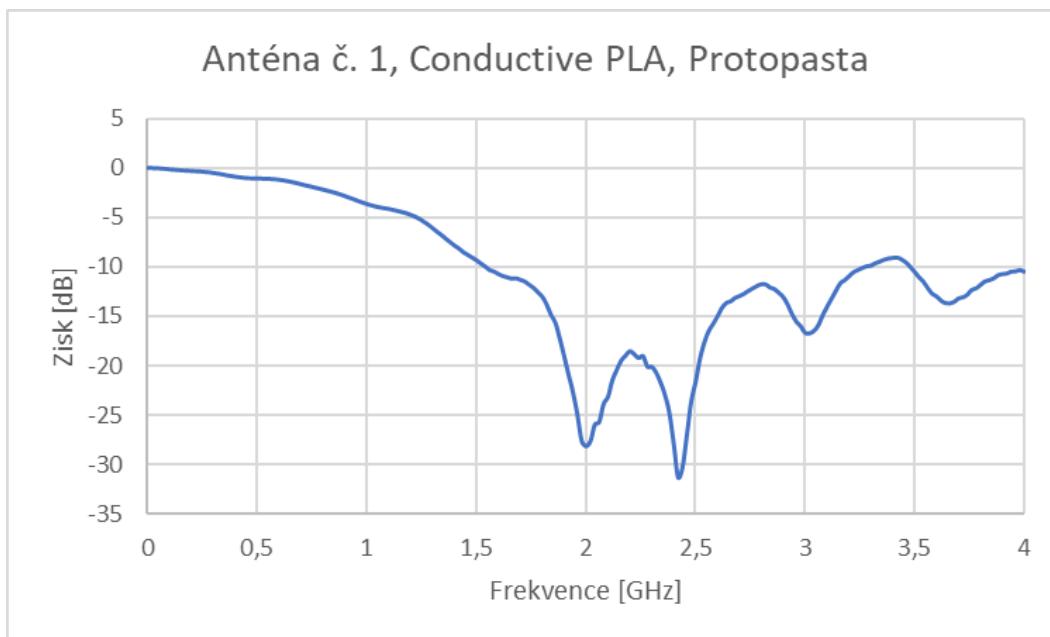
Podle Obr. 54 Anténa č. 1, vytištěná z materiálu Conductive ABS od výrobce Lankeda, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 3,580 GHz, na které má zisk -33,421 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 2,260 GHz a 2,861 GHz, na kterých má zisk -5,621 dB a -11,964 dB. Vzhledem k tomu, že průběh grafu je symetrický podle osy kmitny zisku, lze předpokládat, že anténa bude dobře přizpůsobena na minimálně další jedné frekvenci, která je vyšší než 4GHz. Z důvodu omezeného frekvenčního rozsahu měřicího přístroje nebylo možné tyto vyšší frekvence proměřit.



Obrázek 54 Graf parametru S11 Antény č. 1, Conductive ABS (Lankeda)

#### 3.11.1.2 *Conductive PLA, Protopasta*

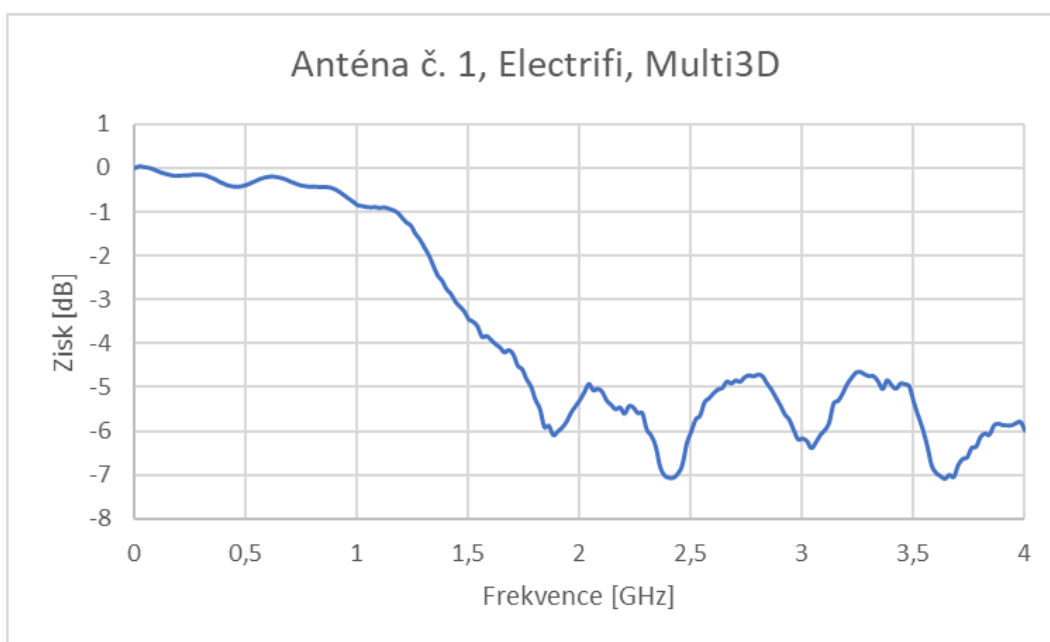
Podle Obr. 55 Anténa č. 1, vytištěná z materiálu Conductive PLA od výrobce Protopasta, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 2,421 GHz se ziskem -31,317 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvenci 2,001 GHz, na které má zisk -28,150 dB. Hůře je anténa přizpůsobena na frekvence 3,020 GHz a 3,660 GHz, na kterých je zisk antény -16,724 dB a -13,695 dB.



Obrázek 55 Graf parametru S11 Antény č. 1, Conductive PLA (Protopasta)

### 3.11.1.3 Electrifi, Multi3D

Podle Obr. 56 Anténa č. 1, vtištěná z materiálu Electrifi od výrobce Multi3D, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 3,620 GHz, na které má zisk -7,077 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 1,861 GHz; 2,400 GHz a 3,020 GHz, na kterých má zisk -6,083 dB; -7,053 dB a -6,382 dB. Vzhledem k omezenému frekvenčnímu rozsahu měřicího přístroje, nebylo možné určit, zda anténa není lépe přizpůsobena ve vyšších frekvenčních pásmech, jelikož lze vidět z grafu, že zisk má opět po 4GHz tendenci růst.

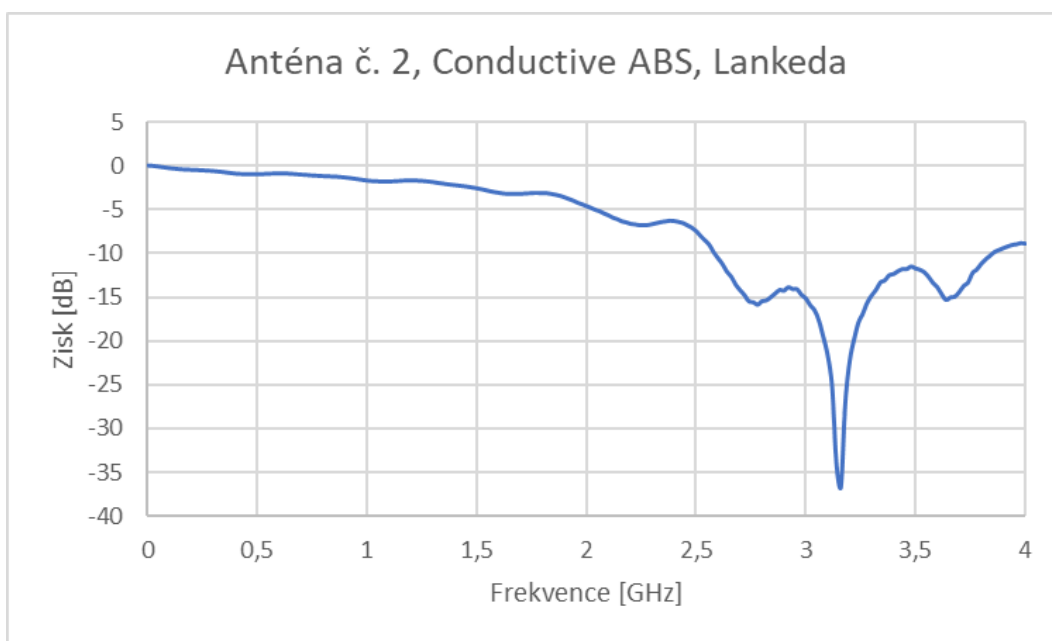


Obrázek 56 Graf parametru S11 Antény č. 1, Electrifi (Multi3D)

### 3.11.2 Anténa č. 2, Unipól 40 mm

#### 3.11.2.1 *Conductive ABS, Lankeda*

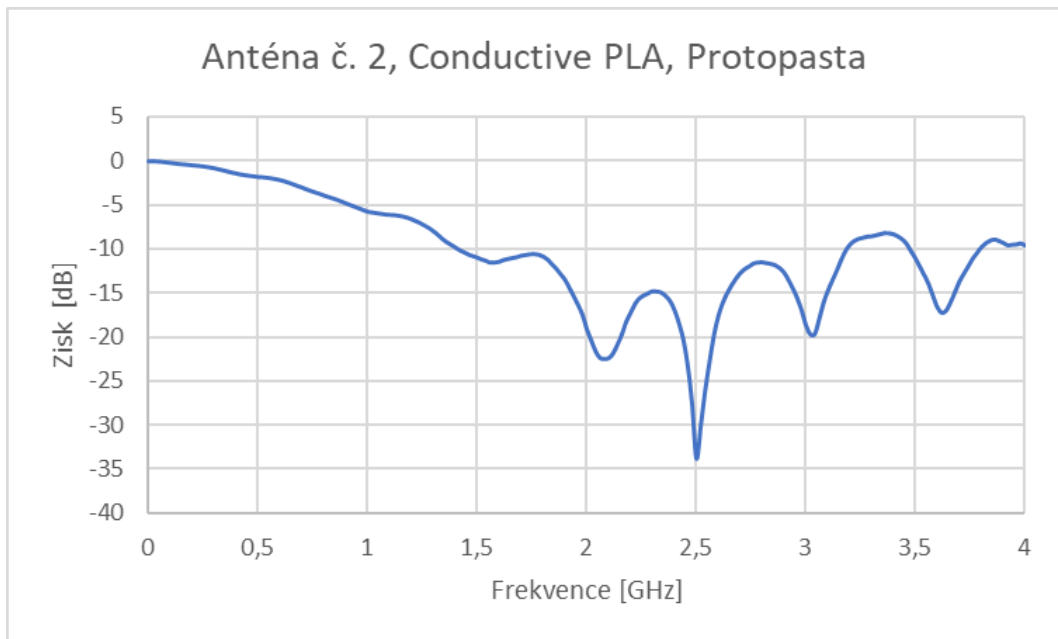
Podle Obr. 57 Anténa č. 2, vytištěná z materiálu Conductive ABS od výrobce Lankeda, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 3,160 GHz, na které má zisk -36,664 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 2,261 GHz; 2,780 GHz a 3,640 GHz, na kterých má zisk -6,803 dB; -15,858 dB a -15,321 dB.



Obrázek 57 Graf parametru S11 Antény č. 2, Conductive ABS, Lankeda

#### 3.11.2.2 *Conductive PLA, Protopasta*

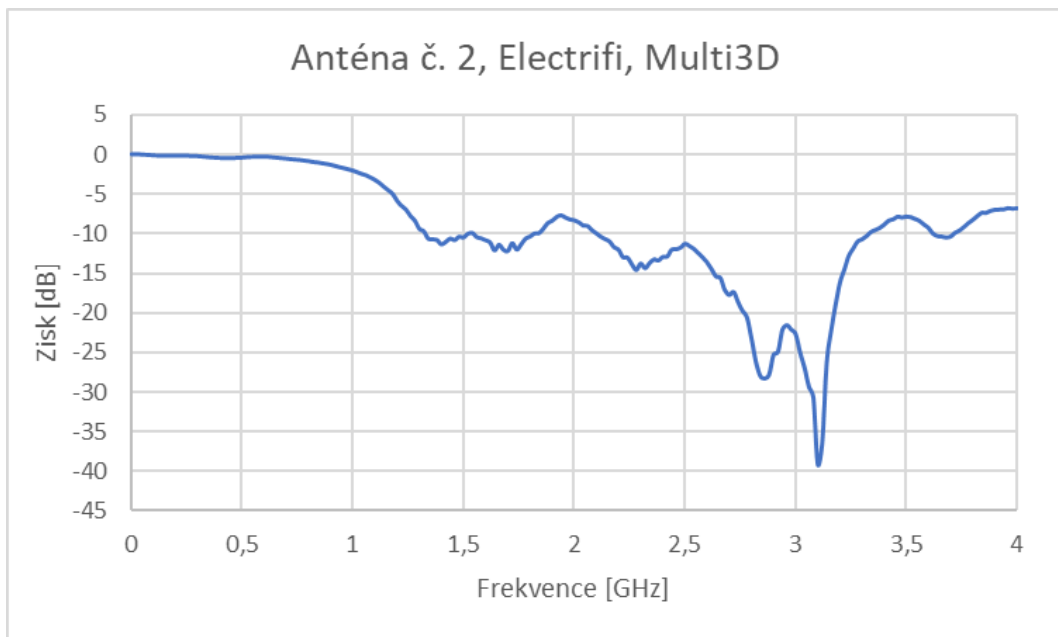
Podle Obr. 58 Anténa č. 2, vytištěná z materiálu Conductive PLA od výrobce Protopasta, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 2,500 GHz, na které má zisk -33,842 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 1,661 GHz; 2,081 GHz; 3,020 GHz a 3,620 GHz, na kterých je zisk antény -10,996 dB; -22,486 dB; -19,697 dB a -17,237 dB.



Obrázek 58 Graf parametru S11 Antény č. 2, Conductive PLA (Protospasta)

### 3.11.2.3 Electrifi, Multi3D

Podle Obr. 59 Anténa č. 2, vytištěná z materiálu Electrifi od výrobce Multi3D, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 3,100 GHz, na které má zisk -39,171 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 1,401 GHz; 1,721 GHz; 2,281 GHz; 2,861 GHz a 3,680 GHz, na kterých má zisk -11,347 dB; -11,210 dB; -14,579 dB; -28,291 dB a -10,473 dB.

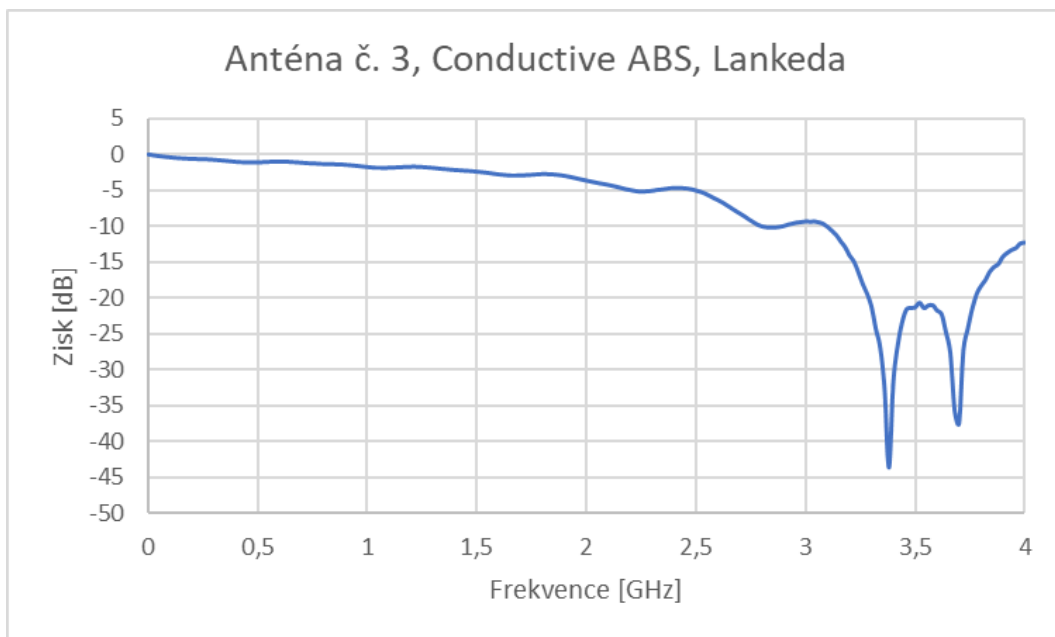


Obrázek 59 Graf parametru S11 Antény č. 2, Electrifi (Multi3D)

### 3.11.3 Anténa č. 3, Sierpińského křivka – 3 iterace

#### 3.11.3.1 *Conductive ABS, Lankeda*

Podle Obr. 60 Anténa č. 3, vytištěná z materiálu Conductive ABS od výrobce Lankeda, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 3,380 GHz, na které má zisk -43,645 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 2,861 GHz a 3,700 GHz, na kterých má zisk -10,155 dB a -37,472 dB.

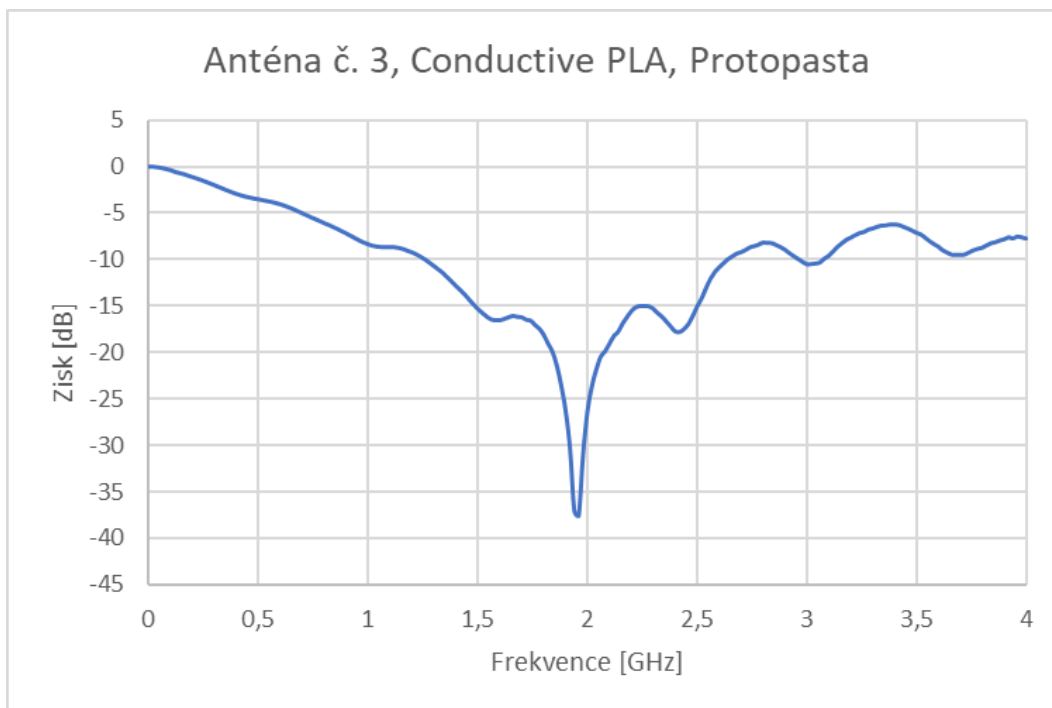


Obrázek 60 Graf parametru S11 Antény č. 3, Conductive ABS (Lankeda)

#### 3.11.3.2 *Conductive PLA, Protopasta*

Podle Obr. 61 Anténa č. 3, vytištěná z materiálu Conductive PLA od výrobce Protopasta, je nejlépe přizpůsobená na frekvenci 1,961 GHz, na které má zisk -37,5509 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 1,601 GHz; 2,420 GHz; 3,000 GHz a 3,700 GHz, na kterých je zisk antény -10,996 dB; -22,486 dB, -19,697 dB a -9,496 dB.

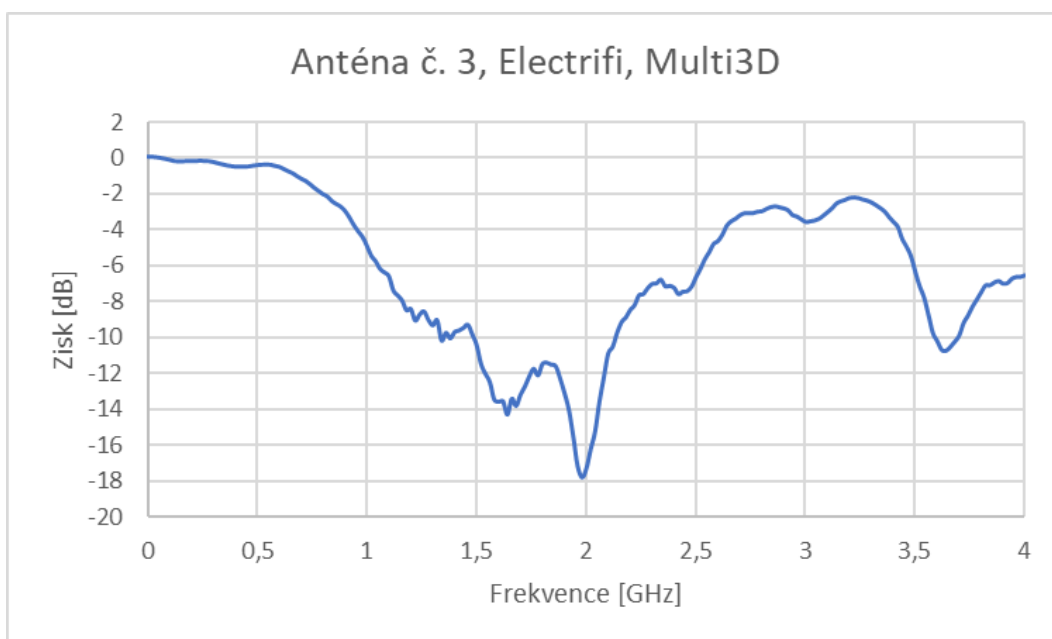




Obrázek 61 Graf parametru S11 Antény č. 3, Conductive PLA (Protopasta)

### 3.11.3.3 Electrifi, Multi3D

Podle Obr. 62 Anténa č. 3, vytištěná z materiálu Electrifi od výrobce Multi3D, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 1,981 GHz, na které má zisk -17,785 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 1,341 GHz; 1,641 GHz; 2,420 GHz; 3,000 GHz a 3,640 GHz, na kterých má zisk -10,181 dB; -14,289 dB; -7,598 dB; -3,586 dB a -10,746 dB.

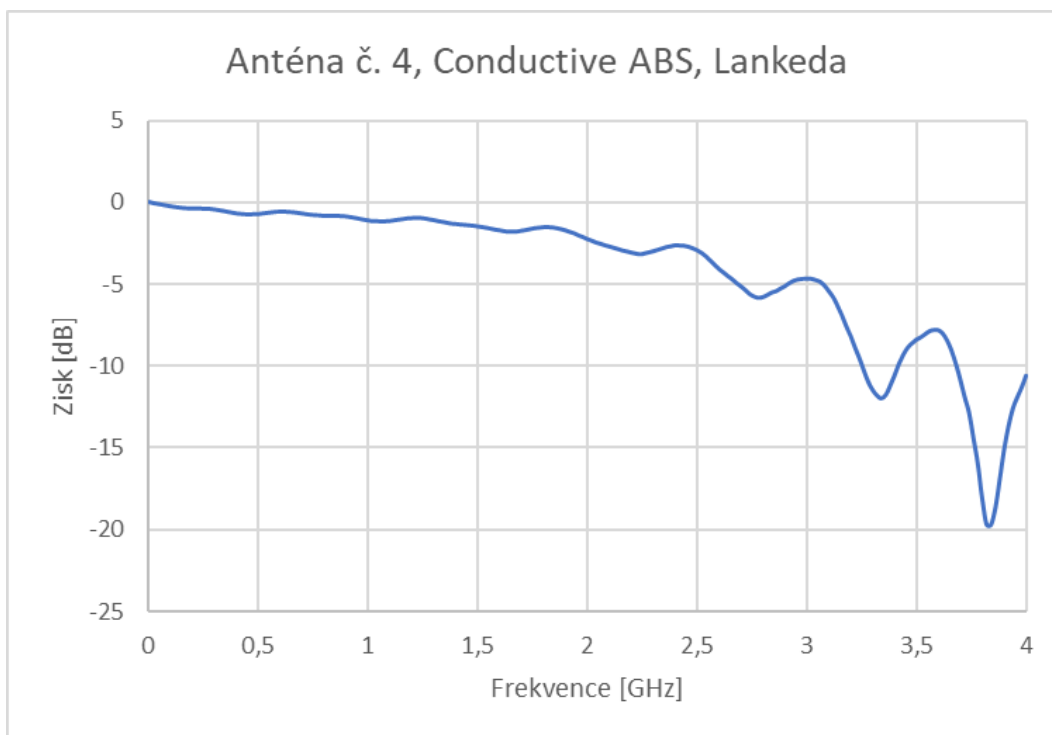


Obrázek 62 Graf parametru S11 Antény č. 3, Electrifi (Multi3D)

### 3.11.4 Anténa č. 4, Sierpińského křivka – 4 iterace

#### 3.11.4.1 Conductive ABS, Lankeda

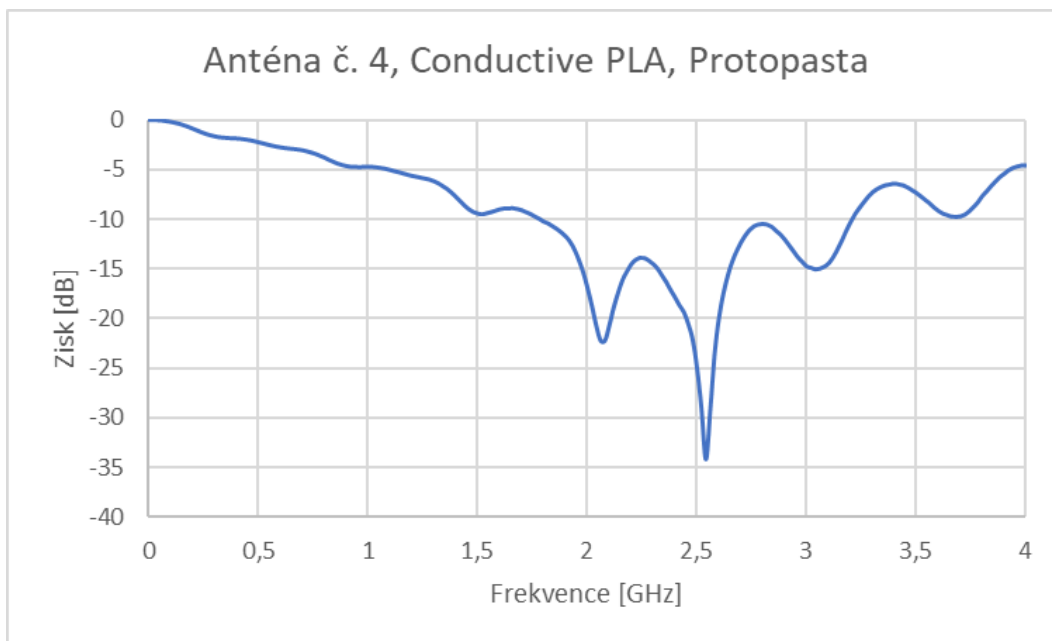
Podle Obr. 63 Anténa č. 4, vytištěná z materiálu Conductive ABS od výrobce Lankeda, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 3,840 GHz, na které má zisk -19,686 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 2,780 GHz a 3,340 GHz, na kterých je zisk antény -5,825 dB a -3,340 dB. Vzhledem k tomu, že průběh grafu je symetrický podle osy kmitny zisku, lze předpokládat, že anténa bude dobře vyzařovat na minimálně dalších dvou frekvencích, které jsou vyšší než 4GHz. Z důvodu omezeného frekvenčního rozsahu měřicího přístroje, nebylo možné tyto vyšší frekvence proměřit.



Obrázek 63 Graf parametru S11 Antény č. 4, Conductive ABS (Lankeda)

#### 3.11.4.2 Conductive PLA, Protopasta

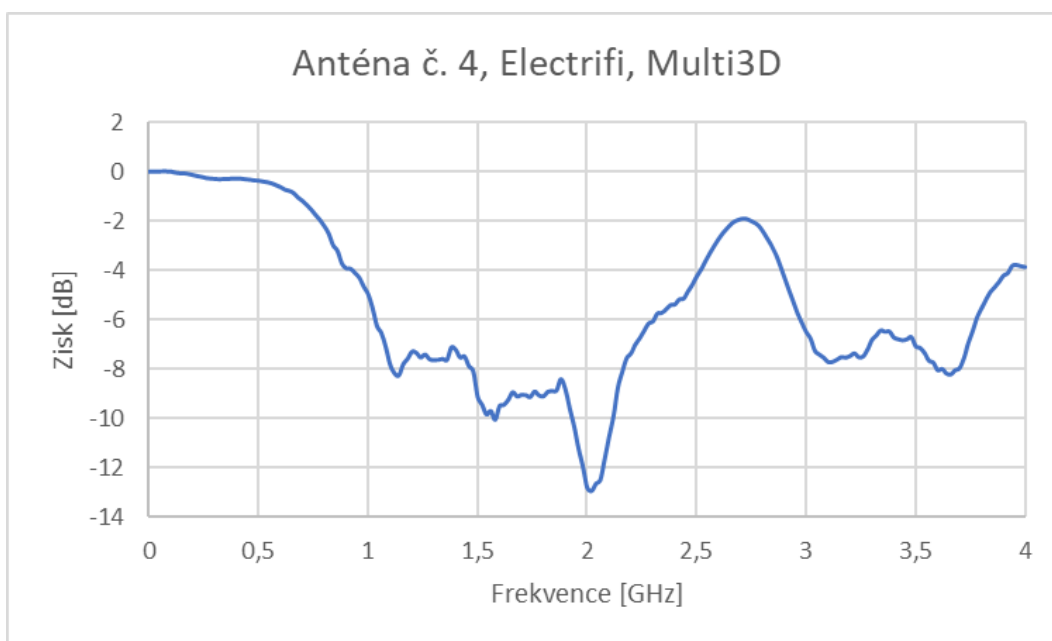
Podle Obr. 64 Anténa č. 4, vytištěná z materiálu Conductive PLA od výrobce Protopasta, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 2,540 GHz, na které má zisk -34,127 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 1,521 GHz; 2,061 GHz; 3,040 GHz a 3,680 GHz, na kterých je zisk antény -9,517 dB; -22,202 dB; -15,043 dB a -9,768 dB.



Obrázek 64 Graf parametru S11 Antény č. 4, Conductive PLA (Protopasta)

### 3.11.4.3 Electrifi, Multi3D

Podle Obr. 65 Anténa č. 4, vytištěná z materiálu Electrifi od výrobce Multi3D, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 2,021 GHz, na které má zisk -12,939 dB. O něco hůře je přizpůsobená na frekvence 1,141 GHz; 1,581 GHz; 3,100 GHz a 3,660 GHz, na kterých má zisk -8,258 dB; -10,0467 dB; -7,711 dB a -8,213 dB. Z důvodu omezeného frekvenčního rozsahu měřícího přístroje, nebylo možné určit, zda anténa nevyzařuje lépe ve vyšších frekvencích, jelikož z grafu lze vidět, že zisk má opět po 4GHz tendenci růst.

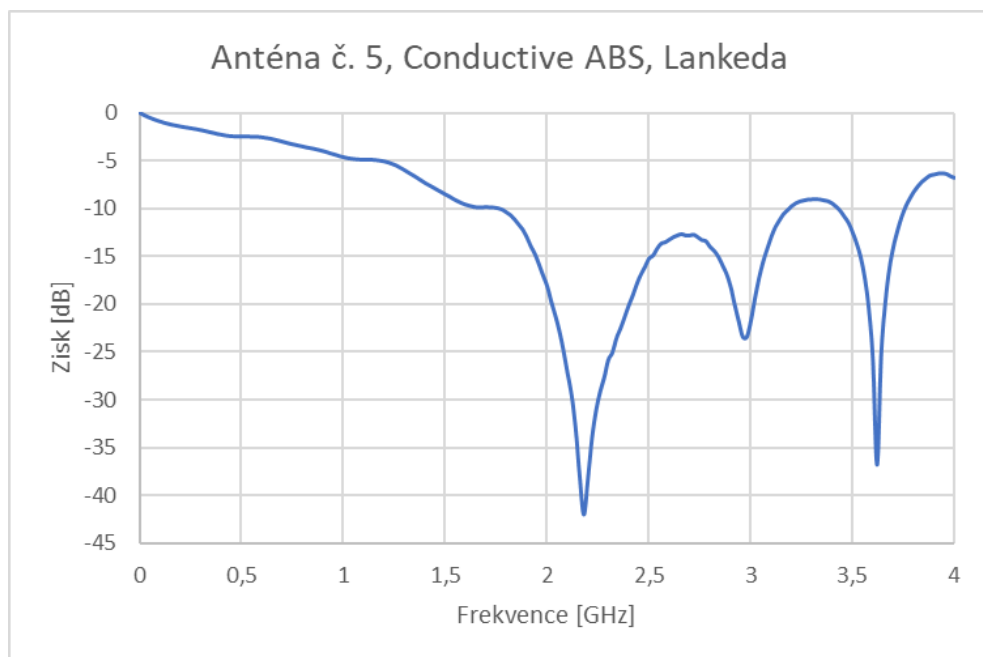


Obrázek 65 Graf parametru S11 Antény č. 4, Electrifi (Multi3D)

### 3.11.5 Anténa č. 5, „Korál“

#### 3.11.5.1 *Conductive ABS, Lankeda*

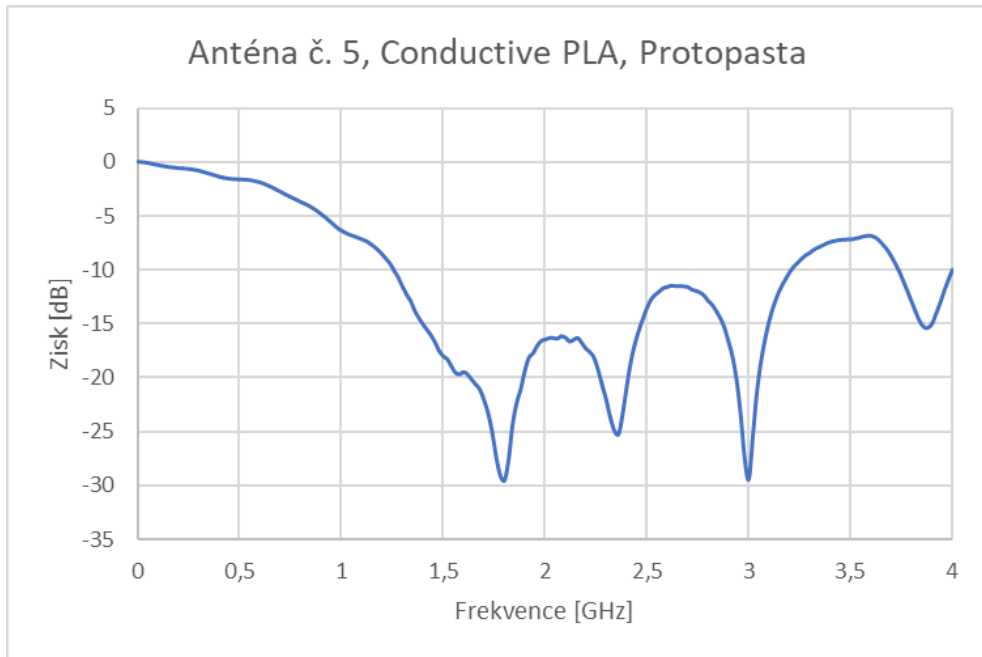
Podle Obr. 66 Anténa č. 5, vytištěná z materiálu Conductive ABS od výrobce Lankeda, je ve frekvenčním rozsahu do 4 GHz nejlépe přizpůsobena na frekvenci 2,181 GHz, na které má zisk -42,001 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 2,981 GHz a 3,620 GHz, na kterých je zisk antény -23,455 dB a -36,784 dB.



Obrázek 66 Graf parametru S11 Antény č. 5, Conductive ABS (Lankeda)

#### 3.11.5.2 *Conductive PLA, Protopasta*

Podle Obr. 67 Anténa č. 5, vytištěná z materiálu Conductive PLA od výrobce Protopasta, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 3,000 GHz, na které má zisk -29,422 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 1,801 GHz; 2,360 GHz a 3,880 GHz, na kterých je zisk antény -29,542 dB; -25,245 dB a -15,363 dB.

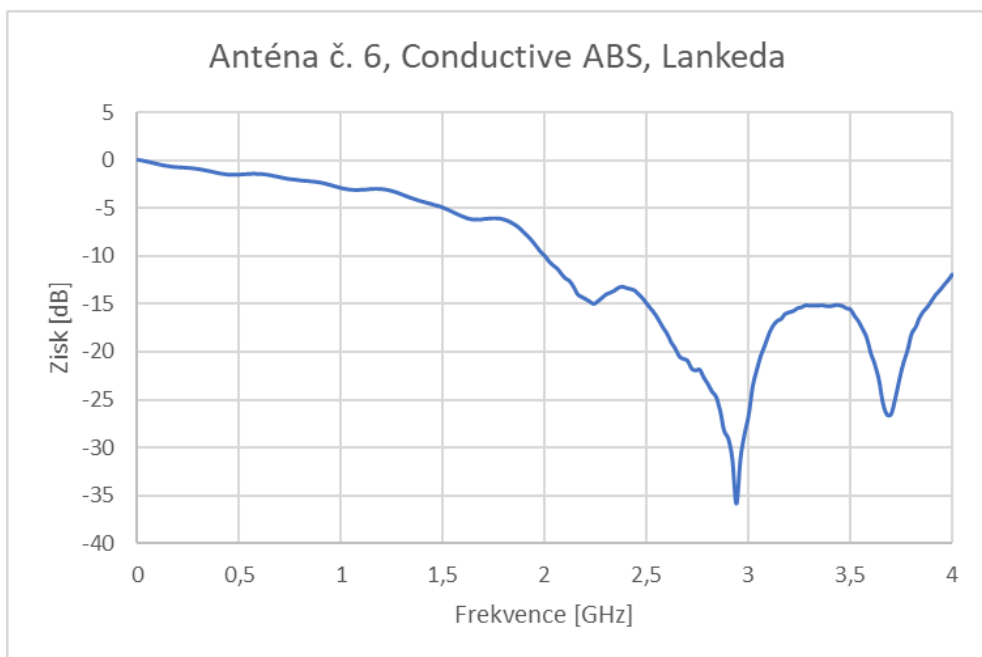


Obrázek 67 Graf parametru S11 Antény č. 5, Conductive PLA (Protopasta)

### 3.11.6 Anténa č. 6, „Papaya“

#### 3.11.6.1 Conductive ABS, Lankeda

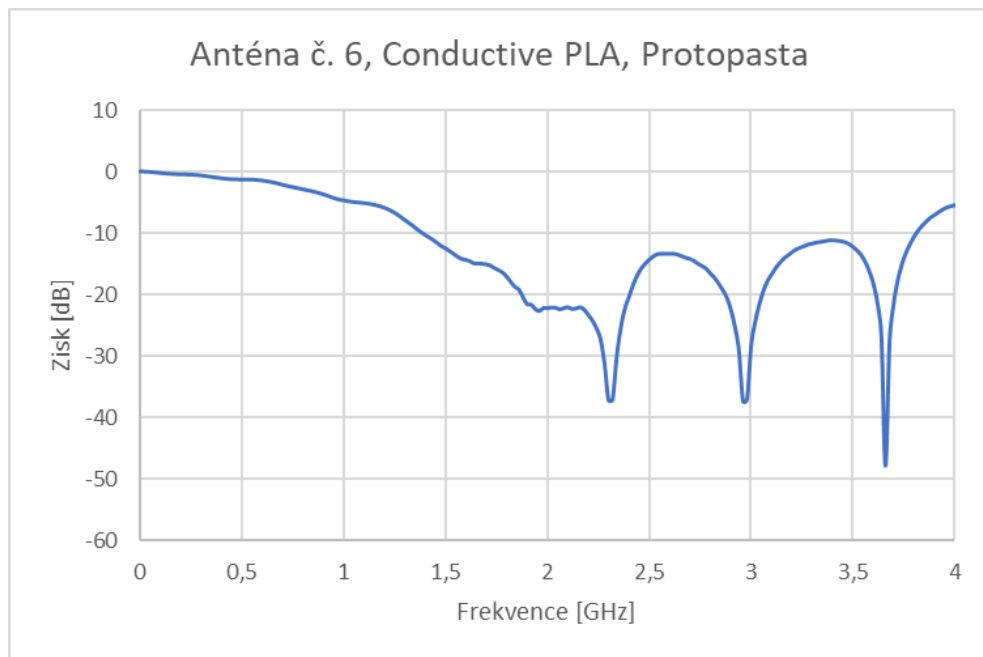
Podle Obr. 68 Anténa č. 6, vytištěná z materiálu Conductive ABS od výrobce Lankeda, je ve frekvenčním rozsahu do 4 GHz nejlépe přizpůsobena na frekvenci 2,940 GHz, na které má zisk -35,860 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 2,241 GHz a 3,680 GHz, na kterých je zisk antény -14,988 dB a -26,565 dB.



Obrázek 68 Graf parametru S11 Antény č. 6, Conductive ABS (Lankeda)

### 3.11.6.2 Conductive PLA, Protopasta

Podle Obr. 69 Anténa č. 6, vytištěná z materiálu Conductive PLA od výrobce Protopasta, je nejlépe přizpůsobena na frekvenci 3,660 GHz, na které má zisk -47,820 dB. O něco hůře je přizpůsobena na frekvence 1,961 GHz; 2,300 GHz a 2,961 GHz, na kterých je zisk antény -22,654 dB; -37,177 dB a -37,346 dB.



Obrázek 69 Graf parametru S11 Antény č. 6, Conductive PLA (Protopasta)

### 3.12 Diskuze

Z výsledků měření unipólů (Antény č. 1 a 2) lze vidět, že průběhy zisku jsou si podobné. Také lze zpozorovat, že kratší 20 mm unipóly jsou lépe přizpůsobeny větším frekvencím (kratší vlnová délka), než delší 40 mm, které jsou lépe přizpůsobeny nižším frekvencím (delší vlnová délka). U 20 mm unipólu z Electrifi lze vidět, že průběh zisku má, na frekvencích větších než 4GHz, tendenci opět růst. Také vzhledem k podobnosti obou průběhů, lze předpokládat, že Anténa č. 1 z materiálu Electrifi je pravděpodobně nejlépe přizpůsobena frekvenci vyšší než 4GHz, avšak tyto frekvence nebylo možné proměřit, kvůli omezenému rozsahu měřícího přístroje. Při porovnání materiálů, nejvyšší zisk v měřeném rozsahu do 4GHz byl naměřen na Anténě č. 2, která byla vytištěna z materiálu Electrifi, od výrobce Multi3D, která byla nejlépe přizpůsobena frekvenci 3,100 GHz, na které měla zisk -39,171 dB.

Z výsledků měření antén založených na Sierpińského křivce (Antény č. 3 a 4), lze opět vidět, že průběhy zisku jsou u stejných iterací podobné. Antény č. 3, založené na 3 iteraci Sierpińského křivky, vzhledem k větším rozměrům jednotlivých prvků křivky, jsou lépe přizpůsobené na nižší frekvence (delší vlnová délka). Jinak je tomu u Antén č. 4, které jsou založené na 4 iteraci Sierpińského křivky, a kde vzhledem k menším rozměrům jednotlivých prvků křivky, jsou tyto antény lépe přizpůsobeny na vyšší frekvence. Vzhledem k tomu, že průběhy zisku jsou symetrické podle osy, která protíná křivku v kmitně zisku, lze předpokládat, že Anténa č. 4 z materiálu Conductive ABS, od výrobce Lankeda, bude dobře přizpůsobena na minimálně další dvě frekvence, které jsou větší než 4 GHz, avšak tyto frekvence nebylo možné proměřit, kvůli omezenému rozsahu měřicího přístroje. Při porovnání materiálů, nejvyšší zisk v měřeném rozsahu do 4GHz byl naměřen na Anténě č. 3, která byla vytištěna z materiálu Conductive ABS, od výrobce Lankeda, která byla nejlépe přizpůsobena na frekvenci 3,380 GHz, na které má zisk -43,645 dB.

Velmi zajímavé výsledky poskytlo měření Antén č. 5 a 6. Při porovnání průběhů zisku Antén č. 5, si lze všimnout, že průběhy jsou si velmi podobné, této podobnosti si můžeme všimnout také u průběhu zisku Antén č. 6. Z grafů je zajímavé, že Antény č. 6 jsou lépe přizpůsobené na vyšší frekvence. Vzhledem k tomu, že velikosti větvené struktury, které tvoří Antény č. 5 a 6, jsou stejné, by měly být antény přizpůsobeny přibližně stejným frekvencím. Tím pádem lze usoudit, že přizpůsobení Antén č. 6 na vyšší frekvence, je způsobeno protáhlejším tvarem této antény. U tohoto protáhlejší tvaru dochází k zužování profilu větvené struktury ke špičce na delším úseku a podobně jako u Antén č. 4, rozměrově menší prvky, které tvoří křivku, umožňují anténám lépe se přizpůsobit na vyšší frekvence. Z důvodu již zmíněné podobnosti průběhu zisku Antén č. 5 a 6, lze předpokládat, že Anténa č. 6 vytištěná z materiálu Conductive PLA, od výrobce Protopasta, bude také dobře přizpůsobená minimálně jedné frekvenci vyšší než 4 GHz, avšak tyto frekvence nebylo možné proměřit, kvůli omezenému rozsahu měřicího přístroje. Podobně je tomu i u Antény č. 6 vytištěné z materiálu Conductive ABS, od výrobce Lankeda. Při porovnání materiálů, nejvyšší zisk v měřeném rozsahu do 4GHz byl naměřen na Anténě č. 6, která byla vytištěna z materiálu Conductive PLA, od výrobce Protopasta, která byla nejlépe přizpůsobena na frekvenci 3,660 GHz, na které má zisk -47,820 dB.

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo prověření možnosti výroby antén pomocí technologie 3D tisku. V teoretické části bylo nahlédnuto do problematiky samotných antén a technologie 3D tisku, její historie, typů tiskáren a materiálů. V rámci kapitoly zabývající se anténami, byl prozkoumán jejich princip, rozdělení a druhy antén, také byly zmíněny fraktální antény, jejich výhody a využití.

Praktická část se věnovala výběru materiálů a tvarů vhodných pro tisk antén, tisku jednotlivých antén a jejich měření. Takto byly vybrány 3 vodivé filamenty, Conductive ABS od výrobce Lankeda, Conductiva PLA od výrobce Protopasta a Electrifi od Multi3D, s těmito materiály se tiskly jednotlivé antény. Dále bylo vybráno 6 tvarů, podle kterých se antény tiskly. Modely jednotlivých antén se vytvářeli v CAD softwaru Solid Edge 2019. Tisk probíhal na FDM tiskárna Prusa MK3S+, u které došlo k výměně standardní 0,4 mm trysky za kalenou 0,6 mm trysku. Došlo také k vytištění zkušebnímu vzorku z každého využitého materiálu, na kterém byly provedena mikroskopie lomu pomocí SEM, což umožnilo náhled do struktury materiálu vytištěného vzorku.

Po vytištění došlo k změření parametru S11 těchto antén. Napříč všemi měřeními antén se potvrdilo, že antény s většími rozměry jsou lépe přizpůsobené na nižší frekvence než antény s menšími rozměry, které jsou lépe přizpůsobené na frekvence vyšší. Některé tyto antény byly lépe přizpůsobené na frekvence vyšší než 4GHz, které nemohl spektrální analyzátor, vzhledem k omezenému měřicímu rozsahu, proměřit. V grafech parametru S11 si bylo možné všimnout podobnosti průběhu zisku mezi anténami se stejnými tvary. Nejvyšší zisk ze všech vytištěných antén byl naměřen na Anténě č. 6, která byla vytištěná z materiálu Conductive PLA, od výrobce Protopasta. Tato anténa byla nejlépe přizpůsobená na frekvenci 3,660 GHz, na které měla zisk -47,820 dB.

Lze tedy usoudit, že antény pomocí technologie 3D tisku, s využitím elektricky vodivých filamentů, je možné vyrobit. Avšak některé tyto vodivé materiály nejsou vhodné k praktickému využití, například v zařízeních, kde může dojít k nárůstu teploty vlivem přehřátí baterie nebo procesoru. V takovém případě by mohlo dojít k roztavení antény vytištěné z takových materiálů.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HORVATH, Joan C. a Rich CAMERON. *Mastering 3D printing: a guide to modeling, printing, and prototyping*. Second edition. New York: Apress. Technology in action. ISBN 9781484258415.
- [2] KUMAR, L. Jyothish, Pulak M. PANDEY and David Ian WIMPENNY, eds., 2019. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Singapore: Springer Singapore. ISBN 9789811303043
- [3] ZUKAS, Victoria, 2015. *An Introduction to 3D Printing*. Sarasota, FL: First Edition Design Publishing. ISBN 9781622878970.
- [4] Historie 3D tisku | ČVUT Fakulta strojní. *ČVUT Fakulta strojní* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/historie-3d-tisk/>
- [5] What Are the Different Types of 3D Printing?. *FutureLearn: Online Courses and Degrees from Top Universities* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.futurelearn.com/info/courses/getting-started-with-digital-manufacturing/0/steps/184102>
- [6] Stereolithography (SLA) 3D Printing | Overview 3D Systems. *3D Printers, Software, Manufacturing & Digital Healthcare | 3D Systems* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/stereolithography>
- [7] Technologie 3D tisku. *na3D - 3D tisk pro každého!* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/technologie-3d-tisku>
- [8] SLA/DLP tisk - Powerprint3D. *3D tisk na zakázku - Powerprint3D* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://powerprint3d.cz/sla-dlp-tisk/>
- [9] Domain Group 3D Printing Workshop Notes 1 Proto+ created by lee bullock. In: *Gov.mt* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://education.gov.mt/en/resources/news/documents/youth%20guarantee/3d%20printing.pdf>
- [10] Supports in 3D Printing: A technology overview | Hubs . *Hubs: On-Demand Rapid Prototypes & Low-Volume Production* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview/#sls>

- [11] Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. *High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [12] SLS (Selective Laser Sintering) | cotu.cz. *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selective-laser-sintering>
- [13] Post processing for SLS printed parts | Hubs . *Hubs: On-Demand Rapid Prototypes & Low-Volume Production* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/post-processing-sls-printed-parts/>
- [14] KOČÍ, Jakub, 2021. Everything you need to know about infills. *Original Prusa 3D Printers* [online] [cit.. 2022-04-03]. Dostupné z: [https://blog.prusaprinters.org/cs/vse-co-potrebuje-znat-o-tiskovych-vyplnich\\_43579/](https://blog.prusaprinters.org/cs/vse-co-potrebuje-znat-o-tiskovych-vyplnich_43579/)
- [15] What is FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing? Explained by Hubs | Hubs . *Hubs: On-Demand Rapid Prototypes & Low-Volume Production* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>
- [16] Post processing for FDM printed parts | Hubs . *Hubs: On-Demand Rapid Prototypes & Low-Volume Production* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/#sanding>
- [17] FDM (Fused deposition modeling) | cotu.cz. *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/134/fdm-fused-deposition-modeling>
- [18] *All3dp.com* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printed-coffee-mug-how-to/>
- [19] Průša, Josef. *Příručka 3D tiskáře*. Prusa Research s.r.o. [Online] [cit. 03.04.2022]. 2018. [https://www.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d\\_manual\\_mk3\\_cz.pdf](https://www.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_mk3_cz.pdf).
- [20] How to Choose 3D Printer Filaments: 5 Considerations -. *BCN3D Technologies: Professional desktop FFF 3D Printers models* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/how-to-choose-3d-printing-material/>

- [21] *All3dp.com* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-plastic-material-properties/>
- [22] What is PETG? (Everything You Need To Know) - TWI. *Joining Innovation with Expertise - TWI* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-petg>
- [23] *All3dp.com* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-petg-material-plastic/>
- [24] What is PETG? (Everything You Need To Know) - TWI. *Joining Innovation with Expertise - TWI* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-petg#HowisitMade>
- [25] What is PETG Material? | The Definitive Guide - PlasticRanger. *PlasticRanger - Its All About Plastics* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: [https://plasticranger.com/what-is-petg-material/#How\\_is\\_PETG\\_Made](https://plasticranger.com/what-is-petg-material/#How_is_PETG_Made)
- [26] Stringování při 3D tisku - jak se mu vyhnout - instruktážní video . *Přední internetový obchod pro 3D tisk - 3DJake Česká republika* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/info/poradce/jak-se-vyhnout-stringovani>
- [27] Everything you need to know about PETG 3D printing | MakerBot. *3D Printers for Educators & Professionals | MakerBot* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/stories/engineering/everything-you-need-to-know-about-petg-3d-printing/>
- [28] FDM 3D printing materials compared | Hubs . *Hubs: On-Demand Rapid Prototypes & Low-Volume Production* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>
- [29] ABS | Polymerové typy - Resinex. *Resinex - Distribuce plastů a kaučuků* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/abs.html>
- [30] Comparing 3D Printing Filament Features: ABS vs. ASA Filament - MakeShaper. *3D Printer Filament | MakeShaper* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.makeshaper.com/2020/01/24/3d-printing-filament-features-abs-vs-asa-filament/>

- [31] PLA vs. ABS: What's the difference? | Hubs . *Hubs: On-Demand Rapid Prototypes & Low-Volume Production* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference/>
- [32] *Cs2.wiki* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: [https://cs2.wiki/wiki/Acrylonitrile\\_styrene\\_acrylate](https://cs2.wiki/wiki/Acrylonitrile_styrene_acrylate)
- [33] ASA 3D tiskový materiál. *Materiály a doplňky pro 3D tisk - filamenty - Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>
- [34] 3D Printing: Understanding about ASA filament applications | MakeShaper. *3D Printer Filament | MakeShaper* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.makeshaper.com/2020/02/21/understanding-about-asa-filament-3d-printing/>
- [35] Ultimate Materials Guide - 3D Printing Flexible Filament. *Professional 3D Printing Software | Simplify3D* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/flexible/>
- [36] Prusa Knowledge Base. *Prusa Knowledge Base* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/en/article/flexible-materials\\_2057](https://help.prusa3d.com/en/article/flexible-materials_2057)
- [37] Prusa Knowledge Base. *Prusa Knowledge Base* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/en/article/cpe\\_166877](https://help.prusa3d.com/en/article/cpe_166877)
- [38] *All3dp.com* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cpe-filament-simply-explained-brands-compared/>
- [39] Best Nylon 3D Printers 2022 (& Nylon Filament 3D Printing Guide) - 3DSourced. *3DSourced - The Best 3D Printer Buyer's Guide Resource & 3D Printer Reviews* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/3d-printer-materials/nylon-filament/>
- [40] PATEL, Nisarg A., Jaydeep R. SHAH and Shashank J. THANKI. A comprehensive review on 3D printer composite filament used in Fused Deposition Modeling. [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.ijcrt.org/download.php?file=IJCRT1892185.pdf>

- [41] 3D Printing Carbon Fiber and Other Composites. *Industrial Additive Manufacturing Platform | Markforged* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-carbon-fiber-and-other-composites>
- [42] The Complete Guide to 3D Printing Composites - 3Dnatives. *Impression 3D et Imprimante 3D : Actualités, Comparatifs, Meilleurs Prix...* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/complete-guide-3d-printing-composites-280120204/#!>
- [43] What is Digital Light Processing (DLP)?. *Industrial Additive Manufacturing Platform | Markforged* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-digital-light-processing-dlp>
- [44] DLP a LCD 3D tisk | cotu.cz. *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/148/dlp-a-lcd-3d-tisk>
- [45] MJF (Multi Jet Fusion) | cotu.cz. *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
- [46] Multi Jet Fusion (MJF) | 3D Printing | Protolabs. *Protolabs | Rapid Prototyping & On-demand Production Services* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.protolabs.com/services/3d-printing/multi-jet-fusion/>
- [47] PolyJet | 3D Printing Technologies & Materials. *Materialise | 3D Printing Innovators* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/polyjet>
- [48] *All3dp.com* [online] [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/polyjet-3d-printing-technologies-simply-explained/>
- [49] Rádio z uhlíkové nanotrubičky - Časopis Vesmír. [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2008/cislo-4/radio-z-uhlikove-nanotrubičky.html>

- [50] Uhlíkové nanotrubicice - technický portál - nanotechnologie, nanomateriály. *grafen.cz - technický portál - nanotechnologie, nanomateriály* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.grafen.cz/nanotechnologie/23-uhlikove-nanotrubicice>
- [51] Carbon nanotubes – what they are, how they are made, what they are used for. *Nanotechnology and Emerging Technologies News from Nanowerk* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: [https://www.nanowerk.com/nanotechnology/introduction/introduction\\_to\\_nanotechnology\\_22.php](https://www.nanowerk.com/nanotechnology/introduction/introduction_to_nanotechnology_22.php)
- [52] *Cuni.cz* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: [https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/kondenzovany\\_stav/materialy\\_2016/pro\\_zajimavost/12-1\\_28-38\\_Novoselov\\_Grafen-materialy\\_v\\_plochem\\_svete.pdf](https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/kondenzovany_stav/materialy_2016/pro_zajimavost/12-1_28-38_Novoselov_Grafen-materialy_v_plochem_svete.pdf)
- [53] The Complete Guide to Electron Beam Melting (EBM) in 3D Printing - 3Dnatives. *Impression 3D et Imprimante 3D : Actualités, Comparatifs, Meilleurs Prix...* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/#>
- [54] What is Electron Beam Melting (EBM)?. *Industrial Additive Manufacturing Platform | Markforged* [online]. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-electron-beam-melting-ebm>
- [55] Elektromagnetický dipól :: MEF. *Fyzika :: MEF* [online]. [cit. 04.04.2022]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/359-elektromagneticky-dipol>
- [56] 69) Antény – princip, zákl. vlastnosti antén – mylms. *mylms* [online]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/69-anteny-princip-zakl-vlastnosti-anten/>
- [57] *Spseke.sk* [online]. [cit. 04.04.2022]. Dostupné z: [https://alzat.spseke.sk/radiote/elmag/anten\\_rozdel.htm](https://alzat.spseke.sk/radiote/elmag/anten_rozdel.htm)
- [58] PSK -- Antény. *Mamut.spseol.cz* [online]. [cit. 04.04.2022] Dostupné z: <https://mamut.spseol.cz/nozka/psk/076-anteny/>
- [59] *Nagano.cz* [online]. [cit. 04.04.2022]. Dostupné z: <http://ok2buh.nagano.cz/first/impedance.html>
- [60] Obvod s impedancí :: MEF. *Fyzika :: MEF* [online]. [cit. 04.04.2022]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/321-obvod-s-impedanci>

- [61] ZISK ANTÉNY. In: *C-a-v.com* [online]. [cit. 04.04.2022]. Dostupné z: [http://ok1like.c-a-v.com/soubory/zisk\\_anteny.htm](http://ok1like.c-a-v.com/soubory/zisk_anteny.htm)
- [62] Elektromagnetická vlna :: MEF. *Fyzika :: MEF* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/358-elektromagneticka-vlna>
- [63] *Gymkren.cz* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.gymkren.cz/download/ucebni-texty/fyzika/f24.pdf>
- [64] Vlnění. *SŠTE OLOMOUCKÁ - STŘEDNÍ ŠKOLA TECHNICKÁ A EKONOMICKÁ BRNO, OLOMOUCKÁ, PŘÍSPĚVKOVÁ ORGANIZACE* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.sstebrno.cz/ebooks/knihovna/elektrina-magnetismus-ii/vlneni.html>
- [65] YAGIHO SMĚROVÉ ANTÉNY [1961-1962]. *Ok2kkw.com* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: [https://www.ok2kkw.com/next/ok1vr\\_yagi1962.htm](https://www.ok2kkw.com/next/ok1vr_yagi1962.htm)
- [66] Multimediální učebnice. [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.radio.feec.vutbr.cz/raida/multimedia/index.php?nav=4-3-A>
- [67] *Tul.cz* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <http://www.ksr.tul.cz/fraktaly/geometrie.html>
- [68] Fraktální anténa. *Encyklopedie* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: [https://wikijii.com/wiki/Fractal\\_antenna](https://wikijii.com/wiki/Fractal_antenna)
- [69] Fraktální geometrie. *Vsb.cz* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~nav79/fraktgeo/index.html>
- [70] *Tul.cz* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <http://www.ksr.tul.cz/fraktaly/definice.html#hurst>
- [71] Fractals Among Us | Hackaday. *Hackaday | Fresh Hacks Every Day* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2016/08/18/fractals-among-us/>
- [72] Fractal Antenna Basics | Fractal Antenna design,working operation. *RF Wireless Vendors and Resources | RF Wireless World* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Fractal-Antenna.html>
- [73] What Is A Fractal Antenna And How Does It Work? | Bit Rebels. *Bit Rebels - Technology, Social Media, Business, Geek News* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://bitrebels.com/technology/fractal-antenna-work/>

- [74] A Review on Fractal Antenna – IJERT. *IJERT – International Journal of Engineering Research & Technology* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.ijert.org/a-review-on-fractal-antenna>
- [75] Uhlíková vlákna | KORDCARBON. *Výroba a prodej uhlíkových a hybridních tkanin | KORDCARBON* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: [http://www.kordcarbon.cz/uhlikove\\_vlakno](http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno)
- [76] Uhlíkové vlákno - oneindustry – průmyslový portál, výroba a technologie. *oneindustry – průmyslový portál, výroba a technologie - oneindustry – průmyslový portál: strojírenství, obrábění, nástrojárna, automotive, plasty, elektro, automatizace, roboty, Průmysl 4.0, výroba, technologie.* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/uhlikove-vlakno/>
- [77] What are Composite Filaments for 3D Printing? - 3D Insider. *3D Insider - Emerging Technology News Publication* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/composite-filaments/>
- [78] Electrically Conductive Filaments: Properties, Uses, and Best Brands. 3D Insider - Emerging Technology News Publication [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/conductive-filament/>
- [79] Electrically Conductive Polymer Composites for 3D Printing - 3D Printing. 3D Printing - Additive Manufacturing [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/3d-printing-use-cases/conductive-materials-for-3d-printing/>
- [80] What is carbon black? —. *ICBA* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.carbon-black.org/new-page-2>
- [81] What is carbon black? *Carbonblack.jp* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <http://www.carbonblack.jp/en/cb/index.html>
- [82] What is Carbon Black? | Carbon Black 101 | Birla Carbon. Home | Carbon Black | Birla Carbon [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.birlacarbon.com/whats-trending/carbon-black/>
- [83] 3D Printing: The Internal Process and Development. | by LiveRoom | Medium. *LiveRoom – Medium* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://liveroomlk.medium.com/3d-printing-the-internal-process-and-development-988ae9b24a6b>



- [84] You Can Now See the First Ever 3D Printer - Invented by Chuck Hull - In the National Inventors Hall of Fame - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing. *3DPrint.com - The Voice of 3D Printing* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>
- [85] (PDF) 3D Printing of Fiber Reinforced Polymer Nanocomposites: Additive Manufacturing. *ResearchGate | Find and share research* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/346033863\\_3D\\_Printing\\_of\\_Fiber\\_Reinforced\\_Polymer\\_Nanocomposites\\_Additive\\_Manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/346033863_3D_Printing_of_Fiber_Reinforced_Polymer_Nanocomposites_Additive_Manufacturing)
- [86] File:Koch curve construction.svg. *Wikimedia.org* [online] [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Koch\\_curve\\_construction.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Koch_curve_construction.svg)
- [87] Filament: Jaké jsou druhy a kde ho koupit | FutLab.cc. *FutLab.cc | Umělecká dílna a slévárna* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://futlab.cc/filament/>
- [88] 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ | 3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši. *Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>
- [89] Kalená tryska české výroby V6 1,75 (závit M6) průměr 0,6 mm | Elegant3D – 3D tiskárny, 3D pera, filamenty a příslušenství. *Elegant3D – 3D tiskárny, 3D pera, filamenty a příslušenství* [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.elegant3d.cz/Kalena-tryska-ceske-vyroby-V6-1-75-zavit-M6-prumer-0-6-mm-d789.htm#detail-anchor-description>
- [90] N9912A FieldFox Handheld RF Analyzer, 4 GHz and 6 GHz | Keysight. [online]. [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/zz/en/product/N9912A/fieldfox-a-handheld-rf-analyzer-4-ghz-6-ghz.html>
- [91] Fractal Antenna Systems Stays Ahead with 3D Design and Printing - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing. *3DPrint.com - The Voice of 3D Printing* [online]. [cit. 19.05.2022]. Dostupné z: <https://3dprint.com/55299/fractal-antenna-systems/>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

3D	Trojdimenzionální
FDM	Fused Deposition Modeling
STL	Surface Tessellation Language
SLA	Stereolithography
CNC	Computer Numeric Control
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
SHS	Selective Heat Sintering
FFF	Fused Filament Fabrication
DLP	Digital Light Processing
MJF	Multi Jet Fusion
UV	Ultra Violet
PLA	Kyselina polylactonová
PETG	Polyethylentereftalát-modifikovaný glykolem
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
FLEX	Flexibilní filament
CPE	Co-polyester
CNT	Carbon nanotube
LC	Obvod složený z kondenzátoru a cívky
dB	Jednotka zisku v porovnání s půlvlnným dipólem
dBi	Jednotka zisku v porovnání s izotropní anténou
$\Omega$	Jednotka elektrického odporu
$S \cdot \text{cm}^{-1}$	Jednotka měrné elektrické vodivosti

HIPS Houževnatý polystyren

PVB Polyvinyl Butyral

GHz Jednotka frekvence, GigaHertz

DPH Daň z přidané hodnoty

$\Omega$ \*cm Měrný elektrický odpor

SEM Scanning Electron Microscope

CAD Computer Aided Design

PAR Formát souborů využívaných programem Solid Edge

G-KÓD Seznam příkazů pro 3D tiskárnu

USB Universal Serial Bus

CSV Comma Separated Values

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Průběh tisku [83] .....	11
Obrázek 2 První patentovaná 3D tiskárna fungující na principu SLA [84].....	12
Obrázek 3 Technologie 3D tisku [85].....	14
Obrázek 4 Porovnání materiálů [87].....	19
Obrázek 5 Princip antény [57] .....	25
Obrázek 6 Kochova křivka [86].....	27
Obrázek 7 Sierpiňského koberec v telefonním zařízení [71].....	28
Obrázek 8 Tiskárna Prusa MK3S+ [88] .....	30
Obrázek 9 Ocelová kalená tryska o průměru 0,6 mm [89].....	31
Obrázek 10 Spektrální analyzátor FieldFox N9912A od firmy Keysight [90].....	31
Obrázek 11 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive ABS, Lankeda (1 mm).....	33
Obrázek 12 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive ABS, Lankeda (10 μm)....	34
Obrázek 13 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive ABS, Lankeda (5 μm).....	34
Obrázek 14 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (1 mm)..	35
Obrázek 15 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (500 μm) .....	36
Obrázek 16 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (30 μm).	36
Obrázek 17 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (20 μm).	37
Obrázek 18 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (10 μm).	37
Obrázek 19 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Conductive PLA, Protopasta (5 μm)...	38
Obrázek 20 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (1 mm).....	39
Obrázek 21 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (500 μm).....	39
Obrázek 22 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (400 μm).....	40
Obrázek 23 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (200 μm).....	40
Obrázek 24 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (100 μm).....	41
Obrázek 25 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (20 μm).....	41
Obrázek 26 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (5 μm).....	42
Obrázek 27 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (4 μm).....	42
Obrázek 28 SEM, Mikroskopie Lomu 3D Tisku – Electrifi, Multi3D (1 μm).....	43
Obrázek 29 Solid Edge 2019 .....	44
Obrázek 30 PrusaSlicer.....	45
Obrázek 31 Rozměry Antény č. 1.....	46
Obrázek 32 ABS Anténa č. 1, Unipól 20 mm .....	47
Obrázek 33 PLA Anténa č. 1., Unipól 20 mm.....	47

Obrázek 34 Electrifi Anténa č. 1, Unipól 20 mm .....	48
Obrázek 35 Rozměry Antény č. 2.....	48
Obrázek 36 ABS Anténa č. 2, Unipól 40 mm .....	49
Obrázek 37 PLA Anténa č. 2, Unipól 40 mm.....	49
Obrázek 38 Electrifi Anténa č. 2, Unipól 40 mm .....	50
Obrázek 39 Rozměry Antény č. 3.....	50
Obrázek 40 ABS Anténa č. 3, fraktál Sierpińského křivka – 3 iterace.....	51
Obrázek 41 PLA Anténa č. 3, fraktál Sierpińského křivka – 3 iterace.....	51
Obrázek 42 Electrifi Anténa č.3, fraktál Sierpińského křivka – 3 iterace .....	52
Obrázek 43 Rozměry Antény č. 4.....	52
Obrázek 44 ABS Anténa č. 4, fraktál Sierpińského křivka – 4 iterace.....	53
Obrázek 45 PLA Anténa č. 4, fraktál Sierpińského křivka – 4 iterace.....	53
Obrázek 46 Electrifi Anténa č. 4, fraktál Sierpińského křivka – 4 iterace .....	54
Obrázek 47 Rozměry Antény č. 5.....	55
Obrázek 48 ABS Anténa č. 5.....	55
Obrázek 49 PLA Anténa č. 5 .....	56
Obrázek 50 Rozměry Antény č. 6.....	57
Obrázek 51 ABS Anténa č. 6.....	57
Obrázek 52 PLA Anténa č. 6 .....	58
Obrázek 53 Měření Antény č. 4, Conductive PLA, Protopasta.....	59
Obrázek 54 Graf parametru S11 Antény č. 1, Conductive ABS (Lankeda).....	60
Obrázek 55 Graf parametru S11 Antény č. 1, Conductive PLA (Protopasta) .....	61
Obrázek 56 Graf parametru S11 Antény č. 1, Electrifi (Multi3D).....	61
Obrázek 57 Graf parametru S11 Antény č. 2, Conductive ABS, Lankeda.....	62
Obrázek 58 Graf parametru S11 Antény č. 2, Conductive PLA (Protopasta) .....	63
Obrázek 59 Graf parametru S11 Antény č. 2, Electrifi (Multi3D).....	63
Obrázek 60 Graf parametru S11 Antény č. 3, Conductive ABS (Lankeda).....	64
Obrázek 61 Graf parametru S11 Antény č. 3, Conductive PLA (Protopasta) .....	65
Obrázek 62 Graf parametru S11 Antény č. 3, Electrifi (Multi3D).....	65
Obrázek 63 Graf parametru S11 Antény č. 4, Conductive ABS (Lankeda).....	66
Obrázek 64 Graf parametru S11 Antény č. 4, Conductive PLA (Protopasta) .....	67
Obrázek 65 Graf parametru S11 Antény č. 4, Electrifi (Multi3D).....	67
Obrázek 66 Graf parametru S11 Antény č. 5, Conductive ABS (Lankeda).....	68
Obrázek 67 Graf parametru S11 Antény č. 5, Conductive PLA (Protopasta) .....	69
Obrázek 68 Graf parametru S11 Antény č. 6, Conductive ABS (Lankeda).....	69

---

Obrázek 69 Graf parametru S11 Antény č. 6, Conductive PLA (Protopasta) ..... 70

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Měrná elektrická vodivost využitých materiálů .....	32
Tabulka 2 Podmínky tisku jednotlivých materiálů .....	45