

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2025

Adam Hrežo



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

STAVBA DELTABOT KONSTRUKCE PRO ÚČELY PREZENTACE A STUDIA KINEMATIKY

DELTABOT CONSTRUCTION FOR PRESENTATION AND STUDY OF KINEMATICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Hrežo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Bayer, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Adam Hrežo

ID: 247008

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Stavba DeltaBot konstrukce pro účely prezentace a studia kinematiky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a porovnejte mezi sebou jednotlivé typy konstrukcí používané u FDM 3D tiskáren, zvláště pak Rotační delta, používanou pro DeltaBot. Zpracujte rešerši jednotlivých prvků a součástí zmíněné konstrukce. Na základě získaných vědomostí sestrojte funkční DeltaBot pro účely prezentace a studia kinematiky této konstrukce pro veřejnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího závěrečné práce.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 5.6.2025

Vedoucí práce: Ing. Robert Bayer, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se věnuje popisu technologie FDM tisku, popisu hlavních komponent FDM tiskáren a srovnávání různých konstrukčních typů, zvláště pak konfigurace Rotační delta, včetně jejího pracovního prostoru, výhod, nevýhod a jejím hlavním konstrukčním částem. Demonstruje výpočty kinematiky, které jsou pro tento typ konstrukce klíčové a dále se věnuje kompletnímu návrhu funkční DeltaBot tiskárny včetně jejího testování.

Klíčová slova

FDM, 3D tiskárna, delta, Rotační delta, kinematika, DeltaBot, konstrukce, převodování, Klipper

Abstract

The thesis focuses on the description of FDM printing technology, the main components of FDM printers, and the comparison of different structural types, particularly the rotary delta configuration. It includes analysis of its working space, advantages, disadvantages, and key mechanical components. It also demonstrates kinematic calculations, which are essential for this type of design, and presents a complete functional design and testing of a DeltaBot 3D printer.

Keywords

FDM, 3D printer, delta, rotary delta, kinematics, DeltaBot, construction, gear reduction, Klipper

Bibliografická citace

HREŽO, Adam. *Stavba DeltaBot konstrukce pro účely prezentace a studia kinematiky* . Online, bakalářská práce. Robert BAYER (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168960>. [cit. 2025-06-01].

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Adam Hrežo
VUT ID studenta:	247008
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2024/25
Téma závěrečné práce:	Stavba DeltaBot konstrukce pro účely prezentace a studia kinematiky

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 5. červen 2025

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu doktoru Robertu Bayerovi za pomoc, rady i trpělivost při konzultacích a při zpracování mé práce.

V Brně dne: 5. červen 2025

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1 FDM 3D TISK.....	12
1.1 FUSED DEPOSITION MODELLING	12
1.1.1 Výhody FDM tisku	13
1.1.2 Nevýhody FDM 3D tisku.....	14
1.1.3 Parametry ovlivňující kvalitu 3D tisku.....	16
1.2 TYPICKÉ ČÁSTI FDM TISKÁRNY	18
1.2.1 Rám	18
1.2.2 Extruder	19
1.2.3 Vyhřívaná tisková podložka	22
1.2.4 Krokové motory.....	23
1.2.5 Základní deska	24
1.3 TYPY FDM TISKÁREN	26
1.3.1 Kartézská	26
1.3.2 CoreXY.....	27
1.3.3 Polární	28
1.3.4 Lineární delta.....	29
1.4 KONSTRUKCE ROTAČNÍ DELTA.....	30
1.4.1 Vlastnosti a použití Rotační delty.....	31
1.4.2 Hlavní konstrukční části rotační delty	32
1.4.3 Kinematika	33
2 KONSTRUKCE TISKÁRNY TYPU ROTAČNÍ DELTA	39
2.1 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ČÁSTÍ DELTA TISKÁRNY	39
2.1.1 Rám tiskárny	39
2.1.2 Návrh pohonů ramen	42
2.1.3 Klouby.....	43
2.1.4 Ramena	44
2.1.5 Vzpěry	45
2.1.6 Koncová platforma.....	46
2.1.7 Extruder	46
2.1.8 Tisková podložka.....	47
2.2 ELEKTRONIKA A SOFTWARE.....	48
2.2.1 Snímání koncové polohy.....	48
2.2.2 Řídící elektronika a napájení	49
2.2.3 Firmware	50
3 KALIBRACE A TESTOVÁNÍ	52
3.1.1 Kalibrace rotační delty	52
3.1.2 Tisk s planetární převodovkou	53
3.1.3 Tisk s řemenovým převodem	53
3.1.4 Tisk převisů	54

3.1.5	Test maximální rychlosti tisku.....	56
3.1.6	Test maximálního zrychlení	57
4	ROZPOČET	59
5	ZÁVĚR.....	61
	LITERATURA.....	63
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	69
	SEZNAM PŘÍLOH.....	70

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1:	Ukázka principu nanášení vrstev u FDM tisku [1]	12
Obrázek 2:	Ukázka delaminace vrstev u FDM tisku [2]	15
Obrázek 3:	Ukázka rámu FDM tiskárny TronXY X3S s extrudovanými hliníkovými profily [16]	18
Obrázek 4:	Ukázka konstrukce RepRap tiskárny [15]	19
Obrázek 5:	Ukázka konstrukce hotendu tiskárny Ender 3 [7]	20
Obrázek 6:	Ukázka bowdenového (vlevo) a přímého (vpravo) extruder [9]	22
Obrázek 7:	Ukázka kulaté tiskové podložky pro tiskárnu FLSUN V400 [21]	23
Obrázek 8:	Ukázka krokového motoru NEMA 17 V400 [23]	24
Obrázek 9:	Ukázka základní desky Creality V4.2.7 [26]	25
Obrázek 10:	Ukázka kartézské tiskárny Prusa i3 MK3S+ [27]	26
Obrázek 11:	Část konstrukce tiskárny konfigurace CoreXY [28]	27
Obrázek 12:	3D polární tiskárna Sculpto PRO2 [27]	28
Obrázek 13:	Tiskárna FLSun V400 konfigurace lineární delta [27]	29
Obrázek 14:	Ukázka konstrukce tiskárny konfigurace rotační delta [33]	30
Obrázek 15:	2D znázornění pracovního prostoru konstrukce rotační delty [34]	31
Obrázek 16:	Grafické znázornění důležitých bodů koncové platformy pro výpočet kinematiky (vyrobena autorem)	34
Obrázek 17:	2D znázornění spojení vzpěry o délce l s koncovou platformou v bodě M a ramena o délce k, jež je spojeno se základnou v bodě Q (vyrobena autorem)	38
Obrázek 18:	Ukázka základny tiskárny sestavená v programu SolidWorks 2023	40
Obrázek 19:	Ukázka horní části rámu sestavená v programu SolidWorks 2023	40
Obrázek 20:	Ukázka kompletního rámu tiskárny sestavená v programu SolidWorks 2023	41
Obrázek 21:	Znázornění převodového systému pro pohon ramen	43
Obrázek 22:	Ukázka sestavy dvou kloubových spojů	44
Obrázek 23:	Ramena vytištěná z PA-CF s kovovou přírubovou spojkou	45
Obrázek 24:	Sestava paralelogramu skládající se ze vzpěr a kloubů	45
Obrázek 25:	Osazená koncová platforma	46
Obrázek 26:	Ukázka části extruderu s převodovkou 3:1	47
Obrázek 27:	Vyhřívání tisková podložka připevněná k horní části rámu tiskárny	48
Obrázek 28:	Ukázka uchycení koncového mikrosřínáče	49
Obrázek 29:	Chlazení driverů na základní desce	50
Obrázek 30:	Konfigurační okno pro desku BTT V1.4 Turbo	51
Obrázek 31:	První výtisky na oživené tiskárně	53
Obrázek 32:	Ukázka testovacích tisků po výměně převodového systému	54

Obrázek 33: Test tisku převísů	55
Obrázek 34: Ukázka testu chlazení a tisku převísů u dvojité šroubovice	55
Obrázek 35: Ukázka zkoušky rychlosti tisku.....	56
Obrázek 36: Ožvýkaný filament z extruderu	56
Obrázek 37: Ukázka zachycující vliv zrychlení na kvalitu tisku (A – chyba extruze, B – ringing)	58
Obrázek 38: Výsledná podoba kompletního návrhu tiskárny typu Rotační delta	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Zvolené rozměry hlavních konstrukčních částí tiskárny (označení v závorkách viz obrázky 16 a 17) [40].....	39
Tabulka 2: Seznam dílů potřebných k sestavení rámu tiskárny (viz obr. 20)	42
Tabulka 3: Celkový přibližný rozpočet tiskárny.....	60

ÚVOD

Technologie 3D tisku zaznamenala v posledním desetiletí výrazný rozvoj a stala se důležitou součástí výrobního průmyslu i oblasti prototypování. Mezi nejrozšířenější metody 3D tisku patří FDM (Fused Deposition Modelling), která si díky finanční dostupnosti a jednoduchému ovládání získala popularitu jak mezi amatérskými nadšenci, tak i mezi profesionály.

Cílem této bakalářské práce je provést podrobnou rešerši konstrukčních prvků a principů Rotačních delta FDM 3D tiskáren, porozumět jejich kinematice a na základě získaných poznatků navrhnout, sestavit a otestovat funkční zařízení typu DeltaBot. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část se věnuje analýze konstrukčních řešení běžně využívaných u FDM tiskáren, se zvláštním zaměřením na Rotační delta konfiguraci. Součástí této části je také porovnání různých typů FDM tiskáren a představení klíčových parametrů ovlivňujících jejich funkci.

Následně je podrobně popsána kinematika Rotační delta tiskárny včetně ukázek důležitých výpočtů, které objasňují principy pohybu a převodu souřadnic tiskové hlavy. Druhá část práce se zaměřuje na samotný návrh a realizaci hlavních konstrukčních částí tiskárny, jako jsou rám, ramena, vzpěry, pohony a koncová platforma. Dále je popsán proces uvedení tiskárny do provozu, včetně její kalibrace.

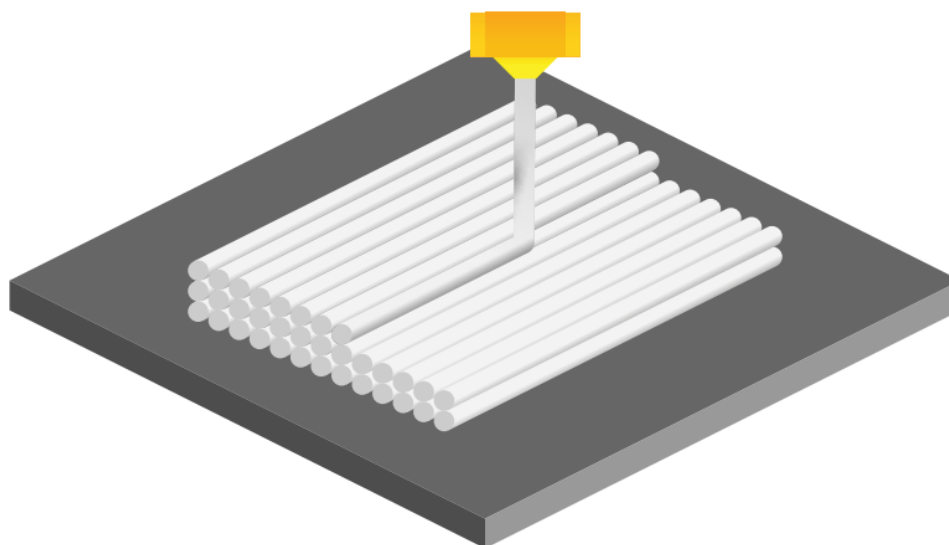
Závěrečná část práce se věnuje ladění zařízení a testování klíčových parametrů tisku, jako je rychlost, maximální zrychlení a schopnost tisknout přehyby.

1 FDM 3D TISK

FDM (Fused Deposition Modelling neboli modelování taveným nanášením) technologie je dnes nejrozšířenější technologií umožňující výroby trojrozměrných dílů, schopna tisku funkčních mechanických částí i prototypů. Při porovnání s technologií SLA (Stereolithography), která pro výrobu dílů používá tekutý resin, je materiál pro FDM tisk bezpečný pro manipulaci.

1.1 Fused Deposition modelling

FDM (Fused Deposition modeling) nebo také FFF (Fused Filament Fabrication) je technologie 3D tisku založená na postupném nanášení vrstev materiálu (viz obr.1). Termoplastický materiál ve formě struny (tzv. filamentu) je pomocí krokového motoru sunut do tzv. „hotendu“, kde je pomocí topného tělíska roztaven a tryskou vytlačen ven. Krokovými motory je tisková hlava přesouvána v souřadnicích X a Y na místa, kde následně dojde k nanesení materiálu na přesně dané místo, kde ztuhne. Když je jedna celá vrstva zhotovena, krokový motor ovládající osu Z zvedne hotend o přesně danou vzdálenost. Tato vzdálenost se nazývá „výška vrstvy“ a je jedním z parametrů udávající kvalitu a přesnost tištěného předmětu [1][3].



Obrázek 1: Ukázka principu nanášení vrstev u FDM tisku [1]

1.1.1 Výhody FDM tisku

Finanční dostupnost

FDM je dnes jednou z nejvíc finančně dostupných technologií 3D tisku. Nejlevnější FDM tiskárny se dnes pohybují okolo 200 dolarů (asi 4500 Kč.). Také je velice jednoduché a levné sehnat náhradní díly.

FDM umožňuje práci s mnoha materiály

Některé technologie 3D tisku, jako SLA umožňují tisk jen z omezeného výběru materiálů. Naproti tomu FDM má široký výběr termo materiálů. Např:

- PLA (*Polylactic acid* – přeloženo = kyselina polylactonová) je materiál, který je levný a snadný k použití. Používá se především v prvních krocích prototypování.
- PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol – přeloženo = polyethylentereftalát – glykol) je tvrdší typ materiálu. Je také nepatrně dražší a hůř se s ním pracuje. Je možné z něj tisknout už funkční mechanické díly.
- ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene – přeloženo = Akrylonitrilbutadienstyren) je materiál, který nabízí velkou pevnost a vyšší teplotní odolnost. Těžko se s ním ale pracuje a kvůli potřebě vyšší teploty trysky se při tisku z materiálu uvolňují toxické látky.
- Nylon (Polyamide – přeloženo = Polyamid) je tuhý, velice odolný materiál, dobře odolávající teplu i tření. Pracuje se s ním ovšem velice těžko, protože pro jeho tisk je nutné dodržet spoustu technologických parametrů.

Stojí také za zmínku, že filamenty pro FDM tiskárny jsou většinou i levnější než tekuté resiny pro SLA tiskárny.

Malá kontaminace materiálu

Jedním z hlavních problémů u SLA tisku je kontaminace tekutého resinu nečistotami a prachem. Nečistoty mohou negativně ovlivňovat kvalitu výtisku.

FDM tiskárny tímto problémem tolik netrpí. Struna filamentu tlačena přes trysku je v hotendu roztavena, a tudíž je většina nečistot spálena. Malé množství prachu, které se dostane skrz trysku neovlivní tolik výslednou kvalitu výtisku.

Rychlost tisku

FDM tisk není nejrychlejší technologií 3D tisku, nicméně při správném nastavení parametrů sliceru (slicer je software, který má za úkol převést 3D model do G-kódu pro tiskárnu), může tiskárna tisknout relativně rychle. Ovšem je třeba mít na paměti, že rychlost tisku výrazně ovlivňuje kvalitu výtisku.

1.1.2 Nevýhody FDM 3D tisku

Omezená přesnost

I přesto, že FDM tiskárny dovedou tisknout poměrně přesně, jejich přesnost je omezená. Jedna možnost pro zlepšení přesnosti tiskárny je použití trysky s menším průměrem. Toto umožní dosáhnout většího detailu výtisku.

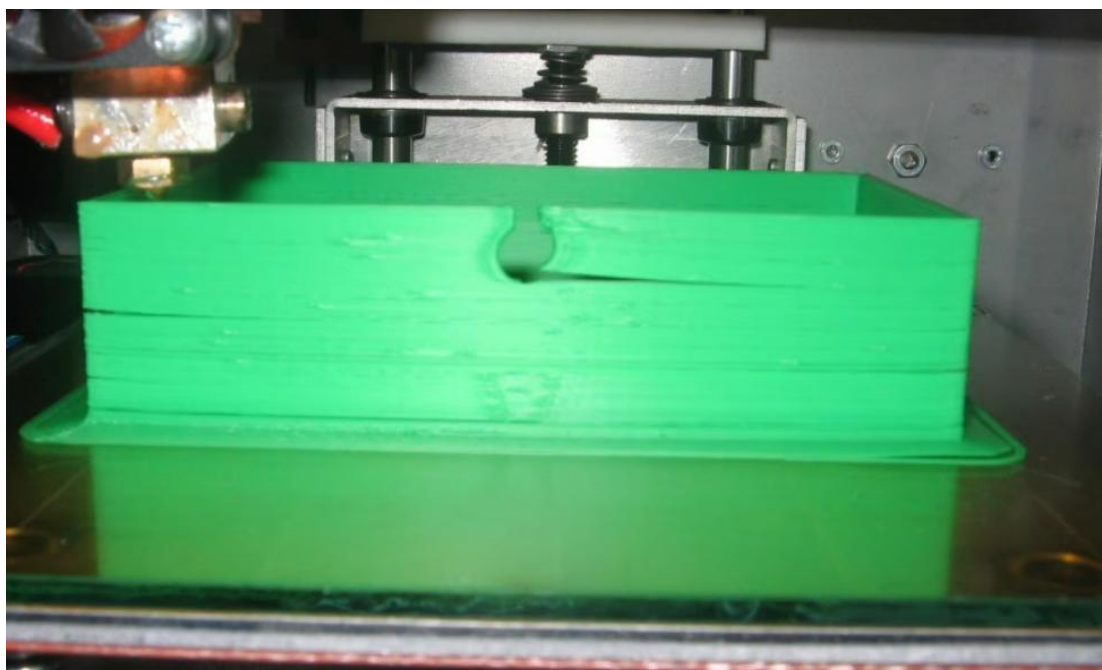
Zmenšení průměru trysky je ovšem problematické, z důvodu nutnosti silnějšího převodování extruderu a rizika ucpání hotendu. Proto se ve většině komerčních tiskáren používají trysky s průměrem 0,4mm. Pro většinu aplikací tento průměr trysky vyhovuje. Pokud je ovšem požadována větší přesnost, je lepší využít SLA tiskárnu.

Omezený tiskový objem

FDM tiskárny oproti SLA tiskárnám umožňují tisk i velkých dílů. Tato schopnost je také ale vyváжена nutností robustnosti a stabilní konstrukce. Čím větší je požadovaný tiskový objem, tím lépe musí být konstrukce tiskárny řešena. Velká konstrukce odolává otřesům tiskárny hůř než malá kompaktní tiskárna.

Pevnost vrstev

Dalším problémem FDM tisku je v některých případech slabé spojení vrstev. FDM tisk totiž probíhá tak, že se nejprve nanese jedna vrstva roztaveného filamentu, ta ztuhne a na ní se nanese další. Problém spočívá v tom, že ztuhlá vrstva a čerstvě nanesená tekutá vrstva se často nedokážou dostatečně pevně spojit. Při nesprávně nastaveném chlazení tisknuté vrstvy nebo špatné teplotě trysky může docházet k delaminaci (viz obr. 2). Je tedy velkou nevýhodou FDM tisku, že výtisky jsou, při použití běžných materiálů, jako třeba PLA, mechanicky méně odolné, zvláště pak při kroucení a ohýbání.



Obrázek 2: Ukázka delaminace vrstev u FDM tisku [2]

Nutnost povrchové úpravy výtisků

Vzhledem k tomu, že FDM výtisky nedosahují příliš velkého detailu, je nutné je po tisku upravit a pomoci jim získat cílený vzhled i vlastnosti.

Jednou možností povrchové úpravy je broušení nedokonalého povrchu brusným papírem. Tato možnost je aplikovatelná pro téměř materiály, je bezpečná, ale je časově a fyzicky náročná. Další možností je vyhlazení povrchů pomocí výparů Acetonu. Nejběžnější způsob je, že se do nádoby nalije trocha acetonu a poté se vytištěný díl uloží na podstavec, který zajišťuje, že se díl přímo nedotýká acetonu. Poté se nádoba zavře a

po danou dobu se nechá materiál dílu leptat. Nakonec je díl vyndán z nádoby a opláchnut vodou, aby se zastavil proces leptání. Acetone lze z běžně dostupných materiálů leptat pouze ABS a ASA (Akrylonitril-styren-akrylát). Tento typ povrchové úpravy je jednoduchý, relativně rychlý, ale má i svoje nevýhody. Jednou z nevýhod použití acetonu pro povrchové úpravy je jeho hořlavost [1][10][11].

1.1.3 Parametry ovlivňující kvalitu 3D tisku

Před začátkem výroby je nutné vzít v potaz, že filameny od různých výrobců mají různé vlastnosti. I kdyby se jednalo typově o stejný materiál, filament od výrobce A může mít lehce odlišné parametry a požadavky na tisk, než filament od výrobce B. Nejen proto je nutno vždy před začátkem výroby provést několik zkušebních tisků a doladit parametry tak, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků. Zde jsou některé parametrů tisku, na které si dávat pozor.

Teplota trysky

Udává teplotu „heatblocku“ a trysky. Pokud se zvolí příliš nízká teplota, může docházet ke slabému spojení vrstev i k zacpání trysky. Na druhou stranu příliš vysoká teplota může způsobovat přepalování extrudovaného materiálu, což ovlivní hladkost povrchu výtisku. Každý tiskový materiál má daný doporučený interval, ve kterém by se teplota trysky měla pohybovat [4].

Teplota podložky

Před začátkem tisku je nutné myslet na jednu důležitou věc a tou je přilnavost daného filamentu k použité podložce. Je nutné zajistit, aby první vrstva na začátku tisku dobře přilnula k povrchu, na kterém se tiskne. Toho lze docílit několika způsoby. Jedním ze způsobů je zvýšení teploty tiskové plochy. Příliš nízká teplota může znamenat nedostatečnou přilnavost materiálu k podložce, a tudíž i možnost odtrhnutí během tisku. Příliš vysoká teplota se zase podílí na zhoršení kvality a zvýšení elektrické spotřeby tiskárny. Stejně jako u teploty trysky existuje pro každý materiál doporučený interval teplot [4].

Přilnavost podložky lze ovšem také zvýšit přidáním určitých fyzických objektů k tištěnému dílu. Jedním z těchto objektů je tzv. Okraj (Anglicky: Brim). Brim je vlastně tenká vrstva, která zvětšuje plochu první vrstvy tisknutého dílu a tím zvyšuje jeho přilnavost i stabilitu. Dalším způsobem pro zvýšení přilnavosti je použití Raftu. Raft je samostatná část, která se vytiskne pod plochou hlavního dílu.

Výplň

3D tisk slouží hlavně k rychlému prototypování, a proto je zbytečné spotřebovávat na každou součástku více materiálu, než je potřeba. Ve zkratce jde o to, že se z plastu nevytiskne úplně celý objem dílu, ale vytisknou se pouze stěny předmětu a výplň. Existují různé vzory výplně například „krychle“, „mřížka“ nebo „cik-cak“. Tyto vzory se od sebe liší například množstvím použitého materiálu i pevností. Tento parametr se udává v procentech. Vyšší procento výplně znamená větší pevnost výtisku, ale taky větší spotřebu materiálu a větší váhu výtisku. Parametr Výplň (Infill) dává uživateli tiskárny plnou kontrolu nad spotřebou filamentu i mechanickými vlastnostmi dílu.

Rychlost tisku

Rychlost tisku, jak už napovídá název, nám udává rychlost, jakou se během tisku pohybuje tisková hlava. Příliš vysoká rychlost tisku může způsobit, nedostatečné roztavení materiálu, nedostatečné ochlazení naneseného materiálu či nedokonalé spojení vrstev. S tímto parametrem také souvisí parametr zrychlení. Pokud motory pohybují tiskovou hlavou vysokou rychlostí a najednou budou chtít rychle změnit směr nebo rychlost pohybu, bude chvíli trvat než tisková hlava, která něco váží, přestane pohybovat v aktuálním směru danou rychlostí. Překročení maximálního doporučeného zrychlení dále způsobuje vibrace, proto musí být konstrukce tiskárny co nejpevnější a nejstabilnější. Rychlost i zrychlení během tisku je proto tedy třeba volit s ohledem na daný typ konstrukce tiskárny, použitých motorech a hmotnosti tiskové hlavy.

Rychlost chlazení

Chlazení je důležitý parametr silně ovlivňující kvalitu tisku. Udává rychlost větráčků mající za úkol chladit právě nanesený filament, aby po nanesení na dané místo ihned ztuhl, a ještě nějakou dobu se neroztékal. Při nastavování rychlosti chlazení je důležité

brát ohled na použitý materiál filamentu. Každý materiál má svoje specifické potřeby. Některé materiály vyžadují rychlejší chlazení a u některých (třeba ABS) se chlazení ani nedoporučuje, protože způsobuje nedostatečné spojení vrstev.

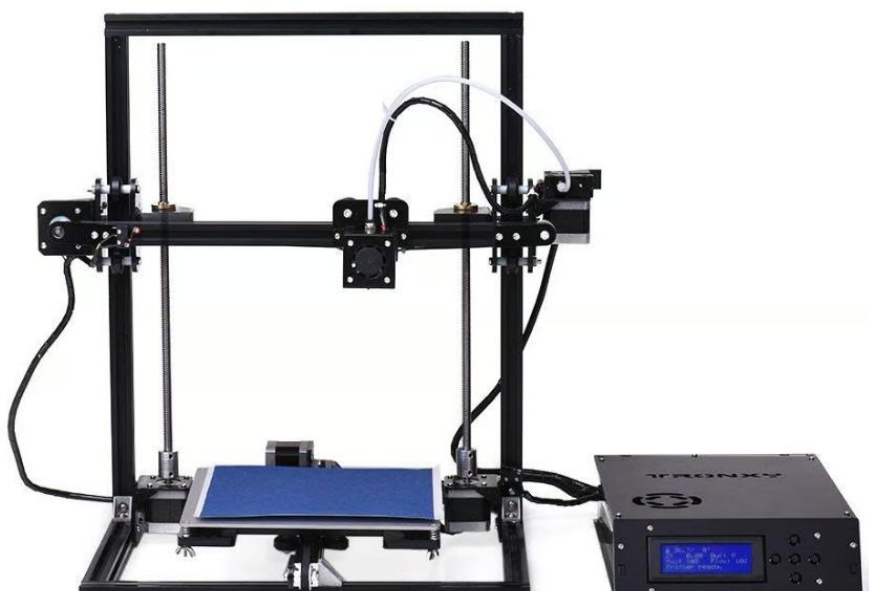
Existuje mnoho dalších parametrů, které je třeba brát v potaz, ale s těmito čtyřmi by měl být seznámen každý, kdo se FDM tiskem zabývá [4][5][12][13].

1.2 Typické části FDM tiskárny

1.2.1 Rám

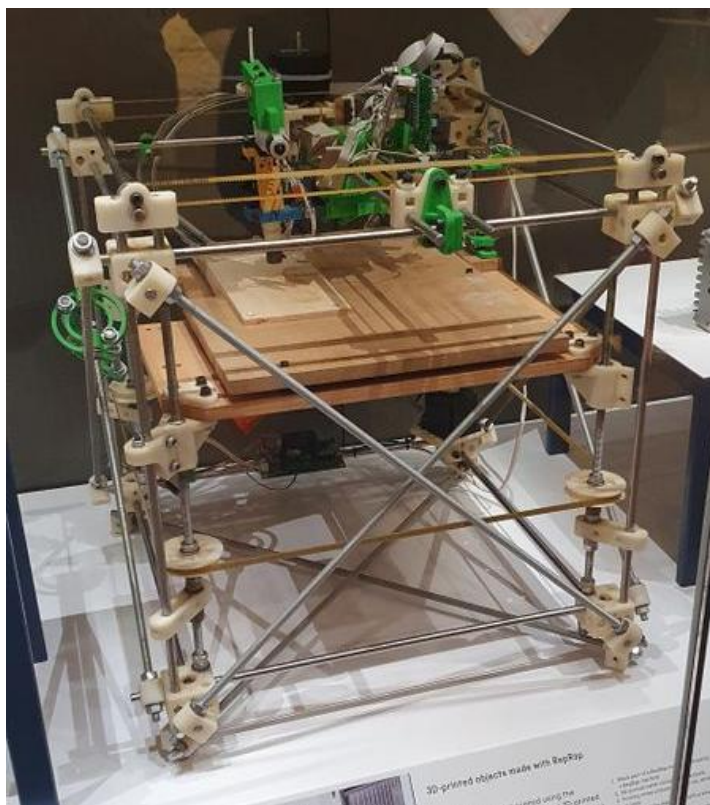
Rám představuje pevnou nepohyblivou část tiskárny, která má za úkol držet všechny elektrické a mechanické části tiskárny pohromadě. Poskytuje oporu a stabilitu během tisku, což napomáhá udržovat přesný pohyb pohyblivých komponent tiskárny. Nejdůležitějšími parametry rámu tiskárny jsou: pevnost, odolnost proti otřesům, hmotnost a cena.

V dnešní době jsou nejvíce rozšířené hliníkové rámy vytvořené extrudováním zahřátého hliníkového materiálu přes formu [14]. Takto vyrobené hliníkové profily (nejznámější např. profily 2020 nebo 3030) jsou pro menší tiskárny (viz obr. 3) dostatečně pevné, aby odolávaly otřesům a vibracím tiskárny. Dále jsou relativně lehké a levné. Existuje spousta různých možností řešení konstrukce (rámu) tiskárny [6].



Obrázek 3: Ukázka rámu FDM tiskárny TronXY X3S s extrudovanými hliníkovými profily [16]

Existují také další technologie výroby konstrukčních prvků pro 3D tiskárny. Například výroba trámů a dalších spojovacích prvků pomocí laseru nebo CNC. Použití kovových spojovacích materiálů není ovšem jediná možnost. Možností použití 3D tištěných plastových spojovacích dílů konstrukce a reprodukovatelností FDM tiskáren se zabývá Projekt RepRap (viz obr. 4) [15][16].



Obrázek 4: Ukázka konstrukce RepRap tiskárny [15]

1.2.2 Extruder

Extruder je důležitá část FDM tiskárny zajišťující tlačení struny filamentu do místa jeho tavení. Extruder se skládá primárně ze dvou částí: coldend (studený konec) a hotend (horký konec). Coldend zajišťující pohyb filamentu přímo nebo skrz teflonovou trubičku do hotendu. V hotendu se přiváděný materiál taví a poté je skrz trysku vytlačován ven [8].

Coldend

Skládá z krokového motoru, ozubeného kolečka, v některých případech i z převodovky pro krokový motor a chladiče.

Hotend

Hotend je asi nejdůležitější součást z celé tiskárny. Všechny součásti hotendu do sebe musí přesně zapadnout, aby vše fungovalo, jak má. Z coldendu vstupuje struna filamentu přes PTFE trubičku (nebo přímo) přes chladič do heatbreaku, což je součástka, která zajišťuje, že se teplo vytvořené v heatblocku (někdy také heater block) nedostane výš. Heatbreak je uložen (zašroubován) v chladiči. Chladič, který je ovšem součástí coldendu, má společně s heatbreakem za úkol zajistit, aby se struna materiálu tavila pouze dole v heatblocku a nikde jinde. Tomuto procesu pomáhá aktivní chlazení ventilátorem. Přivedená struna dále vstupuje do heatblocku, do kterého je připevněno topné těleso, jehož teplem je struna tavena. Pro regulaci teploty je také k heatblocku připevněn teplotní senzor. Pro příklad, tiskárna Creality Ender 3 V2 používá termistor NTC 100k (viz obr. 5). Z heatblocku je potom roztavený filament vytlačen tryskou ven [1].

Existují dva hlavní typy extruderů: přímý (direct) a bowdenový (bowden). Obě tyto varianty mají své výhody nevýhody [8].



Obrázek 5: Ukázka konstrukce hotendu tiskárny Ender 3 [7]

Přímý extruder

U tiskárny s přímým extruderem je mechanismus s krokovým motorem, který posouvá filament do hotendu, připevněn přímo nad hotendem. Materiál tak postupuje do heatblocku přímo (bez trubičky). Použití přímého extruderu ovšem způsobuje zvýšení celkové hmotnosti pohybující se části tiskárny, což neblaze působí na kvalitu tisku (viz obr.6 vpravo).

Mezi výhody přímého extruderu patří: spolehlivost, přesnější a lehčí retrakce, možnost použití slabšího motoru (tím pádem i lehčího a menšího motoru) a možnost tisku i obtížnějších materiálů např. flexibilních TPE (termoplastický elastomer) filamentů, což je pomocí bowdenového extruderu, kvůli tření v PTFE trubičce, velmi obtížné.

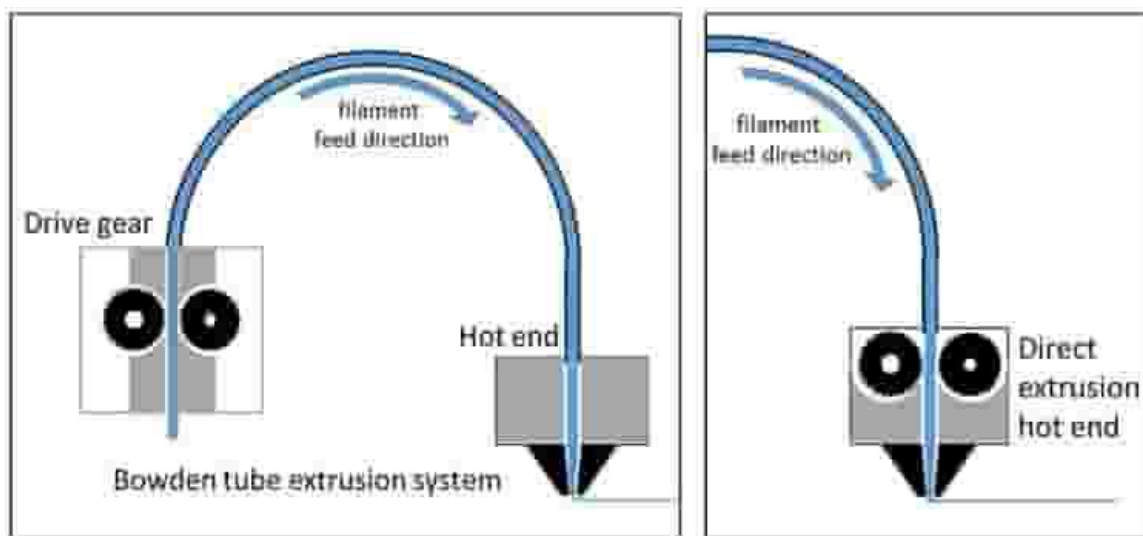
Mezi nevýhody přímého extruderu patří: horší přístup k hotendu při čištění, ale především zvýšení celkové hmotnosti pohybující se části tiskárny, což neblaze působí na kvalitu tisku [8][9].

Bowdenový extruder

U tiskárny s bowdenovým extruderem je část zodpovědná za posouvání materiálu z coldendu do hotendu, pevně spojená s rámem tiskárny. Materiál je tedy tlačěn skrz PTFE trubičku do hotendu (viz obr. 6 vlevo).

Mezi výhody tohoto uspořádání patří: v případě ucpání hotendu je do něj mnohem jednodušší přístup než u přímého extruderu a lehčí pohyblivá část tiskárny, což znamená vyšší dosažitelná rychlost tisku.

Mezi nevýhody bowdenového extruderu patří: pomalejší odezva při posouvání filamentu, způsobena třením v trubičce, nutnost silnějšího, proto i o něco dražšího, motoru, aby měl dostatečný krouticí moment pro překonání tření filamentu při pohybu teflonovou trubičkou [8][9].



Obrázek 6: Ukázka bowdenového (vlevo) a přímého (vpravo) extruder [9]

1.2.3 Vyhřívaná tisková podložka

Vyhřívaná tisková podložka (heat bed), je plocha, na které je tisk realizován. Povrch vyhřívané podložky by měl být kompatibilní s co nejvíce materiály. Slouží k tomu, aby se tištěný díl během tisku neodlepil a tím pádem zabraňuje jeho deformaci. Mezi hlavní části patří: topný element, teplotní senzor, (nejčastěji) kovová deska a samotná tisková podložka.

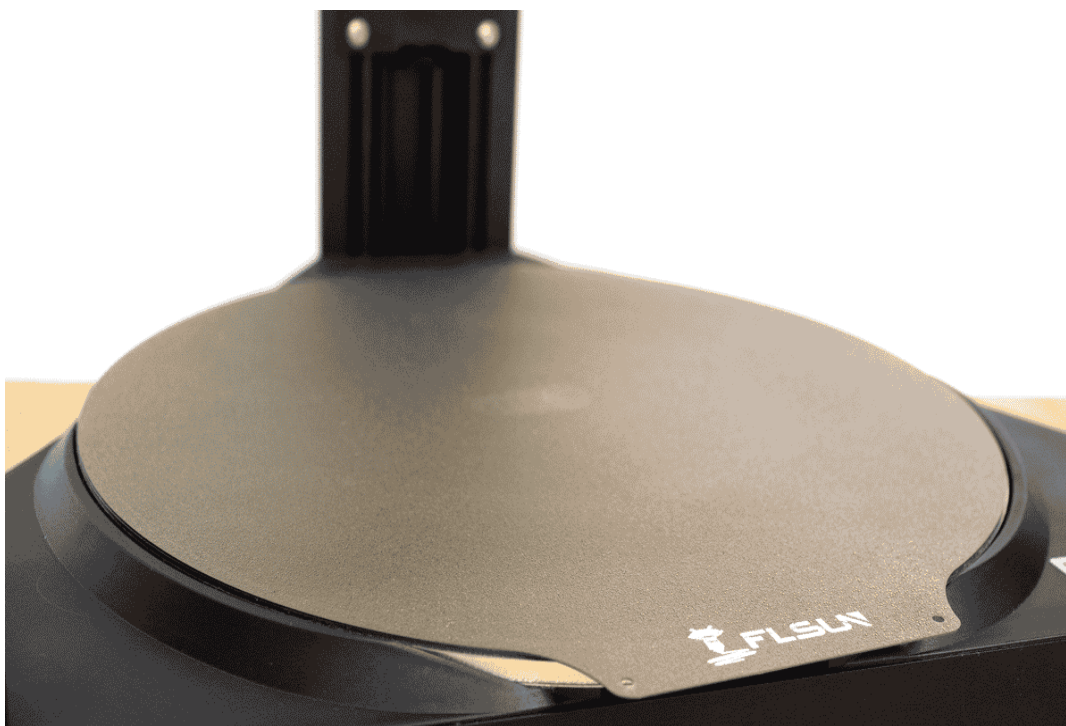
Topný element lze realizovat různými způsoby. K nejběžnějším dnes patří konstrukce topného tělesa pomocí měděných cest, často ve tvaru meandru, na hliníkové desce. Existují i další způsoby realizace topného elementu, například vyhřívaná flexibilní polyimidová PCB nebo upevnění několika topných těles na kovovou desku.

K regulaci teploty tiskové plochy slouží teplotní senzor (nebo senzory). Pro menší tiskárny jsou nejčastěji používány NTC termistory [17].

Teplo generované topným elementem (nebo elementy) je poté přenášeno pomocí této kovové vrstvy na tiskovou plochu. Nejčastěji se pro tento účel používá hliník pro svou dobrou tepelnou vodivost. Tloušťka této hliníkové vrstvy činí většinou pouze několik milimetrů.

Tisková plocha je vrstva materiálu, na které je realizován samotný tisk. Existují různé typy např: skleněné podložky a flexibilní PEI (Polyetherimidové) podložky. Dále jsou dnes populární magnetické tiskové podložky.

V současné době je na trhu dostupných několik typů tiskových podložek: například čtvercové, kulaté nebo podložky realizované jako posuvný pás umožňující tisk velmi dlouhých objektů. Kulaté podložky jsou používány FDM tiskárnami typu Delta (viz obr. 7) a Polar. Čtvercový tvar podložky používají všechny ostatní konfigurace FDM tiskáren [18][19][20].



Obrázek 7: Ukázka kulaté tiskové podložky pro tiskárnu FLSUN V400 [21]

1.2.4 Krokové motory

U každé 3D tiskárny je nutné zajistit pohyb pohyblivých částí. Toho se ve většině případů dosahuje použitím krokových motorů. Na rozdíl od běžných motorů, ke kterým stačí připojit napětí a roztočí se, se krokové motory, při připojení na napájení, otočí vždy jen o malou část. Této části se říká krok (anglicky „step“). Různé motory mohou mít různé kroky, ale nejčastěji se volí základní krok $1,8^\circ$. To znamená, že při jedné změně polarity napětí, přivedeného na vinutí motoru, se hřídel motoru otočí pouze o $1,8^\circ$, případně $0,9^\circ$ pro vyšší přesnost tiskárny. Pro další pootočení hřídele je zapotřebí změnit polaritu napětí na vinutí. Právě tato vlastnost krokového motoru je využívána v 3D tisku

i v dalších odvětvích, jako třeba CNC stroje, kde je přesný pohyb nezbytný. Na rozdíl od servopohonů nevyžadují krokové motory zpětnou vazbu, což je u většiny typů FDM tiskáren výhoda z hlediska jednoduchosti ovládání, ale například u rotační delty, kde může docházet k přeskokování kroků to může být problém.

Na trhu jsou dnes rozšířeny především krokové motory s označením NEMA (National Electrical Manufacturers Association). I přesto, že krokové motory s označením NEMA mohou pocházet od různých výrobců, musí mít vždy stejné parametry (rozměry, kroutící moment atd.), což je jejich velká výhoda.

U běžně dostupných FDM tiskáren jsou používány motory NEMA 17 (viz obr.8) [22][23].



Obrázek 8: Ukázka krokového motoru NEMA 17 V400 [23]

1.2.5 Základní deska

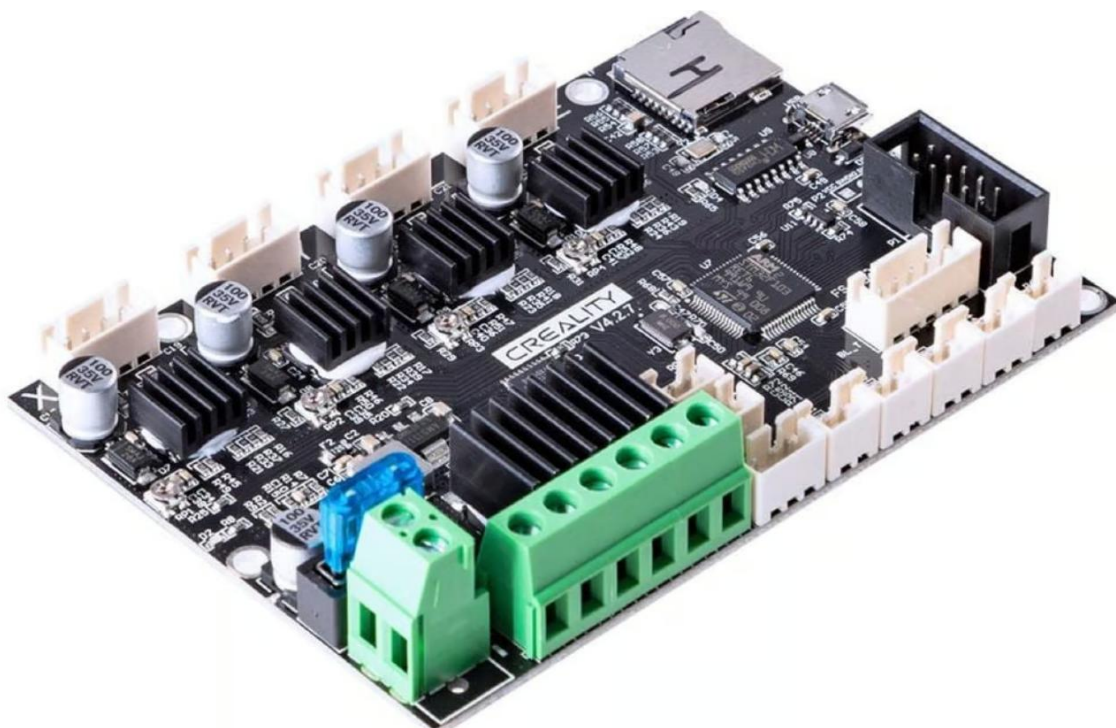
Základní deska (viz obr.9) je mozkem celé tiskárny. Slouží k ovládání všech elektronických komponent, které se v tiskárně nachází (např. krokové motory, extruder a senzory koncové polohy).

Obsahuje mikrokontroler, nejčastěji 8bitový (např. ATmega128P) nebo 32bitový (např. STM32F103RET6), ovladače krokových motorů (např. TMC2225) a svorkovnice a konektory pro připojení ostatních komponent.

Zpracovává data, která jí jsou podávána v podobě g-kódu, na instrukce, které jsou následně vykonávány. Je několik způsobů, jak dostat g-kód do tiskárny, např. použití SD karty nebo komunikace s počítačem pomocí různých USB konektorů. Samotná základní deska ovšem nemůže fungovat bez firmwaru.

Firmware je software, který ovládá základní desku tiskárny. Je nutné mít na paměti kompatibilitu používaného firmwaru s použitou základní deskou. Pro složitější konfigurace tiskáren lze použít propracovanější firmware a tím i výkonnější řídicí elektroniku např. malý počítač Raspberry Pi, který po propojení základní desku využívá pouze jako obslužný sekundární modul a všechny výpočty vykonává sám Raspberry Pi.

Většina výrobců FDM tiskáren prodává 3D tiskárny už s nainstalovaným firmwarem, takže většinou není co řešit. Také je třeba myslet na kompatibilitu základní desky a firmwaru s daným typem tiskárny. Nelze ovládat například FDM tiskárnu typu Rotační delta s firmwarem určeným pro kartézskou tiskárnu [24][25].



Obrázek 9: Ukázka základní desky Crealitiy V4.2.7 [26]

1.3 Typy FDM tiskáren

Existuje mnoho typů konstrukcí FDM tiskáren a každá konstrukce je vhodná na něco jiného. Zde jsou vyjmenovány a popsány některé běžné i zajímavé konstrukce.

1.3.1 Kartézská

Kartézské FDM tiskárny jsou dnes jednou z nejpoužívanějších konstrukcí na trhu. Jsou konstrukčně jednoduché a levné. Ovládání tohoto typu tiskárny není nijak složité, neboť má jednoduchou kinematiku, což znamená, že je jednoduše naprogramovatelná a její řídicí elektronika nevyžaduje velký výpočetní výkon pro přepočítání souřadnic. Díky své jednoduchosti a ceně má velkou komunitu uživatelů.

Tato konfigurace umožňuje pohyb hotendu v osách X, Y a Z, přičemž pohyb po každé ose zajišťuje pro tu osu vyčleněný jeden nebo více krokových motorů.

Rotační pohyb motoru je poté skrze ozubený řemen nebo závitovou trapézovou tyč převeden na lineární pohyb dané osy. Jednou z nejznámějších kartézských tiskáren je Ender 3 V2 (viz obr. 10).



Obrázek 10: Ukázka kartézské tiskárny Prusa i3 MK3S+ [27]

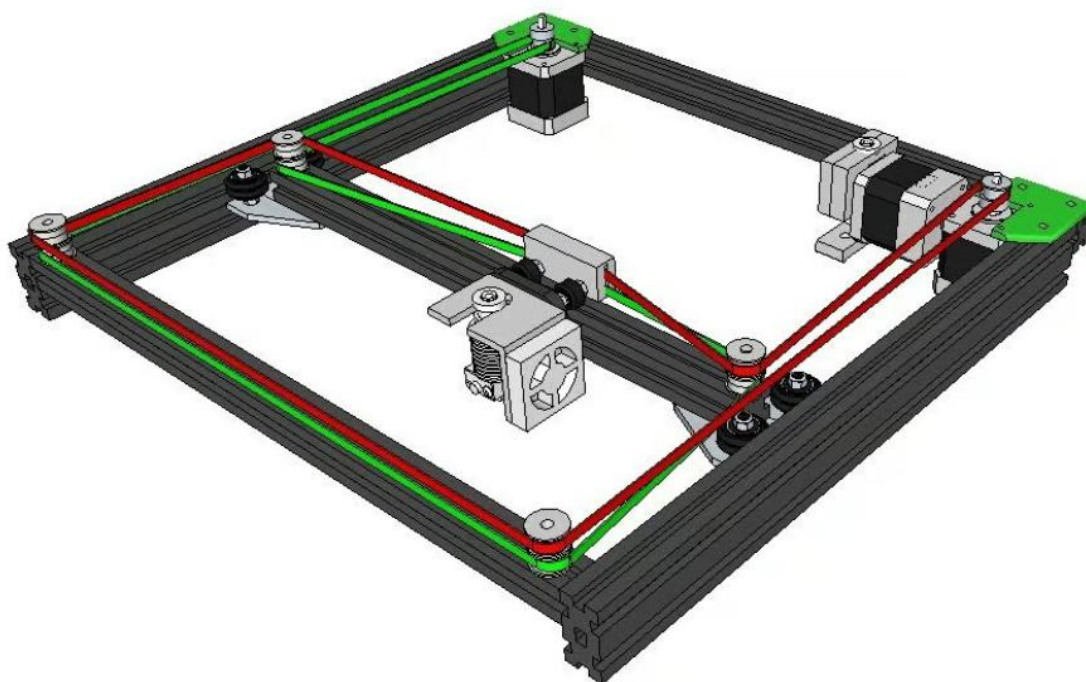
U této tiskárny se tisková hlava pohybuje pomocí krokového motoru s ozubeným řemenem doprava a doleva (v ose X). Pohyb nahoru a dolů v ose Z zajišťuje krokový motor s trapézovou tyčí. Tisková podložka se pohybuje dopředu a dozadu stejným způsobem jako hotend v ose X a zajišťuje tak pohyb v ose Y.

Za svou konstrukční jednoduchost platí tato konstrukce nižší maximální rychlosti tisku a náchylností na vibrace [1][27].

1.3.2 CoreXY

Tato konstrukce FDM tiskárny se od kartézské liší především tím, že jde o paralelní uspořádání pro pohyb tiskové hlavy v osách XY. Tiskárny typu CoreXY (viz obr. 11) fungují následovně.

O pohyb v osách X a Y se pomocí ozubených řemínek a klatek starají dva krokové motory, které se spolupodílí na výsledném pohybu hotendu. O pohyb tiskové podložky se většinou stará krokový motor se závitovou tyčí. Výhodou této konfigurace je možnost dosažení velké rychlosti tisku, a to z důvodu malé hmotnosti pohyblivé části tiskárny. Na rozdíl od kartézských tiskáren jsou oba motory pro osy XY pevně spojeny s nepohyblivou částí konstrukce, a tak nezvětšují celkovou hmotnost pohyblivé části.



Obrázek 11: Část konstrukce tiskárny konfigurace CoreXY [28]

Mezi její výhody patří například: relativně velká přesnost tisku, odolnost proti vibracím, možnost větší tiskové plochy a kompaktnost.

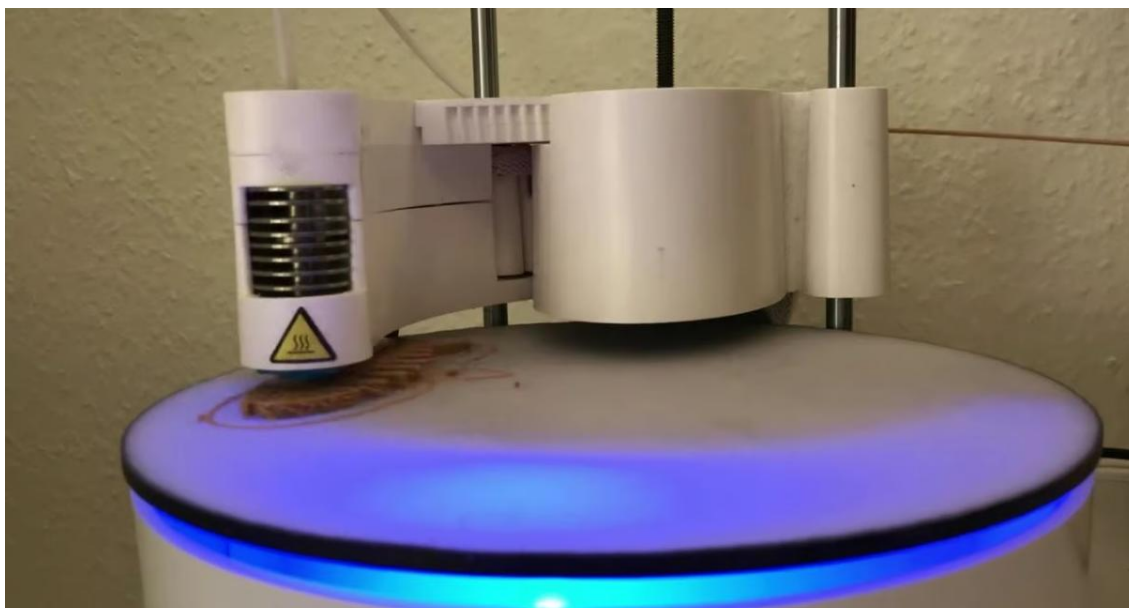
Mezi její nevýhody patří: vyšší cena, složitější oprava pohyblivého systému vzhledem ke složitější pohyblivé části konstrukce, skládající se z řemenů a kladek, nutnost použití řídicí elektroniky s větším výpočetním výkonem [27][28].

1.3.3 Polární

Existuje mnoho typů provedení polárních tiskáren. Jedná se ovšem o relativně nový typ tiskárny. Jendou z dostupných polárních tiskáren na trhu je tiskárna Sculpto PRO2 (viz obr. 12).

Tiskárny s polární konfigurací se skládají z: rotační vyhřívané podložky, ramena pohybuje s hotendem a krokového motoru, zvedající rameno s hotendem, zajišťující pohyb v ose Z. Jak název napovídá, tato konstrukce nevyužívá kartézský souřadný systém, ale polární. Polární tiskárny jsou relativně levné a negenerují tolik hluku během tisku jak ostatní typy tiskáren.

Jejich velkou nevýhodou je ovšem právě jejich souřadný systém, který kromě tiskáren typu SCARA, které fungují na podobném principu, běžné tiskárny nepoužívají. Proto nejsou moc rozšířené a mají malé zastoupení v 3D tiskařské komunitě. Dále nedisponují příliš velkou tiskovou rychlostí ani kvalitou tisku [27].



Obrázek 12: 3D polární tiskárna Sculpto PRO2 [27]

1.3.4 Lineární delta

Lineární delta (viz obr. 13) je zvláštním typem konstrukce používající kartézský souřadný systém, jako ostatní běžné typy tiskáren. Liší se v mechanickém provedení. Na rozdíl od klasické kartézské tiskárny je pohyb hotendu (koncového efektoru) zajišťován pohybem tří ramen. Tato ramena jsou mezi sebou pootočená vždy o 120° , takže při pohledu shora tvoří místa spojení ramen vrcholy pomyslného rovnostranného trojúhelníku (proto delta). Ramena jsou na jedné straně pohyblivě spojena s koncovou platformou, na níž se nachází hotend tiskárny a na druhé straně jsou také pohyblivě spojena s vozíkem, který zajišťuje plynulý a přesný pohyb tohoto konce ramena nahoru a dolů. Pohyb každého ramena zajišťuje krokový motor, jehož rotační pohyb je přes ozubený řemen nebo závitovou tyč převáděn na lineární pohyb vozíku. Z popisu mechanické stránky přístroje je jasné, že tato konstrukce tiskárny má mnohem složitější kinematiku než ostatní typy tiskáren. Kinematika lineární delty je dost podobná jako kinematika tiskárny typu Rotační delta.



Obrázek 13: Tiskárna FLSun V400 konfigurace lineární delta [27]

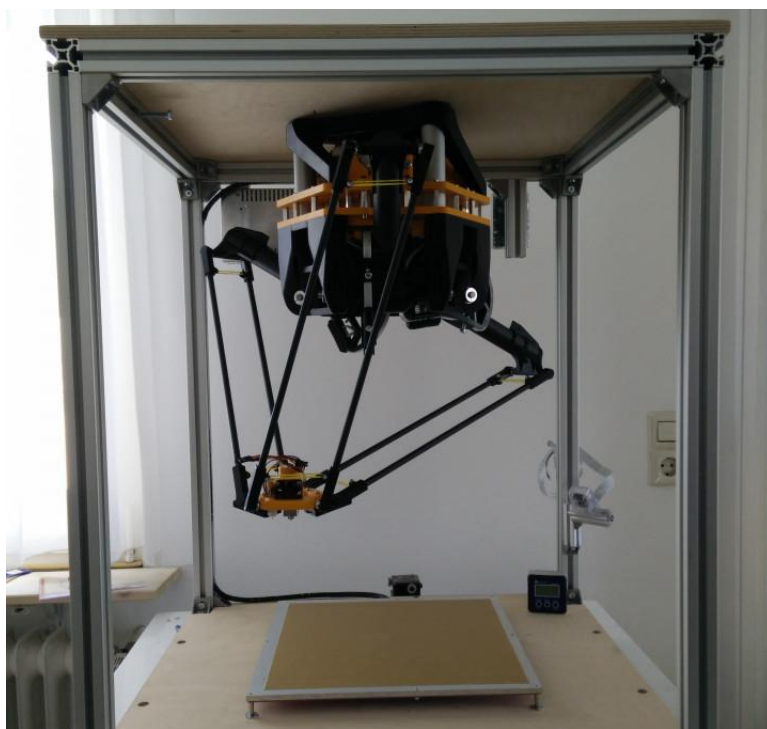
Výhodou této konstrukce je vyšší teoretická rychlost, poměrně slušná kvalita tisku a možnost tisku vyšších dílů.

Nevýhodou této konstrukce je zároveň ovšem to, že čím vyšší je daná tištěná součástka, tím výš se také pohybují ramena s koncovou platformou a tím zvedají těžiště tiskárny. Tiskárna je pak více náchylná na vibrace než při tisku menších dílů. Proto tato konstrukce musí být co nejpevnější a nejstabilnější.

Dalšími nevýhodou je menší tisková plocha a nutnost použití řídicí elektroniky s vyšším výpočetním výkonem, což je při kinematice tiskárny zřejmé [27][29][30].

1.4 Konstrukce Rotační delta

Tiskárny typu Rotační delta (viz obr. 14) jsou dnes novinkou a zatím nejsou dostupné na trhu. Kvůli tomu o nich také není mnoho informací. Tato kapitola se proto zaměřuje převážně na konstrukci a princip rotačního delta robota, jelikož tyto roboty jsou v průmyslu běžně používané a jediným rozdílem je typ koncového efektoru, kterým je v případě 3D tiskárny hotend. Rotační delta robot je paralelním typem robota se třemi stupni volnosti.

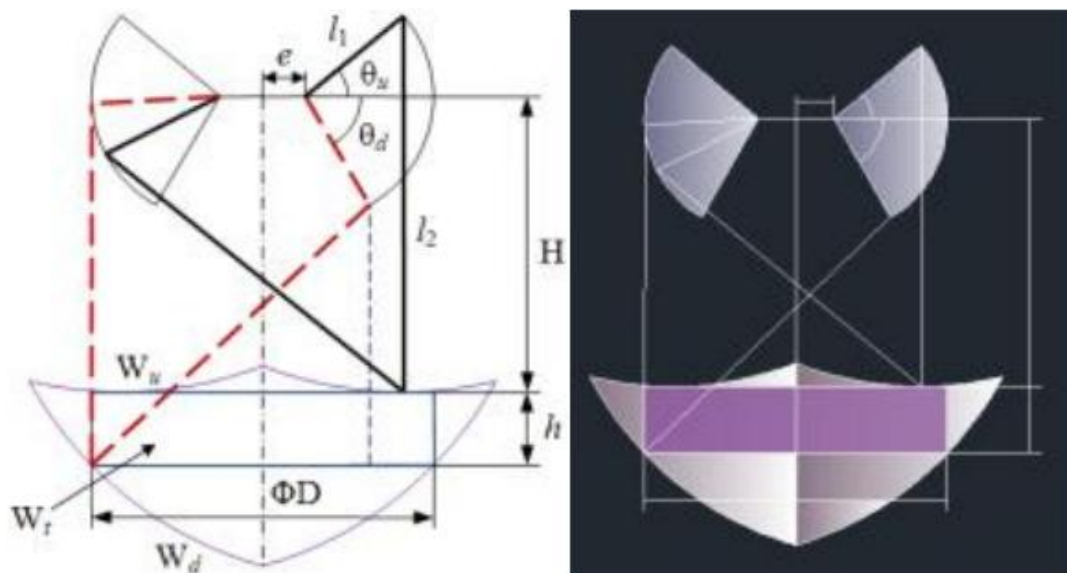


Obrázek 14: Ukázka konstrukce tiskárny konfigurace rotační delta [33]

Každá odborná literatura používá lehce odlišnou terminologii, co se týče názvů komponent této konstrukce. Tato práce bude pracovat s následujícími pojmy: Základna, pohon, ramena, vzpěry a koncová platforma.

1.4.1 Vlastnosti a použití Rotační delty

Paralelní roboty typu Rotační delta jsou dnes široce využívány například v průmyslu nebo potravinářství pro rychlé přesouvání malých lehkých dílů nebo potravin. Mezi výhody této konstrukce tedy patří velká rychlost a zrychlení koncového efektoru. Toho je docíleno tím, že se pohony (motory) nenachází na samotných ramenech robota, ale jsou pevně spojeny s rámem přístroje, takže těžké pohony nemusí pohybovat samy sebou, a to umožňuje dosažení vyšší rychlosti pohybu. Tato konstrukce robota má ovšem také několik nevýhod. Jednou z nich je komplikovanost konstrukce a složitější kinematika. Další nevýhodou je, že naproti tomu, jak rychlých pohybu je robot schopen, neumožňuje tato přemísťování těžších a větších objektů. Další velkou nevýhodou je relativně malý pracovní prostor. Hranice pracovního prostoru rotační delty připomíná paraboloid [31]. Pokud je tedy požadován například válcový tvar pracovního prostoru, je třeba počítat, že se využije pouze malá část dosažitelného pracovního prostoru (viz obr. 15) [32][34].



Obrázek 15: 2D znázornění pracovního prostoru konstrukce rotační delty [34]

1.4.2 Hlavní konstrukční části rotační delty

Základna

Základna je část konstrukce rotační delty, ke které jsou pevně připojeny pohony jednotlivých ramen. Obvykle je upevněna k horní části rámu přístroje, jak je to obvyklé u delta robotů, které jsou využívány pro rychlé a přesné přesouvání věcí. Umístění pohonů k horní části rámu však může nepříznivě působit na stabilitu konstrukce z důvodu vysoko položeného těžiště přístroje. Proto musí být rám této konstrukce velmi pevný, aby odolával vibracím [34].

Pohon

Je několik možností při volbě pohonu pro konstrukci tohoto typu. Dá se využít servomotorů, BLDC (Brushless DC) motorů nebo krokových motorů. Jednou z nevýhod této konstrukce je to, že běžné krokové motory, například NEMA 17, které jsou používány při stavbě většiny FDM tiskáren, nejsou samy o sobě schopny rozpohybovat ramena, protože nemají dostatečný kroutící moment.

Z toho plyne, že je nutné použití pohonů s větším kroutícím momentem. Toho se dá dosáhnout buď použitím větších a silnějších motorů, nebo použitím mechanických převodů pro zvýšení kroutícího momentu na úkor rychlosti pohybů ramen. Jednou z možností při výběru mechanického převodu je použití ozubených řemenů a řemenic [33].

Ramena

Rameno rotační delty je součástka, která je spojena s hřídelí krokového motoru, nebo s výstupní hřídelí mechanického převodu, který ramenem pohybuje. Rotační pohyb použitého pohonu je přenášén na rotační pohyb ramena. Je nutné, aby ramena byla co nejpevnější, aby se neohýbala a nekroutila a tím nevnášela do pohybů přístroje chybu. Další konstrukční podmínkou pro volbu a návrh ramene je, aby bylo co nejlehčí a tím zbytečně nezatěžovalo pohon (motor). Jednou z variant při volbě materiálu je použití trubek z uhlíkových vláken [33].

Vzpěry

Vzpěry (také označovány jako: following arms nebo passive arms) [34] slouží k přenášení pohybů ramena na koncovou platformu. Přestože by mechanismus robota mohl fungovat

i jen s třemi vzpěrami (jedna vzpěra pro každé rameno), většinou se pro každé rameno volí dvě rovnoběžné vzpěry, kvůli zvýšení stability. Tyto dvě paralelní vzpěry tvoří paralelogram (rovnoběžník) [35] Vzpěry jsou k ramenu připojeny většinou úhlovými klouby.

Koncová platforma

Ke koncové platformě jsou pomocí úhlových kloubů připojeny vzpěry. Většinou se tato konstrukce robota používá pro jednoduché rychlé přesouvání lehkých objektů, proto je koncová platforma rovnoběžná se základnou. Je na ní umístěn požadovaný nástroj, např: vakuová přísavka nebo v případě FDM tiskárny hotend [34].

1.4.3 Kinematika

Poloha koncové platformy je dána polohou (natočením) tří ramen. Motory, které pohybují jednotlivými rameny, jsou pevně umístěny na základně. Díky tomu je pohyblivá část lehčí, tedy méně setrvačná, a tím pádem rychlejší. Právě toto konstrukční řešení přináší hlavní výhodu. Schopnost dosahovat vysokých rychlostí a zrychlení. Pro přepočet zadaných souřadnic a pochopení principu pohybu této konstrukce je asi nejdůležitější inverzní neboli zpětná kinematika.

Zpětná kinematika

Zpětná kinematika se zabývá určováním a přepočtem zadaných souřadnic koncového efektoru (v případě FDM tiskáren G-kódu) do úhlů jednotlivých ramen. Následující výpočty ukazují princip řešení inverzní kinematiky jednoduchého robota typu Rotační delta. Ukázka výpočtu zpětné kinematiky:

Nejprve je nutné vypočítat absolutní souřadnice tří bodů M_1 , M_2 a M_3 (viz obr. 16) (bodů, kde se vzpěry spojují s koncovou platformou). To se provede pomocí rovnic (1a až 1f) [36].

Pro bod M1:

$$X_{M1} = X_V + d \cos(\alpha_1) = X_V + d \cdot \cos(90) = \underline{X_V} \quad (1.a)$$

$$Y_{M1} = Y_V + d \sin(\alpha_1) = Y_V + d \cdot \sin(90) = \underline{Y_V + d} \quad (1.b)$$

Pro bod M2:

$$X_{M2} = X_V + d \cos(\alpha_2) = \underline{X_V - d \frac{\sqrt{3}}{2}} \quad (1.c)$$

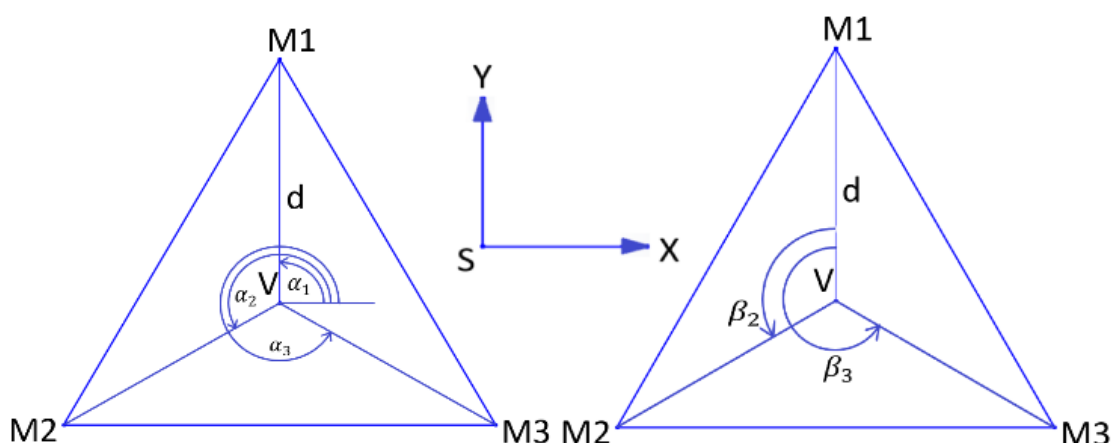
$$Y_{M2} = Y_V + d \sin(\alpha_2) = \underline{Y_V - d \frac{1}{2}} \quad (1.d)$$

Pro bod M3:

$$X_{M3} = X_V + d \cdot \cos(\alpha_3) = \underline{X_V + d \frac{\sqrt{3}}{2}} \quad (1.e)$$

$$Y_{M3} = Y_V + d \cdot \sin(\alpha_3) = \underline{Y_V - d \frac{1}{2}} \quad (1.f)$$

, kde X_M a Y_M jsou souřadnice bodů M_1, M_2 a M_3 vzhledem k souřadnému systému se středem v bodě $V = [X_V ; Y_V]$, d je poloměr pomyslné kružnice se středem v bodě V , procházející všemi třemi body M_1, M_2 a M_3 (vzdálenost bodu M od bodu S) a $\alpha_1 = 90^\circ$, $\alpha_2 = 210^\circ$, $\alpha_3 = 330^\circ$ jsou úhly mezi kladným směrem osy X a úsečkou tvořenou bodem V a jedním z bodů M .



Obrázek 16: Grafické znázornění důležitých bodů koncové platformy pro výpočet kinematiky (vyrobena autorem)

Následuje transformace souřadnic M_1, M_2 a M_3 , nacházejících se v hlavním souřadném systému, do souřadnic M'_1, M'_2 a M'_3 , kde se každý z těchto bodů nachází ve svém vlastním souřadném systému. Toho se docílí použitím rovnic (2.a) a (2.b):

$$X' = M_Y \sin(\beta) + M_X \cos(\beta) \quad (2.a)$$

$$Y' = M_Y \cos(\beta) - M_X \sin(\beta) \quad (2.b)$$

, kde β je úhel mezi kladným směrem osy Y a jedním z bodů M. V tomto případě: $\beta_1 = 0^\circ, \beta_2 = 120^\circ, \beta_3 = 240^\circ$ (viz obr. 16).

Dalším, asi nejsložitějším, krokem je hledání průsečíku kružnice a koule (sféry). Střed kružnice o poloměru k (délka ramene) se nachází v bodě Q. Střed koule o poloměru l (délka vzpěry) se nachází v bodě M (viz obr. 17). Existují tři možné výsledky:

Soustava rovnic má dvě řešení, což znamená, že existují dva možné body, kde skrze sebe kružnice a koule prochází. Potom je nutné vybrat správné řešení.

Soustava rovnic má právě jedno řešení. Toto nastává, pokud se souřadnice koncového efektoru nachází na hranici pracovního prostoru.

Soustava rovnic nemá ani jedno řešení. Toto nastává, pokud se souřadnice koncového efektoru nachází mimo pracovní prostor systému.

Rovnice (3.a) a (3.b):

$$(X' - X'_M)^2 + (Y' - Y'_M)^2 + (Z - Z_M)^2 = l^2 \quad (3.a)$$

$$(X' - X'_Q)^2 + (Z - Z_Q)^2 = k^2 \quad (3.b)$$

Toto je ovšem soustava dvou rovnic o třech neznámých, a proto je nutné si uvědomit, že hledanými souřadnicemi pro bod P jsou souřadnice X'_P a Z. Souřadnice Y'_P je totiž známá a je rovna 0, jelikož bod P bude mít vždy stejnou relativní Y' souřadnici, jako bod Q (viz obr.17). Rovnice (3.a) a (3.b) lze tedy upravit a zjednodušit:

$$(X' - X'_M)^2 + (Z - Z_M)^2 = l^2 - Y'^2_M \quad (4.a)$$

$$(X' - X'_Q)^2 + (Z - Z_Q)^2 = k^2 \quad (4.b)$$

Tuto soustavu rovnic lze ovšem zjednodušit, a to zmenšením souřadnice Z bodů Q a M o hodnotu Z_Q . Tím se celá soustava posune v souřadném systému dolů, čímž se rovnice trošku zjednoduší. Upravené rovnice mají následující podobu:

$$(X' - X'_Q)^2 + Z^2 = k^2 \quad (4.c)$$

$$(X' - X'_M)^2 + (Z - (Z_M - Z_Q))^2 = l^2 - Y'_M{}^2 \quad (4.d)$$

Pro přehlednost je použita substituce, viz rovnice (4.e) a (4.f):

$$(X - D)^2 + Z^2 = E \quad (4.e)$$

$$(X - A)^2 + (Z - B)^2 = C \quad (4.f)$$

, kde $A = X'_M$, $B = (Z_M - Z_Q)$, $C = l^2 - Y'_M{}^2$, $D = X'_Q$, $E = k^2$ a $X = X'$.

Následuje postupné řešení této soustavy rovnic:

$$(X' - D)^2 + Z^2 = E \Rightarrow Z = \pm \sqrt{E - X^2 + 2DX - D^2} \quad (5.a)$$

Následuje dosazení rovnice (5.a) do rovnice (4.e):

$$(X - A)^2 + (\pm \sqrt{E - X^2 + 2DX - D^2} - B)^2 = C \quad (5.b)$$

Po úpravě rovnice (5.b) je obdržena kvadratická rovnice (5.c):

$$X^2(K + 4B^2) + X(2F\sigma - 8B^2D) + (\sigma^2 + 4B^2D^2 - 4B^2E) = 0 \quad (5.c)$$

, kde $K = (2D - 2A)^2$, $F = (2D - 2A)$ a $\sigma = (A^2 + E - D^2 + B^2 - C)$.

Z rovnice (5.c) je vidět, že pro nalezení souřadnice X bodu P (viz obr. 17) je nutno využít rovnici pro hledání kořenů kvadratické rovnice (6.a):

$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (6.a)$$

, kde $a = K + 4B^2$, $b = 2F\sigma - 8B^2D$, $c = \sigma^2 + 4B^2D^2 - 4B^2E$.

Z konstrukčního hlediska přístroje je vhodnější variantou bod P, který má co největší souřadnici X. Proto je pro nalezení správné souřadnice vhodného bodu P použita rovnice (6.b):

$$X = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (6.b)$$

Nyní když je známá správná souřadnice X bodu P, je nutné zjistit souřadnici Y. To se provede dosazením hodnoty X z rovnice (6.b) do rovnic (7.a) a (7.b), které vychází z rovnice (5.a):

$$Z_1 = \sqrt{E - (X - D)^2} \quad (7.a)$$

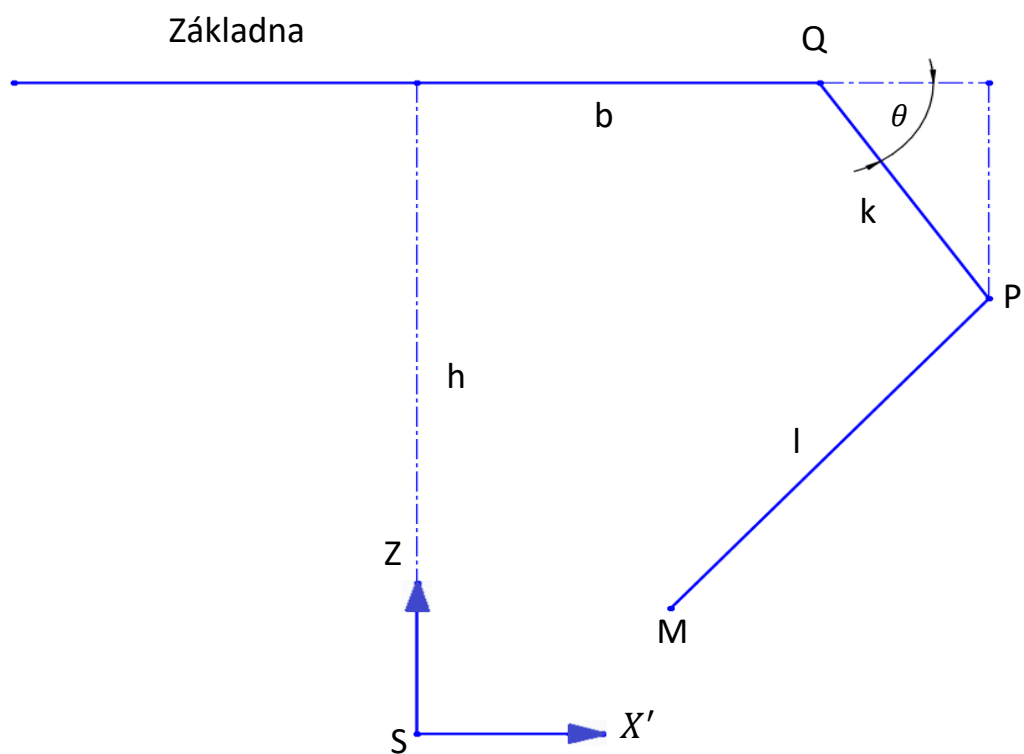
$$Z_2 = -\sqrt{E - (X - D)^2} \quad (7.b)$$

Pro zjištění, která ze souřadnic (Z_1 nebo Z_2) je nejjednodušší dosadit oba výsledky do rovnice (4.f) a pokud rovnice pro dané Z vychází, daná hodnota souřadnice Z bodu P je správná a pro zjištění úhlu θ zbývá už jen jeden krok.

Pro zjištění hledaného úhlu θ se použije rovnice (8), která vychází z obrázku (viz obr. 17):

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Z_P - Z_Q}{X_P - X_Q} \right) \quad (8)$$

Tento samý postup se zopakuje ještě pro další dvě ramena, z čehož je vidět, že kinematika této konfigurace FDM 3D tiskárny je mnohem náročnější, než například kinematika kartézské tiskárny a je zapotřebí řídicí elektroniky s vyšším výpočetním výkonem. Tato náročnost a zdlouhavost výpočtů je jednou z hlavních nevýhod této konfigurace [37][38].



Obrázek 17: 2D znázornění spojení vzpěry o délce l s koncovou platformou v bodě M a ramena o délce k , jež je spojeno se základnou v bodě Q (vyrobena autorem)

2 KONSTRUKCE TISKÁRNY TYPU ROTAČNÍ DELTA

Tato kapitola se věnuje návrhu, konstrukci, a nakonec testování FDM tiskárna typu Rotační delta (DeltaBot).

2.1 Návrh konstrukčních částí delta tiskárny

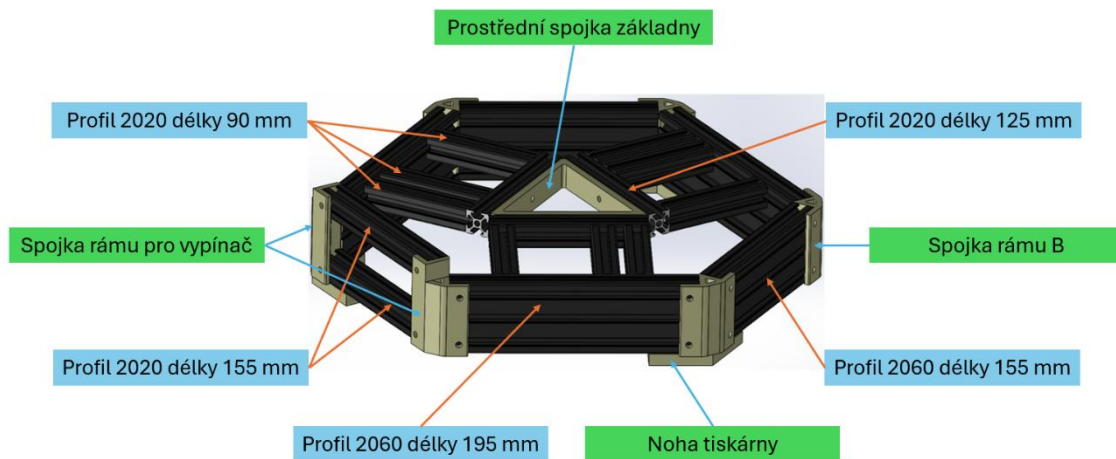
2.1.1 Rám tiskárny

Prvním krokem návrhu konstrukčních částí rámu tiskárny je určení požadovaného tiskového objemu. Jak již bylo v kapitole 1.4.1 řečeno, díky zvláštní kinematice má tato konstrukce neobvyklý pracovní prostor. Dále je z obrázku 15 zřejmé, že velikost pracovní plochy je závislá na velikosti maximální dosažitelné výšky pracovního prostoru. Při volbě pracovního prostoru ve tvaru válce je nutné mít na paměti, že čím větší bude zvolená tisková plocha, tím menší bude dosažitelná tisková výška. Pro tuto tiskárnu byla zvolena kulatá vyhřívaná podložka na hliníkovém substrátu o průměru 220 mm [39]. Vzhledem ke zvolené tiskové ploše byly na internetové stránce, určené pro výpočet rozměrů robotů typu Rotační Delta [40], zvoleny rozměry hlavních konstrukčních prvků tiskárny tak, aby byla splněna požadovaná tisková plocha o průměru zhruba 220 mm. Zvolené rozměry hlavních konstrukčních částí tiskárny jsou v tabulce 1.

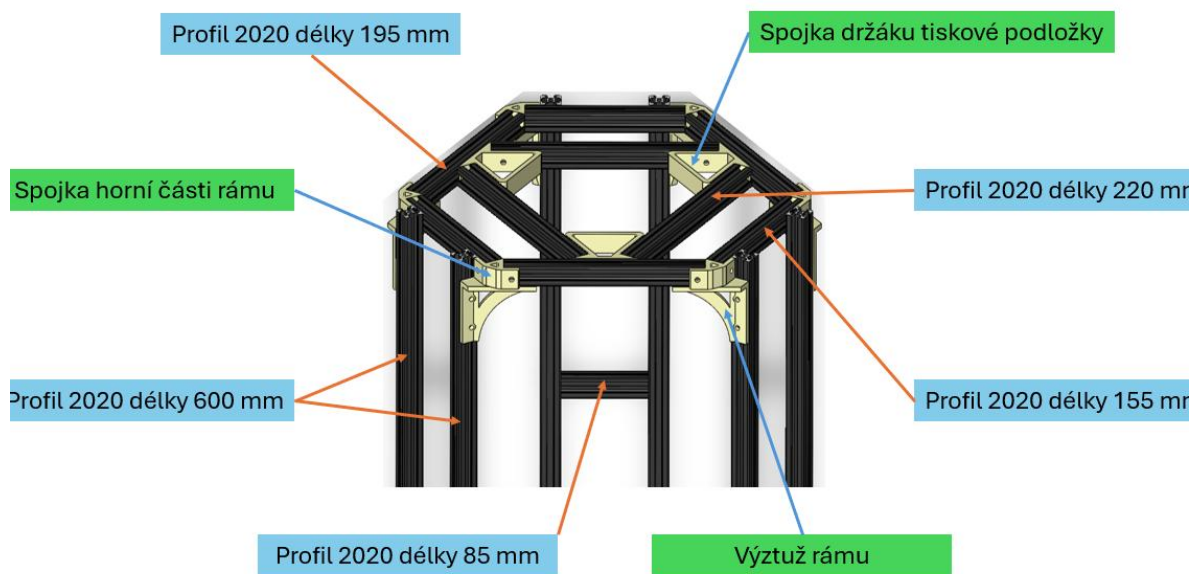
Tabulka 1: Zvolené rozměry hlavních konstrukčních částí tiskárny (označení v závorkách viz obrázky 16 a 17) [40]

Konstrukční část	Zvolený rozměr [mm]
Poloměr základny (b)	81
Poloměr koncové platformy (d)	44
Délka ramena (k)	150,5
Celková délka vzpěry (l)	300
Vzdálenost základny od tiskové plochy (h)	450

Podle těchto zvolených rozměrů byly v programu SolidWorks 2023 [41] vytvořeny a sestaveny (viz obr. 18, 19 a 20) spojovací prvky rámu tiskárny a také byly zvoleny extrudované hliníkové profily (viz tab. 2).



Obrázek 18: Ukázka základny tiskárny sestavená v programu SolidWorks 2023



Obrázek 19: Ukázka horní části rámu sestavená v programu SolidWorks 2023



Obrázek 20: Ukázka kompletního rámu tiskárny sestavená v programu SolidWorks 2023

Navrhovaná konstrukce tiskárny se od běžné rotační delty (konstrukce DeltaBot) liší tím, že základna je umístěna dole u země. Z toho vyplývá, že tisková podložka bude potom nahoře. Toto uspořádání by mohlo mít potenciálně několik výhod, např: vzhledem k tomu, že na základně jsou umístěny pohony jednotlivých ramen, které něco váží, by se těžiště tiskárny mělo posunout dolů, což by mělo příznivý dopad na odolnost vůči vibracím a tím i na kvalitu tisku. Napájecí zdroj včetně řídicí elektroniky by se potom nacházel pod základnou.

Jednou z možných nevýhod tohoto řešení rámu by mohla být potenciálně nedostatečná adheze výtisků k podložce. Toto by ovšem mělo být možné, jelikož FDM tisk probíhající vzhůru nohama využívá například tiskárna Positron V3.2 [42] [43].

Tabulka 2: Seznam dílů potřebných k sestavení rámu tiskárny (viz obr. 20)

Tabulka 3: Název	počet
Hliníkový profil 2020 délka 600 mm	6
Hliníkový profil 2060 délka 155 mm	2
Hliníkový profil 2060 délka 195 mm	3
Hliníkový profil 2020 délka 125 mm	3
Hliníkový profil 2020 délka 90 mm	9
Hliníkový profil 2020 délka 195 mm	3
Hliníkový profil 2020 délka 155 mm	5
Hliníkový profil 2020 délka 220 mm	3
Hliníkový profil 2020 délky 85 mm	3
Spojka držáku tiskové podložky	3
Spojka horní části rámu	6
Spojka rámu B	4
Spojka rámu A pro vypínač	1
Spojka rámu B pro vypínač	1
Prostřední spojka základny	1
Noha tiskárny	3
Výztuž rámu A	5
Výztuž rámu B	5
Matice M5 do T drážky	84
Šroub M5 se zápustnou hlavou délky 8 mm	72
Šroub M5 s válcovou hlavou délky 20 mm	18
Šroub M5 s válcovou hlavou délky 30 mm	12

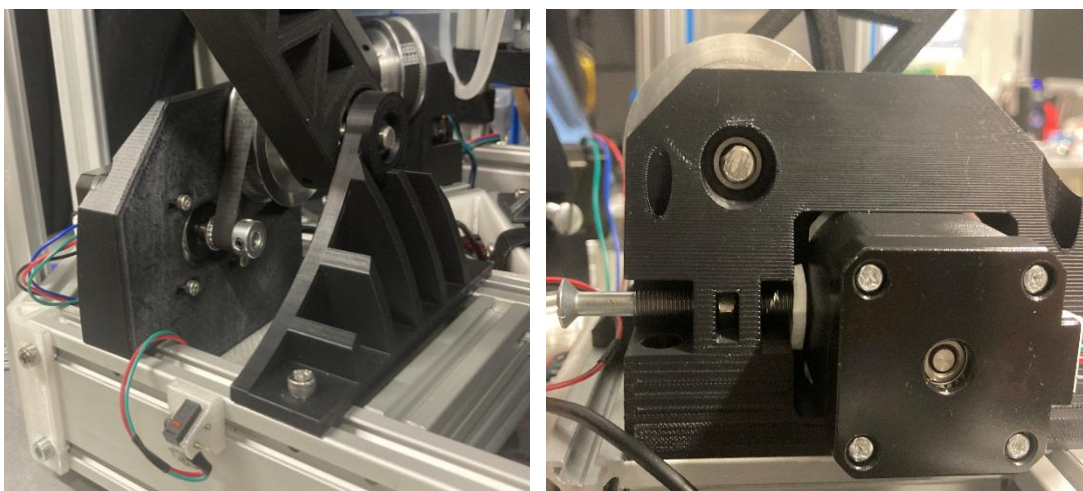
2.1.2 Návrh pohonů ramen

Jak již bylo v kapitole 1.4.2 u pohonů DeltaBotů zmíněno, při použití standartních krokových motorů NEMA17, nemají tyto motory samy o sobě dostatečný krouticí moment (sílu), aby mohly pohnout rameny, na kterých leží celá váha tiskové hlavy včetně vzpěr kloubových spojů a spojovacích prvků. Proto je nutné nějak zajistit větší sílu pohonů. Jednou z možností je použití větších, a tudíž i silnějších motorů. Větší motory jsou ovšem dražší a potřebují větší příkon. Druhou možností je použití mechanického převodu ke snížení rychlosti a zvýšení kroutícího momentu pohonu [44]. Je spousta různých typů mech. převodů.

Pro tuto tiskárnu byl původně navrhován typ cykloidální převodovky. Bohužel se autorovi nepodařilo včas sestavit a doladit cykloidní převod, který byl navrhován převážně z 3D tištěných částí.

Proto byl pro stavbu FDM 3D tiskárny typu DeltaBot zvolen řemenový převod. Konkrétně byla použita sestava skládající se z krokového motoru NEMA17 s krokem $0,9^\circ$, řemenice (16 zubů), řemenice (80 zubů), řemene o šířce 10 mm a délce 200 mm, hřídeli o průměru 8 mm a délce 65 mm a dvou plastových držáků pro uchycení celého převodu.

Celkový převodní poměr potom činí 5:1. Toto zpřevodování by, vzhledem ke zvoleným parametrům konstrukčních částí, mělo pro tuto tiskárnu stačit. Již zmíněné plastové držáky jsou vytištěny z materiálu ASA pro zajištění pevnosti a stability (viz obr. 21).



Obrázek 21: Znáznornění převodového systému pro pohon ramen

2.1.3 Klouby

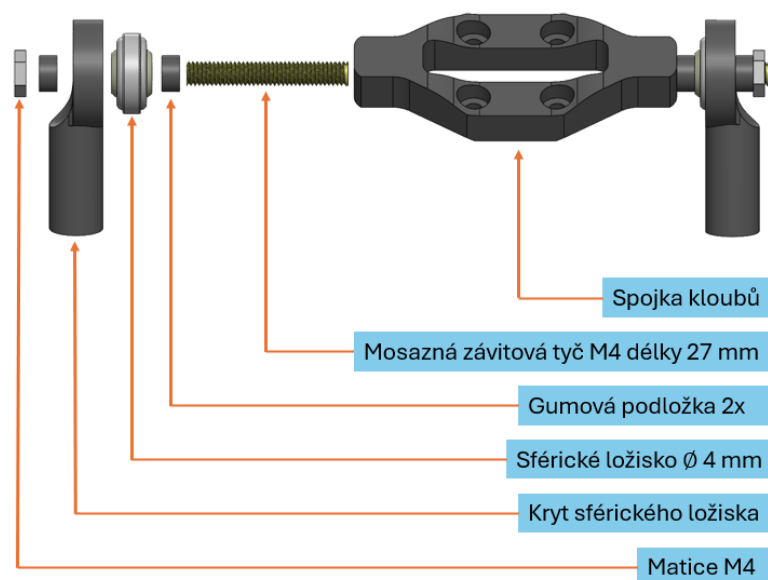
Jak již bylo zmíněno, aby tiskárna mohla tisknout co nejrychleji, musí mít všechny části pohyblivé konstrukce co nejmenší hmotnost. Toto se vztahuje především na ramena a vzpěry a koncovou platformu.

Jedním z důležitých konstrukčních prvků Rotační delty jsou kloubové spoje, které pohyblivě spojují koncovou platformu se vzpěrami a vzpěry s rameny. Na kloubový spoj jsou kladeny nároky jako: nízká hmotnost, malé opotřebení, dlouhá životnost a velký úhlový rozsah [45]. Právě úhlový rozsah kloubového spoje je důležitým parametrem u

tohoto typu konstrukce 3D tiskárny. Čím bude uhlový rozsah spoje větší, tím větší bude pracovní prostor přístroje, v tomto případě tiskárny. Při stavbě konstrukcí typu DeltaBot se běžně využívají kulové klouby (ball joints), které mají tři stupně volnosti. Standardní kulové klouby se vyrábí rozsahem přibližně $\pm 15^\circ$ až $\pm 18^\circ$.

Při návrhu konstrukce této tiskárny typu DeltaBot byly použity autorem upravené sférické klouby (viz obr. 22). Toto řešení bylo zvoleno, právě z důvodu odlehčení celkové pohybové části konstrukce, ale především koncové platformy.

Navržený kloubový spoj se skládá převážně ze 3D tištěných částí, malých sférických ložisek a mosazných závitových tyček. Celková sestava dvou kloubů, která je vidět na obrázku 20, váží 25 g. Tiskárna celkově využívá 6 párů kloubových spojů.



Obrázek 22: Ukázka sestavy dvou kloubových spojů

2.1.4 Ramena

Při návrhu ramen byl nejprve zvolen materiál PETG, z něhož bylo v jednom kuse vytištěno první testovací rameno. Vzhledem k použitému materiálu muselo rameno být rozměrnější, aby se nekroutilo a nevnašelo tak do pohybu chybu. Toto ovšem mělo za následek, že rameno vážilo přibližně 100g a bylo složitější ho připevnit.

Z tohoto důvodu bylo navrženo druhé rameno z kompozitního materiálu. Ramena, stejně jako spojky kloubů, jsou vytištěna na 3D tiskárně z materiálu PA-CF, díky čemuž jsou velmi pevná a je relativně lehká. K upevnění ramena k jeho pohonu (výstupní hřídeli

převodovky) byla použita kovová přírubová spojka s vnitřní průměrem 8 mm (viz obr. 23). Sestavené rameno potom váží přibližně 42 g.



Obrázek 23: Ramena vytištěná z PA-CF s kovovou přírubovou spojkou

2.1.5 Vzpěry

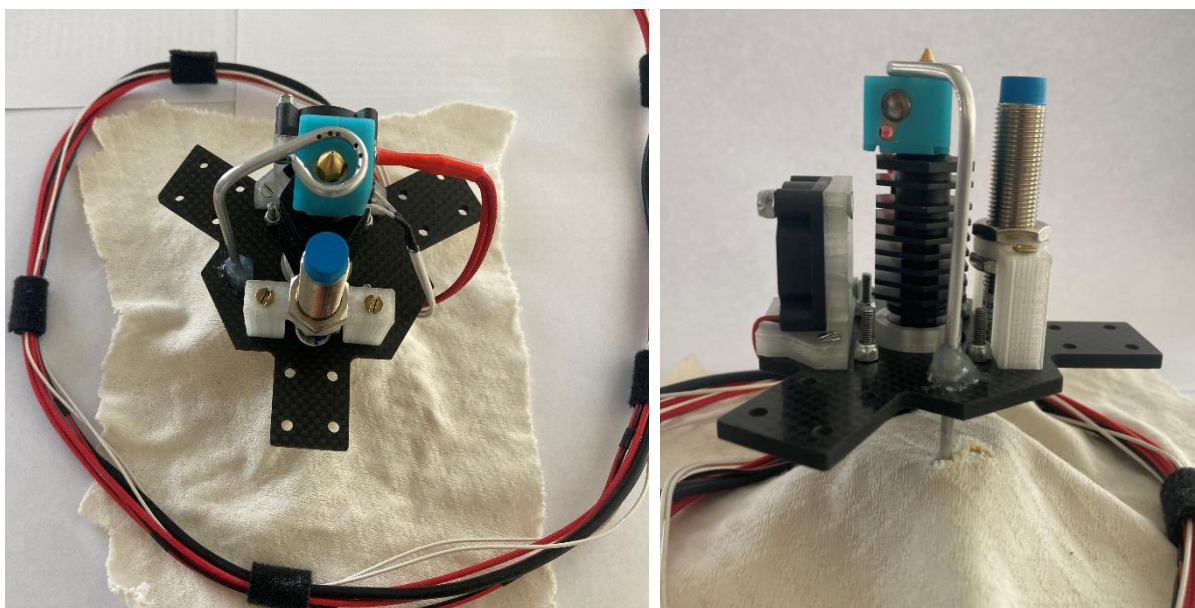
Vzpěry byly realizovány jako uhlíkové trubičky o vnitřním průměru 4mm, vnějších průměru 6mm a délce 245mm. Tyto uhlíkové trubičky se ukázaly jako dobrým řešením, jelikož zajišťují nejen dostatečnou pevnost, ale i malou hmotnost vzpěr. Pro kompenzaci vůle použitých sférických ložisek a vibrační tiskárny jsou na každé straně sestavy (viz obr. 24) umístěny gumičky pro stažení vzpěr k sobě. Vzpěry jsou k pouzdrům ložisek připevněny pomocí mosazných tyček a epoxidového lepidla. Soustava, zobrazená na obrázku 22 váží přibližně 61 g.



Obrázek 24: Sestava paralelogramu skládající se ze vzpěr a kloubů

2.1.6 Koncová platforma

Stejně jako ramena, vzpěry nebo klouby je koncová platforma důležitou částí této tiskárny. Jsou na ní umístěny komponenty: 3010 větráček pro aktivní chlazení chladiče coldendu, bowdenový extruder, indukční senzor (CHE12-4NA-A710-5V) pro kalibraci tiskové podložky a hliníková trubička, která přivádí vzduch z kompresoru pro chlazení do místa nanášeného materiálu (viz obr. 25). Mimo to, jak již bylo v kapitole 1.4.2 řečeno, jsou na platformě umístěny části kloubů pro spojení vzpěr s platformou. Jak jde vidět, na platformě je spousta součástí a při velkých zrychleních by hmotnost těchto komponent mohla způsobovat prohýbání platformy. Z tohoto důvodu byla finální verze platformy vyrobena, podobně jako ramena, z uhlíkové kompozitní desky. Nejprve byl vodním paprskem vyříznut obrys platformy a díra pro uchycení extruderu. Použitý vodní paprsek nebyl schopen vyřezávat otvory o průměru menším než 5 mm, proto byly otvory pro šrouby M3 vyvrtány ručně.

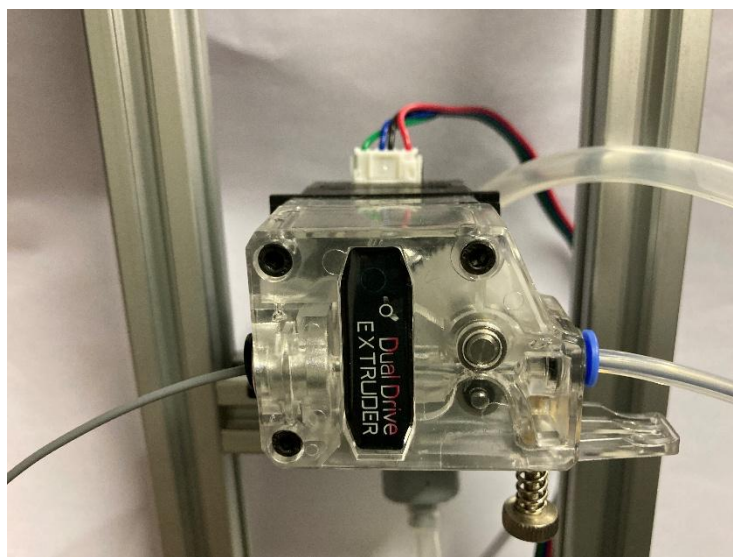


Obrázek 25: Osazená koncová platforma

2.1.7 Extruder

První část extruderu byla realizována malým krokovým motorem NEMA17, umístěným dole na základně tiskárny, s malou převodovkou 3:1 (viz obr. 26) (BMG Dual

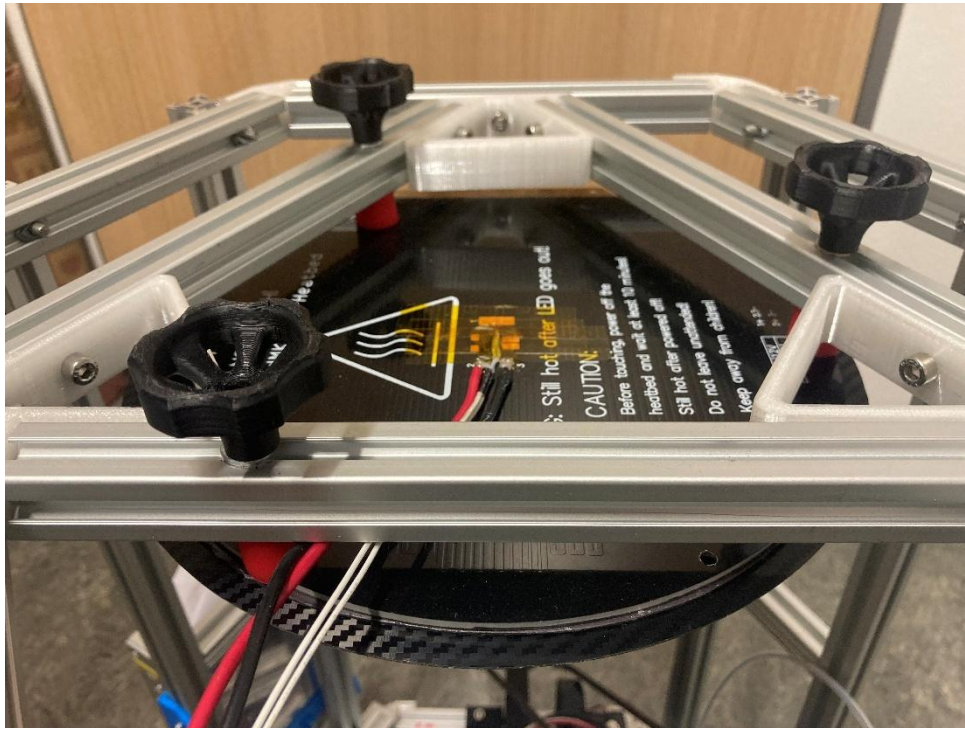
Drive extruder), dále standardní bowdenovou trubičkou, která vede filament do druhé části extruderu umístěného na koncové platformě. Druhá část extruderu (viz obr. 25) se skládá ze spojky, která spojuje bowden od krokového motoru s vysokoteplotním bowdenem přivedeným skrz chladič a heatbreak až k heatbloku, tím se zajistí přesná retrakce filamentu během tisku. Dále se druhá část extruderu skládá ze 40W topného tělesa, termistoru NTC 100K a mosazné trysky. Kvůli použití nepřímého extruderu, není dost dobře možné na této tiskárně tisknout součásti z flexibilních materiálů, což je jednou z nevýhod této konstrukce.



Obrázek 26: Ukázka části extruderu s převodovkou 3:1

2.1.8 Tisková podložka

Je nezbytné, aby byla tisková podložka dobře a stabilně uchycena ke konstrukci. Použita byla hliníková vyhřívaná deska na 24 V o průměru 220 mm. Deska je upevněna k horní části rámu pomocí tří šroubů M4. Pro ruční kalibraci podložky byla vytištěna tři kolečka. Pro zapření vyhřívané desky od rámu tiskárny byly použity silikonové podložky, které slouží jako pružiny pro manuální kalibraci. Na horní straně desky jsou ke kontaktům připojeny napájecí vodiče a kaptonovou páskou je na desce umístěn termistor NTC 100K (viz obr. 27).



Obrázek 27: Vyhřívaná tisková podložka připevněná k horní části rámu tiskárny

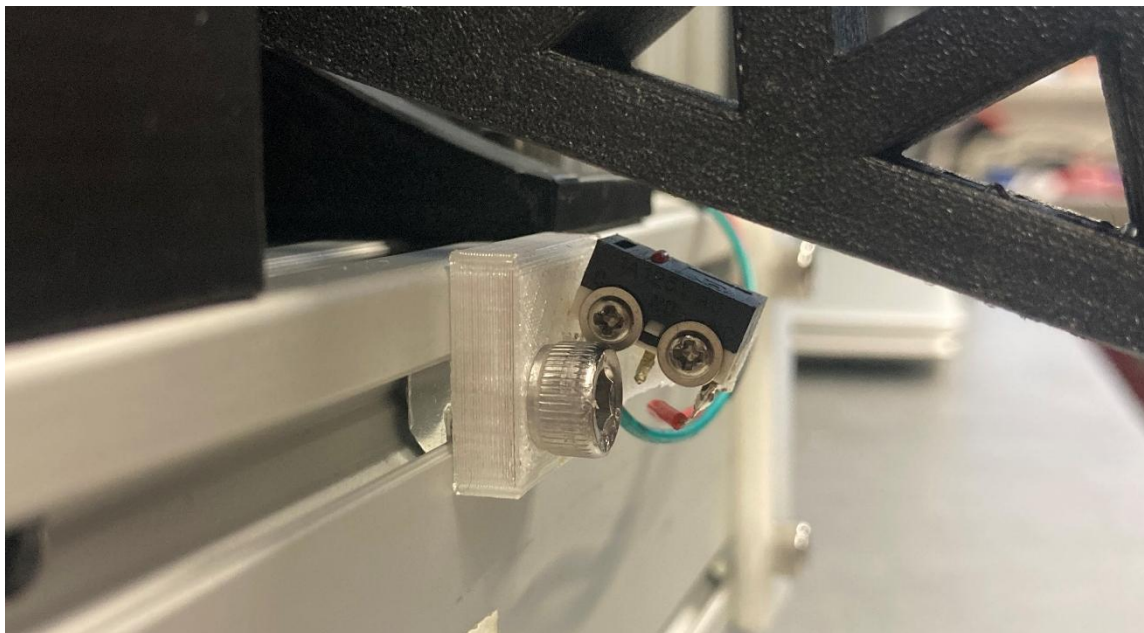
2.2 Elektronika a Software

Jak již bylo řečeno, 3D tiskárny typu Rotační delta nejsou moc rozšířené. Pokud se nad nimi ovšem člověk zamyslí, jsou konstrukčně velmi podobné lineárním deltám. To samé také platí pro jejich složení z pohledu elektronických komponent.

2.2.1 Snímání koncové polohy

Při pohledu na kinematiku tohoto typu tiskárny, i přesto, že se o ní zatím moc nepíše, je jasné, že nemalou otázkou je zde řešení snímání koncové polohy ramen. Existuje mnoho různých metod pro zjišťování koncových poloh u 3D tiskáren, např. snímání pomocí mechanických spínačů, optických závor, induktivních senzorů a dalších. Pro správnou funkci a přepočít souřadnic je nutné co nejpřesněji znát úhel, který svírají ramena tiskárny

Při návrhu byly pro zjišťování koncové polohy použity mikrospínače, protože jsou levné, při správném umístění docela přesné a snadno se upevňují [47][48]. Spínače jsou umístěny na plastových spojkách, které jsou umístěny na stěnách základny tak, aby se jejich spodní strana ramen, při hledání koncové polohy (homing), dotknula (viz obr. 28).

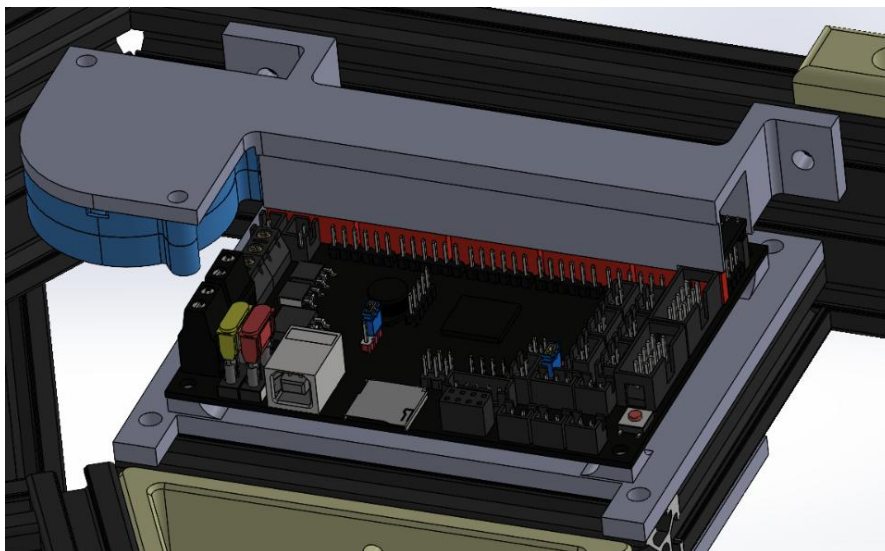


Obrázek 28: Ukázka uchycení koncového mikrospínače

2.2.2 Řídící elektronika a napájení

Dalším krokem byl výběr a propojení elektronických komponent tiskárny. Kvůli poměrně jednoduchému složení komponent byl pro napájení použit 24 V zdroj o výkonu 300 W. Tento zdroj o rozměrech 60x190x35 mm je pomocí 3D tištěného upevňovacího dílu umístěn pod základnou tiskárny. Pod základnou je dále umístěna DIN lišta s jednou rychlosvorkou pro rozvod výstupního napětí zdroje do ostatních komponent. Těmito komponenty jsou: 32bit základní deska BIGTREETECH SKR V1.4 TURBO osazena čtyřmi drivery TMC2209, Raspberry Pi (dále jen RPi) 4B s aktivním chlazením, snižující měnič napětí 24/5 V pro napájení Raspberry Pi a MOSFET modul pro PWM řízení vzduchové pumpy. Pro komunikaci mezi RPi a základní deskou slouží USB-B kabel. Chlazení driverů je zajištěno tunelem, vytištěným z materiálu ASA, kvůli tepelné odolnosti), do kterého vhání vzduch 24 V radiální větráček 5015 (viz obr. 29).

Navrhovaná tiskárna je dále vybavena LCD displejem Mini 12864 RGB a indukčním senzorem pro kalibraci tiskové podložky tiskárny.



Obrázek 29: Chlazení driverů na základní desce

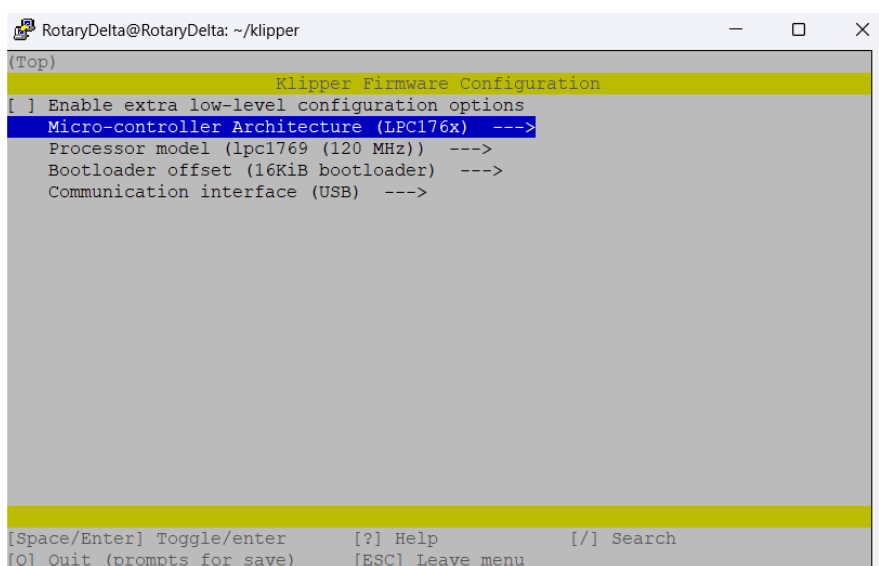
2.2.3 Firmware

Jedním z posledních kroků návrhu byl výběr ovládání tiskárny. Dnes již existuje spousta různých firmwarů i ovládacích prostředí. Pro svou jednoduchost a efektivitu byl použit Klipper firmware [49]. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.5, tradičně se o funkci tiskárny stará základní deska, která ji řídí a provádí i veškeré výpočty pro pohyby. Klipper funguje na principu, že základní deska se stará o ovládání pohonů a snímání hodnot z teplotních i jiných senzorů a samotné výpočty týkající se kinematiky dané tiskárny obstarává mnohem výkonnější počítač, jako je Raspberry Pi. Zde jsou některé výhody klipperu: velmi dobrá kvalita tisku, použití vlastních doplňkových modulů (makra) a jednoduchost úpravy aktuálního firmwaru.

S tiskárnou s klipperem se dá poté komunikovat pomocí přímo pomocí dotykového nebo LCD displeje anebo přes počítače pomocí webového rozhraní jako je např. Fluidd nebo Mainsail. Dále následuje postup nahrání, oživení a úprava firmwaru tiskárny.

Nejprve je v programu Raspberry Pi Imager „CHOOSE OS“ => „Other specific-purpose OS“ => „3D printing“ => „Mainsail OS“ => „Mainsail OS 1.3.2 – Raspberry Pi (32-bit)“, vybrán požadovaný operační systém. Dále je v konfiguracích nastaveno název a heslo použitého RPi, název a heslo pro připojení k síti a povolení SSH. Pak je OS nahrán na vybranou SD kartu a ta umístěna do RPi. Nakonec je RPi zapnuto a může se přejít k další části.

Ted', když RPi slouží jako hlavní výpočetní jednotka je nutné zajistit, aby s ní dokázala komunikovat také základní deska. Pro tento účel je použit program PuTTY, který slouží jako terminál pro komunikaci s RPi pomocí IP adresy (kterou je možné zjistit např. pomocí programu Advanced IP Scanner). Po zadání přihlašovacího jména a hesla je nutné se dostat do konfiguračního menu pro nastavení parametrů použité základní desky. Nejdříve je do terminálu napsán příkaz `cd ~/klipper/` a poté `make menuconfig`. Pro vybranou desku, zmíněnou v předchozí kapitole, byly vybrány parametry ukázané na obrázku 30. Stisknutím kláves Q a následně Y je konfigurace dokončena a nastavené parametry uloženy.



Obrázek 30: Konfigurační okno pro desku BTT V1.4 Turbo

Dále je nutné připojit se pomocí programu WinSCP k RPi a stáhnout z něj soubor s názvem „klipper.bin“. Tento soubor je poté nahrán do základní desky. Po propojení základní desky s RPi pomocí USB-B kabelu je možné připojit se do webového rozhraní Mainsail a začít konfigurovat samotné parametry tiskárny [50].

Zatím nahraný klipper neví, jakou tiskárnu bude ovládat. Tato informace se mu musí sdělit přidáním souboru „printer.cfg“. Tento soubor obsahuje typ oživované tiskárny, mapování vývodů základní desky a definici parametrů, důležitých pro kinematiku tiskárny.

3 KALIBRACE A TESTOVÁNÍ

V průběhu ožívování a doladování této tiskárny byly postupně prováděny testovací tisky. Jednalo se převážně o malé krychle, válce a objekty s nulovou výplní na otestování přesnosti tisku, vlivu vibrací konstrukce na tisk, správného nastavení extruderu a dalších ukazatelů kvality tisku.

3.1.1 Kalibrace rotační delty

Před začátkem tisku je nutné tiskárnu zkalibrovat, jelikož do firmwaru zadané délky ramen, vzpěr nebo pozice domácích poloh se občas nepotkávají se skutečností. Jako první se v `printer.cfg` nastaví hodnoty proměnných `shoulder_radius`, `shoulder_height` a proměnné `position_endstop`. V ideálním případě by všechna tři ramena měla tyto parametry stejné. V realitě se ovšem tyto parametry mohou lehce lišit a je potřeba je doladit.

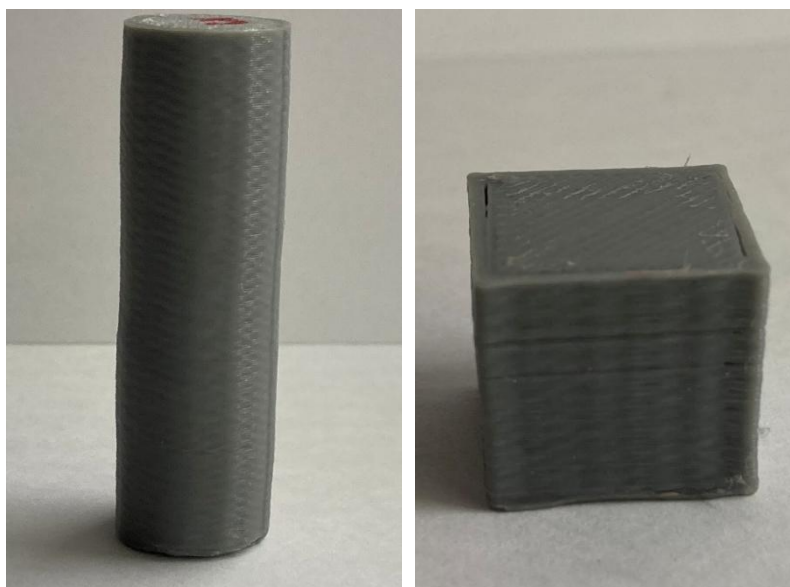
V klipperu k tomuto účelu slouží příkaz `DELTA_CALIBRATE`. Po zavolání tohoto příkazu se tisková hlava zvedne nahoru, k tiskové podložce a pomocí indukčního senzoru 6x, v různých místech, změří vzdálenost trysky od povrchu podložky. Jednotlivé měřené body jsou pravidelně rozmístěny na kalibrační kružnici, která je nastavena v souboru `printer.cfg` proměnou s názvem `delta_radius`. U této tiskárny byl zvolen kalibrační poloměr 60 mm [51].

Po počáteční kalibraci, parametrů specifických pro tiskárnu Rotační delta, je na řadě obecně známá kalibrace tiskové podložky. K tomuto slouží příkaz `BED_MESH_CALIBRATE`, který na tiskové ploše změří 13 různých míst a hodnoty uloží aktuálního profilu tiskové plochy tiskárny.

3.1.2 Tisk s planetární převodovkou

Pro tuto tiskárnu byly nejprve, z důvodu jednoduché montáže a přijatelné ceny, zakoupeny planetární převodovky pro motory NEMA17 s převodním poměrem 5,18:1.

Tyto převodovky se ukázaly, jako nevyhovující řešení. Kvůli své velké vůli (anglicky - backlash) způsobovaly při tisku vibrace, které se potom na tištěných objektech projevovaly jako opakující se zužování a rozšiřování tištěného předmětu. V době psaní této práce nebylo možné použít kompenzaci vůle, protože klipper tuto funkci ještě nepodporoval. Nekvalitní převodový systém ovšem nebyl jediným viníkem. Za nekonzistentní průběh tisku a zvláštní vzor povrchu předmětu (viz obr. 31) mohla také některá nekvalitní sférická ložiska, s velkou vůlí, která byla použita v kloubech. Tento testovací tisk měl ovšem jeden pozitivní výstup a to, že během tisku předměty velice dobře držely na vyhřívané podložce a neměly tendenci se odlepovat. Tisk probíhal při rychlosti 50 mm/s a nastaveným maximálním zrychlením pouze 300 mm/s^2 , což není mnoho.



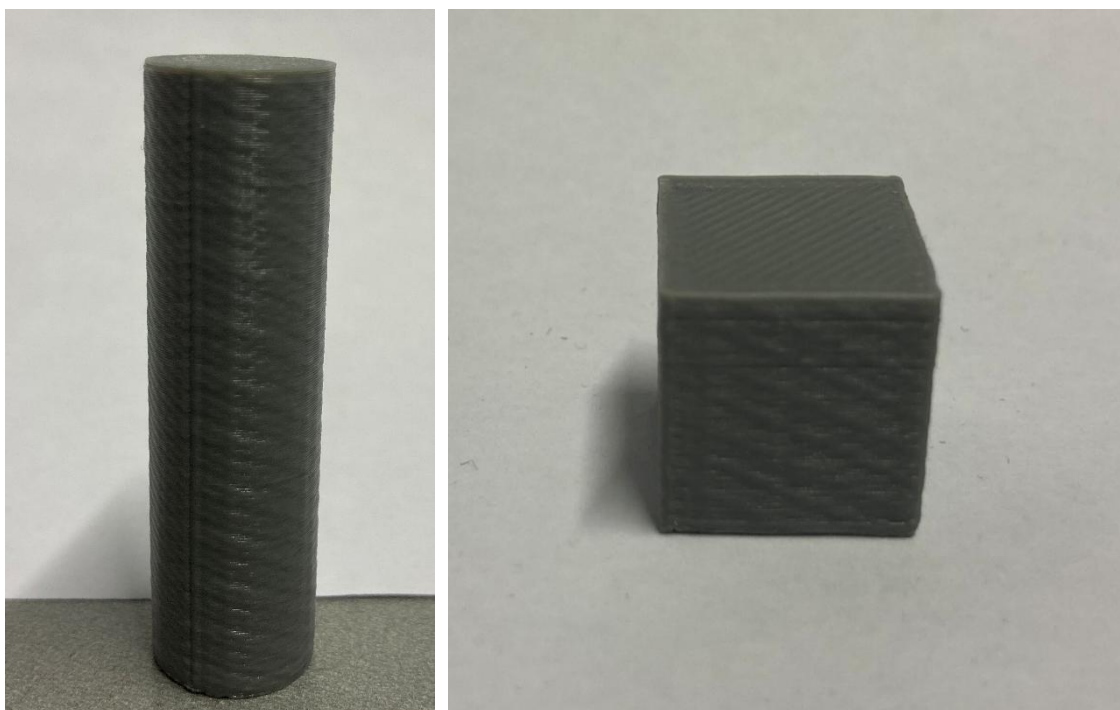
Obrázek 31: První výtisky na oživené tiskárně

3.1.3 Tisk s řemenovým převodem

Druhý set testovacích tisků proběhl po namontování již zmíněných řemenových převodovek. Byly použity krokové motory NEMA17 délky 48 mm s krokem 0,9° pro větší přesnost. Také byla nahrazena vadná sférická ložiska z minulého testování. Díky těmto změnám byly výtisky o něco kvalitnější. Jako první byl vytištěn válec. Na rozdíl

od minulého tisku byl tentokrát průměr válce v celé jeho výšce víceméně stejný a nedocházelo ke střídavému rozšiřování ani zužování, přičemž jeho požadovaný průměr byl 15 mm a skutečný asi 14,75 mm.

Dále bylo možné na horních vrstvách tištěných předmětů pozorovat prázdná místa, kde chybí materiál. Toto je známka nesprávně nastaveného extruderu. Tato chyba se ovšem snadno opravila správným nastavením parametrů extruderu tiskárny a ve sliceru. Dále byla vytištěna krychle 15x15x15 mm s výplní 20 % rychlostí 40 mm/s. Kvalita krychle je o něco lepší než v předchozím případě, nicméně stejně, jako u válce, lze na jejím povrchu pozorovat artefakty (viz obr. 32) způsobené vibracemi tiskárny.



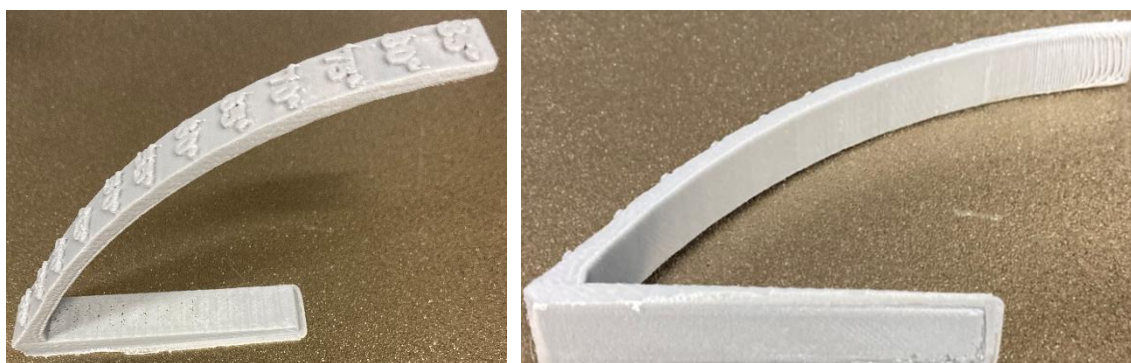
Obrázek 32: Ukázka testovacích tisků po výměně převodového systému

3.1.4 Tisk převisů

Dalším, neméně důležitým, parametrem tiskárny je to, jak dobře dokáže tisknout převisy (anglicky – overhang). K tomuto měření byl použit jeden z veřejně dostupných STL modelů, které pro měření převisů běžně slouží. Rychlost tisku byla zadána na 90 mm/s a zrychlení na 2 000 mm/s². Jak je vidět z obrázku 33, při správném nastavení extruderu a chlazení vrstev, tiskárna bez problému zvládá tisk převisů do 80°. Zhoršení

kvality je poznat až okolo 85°, přičemž i při této hodnotě dokázala tiskárna v pořádku danou část vytisknout.

Při tisku bylo pozorováno, že za schopnost dobrého tisku převisů může typ použitého chlazení. Jak již bylo řečeno, tisk probíhá vzhůru nohama čili extrudovaný materiál má tendenci padat dolů. Brání mu v tom však silný proud vzduchu od kompresoru, který způsobuje, že vytlačený materiál je lehce nadnášen a okamžitě chlazen.



Obrázek 33: Test tisku převisů

Jako poslední test převisů byl vytištěn model dvojité šroubovice. Na začátku byla rychlost vzduchu nastavena na 100 %. Postupně byla zmenšována, až se dosáhlo ideální úrovně chlazení. Nakonec pro tuto tiskárnu byla stanovena ideální úroveň chlazení 40 % při teplotě tisku 210 °C a rychlosti 50 mm/s. Na obrázku 34 je červeným kruhem označeno místo, kde příliš silný proud chladícího vzduchu způsobil od fouknutí první cesty tištěného převisu. K tisku byl použit materiál PLA.



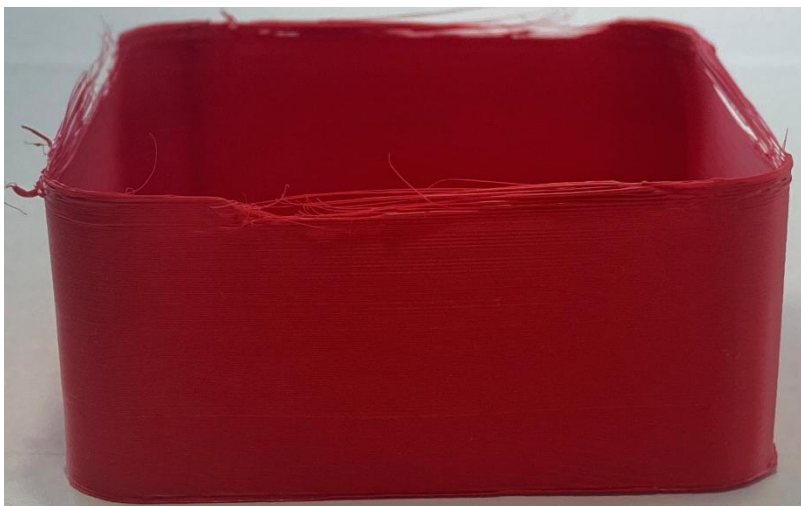
Obrázek 34: Ukázka testu chlazení a tisku převisů u dvojité šroubovice

3.1.5 Test maximální rychlosti tisku

Důležitým parametrem při výběru nebo návrhu tiskárny je její rychlost. Bylo již zmíněno, že Rotační delta roboti jsou velmi rychlí. Kromě toho, lineární delta tiskárny jsou známy právě svou rychlostí tisku [52].

Po ladění tiskárny byl, pro zjištění maximální rychlosti tisku a schopnosti motorů držet krok, několikrát vytištěn STL model kvádrů o rozměrech 80x80x100 mm se zaoblenými stěnami. Ve sliceru byl model upraven tak, aby se po každých 25 vrstvách zvýšila rychlost tisku o 50 mm/s ze základních 100 mm/s a flow (množství extrudovaného materiálu) o 5 % ze základních 100 %. Model byl tištěn v modu vázy (tiskne se jen jedna kontinuální cesta stěny předmětu bez výplně a horních vrstev). Pro tisk byl použit materiál ASA.

Tisk probíhal v pořádku při zrychlení 5 000 mm/s^2 do rychlosti 200 mm/s (viz obr. 35).



Obrázek 35: Ukázka zkoušky rychlosti tisku

Během všech šesti pokusů, při přechodu na tisk rychlostí 250 mm/s, došlo k poškození filamentu v extruderu, který se následně zasekl (viz obr. 36).



Obrázek 36: Ožvýkaný filament z extruderu

Následně byla provedena zkouška maximální rychlosti tiskárny na sucho (stejný g-kód, jen bez filamentu). Počáteční rychlost byla 100 mm/s, přičemž krok zvyšování rychlosti byl 50 mm/s. Tiskárna byla testována do hodnoty 1 000 mm/s, přičemž dokázala pohybovat tiskovou hlavou i při rychlosti kolem 930 mm/s při zrychlení $20\,000\text{ mm/s}^2$. Je ovšem nutné poznamenat, že při těchto hodnotách docházelo k výrazným vibracím rámu tiskárny. Výměnou stávajícího extruderu a vyztužením rámu by teoreticky bylo možné dosáhnout i tiskových rychlostí vyšších, než 200 mm/s.

3.1.6 Test maximálního zrychlení

Zrychlení souvisí s rychlostí tiskárny. Udává, za jak dlouho je možné dosáhnout požadované rychlosti. Například, pokud je trasa tisku jedné cesty dostatečně dlouhá, není potřeba velké zrychlení pro dosažení žádané rychlosti. U malých vzdáleností se ale může stát, že tiskárna nestihne zrychlit na požadovanou rychlost, což může výrazně zpomalovat tisk [53].

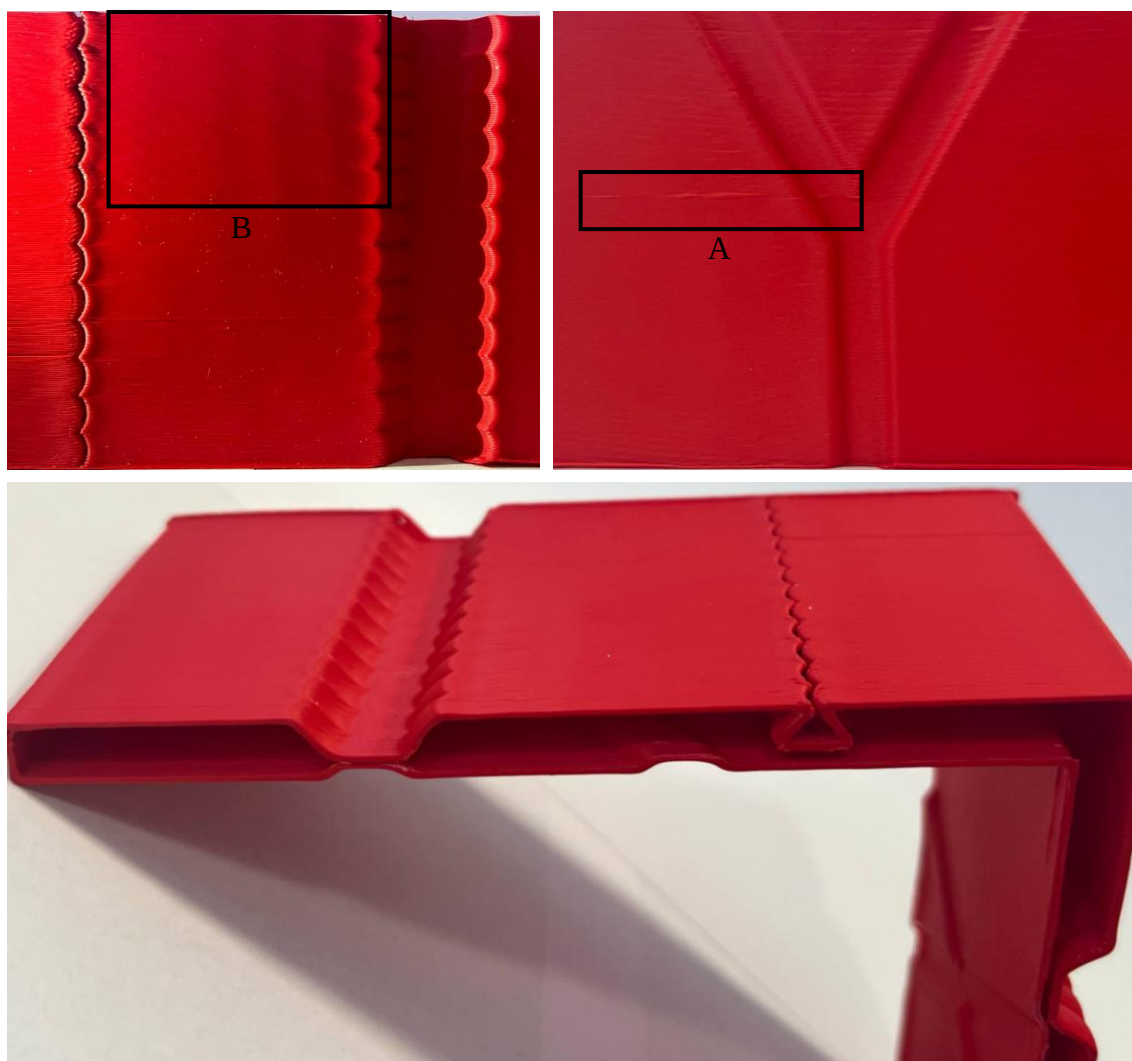
Zrychlení ovšem nesouvisí pouze s celkovou rychlostí tisku, ale i s vibracemi, které pohybový systém způsobuje při velkých změnách rychlosti. Test zrychlení této tiskárny byl již částečně proveden v předchozí kapitole, kde se musela nastavit hodnota okolo $20\,000\text{ mm/s}^2$, aby se rychlost tisku na sucho dostala na hodnotu 930 mm/s.

Jak již ale bylo zmíněno, při těchto hodnotách se rám poměrně třepal. Proto hranice maximálního zrychlení pro tuto tiskárnu byla určena podle toho, při které hodnotě je kvalita tisku ještě přijatelná. Proto byla provedena zkouška pro menší hodnoty zrychlení pomocí modelu Ringing_tower [54], který jinak slouží pro ruční měření rezonančních frekvencí v osách X a Y.

Podle zjištěné hodnoty maximální rychlosti 200 mm/s, byla pro tuto zkoušku vybrána rychlost tisku 150 mm/s, jako kompromis mezi rychlým tiskem, který je pro tento test klíčový, a správnou funkcí extruderu bez zadrhávání filamentu. Podle instrukcí [54] bylo počáteční zrychlení nastaveno na $1\,500\text{ mm/s}^2$ s krokem 500 mm/s^2 až do hodnoty $7\,000\text{ mm/s}^2$.

Vytištěný objekt vypadá na první pohled, při zanedbání chyb extruderu (viz obr. 37 A), docela dobře. Při bližším pohledu na stěny je vidět ringing (viz obr. 37 B) (chyba tisku, kdy se na povrchu výtisku objevují nechtěné stopy nebo artefakty, které kopírují detaily nebo ostré hrany modelu). Podle vzhledu (viz obr. 37) byla odhadem stanovena

maximální hodnota zrychlení na $5\,000\text{ mm/s}^2$. Tuto hodnotu částečně potvrzuje to, že výztuže rámu a jiné předměty byly tištěny při stejném zrychlení a při překročení této hodnoty se jejich kvalita (obzvlášť tisk detailů) začala výrazně zhoršovat, jelikož se výrazně začal projevovat ringing.

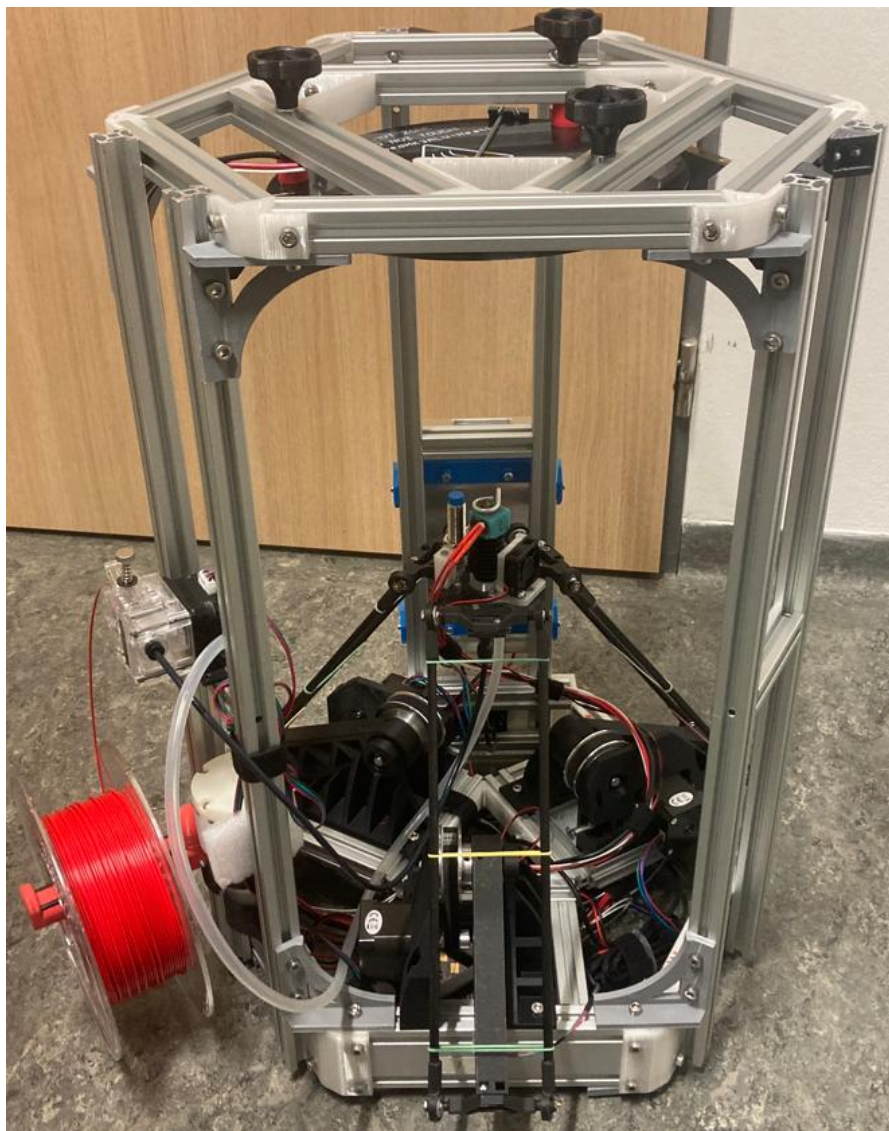


Obrázek 37: Ukázka zachycující vliv zrychlení na kvalitu tisku (A – chyba extruze, B – ringing)

4 ROZPOČET

Tato kapitola se zabývá materiálovým rozpočtem a obsahuje přehled elektronických součástek použitého systému tiskárny. Ceny uvedené v tabulce 3 jsou orientační a mohou se lišit v závislosti na zvoleném dodavateli. Do celkového rozpočtu nejsou zahrnuty náklady na práci spojenou s návrhem a opakovanými úpravami konstrukce, ani práce při montáži, uvedení do provozu a kalibraci zařízení.

S ohledem na tyto skutečnosti byla výsledná cena tiskárny odhadnuta přibližně na 13 000 Kč. Výsledná podoba tiskárny je zobrazena na obrázku 38.



Obrázek 38: Výsledná podoba kompletního návrhu tiskárny typu Rotační delta

Tabulka 3: Celkový přibližný rozpočet tiskárny

Název	množství [-]	cena [Kč]
Rám		
Hliníkové profily	-	1600
3D tištěné části	-	300
Šroubky, matice a podložky	-	800
Ohebná magnetická tisková PEI podložka 250 mm	1	330
Pohybový systém	-	-
3D tištěné části	-	320
Uhlíková trubička Ø 6mm délky 245 mm	6	350
Přírubová spojka (viz obr. 23)	3	250
Sférické ložisko Ø 4 mm	12	420
Sestava řemenové převodovky 5:1	3	330
Výstupní hřídel Ø 8 mm délky 65 mm	3	65
Kuličkové ložisko ZVL 608 2RS	6	158
Elektronika	-	-
Základní deska BTT V1.4 Turbo	-	850
Ovladač (driver) krokového motoru TMC2209	4	600
DC měnič 24 V / 5V pro Raspberry Pi	1	70
PWM měnič pro kompresor	1	50
Raspberry Pi 3B	1	1000
Kompresor 24 V	1	340
USB A / USB C	1	340
USB A / USB B	1	150
Zdroj 24 V, 350 W	1	770
Radiální větráček 5010 24V	1	90
Krokový motor NEMA17 48 mm, 0,9°	3	1500
Krokový motor NEMA17 23 mm, 1,8°	1	250
Extruder BMG Dual Drive	1	500
Vyhřívaná tisková podložka Ø 220 mm	1	720
Termistor NTC 100K	2	50
LCD display MINI12864 RGB	1	500
Elektronika koncové platformy	-	-
Topné těleso 24 V, 40 W	1	70
Axiální větráček 24 V	1	70
Indukční senzor CHE12-4NA-A710-5V	1	100
Chladič V6	1	75
Heatblock MK8	1	60
Celkem	-	13 078 Kč

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zaměřila na podrobný popis technologie FDM 3D tisku, včetně jejích výhod a nevýhod ve srovnání s alternativními metodami 3D tisku. Dále se věnovala rozboru hlavních konstrukčních částí FDM tiskáren a jejich porovnání. Zvláštní pozornost byla věnována konstrukčnímu řešení Rotační delta tiskárny (DeltaBot), včetně podrobného popisu jejích klíčových komponent.

Součástí práce byl také návrh jednotlivých konstrukčních částí tiskárny, její sestavení a následná kalibrace. Pro zvýšení stability byl rám navržen tak, aby základna byla umístěna co nejnižší u země, zatímco tisková plocha se nachází nahoře (viz obr. 20).

Výsledná tiskárna je vybavena magnetickou tiskovou podložkou o průměru 220 mm, bowdenovým extruderem s převodem 3:1, kompresorem pro efektivní chlazení vrstev a LCD displejem. Při maximální výšce tisku přibližně 140 mm činí celkový tiskový objem asi 5,3 litru, přičemž tvar tiskového prostoru odpovídá válci.

Hmotnosti jednotlivých konstrukčních prvků jsou uvedeny v příslušných kapitolách. Za klíčovou lze považovat hmotnost koncové platformy, která po několika iteracích činí přibližně 210 g. Autor se domnívá, že by bylo možné tuto část dále odlehčit, například nahrazením těžkého kovového indukčního senzoru lehčí kalibrační sondou s mikrosplínem. Tato úprava by mohla přispět k dosažení vyššího zrychlení tiskárny.

V závěru práce bylo provedeno testování tisku. Ze zkušebních výtisků vyplynulo, že maximální dosažitelná rychlost tisku činí přibližně 200 mm/s, přičemž maximální zjištěná rychlost pohybu tiskové hlavy dosahuje až 930 mm/s. Maximální zrychlení, při kterém zůstává kvalita výtisků na přijatelné úrovni, bylo stanoveno na přibližně 5 000 mm/s², a to s ohledem na vibrace tiskárny. Mezi přednosti konstrukce patří schopnost velmi dobře tisknout převisy, a to díky orientaci tisku „vzhůru nohama“ a efektivnímu chlazení pomocí kompresoru (viz obr. 33).

Tiskárna je primárně ovládána prostřednictvím webového rozhraní Mainsail, nicméně nabízí i možnost sledování a úpravy parametrů tisku pomocí LCD displeje. Za potenciální vylepšení lze považovat použití většího dotykového displeje pro zlepšení přehlednosti.

Celkové materiálové náklady činily přibližně 13 000 Kč; do této částky není započítána práce ani materiál spotřebovaný během návrhu a prototypování.

Výsledkem této práce je plně funkční 3D tiskárna typu rotační delta (viz obr. 38), která může sloužit nejen pro běžný tisk, ale i jako demonstrační model pro názorné vysvětlení kinematiky tohoto typu konstrukce. Autor se domnívá, že při využití kvalitních komponent a vylepšení konstrukčních dílů může tato tiskárna dosahovat rychlostí a zrychlení srovnatelných s dobrými lineárními deltami.

LITERATURA

- [1] STŘÍTESKÝ, Ondřej, Martin BACH a Josef PRŮŠA. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. [online] 2019. vyd. Praha: Prusa Research a.s., 2019 [vid. 2024-12-23]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/downloads/basics-of-3d-printing.pdf>
- [2] 3D Print Layer Separation: 8 Tips to Avoid Delamination. All3DP [online]. 14.únor 2024 [cit. 2024-12-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-print-delamination-tips-tricks-to-avoid-layer-separation/>
- [3] How Does The FDM 3D Printing Technology Work? - Manufactur3D [online]. 29. leden 2018 [cit. 2024-10-05]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/working-fdm-3d-printing-technology>
- [4] What are factors the quality of 3D printing rests upon? - 3dprintwise [online]. 8. prosinec 2017 [cit. 2024-10-06]. Dostupné z: <https://www.3dprintwise.com/3d-printing-quality>
- [5] Key factors that affect quality in 3D Printing – makenica [online]. 5. červen 2021 [cit. 2024-10-06]. Dostupné z: <https://makenica.com/3d-printing-quality/>
- [6] TOGGLEFRITZ. 3D Printer Frame Design | Togglefritz's Lair [online]. [cit. 2024-10-07]. Dostupné z: <https://togglefritz.com/3d-printer-frame-design/>
- [7] The Best Ender 3 (V2/Pro) Hot End Upgrades. All3DP [online]. 12. září 2024 [cit. 2024-12-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/ender-3-hot-end-what-to-consider-which-to-buy/>
- [8] ALEXANDRA. 3D Printer Extruder: Basic Buyer's Guide. BCN3D Technologies [online]. 7. červenec 2020 [cit. 2024-10-07]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/3d-printer-extruders-a-basic-guide/>
- [9] Direct Drive vs Bowden Extruder: The Differences. All3DP [online]. 27. červenec 2023 [cit. 2024-10-10]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>
- [10] Fused Deposition Modelling: The Advantages And Disadvantages | Prototol UK [online]. 21. říjen 2022 [cit. 2024-10-04]. Dostupné z: <https://prototaluk.com/blog/fused-deposition-modelling-advantages-and-disadvantages/>

- [11] Fused Deposition Modeling Advantages and Disadvantages. SyBridge Technologies [online]. 28. březen 2022 [cit. 2024-10-13]. Dostupné z: <https://sybridge.com/fused-deposition-modeling-advantages-and-disadvantages/>
- [12] The Best 3D Printer Settings for Perfect Prints. All3DP [online]. 7. červenec 2022 [cit. 2024-10-15] Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-slicer-settings-3d-printer/>
- [13] 3D Printer Slicer Software: The Ultimate Guide for Beginners. Medium [online]. 3. březen 2024 [cit. 2024-10-15] Dostupné z: <https://medium.com/@christian.thomsen/3d-printer-slicer-software-the-ultimate-guide-for-beginnersintroductionconclusion-a4afc3b7f8c1>
- [14] Aluminum Extrusions: What is it & What's the Process? QST-Corp [online]. 13. únor 2023 [cit. 2024-10-20] Dostupné z: <https://qst-corp.com/2023/02/13/aluminum-extrusions/>
- [15] RepRap. RepRap contributors [online]. 25. červen 2023 [cit. 2024-10-20] Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/RepRap>
- [16] 3D Printer Frame: What to Consider & Which to Buy. All3DP [online]. 28. únor 2019 [cit. 2024-10-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-frame-what-to-consider-and-which-to-buy/>
- [17] 3D Printer Thermistor: All You Need to Know. ALL3DP [online]. 4. srpen 2021 [cit. 2024-10-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-thermistor/>
- [18] Heated bed. RepRap contributors [online]. 12. listopad 2018 [cit. 2024-10-23] Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Heated_Bed
- [19] Types Of 3D Printer Bed | Choosing Tips. TheMechNinja [online]. 3. září 2021 [cit. 2024-10-23]. Dostupné z: <https://themechninja.com/09/types-of-3d-printer-bed-choosing-tips/>
- [20] 3D printer bed types explained. AzureFilm [online]. 6. září 2024 [cit. 2024-10-23]. Dostupné z: <https://azurefilm.com/2024/09/06/3d-printer-bed-types-explained/>
- [21] FLSun V400 Review: Klipper Delta Magic. All3D [online]. 10. září 2022 [cit. 2024-12-23]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/flsun-v400-review-3d-printer-specs/>
- [22] Why Do 3D Printers Use Stepper Motors? (We've Got The Answer). 3D Printscape [online]. [cit. 2024-10-30]. Dostupné z: <https://3dprintscape.com/why-do-3d-printers-use-stepper-motors/>

- [23] 3D Printer Stepper Motor: All You Need to Know. All3DP [online]. 10. březen 2022 [cit. 2024-10-30]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-stepper-motor-what-to-consider-and-which-to-choose-2/>
- [24] RICHTER, Alec. The Anatomy of a 3D Printer: Controller Boards. MatterHackers [online]. [cit. 2024-10-30]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/articles/3d-printer-anatomy-controller-boards>
- [25] 3D printer parts: Essential components and functions. AzureFilm [online]. 28. říjen 2023 [cit. 2024-10-30]. Dostupné z: <https://azurefilm.com/2023/10/28/3d-printer-parts-essential-components-and-functions/>
- [26] Creality V4.2.7 Silent Board: All You Need to Know. All3DP [online]. 20. únor 2022 [cit. 2024-12-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/creality-silent-board-ender-3/>
- [27] The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY & More. All3DP [online]. 8. červenec 2023 [cit. 2024-11-04]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
- [28] CoreXY 3D Printer: All You Need to Know. All3DP [online]. 1. červenec 2023 [cit. 2024-11-06]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/corexy-3d-printer-is-it-worth-buying/>
- [29] Delta geometry. RepRap contributors [online]. 15. říjen 2024 [cit. 2024-11-06]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Delta_geometry#Rotational_deltas_2
- [30] 3D Printers with Different Kinematics: Comparison, Advantages and Disadvantages. Top3Dshop [online]. 31. říjen 2019 [cit. 2024-11-06]. Dostupné z: <https://top3dshop.com/blog/3d-printer-kinematics-explained>
- [31] Workspace Analysis of Delta Robot Based on Forward Kinematics Solution. C. Liu, G. -H. Cao and Y. -Y. Qu. 2019 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS), Wuhan, China, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICRAS.2019.8808987 [online]. [cit. 2024-12-02]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8808987>
- [32] Delta Robot: Working Advantages and Applications. Smlease Design [cit. 2024-12-02]. Dostupné z: <https://www.smlease.com/entries/automation/delta-robot-working-advantages-applications/>

- [33] Rotary Delta Printer. MyMiniFactory [online]. 15. únor 2021 [cit. 2024-11-13]. Dostupné z: <https://www.myminifactory.com/object/3d-print-rotary-delta-printer-154247>
- [34] Design of 3DOF Delta Parallel Capture Robot with High Speed and Light Weight. JUN-LIN, Ma; YING, Liu; YING-KUN, Zhang a CUNMING, Hao [online]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, roč. 2188, č. 1. ISSN 1742-6588. [cit. 2024-11-13] Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2188/1/012008>
- [35] Kinematic sensitivity parameter identification and calibration of a non-fully symmetric parallel Delta robot. Huiping Shen, Qingmei Meng, Ju Li, Jiaming Deng and Guanglei Wu. [online]. 12. březen 2021 [cit. 2024-11-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X21000690>
- [36] Improving the accuracy of designing a delta robot for 3D printing. A V Zrazhevskiy *et al* 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **2094** 042058 [online]. [cit. 2024-11-13]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/17426596/2094/4/042058/pdf>
- [37] Workspace Analysis of Delta Robot Based on Forward Kinematics Solution. C. Liu, G. -H. Cao and Y. -Y. Qu. 2019 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS), Wuhan, China, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICRAS.2019.8808987 [online]. [cit. 2024-12-02]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8808987>
- [38] Delta Robot: Working Advantages and Applications. Smlease Design [online]. [cit. 2024-12-02]. Dostupné z: <https://www.smlease.com/entries/automation/delta-robot-working-advantages-applications/>
- [39] Aluminum Substrate Heat Bed 1224V Round Hot Bed 3D Printer Parts 220x220x5mm. Fruugo. [online] [cit. 2024-12-27]. Dostupné z: <https://www.fruugo.cz/hlinikovy-substrat-heat-bed-1224v-kulate-horke-luzko-3d-printer-parts-220x220x5mm/p-271727030-602420330>
- [40] Rotary Delta Robot Forward/Inverse Kinematics Calculations. Marginally Clever Robots 2012 [online] [cit. 2024-12-27]. Dostupné z: <https://www.marginallyclever.com/other/samples/fk-ik-test.html>
- [41] SolidWorks 2023. SolidWorks [online]. [cit.2024-12-27]. Dostupné z: <https://www.solidworks.cz/>
- [42] Positron V3.2. POSITRON 3D [online]. 2024 [cit. 2024-12-28]. Dostupné z: <https://www.positron3d.com/>

- [43] Finally, a 3D Printer for Australians! Jeff Geerling [online]. 28. srpen 2024 [cit. 2024-12-28]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=mTIwNMhFvOU&ab_channel=JeffGeerling
- [44] Mechanické převody. ELUC [online]. [cit. 2025-01-02]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1900>
- [45] ŠABART, Adam. Paralelní kinematické struktury průmyslových robotů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr. [cit. 2025-01-03]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103516
- [46] SKF SAKAC 10 M kloubová hlavice. Prumex. [online] [cit. 2025-01-29]. Dostupné z: https://www.prumex.cz/skf-sakac-10-m-kloubova-hlavice/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAwOe8BhCCARIsAGKeD57GU40CcsuYAVHUvBvqfk7mB9F7w803i7fUvbNH04Mho4px20gL25YaAi9cEALw_wcB
- [47] KALČÍK, Filip. *Konstrukce FDM tiskárny typu Delta*. Online. Master's thesis. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Faculty of AgriSciences. 2021. [cit. 2025-03-09]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/tvsifu/>
- [48] 3D Printer Endstop Switch vs Optical Endstop. Jackson O'Connell, ALL3DP. [online]. 28. červenec 2020. [cit. 2025-03-09]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-endstop-switch-optical-endstop/>
- [49] Klipper documentation. Klipper. [online]. [cit. 2025-03-09]. Dostupné z: <https://www.klipper3d.org/>
- [50] How to install Klipper for Beginners. Stacking Layers, Youtube. [online]. 17. září 2023. [cit. 2025-03-09]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=Df8-7zcwiUc&ab_channel=StackingLayers
- [51] Rotary delta Kinematics. Klipper. [online]. [cit. 2025-04-20]. Dostupné z: https://www.klipper3d.org/Config_Reference.html?h=rotary+delta#rotary-delta-kinematics
- [52] Delta 3D Printers. Filament2Print. [online]. 27. červenec 2022. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://filament2print.com/en/blog/3d-delta-drucker>

- [53] How to 3D Print Faster: Tips to Speed Up 3D Printing. All3DP [online]. 4. červenec 2024 [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fast-3d-prints-3d-printing-speed/>
- [54] Resonance Compensation. Klipper. [online]. [cit. 2025-05-09], Dostupné z: https://www.klipper3d.org/Resonance_Compensation.html

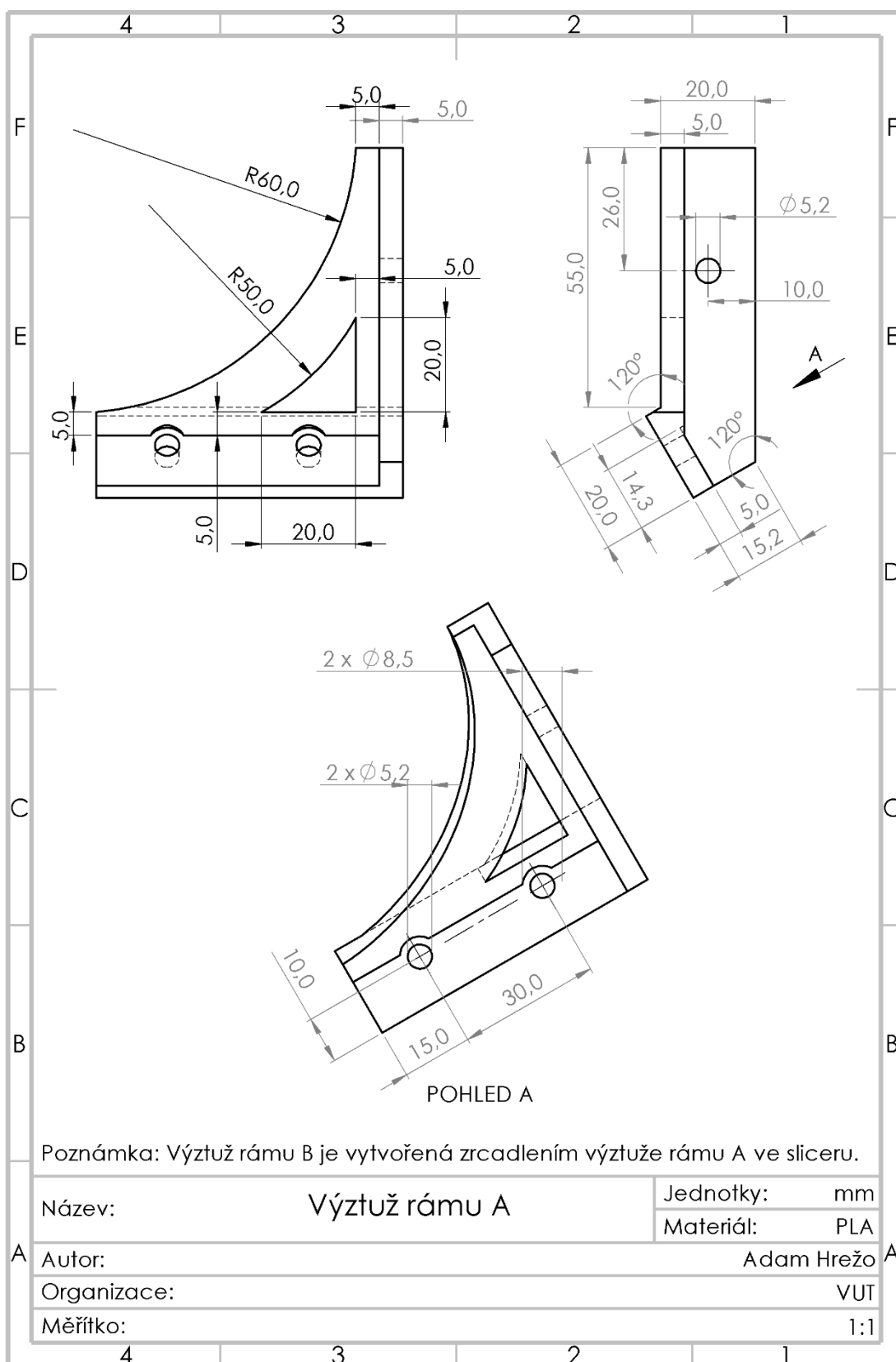
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Trojrozměrný
FDM	Modelování nanášením taveného plastu
SLA	Stereolitografie
PLA	Polylaktidový materiál
PETG	Polyethylen tereftalát glykol
ABS	Akrylonitril butadien styren
ASA	Akrylonitril styren akrylát
PTFE	Polytetrafluoretylen
TPE	Termoplastický elastomer
PEI	Polyetherimid
REPRAP	Sebereplikující 3D tiskárny
CNC	Počítačem řízené numerické ovládání
NTC	Termistor se záporným teplotním koeficientem
NEMA	Mezinárodní asociace výrobců elektrických zařízení
USB	Univerzální sériová sběrnice
PCB	Deska plošného spoje
SD	Paměťová karta
SCARA	Robotické rameno pro selektivní montáž
BLDC	Bezkartáčový stejnosměrný motor
PA-CF	Polyamid s uhlíkovými vlákny
XT-CF	Kopolyester s uhlíkovými vlákny
DIN	Lišta pro upevnění komponent
RGB	Barevný model vytvořený kombinací tří základních barev
MOSFET	Typ tranzistoru řízený elektrickým polem
PWM	Pulsně šířková modulace
OS	Operační systém
SSH	Šifrovaný protokol pro vzdálený přístup
IP	Internetový protokol
STL	Formát souboru pro 3D modely

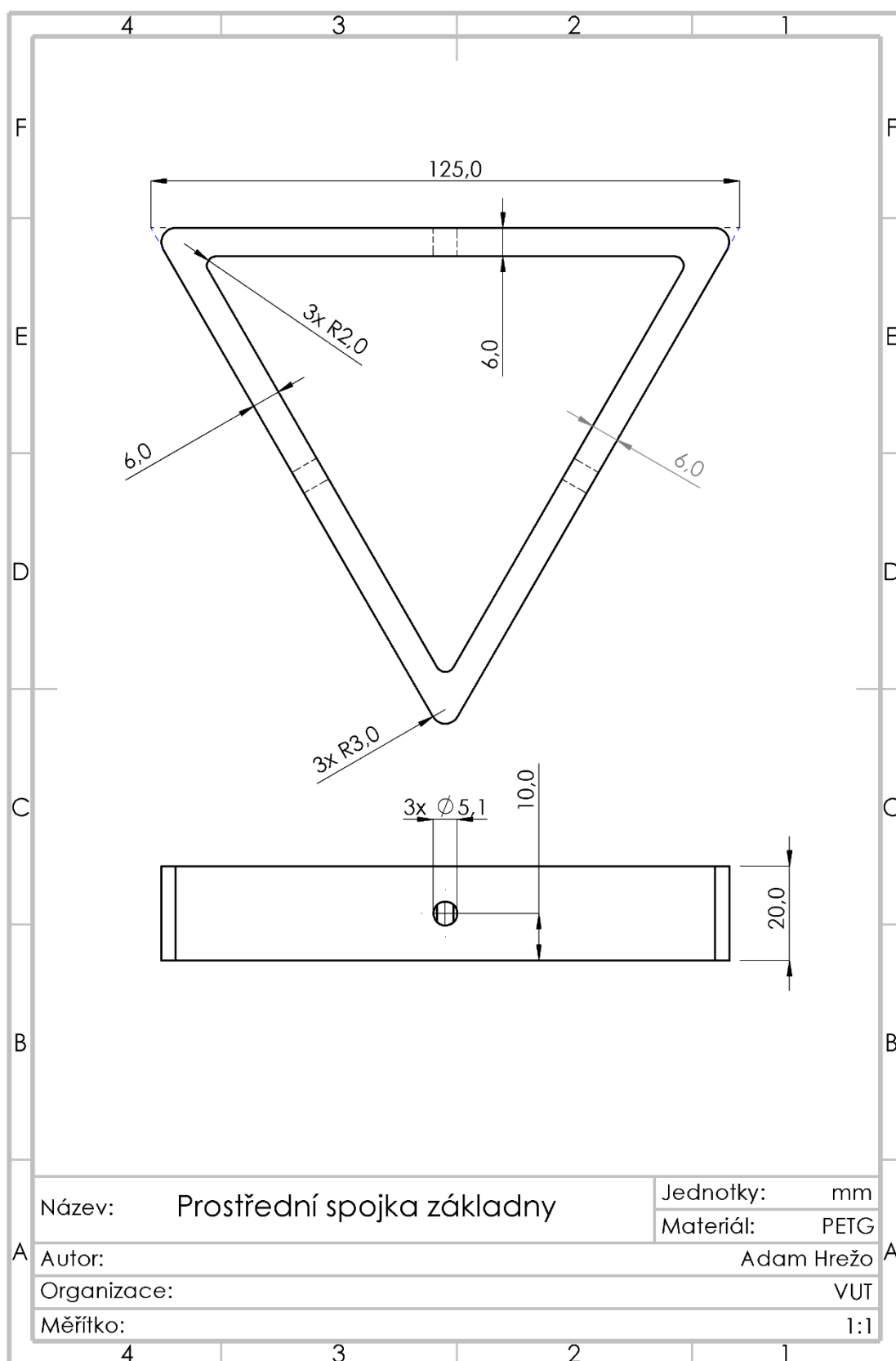
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - VÝZTUŽ RÁMU A.....	71
PŘÍLOHA B - PROSTŘEDNÍ SPOJKA ZÁKLADNY	72
PŘÍLOHA C - SPOJKA DRŽÁKU TISKOVÉ PODLOŽKY	73
PŘÍLOHA D - SPOJKA HORNÍ ČÁSTI RÁMU	74
PŘÍLOHA E - SPOJKA RÁMU B PRO VYPÍNAČ	75
PŘÍLOHA F - SPOJKA RÁMU A PRO VYPÍNAČ	76
PŘÍLOHA G - SPOJKA RÁMU B.....	77
PŘÍLOHA H - NOHA TISKÁRNY	78
PŘÍLOHA I - SPOJKA KLOUBŮ A	79
PŘÍLOHA J - SPOJKA KLOUBŮ B.....	80
PŘÍLOHA K - KRYT SFÉRICKÉHO LOŽISKA KLOUBU	81
PŘÍLOHA L - RAMENO.....	82
PŘÍLOHA M - DRŽÁK TISKOVÉ HLAVY	83
PŘÍLOHA N - KONCOVÁ PLATFORMA	84
PŘÍLOHA O - STĚNA PŘEVODOVKY A.....	85
PŘÍLOHA P - STĚNA PŘEVODOVKY B	86
PŘÍLOHA Q - DRŽÁK PŘÍVODNÍ ZÁSUVKY	87
PŘÍLOHA R - DRŽÁK DISPLEJE	88
PŘÍLOHA S - KRYT DISPLEJE.....	89
PŘÍLOHA T - DRŽÁK ZDROJE	90
PŘÍLOHA U - DRŽÁK HOTEND VĚTRÁČKU	91
PŘÍLOHA V - DRŽÁK INDUKČNÍHO SENZORU	92
PŘÍLOHA W - DRŽÁK MIKROSPÍNAČE	93
PŘÍLOHA X - DRŽÁK MĚNIČE PRO KOMPRESOR	94
PŘÍLOHA Y - DRŽÁK ZÁKLADNÍ DESKY	95
PŘÍLOHA Z - DRŽÁK RASPBERRY PI	96
PŘÍLOHA AA - CHLAZENÍ DRIVERŮ	97

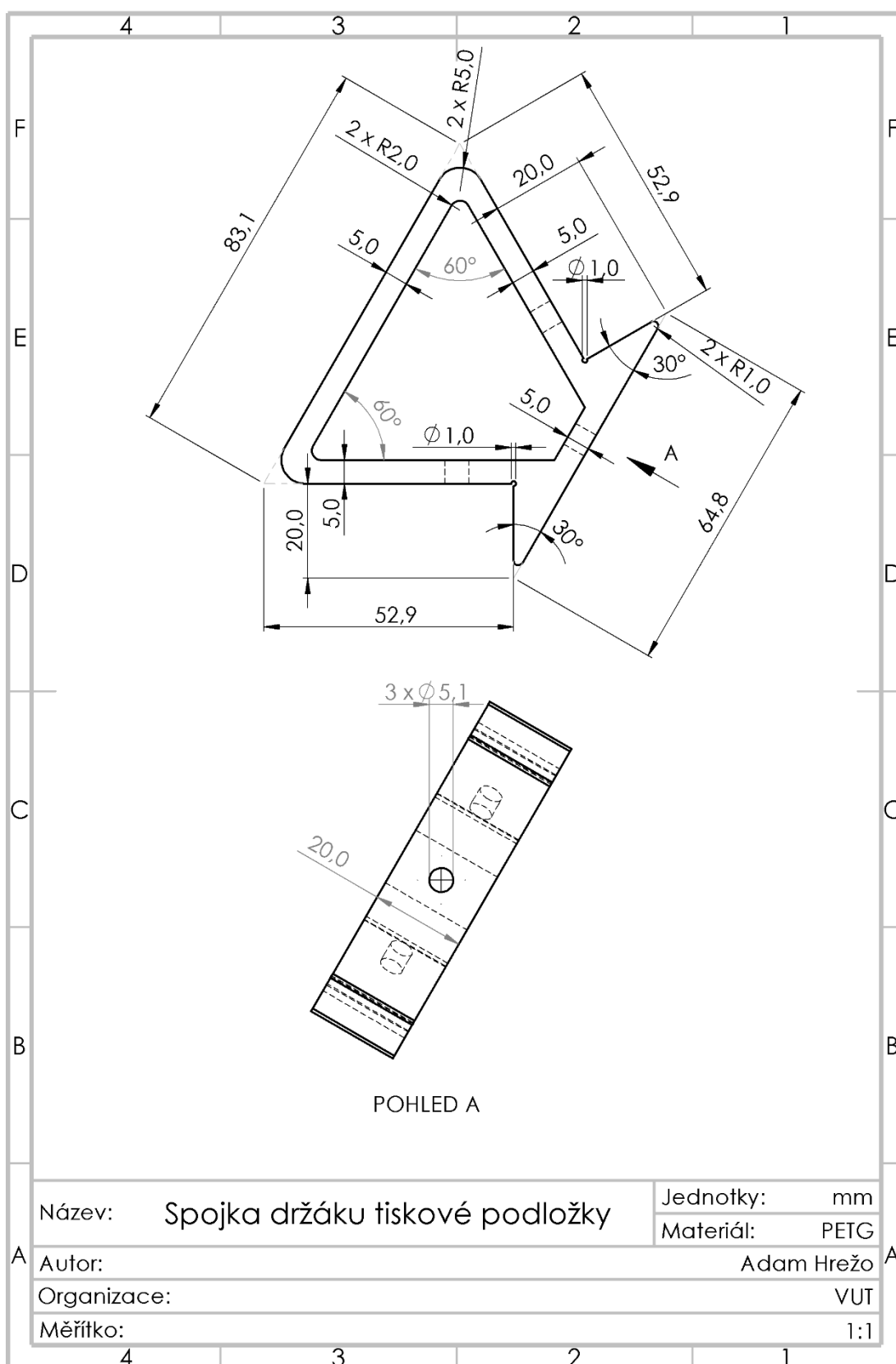
Příloha A - Výztuž rámu A



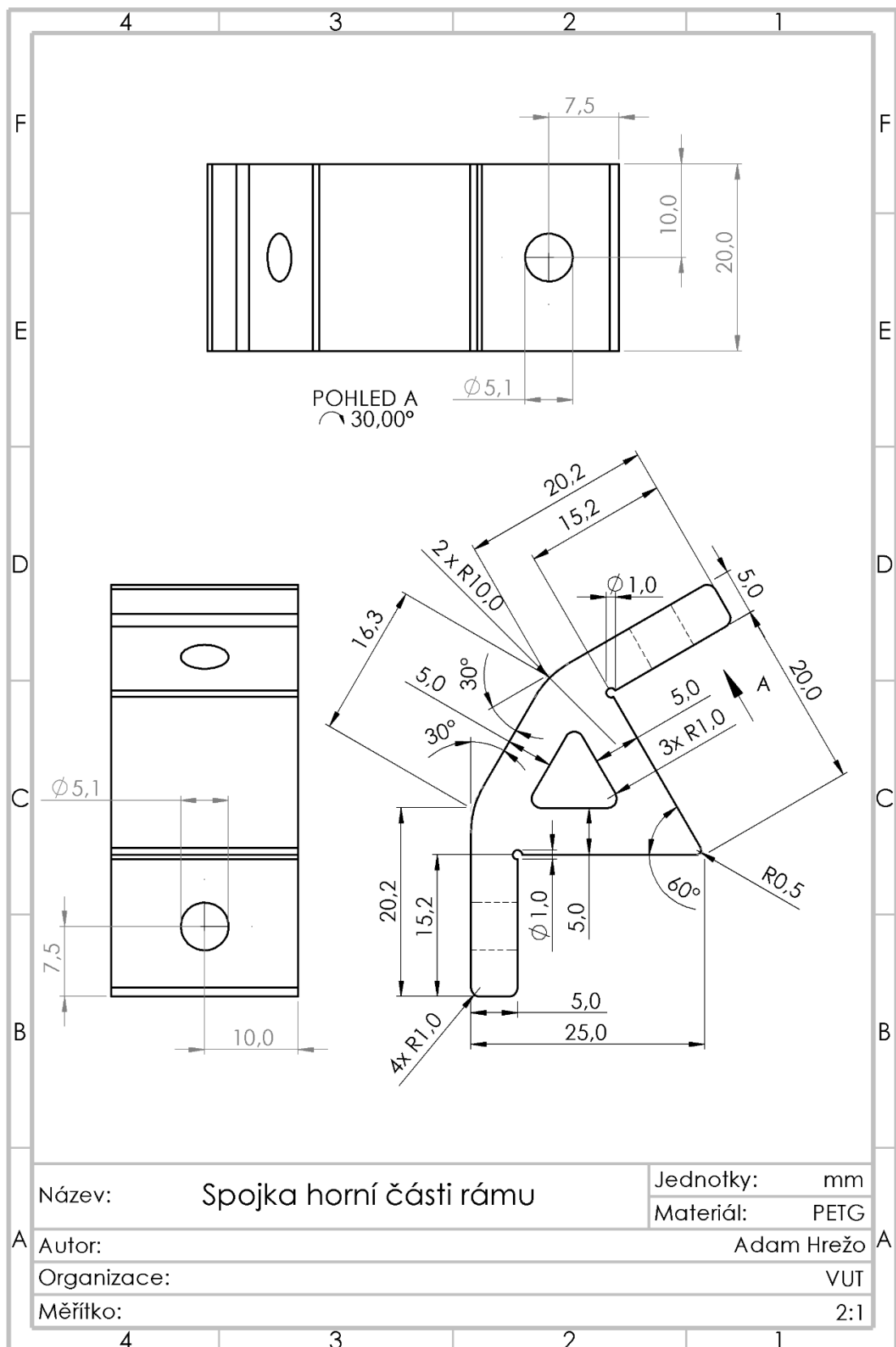
Příloha B - Prostřední spojka základny



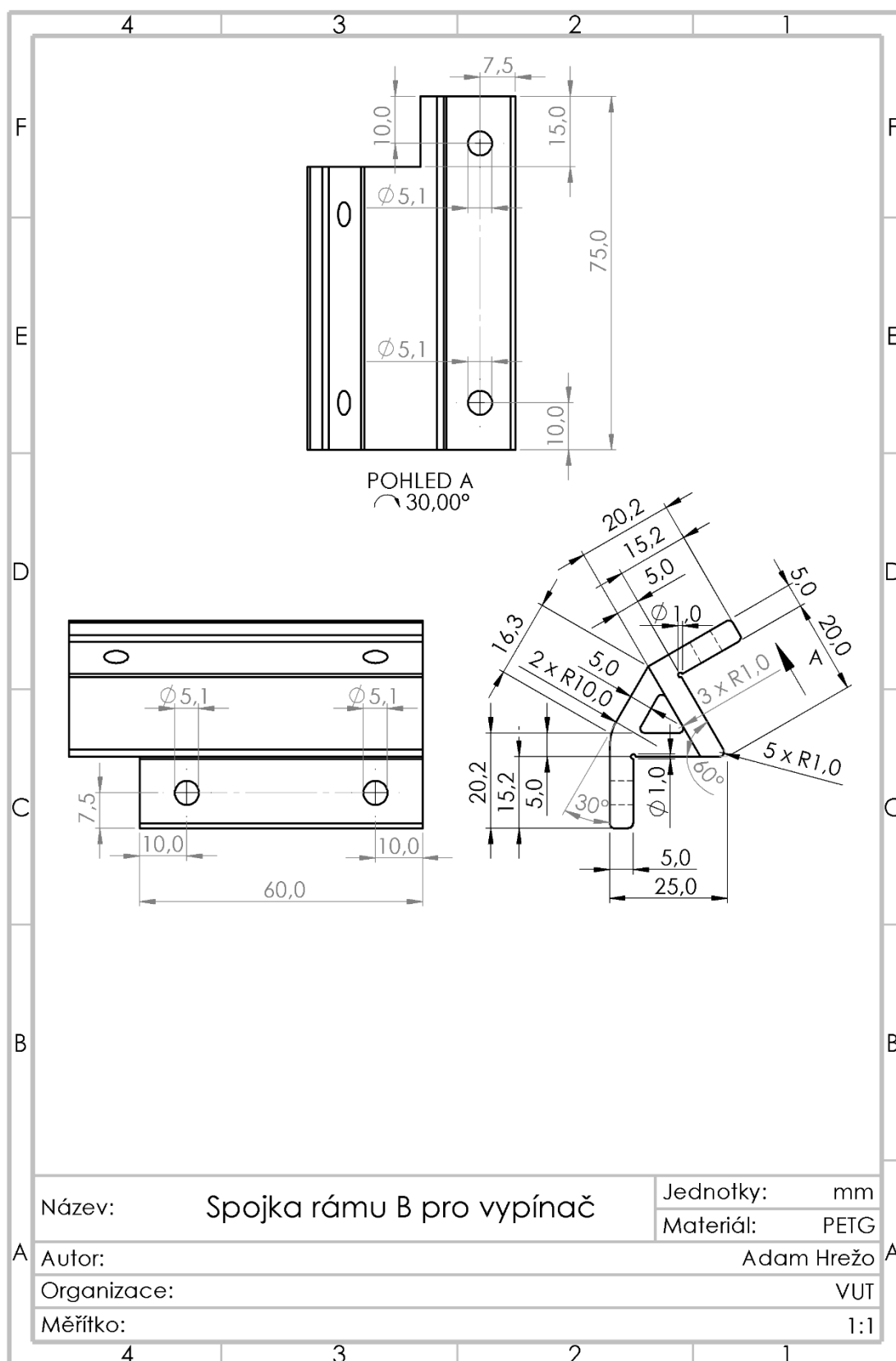
Příloha C - Spojka držáku tiskové podložky



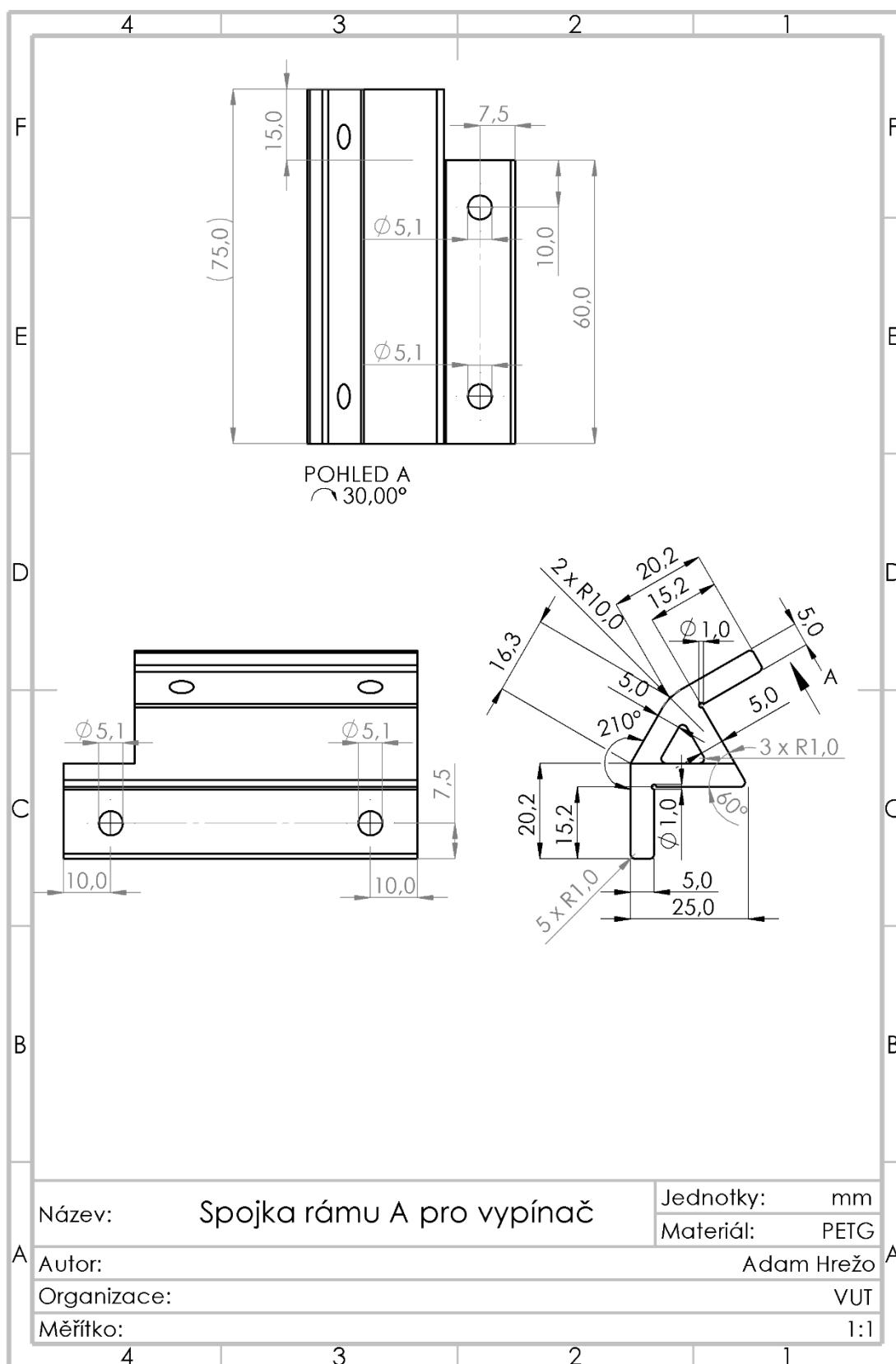
Příloha D - Spojka horní části rámu



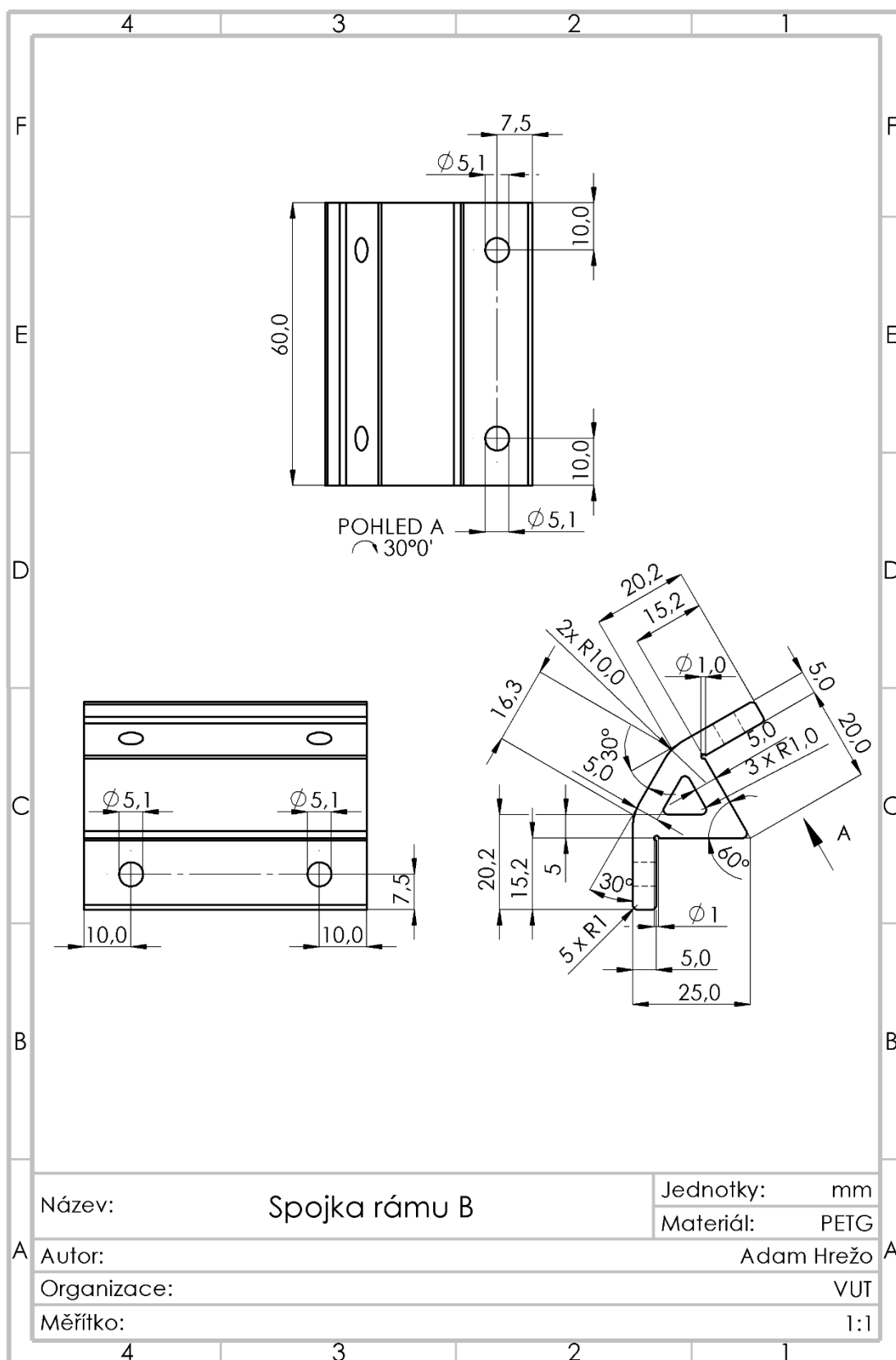
Příloha E - Spojka rámu B pro vypínač



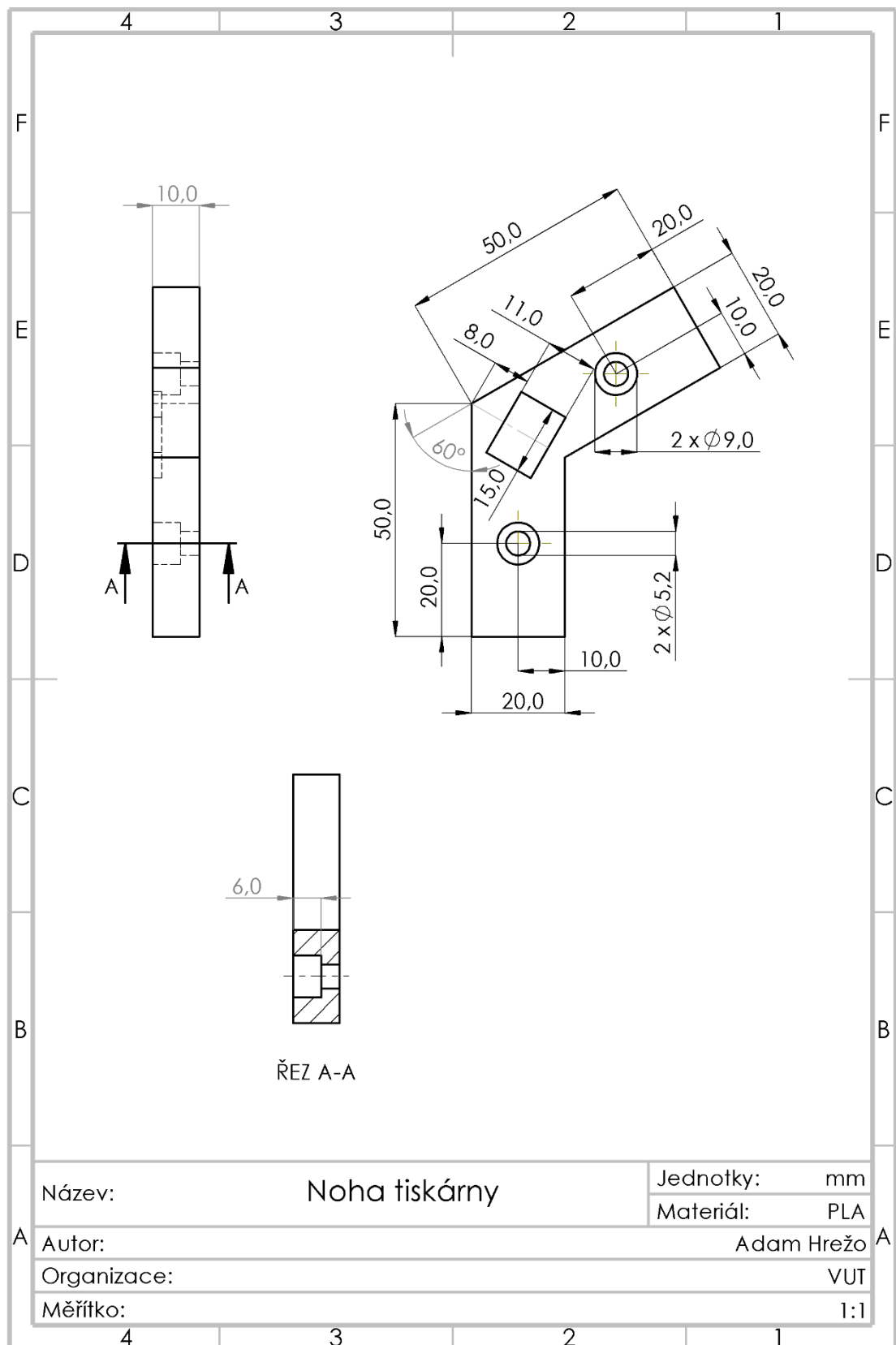
Příloha F - Spojka rámu A pro vypínač



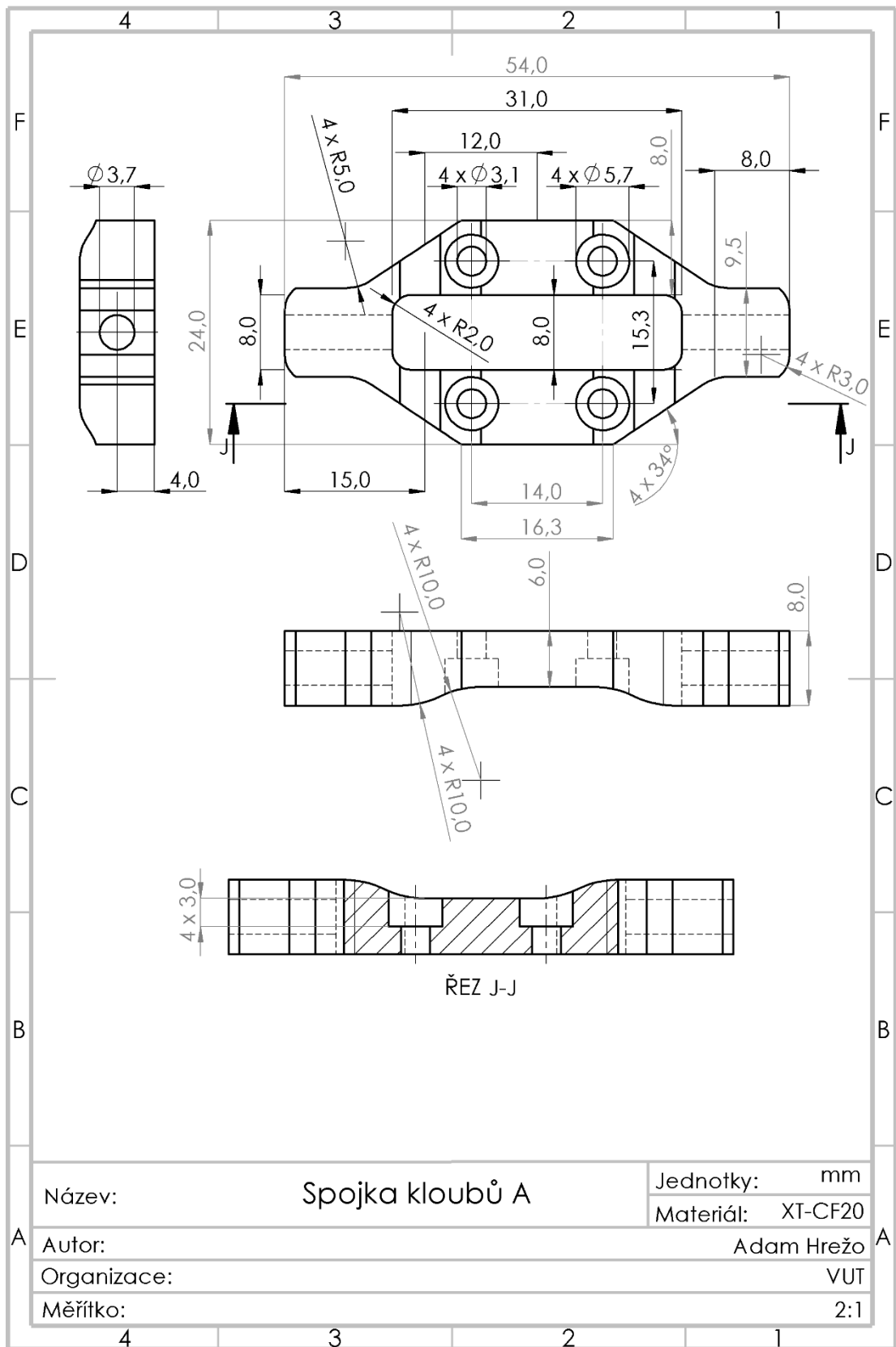
Příloha G - Spojka rámu B



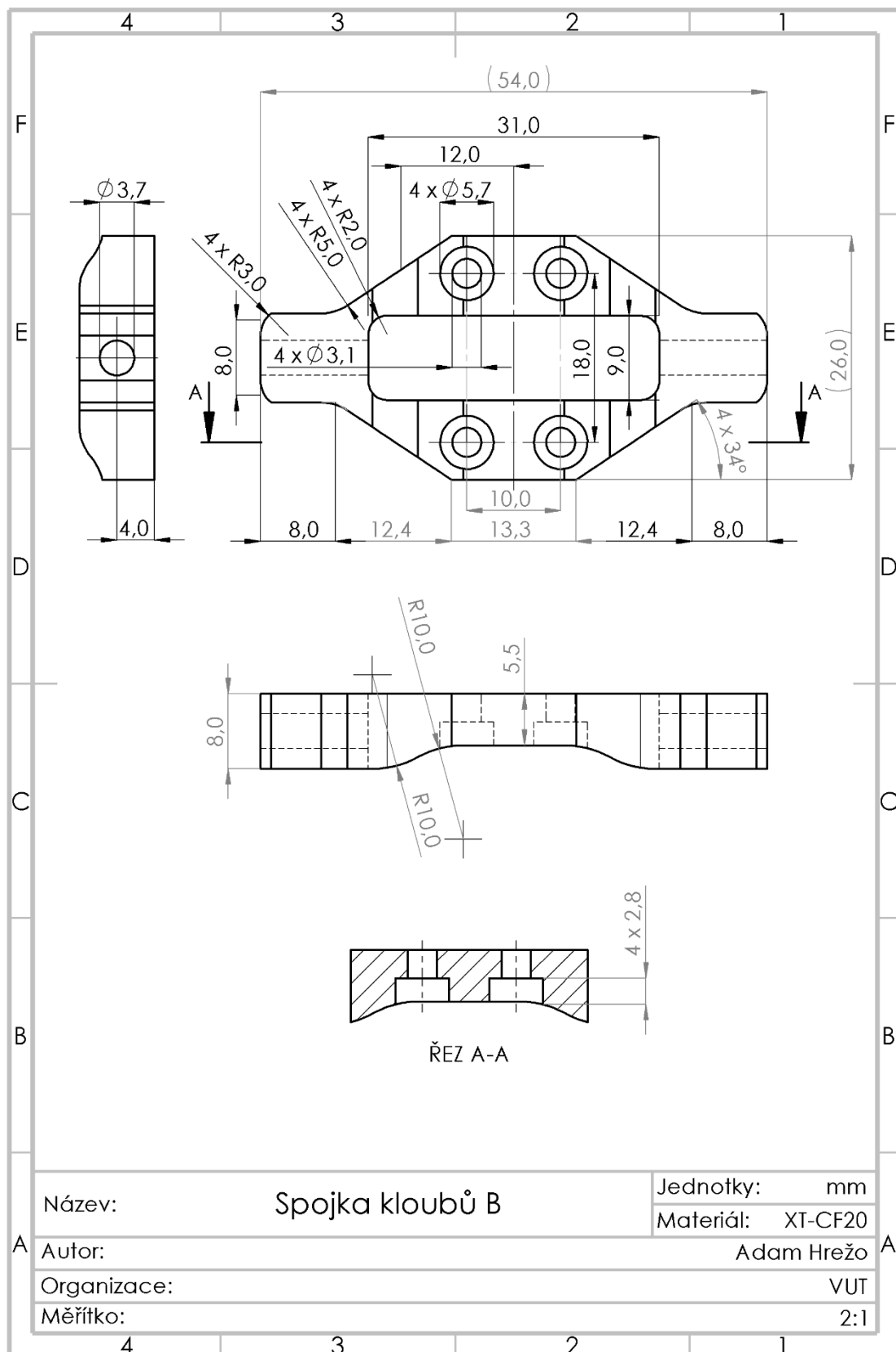
Příloha H - Noha tiskárny



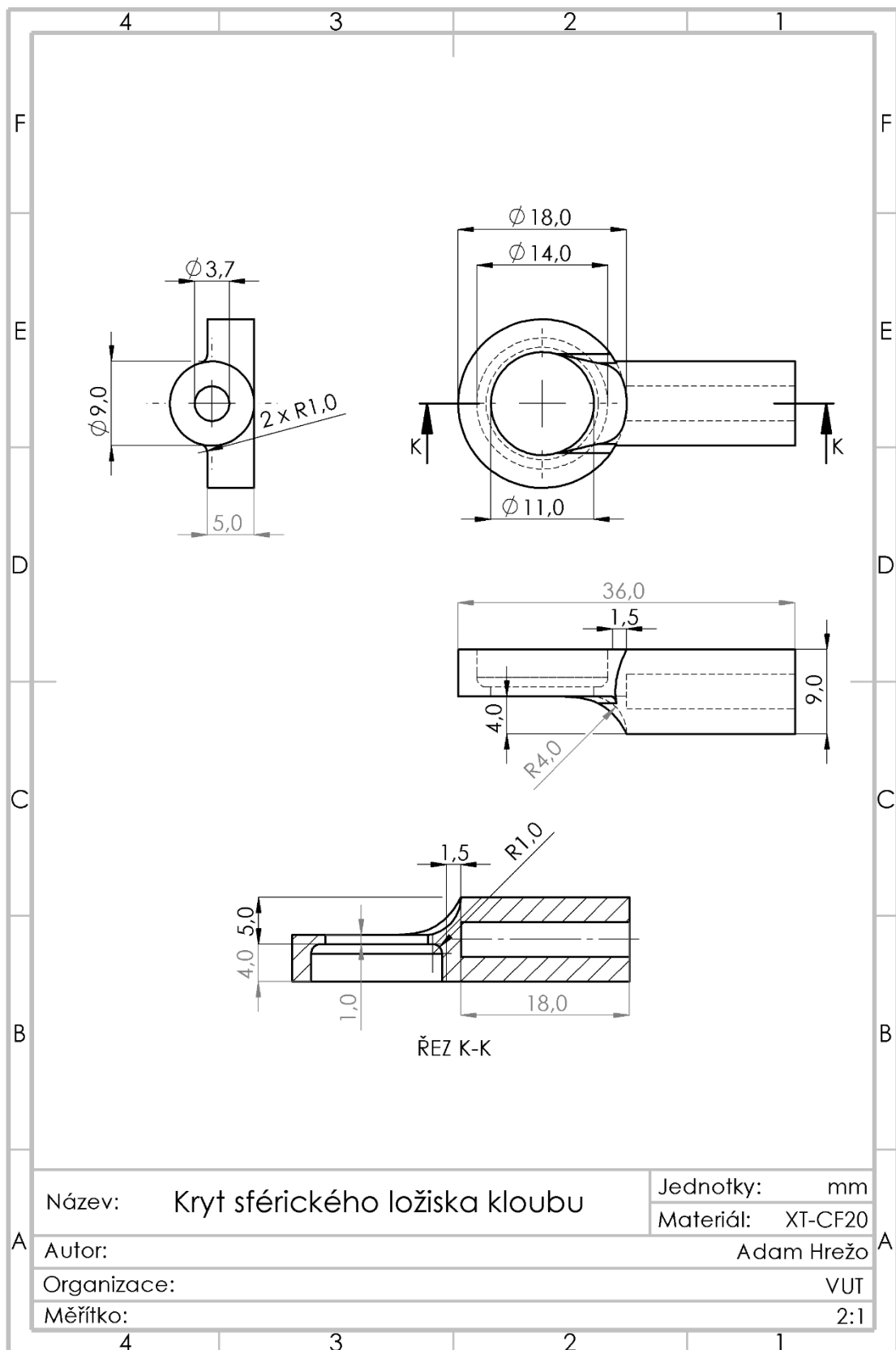
Příloha I - Spojka kloubů A



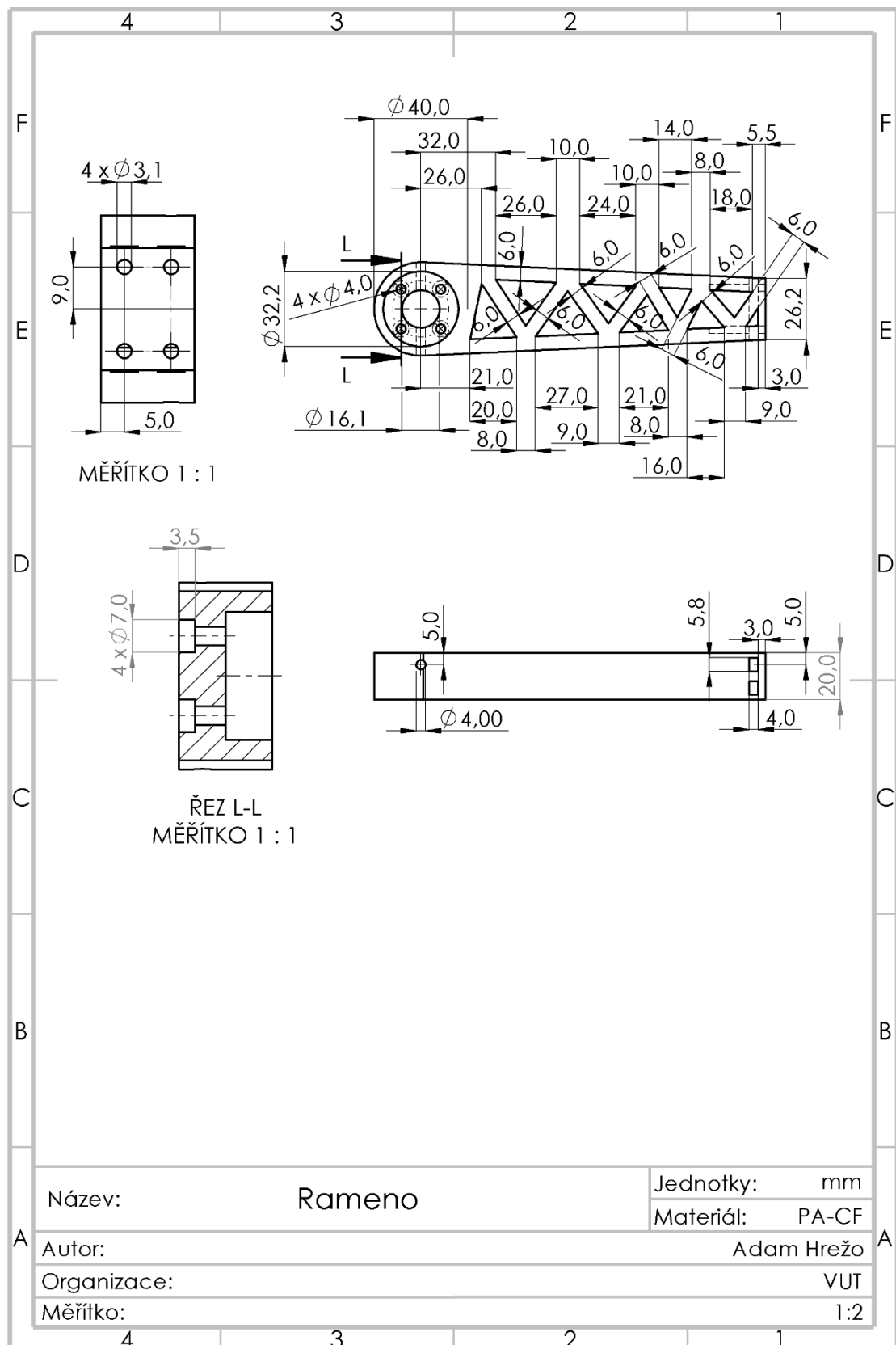
Příloha J - Spojka kloubů B



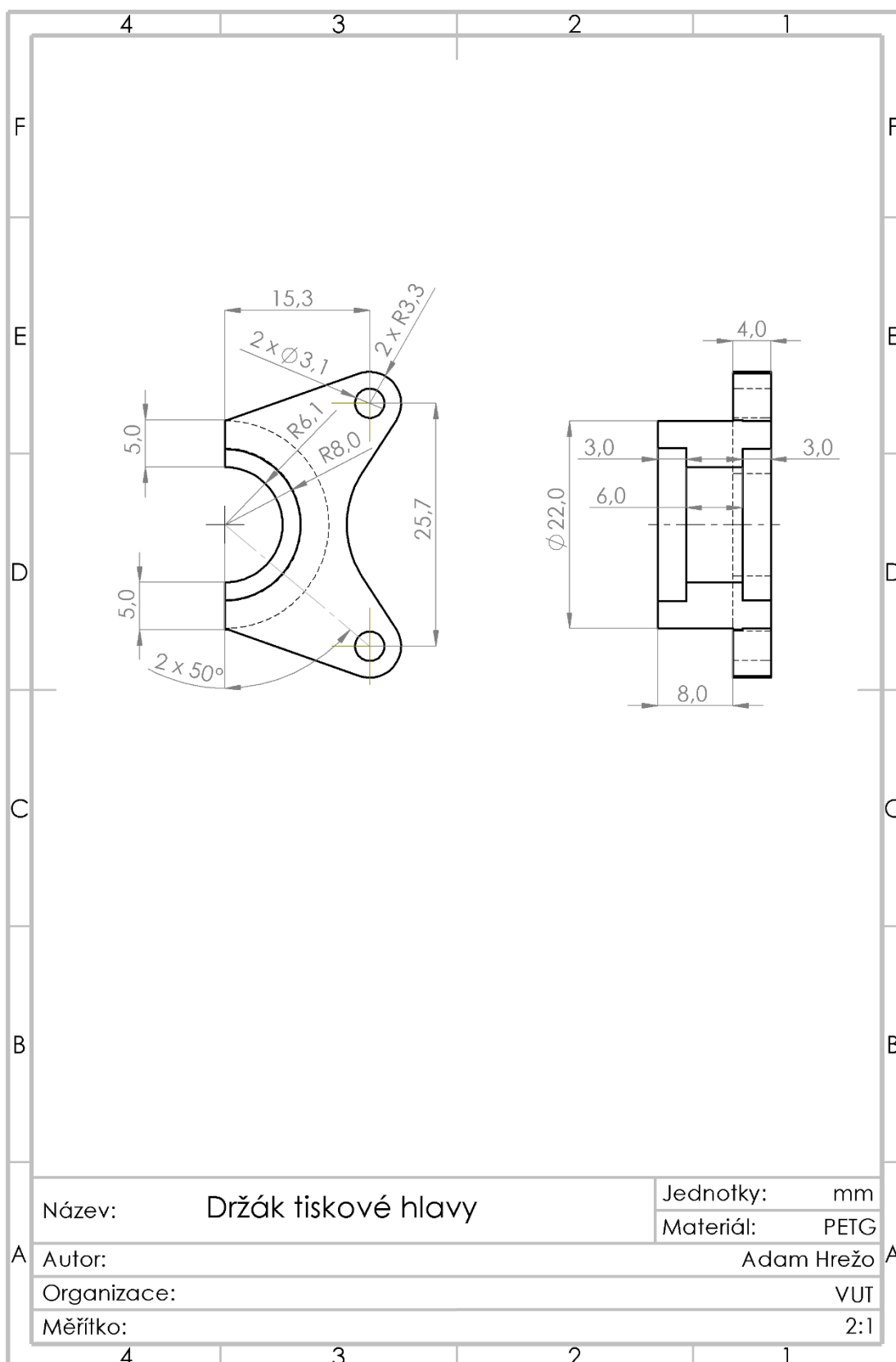
Příloha K - Kryt sférického ložiska kloubu



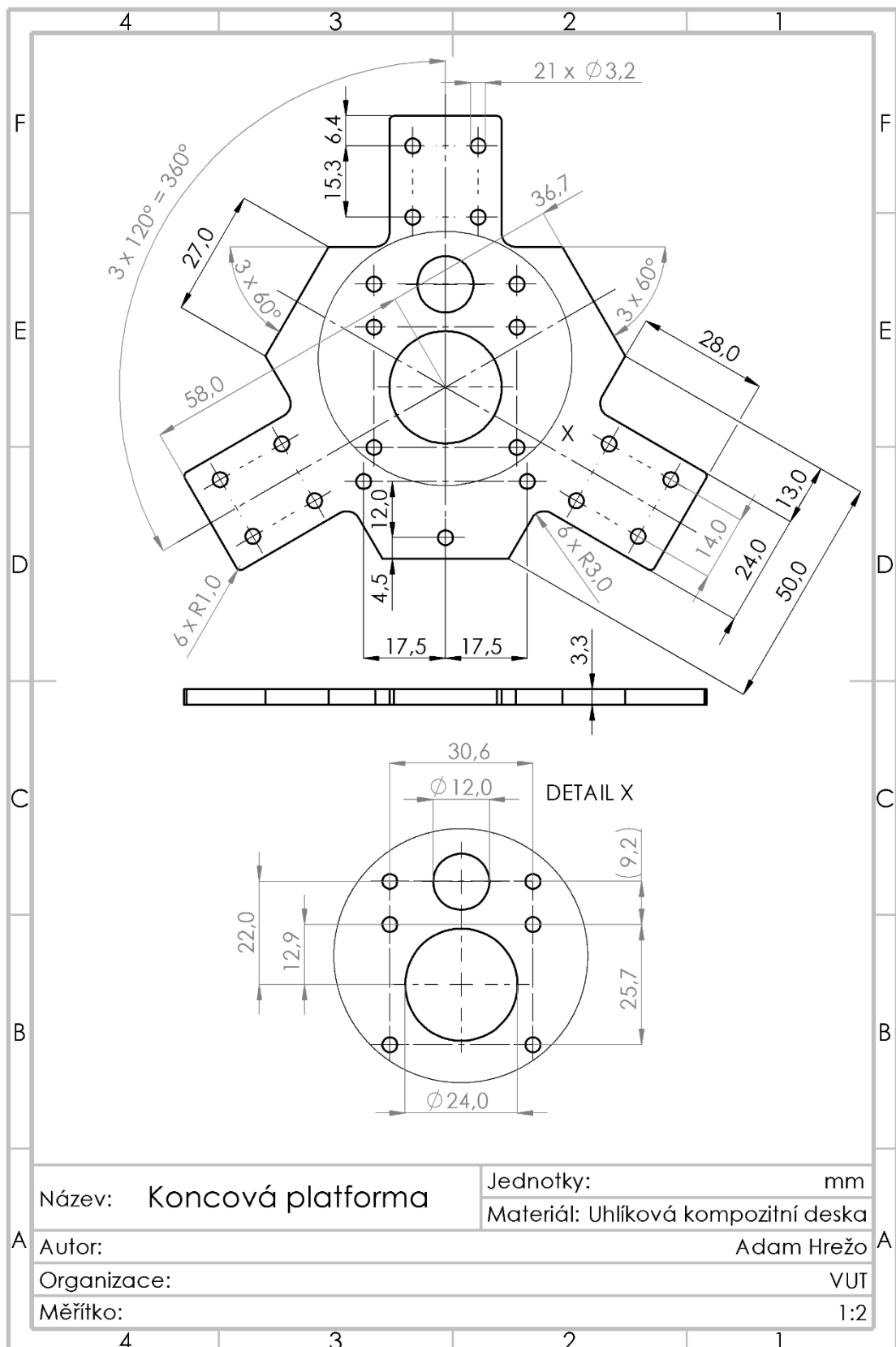
Příloha L - Rameno



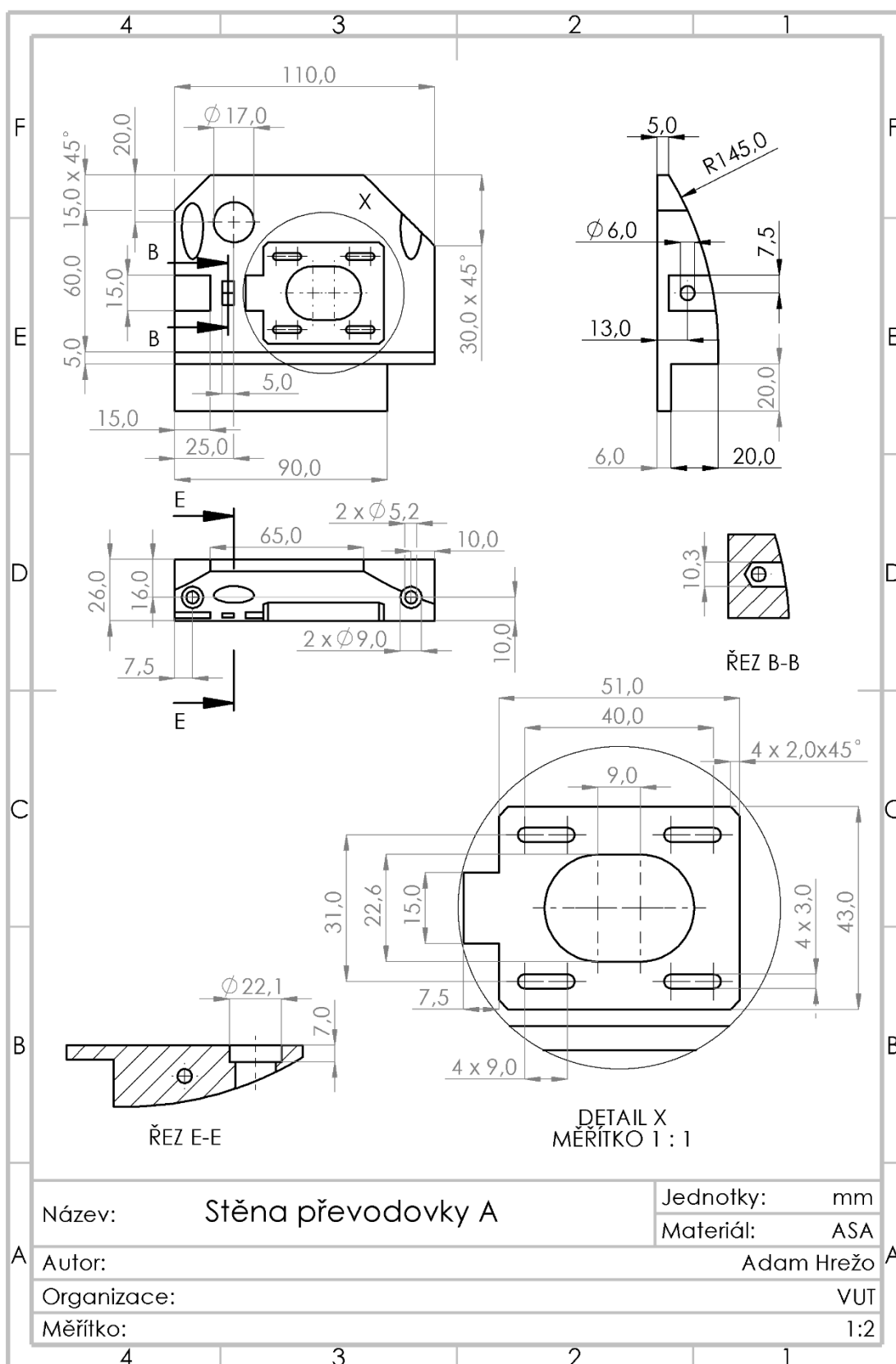
Příloha M - Držák tiskové hlavy



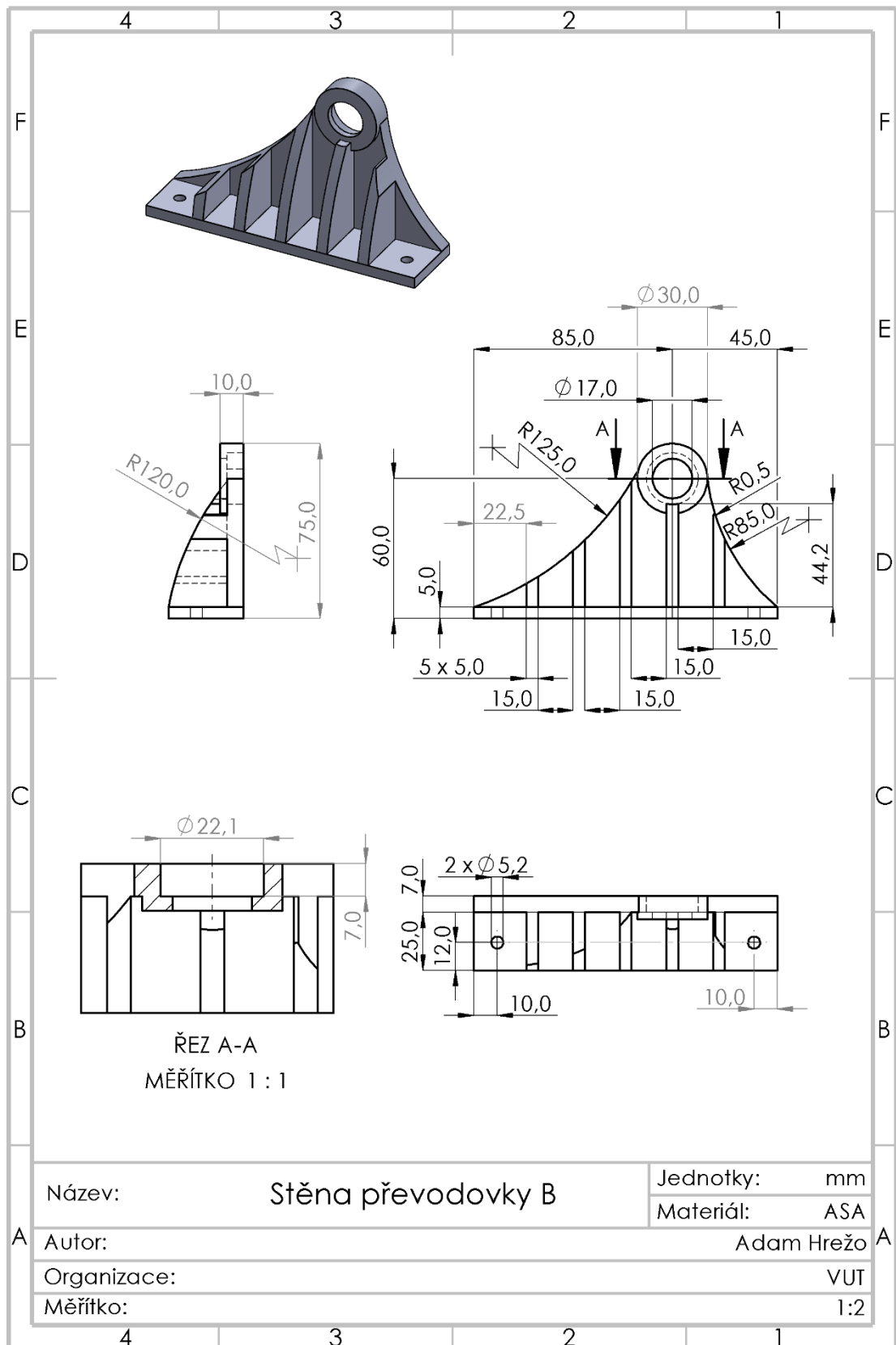
Příloha N - Koncová platforma



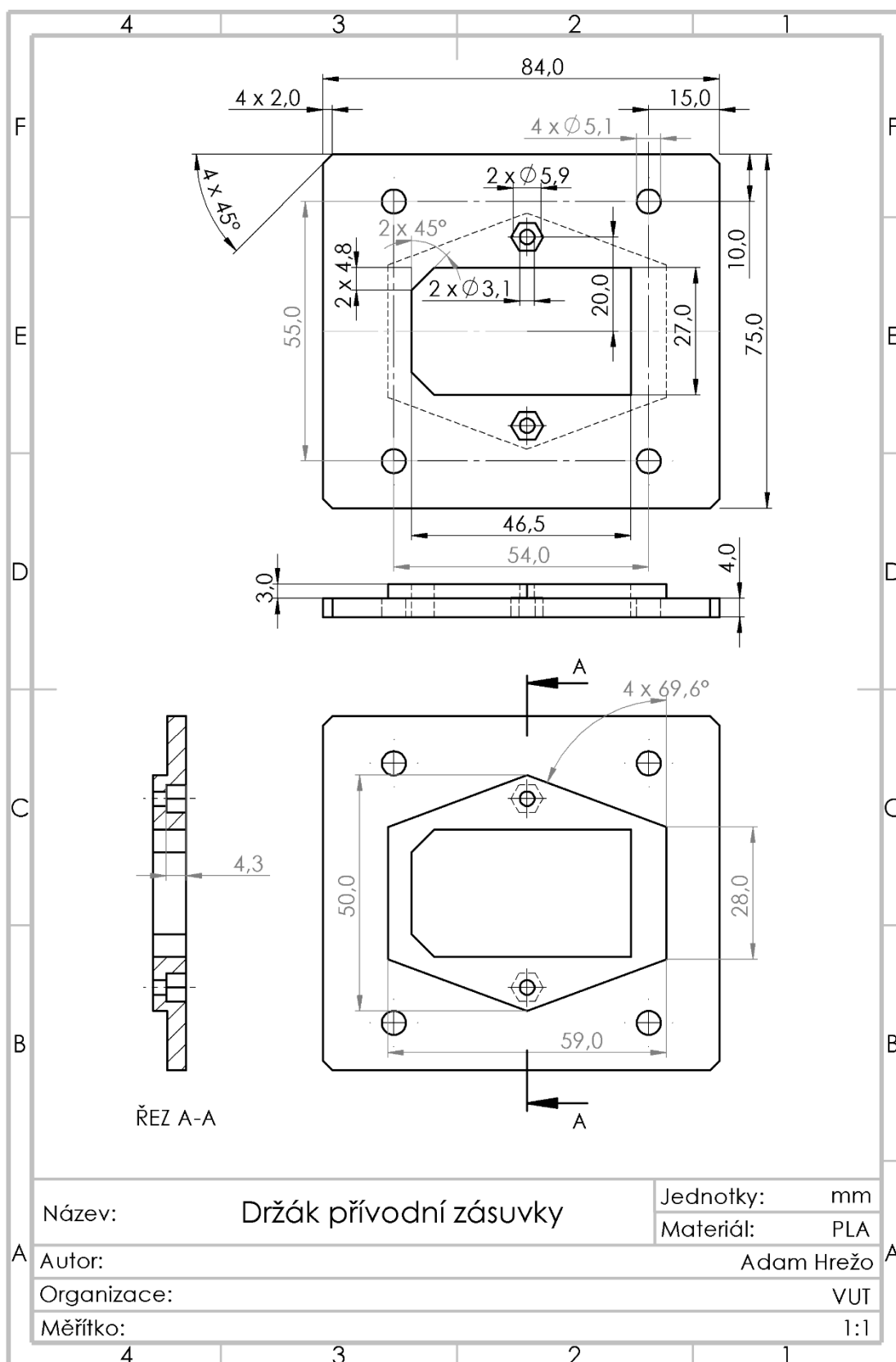
Příloha O - Stěna převodovky A



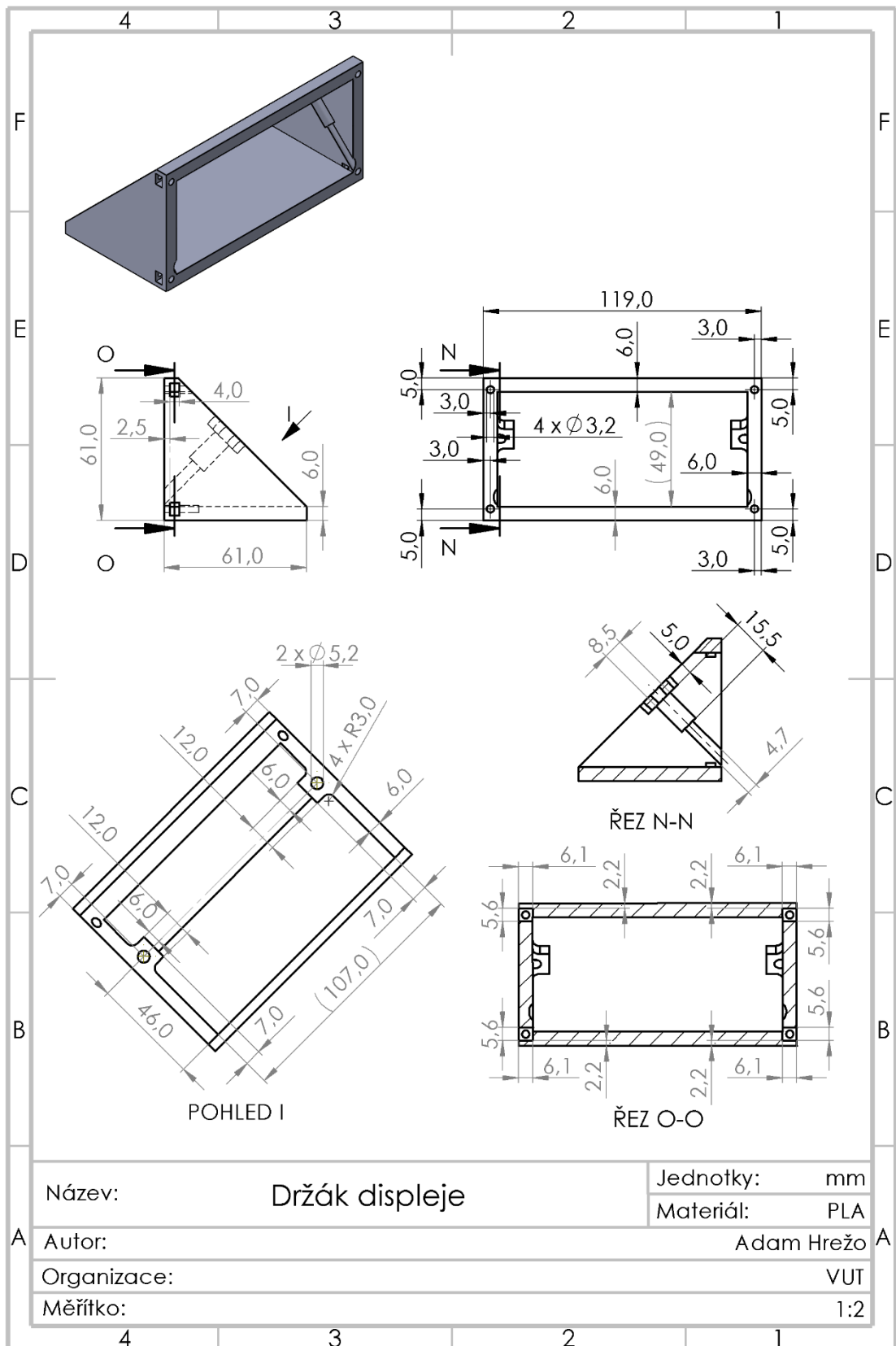
Příloha P - Stěna převodovky B



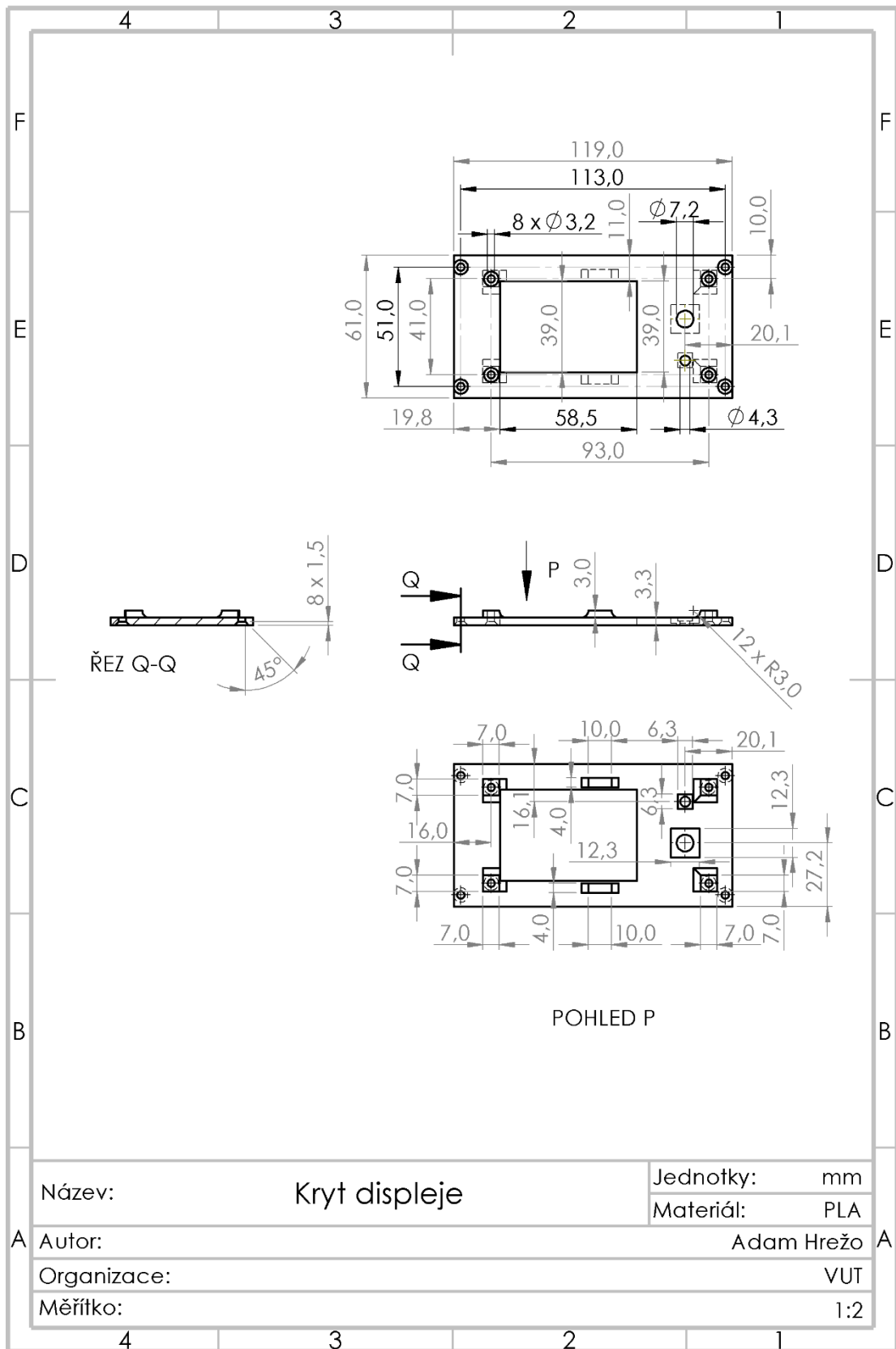
Příloha Q - Držák přívodní zásuvky



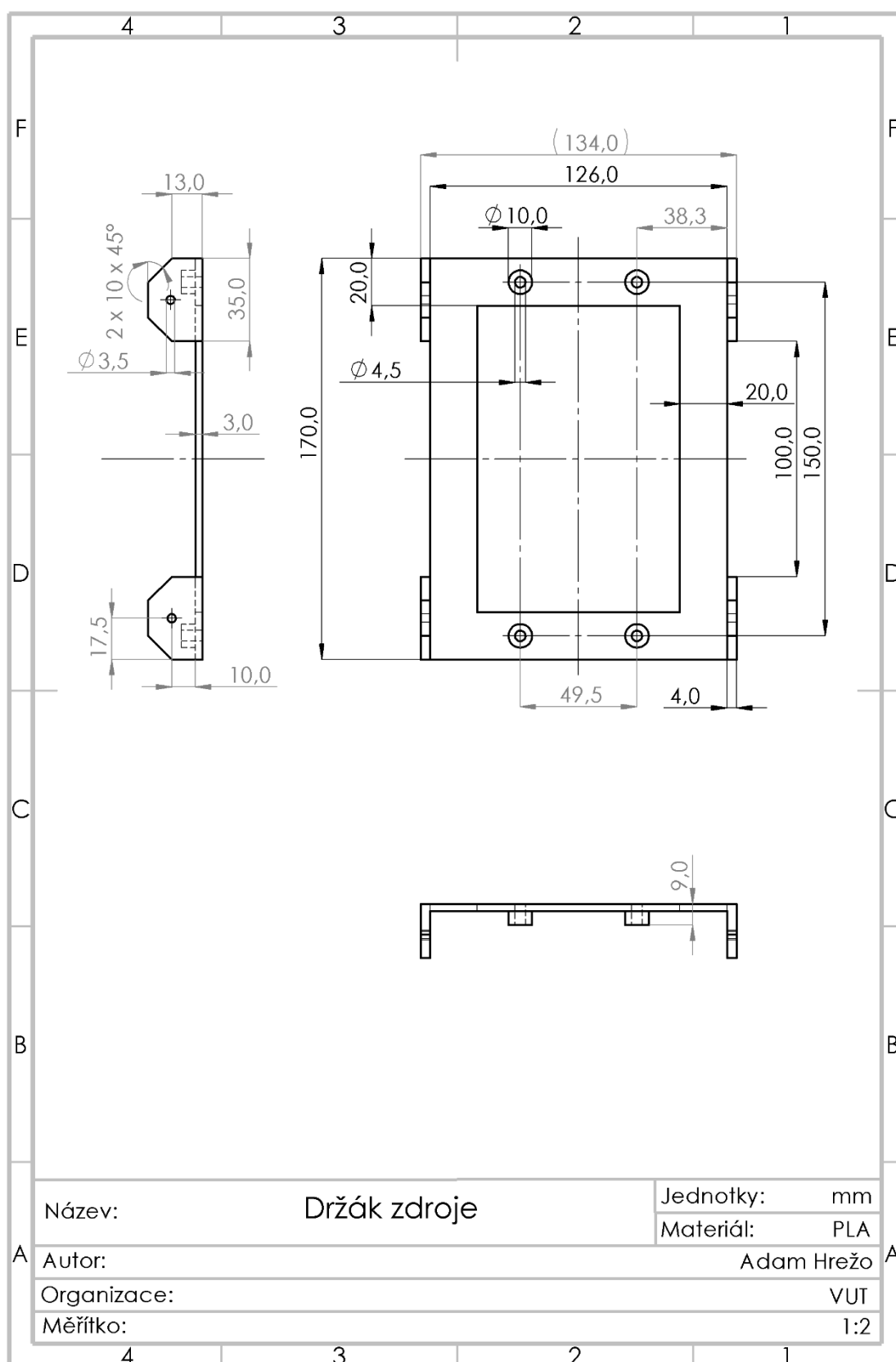
Příloha R - Držák displeje



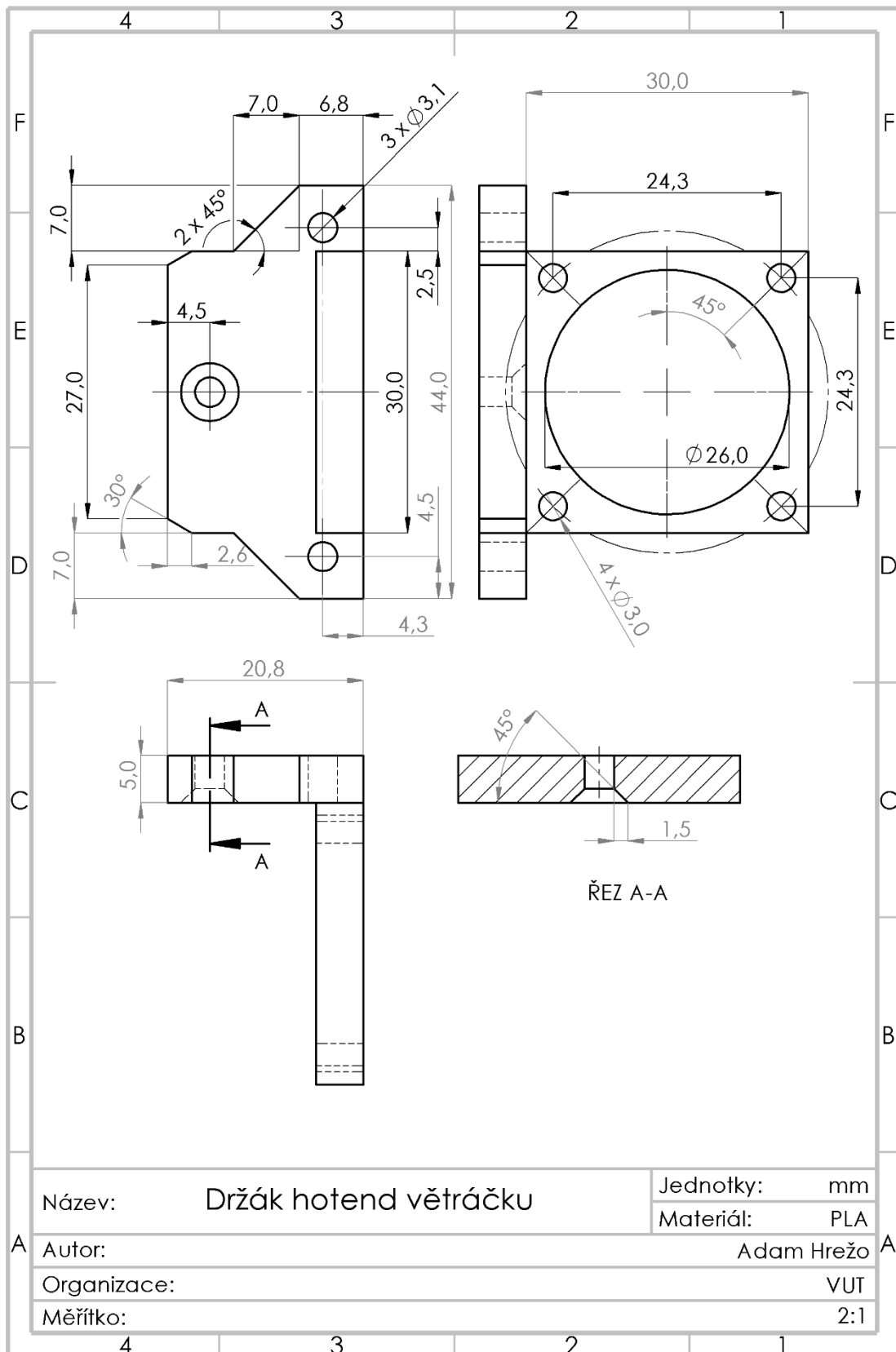
Příloha S - Kryt displeje



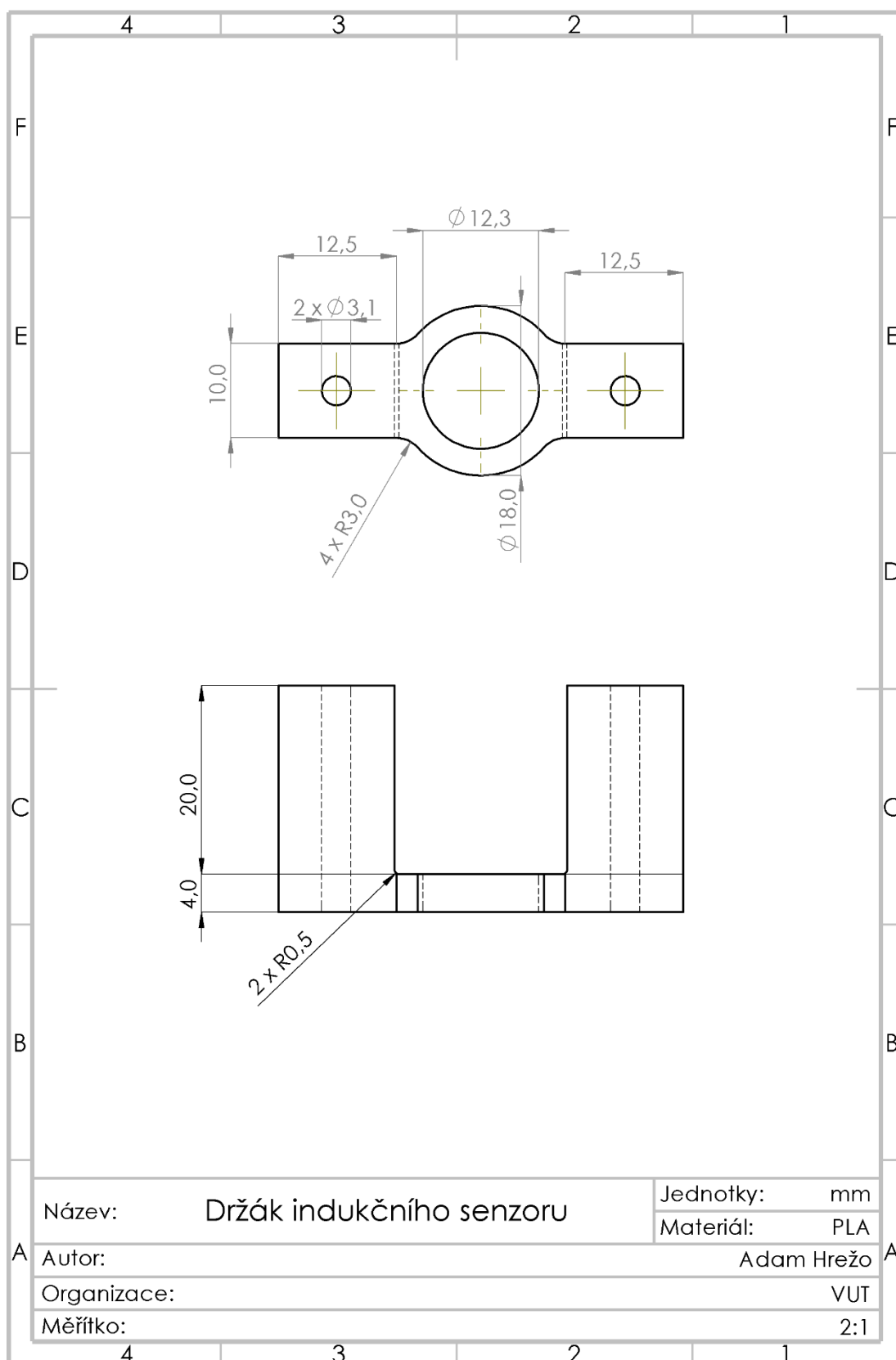
Příloha T - Držák zdroje



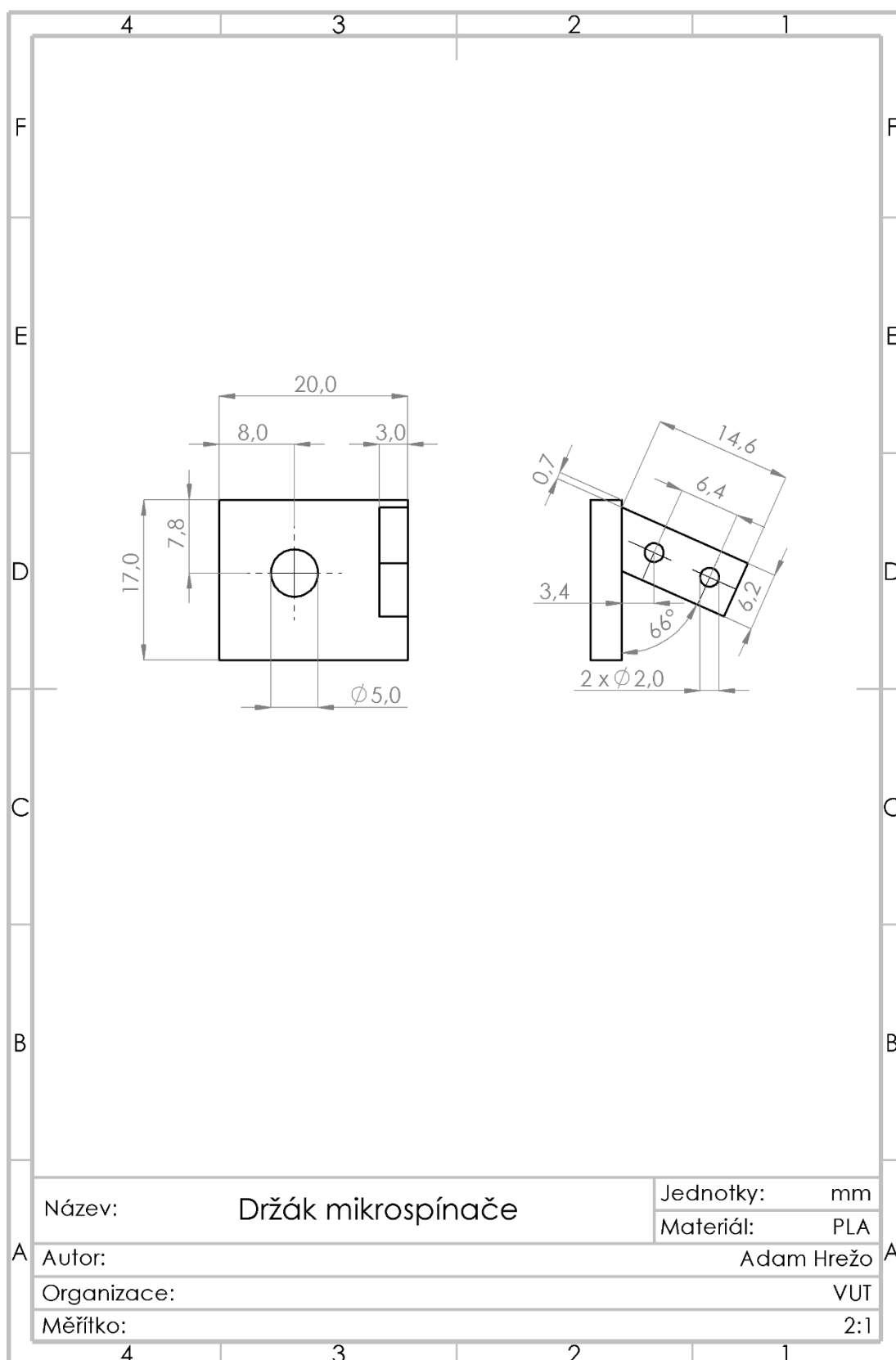
Příloha U - Držák hotend větráčku



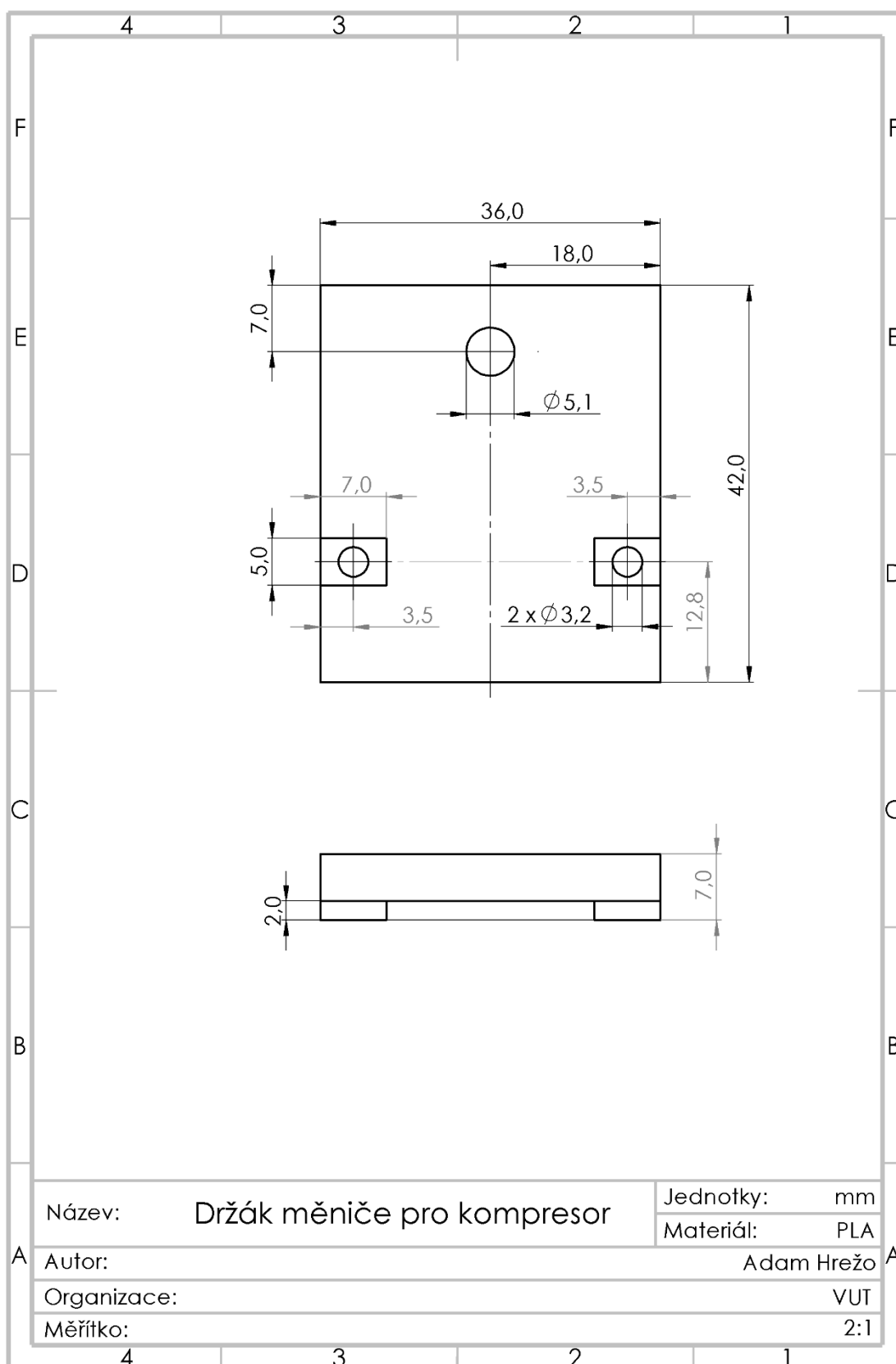
Příloha V - Držák indukčního senzoru



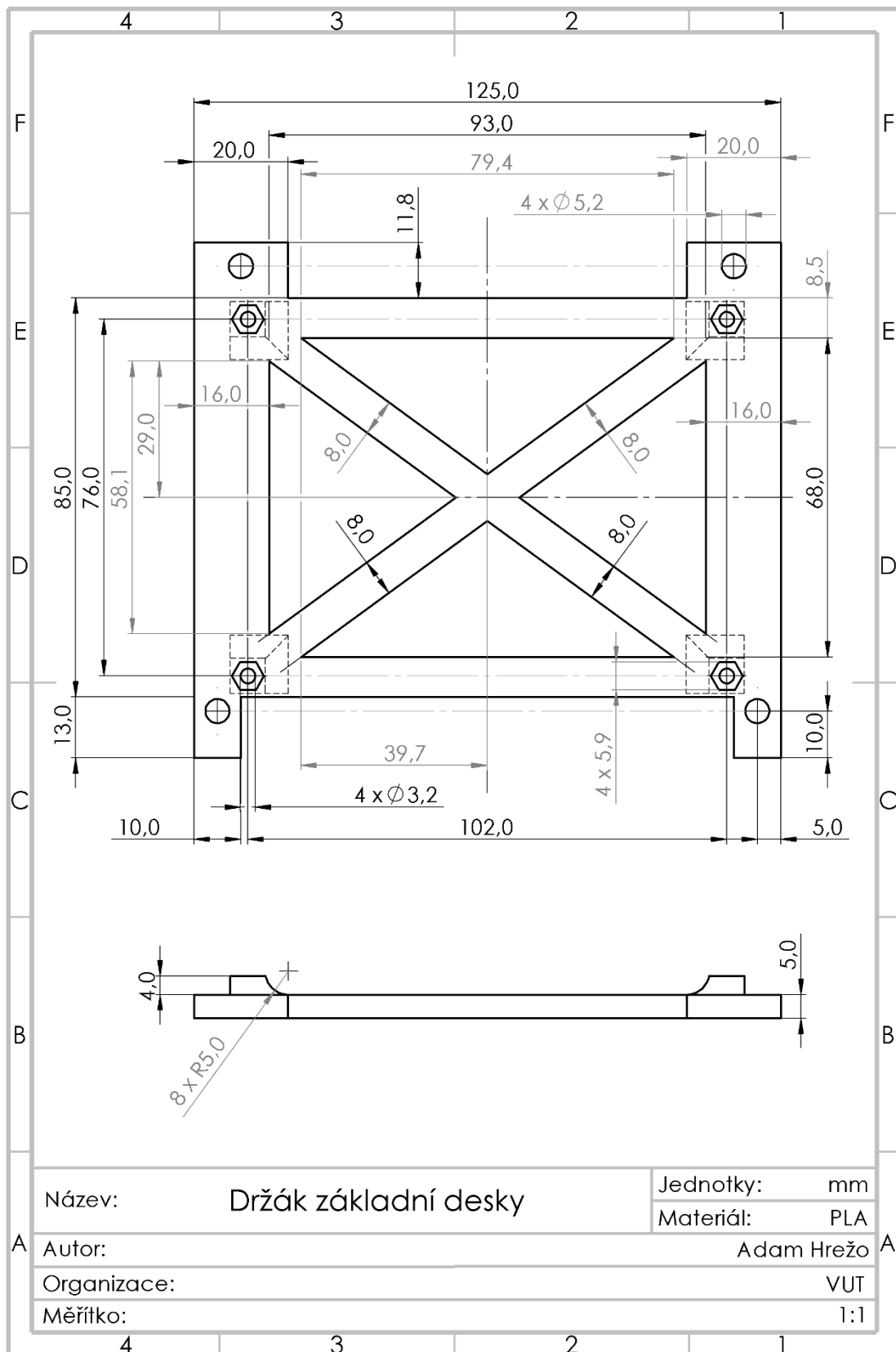
Příloha W - Držák mikropsínače



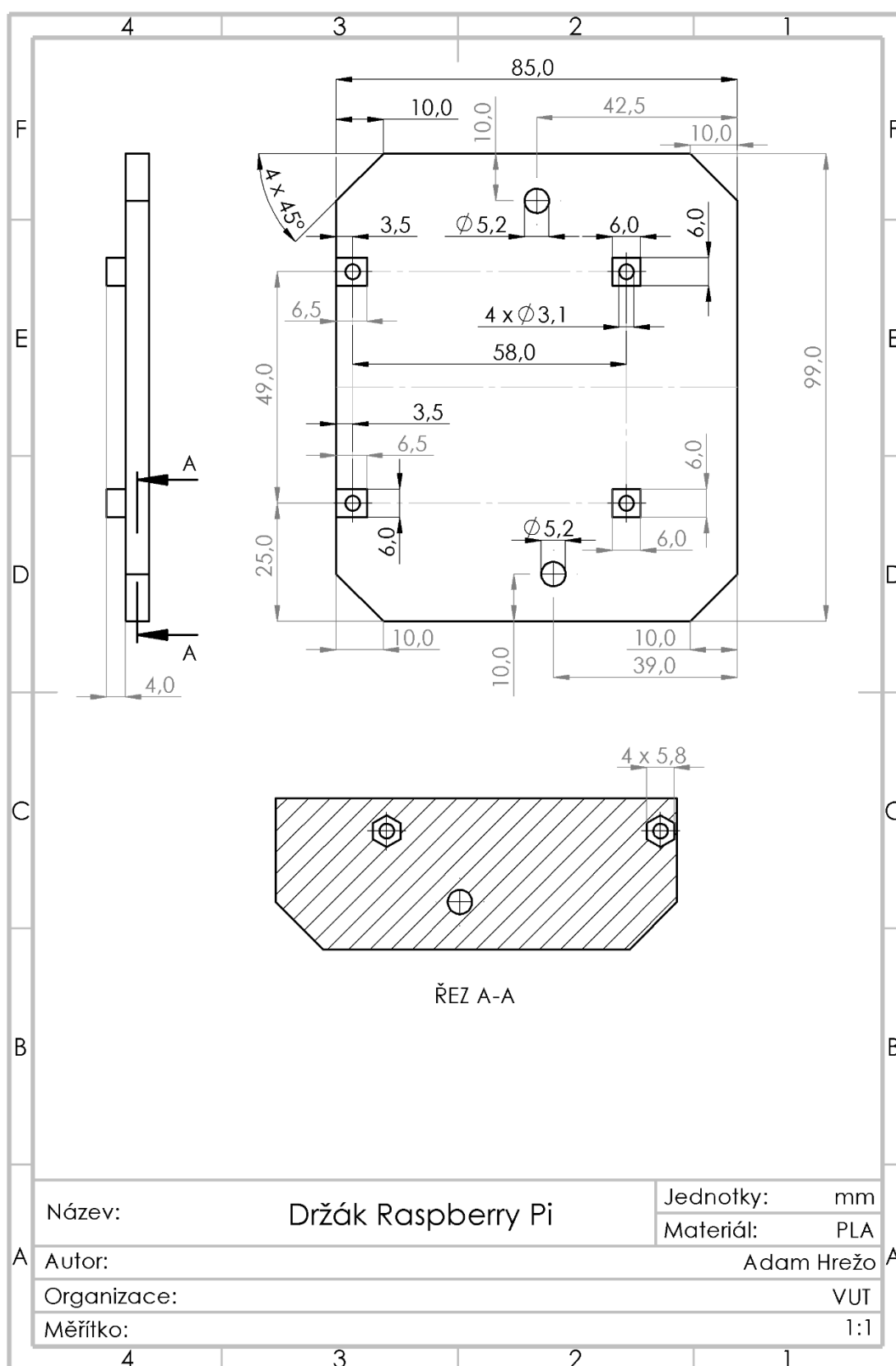
Příloha X - Držák měniče pro kompresor



Příloha Y - Držák základní desky



Příloha Z - Držák Raspberry Pi



Příloha AA - Chlazení driverů

