

# **Senzor hladiny vody zhotovený pomocí 3D tisku**

Bc. Martin Šnajdr

---

Diplomová práce  
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

|                   |                                               |
|-------------------|-----------------------------------------------|
| Jméno a příjmení: | Bc. Martin Šnajdr                             |
| Osobní číslo:     | T23311                                        |
| Studijní program: | N0788A270002 Výrobní inženýrství              |
| Forma studia:     | Prezenční                                     |
| Téma práce:       | Senzor hladiny vody zhotovený pomocí 3D tisku |

## Zásady pro vypracování

- Vypracujte podrobnou literární rešerši na zadané téma.
- Zhodnotte dosavadní stav v oblasti senzorů hladiny vody.
- Na základě vypracované literární rešerše vymodelujte v CAD Softwaru součásti senzoru a připravte model vhodný pro převod do STL formátu.
- Vyberte vhodné polymerní materiály pro výrobu senzoru a připravte vzorky pomocí 3D tisku.
- Připravené komponenty charakterizujte pomocí charakterizačních metod (SEM, DSC), dále změřte mechanické vlastnosti.
- Zhotovte vyhodnocovací indikátor hladiny vody pomocí elektronického obvodu.
- Provedte experimentální měření hladiny vody se zhotoveným senzorem.
- Vyhodnotte naměřená data, popište provedená měření, všechny výsledky interpretujte pomocí grafů, případně i tabulek a textového popisu.
- Vzniklé závěry dostatečně popište a diskutujte.

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

#### Seznam doporučené literatury:

- [1]. GEBHARDT, Andreas; KESSLER, Julia a THURN, Laura. *3D printing: understanding additive manufacturing*. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, [2019]. ISBN 9781569907023.
- [2]. ABDALLAH, Ali; PAURITSCH, Manfred; GASSER, Christian; STANGL, Florian; PRIMAS, Matthias et al. 3D Printed Capacitive Fluid Level Sensor. Online. In: *EUROSENSORS 2018*. Basel Switzerland: MDPI, 2018, 861-. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/proceedings2130861>.
- [3]. FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Fifth edition. Cham: Springer, [2016]. ISBN 9783319193021.
- [4]. SRIVATSAN, T. S. a SUDARSHAN, T. S. (ed.). *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016]. ISBN 9781498714778.
- [5]. Emerald Group Publishing Limited. (2015). *A focus on SLM and SLS methods in 3D printing*. Emerald Publishing.
- [6]. KOCH, Alexander. *Measurement and sensor systems: a comprehensive guide to principles, practical issues and applications*. Springer series in measurement science technology. Cham: Springer, 2023. ISBN 978-3-031-15869-8.

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

Datum zadání diplomové práce: 2. ledna 2025  
Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2025

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

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

# PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

## Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou 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 mohu užít své dílo – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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 diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne .....

.....

podpis autora



## **ABSTRAKT**

Hlavním cílem této diplomové práce je návrh a výroba senzoru hladiny vody pomocí 3D tisku s využitím běžně dostupných vodivých filamentů. V teoretické části jsou shrnuty poznatky z oblasti základních metod 3D tisku, vhodných materiálů pro 3D tisk, různých typů hladinových senzorů a nejdostupnějších mikrokontrolérů. Praktická část dokumentuje průběh tvorby senzoru od testovacích prototypů, přes porovnání dostupných elektricky vodivých filamentů až po konstrukci složeného senzoru využívajícího více segmentů připravených 3D tiskem. Pozornost je věnována také měřicímu obvodu a možným zobrazením měřených hodnot.

Klíčová slova: senzor, 3D tisk, mikrokontrolér, hladina vody, vodivý filament, displej

## **ABSTRACT**

The main objective of this thesis is to design and manufacture a water level sensor using 3D printing with commonly available conductive filaments. The theoretical part summarizes the knowledge of basic 3D printing methods, suitable materials for 3D printing, different types of water level sensors and the most accessible microcontrollers. The practical part documents the process of sensor development from test prototypes, through comparison of available conductive filaments to the construction of a composed sensor using multiple segments made by 3D printing. Attention is also given to the measuring circuit and possible displays of the measured values.

Keywords: sensor, 3D printing, microcontroller, water level, conductive filament, display

Rád bych poděkoval Ing. Jiřímu Matyášovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, cenné připomínky a ochotu při konzultacích a vypracování mé diplomové práce. Děkuji také své rodině za podporu při studiu.

# OBSAH

|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÚVOD.....</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>                          | <b>14</b> |
| <b>1 METODY 3D TISKU.....</b>                          | <b>15</b> |
| 1.1 HISTORICKÝ VÝVOJ .....                             | 15        |
| 1.2 FUSED DEPOSITION MODELING .....                    | 16        |
| 1.2.1 Tiskárny.....                                    | 18        |
| 1.3 SELECTIVE LASER SINTERING .....                    | 19        |
| 1.3.1 Srovnání přímého a nepřímého SLS .....           | 20        |
| 1.3.2 Tiskárny.....                                    | 21        |
| 1.4 STEREOLITOGRAFIE.....                              | 22        |
| 1.5 MULTI-JET FUSION.....                              | 23        |
| <b>2 MATERIÁLY PRO 3D TISK .....</b>                   | <b>25</b> |
| 2.1 PLA .....                                          | 25        |
| 2.1.1 Výroba.....                                      | 25        |
| 2.1.2 Vlastnosti.....                                  | 26        |
| 2.2 PETG.....                                          | 26        |
| 2.3 ABS .....                                          | 27        |
| 2.4 ASA.....                                           | 28        |
| 2.5 TPU .....                                          | 28        |
| 2.6 PC.....                                            | 29        |
| 2.7 PA.....                                            | 30        |
| 2.8 ELEKTRICKY VODIVÉ FILAMENTY .....                  | 31        |
| <b>3 SENZORY HLADINY.....</b>                          | <b>32</b> |
| 3.1 MECHANICKÉ .....                                   | 32        |
| 3.1.1 Jednoduchá měřidla.....                          | 32        |
| 3.1.2 Plovákové hladinoměry .....                      | 32        |
| 3.2 ELEKTRICKÉ .....                                   | 33        |
| 3.2.1 Kapacitní senzory hladiny .....                  | 33        |
| 3.2.2 Odporové senzory hladiny .....                   | 34        |
| 3.3 FYZIKÁLNÍ.....                                     | 35        |
| 3.3.1 Ultrazvukové .....                               | 35        |
| 3.3.2 Radarové .....                                   | 36        |
| <b>4 MIKROKONTROLÉRY.....</b>                          | <b>37</b> |
| 4.1 ROZDÍL MEZI MIKROKONTROLÉRY A MIKROPROCESORY ..... | 37        |
| 4.2 ARDUINO.....                                       | 38        |

|           |                                                       |           |
|-----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3       | ESP32 .....                                           | 39        |
| <b>II</b> | <b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>                           | <b>40</b> |
| <b>5</b>  | <b>CÍLE PRÁCE A POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ A SOFTWARE .....</b> | <b>41</b> |
| 5.1       | TISKÁRNA.....                                         | 41        |
| 5.2       | SOFTWARE.....                                         | 42        |
| 5.2.1     | Autodesk Inventor .....                               | 42        |
| 5.2.2     | CrealityPrint .....                                   | 42        |
| 5.2.3     | Arduino IDE .....                                     | 42        |
| <b>6</b>  | <b>OVĚŘOVACÍ PROTOTYPY .....</b>                      | <b>43</b> |
| 6.1       | TESTOVÁNÍ PRINCIPU SENZORŮ .....                      | 43        |
| 6.1.1     | Odporový senzor .....                                 | 43        |
| 6.1.2     | Kapacitní senzor .....                                | 46        |
| 6.2       | MĚŘICÍ OBVOD .....                                    | 47        |
| 6.2.1     | Obvod odporového senzoru.....                         | 47        |
| 6.2.2     | Obvod kapacitního senzoru .....                       | 48        |
| 6.3       | TESTOVÁNÍ VHODNÝCH MATERIÁLŮ .....                    | 50        |
| 6.3.1     | Conductive ABS Lankeda .....                          | 50        |
| 6.3.2     | Multi3D Electrifi .....                               | 51        |
| 6.3.3     | 3DXSTAT ESD-PLA.....                                  | 53        |
| 6.3.4     | Protopasta Conductive PLA .....                       | 54        |
| <b>7</b>  | <b>SENZORY PŘIPRAVENÉ 3D TISKEM.....</b>              | <b>56</b> |
| 7.1       | ELECTRIFI SENZORY .....                               | 56        |
| 7.1.1     | 50 mm senzor .....                                    | 57        |
| 7.1.2     | 120 mm senzor .....                                   | 58        |
| 7.2       | LANKEDA CONDUCTIVE ABS SENZOR.....                    | 59        |
| 7.3       | PROTOPASTA PLA SENZOR.....                            | 61        |
| 7.4       | SEGMENTOVÝ SENZOR PROTOPASTA PLA.....                 | 63        |
| <b>8</b>  | <b>ZOBRAZOVÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ DAT.....</b>           | <b>66</b> |
| 8.1       | SERIAL MONITOR .....                                  | 66        |
| 8.2       | LCD DISPLEJ .....                                     | 66        |
| 8.3       | OLED DISPLEJ.....                                     | 68        |
| 8.4       | E-INK DISPLEJ .....                                   | 70        |
| <b>9</b>  | <b>ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ .....</b>                       | <b>72</b> |
| 9.1       | TAHOVÁ ZKOUŠKA .....                                  | 72        |
| 9.1.1     | ABS .....                                             | 73        |
| 9.1.2     | PLA .....                                             | 74        |
| 9.2       | MIKROSKOPIE SENZORŮ .....                             | 75        |
| 9.3       | DSC ANALÝZA VYTIŠTĚNÝCH VZORKŮ .....                  | 77        |

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>10 VÝPOČET HLADINY.....</b>                  | <b>80</b> |
| <b>ZÁVĚR .....</b>                              | <b>82</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>          | <b>85</b> |
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>                     | <b>90</b> |
| <b>SEZNAM TABULEK.....</b>                      | <b>92</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b> | <b>93</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>                       | <b>95</b> |



## ÚVOD

V dnešní době je 3D tisk rychle se rozvíjejícím odvětvím, ve kterém je možné nalézt více různých technologií, které využívají různé materiály v odlišných formách. Dříve se uplatňoval převážně v průmyslu, především pro tvorbu prototypů, avšak v současnosti se stále více rozšiřuje i mezi běžnými spotřebiteli. Tato skutečnost je dána stále dostupnějšími zařízeními a materiály, nenáročností na údržbu a jednoduchou a intuitivní obsluhou. Tímto způsobem se nejvíce rozšířila metoda FDM (Fused Deposition Modeling) označovaná také FFF (Fused Filament Fabrication). Jednou z mnoha možností, kromě tisku prototypů a dekorativních předmětů, je také možnost vytvářet podpůrné prvky a konstrukční součásti pro drobnou elektroniku, což je často využíváno pro nejrůznější hobby projekty, zejména v domácích podmínkách.

Spolu s 3D tiskem se rozšiřují také možnosti tvorby vlastních obvodů a chytrých zařízení, které využívají platformy jako je Arduino nebo výkonnější a pokročilejší ESP32. S jejich pomocí je možné naprogramovat a na míru vytvořit celky, které umožňují například měření veličin a jejich zobrazení či reagovat na určité mezní stavy. Velkou výhodou je široká dostupnost různých modulů, jako jsou displeje, senzory, spínače či drobné elektronické součástky.

Je zřejmé, že 3D tisk a vývoj elektronických projektů se dokáží navzájem doplňovat, ať už se jedná o tisk krytů a platforem pro drobná zařízení nebo například využití měřících obvodů pro monitoring tiskového procesu. Při využívání poznatků z obou oborů je možné tvořit zařízení, která umožňují snížit náklady a lze je připravit přesně podle potřeb uživatele.

Cílem této práce je tedy efektivně využít současných možností z oblasti 3D tisku a elektronických vývojových platforem a připravit 3D tištěný senzor hladiny vody využívající mikrokontrolér Arduino či ESP 32 pro potřebná měření. Zároveň se snaží poukázat na to, že je možné takové zařízení realizovat bez nákladných investic a mnohaletých zkušeností.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 METODY 3D TISKU

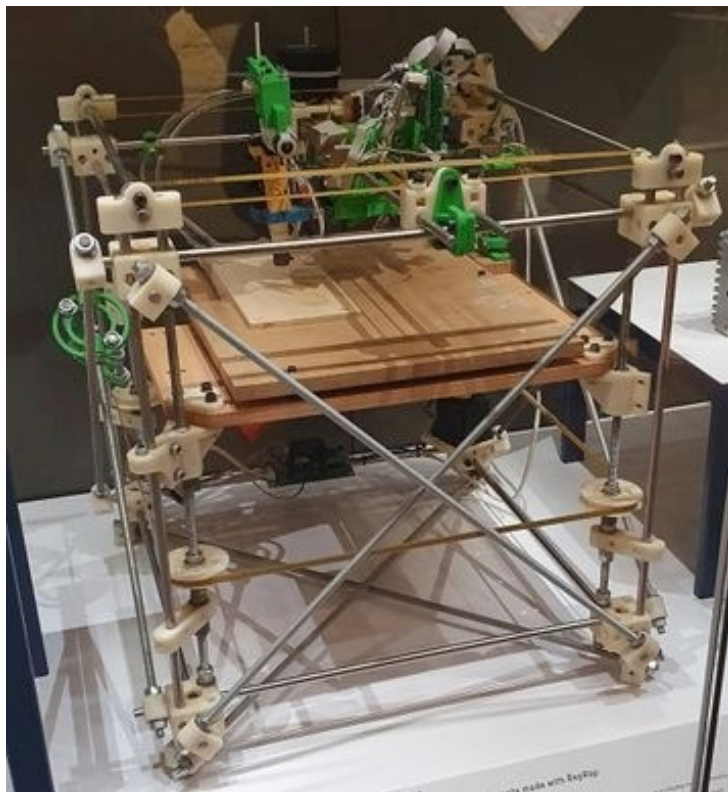
Aditivní výroba je soubor moderních technologií umožňujících výrobu trojrozměrných objektů z digitálních modelů vytvořených pomocí počítačového softwaru. Její zásluhou se mění rozličná výrobní odvětví tím, že s její pomocí lze rychle tvořit prototypy a efektivně vyrábět složité geometrické tvary. Ve světě 3D tisku existuje vícero odlišných technologií používající různé principy, procesní podmínky a použité materiály, z nichž nejběžnější jsou popsány v následujících kapitolách. [1, 2]

### 1.1 Historický vývoj

Tradičním způsobem průmyslové výroby součástí je odebrání materiálu z plného bloku za účelem dosažení požadovaného tvaru. V 80. letech byl navržen opačný způsob, zvaný aditivní výroba, kdy dochází k tvorbě součástí přidáváním jednotlivých vrstev od nuly. Tento způsob výroby byl nazván 3D tisk s odkazem na podobnou technologii použitou v inkoustových tiskárnách. Mezi první významné metody patří Ballistic Particle Manufacturing (BPM), která spočívala v nanášení částic za účelem tvorby trojrozměrných objektů a je považována za základ pro následující inovace. V polovině 80. let byla objevena stereolitografie (SLA), spočívající ve vytvrzování tekutých polymerů laserem, čímž vznikají pevná prostorová tělesa. Její vynálezce Chuck Hull zakládá v roce 1988 společnost 3D Systems, která se stává prvním subjektem komerčně využívajícím 3D tisk. Tím započal počátek 3D tisku jako odvětví, jelikož se zvyšuje zájem o aditivní výrobu z hlediska rychlé výroby prototypů.

V 90. letech dochází k rozvoji materiálů a technologií, například ModelMaker firmy Sanders Prototype, který pracoval se zahřátými voskovými materiály. Tyto první stroje používající vosky sloužily primárně pro výrobu prototypů a návrhů. Po roce 2000 dochází k posunu v tiskových metodách na bázi fotopolymerů, které se tisknou pomocí pokročilých tiskových hlav. Do této doby byly tiskárny obecně drahá zařízení, a proto se používaly především na prototypovou výrobu v průmyslu. Kolem roku 2005 začínají vznikat iniciativy, jejichž cílem bylo nabídnout jednoduché a nezávislé tiskárny jednotlivcům. Projekt Rep Rap (Replicating Rapid Prototyping) přinesl tiskárnu ve formě tříosé platformy, která využívala technologii Fused Filament Fabrication (FFF) s použitím jednoho nebo více extrudérů. Software a hardware této platformy byly open source a elektronické řízení bylo založené na platformě Arduino. S vypršením původních patentů z 80. let došlo ke zrychlení vývoje technologií a materiálů, včetně zavádění nových. Mimo fotopolymerů, vosku,

hliníku, termoplastů atd. se stále více používají kovy, epoxidové pryskyřice, ale i neobvyklé materiály, jako čokoláda v potravinářství. Také se zkoumá opětovné využití odpadních materiálů. V dnešní době mezi nejčastější technologie patří stereolitografie, Selected Laser Sintering (SLS) a především FFF. [1, 3, 4]

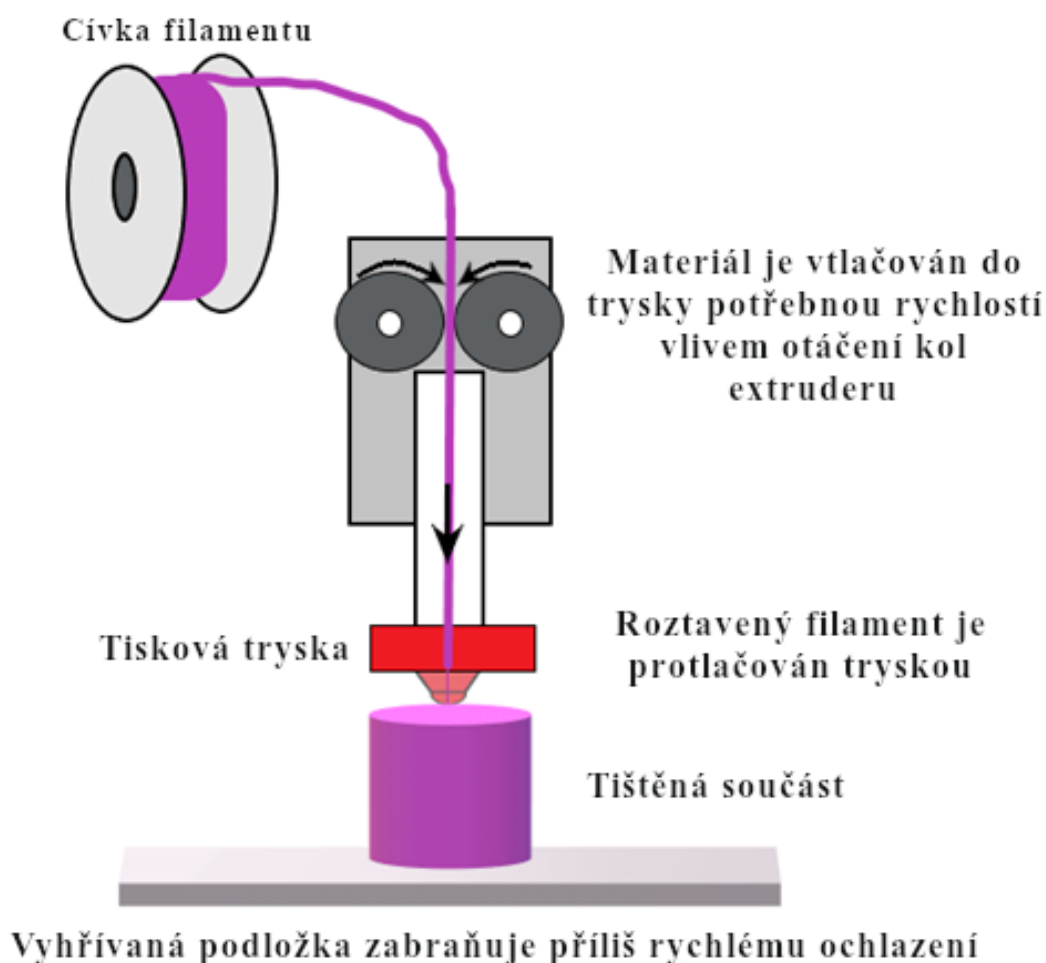


Obrázek 1 První RepRap tiskárna [5]

## 1.2 Fused Deposition Modeling

Jedná se o metodu vytlačování materiálu přiváděného ve formě pevné struny nazývané filament, který se protlačuje přes vyhřívanou trysku, čímž dochází k jeho roztavení. Někdy se označuje také jako FFF (Fused Filament Fabrication). Tisková hlava nanáší tento materiál na tiskovou podložku v předem dané trajektorii, přičemž dochází k chladnutí materiálu. Takto se postupně nanáší jednotlivé vrstvy, přičemž s každou další vrstvou se tisková podložka posouvá dolů (nebo tisková hlava nahoru) v ose Z a proces se opakuje, čímž se postupně tvoří požadovaný pevný díl, jak znázorňuje Obrázek 2. Obecně platí, že čím lepší jsou vlastnosti použitého termoplastu, tím vyšší teploty jsou potřebné na jeho zahřátí a tím je obtížnější takový materiál tisknout. Vyšší tiskové teploty zvyšují pravděpodobnost deformací během tisku s tím, jak dochází k ochlazování součástí, čímž se tvoří vnitřní pnutí. Materiál jako PLA, PETG a ABS jsou obecně považovány za snadno tisknutelné, ale inženýrské a high-tech termoplasty jako PEEK a PEI, přestože nabízejí vynikající

mechanické vlastnosti, je nutné tisknout pomocí průmyslových tiskáren, které umožňují požadované teplotní rozsahy a lepší kontrolu nad procesem. Technologie FDM je široce využívána pro rychlou výrobu prototypů a ověřování designu. Je obzvláště vhodná pro vytváření funkčních dílů, zejména v nekomerčních aplikacích. Díky schopnosti rychle vyrábět prototypy jsou tiskárny FDM cenným nástrojem v různých průmyslových odvětvích, včetně strojírenství a produktového designu.



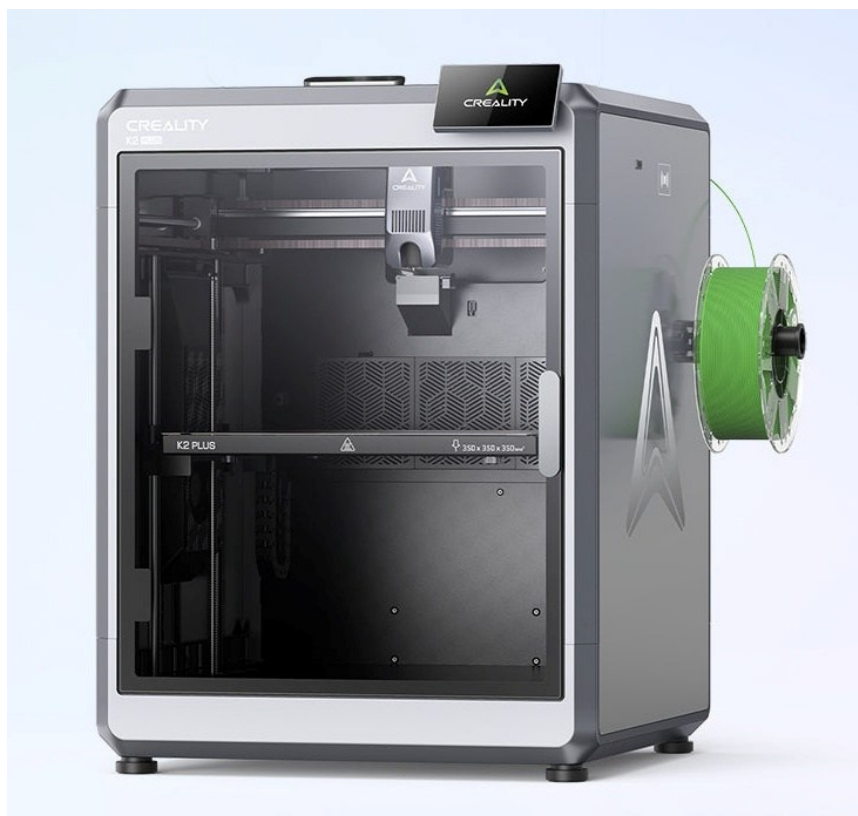
Obrázek 2 Schéma tisku metodou FDM [6]

Tato tisková metoda je považována za uživatelsky přívětivou, jsou dostupné zařízení v různých cenových hladinách pro amatérské i profesionální použití. Vzhledem ke způsobu tisku po jednotlivých vrstvách dochází k jejich chladnutí různou rychlostí a tím k mírnému zkreslení jednotlivých vrstev a tím vznikají deformace nebo smršťování. Na teplotní rozdíly jsou obzvláště náchylné větší součásti nebo tenké díly. Tuto skutečnost je možné kompenzovat vyhřívanou podložkou, uzavřenou tiskovou komorou, která pomáhá redukovat

rychlost ochlazování nebo například zaoblením ostrých hran a rohů či použitím podpurných struktur jako jsou tiskové rafty nebo okraje. [1, 7]

### 1.2.1 Tiskárny

Princip FDM tiskáren spočívá ve vložení vlákna – filamentu do vytlačovací hlavy. Filamenty se dodávají ve formě cívek, z nichž se materiál během tisku postupně odvíjí. Při průchodu vyhřívanou tryskou dochází k roztavení filamentu a jeho nanášení na tiskovou platformu v jednotlivých vrstvách. Proces se dá připodobnit k přesné tavné pistoli pohybující se po jednoznačně definované trajektorii. Pohybem vytlačovací hlavy tiskárna klade materiál na požadovaná místa, po jeho ochlazení a ztuhnutí ve všech vrstvách vzniká hotová součást. FDM tiskárny používají především termoplasty dostupné ve formě vláken, obvykle o průměru 1,75 mm nebo 2,85 mm. Tyto vlákna patří k cenově nejdostupnějším materiálům pro 3D tisk, cena základních materiálů se pohybuje typicky od 400 do 1000 Kč za kilogram, i když vysoce kvalitní technické varianty, jako je PEEK, mohou být podstatně dražší a cenově ve pohybují v řádu vyšších tisíců Kč za kilogram. Oproti jiným tiskovým metodám se FDM filamenty dodávají v široké škále barev, což umožňuje vytvářet pestřejší návrhy a propracovanější sestavy.



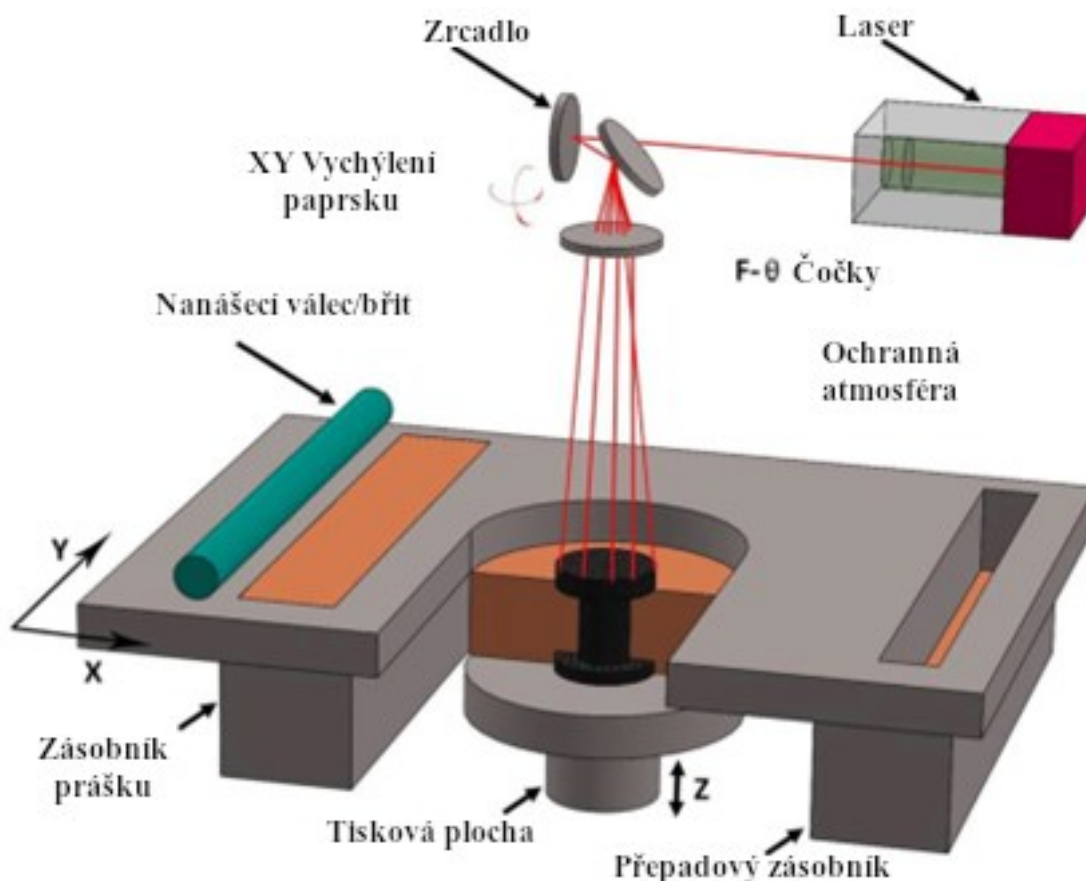
Obrázek 3 FDM CoreXY tiskárna Creality K2 Plus [8]

Na tiskárnách typu FDM je možné nastavit spoustu parametrů za účelem dosažení kvalitního výtisku. Jedná se například o rychlost posuvů, rychlost tisku, teplotu trysky a tiskové podložky za účelem konzistentní kvality povrchu vyráběné součásti. Pro posouzení přesnosti tisku je důležité uvažovat průměr trysky a výšku vrstvy tištěné součásti. Přestože jakost vyráběných součástí je možné ovlivnit více parametry, je to právě menší průměr trysky a nižší výška vrstvy, které obecně umožňují dosáhnout požadavku na hladký povrch a vyšší detail. Při tisku je také nutné uvažovat tiskový objem komory. Stolní tiskárny disponují obvykle komorami s rozměry kolem 200x200x200 mm, zatímco větší průmyslové zařízení mají velikost tiskového prostoru i 1000x1000x1000 mm. U velkých dílů je proto nutné jejich rozdělení na součásti, které se po tisku sestavují. [2, 7]

### 1.3 Selective Laser Sintering

Selektivní laserové sintrování je metoda aditivní výroby na bázi laseru umožňující tisknout kovové i nekovové výrobky přímo z modelů vytvořených v CAD softwaru. Jedná se o efektivní metodu pro rychlé prototypování, kdy dochází k vytváření vrstev materiálu nasměrováním laseru s vysokou hustotou do lože kovových nebo nekovových prášků. Metody SLS lze dále rozdělit podle použitého laserového média a mechanismu tisku. Z hlediska mechanismu se dělí na přímé a nepřímé SLS. Kvalita součástí vytvořených touto metodou je z hlediska kvality povrchu, mechanických vlastností, metalurgických vlastností atd. závislá na procesních parametrech, jako jsou vlastnosti suroviny, geometrické parametry a parametry laseru. Účinnost procesu spékání závisí také na absorbanci materiálů při vlnové délce laseru. Některé polymery mohou vyžadovat přidání látek zvyšujících absorbanci, aby se zlepšila účinnost spékání. Díly vyrobené pomocí metody SLS mohou mít vlastnosti podobné tvářenému materiálu.

Proces, jehož schéma znázorňuje Obrázek 4, začíná zahřátím materiálu ve formě prášku v zásobníku těsně pod bod tání. Poté nanášecí břit rozprostře tenkou vrstvu, typicky kolem 0,1 mm na tiskovou platformu. Následně dochází ke skenování povrchu prášku CO<sub>2</sub> laserem, čímž se spékají částice prášku dohromady a vzniká pevný průřez součásti. Po dokončení vrstvy se tisková platforma posune o tloušťku jedné vrstvy níže, nanášecí břit nanese novou vrstvu prášku na dříve skenovanou vrstvu a proces spékání se opakuje, dokud není součást kompletní.



Obrázek 4 Schéma tiskového procesu metodou SLS [9]

Po dokončení tisku a vychladnutí součásti se pevné díly oddělí od nespečeného prášku, který se poté vyčistí a je možné jej znovu použít. Pro lepší vzhled je možné hotové díly dodatečně opracovat. Velkou výhodou je, že nespečený prášek obklopuje součást a tím ji podpírá během spékání. Díky tomu není potřeba podpěrných prvků, které se běžně používají u jiných metod 3D tisku. Současně je touto metodou možné tisknout více dílů, tudíž se hodí pro sériovou výrobu. Efektivita procesu je vysoká, je možné přibližně 50 % nespečeného prášku recyklovat a opětovně využít, čímž se tvoří méně odpadového materiálu. Typickými materiály používanými touto metodou jsou polyamidy, jejichž výhodou je vynikající dlouhodobá stabilita a chemická odolnost, nejčastěji se používá nylon. Dále se často používají polypropylen, polyethylen či termoplastické elastomery. [3, 7, 10, 11, 12]

### 1.3.1 Srovnání přímého a nepřímého SLS

Tímto procesem je možné vytvářet součásti s hustotou vyšší, než je 80 % teoretické hustoty daného materiálu. Využívá se vysoce výkonný laserový paprsek zaměřený přímo na kovové materiály, přičemž zde nejsou žádné polymerní spojovací materiály. Tato metoda

přímého laserového slinování kovů byla vytvořena v Německu v roce 1995. Následující vývoj umožnil vznik dalších metod přímého SLS. [14]



Obrázek 5 Vyjmutí výrobku vytvořeného metodou SLS [13]

V případě nepřímého SLS jsou částice kovového prášku nejprve obaleny polymerním pojivem. Při tisku laser zahřeje polymer, čímž dojde k jeho roztavení a spojení kovových částic, čímž vzniká tzv. „zelený díl“. Po tisku následuje vypalování nebo infiltrace kovem, aby se zlepšily mechanické vlastnosti součásti. Tisk součástí pomocí nepřímého SLS trvá obvykle v řádu hodin, v případě přímého SLS i v řádu dní, tudíž nepřímá metoda je produktivnější. Nepřímým SLS lze dosáhnout omezené přesnosti, především u rozměrů menších než 2 mm, což je dáno průměrem použitého paprsku. Přímá SLS nepoužívá pojivo a takto vyrobené součásti jsou méně náročné na následné zpracování, ačkoliv samotný proces trvá delší dobu. [15]

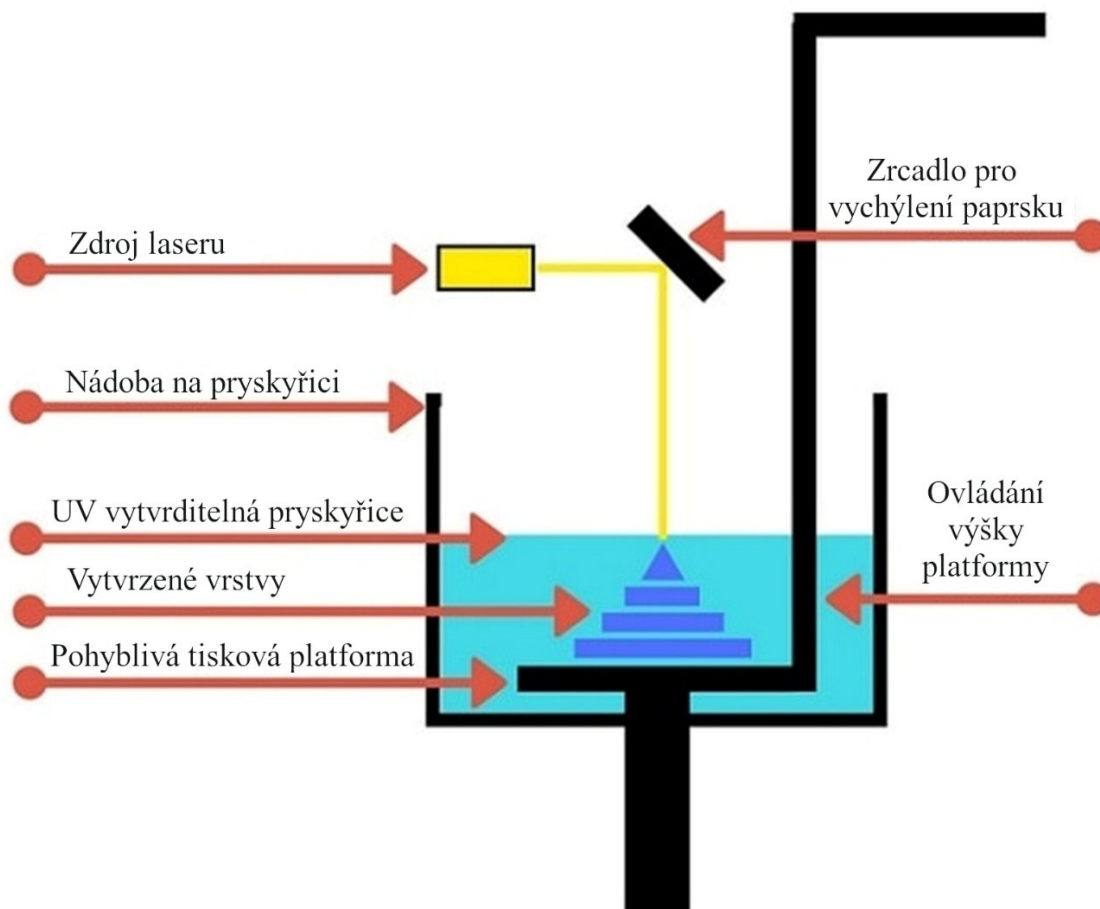
### 1.3.2 Tiskárny

Hlavní rozdíly mezi tiskárnami jsou typ použitého laseru, objem pracovního prostoru a možnosti řízení teplot, nanášení vrstev a dávkování prášku. Proces vyžaduje vysokou přesnost a kontrolu v celém průběhu. Teploty prášků musí být v toleranci 2 °C, aby se minimalizovaly deformace, napětí a tepelné ovlivnění. SLS tiskárny bývají obvykle

navrženy tak, aby během fází zahřívání tisku a chladnutí byly autonomní, tudíž po nastavení procesu probíhá tisk s minimálním zásahem obsluhy, který je vyžadován pro plnění zásobníků prášku a monitorování průběhu tisku. I když je SLS běžný způsob profesionální aditivní výroby, tak pro svou složitost, vysokou cenu a nároky zůstává jeho využití omezeno na velké výrobní podniky. Tiskárny vyžadují speciální vzduchotechniku, potřebují velký prostor a vyžadují delší čas na instalaci a školení obsluhy. [7, 16]

## 1.4 Stereolitografie

Stereolitografie, označovaná zkratkou SLA, patří mezi nejznámější metody 3D tisku a historicky byla jednou z prvních. Pracuje na principu laseru, který slouží k vytvrzení tiskového materiálu – tekuté fotopolymerní pryskyřice do pevných celků. Tiskárna rozdělí 3D model na jednotlivé vrstvy, které jsou pak po jednotlivých bodech obkresleny laserovým paprskem, čímž dochází k vytvrzování pryskyřice. Tento proces znázorňuje Obrázek 6. Mezi klíčové výhody této technologie patří její schopnost výroby vysoce detailních dílů s hladkým povrchem. Oproti některým podobným metodám, jako například Direct Light Processing (DLP), která dokáže vytvořit celou vrstvu najednou je pomalejší, jelikož paprsek postupně vytvrzuje jednotlivé oblasti. Největším omezením SLA jsou materiálové vlastnosti používaných fotopolymerů, které jsou křehké a nemají takovou rázovou pevnost či trvanlivost jako vstříkované součásti, proto se na funkční komponenty používá v omezené míře. V průběhu času také dochází k degradaci vlivem slunečního záření a ztrátě mechanických vlastností. Pro prodloužení životnosti se používají ochranné nátěry. Díky kvalitnímu povrchu a přesnosti součástí nacházejí tyto výrobky uplatnění v různých odvětvích, včetně například lékařství. Na rozdíl od FFF je většina parametrů tiskového procesu pevně daná a nelze je měnit. Typicky je možné nastavit orientace dílu, umístění podpěr, výška vrstvy a materiál, přičemž tyto parametry jsou nastaveny ve sliceru. Tiskárny se většinou dokáží nastavit automaticky podle použitého fotopolymeru. Typická výška vrstvy se pohybuje v řádu 25–100  $\mu\text{m}$ . [7]



Obrázek 6 Uspořádání SLA tiskárny [17]

## 1.5 Multi-Jet Fusion

Multi Jet Fusion (MFJ) je pokročilá technologie 3D tisku vyvinutá společností HP, která slouží pro výrobu modelů s vysokou úrovní detailů a velmi kvalitním povrchem. Princip této technologie se podobá metodě SLS. Princip spočívá v nanesení tenké vrstvy prášku na výrobní plochu, která je vyhřátá těsně pod teplotu tání zvoleného polymeru, nejčastějším materiálem pro tvorbu prášků je nylon. Poté dojde k nanesení černého inkoustu tiskovou hlavou na místa, kde má dojít ke tvorbě stěn součástí. Následuje přejezd infrazářičů těsně nad vytvářenou součástí, čímž dojde k pohlcení záření naneseným inkoustem a v těchto oblastech dochází k tavení prášku. Po ochlazení dochází ke spojení nově vzniklé vrstvy s přechozími. S další vrstvou dochází k posunu tiskové platformy směrem dolů o tloušťku vrstvy a celý proces se opakuje, dokud není zhotovena celá součást. Běžná tloušťka vrstvy je mezi 0,1-0,16 mm, přičemž tenčí poskytují větší přesnost za cenu delších výrobních časů. Takto lze tvořit složité geometrie, které stejně jako u SLS nevyžadují podpory.

Mezi nejvýznamnější přednosti této technologie patří její rychlost, která je podstatně vyšší než u metod FDM a SLS. Vysoká efektivita je dána současným použitím více trysek, které urychlují vytváření jednotlivých vrstev. Kromě nejvíce rozšířených nylonových prášků se mohou používat i prášky na bázi elastomerů nebo kompozitů. Tato všestrannost umožňuje výrobu součástí s odlišnými mechanickými vlastnostmi od prototypů po funkční díly. Touto technologií lze dosáhnout jemných detailů a hladkého povrchu, čímž se snižuje potřeba následného opracování. Přestože je prvotní investice do MJF zařízení vysoká, tak naopak provoz zařízení je celkově ekonomický. To je dáno vysokou rychlostí, malým množstvím odpadu a schopností vyrábět více různých dílů současně. Těchto výhod se využívá především v letectví a Automotive. [1, 18]

## 2 MATERIÁLY PRO 3D TISK

V této kapitole budou rozebrány nejběžnější materiály pro tisk metodou FDM, které mají podobu filamentů navinutých na cívce, přičemž se obvykle používají průměry filamentů 1,75 a 2,85 mm.

### 2.1 PLA

Polyactic Acid neboli kyselina polymléčná je v 3D tiskové technologii FDM široce používaný materiál. K jeho výrobě se používají obnovitelné zdroje, jako je například kukuřičný škrob nebo cukrová třtina, díky čemuž jej lze považovat za ekologičtější variantu oproti plastům na ropné bázi, které budou dále rozebrány. Proto jsou výtisky z tohoto materiálu považovány za udržitelné. Díky snadnému tisku je vhodný pro začátečníky i zkušené uživatele. [19, 20]



Obrázek 7 Výrobky z PLA Wood imitující dřevo [21]

#### 2.1.1 Výroba

Jak již bylo zmíněno, pro výrobu PLA se používá kukuřičný škrob nebo cukrová třtina. První krok výrobního procesu spočívá rozemletí zrn kukuřice, aby mohlo dojít k uvolnění škrobů. Zahřátím dochází k uvolnění cukrů z těchto vstupních surovin. Během následujícího kvašení dochází pomocí mikroorganismů k přeměně cukrů na kyselinu mléčnou. Tato fáze je klíčová, jelikož připravuje základ pro následující proces polymerace. Kyselina mléčná získaná během kvašení prochází polymeračním procesem, čímž se z ní stává kyselina

polymléčná, čehož lze dosáhnout dvěma hlavními způsoby – polymerací otevíráním kruhu nebo přímou kondenzační polymerací, přičemž volba typu polymerace ovlivňuje vlastnosti výsledného filamentu. Takto vzniklý polymer se ochladí a ztuhne do podoby pelet, které se následně nasypou do extrudéru, kde dohází k jejich zahřátí a roztavení. Takto roztavené PLA se protlačuje tryskou, čímž vytváří souvislé vlákno, které se po ochlazení namotává na cívku. Důležitá je optimalizace tohoto procesu, aby byl průměr vlákna v požadované toleranci a nedocházelo k defektům při tisku. [19, 20]

### 2.1.2 Vlastnosti

PLA je z vícero důvodů jedním z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk. To je dáno celkovou dostupností, příznivou cenou, množstvím variant, ale také samotnými tiskovými vlastnostmi. Na rozdíl od ostatních materiálů pro 3D tisk nevyžaduje vyhřívanou podložku ani uzavřenou komoru, díky čemuž jej lze tisknout na jednoduchých, levných tiskárnách. Také je poměrně tolerantní na nastavení tiskového procesu, jeho nízká teplotní roztažnost nezpůsobuje deformace na tiskové podložce, modely jsou tvrdé a při tisku vydává minimální zápach bez zdraví škodlivých látek. Výhodou je také možnost vysokých tiskových rychlostí v porovnání s ostatními materiály, takže se velmi hodí pro tisk prototypů. Existuje velké množství barevných provedení, což je také výhoda proti ostatním materiálům. Filamenty mohou být dvou i vícebarevné, s hedvábným nebo mramorovým vzhledem, ale také mohou obsahovat aditiva zlepšující jejich vlastnosti, převážně mechanickou odolnost či imitující vzhled a povrch jiných materiálů. Setkat se můžeme například s kompozitními filamenty s plnivem na bázi dřeva, kamene nebo kovů, díky čemuž mohou být například elektricky vodivé nebo reagovat na magnetické pole. Mezi nevýhody tohoto materiálu patří degradace vlivem UV záření, křehkost a nízká teplotní odolnost do teplot kolem 60 °C. U funkčních částí může být vyžadován postprocessing. Při tisku se teplota trysky pohybuje nejčastěji mezi 190–220 °C a teplota vyhřívané podložky 40–60 °C. Používá se na tisk prototypů, modelů a hraček, pro zdravotní nezávadnost je možný styk s potravinami, avšak je třeba počítat s úpravou takových výrobků nebo je používat jednorázově, jelikož mezi tiskovými vrstvami se nachází malé mezery, ve kterých mohou zůstat bakterie. [19, 20]

## 2.2 PETG

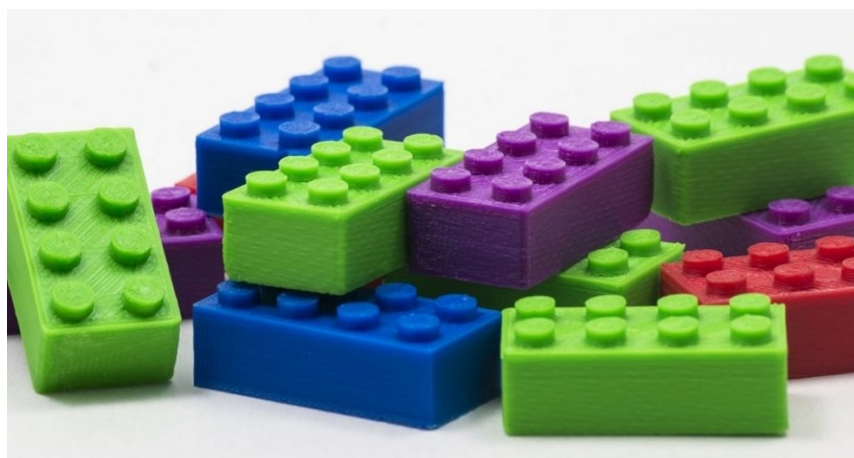
Jedná se o polyethylentereftalát modifikovaný glykolem, který je na rozdíl od nemodifikovaného PET vhodnější pro 3D tisk vzhledem k vyšší teplotní odolnosti a nižší křehkosti. Jeho tiskové vlastnosti jsou kombinací kladných vlastností PLA – snadná

tisknutelnost a ABS – odolnější vyšším teplotám a celková mechanická odolnost. Typicky má velmi dobrou přilnavost mezi vrstvami, riziko deformace nebo zkroucení při tisku je nízké a je možné jej recyklovat. Při tisku nevznikají škodlivé výpary a zápach je minimální. Je též vhodný pro styk s potravinami, avšak za stejných podmínek jako PLA – je třeba počítat s možným usazováním bakterií mezi vrstvami. Je odolný vůči nárazům a namáhání, tudíž je vhodný na tisk funkčních prototypů a součástí. Vykazuje také dobrou odolnost proti chemikáliím, je možné jeho použití v prostředí s agresivními látkami a rozpouštědly. Povrchy výtisků jsou hladké a lesklé. Nevýhodou je náchylnost ke stringování – tvorbě vláken, která za sebou tahá tisková hlava, čímž dochází ke snížení kvality výtisků. Povrch výtisků je náchylný na poškrábání. Je k dispozici také v transparentní formě, tudíž je vhodný na ochranné kryty zařízení a nádoby. Tiskové teploty jsou vyšší než u PLA, teplota trysky je obvykle v rozmezí 220–260 °C. I když není nutná vyhřívaná tisková podložka, je její použití doporučené s teplotou mezi 70–90 °C. Na rozdíl od PLA je nutné s tiskovými teplotami více experimentovat za účelem dosažení optimálních procesních podmínek. [20, 22, 23]

## 2.3 ABS

Akrylonitrilbutadienstryen, označovaný zkratkou ABS je běžný termoplast používaný v různých aplikacích i mimo 3D tisk. Pro pevnost, odolnost a příznivou cenu patří mezi nejčastější materiály využívané k 3D tisku metodou FDM. Díky dobré nárazové odolnosti a houževnatosti je vhodný pro funkční a mechanicky namáhané díly. Oproti ostatním běžným materiálům má vyšší odolnost vůči teplotám až do cca 80 °C, takže je vhodný pro aplikace vyžadující tepelnou stabilitu. Používá se na výrobu prototypů, funkčních součástí a spotřebních výrobků například v Automotive, spotřební elektroniku či výrobu hraček. Oproti PLA a PETG vyžaduje vyhřívanou podložku a také je doporučováno použití tiskové komory nebo uzavřené tiskárny. To je dáno škodlivým zápachem uvolňovaným při tisku a také náchylností na změny teploty, která se projevuje smršťováním materiálu během chladnutí. Vlivem smršťování je obtížnější dodržet rozměrovou přesnost dílců. Přestože pevnost samotného ABS je dobrá, tak může docházet k horší přilnavosti mezi vrstvami, což negativně ovlivňuje celkovou pevnost a odolnost tištěné součásti. Při dlouhodobém vystavení UV záření má tendenci křehnout. Tento materiál je možné snadno opracovat, pro lepší vzhled a kvalitní povrch můžeme výtisky leštit acetonem. Při tisku se teplota trysky nejčastěji pohybuje mezi 230–260 °C a teplota podložky mezi 90–110 °C. V případě použití

tiskové komory je žádoucí vyšší vnitřní teplota, která pomáhá redukovat smršťování během chladnutí a tím stabilizuje tiskový proces. [3, 24, 25, 26]



Obrázek 8 ABS je typický materiál LEGO kostek [25]

## 2.4 ASA

Akrylonitril-styren-akrylát neboli ASA je materiál podobný ABS, avšak s lepšími vlastnostmi, zejména odolností vůči UV záření a povětrnostním vlivům se dá považovat za jeho nástupce. Je tudíž vhodný pro venkovní použití, jeho vyšší UV stabilita pomáhá předcházet degradaci materiálu a blednutí barev, takže si své mechanické vlastnosti dokáže uchovat po delší dobu. Oproti ABS má také vyšší teplotní stabilitu (až do cca 95 °C), při tisku se méně smršťuje a zápach je méně výrazný. Stejně jako v případě ABS je vyžadována vyhřívaná podložka a doporučená tisková komora, také je možné výtisky vyhladit acetonem, je možné jej brousit a lakovat. Tiskové teploty jsou taktéž podobné, pohybují se okolo 250 °C pro trysku a 100 °C pro podložku. Používá se na automobilové komponenty, kryty průmyslových kamer a zařízení pro venkovní použití. Nevýhodou oproti ABS je vyšší cena. [3, 27]

## 2.5 TPU

Termoplastický polyuretan je pružný polymer, který se díky svým univerzálním vlastnostem často používá v aditivní výrobě. Vykazuje vysokou pružnost, houževnatost a ohebnost i při nízkých teplotách, je odolný proti opotřebení a oděru. Skládá se z měkkých a tvrdých kopolymerních segmentů, díky čemuž kombinuje vlastnosti elastomerů a termoplastů. Tato struktura umožňuje změnou chemického obsahu měkkých a tvrdých segmentů dosáhnout rovnováhy mezi pružností a pevností podle požadované aplikace. Jednotlivé typy se obvykle rozpoznávají podle stupně tvrdosti a měří se podle Shore A a D.

Typická hodnota je 95A, pokud je nižší, je filament měkčí, avšak o to hůře se tiskne. V aditivní výrobě roste jeho popularita díky jeho schopnosti vytvářet složité tvary bez podpůrných struktur. Této skutečnosti se využívá například v obuvnictví, na zdravotní a sportovní pomůcky či nositelnou elektroniku, často pro tlumení rázů. Všechny díly vyžadující pružnost podobnou gumě nebo pružné síťované konstrukce lze vytisknout z tohoto materiálu. Při tisku se teplota trysky pohybuje nejčastěji v rozmezí 200–250 °C a podložky okolo 30–60 °C, avšak velmi závisí na konkrétním TPU a jeho tvrdosti. Příliš flexibilní filamenty mohou způsobovat ucpávání extruderu, jelikož nedokáží svou tuhostí vyvinout tlak dostatečný pro vytlačení. Výhodou je dobrá přilnavost mezi vrstvami. Nevýhodou je nutnost optimalizace tiskových parametrů, oproti jiným materiálům nižší tiskové rychlosti a hygroscopické vlastnosti, tudíž je nutné filamenty skladovat v suchém prostředí, ideálně sušit před tiskem. TPU patří mezi nejběžnější flexibilní filamenty, dále se lze setkat také s TPA, TPC či TPS. [1, 28, 29, 30]

## 2.6 PC

Polykarbonát je inženýrský termoplast známý svou pevností a odolností proti nárazu, díky čemuž se používá v aplikacích s požadavky na odolnost, jako jsou ochranné pomůcky, kryty a součásti elektroniky či v automotive. Jednou z jedinečných vlastností polykarbonátu je jeho optická čistota. Může být vyroben jako průhledný, což umožňuje použití tam, kde je důležitá transparentnost, například v krytech světel a optických zařízení.



Obrázek 9 Karabina vytištěná z polykarbonátu [31]

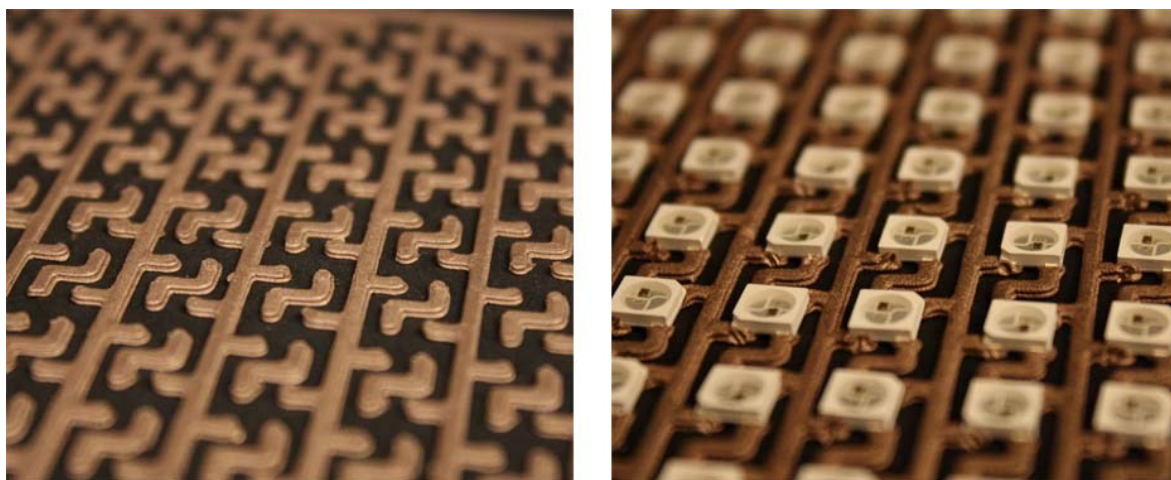
Další jeho předností je dobrá tepelná stabilita až do teplot okolo 110 °C, takže si své vlastnosti dokáže zachovat v širokém rozsahu teplot. Používá se ve vícero metodách aditivní výroby, zejména v FDM a SLS. Kombinace nízké hmotnosti, pevnosti a odolnosti umožňuje v některých aplikacích jeho použití místo hliníkových slitin. Jedná se o obtížný materiál na tisk, jelikož vyžaduje vyšší teploty, které nemusí být dosažitelné běžnými spotřebitelskými tiskárnami. Tryska musí zvládnout dosáhnout teploty 260–310 °C a podložka 80–120 °C. Při tisku se tvoří škodlivý zápach a je náchylný na smršťování a deformace, proto je vyžadována tisková komora. Velmi silně dokáže vázat vzdušnou vlhkost, proto je doporučeno jej skladovat ve vzduchotěsných nádobách a nejlépe sušit před tiskem. [1, 31, 32]

## 2.7 PA

Pro polyamidová vlákna jsou typické vynikající mechanické vlastnosti, jako je vysoká pružnost a pevnost v tahu. Z tohoto důvodu se polyamid používá na díly, které musí snášet značné namáhání a deformace při používání. Při tisku polyamidu metodou FFF vykazují výrobky dobrou mezi vrstvou přilnavost, která je důležitá pro jejich celkovou mechanickou odolnost. Proto nachází široké uplatnění v automotive, spotřebních výrobcích a v součástech strojů a zařízení. Je vhodný na tisk složitých geometrií a funkčních částí, které jsou mechanicky namáhané. Jeho nevýhodou je silná tendence přijímat vzdušnou vlhkost z okolního prostředí, což má negativní vliv na průběh a kvalitu výtisků. Důležité je proto skladování ve vzduchotěsných nádobách s pohlcovačem vlhkosti a sušení před tiskem. Polyamid je možné smíchat s dalšími materiály, například s uhlíkovými nebo skleněnými vlákny, čímž lze dále zlepšit jeho vlastnosti. Tato kompozitní vlákna mohou poskytovat lepší pevnost, tuhost a tepelnou odolnost, proto se pro náročnější aplikace hodí více než čistý polyamid. Svými tiskovými nároky se podobá polykarbonátu, teplota trysky se pohybuje nejčastěji okolo 250–290 °C a teplota podložky mezi 70–110 °C. Na druhou stranu existují také polyamidové filamenty s modifikovaným chemickým složením nebo blendy s ostatními materiály, často s uhlíkovými vlákny. V těchto případech se tisková teplota může snížit až na teploty okolo 220 °C pro trysku a 50 °C pro podložku. V každém případě je vyžadována krytá tiskárna, jelikož se při tisku uvolňuje škodlivý zápach a může docházet k postupné deformaci výtisků vlivem velkých teplotních rozdílů. Tento takzvaný warping je možné snížit, pokud se teplota v komoře tiskárny zvýší na přibližně 45 °C. [33, 34, 35]

## 2.8 Elektricky vodivé filamenty

Filamenty schopné vést elektrický proud jsou inovativním pokrokem v oblasti aditivní výroby, které umožňují tisknout vodivé součásti a elektronické obvody. Obvykle se vyrábějí smícháváním běžných termoplastů pro 3D tisk, jako jsou ABS a PLA, spolu s vodivými částicemi, mezi které patří grafen, saze nebo kovové prášky. Touto kombinací je zajištěna tisknutelnost podobná běžným filamentům a zároveň elektrická vodivost. Použití těchto filamentů je vhodné zejména na elektronické součástky, senzory a nositelnou elektroniku. S jejich pomocí je možné tvořit funkční součásti a prototypy, které umožňují elektricky vodivé spojení, například desky plošných obvodů a vodivé trajektorie, které jsou přímo integrované do tištěného tělesa. Přítomnost vodivých částic ovlivňuje viskozitu a tání filamentu, takže je zapotřebí pečlivá kalibrace tiskového procesu. Tím může být také negativně ovlivněna celková pevnost a pružnost tiskového vlákna. Povrchová úprava výtisků může zahrnovat povlakování nebo nanášení vodivých nátěrů, které dále zlepšují vodivost výtisků. V oblasti elektricky vodivých filamentů stále probíhá vývoj, který se zaměřuje na zlepšení jejich vodivosti, mechanických vlastností a snazší tisknutelnosti, což je zapotřebí pro jejich větší rozšíření a nižší cenu, která bývá ve srovnání s běžnými materiály vysoká. Vhodné je použití takových filamentů v tiskárnách s více extrudéry, kdy přes jednu trysku je vytlačován podkladový materiál, často PLA nebo ABS a přes druhou trysku se vytlačuje elektricky vodivý filament pouze v požadovaných oblastech a vrstvách, čímž dochází k úspoře času a materiálových nákladů, jelikož se netvoří odpad, který by jinak vznikl při střídání filamentů za použití jednoho extrudéru. [35, 36]



Obrázek 10 Vodivé pole z filamentu Electrifi [37]

### 3 SENZORY HLADINY

Monitorování hladiny vody je důležité především v průmyslových a vodohospodářských aplikacích, kdy je nutné znát aktuální stav v nádržích například pro zajištění nepřetržitého výrobního procesu nebo čistě z bezpečnostního hlediska jako prevence vzniku havárií. Měřením hladiny zjišťujeme celkové množství vody v nádrži nebo nádobě obsažené, které vypočítáme na základě tvaru konkrétní nádoby. Pro zjištění stavu vody v nádrži je možné používat různých senzorů pracujících na mechanických, elektrických, hydrostatických nebo fyzikálních principech. [38]

#### 3.1 Mechanické

Tyto typy senzorů využívají mechanických členů, které mohou být nejčastěji v podobě plováků nebo tyčových měrek. Jsou v přímém kontaktu s měřenou hladinou. [39]

##### 3.1.1 Jednoduchá měřidla

Pro jednoduchou vizuální indikaci aktuální hladiny vodních toků a nádrží může sloužit tyčová měrka. Ta má podobu velkého pravítka a bývá připevněna ke statické, například mostní, konstrukci. Kromě svislé polohy může být také instalována v jedné rovině s břehem vodního toku nebo nádrže, díky čemuž je méně náchylná na poškození. Patří mezi běžné referenční zařízení používaných pro kalibraci elektronických snímačů hladiny. Jsou vhodné pro většinu měření v otevřeném prostoru, jako jsou řeky, mokřady, či velké otevřené průmyslové nádrže a zásobníky. Jejich hlavní nevýhodou je nutnost přítomnosti pracovníka pro monitoring a sběr dat. [40]

##### 3.1.2 Plovákové hladinoměry

Hlavní součástí plovákového hladinoměru je plovák, který má formu tělesa z materiálu o velmi malé hustotě nebo se jedná o lehké duté těleso. Vzhledem k častému nasazení v náročných podmínkách, musí být konstruovány z vhodných materiálů, například z polypropylenu. Těleso plováku je do kapaliny ponořeno pouze málo, přičemž poměr ponořené části plováku a jeho celkové výšky je roven poměru hustot plováku a měřené kapaliny. Tvar plováku je dán rozdílem měřených hladin, pokud je změna polohy hladiny menší než 1 m, má plovák kulový tvar. Pokud je potřeba měřit větší změny hladiny do 40 m, pak se používají plováky válcovitého tvaru, jež je opatřen vodící tyčí. Plováky mohou být

často připojeny na zařízení, která v určité poloze hladiny dokáží spustit čerpadlo nebo alarm. [38, 40]



Obrázek 11 Tyčový hladinoměr [41]

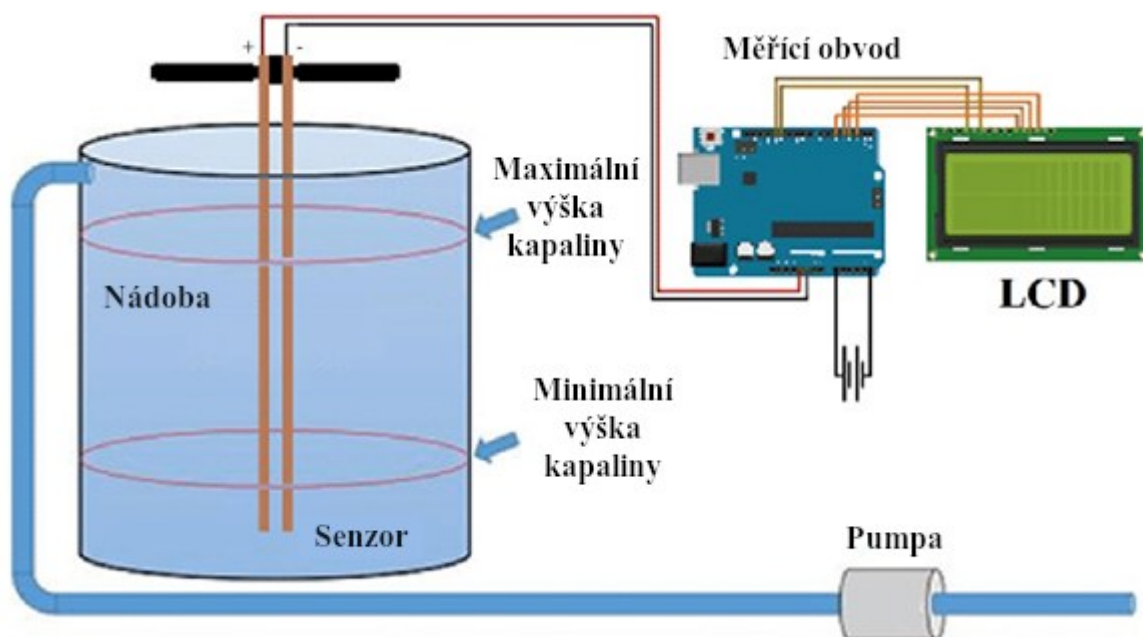
## 3.2 Elektrické

Elektrické senzory hladiny vody jsou zařízení využívají elektrických vlastností vody a materiálů senzorů k přesnému měření. Tyto snímače mohou pracovat na různých principech, včetně odporu a kapacity, a účinně tak detekovat změny hladiny vody. [42]

### 3.2.1 Kapacitní senzory hladiny

Měřicí systémy založené na kapacitních senzorech jsou vhodné pro detekci hladiny kapaliny, jelikož kombinuje přesnost měření, možnost využití různých materiálů pro senzory různých tvarů a uspořádání a nízkou cenu. Tímto způsobem lze provádět i měření hladiny sypkých materiálů. Pracují na principu měření elektrické kapacity, což je schopnost systému uchovávat elektrický náboj. V případě senzoru pro měření hladiny kapaliny je senzor tvořen dvěma kovovými deskami tvořícími kondenzátor. Jakmile hladina kapaliny stoupá nebo klesá, mění se dielektrická konstanta materiálu mezi deskami, což způsobuje změny kapacity. Tato změna je pak využita k přesnému měření výšky hladiny kapaliny. Na měření má také značný vliv materiál elektrod ponořených do kapaliny, na které se často používá nerezová ocel, což je vhodné pro měření vody, která má být zdravotně nezávadná. Za účelem dosažení vysoké přesnosti měření se k senzoru přidává obvod pro úpravu signálu, který slouží k minimalizaci vlivu parazitních kapacit, jež by jinak mohly zkreslovat měření. Mezi

hlavní zdroje parazitní kapacity patří kapacita kabelu senzoru, rozdílná vlhkost a teplota prostředí a vodivé objekty v blízkosti senzoru. [39, 43]



Obrázek 12 Schéma měření hladiny pomocí kapacitního senzoru [44]

### 3.2.2 Odporové senzory hladiny

Elektrický odpor  $R$  je odpor zařízení vůči průchodu elektrického proudu při přiložení elektrického potenciálu. Tento typ senzorů pracuje na principu změny elektrického odporu materiálu v závislosti na přítomnosti vody, kdy se měří odpor mezi dvěma elektrodami, který se liší v závislosti na výšce vodní hladiny v okolním prostředí. Tyto elektrody jsou umístěny na nevodivém podkladovém materiálu. Odpor senzoru se mění nelineárně s úrovní hladiny. Čím více jsou elektrody ponořeny, tím menší je odpor senzoru. Tato vlastnost je klíčová pro přesnou kalibraci. Tyto senzory mohou být zhotoveny z různých materiálů, z kovů se používá nejčastěji měď, platina nebo nerezová ocel. Z nekovových materiálů se používají grafit, vodivé polymery, které umožňují výrobu flexibilních senzorů a vodivá keramika, která je vhodná do prostředí s vysokými teplotami. Pro lepší koroziuvzdornost, teplotní stabilitu či ochranu před poškozením je možné povlakování vodivých elektrod. Častá uspořádání senzorů zahrnují plovákové spínače a odporové sondy ponořené do vody. Kvalita měření pomocí odporových senzorů je ovlivněna teplotou okolního prostředí, jelikož s její změnou se mění odpor materiálu senzoru. V případě požadavku na přesné měření anebo při použití senzoru v prostředí s proměnlivou teplotou je třeba na tuto skutečnost brát zřetel. Výhodou těchto senzorů je jednoduchost použití, možnost nepřetržitého měření, spolehlivost a relativní cenová dostupnost. Mezi hlavní faktory při návrhu odporového senzoru patří

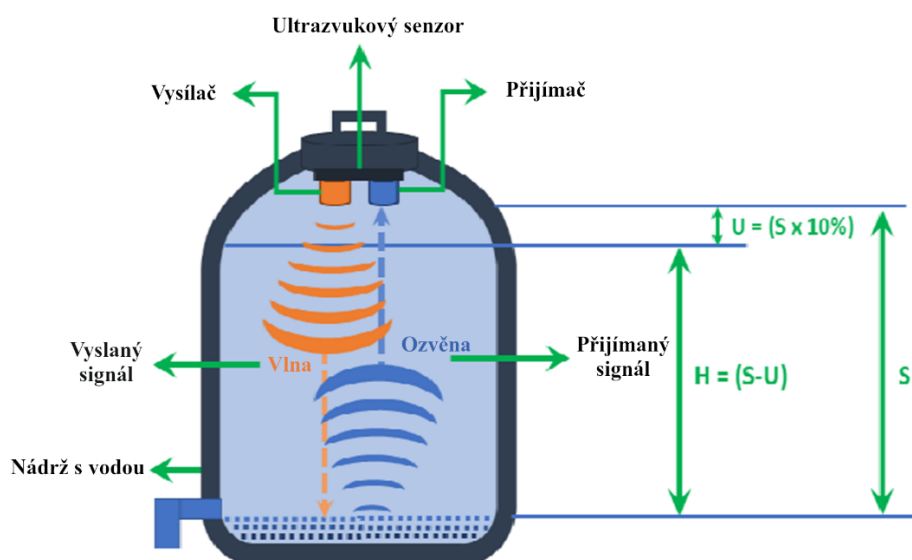
pracovní prostředí, materiál senzoru a požadovaná přesnost měření, kterou je možné zvýšit použitím měřících můstků. [39, 42, 45]

### 3.3 Fyzikální

Fyzikální využívají šíření a odrazivosti vlnění pro měření výšky vodní hladiny. Tyto senzory se dělí na ultrazvukové a radarové a umožňují měřit bez přímého kontaktu s vodou. [45]

#### 3.3.1 Ultrazvukové

Ultrazvukové hladinové senzory využívají pro měření šíření ultrazvukových vln. Periodicky vysílají vysokofrekvenční zvukové vlny, které se šíří vzduchem. Při nárazu na vodní hladinu se vlna odrazí a vrací zpět do snímače, který měří čas, za jaký se zvukový signál vrátí zpět. Pomocí znalosti rychlosti zvuku ve vzduchu určí sensor výpočtem vzdálenost k vodní hladině, která se odvíjí od celkové výšky hladiny vody. Ultrazvukový vysílač a přijímač tvoří jeden konstrukční celek, který je obvykle umístěn v horní části nádrže. Celý systém řídí generátor pulsů. Typický senzor je složen z vysílače/přijímače, který vysílá i přijímá ultrazvukové vlny, mikrokontroléru, který signály zpracovává a vyhodnocuje a displeje nebo komunikačního rozhraní, které umožňuje číst získané informace. Elektronický obvod změří dobu  $t$ , která závisí na délce dráhy impulsu, a zároveň na výšce hladiny. Výška hladiny  $h$  se vypočítá odečtením poloviny naměřené dráhy impulsu od vzdálenosti ke dnu nádrže, což je maximální vzdálenost. Naměřené časy jsou obvykle v rozmezí od desetin do několika sekund.



Obrázek 13 Schéma měření hladiny pomocí ultrazvukového senzoru [46]

Velkou výhodou ultrazvukových senzorů je bezkontaktní měření, nemusí být ponořeny ve vodě, tudíž poskytují přesná měření, která nejsou ovlivněna vlastnostmi vody jako vodivost nebo případný zákal či nečistoty. Z toho plyne také výhoda kompaktnosti senzoru, kdy jeden senzor v rámci svého rozsahu může být použit pro měření v různě velikých nádržích či zásobnících. Jelikož neobsahují pohyblivé části a nejsou v kontaktu s měřenou hladinou, vyžadují tyto zařízení minimální údržbu v porovnání s mechanickými senzory. Používají se v průmyslových nádržích a zásobnících, v zemědělských zavlažovacích systémech, či na vodních tocích a dílech. Přesnost jejich měření může být ovlivněna vzdušnou vlhkostí, teplotou a větrem. Také přítomnost vln či vírů na vodní hladině může rozrušit ultrazvukový signál a způsobovat nepřesná měření. [45, 47]

### 3.3.2 Radarové

Tyto senzory se podobají ultrazvukovým senzorům, avšak místo ultrazvuku vysílají mikrovlnné záření, které se šíří prostředím rychlostí světla. U radarových hladinoměrů se používá dvou měřících metod, časová (pulsní) metoda a frekvenční metoda (s rozmittaným spojitým signálem). Vlny, které vyšle vysílač se na vodní hladině, což je rozhraní dvou prostředí, se z části odrazí zpět do přijímače a z části pokračují druhým prostředím. Zaznamenává se čas, který uplyne od vyslání vlnění k hladině a jeho odrazení zpět k přijímači. Na základě doby, která uplyne mezi vysláním a přijmutím signálu se určí vzdálenost senzoru od hladiny podobně jako u ultrazvukového senzoru. Hodnota vzdálenosti senzoru od hladiny se poté odečte od vzdálenosti senzoru od dna nádrže a tím je určena výška hladiny. [45, 47]

## 4 MIKROKONTROLÉRY

Mikrokontroléry je v dnešní době možné najít ve spoustě zařízení každodenního použití. Existuje značné množství variant a modelů, které se liší svými schopnostmi a vhodností pro určité aplikace. Navzdory rozdílů mezi jednotlivými typy je možné najít společné prvky v jejich uspořádání. V této kapitole jsou popsány jedny z nejběžnějších mikrokontrolérů, jako jsou integrované obvody Arduino a ESP. [48]

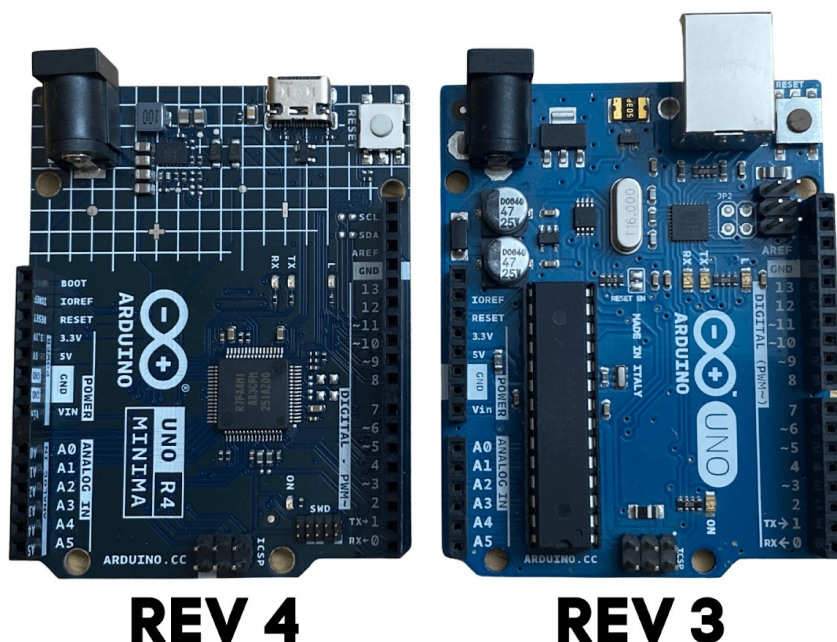
### 4.1 Rozdíl mezi mikrokontroléry a mikroprocesory

Pro přehlednost je nutné uvést rozdíly mezi mikrokontroléry a mikroprocesory, jelikož se jedná o odlišné součásti, z nichž každá má v elektrotechnice konkrétní použití. Mikroprocesor je centrální výpočetní jednotka, označovaná CPU (Central Processing Unit), jejíž součástí není paměť ani periferní rozhraní. Pro správné fungování musí být připojen k externím prvkům, například v podobě vstupně výstupních zařízení a paměťových modulů typu RAM (Random-Access Memory), ROM (Read-Only Memory) /Flash. CPU je mozkiem zařízení a je řízen programem uloženým v paměti. Jeho úkolem je načítat instrukce uložené v paměti, interpretovat a provádět je. Součástí CPU jsou také obvody pro provádění logických a aritmetických operací s binárními daty. Tyto obvody se nazývají Aritmetická a logická jednotka (ALU). Mikroprocesory se používají typicky v chytrých telefonech, osobních počítačích a celkově v zařízeních, která pracují s velkým množstvím dat při vysokých rychlostech, a proto mají vysoké nároky na výpočetní výkon. Mezi největší výrobce mikroprocesorů pro osobní počítače patří firmy Intel a AMD.

Z historického hlediska přišly mikrokontroléry až po mikroprocesorech. Oproti mikroprocesorům obsahují mikrokontroléry mikroprocesor, paměť a periferní rozhraní v podobě I/O pinů (In/Out, vstupně výstupní) integrované na jednom čipu. Na rozdíl od samostatných mikroprocesorů dosahují procesory mikrokontrolérů nižších výpočetních výkonů, avšak jejich pořizovací cena ve srovnání s mikroprocesory je taktéž nízká a mají také nižší spotřebu energie. Uplatnění mikrokontrolérů je například v průmyslových automatizačních systémech, chytré domácnosti, automobilových řídicích jednotkách a pro řízení jednoduchých zařízení a senzorových systémů. Mezi typické zástupce patří vývojové platformy Arduino s procesory Atmel a platformy ESP32 a ESP8266. [48]

## 4.2 Arduino

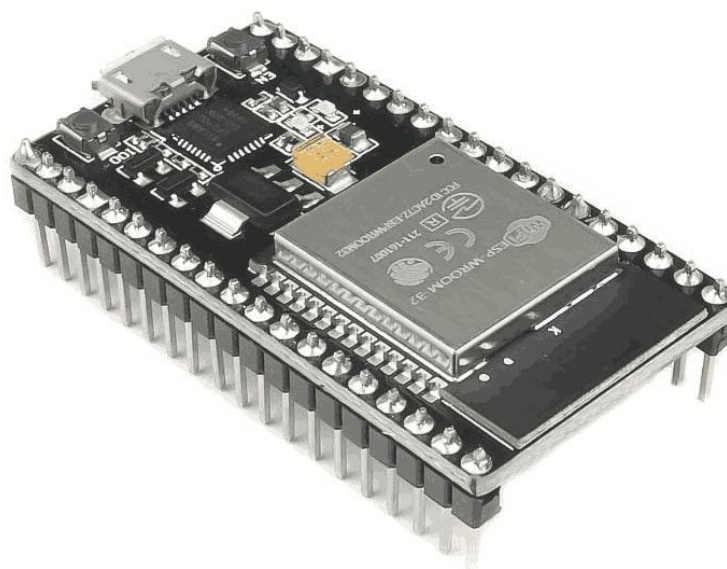
Arduino je open source platforma založená na jednoduše použitelném hardwaru a softwaru. Pro své snadné použití a dostupnost si získala širokou popularitu mezi výzkumníky, designéry i domácími kutily. Mikrokontroléry Arduino dokáží číst vstupy, jako například stisk tlačítka a přeměnit jej na výstup, například rozsvícení LED diody. Arduino vykonává příkazy podle instrukcí v podobě kódu, který je nahrán do jeho mikrokontroléru. Programování je možné v softwaru Arduino Integrated Development Environment (IDE), který umožňuje vytvářet kód založený na jazyku C++ a svým intuitivním rozhraním je vhodný pro začínající uživatele. Existuje velká spousta modulů, z nichž nejběžnější je mikrokontrolér Arduino Uno Rev3 s cenou okolo 700 Kč, avšak k dispozici je též široká řada klonů jiných výrobců. Mezi další patří například menší Arduino Nano, větší Arduino Mega nebo novější nástupce Arduino Uno R4 s pokročilejšími funkcemi jako Wi-Fi nebo Bluetooth. Díky otevřenému zdrojovému kódu existuje spousta online zdrojů a výukových programů a návodů. Mezi klíčové vlastnosti Arduina patří jeho schopnost propojení s různými senzory, což umožňuje sbírat a dále zpracovávat data pro různé aplikace. Hojně se využívá k výuce programování, základům elektroniky a experimentální vědy. Vzhledem k dobré dostupnosti umožňuje vyvíjet pokročilé projekty bez značných investic. [49, 50]



Obrázek 14 Arduino Uno R3 a R4 [51]

### 4.3 ESP32

Jedná se o řadu mikrokontrolérů vyvinutých čínskou společností Espressif. Je nástupcem mikrokontrolérů ESP8266, oproti kterým nabízí vyšší výkon a více funkcí. Pojem ESP32 označuje samotný čip bez nezbytných periférií. K praktickému použití slouží primárně kompletní modul, který kromě ESP32 čipu s procesorem obsahuje také anténu a oscilátor pod kovovým krytem snižujícím radiofrekvenční rušení. Dále se na modulu nachází podle typu desky různý počet připojovacích programovatelných pinů, nejčastěji dvě fyzická tlačítka pro restart modulu, obvykle dvě LED diody, červená signalizující napájení a modrá programovatelná. Pro připojení k počítači se používá konektor Micro USB nebo USB C. Použitý procesor je nejčastěji dvoujádrový o nastavitelné frekvenci až 240 MHz, ale existují i moderní výkonnější verze. Většina modulů umožňuje bezdrátovou komunikaci pomocí Wi-Fi a Bluetooth. Samotných čipů ESP32 a jejich modulů existuje velmi široká řada, jejichž vývoj neustále pokračuje. [52, 53]



Obrázek 15 Modul ESP32 WROOM [54]

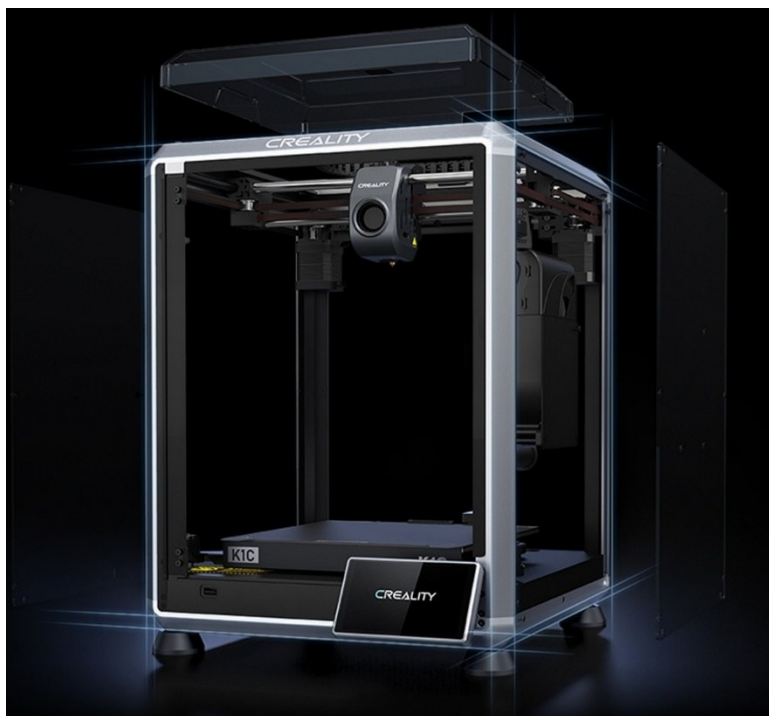
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE PRÁCE A POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ A SOFTWARE

Cílem práce je připravit senzor hladiny vody pracující na principu měření změn elektrického odporu nebo elektrické kapacity pomocí FFF 3D tisku. K tomu bude použito zařízení a materiálů, které jsou běžně dostupné pro koncového spotřebitele. Další částí je připravit obvod využívající mikrokontrolér, který bude sloužit k vyhodnocení dat získaných ze senzorů a jejich zobrazování uživateli v reálném čase. Pro tuto skutečnost budou využity mikrokontroléry Arduino Uno Rev3 (dále pouze Arduino) a ESP32 WROOM (dále pouze ESP32, jež byly popsány v teoretické části práce.

### 5.1 Tiskárna

K tisku byla použita tiskárna Creality K1C, což je uzavřená CoreXY tiskárna využívající technologii FFF. Lze na ní tisknout pokročilejší materiály jako polykarbonát, nylon, flexibilní filamenty či materiály plněné uhlíkovými vlákny. To je dáno maximální teplotou 300 °C pro trysku a 100 °C pro podložku. Tiskový prostor má rozměry 220x220x250 mm, použitá je standartní tryska o průměru 0,4 mm, která je vhodná pro tisk abrazivních materiálů a tiskárna není vybavena multimateriálovým systémem.



Obrázek 16 Použitá tiskárna Creality K1C [55]

## 5.2 Software

Pro zhotovení funkčních senzorů a vyhodnocování jejich měření bylo třeba použít různých softwarových řešení specializujících se na různé aspekty celkové problematiky.

### 5.2.1 Autodesk Inventor

Pro modelování byl použit software Inventor Professional 2024 firmy Autodesk. Použita byla studentská verze softwaru. S jeho pomocí byly vytvořeny 3D modely senzorů a testovacích vzorků, které byly následně exportovány ve formátu STL. Tento typ souborů se poté importuje do sliceru, což je program sloužící pro přípravu 3D modelů k tisku.

### 5.2.2 CrealityPrint

Model ve formátu STL je potřeba připravit tak, aby jej tiskárna dokázala vytisknout podle konkrétních požadavků. K tomu slouží takzvaný Slicer, což je program umožňující přípravu modelu pro tisk, optimalizaci tiskových parametrů jako jsou rychlosti, teploty, tiskový materiál, chlazení a podobně. Konkrétně použitý Slicer CrealityPrint je oficiální software výrobce pro jeho FFF tiskárny. Je možné použít programy třetích stran, avšak tehdy může být zapotřebí delší nastavení použitých tiskáren a jejich optimalizace. Použití oficiálního softwaru také umožňuje plnohodnotné využití všech vlastností tiskárny, jako je například kamera umožňující monitorování tisku.

### 5.2.3 Arduino IDE

Jedná se o software umožňující programování primárně mikrokontrolérů Arduino, ale i jiných výrobců, což může někdy vyžadovat stažení potřebných knihoven pro správnou komunikaci s daným mikrokontrolérem. Výhodou je dostupnost množství tutoriálů a široká komunita tvůrců, díky které je tento program vhodný i pro začátečníky, kteří se jinak v oblasti programování příliš neorientují. Pomocí Arduino IDE budou programovány všechny kombinace mikrokontrolérů, senzorů a displejů použitých v této práci.

## 6 OVĚŘOVACÍ PROTOTYPY

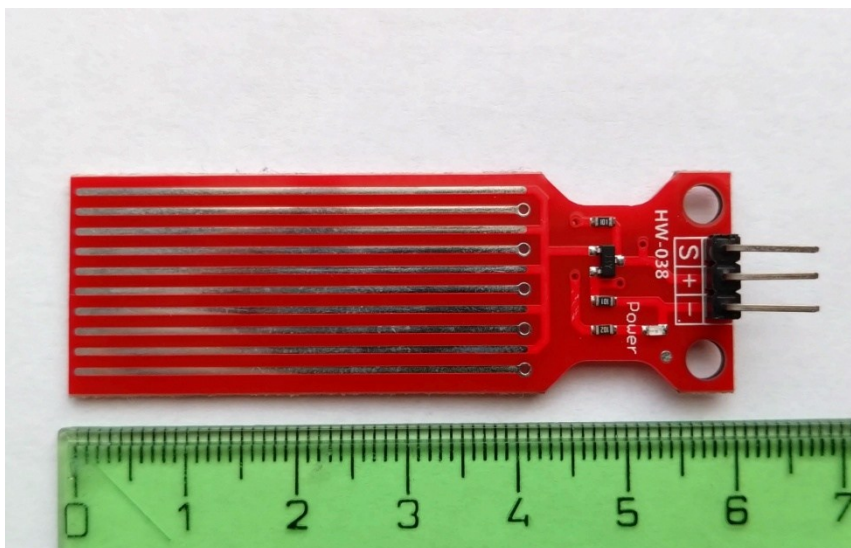
Tato kapitola se věnuje ověřování prototypů z hlediska jejich vhodnosti pro senzor hladiny vody. Nejprve bylo nutné ověřit funkčnost senzorů na základě jejich elektrického principu, na základě čehož byly poté vybrány materiály pro senzory připravené 3D tiskem.

### 6.1 Testování principu senzorů

Jako nevhodnější pro následnou výrobu pomocí 3D tisku se jeví senzory pracující na principu změny elektrického odporu a elektrické kapacity. Jejich rozměry a materiálové složení jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

#### 6.1.1 Odporový senzor

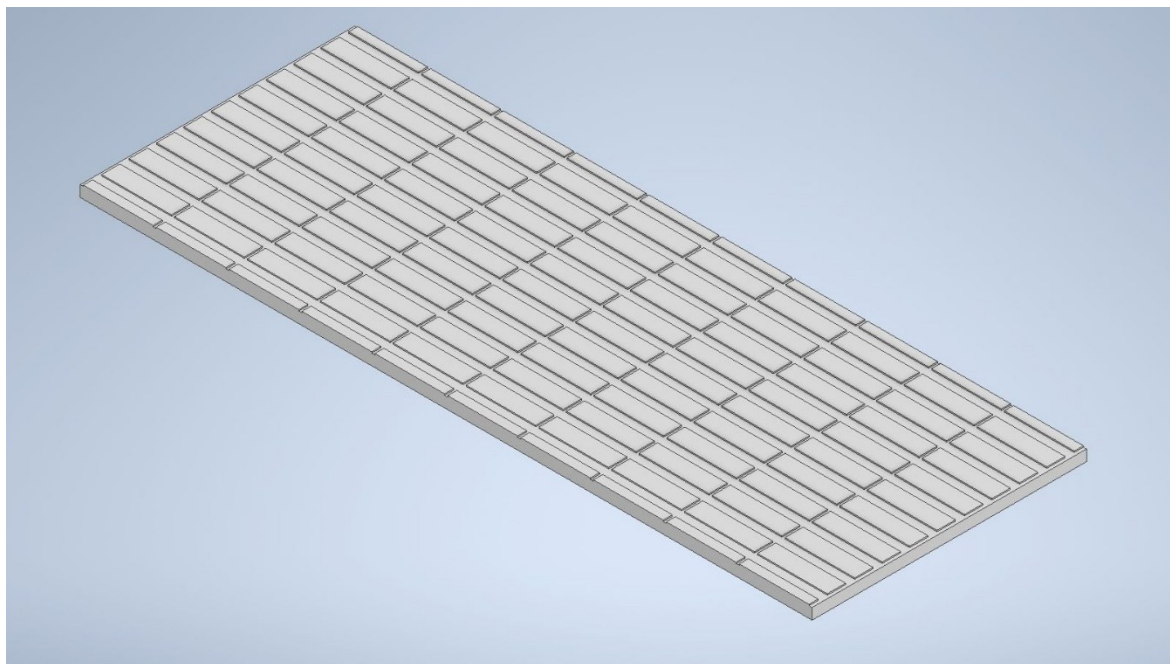
Tento typ senzoru do značné míry vychází z odporového senzoru, který bývá součástí elektronických stavebnic využívajících Arduino. Originální senzor obsahuje 10 rovnoběžných vodičů o délce přibližně 40 mm, které jsou v přímém kontaktu s měřenou hladinou. Senzor je dále osazen malou LED diodou signalizující napájení a  $1\text{M}\Omega$  rezistorem. Připojuje se pomocí 3 vodičů – 2 napájecí a 1 pro přenos signálu.



Obrázek 17 Originální odporový senzor hladiny vody pro Arduino

Prvotním úkolem bylo vytvořit senzor pomocí běžně dostupných materiálů, který sloužil pro ověření funkčnosti takto ručně zhotoveného senzoru, optimalizaci kódu vyhodnocujícího hladinu a použití různých displejů pro zobrazení měřených dat. Původní senzor pro Arduino je poměrně drobný a není tudíž vhodný pro všechny typy aplikací, proto bylo důležité senzor zvětšit. Pro jednoduchost se tento typ senzoru skládá pouze

z podkladového materiálu a vodivých pásem, potřebné propojení a přídatný rezistor se nachází na samostatném nepájitivém poli, ke kterému se senzor připojuje pomocí dvou vodičů. Tím je umožněna vyšší mobilita při zacházení se senzorem a sníženo riziko poškození ostatních částí obvodu, jak z hlediska stříkající vody, tak kvůli fyzickému poškození vlivem například pádu senzoru.



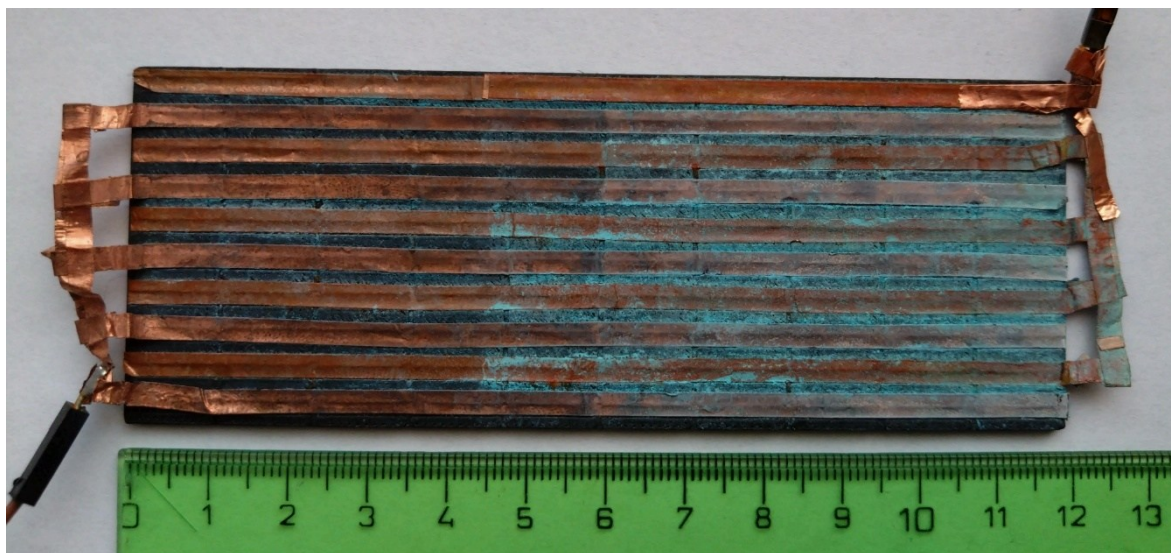
Obrázek 18 Model pro tisk podkladu pro senzor s použitím měděné pásky

Senzor se tedy skládá z podkladového materiálu, který má rozměry 120 x 45 x 2 mm a je vytisknut na 3D tiskárně z černého PLA. Na horní straně se nachází 10 svislých drážek o šířce 1,5 mm a hloubce 0,2 mm, které slouží pro přesnější nalepení měděné pásky, ze které jsou snímací vodiče senzoru. Rovnoběžně na tyto drážky se nachází dalších 9 drážek o stejné hloubce, avšak šířce pouze 0,5 mm, které slouží pro snazší vizuální odečet míry ponoření senzoru po 10 % v rozsahu 0–100 %. Snímací elektrody z měděné pásky o šířce 3 mm jsou na obou kocích podkladu spojeny. Na jednom došlo ke spojení lichých elektrod a na druhém sudých elektrod. Ke každému spojení je připájen vodič, který slouží k připojení senzoru na nepájitivé pole s rezistorem.

Testování tohoto senzoru probíhalo ve sklenici s vodou o objemu 0,5 litru. K měření bylo použito Arduino, rezistor 100  $\Omega$  a zobrazení hodnot probíhalo současně na displej a přes Serial monitor. Cílem je zjištění hodnoty  $U$ , která se mění s ponořením senzoru, jelikož se jedná o rezistor s proměnným odporem. Hodnoty  $U$  rozdělují napětí 5 V do intervalu 0–1023 a byly zapisovány každých 5 sekund. Měření probíhá prostřednictvím porovnání odporu

senzoru připojeného na analogový pin Arduina A0. Schéma zapojení popisuje Obrázek 22 v další kapitole. Nejprve bylo v kódu zapotřebí určit okrajové hodnoty intervalu, ve kterém se bude výška hladiny pohybovat. Na počátku programu je tedy definováno konkrétní číslo pro „lowerLimit“, které udává hodnotu  $U$  zjištěnou plným ponořením senzoru. Druhé číslo pro „upperLimit“ udává naopak hodnotu  $U$  pro senzor, který je sice mokrý ale již je vytažen z vody. Pokud je měřená hodnota nižší než lowerLimit, je senzor považován za ponořený a pokud je vyšší než upperLimit, pak není senzor v kontaktu s vodní hladinou. Hodnota  $U$  pro úplně suchý senzor je vždy v případě měření pomocí Arduina krajní hodnota 1023. Mezi hodnotou upperLimit a krajní hodnotou 1023 je vždy rozdíl podle typu senzoru a použitého rezistoru. Postupným únikem zbytkové vlhkosti dochází k zvyšování hodnoty  $U$  až na 1023, avšak u senzorů, které nejsou na bázi mědi, ať už ve formě pásky nebo filamentu tento proces trvá i okolo 20 minut, což by značně zkreslovalo měření. Z tohoto důvodu je senzor považován za suchý, pokud je hodnota  $U$  stejná nebo vyšší než průměr hodnot pro hladinu 0 cm v tabulce pro příslušný senzor. Před měřením další výšky hladiny byl senzor vždy kompletně vytažen z nádoby s vodou a počkalo se, dokud neukazoval opět hodnotu 0 cm.

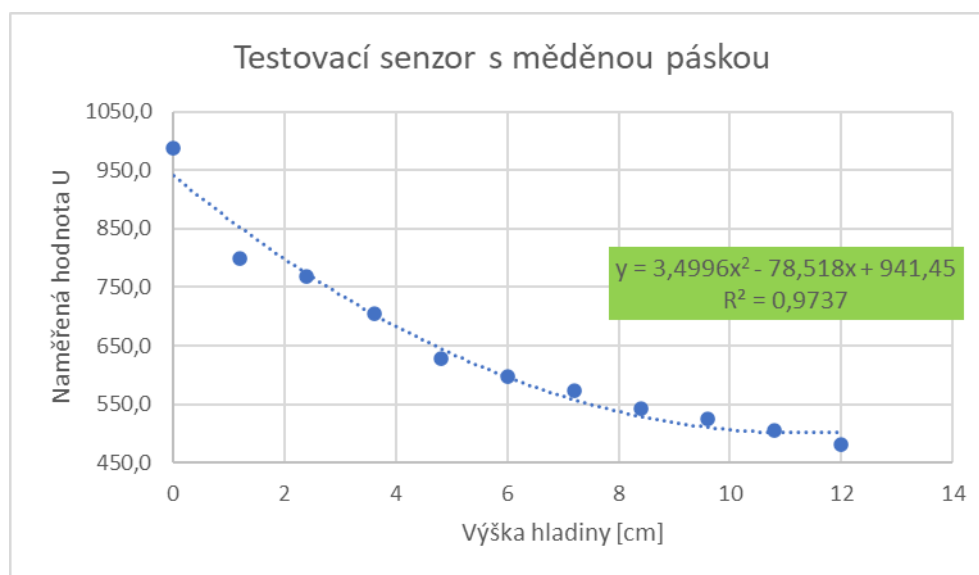
Program tedy pracuje s hodnotou *upperLimit*, *lowerLimit* a *sensorLength*, která udává délku senzoru.



Obrázek 19 Testovací odporový senzor z měděné pásky a podkladu z PLA, v pravé části je zřejmé opotřebení senzoru (oxidace) ponořeného do vody při průchodu eklektického proudu

| Výška hladiny |      |        | Naměřená hodnota U testovacího senzoru 120 mm |     |     |     |     | Průměr | Sm.odch |
|---------------|------|--------|-----------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------|---------|
| [%]           | [cm] | zaokr. | 1                                             | 2   | 3   | 4   | 5   |        |         |
| 0             | 0    | 0      | 988                                           | 990 | 985 | 986 | 992 | 988,2  | 2,9     |
| 10            | 1,2  | 1      | 800                                           | 804 | 793 | 796 | 809 | 800,4  | 6,3     |
| 20            | 2,4  | 2      | 759                                           | 779 | 770 | 764 | 768 | 768,0  | 7,4     |
| 30            | 3,6  | 4      | 712                                           | 706 | 704 | 698 | 700 | 704,0  | 5,5     |
| 40            | 4,8  | 5      | 634                                           | 632 | 630 | 622 | 626 | 628,8  | 4,8     |
| 50            | 6    | 6      | 601                                           | 597 | 595 | 600 | 593 | 597,2  | 3,3     |
| 60            | 7,2  | 7      | 574                                           | 573 | 572 | 577 | 571 | 573,4  | 2,3     |
| 70            | 8,4  | 8      | 545                                           | 539 | 544 | 541 | 539 | 541,6  | 2,8     |
| 80            | 9,6  | 10     | 528                                           | 526 | 526 | 525 | 524 | 525,8  | 1,5     |
| 90            | 10,8 | 11     | 507                                           | 505 | 503 | 506 | 502 | 504,6  | 2,1     |
| 100           | 12   | 12     | 484                                           | 480 | 479 | 485 | 482 | 482,0  | 2,5     |

Tabulka 1 Naměřené hodnoty U pro testovací senzor z měděné pásky

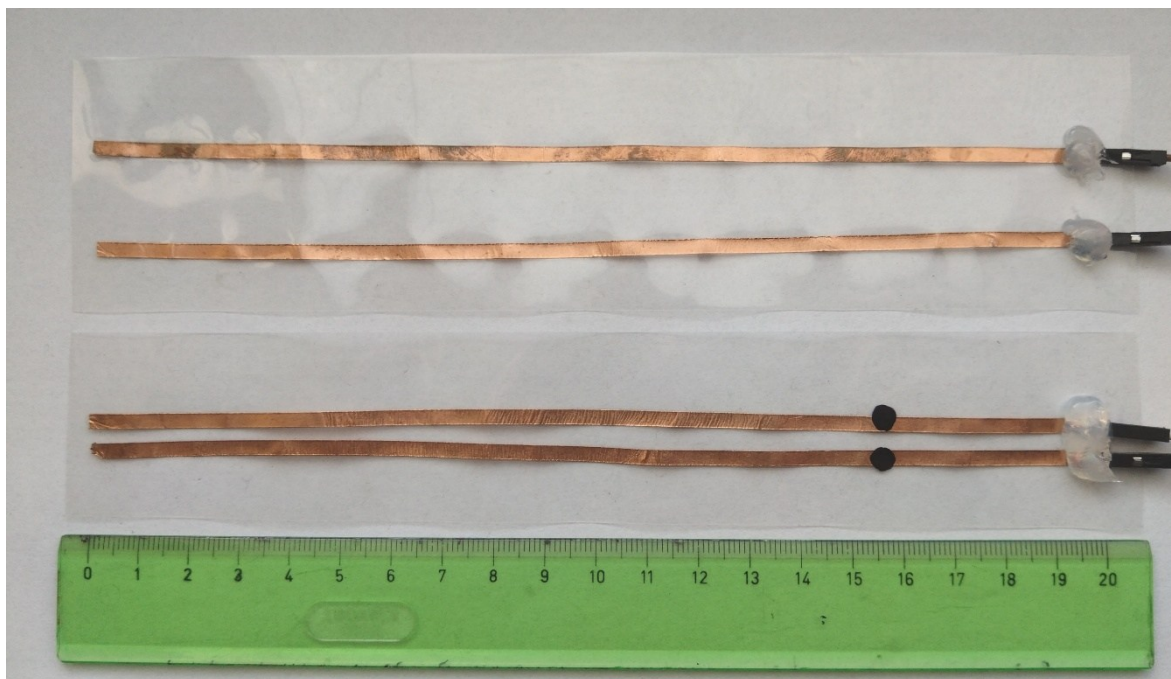


Obrázek 20 Graf závislosti naměřené hodnoty U na výšce hladiny pro testovací senzor s měděnou páskou

### 6.1.2 Kapacitní senzor

Druhý typ senzoru využívá principu změny elektrické kapacity. Konstrukčně je jednodušší než odporový senzor a pro prvotní testování nebyl využit 3D tisk. Bylo zapotřebí použít dvě vodivé elektrody, které jsou mezi sebou i od okolí izolovány vhodným materiálem, který je kompletně obklopuje. V tomto případě jsou vodivé elektrody vytvořeny opět z měděné lepicí pásky jako v případě testovacího odporového senzoru. Jako okolní materiál je použita fólie A4 pro laminování dokumentů, které se nejčastěji vyrábějí z PET a jako lepidlo složku používají ethylenvinylacetát (EVA). Páska pro vodivé elektrody byla nejprve nastříhána na délku 200 mm. Poté byly na předem vyměřená místa dovnitř laminovací fólie nalepeny vedle sebe dvě rovnoběžné elektrody. Na jednom konci elektrod byly ve fólii zhotoveny kruhové otvory pomocí děrovačky, které umožňují připojení vodičů

na měděnou pásku. Následně byla folie s elektrodami laminována za tepla v laminovačce Crelando A3 CLG 450 A1. Po zchladnutí fólie byla ze senzoru oříznuta přebytečná folie pomocí řezačky, jež je součástí laminovačky. Následně byly na měděnou pásku přes otvory ve fólii připájeny vodiče, které slouží k zapojení senzoru do obvodu.



Obrázek 21 Kapacitní senzory se vzdáleností 16 a 4 mm mezi elektrodami, délka elektrod je 200 mm

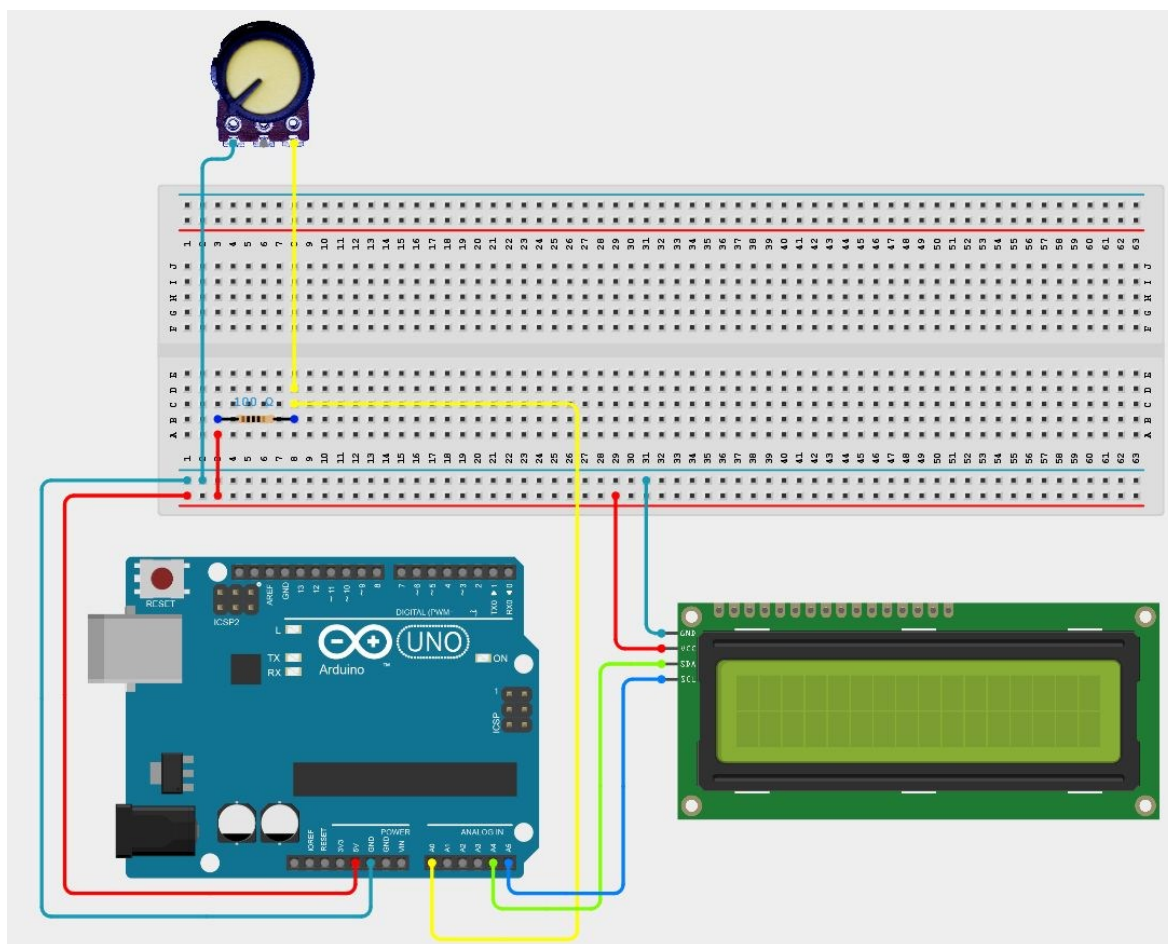
## 6.2 Měřící obvod

Jelikož kapacitní a odporové senzory pracují na odlišném principu, bylo zapotřebí vytvořit pro každé provedení odlišný měřící obvod, aby bylo možné vyhodnocovat úroveň hladiny vody měřené daným senzorem. V obou případech se v obvodu nachází mikrokontrolér, senzor a zobrazovací zařízení.

### 6.2.1 Obvod odporového senzoru

Součástí tohoto obvodu je mikrokontrolér, odporový senzor, zobrazovací zařízení a pomocný obvod na nepájivém poli. Jako mikrokontroléru bylo použito Arduina i ESP32. Pro zobrazování hodnot byly použity LCD, OLED a E-INK displeje. Pro zjednodušení bylo Arduino připojeno k LCD a OLED displeji a E-INK displej k ESP32 vzhledem k jejich odlišným požadavkům na napájení, které jsou rozvedeny v další kapitole. Díky tomu bylo možné zachovat stejné zapojení na nepájivém poli a měnit pouze mikrokontrolér připojený na příslušný displej. Datové vodiče displeje jsou připojeny na příslušné piny

mikrokontroléru, které jsou definovány v použitém kódu. Napájení je vyvedeno z mikrokontroléru do napájecí lišty napájecího pole, odkud se kladný a záporný pól vrací vodiči na příslušný pin displeje. Plusový pól z napájecí lišty vede přes rezistor, za nímž se rozděluje na dva směry. Jedním vodičem je spojen se senzorem a druhým vodičem se vrací do mikrokontroléru, čímž dochází k vyhodnocování proměnlivého odporu. U obvodů s Arduinem je připojen na pin A0, v případě ESP32 na D25 (označení dle popisu na mikrokontroléru). Záporný pól je pak veden z napájecí lišty do senzoru napřímo. Displej zobrazuje hodnotu  $U$  sloužící pro kalibraci senzoru, výšku hladiny v centimetrech a v procentech. Tímto způsobem je možné přidat další senzory, z nichž každý má svůj rezistor a je připojen na mikrokontrolér vlastním pinem.

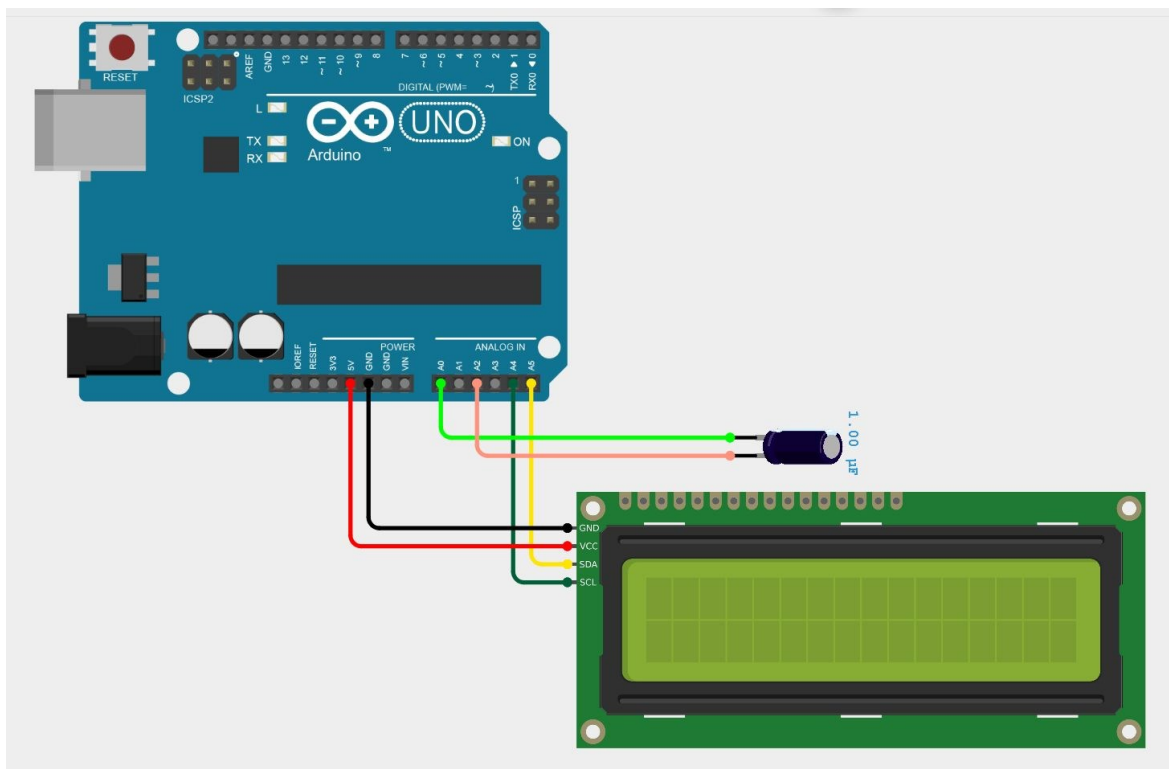


Obrázek 22 Schématické znázornění obvodu pro odporový senzor, který je vykreslen pomocí potenciometru

### 6.2.2 Obvod kapacitního senzoru

Zapojení pro testování kapacitního senzoru bylo jednodušší nežli v případě odporového senzoru. Pro testování bylo použito Arduino a k zobrazení LCD displej. Senzor se připojoval

přes analogové piny A0 a A2 přímo do Arduino, čímž se využila na něm integrovaná elektronika a nebylo zapotřebí vytvářet pomocný obvod na nepájivém poli. Stejně jako v případě obvodu pro odporový senzor se na displeji zobrazuje hodnota U pro kalibraci senzoru a výška hladiny v centimetrech a v procentech.

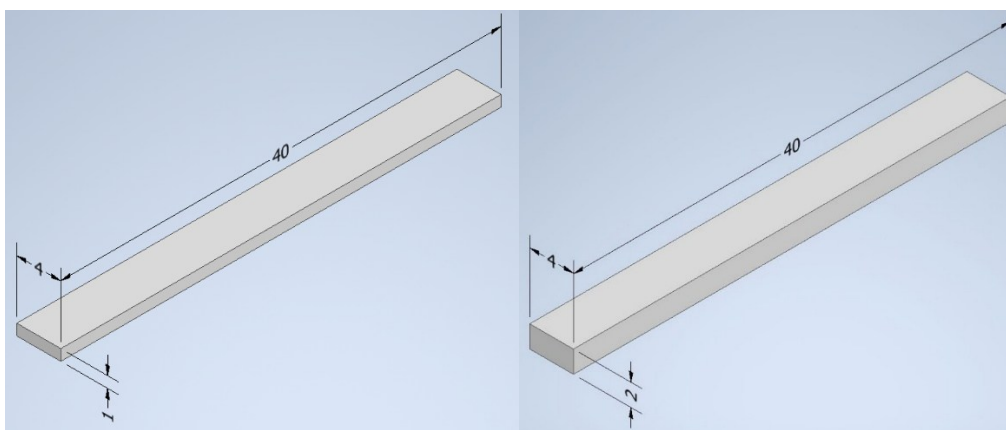


Obrázek 23 Schématické znázornění obvodu pro kapacitní senzor, který je vykreslen pomocí kondenzátoru

Měření hladiny vody pomocí kapacitních senzorů se ukázalo jako možné, avšak hodnoty hladiny značně kolísaly, což bylo dáno například parazitními kapacitami vodičů, čímž docházelo k ovlivňování výsledných hodnot. Tento typ senzorů by pro správné vyhodnocení hladiny vyžadoval komplexnější obvod než pouze mikrokontrolér a také pokročilejší znalosti z oblasti elektrotechniky, což by mohlo být téma pro samostatnou práci. Také tisknutelnost takových senzorů by byla horší oproti odporovým, především z důvodu neustálého přehazování filamentů (pokud by nebyla použita tiskárna s více extrudery), čímž by docházelo k tvorbě velkého množství odpadu. To je vzhledem k cenám vodivých filamentů značně neekonomické, a proto bylo po prvotním testování od tohoto typu senzorů upuštěno a dále se práce věnuje pouze senzorům odporovým.

### 6.3 Testování vhodných materiálů

Po vytvoření prvotních senzorů následovalo testování vhodných filamentů schopných vést elektrický proud, které by sloužily jako vodivé elektrody odporového senzoru. Vzhledem k použité tiskárně byly vždy voleny filamenty o průměru 1,75 mm. U vybraných materiálů se pomocí multimetru měřil odpor samotného filamentu na délce 10 cm. Měření probíhalo před a po sušení materiálu za podmínek podle daného typu filamentu. K sušení materiálu byla použita sušička filamentů Creality Space  $\pi$  umožňující sušení v teplotním rozsahu 45 až 70 °C s dobou sušení až 48 hodin. Pro test vodivosti byly ze všech použitých filamentů vytištěny testovací tělíska o rozměrech 40 x 4 a dvou různých výškách – 1 a 2 mm. K měření odporu byl použit multimetr EMOS M92A.



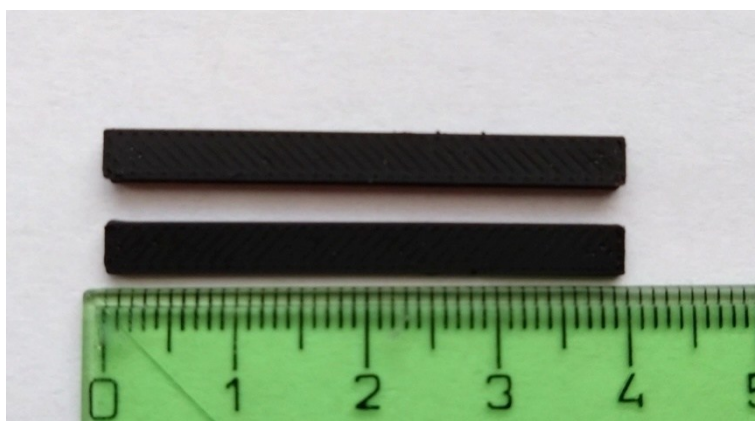
Obrázek 24 Rozměry tělísek pro test vodivosti

#### 6.3.1 Conductive ABS Lankeda

Tento filament čínského výrobce Lankeda využívá uhlík jako aditivum způsobující vodivost. Byl zakoupen již dříve, momentálně není na českých e-shopech k dispozici. I když nedostupný, web Elegant3D jej má v nabídce jako 1 kg cívku za cenu 1399 Kč/kg. Taktéž není k dispozici materiálový list. Teplota trysky se doporučuje v rozsahu 235–260 °C, teplota podložky 90 °C a více. Vzhledem k povaze materiálu a škodlivým výparům se vzorky tisknuly se zavřenou tiskárnou.

Při měření odporu filamentu na délce 10 cm byl jeho odpor před sušením okolo 1 M $\Omega$  a po sušení, které trvalo 8 h při teplotě 55 °C se odpor snížil na hodnoty okolo 600 k $\Omega$ , tudíž oproti jiným materiálům zlepšilo sušení jeho vodivostní vlastnosti. Jelikož ABS je možné sušit déle při vyšších teplotách, bylo ještě těsně před samotným tiskem sušeno na teplotu 65 °C po dobu 4 h. Vzorky byly tištěny s výškou vrstvy 0,08 mm a rychlost tisku byla 60 mm/s, avšak vzhledem k obecně horší přilnavosti ABS k podložce byl tiskový proces na tiskárně

zpomalen na 50 %, tudíž efektivní rychlost dosahovala hodnoty 30 mm/s. Teplota trysky byla nastavena na 260 °C pro první vrstvu a 250 °C pro další vrstvy, teplota podložky dosahovala 100 °C. I když tiskové teploty odpovídají rozsahu teplot udávaným prodejcem a jsou obecně vhodné pro ABS, tak při sundávání z podložky došlo u tenčího vzorku k částečné delaminaci spodní vrstvy a zanechání obtisku na podložce, čímž následovalo pracné čištění podložky. Z této skutečnosti lze usoudit, že pro další výtisky by bylo vhodné snížení teplot trysky i podložky v rámci doporučeného rozsahu. Po vytištění byl na délce vzorku 40 mm měřen odpor v rozmezí 70-120 k $\Omega$ , je tedy zřejmé, že tiskovým procesem dochází k dalšímu zlepšení vodivosti tohoto materiálu. Tento materiál se tedy ukázal jako vhodný pro tisk testovacího senzoru.

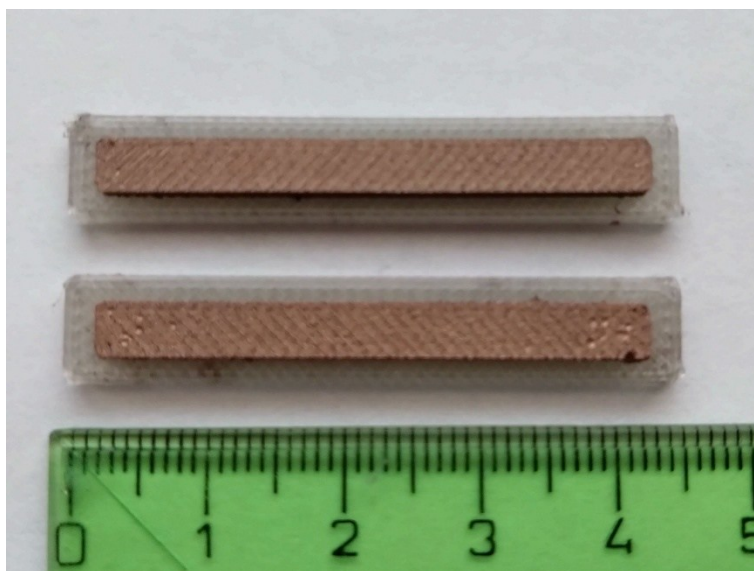


Obrázek 25 Testovací vzorky z vodivého ABS Lankeda

### 6.3.2 Multi3D Electrifi

Jedná se o kompozitní filament amerického výrobce Multi3D, který jako složení uvádí biologicky odbouratelný polyester a měď. Dále vyzdvihuje filament jako nejvíce vodivý z dostupných na trhu s odporem 2,5  $\Omega$  na délce 10,9 cm, avšak tyto hodnoty platí po aplikaci stříbrné pasty na kontaktní plochy pro snížení přechodového odporu. Měřením odporu filamentu multimetrem na délce 10 cm byla zjištěna hodnota 70–150  $\Omega$ , avšak tento značný rozdíl oproti udávaným hodnotám je dán parazitním přechodovým odporem ve spoji filamentu a měřících elektrod a také nepoužitím stříbrné pasty. Filament byl sušen při teplotě 45 °C (nejmenší možná teplota na použité sušičce) po dobu 4 h. Následně byl opět změřen odpor, který dosahoval srovnatelných hodnot jako před sušením. Z použitých filamentů je Electrifi nejlépe vodivý, ale je zároveň značně dražší než ostatní. Prodává se ve 100 g návínu za cenu 215 \$, což odpovídá ceně 4960 Kč za toto množství nebo 49 600 Kč/kg (kurz 1 \$ = 23,05 Kč).

Vzhledem k odlišnému složení oproti běžným filamentům vyžaduje nezvykle nižší tiskové teploty. Výrobce uvádí vhodné teploty trysky mezi 140 a 160 °C s tiskovými rychlostmi v rozmezí 15–45 mm/s. Teplotu tání uvádí 60 °C. Tiskárny běžně disponují ochranou, která zamezuje tisknout teplotou nižší, než je určitá hodnota. Tuto hodnotu je možné snížit přidáním řádku g-kódu „M302 S140“, kdy by nejnižší teplota tisku byla 140 °C. Záleží však na typu firmwaru, který tiskárna používá, Creality K1C je kompatibilní s firmwarem Klipper, kde tento g-kód nefungoval. Vzhledem k platné záruční lhůtě by zásah do firmwaru tiskárny nebyl žádoucí, proto musel být použit alternativní způsob. Při tisku přímo na tiskovou podložku s teplotou trysky 180 °C (nejnižší možná teplota bez zásahu do tiskárny) a teplotou podložky 30 °C došlo k silnému přilepení filamentu k podložce a při snaze jej sundat se výtisk zničil, jelikož teploty procesu byly příliš vysoké.



Obrázek 26 Testovací vzorky Multi3D Electrifi na podkladu z transparentního PLA

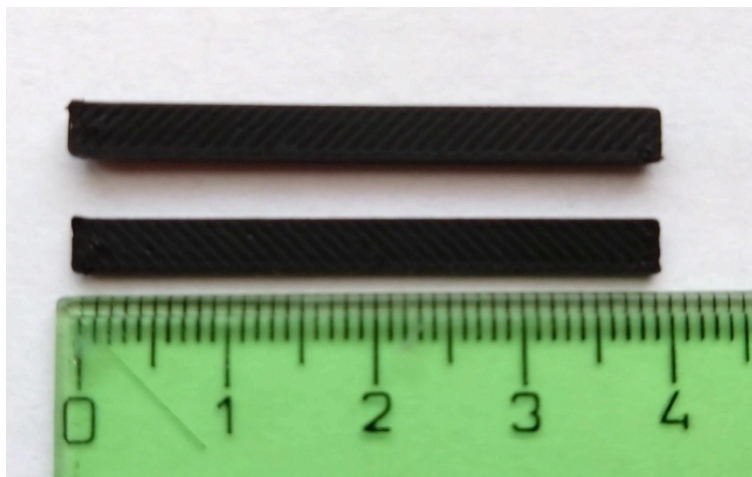
Protože v senzoru jsou vodivé elektrody natištěny na nevodivém podkladu, byly i testovací vzorky Electrifi tištěny na běžné transparentní PLA. Pod samotný vzorek z Electrifi byl přidán kvádr 45 x 8 x 2 mm vytištěný ze zmíněného PLA. V tomto případě musely být zvoleny kompromisní teploty tak, aby jej zvládla jak tiskárna bez zásahu do firmwaru, tak i oba materiály. Teplota první vrstvy byla nastavena na 200 °C a ostatních vrstev 180 °C, teplota podložky 55 °C. Výška vrstvy byla 0,08 mm a rychlost 25 mm/s. Do g-kódu pak musela být přidána pauza po vytištění 25. vrstvy, aby mohlo dojít k manuální výměně PLA za Electrifi. Poté byl tisk obnoven a s tímto nastavením byly testovací vzorky již vytištěny v pořádku. Při měření byl odpor na délce vzorku 40 mm v rozmezí 200-350  $\Omega$ . Pro lepší vodivost výtisků výrobce doporučuje použití trysky o průměru 0,8 mm, která však

nebyla k dispozici, tudíž použití standartní trysky o průměru 0,4 mm a výšky vrstvy 0,08 mm, která byla volena pro lepší srovnání s ostatními materiály, způsobilo zhoršení vodivosti proti měření samotného filamentu. Nelze také zanedbat vliv již zmíněných vyšších tiskových teplot.

### 6.3.3 3DXSTAT ESD-PLA

Toto speciální PLA amerického výrobce 3DXTECH bylo pořízené v návahu 750 g za cenu 98 \$, což při aktuálním přepočtu odpovídá ceně 2259 Kč neboli 3011 Kč/kg (kurz 1 \$ = 23,05 Kč). Výrobce udává jako přednosti možnost tisku bez vyhřívání podložky, nízké smršťování, velmi nízký zápach, a tisknutelnost srovnatelnou s běžným PLA. Jako vodivé plnivo jsou použity uhlíkové nano trubice. Povrchovou vodivost udává v rozmezí 10 M $\Omega$  až 1 000 M $\Omega$ .

Z hlediska tisku udává teplotu trysky 210–240 °C, teplotu podložky 23–60 °C, sušení při 65 °C po dobu 4 hodin a nemá žádné speciální nároky na trysku nebo výšku vrstvy, taktéž nevyžaduje uzavřenou tiskárnu. Vzhledem k udávané teplotě skelného přechodu 60 °C byla teplota sušení ponechána na výchozí hodnotu pro PLA, která činí 50 °C a délka sušení byla 8 hodin. Měřené hodnoty odporu samotného filamentu na 10 cm byly před i po sušení srovnatelné a pohybovaly se okolo 600 k $\Omega$  - 1 M $\Omega$ , což jsou lepší hodnoty, než udává výrobce. Testovací vzorky byly tištěny s výškou vrstvy 0,08 mm, rychlostí 100 mm/s, teplotou trysky pro všechny vrstvy 220 °C a teplotou podložky 35 °C, což jsou parametry odpovídající hodnotám udávaným výrobcem i vhodné pro běžné PLA. Během tisku docházelo k mírnému odlepování okrajů silnějšího vzorku z podložky, tudíž její teplota by mohla být vyšší. Nicméně po vytištění a měření odporu vzorků se oba (výška 1 a 2 mm) ukázaly jako nevodivé, proto nebyly pro tisk testovacích senzorů použity.



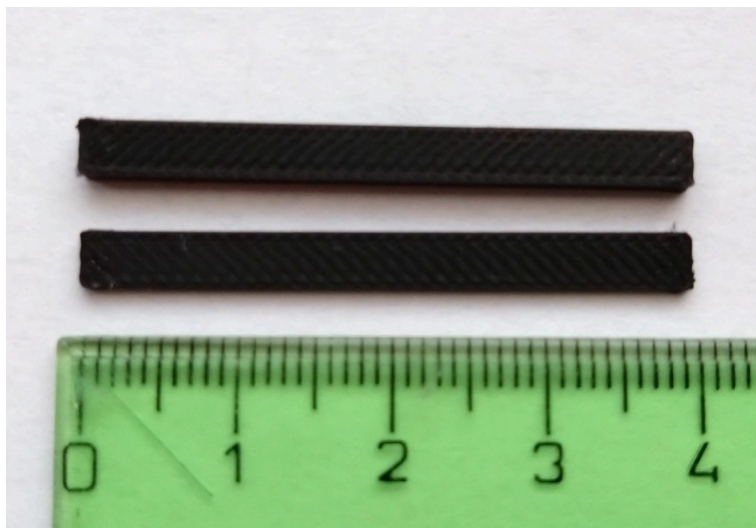
Obrázek 27 Testovací vzorky 3DXSTAT ESD-PLA

#### 6.3.4 Protopasta Conductive PLA

Dalším materiálem, který byl použit, je vodivé PLA amerického výrobce Protopasta. Tato firma má v nabídce více typů speciálních filamentů, například s příměsí kovů a slitin, jako železo, měď, bronz nebo nerezová ocel. K dispozici byl také filament Iron Composite PLA s kódovým označením FEP11705, což je feromagnetický PLA plněný železem, který při měření nevykazuje elektrický odpor a není proto vhodný pro tisk senzoru.

Samotný PLA Conductive filament nese označení CDP11705 a na stránkách výrobce je uvedena vodivost 2,0 – 3,5 k $\Omega$  pro délku 10 cm při průměru vlákna 1,75 mm. Byl zakoupen návin o hmotnosti 500 g za cenu 50 \$, což odpovídá ceně 1 153 Kč za toto množství nebo 100\$ a 2305 Kč/kg (kurz 1 \$ = 23,05 Kč).

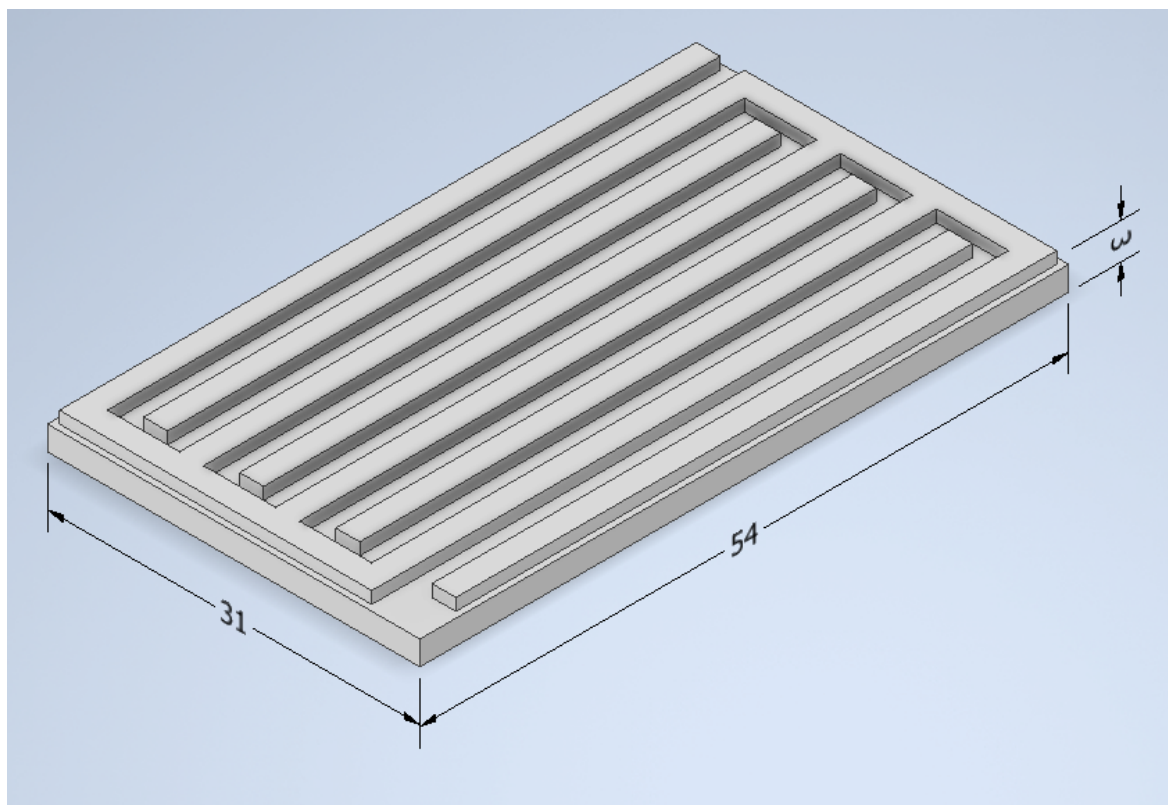
Pro tisk není vyžadována tvrzená tryska ani vyhřívaná podložka a tiskové teploty udává mírně vyšší, ale stále v rozsahu jako pro standardní PLA, konkrétně 210–230 °C. Při použití vyhřívané podložky je doporučená teplota 60 °C. Doporučená je tryska o průměru 0,4 mm a větší. Sušení není obecně vyžadováno, ale udává teplotu 55 °C při 6 hodinách. Filament byl opět měřen před a po sušení, které trvalo 8 hodin při 55 °C. Hodnoty byly v obou případech srovnatelné, pohybovaly se v rozmezí 4–5 k $\Omega$ , což je mírně vyšší hodnota, než udává výrobce, ale oproti ostatním testovaným filamentům se nikterak zásadně neliší. Tisk tělísek probíhal opět s výškou vrstvy 0,08 mm, rychlostí 100 mm/s, teplotou trysky 215 °C a teplotou podložky 60 °C. Po vytištění byl odpor na délce vzorku 40 mm v rozsahu 3–5 k $\Omega$ .



Obrázek 28 Testovací vzorky Protospa Conductive PLA

## 7 SENZORY PŘIPRAVENÉ 3D TISKEM

Po zúžení výběru vhodných materiálů z nich byly vytištěny malé testovací senzory. Tyto senzory se skládají z podkladového nevodivého materiálu, na který jsou v „hřebenovém“ vzoru natištěny vodivé plochy, které po styku s vodou vytvoří vodivé spojení, jehož odpor je závislý na míře ponoření senzoru. Uspořádání snímacích elektrod vychází z testovacího senzoru používajícím měděnou pásku. Pro testování byly rozměry senzoru zmenšeny a oba póly obsahují 4 snímací elektrody. Z nejlepších testovacích senzorů byl následně vytvořen složený senzor, který je vhodný pro praktické měření vodní hladiny ve velkých nádobách. Délka podkladu je 54 mm. Výška podkladu je 2 mm a elektrod 1 mm. Vzhledem k tomu, že musí dojít k propojení elektrod pomocí vody, je měřicí délka 50 mm i když je délka elektrody 53 mm, z čehož plyne označení senzoru.



Obrázek 29 Největší rozměry tištěného senzoru o snímací délce 50 mm

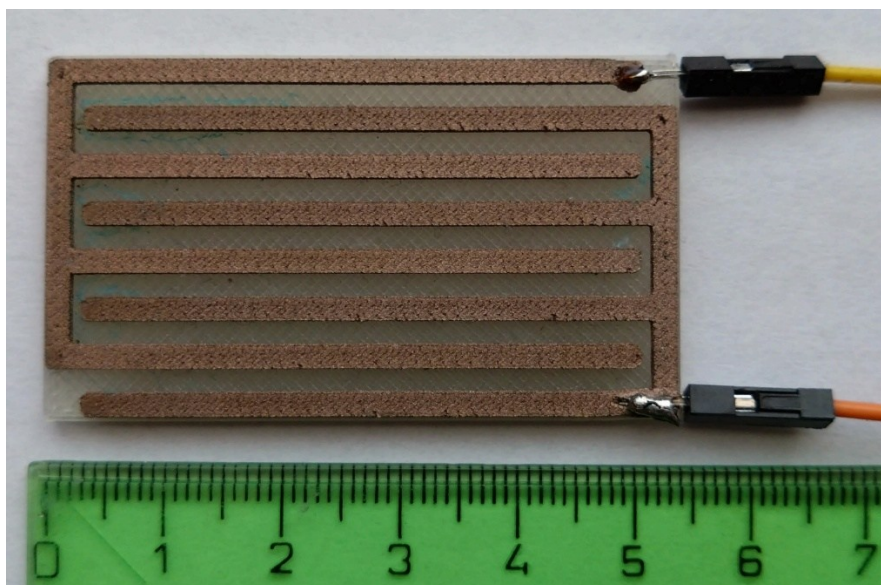
### 7.1 Electrifi senzory

Stejně jako u testovacích vzorků byly i tyto senzory natištěny na transparentní PLA, které sloužilo jako nevodivý podkladový materiál. Pro oba senzory se jako vhodný ukázal rezistor s odporem 100  $\Omega$ . Tiskové parametry byly stejné jako při tisku testovacích vzorků, tedy výška vrstvy 0,08 mm, teploty 200 °C pro první vrstvu a 180 °C pro další vrstvy, teplota

podložky 55 °C. Rychlost tisku byla 25 mm/s. Změna materiálu z transparentního PLA na Electrifi probíhá po vytištění 24. vrstvy.

### 7.1.1 50 mm senzor

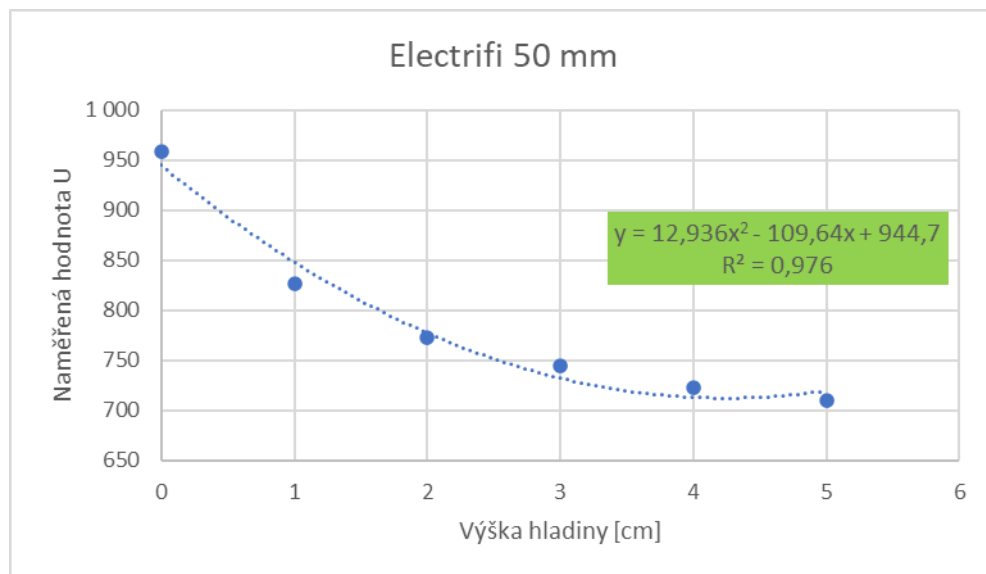
Nejprve byl vytištěn menší testovací senzor, který má snímací délku 50 mm a 4 elektrody na každý pól. Spotřeba Electrifi na jeden senzor je dle Sliceru 1 g, celý senzor při použití 100% výplně váží 5 g. Při uvážení ceny PLA 420 Kč/1 kg tak vychází materiálové náklady jednoho senzoru po zaokrouhlení na 52 Kč/kus.



Obrázek 30 Testovací senzor Electrifi 50 mm, podklad transparentní PLA

| Výška hladiny |      | Naměřená hodnota U senzoru Electrifi 50 mm |     |     |     |     | Průměr | Sm.odch |
|---------------|------|--------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------|---------|
| [%]           | [cm] | 1                                          | 2   | 3   | 4   | 5   |        |         |
| 0             | 0    | 955                                        | 958 | 961 | 956 | 960 | 958,0  | 2,5     |
| 20            | 1    | 825                                        | 829 | 826 | 827 | 823 | 826,0  | 2,2     |
| 40            | 2    | 772                                        | 773 | 771 | 773 | 774 | 772,6  | 1,1     |
| 60            | 3    | 746                                        | 748 | 745 | 744 | 741 | 744,8  | 2,6     |
| 80            | 4    | 725                                        | 723 | 722 | 721 | 724 | 723,0  | 1,6     |
| 100           | 5    | 711                                        | 709 | 710 | 711 | 712 | 710,6  | 1,1     |

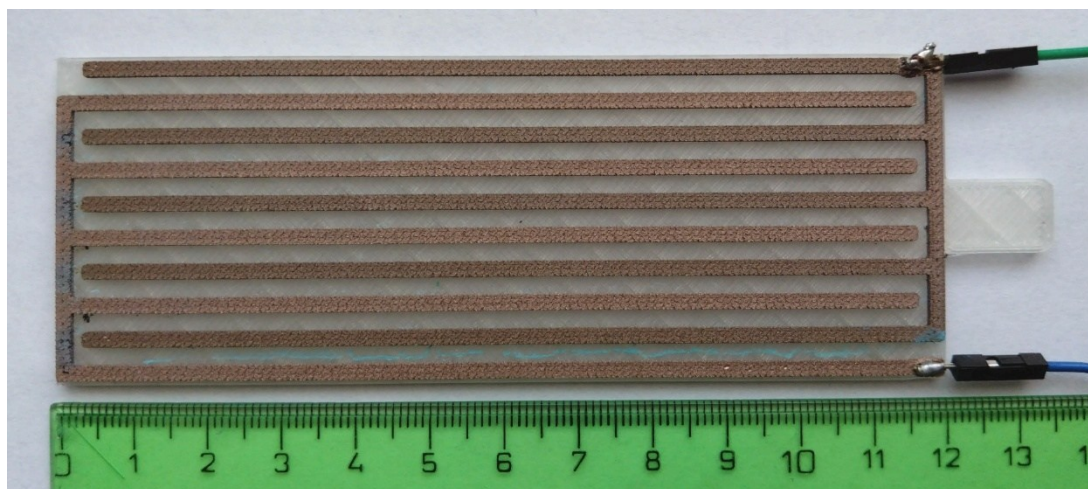
Tabulka 2 Naměřené hodnoty U pro senzor Electrifi 50 mm s rezistorem 100  $\Omega$



Obrázek 31 Graf závislosti hodnoty U na výšce hladiny pro senzor Electrifi 50 mm s rezistorem 100  $\Omega$

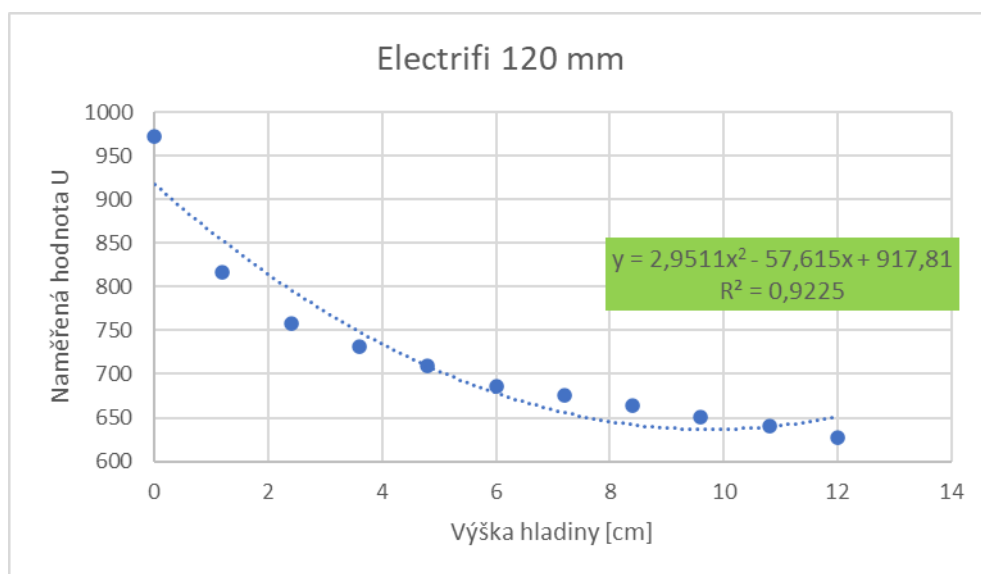
### 7.1.2 120 mm senzor

Po menším senzoru byl vytištěn větší senzor pro srovnání s původním senzorem z měděné pásky. Stejně jako jeho testovací předobraz dokáže též dobře pracovat s rezistorem o odporu 100  $\Omega$ . Společná je také jeho reaktivita měděných elektrod s vodou, kdy dochází k rychlé reakci a uvolňování iontů do vody, tudíž tyto senzory nejsou vhodné pro dlouhodobé měření hladiny, jelikož dochází k rychlé oxidaci vodivého materiálu. V případě tohoto senzoru je spotřeba Electrifi 2,9 g a celý senzor váží 13 g při použití 15 % výplně, která byla volena vzhledem k větším rozměrům senzoru a úspoře materiálu. Cena materiálu potřebného na tento senzor pak vychází na 149 Kč.



Obrázek 32 Senzor Electrifi 120 mm

| Výška hladiny |      |        | Naměřená hodnota U senzoru Electrifi 120 mm |     |     |     |     | Průměr | Sm.odch |
|---------------|------|--------|---------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------|---------|
| [%]           | [cm] | zaokr. | 1                                           | 2   | 3   | 4   | 5   |        |         |
| 0             | 0    | 0      | 969                                         | 976 | 974 | 972 | 975 | 973,2  | 2,8     |
| 10            | 1,2  | 1      | 817                                         | 813 | 818 | 815 | 820 | 816,6  | 2,7     |
| 20            | 2,4  | 2      | 754                                         | 755 | 760 | 758 | 761 | 757,6  | 3,0     |
| 30            | 3,6  | 4      | 732                                         | 728 | 730 | 733 | 735 | 731,6  | 2,7     |
| 40            | 4,8  | 5      | 709                                         | 707 | 708 | 710 | 711 | 709,0  | 1,6     |
| 50            | 6    | 6      | 688                                         | 686 | 683 | 685 | 686 | 685,6  | 1,8     |
| 60            | 7,2  | 7      | 677                                         | 675 | 674 | 675 | 676 | 675,4  | 1,1     |
| 70            | 8,4  | 8      | 666                                         | 665 | 663 | 662 | 661 | 663,4  | 2,1     |
| 80            | 9,6  | 10     | 650                                         | 649 | 650 | 651 | 651 | 650,2  | 0,8     |
| 90            | 10,8 | 11     | 641                                         | 640 | 639 | 641 | 639 | 640,0  | 1,0     |
| 100           | 12   | 12     | 625                                         | 629 | 627 | 626 | 627 | 626,8  | 1,5     |

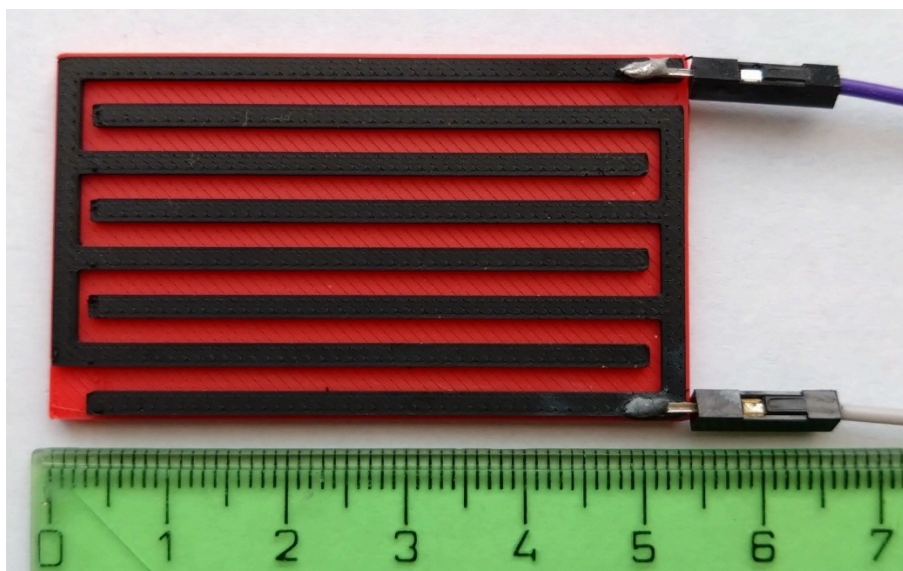
Tabulka 3 Naměřené hodnoty U pro senzor Electrifi 120 mm s rezistorem 100  $\Omega$ Obrázek 33 Graf závislosti naměřené hodnoty U na výšce hladiny pro senzor Electrifi 120 mm s rezistorem 100  $\Omega$ 

## 7.2 Lankeda Conductive ABS senzor

Senzory z vodivého ABS Lankeda byly tištěny také s výškou vrstvy 0,08 mm a rychlostí tisku 60 mm/s. Teplota trysky pro první vrstvu byla 260 °C a 250 °C pro další vrstvy, teplota podložky dosahovala 100 °C. Změna materiálu z nevodivého ABS na Lankeda Conductive ABS probíhá po vytištění 24. vrstvy. Spotřeba vodivého filamentu je dle Sliceru 0,9 g, celý senzor při použití 100% výplně váží 4,2 g. Při uvážení ceny ABS 500 Kč/1 kg tak vychází materiálové náklady na senzor po zaokrouhlení na 3 Kč/kus.

Po vytištění testovacího senzoru o měřicí délce 50 mm a použití 100  $\Omega$  rezistoru docházelo pouze k minimálním změnám hodnoty U, proto bylo zapotřebí použít rezistor s větším odporem. Testované rezistory a přehled jimi dosažených hodnot udává Tabulka 4.

Hodnota min U udává hodnoty pro senzor ponořený včetně vodičů, jejichž nízký odpor ovlivňuje vodivost. Tento rozdíl je zde větší než u senzorů na bázi mědi a tato hodnota není tedy zahrnuta do výpočtu výšky hladiny. Hodnota U mok pak udává nejvyšší hodnotu senzoru, který je celý mokrý, ale již mimo vodní hladinu. Tato hodnota odpovídá nulové výšce hladiny.



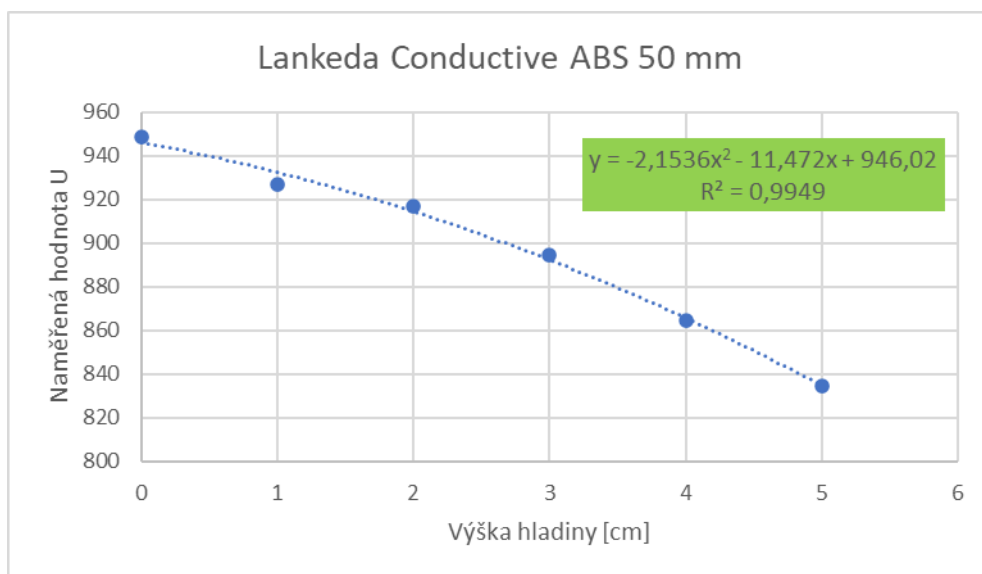
Obrázek 34 Testovací senzor Lankeda Conductive ABS, podklad červené ABS

| Testované rezistory Conductive ABS |       |       |        |       |
|------------------------------------|-------|-------|--------|-------|
| Odpor [ $\Omega$ ]                 | min U | U mok | Rozdíl | max U |
| 100                                | 1007  | 1022  | 15     | 1023  |
| 220                                | 990   | 1020  | 30     |       |
| 1000                               | 904   | 1015  | 111    |       |
| 4700                               | 686   | 985   | 299    |       |
| 10000                              | 557   | 948   | 391    |       |

Tabulka 4 Hodnoty pro rezistory použité s Lankeda Conductive ABS senzorem

| Výška hladiny |      | Naměřená hodnota U senzoru Conductive ABS 50 mm |     |     |     |     | Průměr | Sm.odch |
|---------------|------|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------|---------|
| [%]           | [cm] | 1                                               | 2   | 3   | 4   | 5   |        |         |
| 0             | 0    | 946                                             | 950 | 946 | 949 | 951 | 948,4  | 2,3     |
| 20            | 1    | 925                                             | 926 | 928 | 927 | 929 | 927,0  | 1,6     |
| 40            | 2    | 916                                             | 915 | 917 | 917 | 918 | 916,6  | 1,1     |
| 60            | 3    | 895                                             | 891 | 893 | 896 | 897 | 894,4  | 2,4     |
| 80            | 4    | 866                                             | 862 | 864 | 865 | 866 | 864,6  | 1,7     |
| 100           | 5    | 835                                             | 833 | 834 | 836 | 835 | 834,6  | 1,1     |

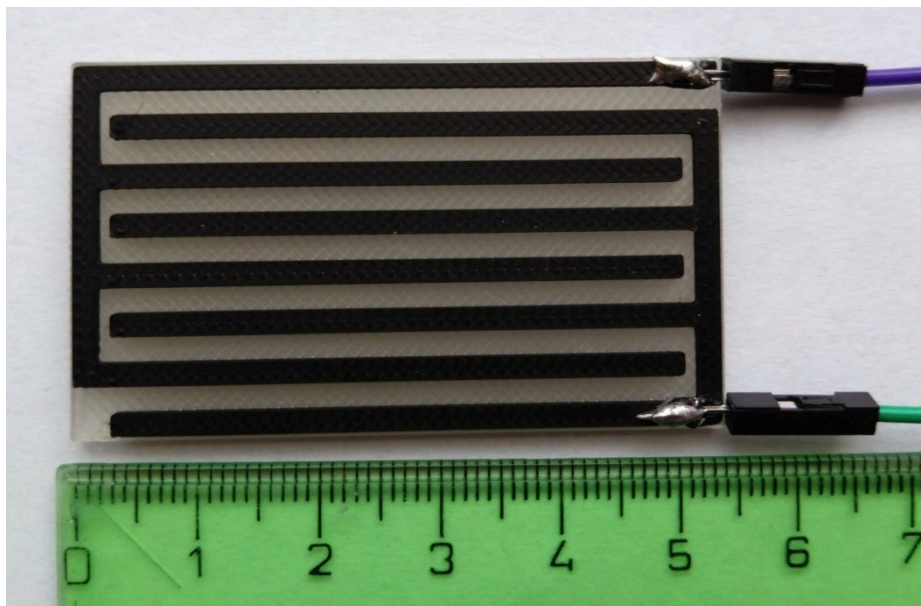
Tabulka 5 Naměřené hodnoty U pro senzor Lankeda Conductive ABS 50 mm



Obrázek 35 Graf závislosti naměřené hodnoty U na výšce hladiny pro senzor Lankeda Conductive ABS 50 mm

### 7.3 Protopasta PLA senzor

Tento senzor při připojení k Arduino pracoval nejlépe s rezistorem 10 kΩ. Z testovacích senzorů se ukázal jako nejvhodnější pro vytvoření většího senzoru, jehož segmenty jsou tvořeny právě těmito testovacími senzory. Mezi výhody tohoto senzoru patří absence reaktivity materiálu s vodou, pro odporový senzor dostatečná vodivost, a především možnost kombinace tohoto materiálu s PLA, který je široce dostupný a snadno tisknutelný na prakticky jakémkoliv současné tiskárně typu FDM. Pozitivní vliv má také minimum zápachu při tisku a není potřeba tisková komora. Tento senzor je tištěn na podklad ve formě transparentního PLA, výška vrstvy byla pro vysoký detail nastavena na 0,08 mm, rychlostí 60 mm/s pro první a 100 mm/s pro ostatní vrstvy. PLA je možné tisknout vyššími rychlostmi, ale vzhledem k tisku více senzorů současně bylo žádoucí pomalejší tempo pro minimalizaci defektů při tisku. Teplota trysky byla 215 °C pro všechny vrstvy a teplota podložky byla nastavena na 60 °C. Změna materiálu z transparentního PLA na Protopasta Conductive PLA probíhá po vytištění 24. vrstvy. Použito je dle Sliceru 1 g vodivého filamentu, celý senzor při použití 100% výplně váží 4 g. Při uvážení ceny PLA 420 Kč/1 kg tak vychází materiálové náklady na senzor po zaokrouhlení na 4 Kč/kus.



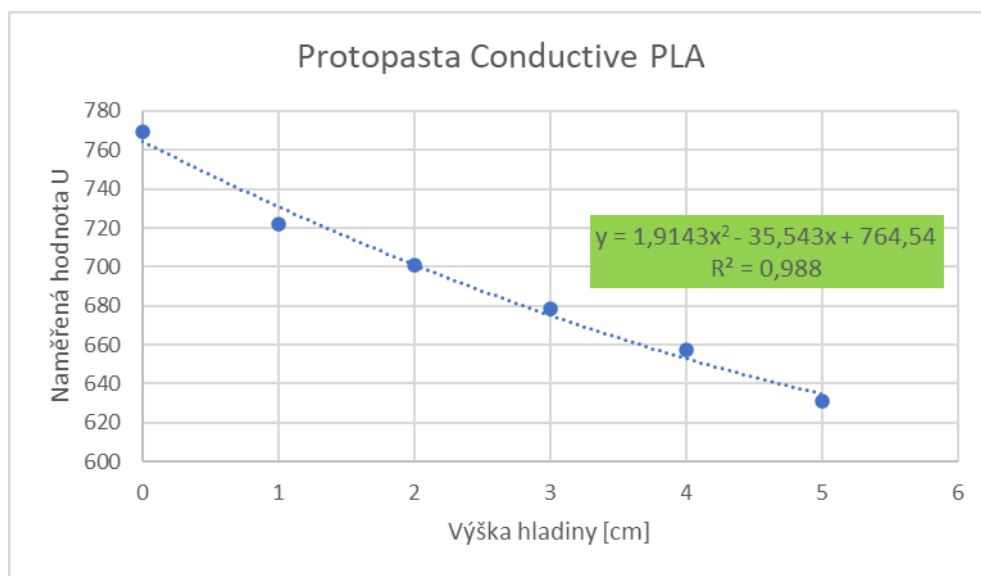
Obrázek 36 Testovací senzor Protopasta Conductive PLA, podklad transparentní PLA

| Testované rezistory Conductive PLA |       |       |        |       |
|------------------------------------|-------|-------|--------|-------|
| Odpor [ $\Omega$ ]                 | min U | U mok | Rozdíl | max U |
| 100                                | 1004  | 1018  | 14     | 1023  |
| 220                                | 980   | 1012  | 32     |       |
| 1000                               | 873   | 979   | 106    |       |
| 4700                               | 660   | 855   | 195    |       |
| 10000                              | 494   | 770   | 276    |       |

Tabulka 6 Hodnoty pro rezistory použité s Protopasta Conductive PLA senzorem

| Výška hladiny |      | Naměřená hodnota U senzoru Conductive PLA 50 mm |     |     |     |     | Průměr | Sm.odch |
|---------------|------|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------|---------|
| [%]           | [cm] | 1                                               | 2   | 3   | 4   | 5   |        |         |
| 0             | 0    | 772                                             | 774 | 769 | 767 | 766 | 769,6  | 3,4     |
| 20            | 1    | 725                                             | 720 | 719 | 722 | 724 | 722,0  | 2,5     |
| 40            | 2    | 699                                             | 702 | 703 | 700 | 701 | 701,0  | 1,6     |
| 60            | 3    | 675                                             | 677 | 680 | 678 | 682 | 678,4  | 2,7     |
| 80            | 4    | 656                                             | 660 | 654 | 657 | 659 | 657,2  | 2,4     |
| 100           | 5    | 630                                             | 631 | 634 | 632 | 629 | 631,2  | 1,9     |

Tabulka 7 Naměřené hodnoty U pro senzor Protopasta Conductive PLA 50 mm



Obrázek 37 Graf závislosti naměřené hodnoty U na výšce hladiny pro senzor Protopasta Conductive PLA 50 mm

#### 7.4 Segmentový senzor Protopasta PLA

Jak již bylo zmíněno, tento senzor je složen ze segmentů v podobě testovacích Protopasta PLA senzorů, které jsou přilepeny na hliníkovém profilu. Tímto způsobem je možné vytvořit senzor na míru, jelikož všechny segmenty jsou stejné a mění se pouze jejich množství a rozmístění na nosném profilu. Použitý hliníkový profil má průřez tvaru L, celkovou délku 1250 mm a šířku 25 mm, tloušťka je 2 mm. Měření probíhalo v sudu o objemu 200 litrů, který je vybaven přepadem ve výšce 840 mm. Z tohoto důvodu je senzor tvořen 5 segmenty, první se nachází na konci senzoru a vyhodnocuje hladinu do 50 mm, další ve výšce 200 mm a ostatní každých dalších 200 mm až do 800 mm. Pro vyhodnocování byl použit mikrokontrolér ESP32 s OLED a EINK displejem. Každý senzor je připojen přes rezistor o odporu 10 kΩ na vlastní pin na mikrokontroléru. Konkrétně jsou použity piny 25, 26, 27, 32, 33. Dále je možné použít například piny 34 a 35 a obecně jakékoliv využívající ADC (analogově-digitální převodník). Je však třeba postupovat podle schématu pro konkrétní mikrokontrolér, jelikož použití některých pinů může ovlivnit funkce mikrokontroléru, jako je například síť Wi-Fi nebo spouštěcí sekvence.

Při potřebě většího množství senzorů je též možné použít variantu ESP32 s větším množstvím pinů, například s 38. Program opět pracuje s hodnotami upperLimit a lowerLimit, tento interval je stejný pro všechny senzory, jelikož jsou vyrobeny stejným postupem. Pro jednotlivé piny, na které jsou senzory připojeny jsou definovány výšky, ve kterých se senzory nachází. K tomu slouží řádek kódu `const int sensorHeights[5] = {5, 20,`

40, 60, 80};, kde jsou určeny tyto výšky v centimetrech. Jelikož je nádoba válcovitého tvaru, dokáže program snadno na základě vzorce pro objem válce určit množství vody v litrech a zaplnění nádoby v procentech. Ta jsou též graficky znázorněna pomocí svislého ukazatele, který se odspodu plní podle úrovně hladiny.



Obrázek 38 Ukázka měření hladiny – 3 senzory ponořeny, výška hladiny je 40 cm, zobrazení na E-INK displeji

Program tedy vyhodnocuje, který nejvyšší senzor je ponořen a jeho příslušnou výšku vyhodnotí a vypíše na displej spolu s ostatními údaji. V rámci jednoho senzoru dokáže přibližně určit míru jeho ponoření, tudíž například rozliší ponoření senzoru 2 a 5 cm. Výpočet hladiny je uveden v další kapitole, kompletní verze kódu pro OLED a E-INK displej je uvedena v příloze práce (PI a PII). Počet segmentů a jejich rozmístění je možné vytvořit na míru pro konkrétní nádobu. Pro testování jsou senzory připevněny pomocí oboustranné lepicí pásky. V tomto případě, kdy hladina v sudu může stoupat poměrně rychle s menším přírůstkem objemu mezi měřicími segmenty, byl jejich počet považován za dostatečný. Jedná se tedy o řešení, které otestovalo možnosti samotných senzorů, mikrokontrolérů, displejů a samozřejmě použitého kódu. Tato sestava různých prvků se jeví jako funkční. V praxi může být použita pro měření hladiny vody například v nádobách a nádržích na dešťovou vodu. Materiálové náklady na použitých 5 senzorů činí 20 Kč, orientační cena hliníkového profilu je 98 Kč za použitý rozměr.



Obrázek 39 Senzor složený z 5 segmentů



Obrázek 40 Měření hladiny vody v sudu pomocí segmentového senzoru, uvedené jsou výšky jednotlivých segmentů

## 8 ZOBRAZOVÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ DAT

Pro snadné čtení a vyhodnocení dat měřených senzorem bylo nutné použít výstupní zařízení, která umožní uživateli jednoduše číst hodnoty měřené senzorem a zpracované mikrokontrolérem. Pro prvotní testování byla použita funkce Serial Monitor, dále pak LCD, OLED a E-INK displeje zapojené přímo na mikrokontrolér. Hlavní odlišnosti v jednotlivých programech jsou hlavně podle použitého typu displeje, se kterým je třeba správně komunikovat a zobrazovat data v požadované formě.

### 8.1 Serial Monitor

Serial monitor je funkcí v prostředí Arduino IDE, která umožňuje uživateli číst měřená data či podle příkazů ovládat mikrokontrolér v závislosti na použitém kódu. V tomto případě byla tato funkce použita pro prvotní nastavení všech použitých senzorů, kdy bylo nutné zjistit naměřené hodnoty z napětíového intervalu. Ten je pro Arduino 0–1023 a je možné použít napětí 3,3 nebo 5 V. Pro ESP32 platí interval 0–4095 a napětí je 3,3 V. Vypisování do Serial Monitoru je součástí i kódů pracujících s displejem, čímž je možné ověřit správnost zobrazovaných údajů. Pro finální verzi senzoru je také vhodné zobrazit na displej pouze data přínosná pro uživatele a hodnoty U pro kalibraci senzorů ponechat pouze v Serial Monitoru.

```
23:48:44.661 -> Senzor 1: 1856
23:48:44.661 -> Senzor 2: 3151
23:48:44.697 -> Senzor 3: 4095
23:48:44.697 -> Senzor 4: 635
23:48:44.697 -> Senzor 5: 0
23:48:44.744 -> Hladina: 22 cm, Objem: 48.5 l, Zaplnění: 27.5 %
```

Obrázek 41 Ukázka výpisu hodnot U přes Serial Monitor, první dva senzory jsou ponořené, třetí je suchý a poslední dva senzory nejsou momentálně připojené

### 8.2 LCD displej

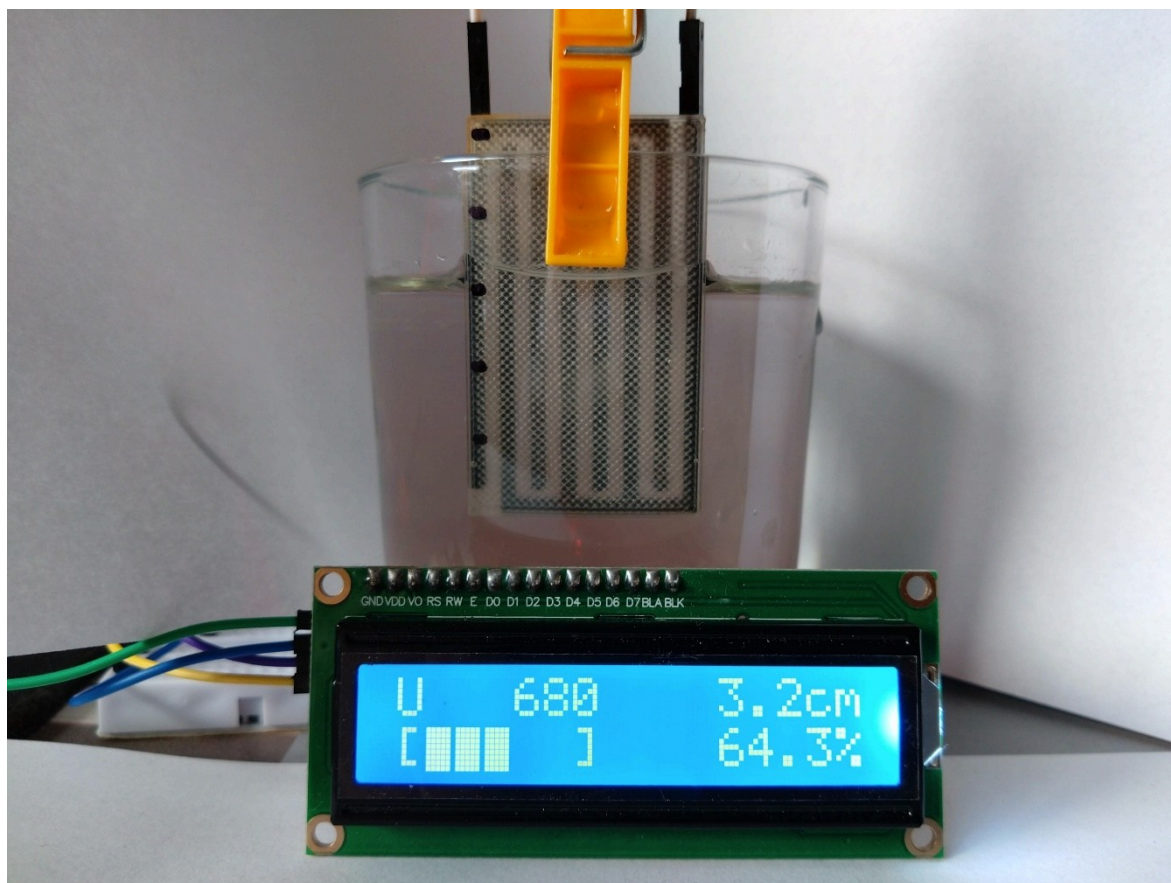
Pro zobrazování dat je v případě senzoru pro měření hladiny vody vhodné použít výstupní zařízení, které je připojené na obvod se senzorem a mikrokontrolérem, tudíž odpadá nutnost kabelového připojení k počítači a zobrazování dat přes Serial Monitor. Toto řešení je vhodné pro úvodní testování a kalibraci programu v rozhraní Arduino IDE na základě hodnot měřených senzorem, avšak pro praktické použití je lepší napájet obvod například pomocí USB adaptéru, který poskytuje přenositelnost systému a jeho samostatnost v místě měření.

| Pin displeje | Pin Arduino |
|--------------|-------------|
| SCL          | A5          |
| SDA          | A4          |
| VCC          | 5V          |
| GND          | GND         |

Tabulka 8 Zapojení LCD displeje s Arduinem

LCD displej je z použitých displejů nejjednodušší a cenově i z hlediska nabídky nejdostupnější. V tomto konkrétním případě se jedná o dvouřádkový displej umožňující zobrazení 16 znaků na jednom řádku. Z toho plyne označení displeje 1602, tento typ se často používá například u kopírek, tiskáren nebo průmyslových zařízení. Je možné jej připojit buď jako takový s využitím až 16 vodičů (je nutné zapojit minimálně 10) nebo použít převodník na I2C sběrnici, který redukuje počet vodičů na pouhé 4. Na převodníku se nachází také otočný trimr umožňující nastavení intenzity podsvícení displeje. Při použití displeje bez převodníku se jas nastavuje potenciometrem, případně následně rezistorem na nepájivém poli. V našem případě byl použit displej s modrým podsvícením, který byl již osazen zmíněným převodníkem, což zjednodušuje zapojení displeje do obvodu a také lze kdykoliv rychle nastavit jas displeje. Pro správné fungování LCD displejů je nutné v kódu zahrnout knihovnu *LiquidCrystal\_I2C.h*, která umožňuje komunikaci mikrokontroléru s LCD displejem a správné zobrazování požadovaných údajů. Tento typ displeje vyžaduje stejnosměrné napětí 5 V, tudíž bez vhodného měniče jej není možné připojit k ESP32, které disponuje napětím 3,3 V. Připojení k Arduinu znázorňuje Tabulka 8.

LCD displej byl vzhledem k horší čitelnosti údajů na slunci, a především omezenému rozsahu zobrazovaných informací použit pouze pro testování senzorů. Obrázek 42 znázorňuje rozsah zobrazovaných informací. Také je zřejmé, že při měření jednoho senzoru lze dosáhnout poměrně vysoké přesnosti, čárky na levém boku senzoru udávají vzdálenost 10 mm, tudíž zobrazovaná hodnota odpovídá míře ponoření senzoru.



Obrázek 42 Zobrazení hladiny senzoru v pozadí pomocí LCD displeje. Uvedena je hodnota U pro kalibraci displeje, výška v centimetrech, grafické znázornění zaplnění pomocí 5 segmentů a konkrétní výška v procentech. Senzor Protopasta Conductive PLA

### 8.3 OLED displej

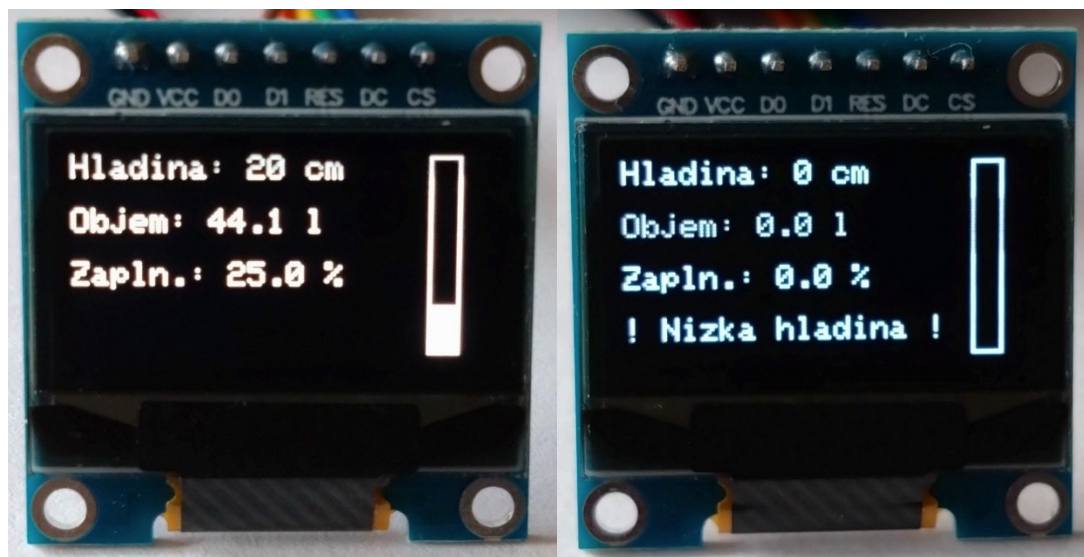
Jedním z dalších možných zobrazovacích zařízení, které bylo i použito pro testování různých verzí senzorů je OLED displej. Výhodou OLED displejů obecně je nízká spotřeba, jelikož svítí pouze body, které mají být viditelné. Z toho plyne také snazší čitelnost na slunci díky vysokému kontrastu. Nevýhodou může být omezená životnost svítících bodů. Oproti LCD displeji dokáže zobrazit více informací, je možné měnit použité fonty a zobrazovat jednoduchou grafiku.

V tomto konkrétním případě se jedná o OLED displej s rozlišením 128 x 64 bodů a úhlopříčkou 0,96 palce (asi 2,4 cm) s bílým podsvícením. Připojuje se pomocí SPI rozhraní, obsahuje 7 vodičů, z nichž 2 jsou napájecí a ostatní slouží pro ovládání displeje. Použitý displej disponuje spotřebou pouze 0,08 W, pokud svítí všechny pixely. Lze jej napájet stejnosměrným napětím v rozmezí 3–5 V, tudíž je vhodný pro použití s Arduinem i ESP32. Cenově je tento displej mírně dražší ve srovnání s LCD displeji typu 1602, které jsou již osazeny převodníkem. Tento konkrétní byl pořízen za 113 Kč s DPH.

| Pin displeje | Pin ESP32 | GPIO | Pin displeje | Pin Arduino |
|--------------|-----------|------|--------------|-------------|
| CS           | D5        | 5    | CS           | 8           |
| DC           | RX2       | 16   | DC           | 9           |
| RES          | TX2       | 17   | RES          | 10          |
| D1           | D23       | 23   | D1           | 11          |
| D0           | D18       | 18   | D0           | 13          |
| VCC          | 3V3       | -    | VCC          | 5V          |
| GND          | GND       | -    | GND          | GND         |

Tabulka 9 Zapojení OLED displeje s ESP32 (vlevo) a s Arduinem

Pro správnou funkčnost je nutné na začátku kódu zahrnout knihovnu *Adafruit\_GFX.h* a *Adafruit\_SSD1306.h*, které slouží pro ovládání monochromatického TFT a OLED displeje. Dále je třeba definovat připojovací piny D0, D1, DC, CS a RES podle jejich připojení k mikrokontroléru. Konkrétní definované piny pro Arduino a ESP32 uvádí Tabulka 9. Jelikož existuje široká řada displejů s různými řadiči, je nutné z knihovny inicializovat konkrétní použitý displej. V našem případě pomocí příkazu *Adafruit\_SSD1306 display(128, 64, &SPI, OLED\_DC, OLED\_RESET, OLED\_CS)*, kde se nejprve určuje knihovna, dále použitý řadič na displeji, zvolené pojmenování displeje, rozlišení displeje, a již zmíněné připojovací piny.



Obrázek 43 Ukázka OLED displeje zobrazujícího aktuální stav hladiny

Možnosti OLED displeje ilustruje Obrázek 43, na kterém je zachycen stav měřené hladiny. V tomto konkrétním případě byl kód nastaven pro měření hladiny pomocí senzoru složeného z 5 malých senzorů z Protopasta Conductive PLA a měření probíhalo v sudu o objemu 200 litrů. Pokud hladina dosahuje pouze 5 cm nebo méně, objeví se navíc hláška „!Nizka hladina!“ upozorňující na malé množství vody v nádobě.

## 8.4 E-INK displej

Tento typ displeje se v mnohém liší od předchozích, a i když se nachází například v čtečkách knih nebo v obchodech, kde slouží k zobrazování ceny zboží, tak se s ním v praxi setkáme méně než s předchozími typy displejů. Největší výhodou E-INK nebo také jinak nazývaných e-Paper displejů je extrémně nízká spotřeba a schopnost udržet již vykreslený obraz bez napájení, je tedy velmi vhodný pro statické zobrazení neměnných informací po delší dobu, což je žádoucí zejména, pokud je celý systém vyhodnocování hladiny napájen výhradně bateriemi. Další výhodou těchto displejů je dobrá čitelnost na slunci a široké pozorovací úhly. Tyto displeje mohou také mít více vykreslovaných barev, pokladová barva je bílá. Nevýhodou těchto displejů je především vyšší cena, stojí řádově 4 až 5krát více než velikostně srovnatelné OLED displeje, a také pomalé obnovovací frekvence, které omezují použití na zobrazování informací, které se často nemění, jelikož překreslení displeje trvá nižší jednotky sekund.

| Pin displeje | Pin ESP32 | GPIO |
|--------------|-----------|------|
| BUSY         | D4        | 4    |
| RST          | RX2       | 16   |
| DC           | TX2       | 17   |
| CS           | D5        | 5    |
| CLK          | D18       | 18   |
| DIN          | D23       | 23   |
| GND          | GND       | -    |
| VCC          | 3V3       | -    |

Tabulka 10 Zapojení E-INK displeje s ESP32

Použitý byl displej výrobce Waveshare s rozlišením 200 x 200 bodů a úhlopříčkou 1,54 palce (asi 3,9 cm) se dvěma barvami – bílým pozadím a černě vykreslenými pixely. Pořizovací cena byla 487 Kč s DPH. Tento typ displeje vyžaduje napětí 3,3 V, tudíž je možné jej připojit k ESP32 a při připojení k Arduino je třeba dbát na správné zapojení, jelikož běžně používaných 5 V může displej nenávratně poškodit. Vzhledem k obecně vyšší náročnosti na výkon mikrokontroléru u E-INK displejů nebylo k jeho připojení použito Arduino, ale pouze ESP32. Z tohoto důvodu tedy Tabulka 10 znázorňuje zapojení pouze k jednomu mikrokontroléru.

Spotřebu při překreslení displeje udává prodejce 26,4 mW a v pohotovostním režimu <0,017 mW. Ze všech použitých displejů se jedná o nejlepší hodnoty. Bylo testováno, že text vydrží zobrazen na displeji minimálně dva měsíce bez napájení, což je mnohem delší

doba, než by byla u tohoto typu použití vyžadována. Taktéž vzhledem k rozlišení všech použitých displejů je na tomto typu možné zobrazit nejvíce informací a tím pádem je zde prostor také pro jednoduchou grafiku v podobě posuvníků graficky znázorňující procenta hladiny či ikon s upozorněním. Díky schopnosti zobrazit poslední vykreslený obraz bez napájení je možné uchovávat starší data a přemazat je až krátkodobým připojením ke zdroji napětí. Tím můžeme například jednoduše porovnat dřívější stav hladiny se současným.



Obrázek 44 Ukázka E-INK displeje zobrazujícího aktuální stav hladiny s upozorněním

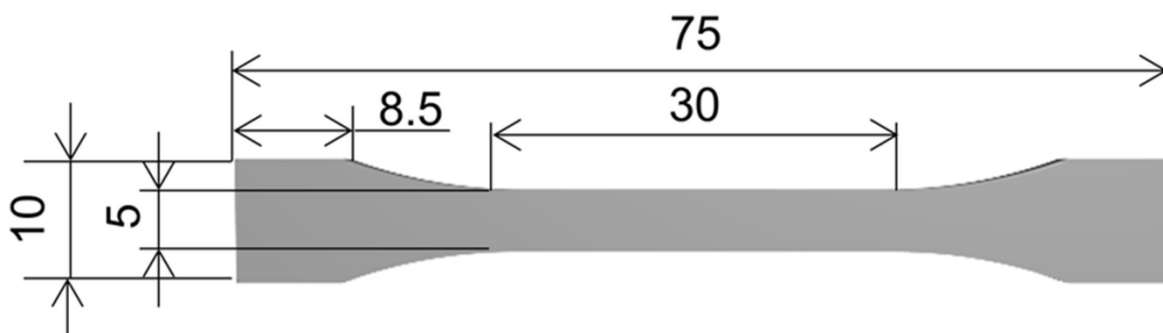
Grafické znázornění pomocí E-INK displeje zachycuje Obrázek 44, který zachycuje výstup měření v sudu o objemu 200 litrů za stejných podmínek jako v případě OLED displeje, avšak formát zobrazovaných dat je přizpůsoben rozlišení a typu E-INK displeje.

## 9 ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ

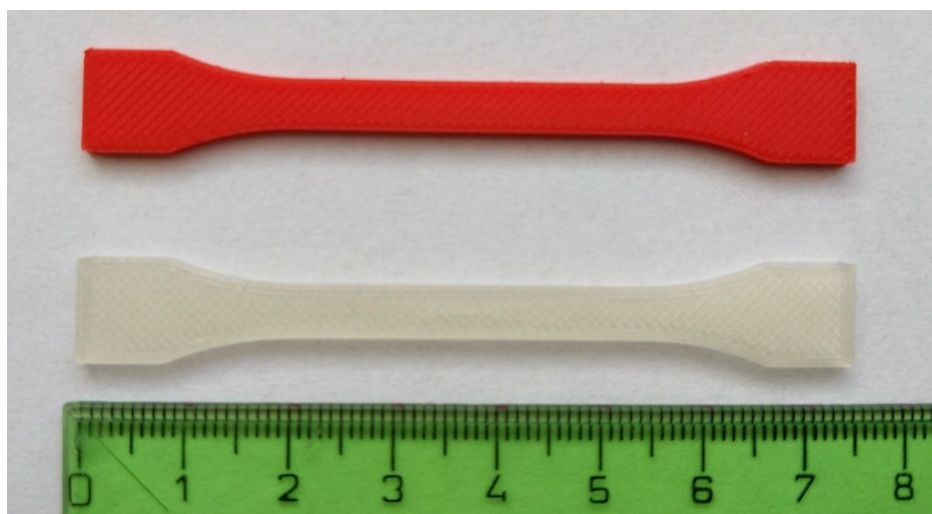
Pro zjištění vlastností materiálů použitých na tisk senzorů byly tyto materiály testovány tahovou zkouškou, byly pořízeny snímky vytištěných senzorů pomocí optického mikroskopu, dále byla provedena DSC (diferenciální skenovací kalorimetrie).

### 9.1 Tahová zkouška

Ke zkoušení materiálů pomocí tahové zkoušky byly použity zkušební tělíska typu 1BA podle normy ISO 527-2, jejichž rozměry udává Obrázek 45. Zkoušeny byly podkladové materiály použité na tištěné senzory, tedy transparentní PLA a červené ABS. U obou těchto materiálů nejsou známy jejich vlastnosti ani výrobce. Výtisky obsahují 100% výplň, 2 perimetry a tisk výplně probíhal pod úhlem 45°. Toto nastavení je stejné jako při tisku samotných podkladů senzorů. Pro oba materiály se provedlo 10 tahových zkoušek na zařízení Testometric MT350-5CT se zátěžovou buňkou 500 kg.



Obrázek 45 Rozměry zkušebních tělísek ISO 527-2 typ 1BA [56]

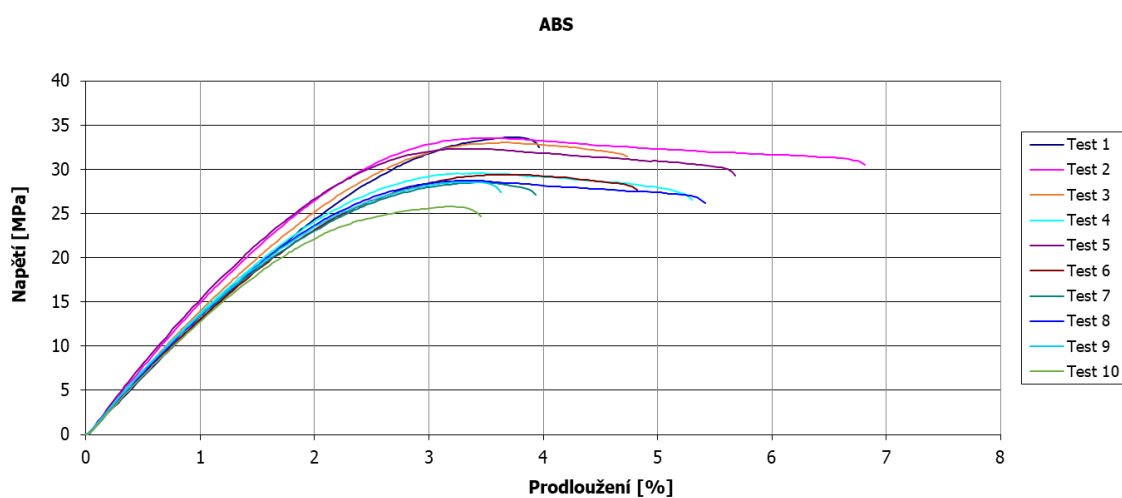


Obrázek 46 Připravená zkušební tělíska z ABS a PLA



Obrázek 47 Testovací tělísko upnuté v trhačím stroji Testometric MT350-5CT

### 9.1.1 ABS



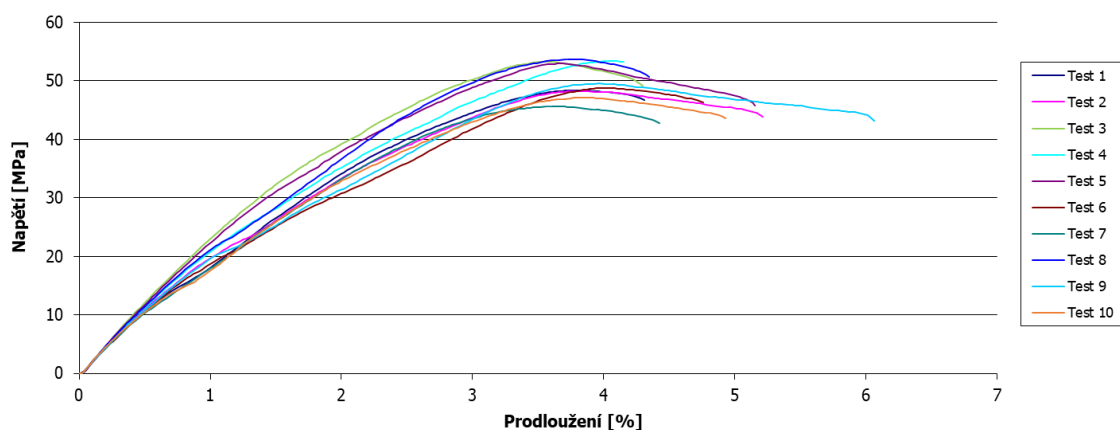
Obrázek 48 Graf tahové zkoušky pro Červené ABS

| Testovací vzorek | Nejvyšší síla [N] | Prodloužení [%] | Youngův modul [MPa] | Napětí při přetržení [MPa] | Mez kluzu [MPa] | Šířka [mm] | Tloušťka [mm] |
|------------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------------------------|-----------------|------------|---------------|
| 1                | 336,020           | 3,965           | 1290,878            | 32,444                     | 33,576          | 5          | 2             |
| 2                | 335,380           | 6,818           | 1528,307            | 30,497                     | 33,526          | 5          | 2             |
| 3                | 330,110           | 4,738           | 1395,766            | 31,391                     | 32,997          | 5          | 2             |
| 4                | 295,270           | 5,305           | 1320,213            | 26,555                     | 29,525          | 5          | 2             |
| 5                | 323,220           | 5,683           | 1513,743            | 29,300                     | 32,320          | 5          | 2             |
| 6                | 294,100           | 4,825           | 1333,627            | 27,651                     | 29,393          | 5          | 2             |
| 7                | 285,100           | 3,933           | 1369,413            | 27,150                     | 28,467          | 5          | 2             |
| 8                | 286,940           | 5,418           | 1375,920            | 26,191                     | 28,682          | 5          | 2             |
| 9                | 285,560           | 3,633           | 1398,054            | 27,373                     | 28,545          | 5          | 2             |
| 10               | 257,730           | 3,453           | 1310,200            | 24,633                     | 25,747          | 5          | 2             |
| Minimum          | 257,730           | 3,453           | 1310,200            | 24,633                     | 25,747          |            |               |
| Medián           | 299,268           | 4,867           | 1393,916            | 27,860                     | 29,911          |            |               |
| Maximum          | 335,380           | 6,818           | 1528,307            | 31,391                     | 33,526          |            |               |
| Sm. Odch.        | 25,342            | 1,083           | 78,613              | 2,156                      | 2,540           |            |               |

Tabulka 11 Naměřené hodnoty tahové zkoušky červeného ABS

Z dat naměřených při trhací zkoušce byla zjištěna průměrná nejvyšší síla 299,3 N, průměrná hodnota Youngova modulu 1393,9 N a průměrné napětí při přetržení 27,9 MPa.

### 9.1.2 PLA



Obrázek 49 Graf tahové zkoušky pro Transparentní PLA

| Testovací vzorek | Nejvyšší síla [N] | Prodloužení [%] | Youngův modul [MPa] | Napětí při přetržení [MPa] | Mez kluzu [MPa] | Šířka [mm] | Tloušťka [mm] |
|------------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------------------------|-----------------|------------|---------------|
| 1                | 483,770           | 4,308           | 1579,914            | 46,683                     | 48,352          | 5          | 2             |
| 2                | 482,130           | 5,215           | 1891,981            | 43,810                     | 48,192          | 5          | 2             |
| 3                | 532,700           | 4,300           | 2298,103            | 49,213                     | 53,250          | 5          | 2             |
| 4                | 534,300           | 4,150           | 2077,123            | 53,250                     | 53,380          | 5          | 2             |
| 5                | 529,500           | 5,155           | 2213,974            | 45,799                     | 52,920          | 5          | 2             |
| 6                | 487,860           | 4,758           | 1931,948            | 46,266                     | 48,717          | 5          | 2             |
| 7                | 456,540           | 4,425           | 1528,608            | 42,715                     | 45,593          | 5          | 2             |
| 8                | 537,100           | 4,345           | 2099,731            | 50,620                     | 53,680          | 5          | 2             |
| 9                | 495,190           | 6,060           | 1899,242            | 43,182                     | 49,504          | 5          | 2             |
| 10               | 471,670           | 4,930           | 1702,728            | 43,631                     | 47,112          | 5          | 2             |
| Minimum          | 456,540           | 4,150           | 1528,608            | 42,715                     | 45,593          |            |               |
| Medián           | 501,076           | 4,765           | 1922,335            | 46,517                     | 50,070          |            |               |
| Maximum          | 537,100           | 6,060           | 2298,103            | 53,250                     | 53,680          |            |               |
| Sm. Odch.        | 29,675            | 0,592           | 259,000             | 3,516                      | 2,975           |            |               |

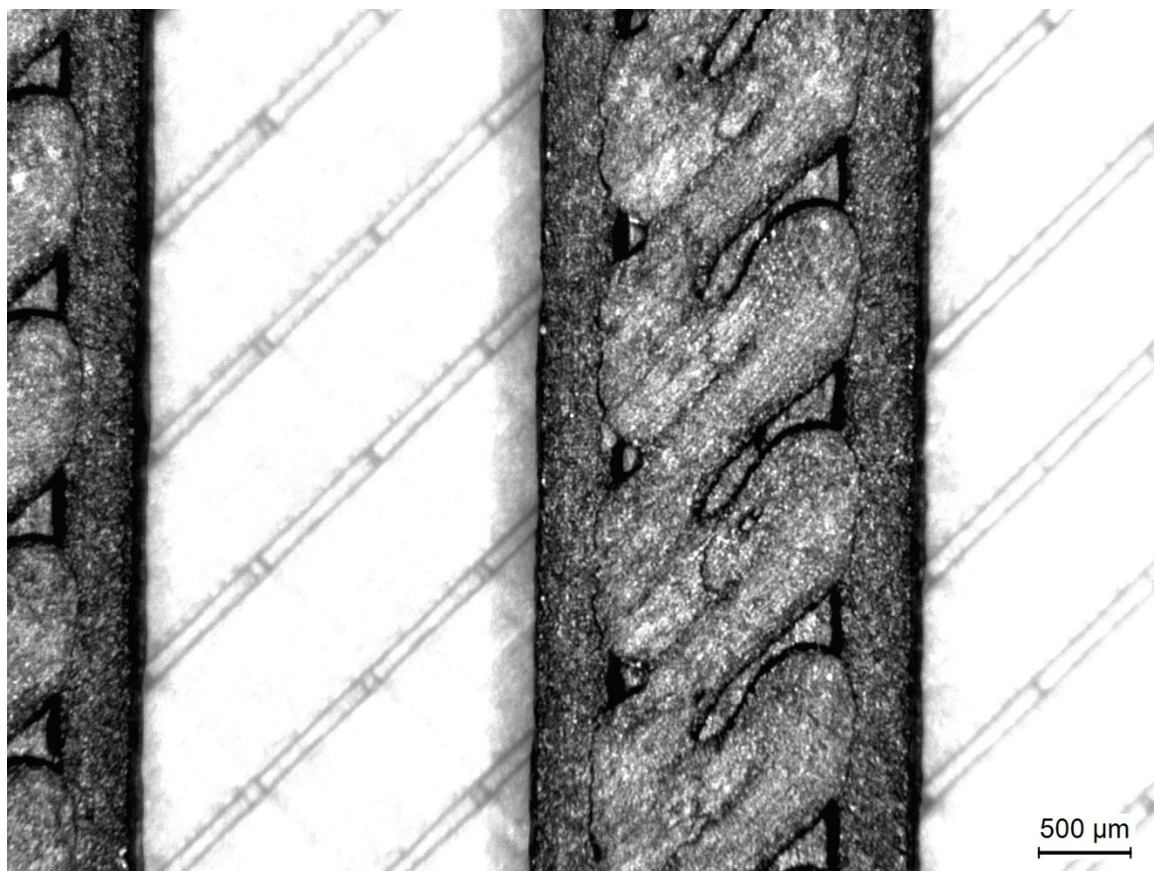
Tabulka 12 Naměřené hodnoty tahové zkoušky Transparentního PLA

Naměřená data z trhací zkoušky PLA ukazují průměrnou nejvyšší sílu 501,1 N, průměrnou hodnotu Youngova modulu 1922,4 N a průměrné napětí při přetržení 46,5 MPa.

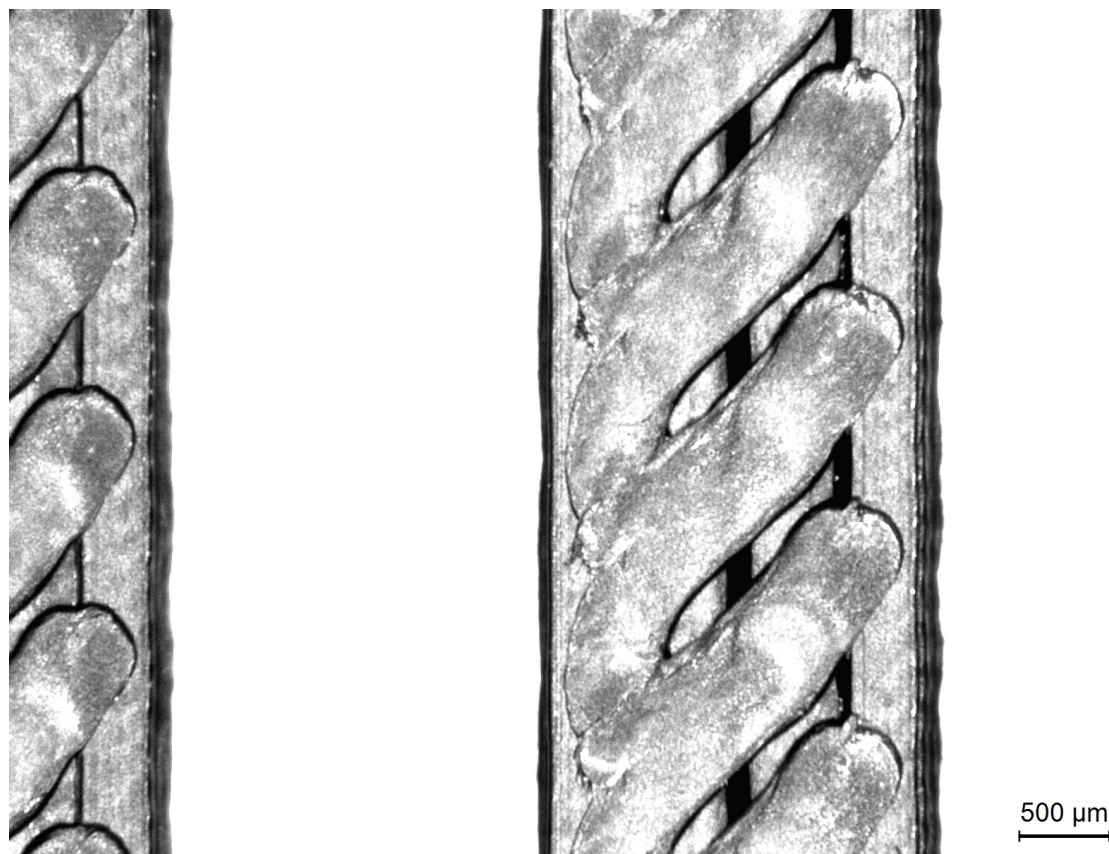
U PLA bylo dosaženo obecně vyšších hodnot než u ABS, kromě prodloužení, které je mírně vyšší u ABS. Výsledky odpovídají skutečnosti, že ABS je více houževnaté a pružné, zatímco PLA je křehké a více pevné.

## 9.2 Mikroskopie senzorů

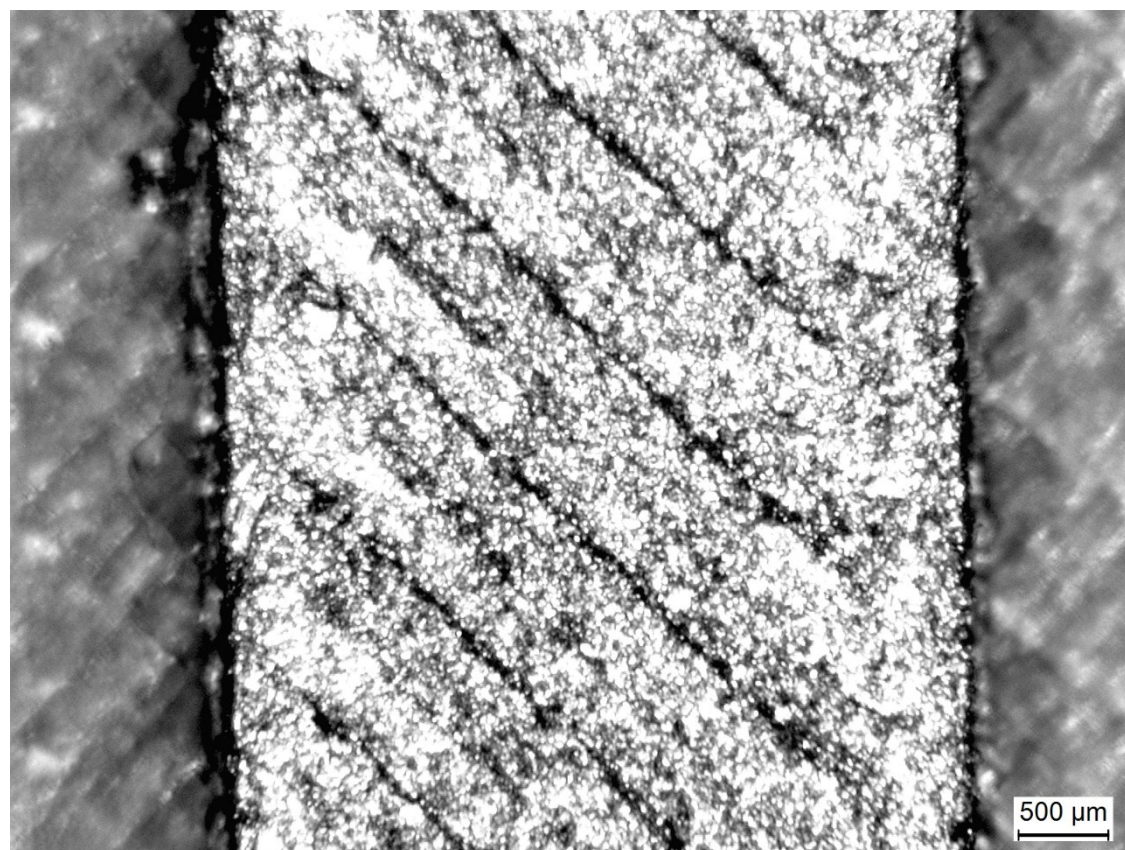
Pro každý z materiálů, ze kterých byly tištěny senzory, došlo k pořízení snímků pomocí optického mikroskopu Leica DVM2500 Digital Camera. Na těchto snímcích je zřetelná struktura povrchu typická pro 3D výtisky.



Obrázek 50 Mikroskopie Conductive ABS senzoru, 500  $\mu\text{m}$



Obrázek 51 Mikroskopie Protospasta PLA senzoru, 500 μm

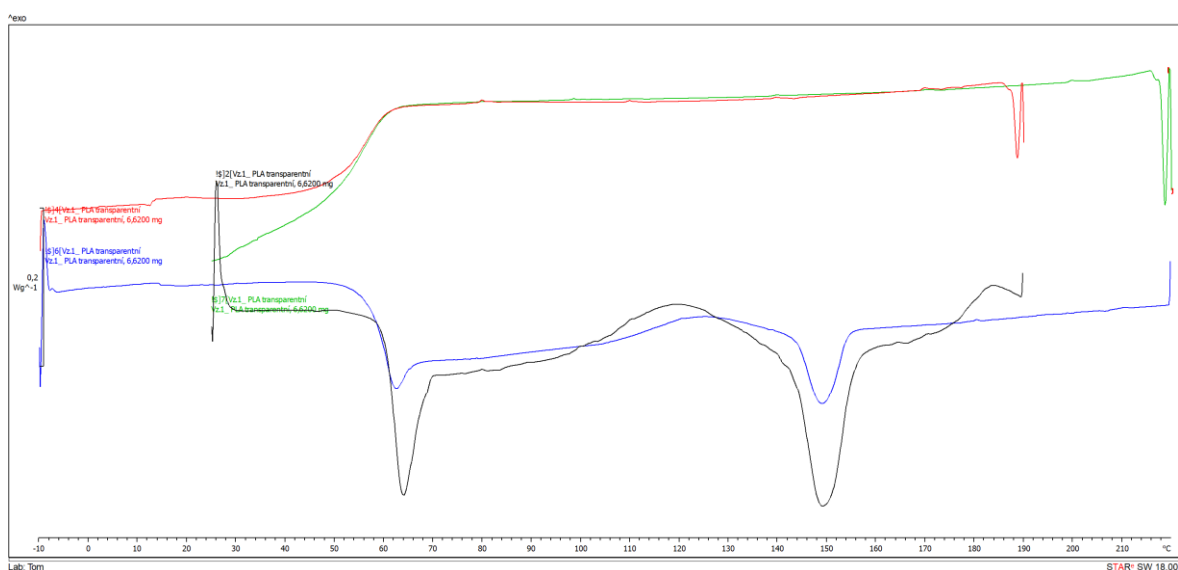


Obrázek 52 Mikroskopie Electrifi senzoru, 500 μm

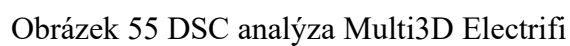
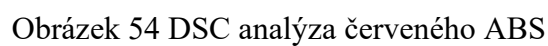
Na snímcích pořízených mikroskopem je zřejmá struktura horní vrstvy senzorů, která není ideálně vyplněna. I když by bylo možné zvýšit vyplnění materiálem pomocí nastavení ve sliceru a tím pravděpodobně dále zlepšit vodivost, tak pro danou aplikaci jsou vlastnosti senzoru dostatečné. Jako nevýhoda se může jevit zůstatek malého množství vody ve spárách, avšak tato skutečnost je ošetřena ve zdrojovém kódu, kdy neponořený, ale pouze vlhký senzor je vyhodnocen jako suchý.

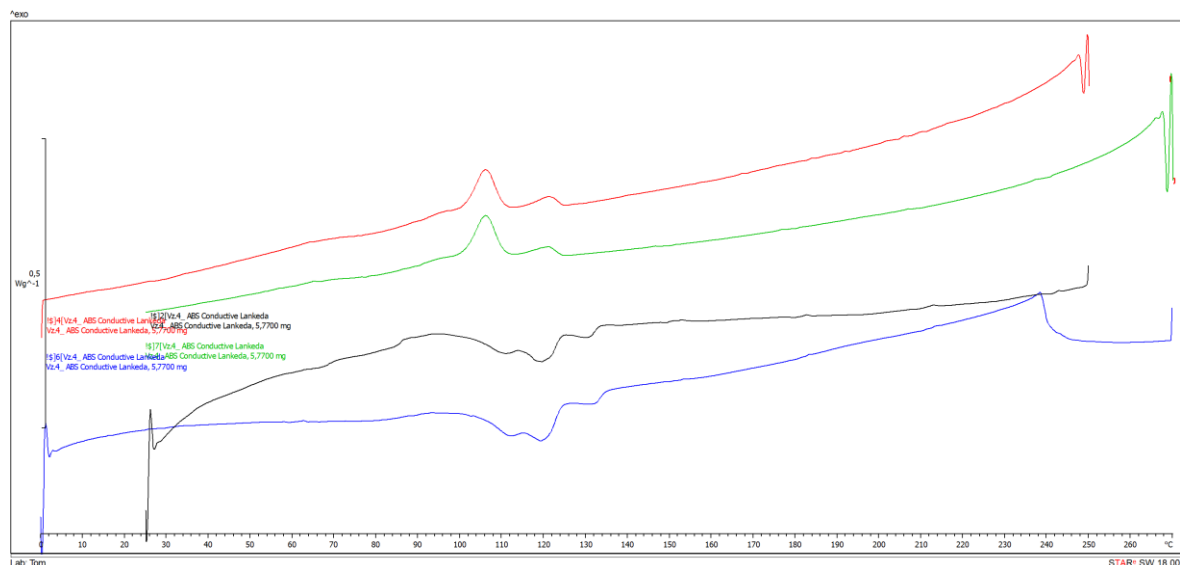
### 9.3 DSC analýza vytištěných vzorků

Metoda diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) je termická analytická metoda, která umožňuje zkoumat teplotní přechody v daném materiálu, jako je například jeho teplota tání, teplota skelného přechodu nebo krystalizace. Při těchto teplotách se v materiálu teplo buď spotřebovává, což označujeme jako endotermická reakce, nebo uvolňuje, tehdy hovoříme o exotermické reakci. Výstupem měření je graf, ve kterém se tyto teploty projeví formou lokálních špiček. Při měření se do jedné části zařízení umístí měřený materiál, přičemž v druhé části se nachází referenční materiál, v tomto případě indium. Oba materiály jsou ohřívány a ochlazovány současně. Pokud teplota dosáhne například teploty tání měřeného polymeru, začne tento polymer spotřebovávat teplo a tím se změní jeho teplotní tok ve srovnání s referenčním materiálem. Takto byly měřeny materiály použité na tisk senzorů, konkrétně transparentní PLA, červené ABS, Multi3D Electrifi, Lankeda Conductive ABS a Protopasta Conductive PLA. Pro měření byl použit kalorimetr DSC 1 Star system výrobce Mettler Toledo.

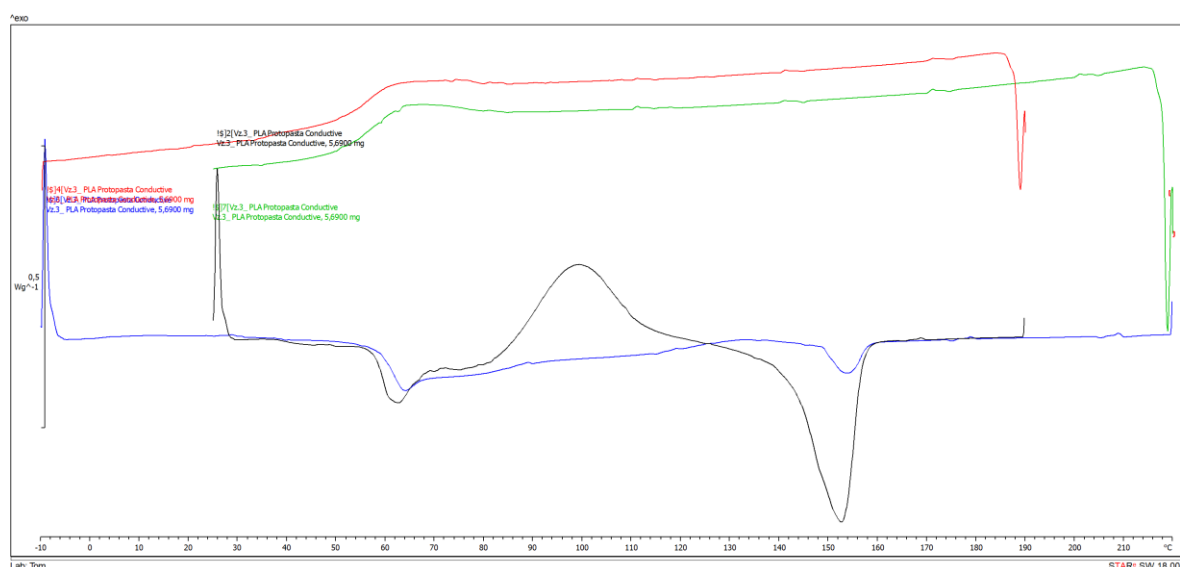


Obrázek 53 DSC analýza transparentního PLA





Obrázek 56 DSC analýza Lankeda Conductive ABS



Obrázek 57 DSC analýza Protopasta Conductive PLA

Z grafů lze zjistit teploty tání a skelných přechodů použitých materiálů. Pro transparentní PLA vychází teplota skelného přechodu na 60 °C a teplota tání 150 °C. Teplota skelného přechodu ABS odpovídá 114 °C. U Multi3D Electrifi je teplota skelného přechodu 26 °C a teplota tání 64 °C. Lankeda Conductive ABS má teplotu skelného přechodu 120 °C. V případě Protopasta Conductive PLA je teplota skelného přechodu 58 °C a teplota tání 152 °C. Lze konstatovat, že naměřené teploty odpovídají běžně uváděným teplotám daných materiálů. Také je zřejmé, že teploty jsou u vodivých materiálů mírně vyšší než u jejich nevodivých protějšků.

## 10 VÝPOČET HLADINY

Následující kód je pouze část, která slouží pro výpočet hladiny měřené pomocí segmentového senzoru. Tato část je stejná pro OLED i E-INK displej. Kompletní kód pro oba typy displeje je uveden v příloze (PI a PII).

```
//Definice proměnných pro senzor a připojovací piny
const int lowerLimit = 3000;    //nastavení spodního limitu, při nižších
    hodnotách je senzor považován za potopený
const int upperLimit = 4000;    //nastavení horního limitu, při vyšších
    hodnotách je senzor mimo vodní hladinu

const int sensorPins[5] = {25, 26, 27, 32, 33};    //definice pinů
    ESP32, na které jsou připojeny senzory od nejnižšího po nejvyšší
const int sensorHeights[5] = {5, 20, 40, 60, 80};    //výšky hladiny
    senzorů (v cm) na odpovídajících pinech ve stejném pořadí

const int maxHeight = 80;    //maximální výška hladiny v měřené nádobě
const float radius = 26.5;    //poloměr nádoby pro měření hladiny v cm

//Následuje část pro komunikaci s konkrétním typem displeje

//Určení výšky hladiny podle ponořených senzorů
int getWaterLevel() {
    int maxLevel = 0;

    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        int value = analogRead(sensorPins[i]);
        Serial.print("Senzor ");
        Serial.print(i + 1);
        Serial.print(": ");
        Serial.println(value);

        float estimatedLevel = 0;

        if (value <= lowerLimit && value >= 1000) {
            // Plně ponořený senzor dosahuje hodnot v tomto intervalu
            if (i == 0) {
                estimatedLevel = sensorHeights[i];    // První senzor - bez posunu
            } else {
                estimatedLevel = sensorHeights[i] + 2;    // Ostatní senzory -
                // přičtení 2 cm, jelikož střed sensoru se nachází ve výškách 20, 40,...
                // cm
            }
        }
    }
}
```

```
    }
    maxLevel = max((float)maxLevel, estimatedLevel);
}

else if (value >= lowerLimit && value <= upperLimit) {
    // Pro senzory mezi limity
    float range = upperLimit - lowerLimit;
    float normalized = (value - lowerLimit) / range;
    float height = 5.0 * (1.0 - normalized);

    if (height >= 4) {
        estimatedLevel = sensorHeights[i];
    } else if (height > 0.0) {
        estimatedLevel = 2; // Mezipoloha
    } else {
        estimatedLevel = 0;
    }

    // Výpočet pro ostatní senzory
    if (i > 0) {
        if (height <= 2) {
            estimatedLevel = sensorHeights[i] - 2;           //málo ponořený
            senzor - výška je jeho střed - 2 cm
        } else if (height >= 2 && height <= 3) {
            estimatedLevel = sensorHeights[i];               //středně ponořený
            senzor - výška je jeho střed
        } else {
            estimatedLevel = sensorHeights[i] + 2;           //hodně ponořený
            senzor - výška je jeho střed + 2 cm
        }
    }
    maxLevel = max((float)maxLevel, estimatedLevel);
}
}
return maxLevel;
}
```

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo připravit senzor hladiny vody pomocí 3D tisku z běžně dostupných materiálů. V teoretické části byly uvedeny základní poznatky nutné pro porozumění dané problematice. Praktická část pak dokumentuje postup tvorby senzoru od prototypů, přes měřicí obvod a vhodné materiály až po možnosti zobrazení dat a zkoušení použitých materiálů. Byly zvoleny dva nejvhodnější principy senzorů, konkrétně kapacitní a odporový. Aby bylo možné vyhodnocovat stav hladiny, byl senzor připojen na mikrokontrolér, v tomto případě Arduino Uno Rev3 a ESP32 WROOM. Pro zobrazení dat při testování senzorů byla použita funkce Serial Monitor, ale na praktické měření byl k obvodu připojen displej, konkrétně typu LCD, OLED a E-INK. K tisku byla použita tiskárna Creality K1C. Při testování bylo na základě měření rozhodnuto, že kapacitní senzor není příliš vhodný, jelikož měření hladiny byly nestabilní. Také jeho příprava pomocí 3D tiskárny s jedním extruderem by byla komplikovaná a spotřeba materiálů při jejich neustálém střídání vysoká. Proto se další pozornost věnovala pouze senzorům odporovým.

Jako dobře vodivé pro přípravu těchto senzorů se ukázaly materiály Conductive ABS Lankeda, Multi3D Electrifi a Protopasta Conductive PLA. Electrifi se ukázal jako nevhodný vzhledem k reaktivitě s vodou, také cena tohoto materiálu je násobně vyšší než u ostatních. Sensory z vodivého ABS a PLA si vedly podobně, oba pracovaly dobře s 10 k $\Omega$  rezistory a materiálové náklady jsou po zaokrouhlení 3 Kč na ABS senzor a 4 Kč na PLA. Nakonec byl pro realizaci složeného senzoru zvolen typ z vodivého PLA, a to především kvůli menším tiskovým nárokům, čímž je možné jej vytvořit i na levných tiskárnách bez vzniku škodlivého zápachu.

Pro řízení obvodu byl u segmentového senzoru zvolen mikrokontrolér ESP32 WROOM, který na rozdíl od Arduina obsahuje větší množství pinů, díky čemuž by dokázal pracovat s více senzory a také disponuje značně vyšším výkonem, což je důležité pro pokročilejší displeje. Z hlediska zobrazování tedy nebylo možné použít LCD displej, který vyžaduje napětí 5 V, ale ESP32 pracuje s 3,3 V. Pro zobrazování stavu hladiny tedy sloužily displeje OLED a E-INK, z nichž každý má své výhody a nevýhody, avšak v této aplikaci je možné použít oba.

Výhodou segmentového senzoru s mikrokontrolérem je možnost připravit měřicí zařízení na míru s nízkou cenou. Z hlediska materiálových nákladů je cena 5 kusů senzorů (Protopasta Conductive PLA) na 20 Kč, cena použitého hliníkového profilu 98 Kč, cena

ESP32 207 Kč, OLED displeje 113 Kč, E-INK displeje 487 Kč, propojovací vodiče z datového kabelu 20 Kč, nepájivé pole a rezistory 42 Kč. Řešení s OLED displejem by tedy v součtu vyšlo na 500 Kč s DPH, při použití E-INK displeje na 874 Kč s DPH.

Je zřejmé, že v obou případech se jedná o cenově dostupné řešení, které může být atraktivní například pro domácí kutily a nadšence do 3D tisku, elektroniky a moderních technologií obecně. Lze předpokládat, že s postupem času budou vodivé filamenty více dostupné, stejně jako mikrokontroléry a displeje, což bude výhodné hlavně pro koncové spotřebitele.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GEBHARDT, Andreas; KESSLER, Julia a THURN, Laura. 3D printing: understanding additive manufacturing. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, [2019]. ISBN 9781569907023.
- [2] 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.
- [3] GIBSON, Ian; ROSEN, David a STUCKER, Brent. Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Second Edition. Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2113-3.
- [4] SAVINI, A. a SAVINI, G.G. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON). 2015. ISSN DOI: 10.1109/HISTELCON.2015.7307314.
- [5] The first RepRap machine. Online. RepRap.org. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/File:Science-museum.jpg>. [cit. 2025-02-23].
- [6] Schematic diagram of FDM process. Online. ResearchGate. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-FDM-process\\_fig2\\_349435391](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-FDM-process_fig2_349435391). [cit. 2025-02-23].
- [7] FADELL, Tony a REDWOOD, Ben. The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications. 3D HUBS, 2017. ISBN 978-9082748505.
- [8] *K2 Plus Combo Epic Leap of Color & Size*. Online. Creality. Dostupné z: <https://www.creality.com/products/creality-k2-plus-cfs-combo>. [cit. 2025-02-23].
- [9] Schematic of SLS 3D printing process. Online. ResearchGate. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-SLS-3D-printing-process-which-locally-fuses-the-polymer-powder-on-a\\_fig8\\_351959771](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-SLS-3D-printing-process-which-locally-fuses-the-polymer-powder-on-a_fig8_351959771). [cit. 2025-02-23].
- [10] HOGAN, Madeline. Types & Benefits of SLS Materials for 3D Printing. Online. Nexa3D. Dostupné z: <https://nexa3d.com/blog/sls-materials/>. [cit. 2025-02-11].

- [11] *SLS 3D Printing Service*. Online. Stratasys. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/stratasysdirect/services/3d-printing-services/selective-laser-sintering-service/>. [cit. 2025-02-11].
- [12] GUECHE, Yanis A. a SANCHEZ-BALLESTER, Noelia M. Selective Laser Sintering (SLS), a New Chapter in the Production of Solid Oral Forms (SOFs) by 3D Printing. *Pharmaceutics*. 2021, roč. 2021, č. 13(8). ISSN <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13081212>.
- [13] *SLS 3D Printing Powders*. Online. 2021-06-14. Dostupné z: <https://powdermonkeys.de/2021/06/14/ein-toller-beitrag/>. [cit. 2025-02-23].
- [14] NATARAJAN, Jeyaprakash; CHEEPU, Muralimohan a YANG, Che-Hua. *Advances in Additive Manufacturing Processes*. Bentham Science, 2021. ISBN 978-981-5036-33-6.
- [15] DEWIDAR, Montasser a DALGARNO, Kenny. A Comparison between Direct and Indirect Laser Sintering of Metals. *Journal of Material Science and Technology*. 2008, roč. 2007, č. 24(2), s. 227-232.
- [16] *Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing*. Online. Formlabs. Dostupné z: <https://formlabs.com/eu/blog/what-is-selective-laser-sintering/>. [cit. 2025-02-11].
- [17] *A Diagrammatical Representation of the working of SLA*. Online. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/stereolithography-sla-3d-printing-works/>. [cit. 2025-02-23].
- [18] *Multi Jet Fusion (MJF)*. Online. One3D. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/technologie/detail/multi-jet-fusion-mjf/>. [cit. 2025-02-19].
- [19] O'CONNELL, Jackson. *PLA Plastic/Material – All You Need to Know*. Online. ALL3DP. 2024-05-24. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>. [cit. 2025-02-10].
- [20] DAVE, Harshit K. a DAVIM, J. Paulo. *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*. Springer, 2021. ISBN 978-3-030-68024-4.
- [21] *When done right, wood PLA can be pretty convincing*. Online. All3DP. 2023-08-22. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/pla-filament-3d-printing/>. [cit. 2025-02-23].
- [22] *PET, PET-G*. Online. MATERIALPRO3D. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/pet-g/>. [cit. 2025-02-10].

- [23] *A Look at PETG 3D Printing and How It Works*. Online. Xometry. 2024-12-17. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/petg-3d-printing-filament/>. [cit. 2025-02-10].
- [24] *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) 3D Printing Filament Review*. Online. JuggerBot3D. Dostupné z: <https://juggerbot3d.com/3d-printing-material-capabilities/abs-filament-review/>. [cit. 2025-02-10].
- [25] *ABS*. Online. SIMPLYFY3D. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/abs/>. [cit. 2025-02-10].
- [26] DE NAOUM, Kat. *All About ABS 3D Printing Filament*. Online. Xometry. 2024-09-13. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>. [cit. 2025-02-10].
- [27] *How To Succeed When 3D Printing With ASA Filament*. Online. MatterHackers. 2023-09-06. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/articles/how-to-succeed-when-3d-printing-with-asa-filament>. [cit. 2025-02-10].
- [28] VICKNAIR, Adam a RENGANATHAN, Sriram. *Flexible 3D Printer Filament: 7 Types Compared*. Online. ALL3DP. 2023-09-03. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/flexible-3d-printing-filament-which-should-you-chose/>. [cit. 2025-02-14].
- [29] MARCO, V.; MASSIMO, G. a MANUELA, G. Additive manufacturing of flexible thermoplastic polyurethane (TPU): enhancing the material elongation through process optimisation. *Progress in Additive Manufacturing*. 2024. ISSN <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00790-y>.
- [30] *What is TPU: Everything you need to know about this flexible materials*. Online. Sculpteo. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-materials-guide/what-is-tpu/>. [cit. 2025-02-13].
- [31] *Polycarbonate*. Online. SIMPLIFY 3D. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/polycarbonate/>. [cit. 2025-02-14].
- [32] *A COMPLETE GUIDE- 3D PRINTING WITH POLYCARBONATE (PC)*. Online. Makenica. 2020-09-28. Dostupné z: <https://makenica.com/a-complete-guide-3d-printing-with-polycarbonate-pc/>. [cit. 2025-02-14].
- [33] *Nylon*. Online. SIMPLYFY3D. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/nylon/>. [cit. 2025-02-19].

- [34] *How to print with nylon filament*. Online. UltiMaker. Dostupné z: <https://ultimaker.com/learn/how-to-print-with-nylon-filament/>. [cit. 2025-02-19].
- [35] Naveen Mani Tripathi (editor), Ankit Sharma (editor) - *Advances in Pre- and Post-Additive Manufacturing Processes (Innovations in Smart Manufacturing for Long-Term Development and Growth)*-CRC Press (2
- [36] LAZARUS, Nathan a BEDAIR, Sarah S. Selective Electroplating for 3D-Printed Electronics. *Advanced Materials Technologies*. 2019, roč. 2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/admt.201900126>.
- [37] *How can I make electrical contact to LEDs?* Online. Multi3D. Dostupné z: [https://www.multi3dllc.com/faqs/#ac\\_664\\_collapse7](https://www.multi3dllc.com/faqs/#ac_664_collapse7). [cit. 2025-02-23].
- [38] *Snímače polohy hladiny – principy, vlastnosti a použití (část 1)*. Online. Automa.cz. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/web-clanky/snimace-polohy-hladiny-%E2%80%93-principy-vlastnosti-a-pouziti-cast-1-30469\\_0494/](https://automa.cz/cz/web-clanky/snimace-polohy-hladiny-%E2%80%93-principy-vlastnosti-a-pouziti-cast-1-30469_0494/). [cit. 2025-02-10].
- [39] KOCH, Alexander. *Measurement and sensor systems: a comprehensive guide to principles, practical issues and applications*. Springer series in measurement science technology. Cham: Springer, 2023. ISBN 978-3-031-15869-8.
- [40] *What Is Water Level, and Why Is It Measured?* Online. YSI Xylem. Dostupné z: <https://www.ysi.com/parameters/level>. [cit. 2025-02-19].
- [41] *Měření výšky hladiny na vodních tocích*. Online. Dex.cz. Dostupné z: <https://www.dex.cz/clanek/co-je-hladinomer-a-k-cemu-slouzi/>. [cit. 2025-02-23].
- [42] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*. Fifth Edition. Springer, 2016. ISBN 978-3-319-19303-8.
- [43] LOIZOU, Konstantinos a KOUTROULIS, Eftichios. Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system. *Measurement*. Roč. 2016. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.019>.
- [44] *The real-time capacitive sensor mounted on tank side, and its operation principle of proposed model with dielectric liquids*. Online. ResearchGate. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/The-real-time-capacitive-sensor-mounted-on-tank-side-and-its-operation-principle-of\\_fig2\\_333827263](https://www.researchgate.net/figure/The-real-time-capacitive-sensor-mounted-on-tank-side-and-its-operation-principle-of_fig2_333827263). [cit. 2025-02-23].

- [45] NIHTIANOV, Stoyan a LUQUE, Antonio. Smart sensors and MEMS Intelligent devices and microsystems for industrial applications. Woodhead Publishing Limited, 2014. ISBN 978-0-85709-929-7.
- [46] Ultrasonic sensor-based water level measurement principle. Online. ResearchGate. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Ultrasonic-sensor-based-water-level-measurement-principle\\_fig5\\_373429552](https://www.researchgate.net/figure/Ultrasonic-sensor-based-water-level-measurement-principle_fig5_373429552). [cit. 2025-02-23].
- [47] Snímače polohy hladiny – principy, vlastnosti a použití (část 2). Online. Automa.cz. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/snimace-polohy-hladiny-principy-vlastnosti-a-pouziti-cast-2-2005\\_06\\_30540\\_1763/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/snimace-polohy-hladiny-principy-vlastnosti-a-pouziti-cast-2-2005_06_30540_1763/). [cit. 2025-02-23].
- [48] VALDES-PEREZ, Fernando E. a PALLAS-ARENY, Ramon. MICROCONTROLLERS Fundamentals and Applications with PIC. CRC Press, 2009. ISBN 978-1420077674.
- [49] SMYTHE, Richard J. Arduino in Science Collecting, Displaying, and Manipulating Sensor Data. Apress, 2021. ISBN 978-1-4842-6778-3.
- [50] What is Arduino? Online. Arduino.cc. 2018-02-05. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. [cit. 2025-02-19].
- [51] Is the Arduino UNO R4 for you? Find out here. Online. Programming Electronics Academy. Dostupné z: <https://www.programmingelectronics.com/arduino-uno-r4-minima/>. [cit. 2025-02-23].
- [52] MALÝ, Martin. ESP32 prakticky. CZ.NIC, 2024. ISBN 978-80-88168-79-9.
- [53] CAMERON, Neil. Electronics Projects with the ESP8266 and ESP32. Apress, 2021. ISBN 978-1-4842-6335-8.
- [54] Introduction to ESP32. Online. ElectronicsWings. Dostupné z: <https://www.electronicwings.com/esp32/introduction-to-esp32>. [cit. 2025-02-23].
- [55] K1C Champion of Speed & Skills. Online. Creality. Dostupné z: <https://www.creality.com/products/k1c-carbon-3d-printer>. [cit. 2025-03-25].
- [56] *The dimensions of the ISO 527–2: 2012 1BA tensile test specimens*. Online. ResearchGate. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/a-The-dimensions-of-the-ISO-527-2-2012-1BA-tensile-test-specimens-b-90-and-0\\_fig2\\_366707446](https://www.researchgate.net/figure/a-The-dimensions-of-the-ISO-527-2-2012-1BA-tensile-test-specimens-b-90-and-0_fig2_366707446). [cit. 2025-04-08].

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1 První RepRap tiskárna [5] .....                                                                                                                                            | 16 |
| Obrázek 2 Schéma tisku metodou FDM [6] .....                                                                                                                                         | 17 |
| Obrázek 3 FDM CoreXY tiskárna Creality K2 Plus [8] .....                                                                                                                             | 18 |
| Obrázek 4 Schéma tiskového procesu metodou SLS [9] .....                                                                                                                             | 20 |
| Obrázek 5 Vyjmutí výrobku vytvořeného metodou SLS [13] .....                                                                                                                         | 21 |
| Obrázek 6 Uspořádání SLA tiskárny [17] .....                                                                                                                                         | 23 |
| Obrázek 7 Výrobky z PLA Wood imitující dřevo [21] .....                                                                                                                              | 25 |
| Obrázek 8 ABS je typický materiál LEGO kostek [25] .....                                                                                                                             | 28 |
| Obrázek 9 Karabina vytištěná z polykarbonátu [31] .....                                                                                                                              | 29 |
| Obrázek 10 Vodivé pole z filamentu Electrifi [37] .....                                                                                                                              | 31 |
| Obrázek 11 Tyčový hladinoměr [41] .....                                                                                                                                              | 33 |
| Obrázek 12 Schéma měření hladiny pomocí kapacitního senzoru [44] .....                                                                                                               | 34 |
| Obrázek 13 Schéma měření hladiny pomocí ultrazvukového senzoru [46] .....                                                                                                            | 35 |
| Obrázek 14 Arduino Uno R3 a R4 [51] .....                                                                                                                                            | 38 |
| Obrázek 15 Modul ESP32 WROOM [54] .....                                                                                                                                              | 39 |
| Obrázek 16 Použitá tiskárna Creality K1C [55] .....                                                                                                                                  | 41 |
| Obrázek 17 Originální odporový senzor hladiny vody pro Arduino .....                                                                                                                 | 43 |
| Obrázek 18 Model pro tisk podkladu pro senzor s použitím měděné pásky .....                                                                                                          | 44 |
| Obrázek 19 Testovací odporový senzor z měděné pásky a podkladu z PLA, v pravé části je zřejmé opotřebení senzoru (oxidace) ponořeného do vody při průchodu eklektického proudu ..... | 45 |
| Obrázek 20 Graf závislosti naměřené hodnoty U na výšce hladiny pro testovací senzor s měděnou páskou .....                                                                           | 46 |
| Obrázek 21 Kapacitní senzory se vzdáleností 16 a 4 mm mezi elektrodami, délka elektrod je 200 mm .....                                                                               | 47 |
| Obrázek 22 Schématické znázornění obvodu pro odporový senzor, který je vykreslen pomocí potenciometru .....                                                                          | 48 |
| Obrázek 23 Schématické znázornění obvodu pro kapacitní senzor, který je vykreslen pomocí kondenzátoru .....                                                                          | 49 |
| Obrázek 24 Rozměry tělísek pro test vodivosti .....                                                                                                                                  | 50 |
| Obrázek 25 Testovací vzorky z vodivého ABS Lankeda .....                                                                                                                             | 51 |
| Obrázek 26 Testovací vzorky Multi3D Electrifi na podkladu z transparentního PLA .....                                                                                                | 52 |
| Obrázek 27 Testovací vzorky 3DXSTAT ESD-PLA .....                                                                                                                                    | 54 |
| Obrázek 28 Testovací vzorky Protopasta Conductive PLA .....                                                                                                                          | 55 |
| Obrázek 29 Největší rozměry tištěného senzoru o snímací délce 50 mm .....                                                                                                            | 56 |

|                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 30 Testovací senzor Electrifi 50 mm, podklad transparentní PLA .....                                                                                                                                                                                | 57 |
| Obrázek 31 Graf závislosti hodnoty U na výšce hladiny pro senzor Electrifi 50 mm s rezistorem 100 $\Omega$ .....                                                                                                                                            | 58 |
| Obrázek 32 Senzor Electrifi 120 mm .....                                                                                                                                                                                                                    | 58 |
| Obrázek 33 Graf závislosti naměřené hodnoty U na výšce hladiny pro senzor Electrifi 120 mm s rezistorem 100 $\Omega$ .....                                                                                                                                  | 59 |
| Obrázek 34 Testovací senzor Lankeda Conductive ABS, podklad červené ABS .....                                                                                                                                                                               | 60 |
| Obrázek 35 Graf závislosti naměřené hodnoty U na výšce hladiny pro senzor Lankeda Conductive ABS 50 mm .....                                                                                                                                                | 61 |
| Obrázek 36 Testovací senzor Protopasta Conductive PLA, podklad transparentní PLA ....                                                                                                                                                                       | 62 |
| Obrázek 37 Graf závislosti naměřené hodnoty U na výšce hladiny pro senzor Protopasta Conductive PLA 50 mm .....                                                                                                                                             | 63 |
| Obrázek 38 Ukázka měření hladiny – 3 senzory ponořeny, výška hladiny je 40 cm, zobrazení na E-INK displeji .....                                                                                                                                            | 64 |
| Obrázek 39 Senzor složený z 5 segmentů .....                                                                                                                                                                                                                | 65 |
| Obrázek 40 Měření hladiny vody v sudu pomocí segmentového senzoru, uvedené jsou výšky jednotlivých segmentů .....                                                                                                                                           | 65 |
| Obrázek 41 Ukázka výpisu hodnot U přes Serial Monitor, první dva senzory jsou ponořené, třetí je suchý a poslední dva senzory nejsou momentálně připojené .....                                                                                             | 66 |
| Obrázek 42 Zobrazení hladiny senzoru v pozadí pomocí LCD displeje. Uvedena je hodnota U pro kalibraci displeje, výška v centimetrech, grafické znázornění zaplnění pomocí 5 segmentů a konkrétní výška v procentech. Senzor Protopasta Conductive PLA ..... | 68 |
| Obrázek 43 Ukázka OLED displeje zobrazujícího aktuální stav hladiny .....                                                                                                                                                                                   | 69 |
| Obrázek 44 Ukázka E-INK displeje zobrazujícího aktuální stav hladiny s upozorněním...                                                                                                                                                                       | 71 |
| Obrázek 45 Rozměry zkušebních tělísek ISO 527-2 typ 1BA [56] .....                                                                                                                                                                                          | 72 |
| Obrázek 46 Připravená zkušební tělíska z ABS a PLA .....                                                                                                                                                                                                    | 72 |
| Obrázek 47 Testovací tělísko upnuté v trhacím stroji Testometric MT350-5CT .....                                                                                                                                                                            | 73 |
| Obrázek 48 Graf tahové zkoušky pro Červené ABS .....                                                                                                                                                                                                        | 73 |
| Obrázek 49 Graf tahové zkoušky pro Transparentní PLA .....                                                                                                                                                                                                  | 74 |
| Obrázek 50 Mikroskopie Conductive ABS senzoru, 500 $\mu\text{m}$ .....                                                                                                                                                                                      | 75 |
| Obrázek 51 Mikroskopie Protopasta PLA senzoru, 500 $\mu\text{m}$ .....                                                                                                                                                                                      | 76 |
| Obrázek 52 Mikroskopie Electrifi senzoru, 500 $\mu\text{m}$ .....                                                                                                                                                                                           | 76 |
| Obrázek 53 DSC analýza transparentního PLA .....                                                                                                                                                                                                            | 77 |
| Obrázek 54 DSC analýza červeného ABS .....                                                                                                                                                                                                                  | 78 |
| Obrázek 55 DSC analýza Multi3D Electrifi .....                                                                                                                                                                                                              | 78 |
| Obrázek 56 DSC analýza Lankeda Conductive ABS .....                                                                                                                                                                                                         | 79 |
| Obrázek 57 DSC analýza Protopasta Conductive PLA .....                                                                                                                                                                                                      | 79 |

**SEZNAM TABULEK**

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 Naměřené hodnoty U pro testovací senzor z měděné pásky.....                    | 46 |
| Tabulka 2 Naměřené hodnoty U pro senzor Electrifi 50 mm s rezistorem 100 $\Omega$ .....  | 57 |
| Tabulka 3 Naměřené hodnoty U pro senzor Electrifi 120 mm s rezistorem 100 $\Omega$ ..... | 59 |
| Tabulka 4 Hodnoty pro rezistory použité s Lankeda Conductive ABS senzorem.....           | 60 |
| Tabulka 5 Naměřené hodnoty U pro senzor Lankeda Conductive ABS 50 mm .....               | 60 |
| Tabulka 6 Hodnoty pro rezistory použité s Protopasta Conductive PLA senzorem.....        | 62 |
| Tabulka 7 Naměřené hodnoty U pro senzor Protopasta Conductive PLA 50 mm .....            | 62 |
| Tabulka 8 Zapojení LCD displeje s Arduinem .....                                         | 67 |
| Tabulka 9 Zapojení OLED displeje s ESP32 (vlevo) a s Arduinem.....                       | 69 |
| Tabulka 10 Zapojení E-INK displeje s ESP32.....                                          | 70 |
| Tabulka 11 Naměřené hodnoty tahové zkoušky červeného ABS .....                           | 74 |
| Tabulka 12 Naměřené hodnoty tahové zkoušky Transparentního PLA .....                     | 74 |

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|       |                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------|
| 3D    | Trojrozměrný                                                |
| ABS   | Akrylonitrilbutadienstyren                                  |
| ADC   | Analogově-digitální převodník (Analog-to-Digital Converter) |
| ALU   | Aritmetická a logická jednotka (Arithmetic Logic Unit)      |
| ASA   | Akrylonitrilbutadienstyren                                  |
| BPM   | Ballistic Particle Manufacturing                            |
| CAD   | Computer Aided Design                                       |
| CPU   | Procesor (Central Processing Unit)                          |
| DLP   | Direct Light Processing                                     |
| DSC   | Diferenční skenovací kalorimetrie                           |
| E-INK | Elektronický inkoust                                        |
| ESD   | Elektrostatický výboj (Electrostatic discharge)             |
| ESP   | Espressif Systems                                           |
| EVA   | Ethylenvinylacetát                                          |
| FDM   | Fused Deposition Modeling                                   |
| FFF   | Fused Filament Fabrication                                  |
| I/O   | Vstup/výstup (Input/Output)                                 |
| I2C   | Inter-Integrated Circuit                                    |
| IDE   | Integrated Development Environment                          |
| LCD   | Displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)        |
| LED   | Light-Emitting Diode                                        |
| MFJ   | Multi Jet Fusion                                            |
| OLED  | Organic Light-Emitting Diode                                |
| PA    | Polyamid                                                    |
| PC    | Polykarbonát                                                |

---

|       |                                                                 |
|-------|-----------------------------------------------------------------|
| PEEK  | Polyetheretherketon                                             |
| PEI   | Polyetherimid                                                   |
| PETG  | Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem                     |
| PLA   | Kyselina polymléčná                                             |
| RAM   | Random-Access Memory                                            |
| ROM   | Read-Only Memory                                                |
| SEM   | Rastrovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscope) |
| SLA   | Stereolitografie                                                |
| SLS   | Selective Laser Sintering                                       |
| SPI   | Serial Peripheral Interface                                     |
| STL   | Surface Tessellation Language                                   |
| TPA   | Termoplastický polyamid                                         |
| TPC   | Termoplastický kopolyesterový elastomer                         |
| TPS   | Termoplastický styrenový elastomer                              |
| TPU   | Termoplastický polyuretan                                       |
| USB   | Universal Serial Bus                                            |
| UV    | Ultrafialový (Ultra Violet)                                     |
| Wi-Fi | Bezdrátový síťový protokol IEEE 802.11                          |

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Zdrojový kód segmentového senzoru a OLED displeje

Příloha P II: Zdrojový kód segmentového senzoru a E-INK displeje

Příloha P III: Výkres Senzoru testovacího

Příloha P IV: Výkres Senzoru 50 mm

Příloha P V: Výkres Senzoru 120 mm

## PŘÍLOHA P I: ZDROJOVÝ KÓD SEGMENTOVÉHO SENZORU A OLED DISPLEJE

```
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

//OLED připojení přes SPI - definice připojovacích pinů
#define OLED_MOSI 23 // D1 - MOSI
#define OLED_CLK 18 // D0 - SCK
#define OLED_DC 16 // DC
#define OLED_CS 5 // CS
#define OLED_RESET 17 // RES

Adafruit_SSD1306 display(128, 64, &SPI, OLED_DC, OLED_RESET,
  OLED_CS); //knihovna ovládající OLED displej 128x64 px

//Definice proměnných pro senzor a připojovací piny
const int lowerLimit = 3000; //nastavení spodního limitu, při nižších
  hodnotách je senzor považován za potopený
const int upperLimit = 4000; //nastavení horního limitu, při vyšších
  hodnotách je senzor mimo vodní hladinu

const int sensorPins[5] = {25, 26, 27, 32, 33}; //definice pinů
  ESP32, na které jsou připojeny senzory od nejnižšího po nejvyšší
const int sensorHeights[5] = {5, 20, 40, 60, 80}; //výšky hladiny
  senzorů (v cm) na odpovídajících pinech ve stejném pořadí

const int maxHeight = 80; //maximální výška hladiny v měřené nádobě
const float radius = 26.5; //poloměr nádoby pro měření hladiny v cm

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // Inicializace SPI OLED displeje
  if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC)) {
    Serial.println(F("SSD1306 OLED nenalezen"));
    while (true);
  }

  display.clearDisplay();
  display.setTextSize(1);
```

```

display.setTextColor(SSD1306_WHITE);

for (int i = 0; i < 5; i++) {
    pinMode(sensorPins[i], INPUT);
}
}

void loop() {
    int level = getWaterLevel();

    // nastavení podmínky nezáporné hodnoty hladiny
    if (level < 0) level = 0;

    float    percent    =    (level    /    (float)maxHeight)    *
100.0;                //výpočet zaplnění nádoby v %

    float volumeLiters = 3.14159 * radius * radius * level /
1000.0;    //výpočet objemu nádoby v litrech

    bool lowLevel = (level < 5);

    display.clearDisplay();

    display.setCursor(0, 0);                //zobrazení výšky
    hladiny na OLED displeji v cm
    display.print("Hladina: ");
    display.print(level);
    display.print(" cm");

    display.setCursor(0, 16);                //zobrazení objemu vody na OLED
    displeji v litrech
    display.print("Objem: ");
    display.print(volumeLiters, 1);
    display.print(" l");

    display.setCursor(0, 32);                //zobrazení zaplnění nádoby na
    OLED displeji v procentech
    display.print("Zaplň.: ");
    display.print(percent, 1);
    display.print(" %");

    if (lowLevel) {
        display.setCursor(0, 48);
    }
}

```

```

    display.print("! Nizka hladina !"); //při nedostatku vody vypíše
    OLED displej upozornění "! Nizka hladina !"
}

//Grafický sloupec - znázornění výšky hladiny v nádobě formou svislého
sloupcového posuvníku
int barX = 110;
int barY = 0;
int barWidth = 10;
int barHeight = 60;

int fillHeight = (percent / 100.0) * barHeight;
int fillY = barY + (barHeight - fillHeight); // Naplnění odspodu

// Rámeček pro sloupec
display.drawRect(barX, barY, barWidth, barHeight, SSD1306_WHITE);
// Výplň sloupce
display.fillRect(barX + 1, fillY, barWidth - 2, fillHeight,
SSD1306_WHITE);

display.display();
//výpis hodnot do Serial Monitoru
Serial.print("Hladina: ");
Serial.print(level);
Serial.print(" cm, Objem: ");
Serial.print(volumeLiters, 1);
Serial.print(" l, Zaplnění: ");
Serial.print(percent, 1);
Serial.println(" %");
delay(5000);
}

//Určení výšky hladiny podle ponořených senzorů
int getWaterLevel() {
    int maxLevel = 0;

    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        int value = analogRead(sensorPins[i]);
        Serial.print("Senzor ");
        Serial.print(i + 1);
        Serial.print(": ");
        Serial.println(value);
    }
}

```

```

float estimatedLevel = 0;

if (value <= lowerLimit && value >= 1000) {
    // Plně ponořený senzor dosahuje hodnot v tomto intervalu
    if (i == 0) {
        estimatedLevel = sensorHeights[i]; // První senzor - bez posunu
    } else {
        estimatedLevel = sensorHeights[i] + 2; // Ostatní senzory -
        // přičtení 2 cm, jelikož střed sensoru se nachází ve výškách 20, 40,...
        // cm
    }
    maxLevel = max((float)maxLevel, estimatedLevel);
}

else if (value >= lowerLimit && value <= upperLimit) {
    // Pro senzory mezi limity
    float range = upperLimit - lowerLimit;
    float normalized = (value - lowerLimit) / range;
    float height = 5.0 * (1.0 - normalized);

    if (height >= 4) {
        estimatedLevel = sensorHeights[i];
    } else if (height > 0.0) {
        estimatedLevel = 2; // Mezipoloha
    } else {
        estimatedLevel = 0;
    }

    // Výpočet pro ostatní senzory
    if (i > 0) {
        if (height <= 2) {
            estimatedLevel = sensorHeights[i] - 2; //málo ponořený
            // senzor - výška je jeho střed - 2 cm
        } else if (height >= 2 && height <= 3) {
            estimatedLevel = sensorHeights[i]; //středně ponořený
            // senzor - výška je jeho střed
        } else {
            estimatedLevel = sensorHeights[i] + 2; //hodně ponořený
            // senzor - výška je jeho střed + 2 cm
        }
    }
}

```

```
        maxLevel = max((float)maxLevel, estimatedLevel);
    }
}
return maxLevel;
}
```

## PŘÍLOHA P II: ZDROJOVÝ KÓD SEGMENTOVÉHO SENZORU A E-INK DISPLEJE

```
#include <GxEPD2_BW.h>
#include <Fonts/FreeMonoBold9pt7b.h>
#include "GxEPD2_display_selection_new_style.h"

//Definice proměnných pro senzor a připojovací piny
const int lowerLimit = 3000;    //nastavení spodního limitu, při nižších
    hodnotách je senzor považován za potopený
const int upperLimit = 4000;    //nastavení horního limitu, při vyšších
    hodnotách je senzor mimo vodní hladinu

const int sensorPins[5] = {25, 26, 27, 32, 33};    //definice pinů
    ESP32, na které jsou připojeny senzory od nejnižšího po nejvyšší
const int sensorHeights[5] = {5, 20, 40, 60, 80};    //výšky hladiny
    senzorů (v cm) na odpovídacích pinech ve stejném pořadí

const int maxHeight = 80;    //maximální výška hladiny v měřené nádobě
const float radius = 26.5;    //poloměr nádoby pro měření hladiny v cm

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    // Inicializace E-INK displeje
    display.init(115200, true, 2, false);
    display.setRotation(0);
    display.setFont(&FreeMonoBold9pt7b);
    display.setTextColor(GxEPD_BLACK);

    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        pinMode(sensorPins[i], INPUT);
    }
}

void loop() {
    int level = getWaterLevel();

    // nastavení podmínky nezáporné hodnoty hladiny
    if (level < 0) level = 0;
```

```

float percent = (level / (float)maxHeight) * 100.0;
//výpočet zaplnění nádoby v %

float volumeLiters = 3.14159 * radius * radius * level / 1000.0;
//výpočet objemu nádoby v litrech

bool lowLevel = (level < 5);

display.setFullWindow();
display.firstPage();
do {
    display.fillScreen(GxEPD_WHITE);

    display.setCursor(10, 20);      //zobrazení výšky hladiny na EINK
    displeji v cm
    display.print("Hladina: ");
    display.print(level);
    display.print(" cm");

    display.setCursor(10, 40);      //zobrazení objemu vody na EINK
    displeji v litrech
    display.print("Objem: ");
    display.print(volumeLiters, 1);
    display.print(" l");

    display.setCursor(10, 60);      //zobrazení zaplnění nádoby na EINK
    displeji v procentech
    display.print("Zaplň.: ");
    display.print(percent, 1);
    display.print(" %");

    // Grafický sloupec - znázornění výšky hladiny v nádobě formou
    svislého sloupcového posuvníku
    int barHeight = (percent / 100.0) * 200;
    int barBottom = 200;
    int barTop = barBottom - barHeight;

    display.drawRect(180, 0, 20, 200, GxEPD_BLACK);
    display.fillRect(180, barTop, 20, barHeight, GxEPD_BLACK);

    // Výstražná hláška a ikona při nízké hladině
    if (lowLevel) {
        display.setCursor(5, 100);
        display.print("!Nizka hladina!");
    }
} while (true);

```

```

    // Vykreslení nádoby
    display.fillRect(70, 120, 2, 60, GxEPD_BLACK); // Levá strana (x,
y, w, h, color)
    display.fillRect(70, 180, 42, 4, GxEPD_BLACK); // Spodní část
    display.fillRect(110, 120, 2, 60, GxEPD_BLACK); // Pravá strana

    // Vykreslení vykřičníku
    display.fillRect(90, 130, 2, 30, GxEPD_BLACK); // Svislá čára
vykřičníku
    display.fillCircle(91, 170, 2, GxEPD_BLACK); // Tečka vykřičníku
    }

} while (display nextPage());

Serial.print("Hladina: ");
Serial.print(level);
Serial.print(" cm, Objem: ");
Serial.print(volumeLiters, 1);
Serial.print(" l, Zaplnění: ");
Serial.print(percent, 1);
Serial.println(" %");
delay(10000);
}

//určení výšky hladiny podle ponořených senzorů
int getWaterLevel() {
    int maxLevel = 0;

    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        int value = analogRead(sensorPins[i]);
        Serial.print("Senzor ");
        Serial.print(i + 1);
        Serial.print(": ");
        Serial.println(value);

        float estimatedLevel = 0;

        if (value <= lowerLimit && value >= 1000) {
            // Plně ponořený senzor dosahuje hodnot v tomto intervalu
            if (i == 0) {

```

```

        estimatedLevel = sensorHeights[i];    // První senzor - bez
posunu
    } else {
        estimatedLevel = sensorHeights[i] + 2; // Ostatní senzory -
přičtení 2 cm, jelikož střed sensoru se nachází ve výškách 20, 40,...
cm
    }
    maxLevel = max((float)maxLevel, estimatedLevel);
}

else if (value >= lowerLimit && value <= upperLimit) {
    // Pro senzory mezi limity
    float range = upperLimit - lowerLimit;
    float normalized = (value - lowerLimit) / range;
    float height = 5.0 * (1.0 - normalized);

    if (height >= 4) {
        estimatedLevel = sensorHeights[i];
    } else if (height > 0.0) {
        estimatedLevel = 2; // Mezipoloha
    } else {
        estimatedLevel = 0;
    }

    // Výpočet pro ostatní senzory
    if (i > 0) {
        if (height <= 2) {
            estimatedLevel = sensorHeights[i] - 2;    //málo ponořený
senzor - výška je jeho střed - 2 cm
        } else if (height >= 2 && height <= 3) {
            estimatedLevel = sensorHeights[i];        //středně ponořený
senzor - výška je jeho střed
        } else {
            estimatedLevel = sensorHeights[i] + 2;    //hodně ponořený
senzor - výška je jeho střed + 2 cm
        }
    }
    maxLevel = max((float)maxLevel, estimatedLevel);
}
}
return maxLevel;
}

```