ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA PEDAGOGICKÁ
KATEDRA MATEMATIKY, FYZIKY A TECHNICKÉ VÝCHOVY

VÝTISKY NA 3D TISKÁRNĚ A JEJICH MECHANICKÉ VLASTNOSTI

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Pavel Honzík

Technická výchova se zaměřením na vzdělávání

Vedoucí práce: Mgr. Jan Fadrhonc, Ph.D.

Plzeň, 2023

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

V Plzni dne ……

.....

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Mgr. Janu Fadrhoncovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a cenné rady, které mi poskytl v průběhu jejího zpracování. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Janu Krotkému, Ph.D. a panu Mgr. Pavlu Mocovi za podporu při realizaci praktické části této diplomové práce.

1 OBSAH

ÚVOD **6**

2 3D TISK **7**

3 VYBRANÉ TECHNOLOGIE 3D TISKU **10**

3.1 SLA - STEREOLITHOGRAPHY 10
3.2 DLP - DIGITAL LIGHT PROCESSING 11
3.3 SLS – SELECTIVE LASER SINTERING 11
3.4 LOM - LAMINATED OBJECT MANUFACTURING 11
3.5 FDM/FFF - FUSED DEPOSITION MODELING/ FUSED FILAMENT FABRICATION 12
3.5.1 Rozdělení tiskáren FDM/FFF podle pohybu ve 3D prostoru 13
3.5.2 Části Tiskárny pro technologii FDM/FFF 13
3.5.3 Tisk z kovu pomocí technologie FDM/FFF 19

4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO 3D TISK **21**

4.1 PLA 21
4.2 PETG 21
4.3 ASA 22
4.4 PC BLEND 23
4.5 HIPS 24

5 VYBRANÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLŮ **25**

5.1 KOMPRESNÍ TEST 25
5.2 ZKOUŠKA OHYBEM 25
5.3 TEST TVRDOSTI MATERIÁLŮ – BRINELLŮV TEST 26

6 PRAKTICKÁ ČÁST **28**

6.1 VÝBĚR MATERIÁLŮ PRO TESTOVÁNÍ 28

7 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU **30**

7.1 VYTVOŘENÍ 3D MODELŮ PRO TESTOVÁNÍ 30
7.1.1 Kompresní test 30
7.1.2 Ohybový test 33
7.2 PŘÍPRAVA 3D MODELŮ PRO TISK 36
7.3 CHARAKTERISTIKA TISKÁRNY 37
7.4 NASTAVENÍ PARAMETRŮ V PROGRAMU PRUSASLICER VE VERZI 2.5.0 39
7.4.1 Porovnání úspory manipulačního času 40
7.4.2 Výpis globálního nastavení pro porovnávané nastavení tisku vzorků 40
7.5 NASTAVENÍ TISKU A POČET TISKNUTÝCH VZORKŮ 41
7.5.1 PLA 41
7.5.2 PETG 41
7.5.3 ASA 42
7.5.4 ABS 42
7.5.5 Zdůvodnění výběru tiskových nastavení 43

8 TESTOVÁNÍ **45**

8.1 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ GUNT WP 300 (20 KN) 45
8.2 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU NA TESTOVACÍM ZAŘÍZENÍ 46
8.2.1 Kompresní test 47
8.2.2 Ohybový test 48
8.2.3 Test tvrdosti podle Birnella 49
8.3 PC PROGRAM GUNT (SYSTEM FOR DATA ACQUISITION) 49
8.4 PRŮBĚH TESTOVÁNÍ 51
8.5 NÁVRH VYLEPŠENÍ ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ GUNT WP 300 52

9 VÝSLEDKY VÝZKUMU 56
9.1.1 Ověření věrohodnosti dat 56
9.2 Kritérium 1 – Porovnání množství výplně v rámci jednoho materiálu 58
9.2.1 PLA - (výplň Gyroid) 58
9.2.2 PETG - (výplň Gyroid) 64
9.2.3 ASA - (výplň Gyroid) 68
9.2.4 ABS - (výplň Gyroid) 71
9.3 Kritérium 2 – Porovnání materiálů mezi sebou 76
9.3.1 80% výplň (Gyroid) 76
9.3.2 50% - výplň (Gyroid) 77
9.3.3 10 %- výplň (Gyroid) 77
9.4 Kritérium 3- Porovnání vzoru výplní u jednoho materiálu 78
9.4.1 70% - výplň (Gyroid)/(Mřížka) 78
9.4.2 50% - výplň (Gyroid)/(Mřížka) 79
9.5 Kritérium 4 – Porovnání vzoru výplní mezi testovanými materiály 80
9.5.1 80% - výplň (Mřížka) 80
9.5.2 50% - výplň (Mřížka) 81
9.6 Kritérium 5 - Ohybový test 81
9.7 Kritérium 6 – Nastavení perimetrů výtisku 82
10 ZÁVĚR 86
11 RESUMÉ 87
11.1 Summary 87
SEZNAM LITERATURY 88
SEZNAM OBRÁZKŮ 92
SEZNAM TABULEK 93
SEZNAM GRAFŮ 95

ÚVOD

3D tisk je v současné době stále se rozšiřující technologií, která nachází své uplatnění v mnoha směrech, jako je třeba zdravotnictví, automobilový průmysl, letectví nebo architektura. V těchto odvětvích je zpravidla potřeba dosáhnout určitých mechanických vlastností. Tímto tématem se v naší práci budeme zabýv.

Hlavním cílem práce je vytištění testovacích vzorků z materiálu PLA, PETG, ABS, ASA, HIPS a PC, které následně podrobíme vybraným mechanickým zkouškám na testovacím zařízení GUNT WP 300.

V první části práce popíšeme jednotlivé technologie 3D tisku s jejich aktuálním využitím včetně nových trendů. Dále popíšeme mechanické vlastnosti vybraných materiálů pro 3D tisk, které v další části práce podrobíme testování.

Součástí praktické části této práce je i detailně popsaná obsluha testovacího zařízení GUNT WP 300, které může posloužit jako návod při manipulaci s ním. V praktické části také uvedeme několik pokročilých funkcí v programu PrusaSlicer i s ohledem na úsporu času tisku a obsluhy zařízení. Na testovacím zařízení zrealizujeme několik experimentů – kompresní test a ohybový test. Výsledky z těchto testů v závěrečné kapitole zhodnotíme a shrneme.

2 3D TISK

3D tisk, známý také jako aditivní výroba, je moderní technologie, která umožňuje vytvářet fyzické objekty tím, že se vrstva po vrstvě nanáší materiál na základě digitálního modelu připraveného ve speciálním programu, který se nazývá Slicer. Shahrubudin (2019) ve svém článku uvádí, že se jedná o velmi rychle se rozvíjející technologii. S tímto tvrzením musíme naprosto souhlasit. V posledních několika letech se technologie 3D tisku stala součástí běžného života. Pro velké množství žáků základní školy je to věc, kterou již běžně používají jako doplněk výuky ve velmi širokém spektru předmětů. Na tom má nemalý podíl Josef Průša, který se svojí firmou oblast školství velice podporuje, převážně programem Průša pro školy. Zároveň je 3D tisk už tak dostupný, že se jedná o další spotřebič, který se díky svojí popularitě dostává do domácností.

Tato technologie nabývá na popularitě v mnoha průmyslových odvětvích, zdravotnictví, architektuře, automobilovém průmyslu, letectví a mnoha dalších.

Nespornou výhodou 3D tisku je, že různé speciální díly a modely, které by se běžně sháněly velmi těžce, se s 3D tiskárnou dají vyrobit během chvilky. Vše si můžeme jednoduše přizpůsobit našim požadavkům a potřebám. Hlavně ve firmách se pořízení 3D tiskárny i přes větší počáteční investici rychle vrátí. Zbytkový a nevyužitý materiál se dá recyklovat a šetříme tak životní prostředí (Technologiebudoucnosti.cz [online]).

V posledních letech se využívání 3D tiskáren těší veliké oblibě. Nepoužívají se jen ve firmách, ale i k soukromým „domácím“ účelům.

Velký úspěch mají 3D tiskárny ve zdravotnictví. Pacientovi umožňují vytvořit např. protézu nebo implantát na míru. Výhodou je krátká výrobní doba. Na 3D tiskárně se dají vytisknout různá nářadí a nástroje, studijní pomůcky např. lidské orgány, různé předměty do domácnosti jako jsou třeba talíře, květináče, hračky pro děti, držáky na kartáčky a ručníky, klíčenky, vázy, krabičky, šperky apod. V podstatě cokoliv nás napadne. Kromě výše zmíněných předmětů je možné na 3D tiskárnách vytisknout i jídlo. Tiskne se pochopitelně z jedlého materiálu. Toto se často využívá v cukrářství, kde se tisknou různé čokoládové dekorace, dorty a různé originální modely (Premo.cz [online]).

Jak jsme již zmiňovali, velký úspěch má 3D tisk ve zdravotnictví, a to zejména proto, že díly bývají tvarově náročné a je potřeba, aby výsledný model byl velmi přesný. Je možné vytisknout třeba kostní implantáty, části páteře i zubní korunky. Kromě zdravotnictví je také

3D tisk rozšířen v automobilovém a leteckém průmyslu, kde se tisknou např. části motorů. Cílem je snížení celkové hmotnosti letadla, urychlení výroby a zvýšení výkonu a odolnosti letadla. U automobilů se díky vytištěným dílům snižuje spotřeba paliva. V budoucnu se dokonce plánuje tisk vesmírných raket a jejich motorů (Technologiebudoucnosti.cz [online]).

Historie 3D tisku sahá do 80. let 20. století, kdy byla vyvinuta první technologie pro aditivní výrobu. První stroje podobné 3D tiskárnám byly velká a drahá zařízení, používaná převážně ve vědeckých a průmyslových aplikacích. Postupem času se však technologie stala cenově dostupnější pro širokou veřejnost, což vedlo k rozvoji komerčního 3D tisku. (Kloski, 2017)

Princip 3D tisku spočívá v tisku objektu vrstv po vrstvě. Nejběžnější technologie 3D tisku jsou Fused Filament Fabrication (FFF) nebo také Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS) a PolyJet. U FFF/FDM je materiál ve formě taveniny stlačován tryskou a nanášen na podložku. U SLA se používá UV laser na tuhnutí tekutého fotopolymeru, zatímco u SLS se laserem nebo jiným zdrojem tepla roztavuje a svařuje prachový materiál. Oproti tomu používá PolyJet tiskovou hlavu na nanášení tenkých vrstev tekutého fotopolymeru, který je následně vytvrzen UV světlem (Kloski, 2017).

Existuje několik výhod 3D tisku. Jedna z hlavních výhod je rychlost a flexibilita ve výrobě prototypů a malosériové výroby. Díky schopnosti tisknout složité geometrie a designy lze snadno vytvářet komplexní díly, které by byly obtížné nebo nemožné vyrobit tradičními výrobními metodami. (Kloski, 2017 a Stříteský, 2019)

3D tisk také klade otázky v oblasti právního rámce a regulace, zejména ohledně duševního vlastnictví, ochrany autorských práv a certifikací pro výrobu komponentů v některých odvětvích, jako je letectví nebo zdravotnictví. Navíc, environmentální dopad 3D tisku zatím není zcela jasný, ačkoli se očekává, že 3D tisk může mít potenciál snížit množství odpadu v porovnání s tradičními výrobními metodami, zejména díky možnosti tisknout pouze potřebné množství materiálu.

Nicméně, použití plastů a dalších materiálů v 3D tisku může mít také negativní dopad na životní prostředí, zejména pokud nejsou recyklovány nebo správně likvidovány.

Vývoj 3D tisku pokračuje a přináší nové inovace a možnosti. Rozvíjí se nové materiály s různými vlastnostmi, jako jsou biodegradabilní materiály nebo materiály s vylepšenými

mechanickými nebo tepelnými vlastnostmi. 3D tisk také nachází uplatnění v medicíně, kde se využívá pro tisknutí biologických tkání a orgánů pro transplantace, což může potenciálně změnit lékařskou praxi a zlepšit životy pacientů.

Další oblastí vývoje je rozšiřování možností tisku větších objektů a větších měřítek, což by mohlo mít využití například ve stavebnictví a výrobě velkých prvků pro infrastrukturu. Taktéž se vyvíjejí nové možnosti vylepšení stávajících technologií tisku například vylepšením pro multimateriálový 3D tisk. Ten umožňuje tisknout objekty s různými materiály a vlastnostmi v jednom procesu, což posouvá možnosti a aplikace 3D tisku na novou úroveň.

Celkově lze říci, že 3D tisk je inovativní technologie s potenciálem revolučně změnit různé odvětví průmyslu a výroby. Přináší rychlost, flexibilitu, možnost personalizace a optimalizace designu a je stále více využíván ve vývoji prototypů, malosériové výrobě, medicíně, stavebnictví a dalších oblastech. Nicméně, stále existují výzvy, jako jsou cena, kvalita výstupu, environmentální dopad a právní rámec, které vyžadují další výzkum a rozvoj této technologie.

3 VYBRANÉ TECHNOLOGIE 3D TISKU

Mezi dvě nejběžněji používané technologie 3D tisku patří technologie FFF/FDM a SLA. Důvodem je přívětivá cena a možnost využití pro domácí účely. Kvůli velkému zájmu se výrobci 3D tiskáren v posledních letech snaží zaměřit převážně na běžné uživatele. (Tonerpartner.cz [online]).

V následujících kapitolách představíme vybrané technologie 3D tisku. Zaměříme se na využití technologií v praxi a jejich rychlost a náročnost obsluhy.

3.1 SLA - STEREOLITHOGRAPHY

Tato technologie patří mezi nejstarší a jednu z nejpřesnějších technologií 3D tisku. „V nádobě s tekutým polymerem (resinem) je umístěna tisková deska, jejíž úroveň proti hladině polymeru určuje výšku požadované tiskové vrstvy. Světelný paprsek (laser) vykreslí požadovaný tvar vrstvy a tím dojde k vytvrzení resinu v příslušném tvaru. Následně se tisková deska posune a světelný paprsek vykreslí a vytvrdí další požadovaný tvar“ (Abc3D.cz [online]).

Díky tomu, že jsou výtisky velmi přesné, často se využívají např. v zubním lékařství, vědě, při výzkumech, šperkařství, architektuře a v mnoha dalších odvětví (radce3D.cz [online]).

V článku na stánkách dkmp.cz (online) jsou detailně popsány dva principy, na kterých můžou být tiskárny s touto technologií založeny. „Princip 1: Pracovní plocha je na začátku úplně ponořena v nádobě s tekutým fotopolymerem. Postupně, vrstvu po vrstvě, vytvrzuje laserem vytvořené UV záření. Laser působí na pracovní plochu zespoda, skrze nádobu s fotopolymerem. Pracovní plocha se tak pohybuje směrem vzhůru, přičemž doslova vytahuje zhotovovaný model ven z nádoby.

Princip 2: V tomto případě je pracovní plocha, na kterou má být vyhotoven model, postupně ponořována do tekutého fotopolymeru. Laserový paprsek působí narozdíl od předešlého principu shora. To znamená, že se pracovní plocha na začátku procesu ponoří do hloubky o velikosti jedné vrstvy. Laserový paprsek vytvrdí fotopolymer v místech, kde má vzniknout model a poté se pracovní plocha spolu s modelem ponoří opět o velikost jedné vrstvy do tekutého fotopolymeru. Tento proces se opakuje až do úplného vyhotovení modelu.“

3.2 DLP - DIGITAL LIGHT PROCESSING

3Dtisk-online (online) uvádí, že DLP technologie je stejně jako SLA založena na pryskyřici, která je tekutá a při aktivaci UV zářením tuhne. Značnou nevýhodou těchto dvou technik je to, že pryskyřice je toxická. Není tedy vhodná pro začátečníky, kteří se s 3D tiskem teprve seznamují a také je potřeba znalostí o dodržování bezpečnosti práce. Pro někoho může být na obtíž následné odstraňování podpor po vytištění výrobku. Jak u DLP, tak u SLA jsou výhodou ostré detaily a jejich hladký povrch.

3.3 SLS – SELECTIVE LASER SINTERING

Na rozdíl od technologie FDM/FFF může SLS technologie používat jen velmi malé množství materiálů. Nejčastěji používaným materiálem pro tisk touto technologií jsou práškové polyamidy (NYLON) (cotu.cz [online]).

„Na tiskové desce je rozprostřen stavební materiál ve formě prášku. Tvar požadované vrstvy modelu je vytvrzen pomocí laseru nebo lepidla. Tisková deska se posune o úroveň definované výšky vrstvy, nanese se další vrstva prášku a laser či lepidlo vytvrdí požadovaný tvar. Tento princip je hojně využíván technologiemi SLS (selective laser sintering), CJP (color jet printing) a DMP (direct metal printing). Stavebním materiálem je dle technologie celá škála plastů, kovů a prášků na bázi sádry. Práškové plasty mají navíc tu výhodu, že jako podpůrný prostředek poslouží nepoužitý prášek mimo model. U kovového prášku by ve vyšších vrstvách hrozilo propadnutí díky hmotnosti. Je zde tedy nutné stavět kovové podpěry společně s modelem. Technologie CJP dokáže vytisknout téměř fotorealistický 3D model.“ (ABC3D.cz [online])

Nevýhodou této technologie je velmi vysoká pořizovací cena (cca 5 milionů Kč) k dubnu 2023. Na stránkách dkmp.cz (online) uvádí autor mimo vysokou cenu ještě jednu nevýhodu, a to nedokonalý povrch modelu.

Mimo speciální tisk z kovu pomocí technologie SLS se výrobci 3D tiskáren přesouvají k možnostem tisku z kovu na FDM/FFF tiskárnách. Více se o tomto tématu můžete dočíst v kapitole 3.5.3.

3.4 LOM - LAMINATED OBJECT MANUFACTURING

Jedná se o nejméně využívanou technologii 3D tisku. „Technologie LOM (Laminated Object Manufacturing) jako stavební materiál využívá zpravidla papír nebo folii. Tvar vrstvy

„tištěného“ modelu je vyříznut z materiálu nožem a následně další vrstva je přilepena na předchozí. Podání nové vrstvy materiálu je zajištěno odvinutím z role nebo podáním zezásobníku např. formátu A4, A3 apod. Po dotištění/vyříznutí vrstvy ji lze pomocí principu inkoustové hlavy obarvit a dosáhnout tak barevných efektů finálního modelu. Vzhledem k tomu, že model se skutečně netiskne, ale vyřezává, je s podivem hovořit o 3D tisku. Nicméně materiál, v roli nebo v zásobníku papíru, se bezesporu přidává. Tato technologie je rovněž aditivní a má v tomto výčtu své místo.“ (Abc3D.cz [online])

Jak je zmíněno v příspěvku na stránkách 3Dtisk-online.cz (online) mezi negativa této technologie patří např. vyšší náklady a více odpadu, než u jiných technologií. Výhodou je, že model může být potisknut jakoukoli texturou.

„Princip: Každá vrstva je vyříznuta buď z plastu, nebo z papíru a poté přilepena na plochu předchozí vrstvy. Fólie s materiálem se převijí z jedné cívky na druhou. Převíjení probíhá přes pracovní plochu, kde se vždy převíjení zastaví. Vyřízne se právě jedna vrstva, a to buď nožem a nebo laserovým paprskem. Vyříznutá vrstva se přilepí na předešlou vrstvu a proces se opakuje.“ (DKMP.cz [Online])

I přesto, že se technologie neřadí mezi nejpopulárnější a nejpoužívanější, zařadili jsme ji do našeho výběru. Důvodem je, že jsme se setkali s velmi praktickým využitím této technologie. Konkrétně se jedná o projekt Peregrinus Silva Bohemica, který mimo jiné vytvořil 3D modely historických budov právě touto technologií. Díky možnosti přidávat barevnou texturu vnikly opravdu autentické modely.

3.5 FDM/FFF - FUSED DEPOSITION MODELING/ FUSED FILAMENT FABRICATION

K nejrozšířenější technologii 3D tisku patří FDM/FFF (Fused Filament Fabrication). Tato technologie je oblíbená hlavně pro své nízké náklady, které se u těchto stolních tiskáren pohybují již od 3 000 Kč. Jako u většiny produktů ale platí, že čím dražší tiskárna bude, tím bude kvalitnější a může dosahovat lepších výsledků při tisku. Podle našeho názoru s kvalitní tiskárna dá sehnat za cenu kolem 10 000 Kč (k dubnu 2023). Tato technologie má ale i svá negativa, jako je například delší doba tisku, menší pevnost v ose Z, nebo nutnost využití dočasných podpěr pro složitější 3D objekty.

„FDM/FFF technologie tisku funguje na principu natavování materiálu, který je tiskárně dodáván nejčastěji ve formě plastové struny, takzvaného filamentu. Ten je v zásobníku 3D tiskárny umístěn na cívce, ze které si tiskárna materiál postupně odmotává a jakoby

jej „nasává“ do tiskové hlavy, ve které se taví. Tisková hlava 3D tiskárny pak vrstvu po vrstvě skládá na sebe ve fyzický 3D model, který přebírá z počítače, paměťové karty, aplikace a tak podobně. V principu je tato technologie 3D tisku velmi podobná technologii tisku inkoustových tiskáren. Stejně jako na papír vstřikuje tisková hlava velmi malé množství inkoustu, tisková hlava 3D tiskárny umisťuje roztavený materiál na podložku vrstvu po vrstvě, čímž vzniká fyzický model.“ (TonerPartner [online], 2022)

3.5.1 ROZDĚLENÍ TISKÁREN FDM/FFF PODLE POHYBU VE 3D PROSTORU

Kartézská

Jedná se o nejpoužívanější systém pohybu os u 3D tiskáren. Pohyb ve třech lineárních osách, které jsou na sebe kolmé (Kloski, 2017). U převážné většiny tiskáren tohoto typu jsou i tiskové desky a podložky pravoúhlé (Stříteský, 2019). Příkladem může být tiskárna Original Prusa Mini+ použitá pro tisk našich testovacích vzorků.

Delta

Delta je druhý nejpoužívanější typ pohybu u technologie FDM/FFF. Tisková hlava je zavěšena na třech ramenech. Konstrukce je většinou trojúhelníková a umožňuje tisknout vyšší modely. Díky této konstrukci a umístění tiskové hlavy na ramenech je možné dosahovat vyšších rychlostí při 3D tisku (Stříteský, 2019).

Polar

Poslední z možných konstrukcí pro pohyb při tisku touto technologií se nazývá Polar. Stříteský (2019) uvádí: „Tento systém je konstrukčně velmi jednoduchý, ale převedení a příprava modelu pro tisk je naopak v tomto případě poměrně komplikovaná.“

Jedná se většinou o jednoramenný systém, kde je kruhová podložka, která se při tisku otáčí a pohybuje do stran. Bukhari (2023) ve svém článku naopak uvádí výhody této technologie. Zmiňuje například, že se jedná o nejméně nákladné konstrukce oproti kartézskému a delta systému a vidí v tom budoucnost 3D tisku. Navzdory přesvědčení autora článku je světový trend alespoň prozatím rozdílný.

3.5.2 ČÁSTI TISKÁRNY PRO TECHNOLOGII FDM/FFF

Kloski (2017) uvádí, že každá FDM/FFF tiskárna se skládá z několika potřebných komponentů:

- rám – konstrukce tiskárny,

- tisková podložka,
- tisková deska,
- řídící jednotka,
- extruder,
- filament – vlákno,
- komponenty lineárního pohybu – krokové motory,
- tisková hlava,
- kalibrační sonda.

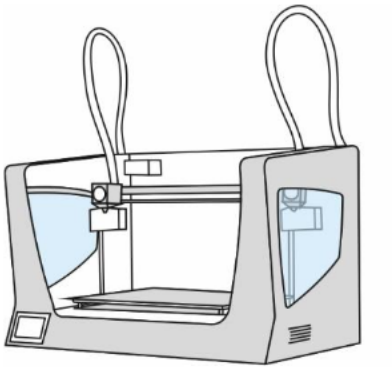
Každý výrobce má své postupy a návrhy konstrukce pro nejlepší a nejpřesnější 3D tisk. Seznam komponentů se ale až na naprosté výjimky nijak neliší.

Rám – konstrukce tiskárny

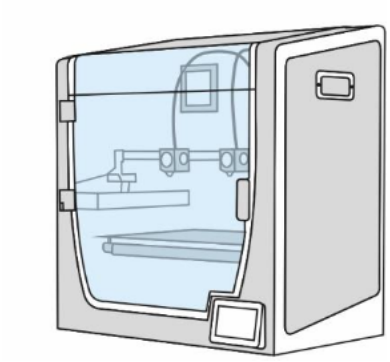
Podle Šmejckého (2021) může být konstrukce u 3D tiskáren otevřená, částečně uzavřená, nebo plně uzavřená. Velikost a materiál konstrukce rámu může mít několik podob. Využívá se kovových tyčí, kovového monolitu nebo celouzavřené polykarbonátové konstrukce se vzpěrami v osách pohybu pro uchycení krokových motorů. Tuhost, přesnost a zpracování konstrukce májí významný vliv na výslednou kvalitu tisku (Střítеský, 2019).

Každá z výše vypsaných konstrukcí má své výhody. Otevřená konstrukce umožňuje uživateli snadněji měnit, opravovat a vylepšovat komponenty. Zároveň může konstrukce tiskárny podléhat vnějším vlivům, například přenášet otřesy. To se může projevit i na kvalitě samotného výtisku. U částečně uzavřené konstrukce můžeme získat větší pevnost a tím i vyšší přesnost tisku. Uživatel se stále může dostat ke všem potřebným prvkům při závadách, nebo výměně komponentů. Poslední – uzavřená komora vyžaduje při poruchách a výměně komponentů více času, protože uživatel nejprve musí odstranit šasí tiskárny pro přístup k právě potřebným místům.

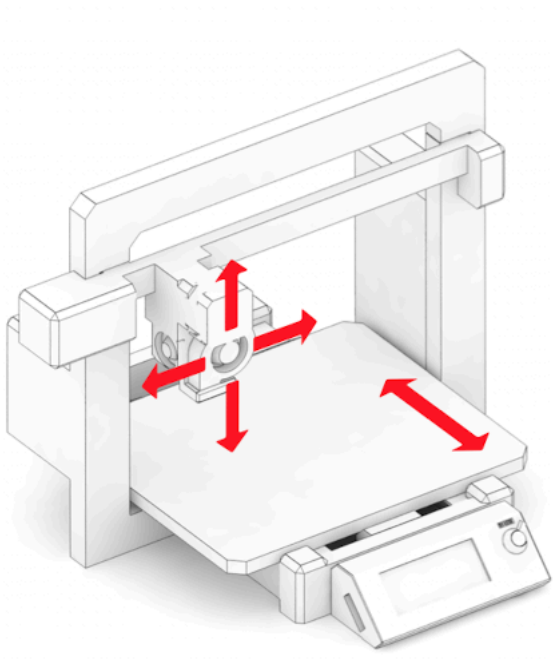
S konstrukcí tiskárny se pojí i kvalita a možnosti tisknout náročnější materiály pro tisk jako jsou NYLON a PC. Pro tisk z těchto materiálů se hodí nejvíce uzavřená tisková komora pro udržení vyšší ambientní teploty pro tisk.



Obrázek 1: Částečně uzavřená konstrukce 3D tiskárny



Obrázek 2: Uzavřená konstrukce 3D tiskárny



Obrázek 3: Otevřená konstrukce 3D tiskárny

Tisková podložka

Tisková podložka se nachází pod tiskovou deskou a slouží právě k jejímu uchycení. U většiny zařízení má funkci vyhřívání, díky čemuž se výtisky na tiskovou desku lépe přichytávají. Tisková podložka se u kartézského systému tiskáren pohybuje v ose Z nebo Y (Šmejcký, 2021).

Tisková deska

Tisková deska je část tiskárny, na kterou se přímo nanáší roztavený materiál. Je umístěna na horní straně vyhřívané tiskové podložky. Její uchycení může být různé. U některých tiskáren je deska přichycena pomocí magnetů a těsně doléhá na tiskovou podložku. U jiných je uchycení pomocí klipsen, které drží desku na místě a nemusí se úplně dotýkat vyhřívané podložky.

Řídící jednotka

„Řídící jednotka se stará o chod celé tiskárny. Její primární funkcí je čtení a zpracovávání vstupního textového souboru (G-code), podle kterého se řídí pohyby jednotlivých krokových motorů, a který ovládá nahřívání podložky a trysky.“ (Stříteský, 2019) Mimo čtení G-code souboru se pomocí řídící jednotky ovládá celá tiskárna, včetně výměny filamentu, kalibrace, nastavování teplot, pohyby os a další.

Extruder

„Extruder ukrývá ozubený mechanizmus zajišťující posunování vpřed (tisk), nebo zpětný pohyb (retrakci) filamentu - tiskové struny.“ (Šmejcký, 2021) Extruder může být buď tlačný, nebo tažný, přičemž záleží na umístění vůči tiskové hlavě. V případě tažného extruderu se nachází přímo na tiskové hlavě. Tím se zvyšuje i celková hmotnost pohybující se části tiskárny a je potřeba mít pevnější konstrukci a silnější krokové motory. Ve druhém případě (tlačný) se extruder nachází většinou v zadní části tiskárny a je umístěn přímo na konstrukci. Kvůli vzdálenosti, kterou musí vlákno urazit k tiskové hlavě, musí být motor extruderu zpravidla silnější, ale ostatní motory, které pohybují s tiskovou hlavou v osách X, Y a Z mohou být o něco menší a slabší.

Příkladem mohou být tiskárny Original Prusa MK3S+ a Original Prusa Mini+. Model MK3S+ má extruder umístěn přímo na tiskové hlavě. U modelu Mini+ se extruder nachází na zadní straně tiskárny na nosném ramenní osy Z a tlačí filament do tiskové hlavy skrz PTFE trubičku o délce 27,5 cm.

Filament – vlákno

Vlákno z termoplastu je namotané na cívce. „Vlákno slouží jako surovina, níž 3D tiskárna vytváří předměty.“ (Kloski, 2017) Pro 3D tisk existují dva průměry vláken. První má 2,85 mm a druhý 1,75 mm.

Komponenty lineárního pohybu – krokové motory

Další částí tiskáren jsou motory, které zajišťují veškeré mechanické pohyby. Pohybují s podložkou nebo s tiskovou hlavou ve všech osách a také s extruderem. „Výhodou krokových motorů je definovaná velikost kroku.“ (Střítеský, 2019)

Tisková hlava

Pojem tisková hlava pod sebou skrývá hned několik součástek, které jsou pro 3D tisk nutné. Na tiskové hlavě se nachází tryska, topné tělísko, čidlo teploty, chladič, ventilátor a kalibrační sonda.

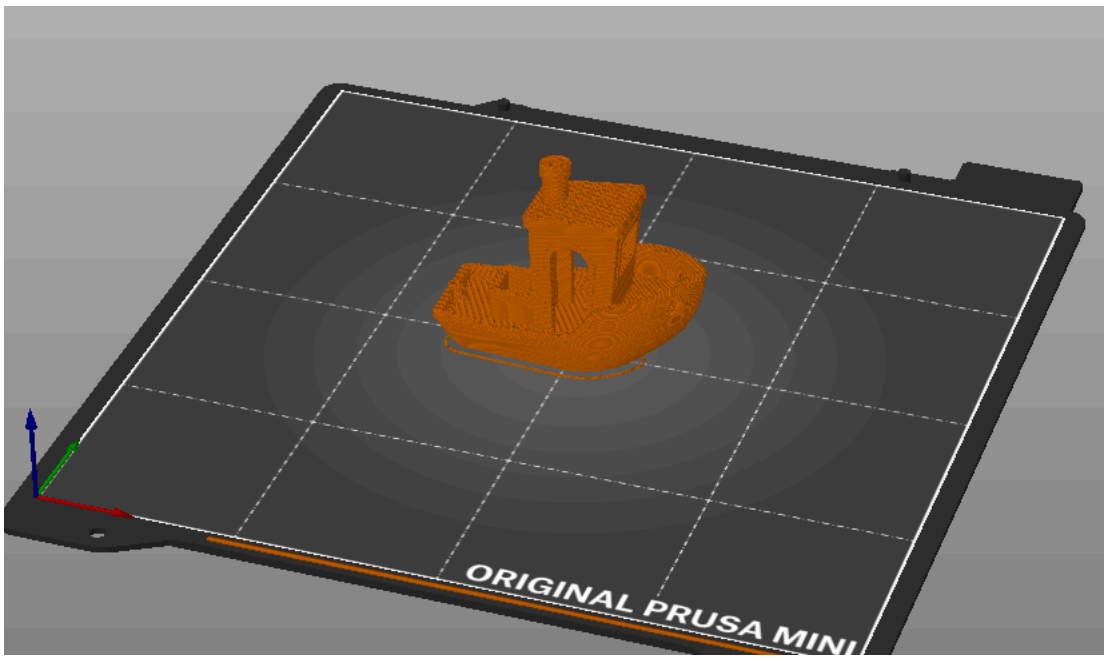
Složení a parametry jednotlivých komponentů na tiskové hlavě se liší u každého výrobce. Obecně se dá ale tvrdit, že v topném tělísku se materiál zahřívá a postupně se posunem extruderu dostává ven z trysky, která nahřátý materiál nanáší přímo na tiskovou desku, nebo na předešlé vrstvy tisknutého modelu. Díky čidlu teploty umístěném na tiskové hlavě víme aktuální teplotu nahřívání materiálu. To je pro 3D tisk velmi důležité, protože každý materiál vyžaduje jiné teploty pro tavení a možný tisk. Chladič má za úkol odvádět přebytečné teplo pryč. Snaží se zahřívat materiál v co nejmenší možné vzdálenosti, aby nedocházelo k ucpávání trysky a trubičky, kterou vlákno putuje k trysce. K činnosti chladiče přispívá přídavný ventilátor, který chladí okolí trysky a tiskové hlavy a zabraňuje přehřívání.

Poslední součástí tiskové hlavy je kalibrační sonda. Kalibrace může být kontaktní nebo bezkontaktní. Obě varianty mají svoje výhody a nevýhody. Každopádně je důležité před prvním tiskem manuálně nastavit výšku první vrstvy tisku pro dosažení dobrých výsledků.

Velmi důležitým hardwarovým nastavením u 3D tisku je vhodná volba velikosti trysky. Trysky jsou dostupné v několika velikostech. Běžné jsou velikosti trysek - 0,25 mm; 0,4 mm; 0,6 mm; 0,8 mm a 1 mm. Trysky se vyrábí z několika materiálů. Levnější trysky jsou z mosazi, dražší bývají kalené ocelové. „Tryska je část tiskové hlavy (extruderu), která určuje, jak detailní bude Váš výtisk. Použitím trysky s menším otvorem dosáhnete jemnějšího tisku, ale zároveň výrazně roste celková doba tisku. Nejpoužívanější je tryska o průměru 0,4 mm.“ (Materiálpro3D, online)

Rozdíly v detailu a čase tisku ukážeme v následujícím příkladu.

Pro porovnání použijeme 3D model *„Benchy“ – dostupný zde:* https://www.printables.com/cs/model/3161-3d-benchy/files, který se používá jako testovací a kalibrační model pro 3D tiskárny. V tabulce č. 1 je vidět čas potřebný pro tisk pomocí různého průměry trysek. Porovnání času proběhlo pro nastavení tisku na tiskárně Prusa Mini+.



Obrázek 4: Model Benchy v prostředí programu PrusaSlicer

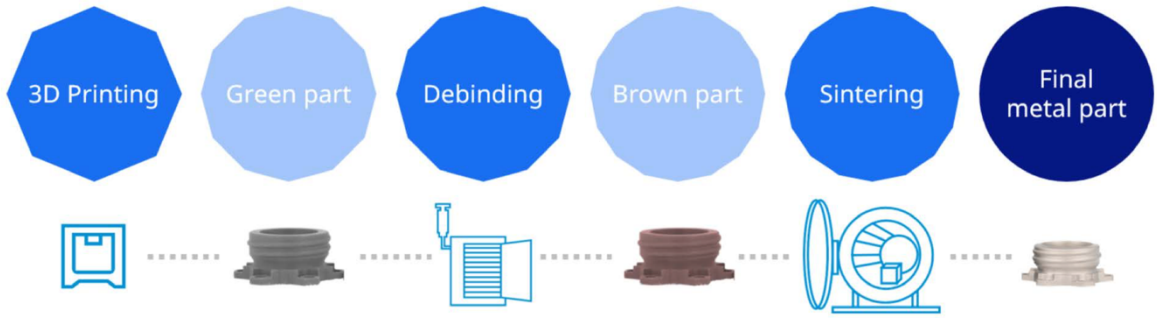
Tabulka 1: Vliv velikosti trysky na celkovou dobu tisku

Průměr trysky [mm]	čas tisku [xh xm]
0,8	25m
0,6	39m
0,4	1h 10m
0,25	3h 39m

3.5.3 TISK Z KOVU POMOCÍ TECHNOLOGIE FDM/FFF

Španělský výrobce tiskáren BCN3D přišel s přídavným kitem k tiskárně, který nazývá „Metal Pack“. Nutností je samozřejmě vlastnit podporovanou tiskárnu, která toto vylepšení umožňuje. V tomto souhrnném balíčku uživatel nalezne vše potřebné pro upgrade své tiskárny. Balíček obsahuje dvě trysky, dva filamenty se speciálním vláknem Ultrafuse, lepidlo upravené přímo pro Ultrafuse materiál a kartáče pro očištění materiálu z trysek.

S velmi podobným kitem přišel i výrobce Ultimaker. Ten přesně krok po kroku popisuje ve svém materiálu Ultimaker playbook: *„3D printing functional metal parts”*, jak přesně postupovat při tisku z kovu v domácích podmínkách na tiskárnách technologie FDM/FFF Ultimaker. Celý proces je znázorněn na obrázku č. 5.



Obrázek 5: Proces FDM/FFF tisku z kovu (Převzato z: 3D printing functional metal parts)

Prvním krokem je 3D tisk. Ten probíhá naprosto stejným způsobem jako u běžného FDM/FFF tisku. 3D model se připraví ve sliceru a model se dá tisknout. Samozřejmě je důležité správné nastavení pro tento konkrétní speciální materiál a speciální trysku. Tiskem z Ultrafuse materiálu vznikne výtisk, kterému jak Ultimaker tak BCN3D říkají *green part.* To je dáno barvou materiálu, ze kterého se tiskne. Na první podhled nevypadá tento objekt nijak rozdílně oproti klasickému výtisku například z PLA materiálu. Kovového vzhledu dosáhneme o několik kroků později. Po vytištění *green part* tedy přichází na řadu proces, kterému se říká *debinding*, což v překladu znamená odstranění termoplastického pojiva z výtisku. Tímto krokem nám výtisk změní barvu na hnědou. Proto se další části říká *brown part*. Odstranění termoplastických pojiv ještě nedodá výtisku požadovaný kovový vzhled. Proto je potřeba ještě další proces, kterému se říká *„Sintering“*. Ultimaker (2022) ve svém playbooku uvádí: „Během sintrování se zcela odstraní poslední organické materiály přítomné v *brown part*. Zbývající prášek z nerezové oceli se poté zahřeje na teplotu vyšší než 1 300 °C a prášek začne tuhnout.“

Osobně v tisku z kovu pomocí běžných tiskáren (FDM/FFF), které už jsou v dnešní době poměrně dostupná zařízení, vidíme velký potenciál. Posouvá to možnosti tisku opět o kus dál. Hlavně uživatelé, kterým nestačí vlastnosti plastových materiálů mohou již dnes sáhnout po vylepšení a tisknout doma z nerezové oceli.

Největším úskalím je sintrování, ke kterému je potřebné speciální zařízení. Sintrovací pece jsou dostupné s cenovkou kolem 150 000 korun českých. Není to tedy zařízení do každé domácnosti. Některé tiskové firmy ale nabízejí možnost zaslání vlastních výtisků z ultrafuse materiálu k sintrování přímo u nich. Zatím to pro uživatele není úplně komfortní, ale určitě to i tak ušetří nemalé peníze při tvorbě modelu jinou technologií než právě Metal FDM/FFF tiskem.

Ještě bychom měli uvést parametry a složení již několikrát zmiňovaného materiálu Ultrafuse. Ultrafuse materiál je tiskový filament složený z 90 % spékavým ocelovým práškem a z 10 % pojivými polymery. Díky tomuto složení se dá snadno tisknout a následnou úpravou dosáhnout čistě kovového výtisku. Po sintrování dosáhne výtisk velmi dobrých mechanických vlastností. Pro samotný tisk z tohoto materiálu doporučuje výrobce hodnoty teplot trysky mezi 230 °C až 250 °C. Pro tiskovou desku uvádí hodnoty mezi 90 °C a 120 °C. U teploty desky záleží na velikosti tištěného objektu. Zde platí to stejné jako u běžných plastových materiálů, čím větší objekt, tím vyšší teplota tiskové desky pro zajištění dobré adheze a zabránění kroucení a smršťování materiálu (BCN3D, online).

Využití MFDM/MFFF tisku

Rozhodně se nejedná o úplně převratnou technologii, která by měnila přístupy k výrobě. Jedná se spíše o dostupnější a levnější řešení i pro běžné uživatele při tisku a prototypování unikátních specifických dílů.

„CNC zůstane vždy špičkovou technologií pro rychlé prototypování kovových a plastových dílů. MFFF tu není proto, aby nahradil CNC nebo jiné tradiční výrobní technologie. MFFF však může hrát roli doplňkové technologie k CNC, pokud jde o malé objemy složitých dílů na míru, které mají vlastnosti vhodnější pro aditivní výrobu. To platí pro složité prvky, které by vyžadovaly velké úsilí při přípravě na víceosém CNC stroji.“ (Ultimaker, 2022)

4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO 3D TISK

V téhle kapitole navazujeme na naši Bakalářskou práci *„3D skenování a tvorba modelů na ZŠ“*. V bakalářské práci nás zajímal hlavně obecný popis materiálů PLA, PETG, ABS. Velmi stručně jsme se zaměřili i na ASA materiál a další. Diplomová práce má právě za úkol porovnat vybrané materiály mezi sebou co se týče jejich mechanických vlastností. Prvním vybraným materiálem pro 3D tisk vzorků byl materiál PLA.

4.1 PLA

Jedná se o materiál, který je pro 3D tisk využíván nejčastěji. „Je velmi pevný a snadno se z něj tiskne. Díky malé tepelné roztažnosti a prakticky nulové deformaci během tisku je ideální volbou pro velké tisky.” (Honzík, 2021) Hodí se i pro tisk drobných dílů vzhledem k nízké teplotě tání. Ačkoliv je PLA hygienicky nezávadný, nedoporučujeme jej pro tisk 3D nádob s opakovaným použitím pro jídlo a pití. Důvodem jsou mikroskopické trhliny na povrchu, kde se mohou časem usadit bakterie. Tomu lze zamezit speciální vrstvou, která povrch uzavře. Nicméně PLA není dokonalý materiál a jako každý plast má i svoje slabé stránky. Nízká teplota tisku znamená nízkou teplotní odolnost. Vytištěné díly ztrácí svou mechanickou pevnost při teplotách nad 60 °C (Prusament, [online]).

Výhodou tohoto materiálu je, že je snadno použitelný ve 3D tiskárnách, což umožňuje vysokou kvalitu tisku i v náročných detailech a skvělou laminaci tisknutého předmětu. PLA tisková struna je vyrobená z přírodních složek a je biodegradovatelně odbouratelná. Plní požadavky pro styk s potravinami (Profi-filaments.sk [online]).

Co se týče jeho mechanických vlastností, zde je jeho využití poměrně omezené. Pro jednoznačný důkaz jeho křehkosti zde uvedeme parametry z data sheetu přiloženého k materiálu od výrobce. Nutno dodat, že parametry u stejného typu materiálu od různých výrobců se mohou lišit.

Pro příklad zde uvádíme materiál PLA od českého výrobce filamentu Aurapol, s. r. o. Ten má v data sheetu pro materiál PLA (natural) uvedenou hodnotu pevnosti v tahu 50 MPa při testování podle normy ISO 527-1 (Aurapol.cz [online]).

4.2 PETG

PETG má vysokou teplotní odolnost a je možné ho využívat jak pro vnitřní, tak venkovní účely. Mezi další pozitiva patří malá tepelná roztažnost, pevnost a houževnatost. Nespornou

výhodou je také recyklovatelnost tohoto materiálu a díky tomu šetříme životní prostředí. Pokud používáme materiál v domácím prostředí, určitě oceníme, že při tisku je téměř bez zápachu (prusament.com [online]).

Jako všechny plasty i PETG má své negativa. U PETG hrozí, že bude při tisku tvořit vlásečnice, které musíme následně odstranit a je to pro nás práce navíc. Pokud chceme tisknout převisy, je potřeba vytisknout i podpěry. Při dotisknutí se model může hůře sundávat z podložky a je potřeba být opatrný, aby nedošlo k jeho poškození (prusament.com [online]).

„PETG je univerzální materiál. Výtisky z něj jsou houževnaté, vrstvy se dobře propojují, a tak si nemusíte tolik lámat hlavu s orientací modelů. Díky slušné tepelné odolnosti je možné výtisky z PETG použít i pro venkovní užití.“ (prusament.com [online]) Stejně tak portál profi-filaments.sk uvádí parametry jako na stránkách Prusament. Jedná se o pevný a houževnatý materiál, který se vyznačuje dobrou teplotní stálostí. Tento materiál díky malému smrštění při tisku je vhodný pro tisk velkých objektů. PETG je na rozdíl od jiných materiálů více odolný vůči kyselinám a rozpouštědlům a vysokým i nízkým teplotám (Profi-filaments.sk [online]).

Vlákno z PETG materiálu kombinuje vlastnosti materiálu ABS, které je silnější, odolnější teplotám, odolnější chemicky a PLA, ze kterého se velmi snadno tiskne. Adheze mezi vrstvami je obvykle vynikající, riziko zkroucení nebo výrazného smrštění není tak velké a výhodou je, že jej lze recyklovat. Mnoho výrobců a uživatelů se shoduje na tom, že nejde o nejjednodušší materiál pro tisk. Obvykle vyžaduje, abyste našli správné nastavení tiskárny. Při 3D tisku proto pravděpodobně budete muset s parametry experimentovat více než obvykle (Materialpro3D.cz [online]).

Opět si zde můžeme uvést technický parametr PETG materiálu při tahové zkoušce. Ten podle normy ISO 527 dosáhl na hodnotu 46 MPa. (Aurapol.cz [online]).

4.3 ASA

Jako kladnou vlastnost materiálu ASA můžeme uvést, že je vhodný pro venkovní prostředí a stejně jako PETG má vysokou teplotní odolnost. Můžeme tisknou detaily, aniž by se tvořily vlásečnice (stringování). Jedná se o velmi pevný a odolný materiál vůči nárazu, avšak vyžaduje vysoké teploty při tisku a silně zapáchá. Nicméně zápach je výrazně menší než u ABS, který se považuje za jeho „horšího“ předchůdce. S tímto materiálem je lepší tisknout

menší modely. Větší se častěji deformují. ASA má také tendenci pohlcovat vlhkost (Prusament.com [online]).

„Nebezpečí smršťování (warpingu) se úplně nevyhnete ani s ASA, a to zejména u rozměrnějších modelů. Dokonce i s vyhřívanou podložkou nastavenou na 110 °C se mohou velké výtisky začít kroutit a odlepovat od podložky. Kroucení je ale menší než při tisku s ABS. Tento problém lze ale eliminovat tiskem v boxu na tiskárnu nebo vysokým skirtem.“ (Prusament.com [online])

S odtržením od podložky jsme se také několikrát setkali, a to i hlavně při tisku testovacích vzorků, které budeme testovat v další části této práce.

Pro nás velmi důležitým parametrem pro použití ASA materiálu je jeho UV stabilita, jak uvádíme v bakalářské práci (Honzík, 2021). Avšak zajímají nás i mechanické vlastnosti tohoto materiál, které opět uvedeme na příkladu tahové zkoušky, kterou uvádí Prusa (online) v data sheetu k materiálu ASA podle normy ISO 527 na 40 MPa.

4.4 PC BLEND

Oproti PLA, které se začíná deformovat již okolo 55 °C, se jedná o velmi teplotně odolný materiál. Deformovat se začíná okolo 113 °C. Jeho vlastnosti jsou podobné jako u ASA. Materiál je též velmi pevný a odolný vůči nárazům. Kromě jiného má dobrou přilnavost k podložce. Bohužel při tisku větších dílů často dochází ke kroucení, proto je vhodné tisknou spíše modely menších rozměrů. Zápach materiálu není tak silný jako např. u ASA nebo ABS. Pro někoho může být překážkou jeho vyšší cena (Prusament.com [online]).

„Prusament PC Blend (polykarbonát) je filament ideální pro vysoce odolné 3D výtisky. Polykarbonáty jsou skupinou plastů, které jsou známé pro jejich pevnost, houževnatost a mechanickou a teplotní odolnost. Běžně se používají pro výrobu CD, ochranných brýlí či automobilových světlometů. Velmi špatně drží na tiskové podložce a kvůli vysoké tepelné roztažnosti se při chladnutí deformuje a praská. PC Blend doporučujeme především zkušeným 3D tiskařům. Určitě není vhodný pro začínajícího tiskaře jako první tiskový materiál. Tím by mělo být vždy PLA. Polykarbonát je vynikající plast pro tisk prototypů i funkčních věcí, tepelně namáhaných dílů a mechanicky namáhaných součástí.“ (nc.cz [online])

PC materiál se často používá i s příměsí karbonových vláken, což jeho odolnost a houževnatost posouvá ještě o něco dál. Je zde ovšem o dost vyšší pořizovací cena, která

je už i u materiálu PC blend poměrně vysoká. Opět přidáváme jeho vlastnosti v tahovém testu podle normy ISO 527, kdy je pro PC blend typická hodnota na 58 MPa. Což je podstatně více než u předchozích materiálů (Prusament.com [online]).

4.5 HIPS

Jedná se o velmi pevný a houževnatý materiál, který má dobrou teplotní stálost. V porovnání s ABS, se kterými má mnoho společných mechanických vlastností, je o něco lehčí a nemá tak velkou tendenci se smršťovat (help.prusa3D.com [online]).

„Dá se rozpustit pomocí limonenu (přesněji d-Limonene) - je proto vhodný pro tisk rozpustných podpěr u složitých modelů z ABS, ASA nebo PETG. HIPS se dá brousit, podobně jako ABS a ASA, navíc se dá přichytit k podložce pomocí ABS rozpuštěným acetonu – to ovšem není nutné pro naše tiskové pláty vzhledem k dobré přilnavosti HIPS k PEI povrchu.“ (help.prusa3D.com [online])

HIPS materiál je velmi příjemný materiál, který při vytištění působí opravdu velmi lehkým dojmem. Ovšem jeho pevnost je výrazně menší než u materiálů v předchozích kapitolách. Výrobce HIPS materiálu Fillamentum uvádí v data sheetu hodnotu pro test v tahu podle normy ISO 527 na 26 MPa. Materiál sice není oproti ostatním tak odolný, ale zase se nejvíce hodí pro tisk součástí pro elektroniku kvůli jeho výborné izolaci. (Fillamentum [online]).

5 VYBRANÉ MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLŮ

V této části kvalifikační práce popíšeme vybrané mechanické zkoušky materiálů, které zvažujeme pro následné testování vzorků v praktické části. Mezi testy, které chceme realizovat jsme vybrali kompresní test, ohybový test a test tvrdosti materiálu, kterému se jinak také říká Brinell test.

Břehálek (2016) ve své publikací uvádí: „Mechanické vlastnosti materiálů jsou prakticky čtyři (pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost), ale mechanických charakteristik, které poskytují důležité informace pro jejich použití, je mnohem více.“ Pro ověřování a zjišťování mechanických vlastností jsou používána zkušební tělesa neboli testovací vzorky, na kterých se přímo vlastnosti testují a vyhodnocují.

5.1 KOMPRESNÍ TEST

Jeden z nejzákladnějších testů materiálů je test kompresní. Při zkoušce tlakem se na vzorku materiálu vytvoří jednoosý napěťový stav. Napěťový stav vzniká působením vnějšího zatížení na vzorek pomocí tlakové síly v podélném směru. Stejně jako při jiných zkouškách (například tahových) pak dochází k rovnoměrnému normálovému rozložení napětí v průřezu zkušebního vzorku. (Mittasch, 2014)

Zkouška tlakem se používá ke stanovení pevnosti v tlaku. Pevnost v tlaku je důležitou charakteristikou materiálu, který je zatěžován tlakem. Dále lze mez kluzu v tlaku určit jako počátek plastické deformace plastového materiálu, na kterém nelze určit pevnost v tlaku.

Při zkoušce tlakem se v geometricky definovaném vzorku vytvoří jednoosý stav napětí. Tento stav napětí je vyvolán vnějším zatížením vzorku v podélném směru tlakovou silou. Pak převládá rovnoměrné normálové rozložení napětí ve zkušebním průřezu vzorku.

Za účelem stanovení pevnosti materiálu se zatížení vzorku pomalu a plynule zvyšuje, dokud vzorek nepraskne. Maximální zkušební zatížení, které je testovací vzorek schopen vydržet je měřítkem pevnosti materiálu. Takzvaná pevnost v tlaku se určuje z maximálního zkušebního zatížení silou F [kN] a velikosti deformace vzorku s [mm] (Běhálek, 2016 a Mittasch, 2014).

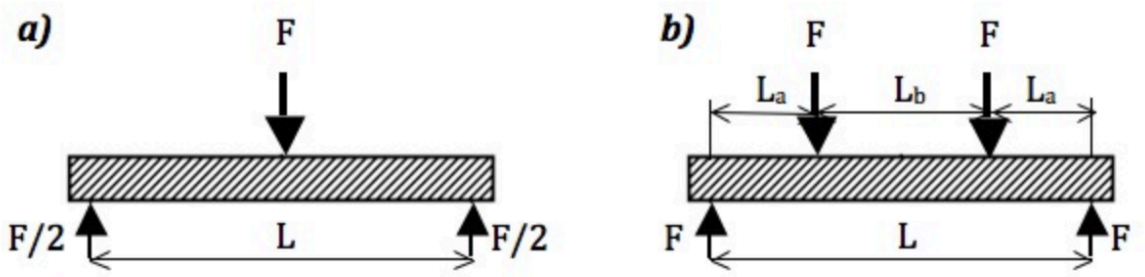
5.2 ZKOUŠKA OHYBEM

Zkouška ohybem testuje pružnou deformaci ohýbaného vzorku. Pružná tažnost je určena modulem pružnosti materiálu. Modul pružnosti lze určit na základě zkoušky ohybem.

Výhodou zkoušky ohybem je, že při stejném zatížení dochází v oblasti pružnosti k podstatně větší deformaci, kterou lze snadněji a přesněji změřit, než je tomu u klasické zkoušky tahem. (Mittasch, 2014)

„Ohybové charakteristiky polymerů jsou důležité při namáhání polymerních dílů v ohybu, což je velice časté namáhání plastů (nosníky, střešní konstrukce z laminátů, obkladové materiály a další).“ (Běhálek, 2016)

Při zkoušce ohybem se testovaný vzorek upevňuje na dvě podpěry, které od sebe mohou mít různou vzdálenost a tlačí se na středový bod testovaného vzorku určitou silou. Tomuto systému se podle Běhálka (2016) říká tříbodový ohyb. Existuje ale ještě jeden systém – čtyřbodový. U čtyřbodového systému působí síla na dvou místech v určité vzdálenosti od podpěr. Jak oba systémy testování ohybem vypadají můžete vidět na obrázku č. 6.



Obrázek 6: Ohybový test
a) tříbodový ohyb; b) čtyřbodový ohyb
Převzato z : Polymery (Běhálek, 2016)

5.3 TEST TVRDOSTI MATERIÁLŮ – BRINELLŮV TEST

„Jednou ze základních mechanických vlastností je tvrdost materiálu. Definice tohoto výrazu se dá popsat jako odolnost materiálu proti vniknutí cizího tělesa.” (Seidlová, 2018) „Zkouška vznikla roku 1900, kdy byla prezentována švédským inženýrem J. A. Brinellem na druhém mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálu v Paříži.“ (Urbášek, 2017)

Principem zkoušky je vtlačení kuličky do materiálu předem stanovenou silou, kdy se následně měří velikost vytvořené prohlubně. (Urbášek 2017, Seidlová 2018)

Běhálek (2016) tento test definuje přesněji: „Principem metody je vtlačování kuličky o průměru 5 mm (vyrobené z kalené oceli) do zkušebního tělesa. Zkoušené těleso se nejprve definovaně zatíží počátečním zatížením (9,8 N) a následně se aplikuje přídavné zatížení (Fm = 49 N, 132 N, 358 N nebo 961 N) tak, aby výsledná hloubka vtlačení (h) byla

v rozsahu 0,15 mm až 0,35 mm, zajišťující stejný povrchový tlak. Tvrdost vtlačením kuličky (H) se potom stanoví na základě hloubky vtlačení odečtené po 30 s dle rovnice na obrázku č. 7, tj. z rozdílu hloubky vtlačení při počátečním zatížení a následně po 30 s aplikace přídavného zatížení.“

$$H = 0{,}0535 \cdot \frac{F_m}{h - 0{,}46} \; [-]$$

Obrázek 7: Rovnice pro výpočet tvrdosti materiálu - Brinellův test

Tvrdost podle Mittasch (2014) označuje mechanickou odolnost, která zabraňuje vniku jiného tělesa. Při testu tvrdost nedochází zpravidla k celkové deformaci celého vzorku. Testují se i jen jednotlivé části větších zařízení.

6 PRAKTICKÁ ČÁST

Pro praktickou část této diplomové práce jsme zvolili tři materiálové zkoušky popsané v kapitole č. 5. První z nich je kompresní test, kde testujeme pevnost, houževnatost a odolnost 3D výtisků vytištěných na 3D tiskárně technologií FFF/FDM. Druhým, námi vybraným testem, je ohybový test a třetím je materiálový test tvrdosti – Brinellův test. Testované vzorky jsme vytvářeli v souladu s požadavky zařízení, na kterém testy probíhaly. Jedná se o zařízení na testování materiálových zkoušek značky GUNT, přesněji tedy model GUNT WP 300.

Mezi hlavní kritéria vzorků jsme volili nejpoužívanější nastavení 3D tisku, jako je množství výplně, druh výplně, počet perimetrů a počet horních a spodních vrstev. Od každého testovaného vzorku jsme vytiskli nejméně 2 kontrolní vzorky pro zajištění objektivních výsledků testování. Detailní parametry výtisků jsou popsány v kapitole 7.5.

6.1 VÝBĚR MATERIÁLŮ PRO TESTOVÁNÍ

Při výběru testovaných materiálů byla zvážena náročnost tisku, popularita materiálu, ale také cena materiálu. Mezi vybrané materiály jsme zvolili tyto: PLA, ABS, ASA a PET-G. Tyto čtyři materiály jsou standardem u 3D tisku technologií FFF/FDM. S tiskem z PLA materiálu začíná každý 3D tiskař, protože je velmi snadné z něj tisknout. Nepodléhá tolik tepelnému smršťování, nepotřebuje žádné specifické podmínky prostředí pro tisk a při zahřívání při tisku nevytváří žádný odpudivý toxický zápach. Proto je ideální volbou pro začátečníky, ale i zkušené tiskaře. V našem porovnávání si tedy určitě zaslouží místo. Další z testovaných materiálů – ABS – je vlastně úplně první materiál, který se pro 3D tisk s technologií FFF/FDM začal používat. Dalším materiálem v našem výběru byla ASA. Jedná se o velmi podobný materiál ABS s vylepšenými parametry. Jedním z hlavních vylepšení ASA materiálu oproti ABS je odolnost vůči UV záření. Josh Matte (2017) ve svém článku uvádí jak on sám testoval dvě ptačí budky vytisklé z ABS a ASA materiálu a sledoval jejich změnu ve venkovním prostředí. ASA se podle jeho výsledků téměř nezměnila, zatímco ABS vystavené UV záření velmi zežloutlo a změnilo své vlastnosti. Posledním z námi testovaných materiálů je PET-G. PET-G má zajímavé mechanické vlastnosti, proto jsme jej chtěli porovnávat s ostatními materiály. V dnešní době se používá i pro tisk dílů, ze kterých se sestavují 3D tiskárny. Pro tisk není potřeba mít vyhřívanou komoru. Postačí otevřená konstrukce tiskárny a PET-G se dobře tiskne.

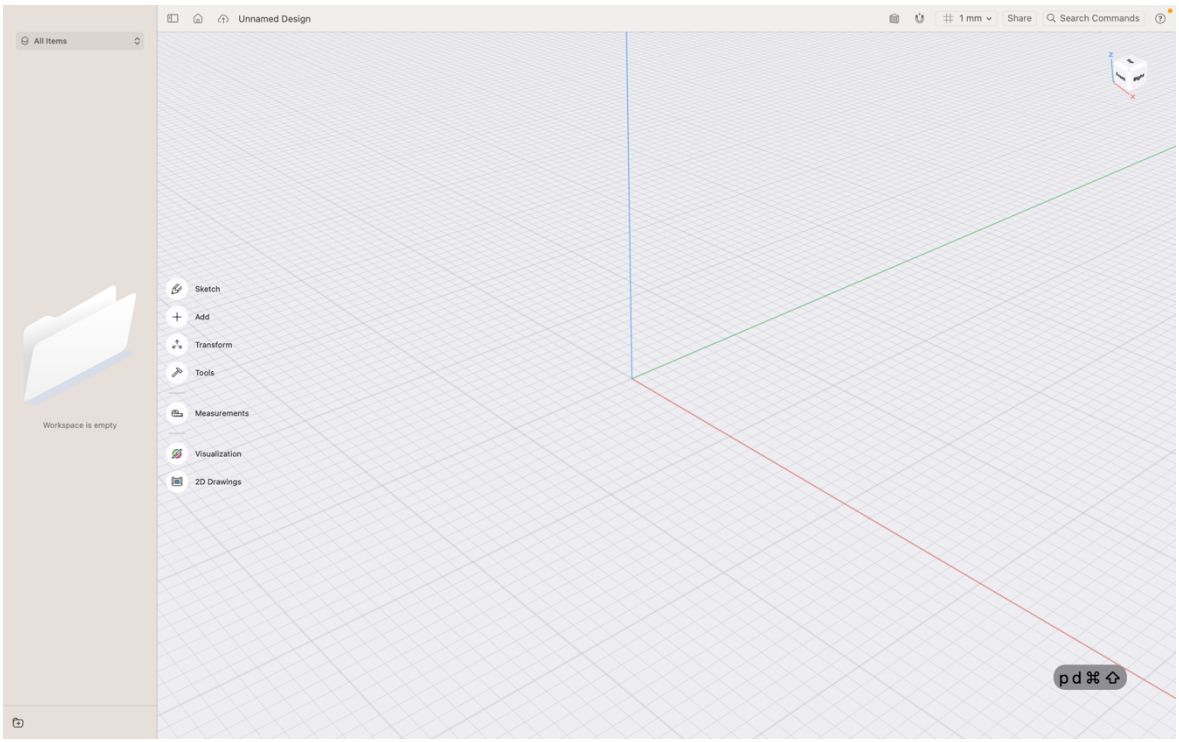
V přípravě vzorků jsme uvažovali ještě další dva materiály – PC (polykarbonát) a HIPS (high impact polystyren). Při prvních zkušebních pokusech testování jsme se je snažili porovnávat. PC je ale náročný na tisk a nám dostupná tiskárna umožňuje dosáhnout na vyhřívané podložce pouze 100 °C. Pro polykarbonát je doporučená hodnota teploty podložky 110 °C (±10 °C). Kvůli náročnosti tisku a velmi odlišným mechanickým vlastnostem materiálů jsme se rozhodli tento materiál vynechat. Materiál HIPS se naopak tiskne velmi dobře, má krásný matný povrch. Zde byl problém opačný. Jedná se o velmi málo pevný materiál, který se používá převážně pro tisk podpěr pro materiál ABS a ASA, protože je rozpustný v lemonesolu. Kvůli těmto důvodům jsme tyto dva materiály do testování nezařadili.

7 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Pro realizaci experimentu jsme si museli nejprve vytvořit digitální 3D model podle požadavků testovacího zařízení GUNT WP 300. Rozměry a tvar testovacích vzorků jsme vyčetli z technické dokumentace přiložené k zařízení WP 300. Pro kompresní test uváděl výrobce zařízení tvar válce o rozměrech vzorku 35 mm x 20 mm (výška x šířka). Pro test ohybový se jedná o kvádr o výšce 10 mm a délce 120 mm, 220 mm nebo 320 mm.

7.1 VYTVOŘENÍ 3D MODELŮ PRO TESTOVÁNÍ

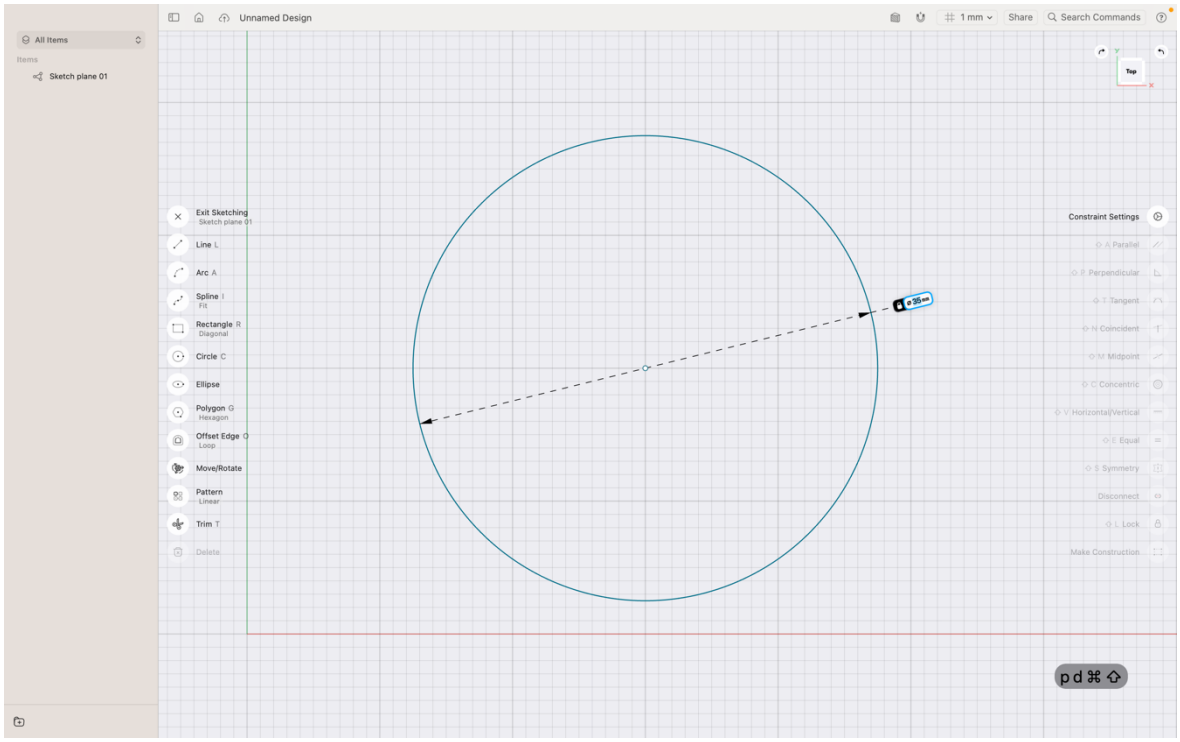
Digitální 3D model jsme vytvářeli v programu Shapr3D, podle předem zjištěných rozměrů.



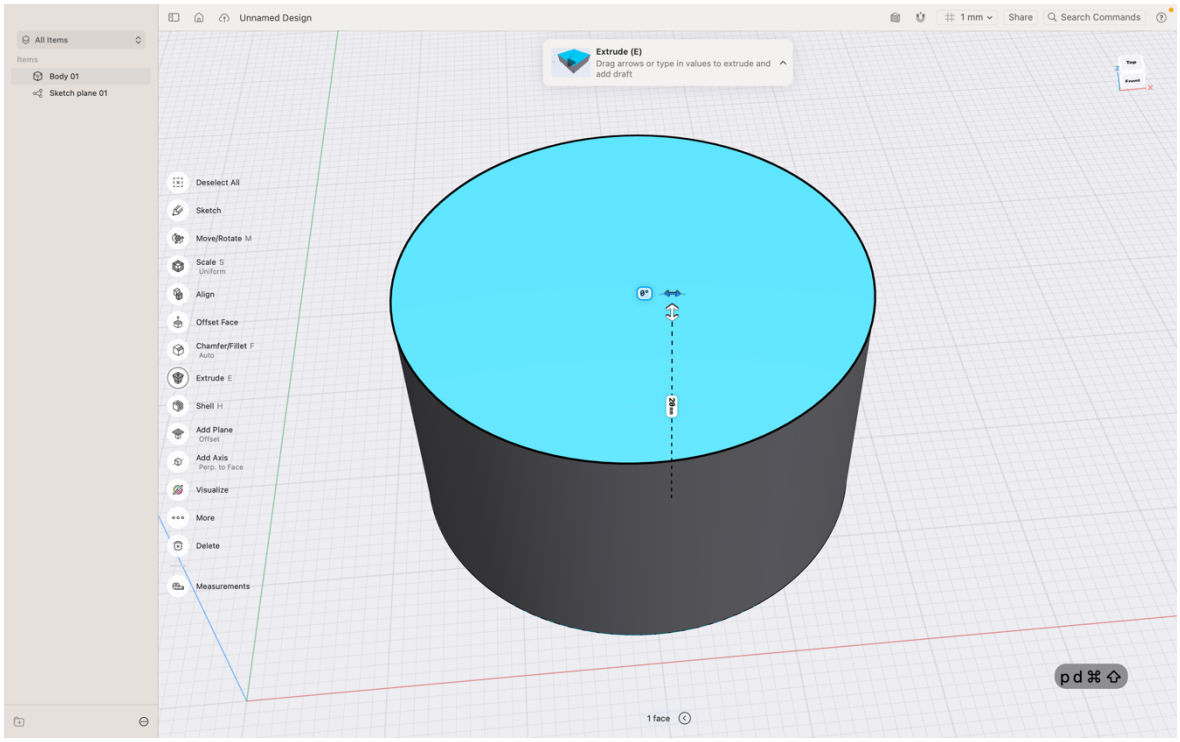
Obrázek 8: Prostředí programu Shapr3D

7.1.1 KOMPRESNÍ TEST

Pro kompresní test jsme vytvořili trojrozměrný válec o předem zjištěných rozměrech. Nejprve jsme si v programu Shapr3D připravili kružnici o průměru 35 mm a následně jsme pomocí funkce *Extrude* nastavili výškovou kótu na 20 mm.

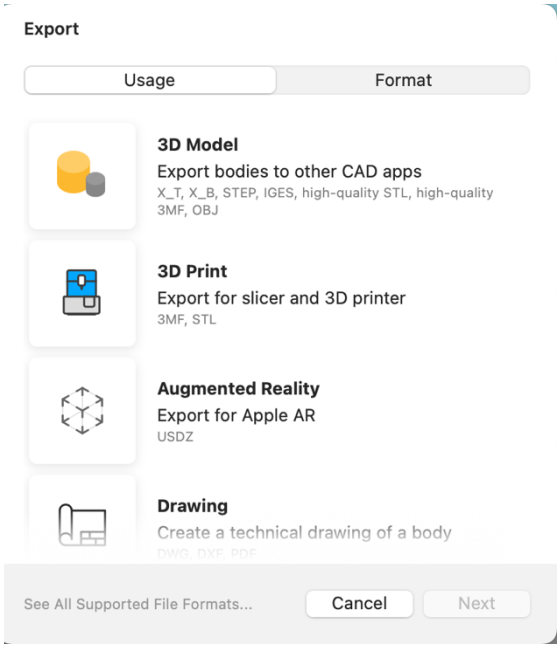


Obrázek 9: 2D nákres – funkce Circle

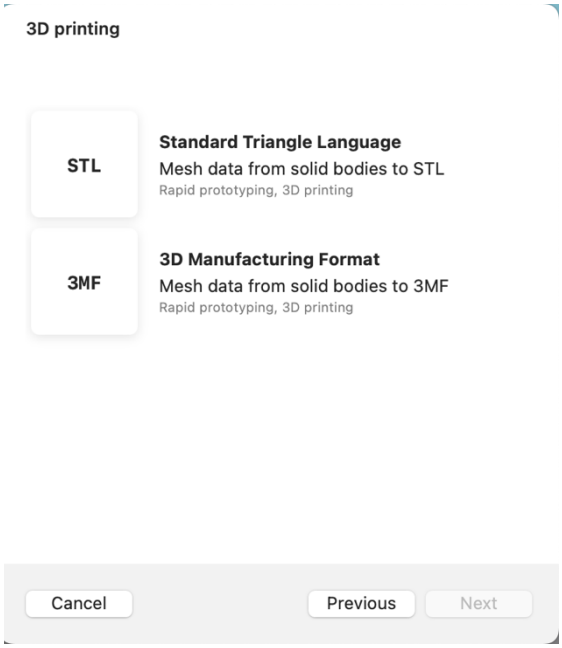


Obrázek 10: Funkce extrude

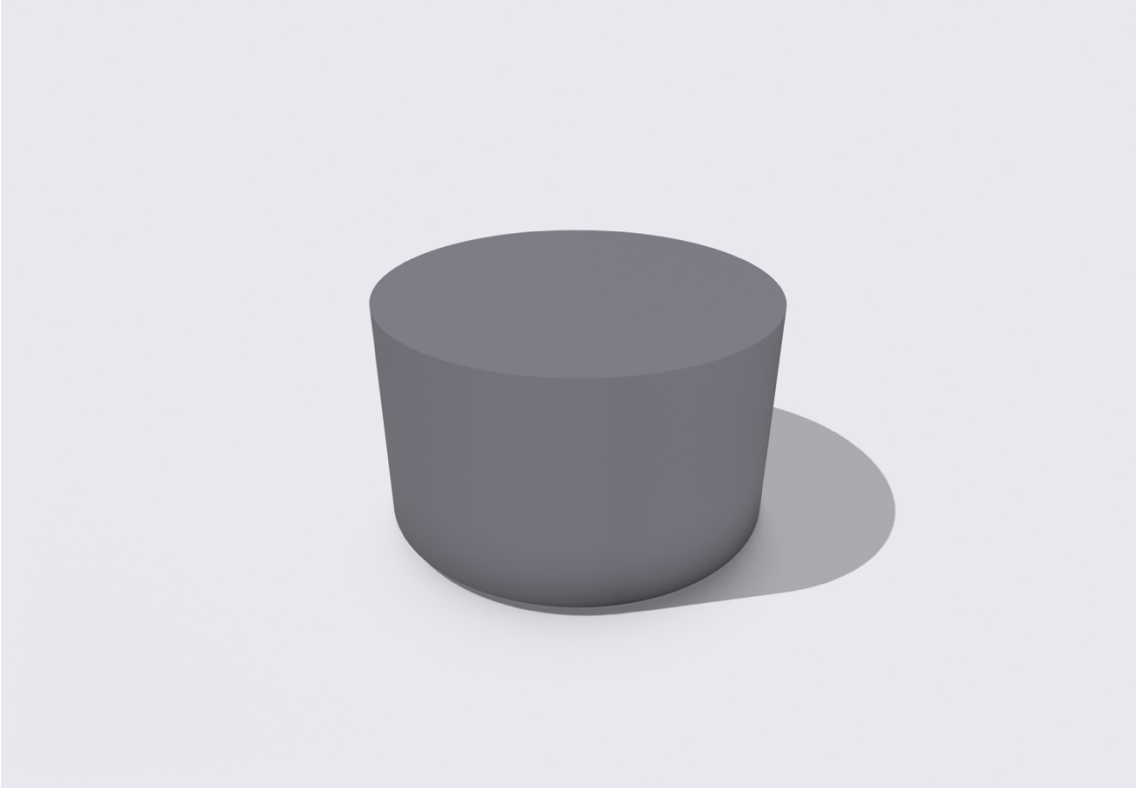
Vytvořený model jsme následně vyexportovali ve formátu .STL, který se používá pro modely, které chceme tisknout na 3D tiskárně.



Obrázek 11: Náhled možnosti exportu z programu Shapr3D



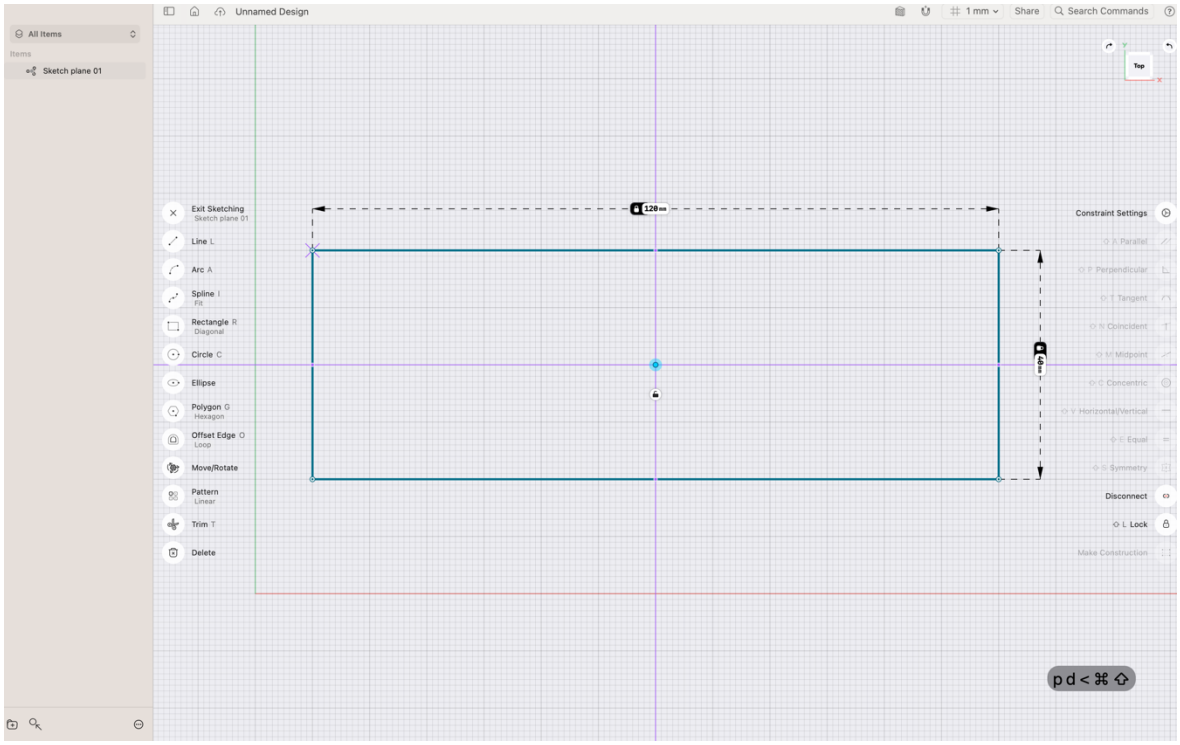
Obrázek 12: Export modelu pro 3D tisk



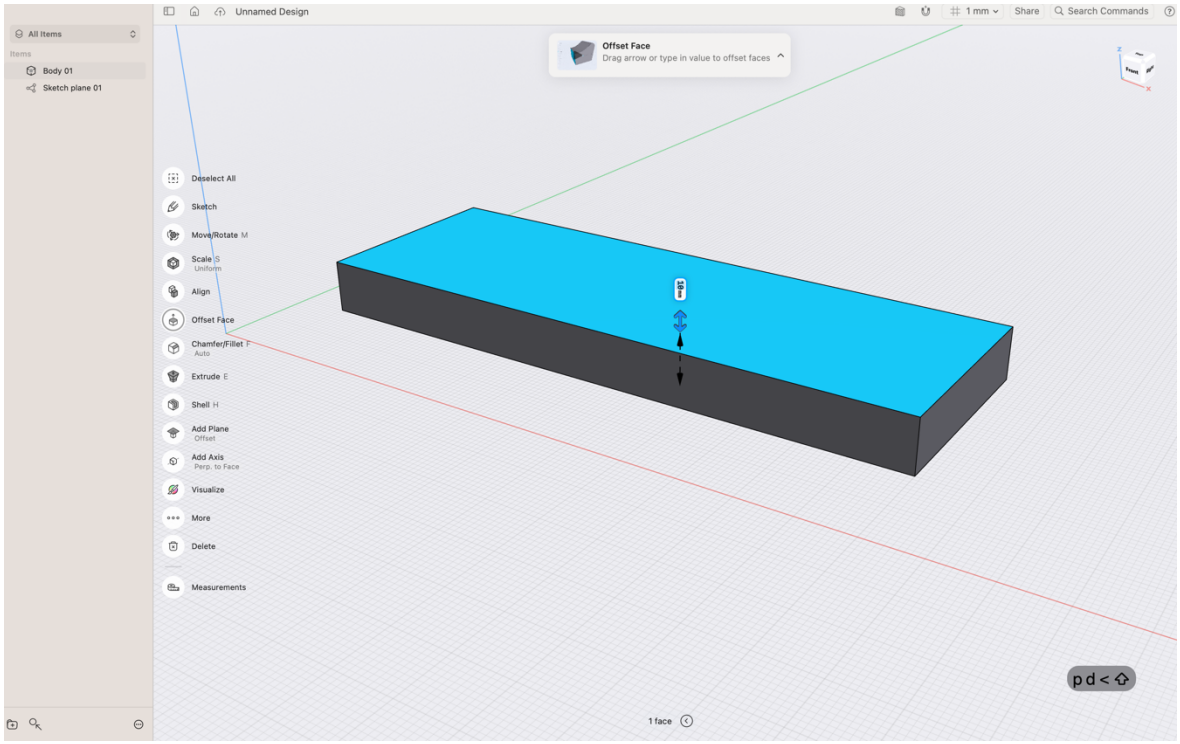
Obrázek 13: Náhled vyexportovaného 3D modelu – Kompresní test

7.1.2 OHYBOVÝ TEST

Testovací zařízení umožňuje testovat ohyb na vzorcích o velikosti 320 mm, 220 mm a 120 mm. My jsme zvolili nejmenší rozměr (120 mm) z důvodu omezené velikosti tiskové desky na nám dostupné 3D tiskárně (Prusa Mini+).



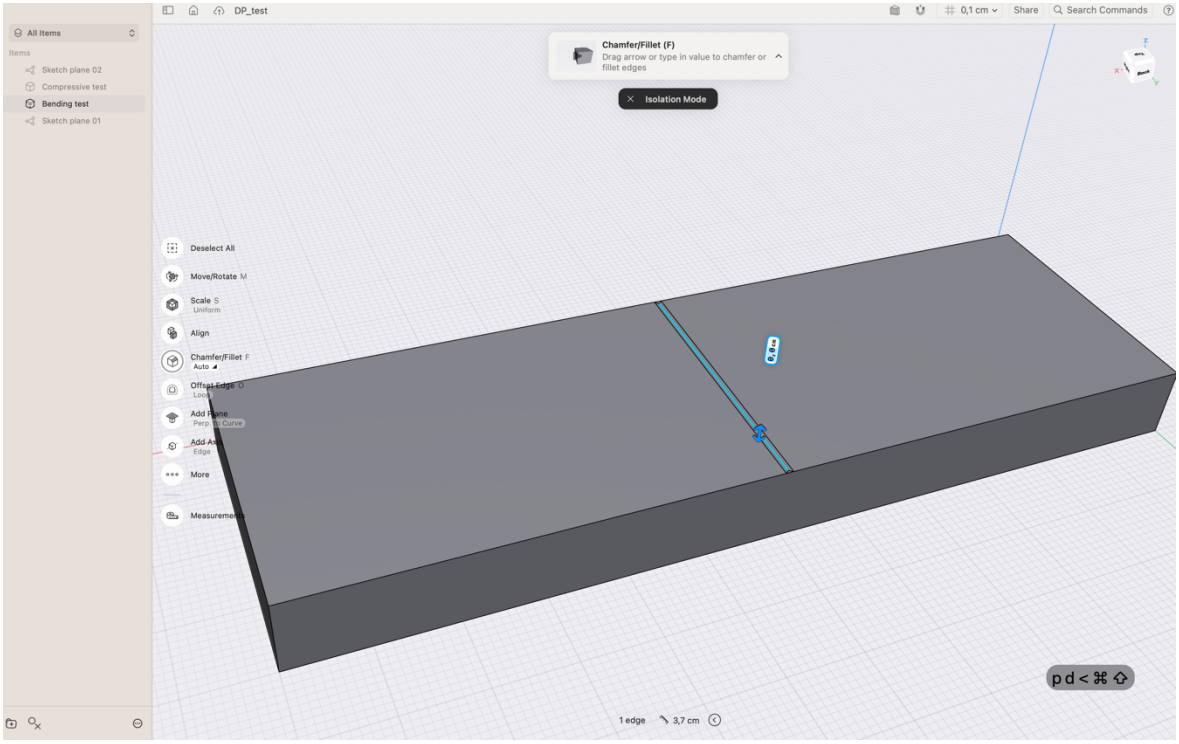
Obrázek 14: 3D nákres - funkce Rectagle (diagonal)



Obrázek 15: Funkce extrude

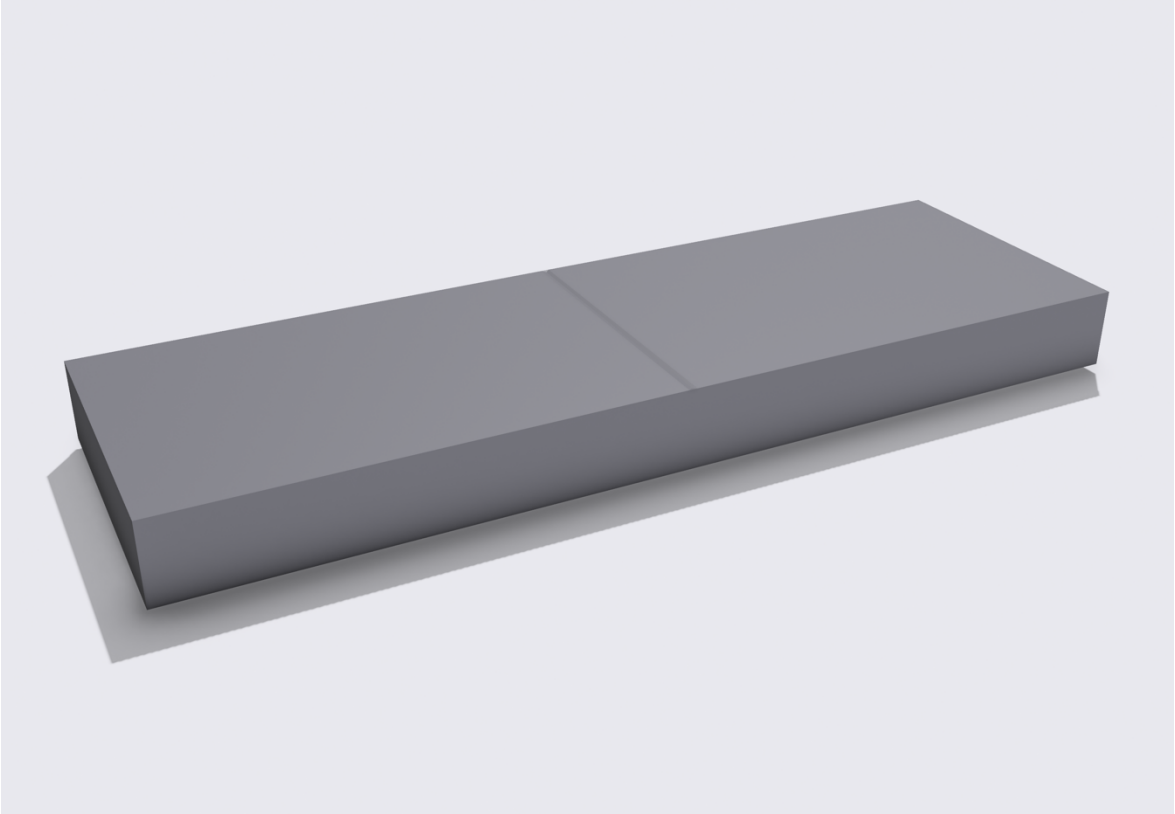
Pro jednodušší testování ohybu jsme na 3D model doplnili centrovací značku, která se automaticky vytiskne na každý vzorek. Ta nám pomůže vždy správně umístit testovaný vzorek přesně na střed. Díky tomu jsme předešli špatnému umístění vzorku a usnadnili

a zpřesnili tím práci a výsledky testování. Na několika vzorcích jsme se ujistili, že nepatrná centrovací značka nemá na testování, a tedy pevnost materiálu v ohybu žádný vliv.



Obrázek 16: Náhled centrovací značky

Následně jsme model vyexportovali stejně jako v předchozím případě ve formátu .STL.



Obrázek 17: Náhled vyexportovaného modelu - Ohybový test

7.2 PŘÍPRAVA 3D MODELŮ PRO TISK

Pro přípravu vytvořených digitálních 3D modelů jsme použili volně dostupný program *PrusaSlicer* ve verzi 2.5.0., který je doporučován pro přípravu 3D modelů pro 3D tisk na nám dostupné tiskárně (Prusa Mini+).

PrusaSlicer je nástroj, ve kterém se připravují digitální 3D modely pro 3D tisk. Nastavují se zde veškeré parametry 3D tisku. Mezi parametry 3D tisku patří například: teplota trysky, teplota podložky, rychlosti posuvu krokových motorů, výška vrstvy, počet perimetrů, počet horních a spodních vrstev a další. Při přípravě model v programu rozřeže (*„naslicuje“*) na jednotlivé 2D vrstvy. Výška jedné vrstvy se může nastavit na různé hodnoty podle velikosti trysky používané pro 3D tisk. Pro námi použitou trysku o průměru 0.6 mm jsou přednastavené hodnoty – *0,15 mm; 0,20 mm; 0,30 mm; 0,35 mm; 0,40 mm***.** I přes tyto přednastavené hodnoty můžeme výšku vrstvy přepisovat i manuálně podle našeho uvážení. Model rozřezaný podle námi nastavené výšky vrstvy se pak v jednotlivých 2D vrstvách nanáší pomocí trysky a rozehřívání materiálu na sebe a tím vzniká 3D model.

Mimo základní funkce pro přípravu modelů pro tisk dokáže tento program vkládat i základní jednoduché tvary – válec a kvádr a koule. Tvar je vložen jako klasický 3D model, se kterým se dá i běžně pracovat. Díky funkci vložení tvaru a možnosti změnit velikost, nám PrusaSlicer může posloužit jako jednoduchý nástroj pro tvorbu velmi primitivních 3D objektů. Pro naše dva mechanické testy by tedy postačila tvorba modelů pomocí této funkce. Mimo vkládání tvarů je možné vkládat i negativní tvary, které nám mohou v některých případech pomoci například vytvořit otvor v již hotovém objektu.

7.3 CHARAKTERISTIKA TISKÁRNY

Tisk jsme prováděli na tiskárně Original Prusa Mini+. Jedná se o kompaktní cenově dostupnou 3D tiskárnu. Tiskárna je dostupná jako stavebnice, kdy si ji uživatel sestavuje zcela sám, nebo je možné ji pořídit již jako předsestavenou. Ve druhém případě se spojují větší části 3D tiskárny k sobě.

Tabulka 2: Parametry použité 3D tiskárny

	ORIGINAL PRUSA MINI+
Rozměry tiskové plochy	**18 × 18 × 18 cm**
Výška vrstvy	**0.05 – 0.35 mm**
Maximální rychlost	**200+ mm/s**
Pracovní teploty trysky / podložky	**280 °C / 100 °C**
Elektronika	**Deska "Buddy" vlastního návrhu s 32bitovým čipsetem STM32 a nejnovějšími tichými Trinamic 2209 drivery**
Extruder	**Bowden, podávací motor s převodem 3:1**
LCD obrazovka	**2,8″ grafický barevný displej (65k barev)**
Tiskový povrch	**magnetická vyhřívaná podložka s vyměnitelnými tiskovými pláty**
Průměr struny filamentu	**1,75 mm**
Průměr trysky	**0,4mm (základní) / podpora vyměnitelných trysek**
Podporované materiály	**PLA, PETG, ASA, ABS**
Filament senzor	**Volitelný doplněk**
Zotavení ze ztráty napájení	**V budoucnu jako softwarový upgrade, přesnost na jednu vrstvu**

RJ45/LAN připojení	**Ano**
Wi-Fi připojení	**V budoucnu přes volitelný ESP Wi-fi modul**
Senzory	**3 termistory, senzor otáček větráku**
Režim tiskové farmy	**Ano (po softwarové aktualizaci)**
Kalibrace	**Automatická, Mesh Bed Leveling**
Zdroje tisku	**USB disk / LAN**
Aktualizace firmware	**přes USB disk / LAN**
Zdroj	**160W, externí adaptér od značek Meanwell či Delta (dle oblasti)**

Zdroj: Převzato z www.josefprusa.cz

Obrázek 18: Original Prusa Mini+

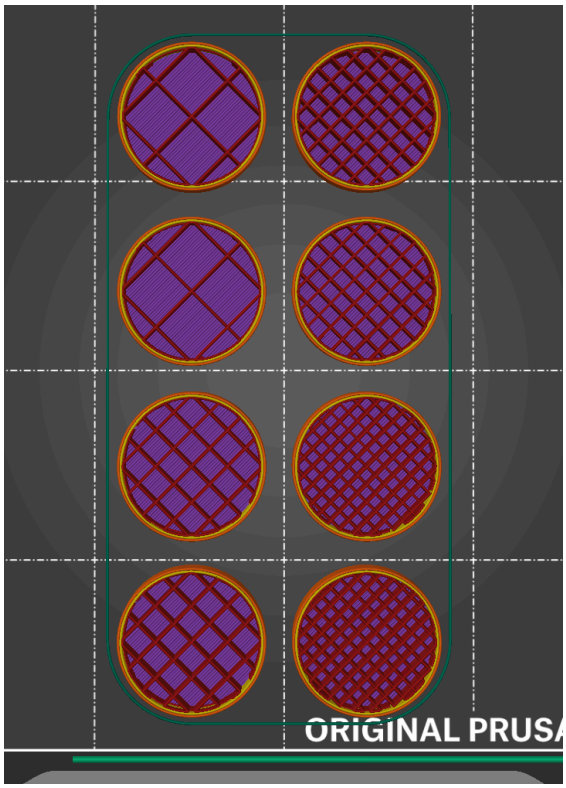
V tabulce výše je uvedeno, že tiskárna podporuje pouze PLA, PETG, ABS a ASA materiál. To je převážně z důvodu nižší hodnoty výhřevu desky (max. 100 °C) a také hodnoty 280 °C u pracovní teploty trysky. Další materiály, jako je například PC (polykarbonát) nebo Nylon, vyžadují pro dosažení dobrých výsledků tisku teplotu podložky alespoň 120 °C (+/- 10 °C).

7.4 NASTAVENÍ PARAMETRŮ V PROGRAMU PRUSASLICER VE VERZI 2.5.0.

Digitální modely vyexportované z programu *Shapr3D* jsme nahráli do prostředí programu *Prusaslicer* a přešli k přípravě pro tisk. Zvažovali jsme různé možnosti, jak efektivně tisknout poměrně velké množství vzorků při rozdílných nastaveních.

Pro testované vzorky jsme si připravili několik nastavení tisku u námi testovaných čtyř materiálů (PLA, PETG, ASA, ABS). Pro kompresní test jsme testovali vzorky se stejným množstvím perimetrů a stejným počtem horních vrstev a měnili jsme pouze hustotu a vzor výplně.

Z důvodu časové úspory jsme využili pokročilé funkce Sliceru a nastavili pro každý jednotlivý vložený 3D objekt svoji vlastní hodnotu výplně. Díky této pokročilé funkci jsme ušetřili manipulační čas v řádu několika hodin, které by zabralo opětovné zapínání tisku a vyjímání hotových výtisků z 3D tiskárny. Tuto funkci *PrusaSliceru* jsme použili pro tisk veškerých testovacích vzorků.



Obrázek 19: Ukázka rozdílného nastavení vnitřní výplně (mřížka) u testovacích vzorků (Kompresní test)

7.4.1 POROVNÁNÍ ÚSPORY MANIPULAČNÍHO ČASU

Pro ukázku přikládáme porovnání rozdílu času tisku stejného počtu vzorků bez nastavení odlišných hodnot parametrů. Jedná se o přípravu tisku z materiálu PLA. Tento časový rozdíl lze zobecnit i pro ostatní z testovaných materiálů. Naopak by se například u materiálu ABS dalo odhadovat, že se celkový čas přípravy tisku bude ještě prodlužovat, a to z důvodu delšího nahřívání podložky. U PLA materiálu se tisková teplota podložky nastavuje na 60 °C (±10 °C). U ABS a ASA materiálu na hodnotu 100 °C (±10 °C), což je zároveň i limitní teplota, které je naše tiskárna schopna dosáhnout.

7.4.2 VÝPIS GLOBÁLNÍHO NASTAVENÍ PRO POROVNÁVANÉ NASTAVENÍ TISKU VZORKŮ

Tabulka 3: Globální nastavení pro porovnávané nastavení tisku

3D tiskárna	Průměr trysky	Výška vrstvy [mm]	Vzor - výplň	Počet perimetrů	Počet horních vrstev	Teplota trysky	Typ podložky
Prusa MINI+	0,6	0,4	Mřížka/gyroid	2, 4, 5, 6, 7, 8	4	215	PEI

Tabulka 4: Porovnání času tisku - A

Množství výplně [%]	čas tisku [xh xm]	Váha [g]	Filament [m]	Počet kusů
10-80	7h 36m	220,21	73,83	16
10-80	7h 36m	220,21	73,83	16
	15h 12m	**440,42**	**147,66**	**32**

Tabulka 5: Porovnání času tisku – B

Množství výplně [%]	čas tisku [xh xm]	Váha [g]	Filament [m]	Počet kusů
10	54m	31,76	10,65	4
20	1h 8m	38,79	13	4
30	1h 26m	45,78	15,35	4
40	1h 44m	52,37	17,56	4
50	2h 1m	58,82	19,72	4
60	2h 18m	65,22	21,87	4
70	2h 37m	71,70	24,04	4
80	3h 5m	77,10	25,85	4
	15h 13m	**441,54**	**148,04**	**32**

7.5 NASTAVENÍ TISKU A POČET TISKNUTÝCH VZORKŮ

V tabulkách níže jsou vypsány jednotlivá nastavení a počty tisknutých vzorků u materiálů, které jsme v našem tetování využili. U PLA a PETG se počty oproti ASA a ABS liší. Důvodem je větší smrštivost ASA a ABS materiálů a problematický tisk vzorků s více perimetry a s větším množstvím výplně pro větší objekty.

7.5.1 PLA

Materiál PLA se vyznačuje velmi snadným tiskem a výbornou přilnavostí k podložce. Při nastavování parametrů tisku jsme tedy mohli využít velikost tiskové podložky maximálním způsobem. Na tiskovou podložku tiskárny Prusa Mini+ se vejde 16 kusů vzorků pro kompresní test. V kombinaci s možností nastavovat parametry jednotlivých položek v programu *PrusaSlicer* (verze 2.5.0) jsme tedy tiskli naprosto efektivně.

Tabulka 6: Souhrn 3D tisku z materiálu PLA

PLA

TEST	3D tiskárna	Průměr trysky	Výška vrstvy [mm]	Vzor - výplň	Množství výplně [%]	Počet perimetrů	Počet horních	Teplota trysky	Typ podložky	čas tisku [xh xm]	Váha [g]	Filament [m]	Počet kusů
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**10-80**	2	4	215	PEI	7h 36m	220,21	73,83	16
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**10-80**	2	4	215	PEI	7h 36m	220,21	73,83	16
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Mřížka**	**10-80**	2	4	215	PEI	5h 52m	227,62	76,32	16
Bending	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20,30,40,50**	2	4	215	PEI	4h 33m	123,47	41,40	4
Bending	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20,30,40,50**	2	4	215	PEI	4h 33m	123,47	41,40	4
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20**	4, 5, 6, 7	4	215	PEI	5h 38m	212,36	71,60	16
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20**	8	4	215	PEI	1h 35m	61,88	20,75	4
										1d 13h 23m	**1189,22**	**399,13**	**76**

7.5.2 PETG

Pro PETG materiál jsme používali zrnitou PEI podložku, která se pro tisk z tohoto materiálu doporučuje. Je možné jej tisknout i na klasickou hladkou podložku kdy je ale nutné používat například klasické kancelářské lepidlo pro vytvoření separační vrstvy, jinak se materiál k podložce přichytí až moc silně a může ji poničit.

Tabulka 7: Souhrn 3D tisku z materiálu PETG

PETG

TEST	3D tiskárna	Průměr trysky	Výška vrstvy [mm]	Vzor - výplň	Množství výplně [%]	Počet perimetrů	Počet horních	Teplota trysky	Typ podložky	čas tisku [xh xm]	Váha [g]	Filament [m]	Počet kusů
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**10-80**	2	4	250	Zrnitý PEI	7h 42m	225,53	73,83	16
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**10-80**	2	4	250	Zrnitý PEI	7h 42m	225,53	73,83	16
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Mřížka**	**10-80**	2	4	250	Zrnitý PEI	5h 57m	233,13	76,32	16
Bending	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20,30**	2	4	250	Zrnitý PEI	2h 42m	99,03	32,42	4
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20**	4, 5, 6, 7, 8	4	250	Zrnitý PEI	3h 38m	140,46	45,98	10
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20**	4, 5, 6, 7, 9	4	250	Zrnitý PEI	3h 38m	140,46	45,98	10
										1d 7h 19m	**1064,14**	**348,36**	**72**

7.5.3 ASA

Tisk z materiálu ASA nešel tak hladce jako u předchozích dvou. ASA se při chladnutí poměrně hodně smršťuje. Touto naší zkušeností tedy potvrzujeme tvrzení z kapitoly 4.3. Kvůli tomu je větší pravděpodobnost, že se výtisk odtrhne od podložky a celý tisk se tak může zničit. Velmi důležité je odmastit a očistit před tiskem tiskovou podložku izopropylalkoholem (IPA). Pro větší jistotu jsme tiskli s použitím límce kolem výtisků pro větší styčnou plochu s deskou. Díky tomu se většina tisků obešla bez problémů.

Tabulka 8: Souhrn 3D tisku z materiálu ASA

ASA

TEST	3D tiskárna	Průměr trysky	Výška vrstvy [mm]	Vzor - výplň	Množství výplně [%]	Počet perimetrů	Počet horních	Teplota trysky	Typ podložky	čas tisku [xh xm]	Váha [g]	Filament [m]	Počet kusů
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**10-80**	2	4	260	Zrnitý PEI	7h 38m	190,02	73,83	16
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**10-80**	2	4	260	Zrnitý PEI	7h 38m	190,02	73,83	16
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Mřížka**	**10-40**	2	4	260	Zrnitý PEI	2h 27m	74,27	28,86	8
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Mřížka**	**50-80**	2	4	260	Zrnitý PEI	3h 52m	122,37	47,55	8
Bending	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20,30**	2	4	260	Zrnitý PEI	1h 42m	46,55	18,61	2
Bending	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20,30**	2	4	260	Zrnitý PEI	1h 42m	46,55	18,61	2
										1d 0h 59m	**669,78**	**261,29**	**52**

7.5.4 ABS

Poslední z námi testovaných materiálů (ABS) a zároveň také materiál s největším smršťováním při chladnutí. U tohoto materiálu jsme měli s tiskem poměrně velké problémy. Výtisky se často odtrhávali od podložky. Z toho důvodu jsme tiskly z ABS po menších sériích vzorků s využitím již zmiňovaného límce kolem výtisků, abychom zabránili velkým ztrátám materiálu.

Tabulka 9: Souhrn 3D tisku z materiálu ABS

ABS

TEST	3D tiskárna	Průměr trysky	Výška vrstvy [mm]	Vzor - výplň	Množství výplně [%]	Počet perimetrů	Počet horních	Teplota trysky	Typ podložky	čas tisku [xh xm]	Váha [g]	Filament [m]	Počet kusů
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**10-40**	2	4	255	Zrnitý PEI	2h 39m	70,6	28,22	8
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**50-80**	2	4	255	Zrnitý PEI	4h 59m	114,28	45,68	8
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**10-40**	2	4	255	Zrnitý PEI	2h 39m	70,6	28,22	8
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**50-80**	2	4	255	Zrnitý PEI	4h 59m	114,28	45,68	8
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Mřížka**	**10-40**	2	4	255	Zrnitý PEI	2h 45m	71,56	28,61	8
Compression test	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Mřížka**	**10-40**	2	4	255	Zrnitý PEI	4h 1m	120,25	48,07	8
Bending	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20,30**	2	4	255	Zrnitý PEI	1h 42m	46,55	18,61	2
Bending	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20,30**	2	4	255	Zrnitý PEI	1h 42m	46,55	18,61	2
										1d 1h 26m	**654,67**	**261,7**	**52**

7.5.5 ZDŮVODNĚNÍ VÝBĚRU TISKOVÝCH NASTAVENÍ

Pro ohybový test jsme začali tisknout nejprve PLA materiál s hodnotami výplně od 20 % do 50 %. Pro PLA materiál nedělal tisk žádné problémy, avšak u dalších materiálů (ASA, ABS) jsme nebyli schopni dosáhnout úspěšných tisků kvůli přílišnému smršťování. Z toho důvodu jsme nakonec ohybový test realizovali pouze s výplní 20 % a 30 %. U PETG materiálu by se při tisku nejspíše problémy neobjevily, ale chtěli jsme porovnávat hlavně materiály mezi sebou. Proto jsme se 3D tisku z PETG v těchto hodnotách u ohybového testu vyhnuli.

Dalším pro nás důležitým parametrem bylo porovnání různých hodnot a různých vzorů výplně u kompresního testu. Ve vyhodnocení, v kapitole číslo 8, se zaměříme na rozdíly mezi hodnotami výplně, a i druhy výplně porovnáme mezi sebou.

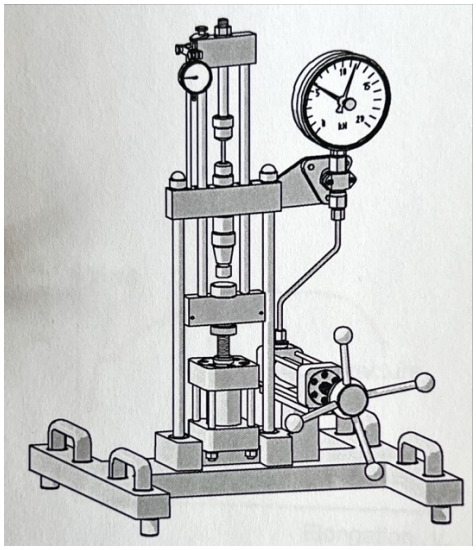
Veškerý tisk jsme realizovali pomocí trysky o průměru 0,6 mm. Tuto trysku jsme zvolili z několika důvodů. Díky její velikosti je možné rychleji tisknout větší množství vzorků než s tryskou o průměru 0,4 mm. Dalším důvodem je pro nás i aktuální trend tisku s touto tryskou. Výrobce tiskáren Prusa tiskne veškeré části jeho tiskáren na tiskové farmě právě tryskou o velikosti 0,6 mm. Tento trend následujeme i pro tisk mimo tuto kvalifikační práci. Podle našeho názoru tryska o průměru 0,6 nabízí skvělý poměr kvality povrchu výtisku s ohledem na rychlost tisku.

Tabulka 10: Kompletní souhrn 3D tisku vzorků

Parametr	CELKOVÝ SOUČET
čas tisku [xh xm]	4d 23h 7m
Váha [g]	3577,81
Filament [m]	1270,48
Počet kusů	252

8 TESTOVÁNÍ

Veškeré vytištěné vzorky jsme vystavovali mechanickým zkouškám na testovacím zařízením (GUNT WP 300), které se kvůli jeho jednoduchosti používá v oblasti technického vzdělávání (hlavně kvůli jeho názornosti). Zařízení dokáže mimo námi dva prováděné testy (kompresní, ohybový), testovat vzorky v tahu, ve střihu a v neposlední řadě také realizaci Brinnel testu tvrdosti materiálů. Díky tomu se jedná o velmi široce využívané zařízení pro testování mechanických vlastností kovů, plastů a dalších podporovaných materiálů, u kterých nás mohou tyto vlastnosti zajímat.



Obrázek 20: Testovací zařízení GUNT WP 300

Jeho otevřená konstrukce umožňuje velmi snadno a přehledně pochopit základní principy postupu testování vzorků. Mittasch (2014) v brožuře k zařízení uvádí, že je vhodné zařízení používat během výuky ve skupinách.

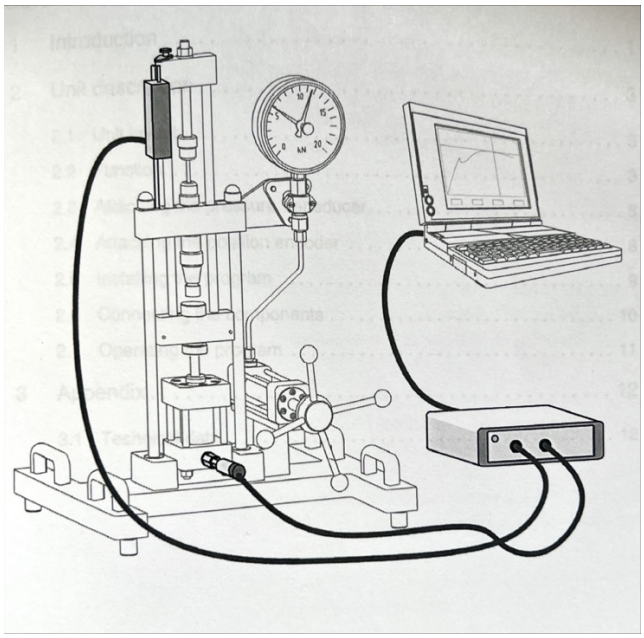
8.1 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ GUNT WP 300 (20 KN)

Celé zařízení je na masivním podstavci, na kterém jsou madla k případnému přenášení na jiná místa. Na podstavci je uchycen zbytek komponentů. Ve spodní části je hydraulický zvedák, díky kterému se po vodících tyčích pohybují čelisti směrem k sobě (ve spodní testovací části), nebo od sebe (horní testovací část). V horní části tedy probíhají tahové zkoušky, kdy se příčka při vysouvání spodního hydraulického zvedáku oddaluje od rámu. Naopak ve spodní části probíhají zkoušky tlakové, protože se vysouváním hydraulického zvedáku zkracuje vzdálenost mezi podložkou a příčkou rámu. K příčce rámu je přichycen

ještě siloměr. „Siloměr pracuje na principu manometru.“ (Mittasch, 2014) To znamená, že měří hydrostatický tlak v hydraulickém systému zvedáku.

Konstrukce v levé horní části obsahuje prostor pro sondu připojenou k počítači nebo úchylkoměr. Zařízení tedy nevyžaduje připojení k síti. Lze jej používat i naprosto samostatně s použitím úchylkoměru. „Číselníkový úchylkoměr je komparační dotykové měřidlo s přímým odečítáním naměřené hodnoty.“ (Frková, 2015).

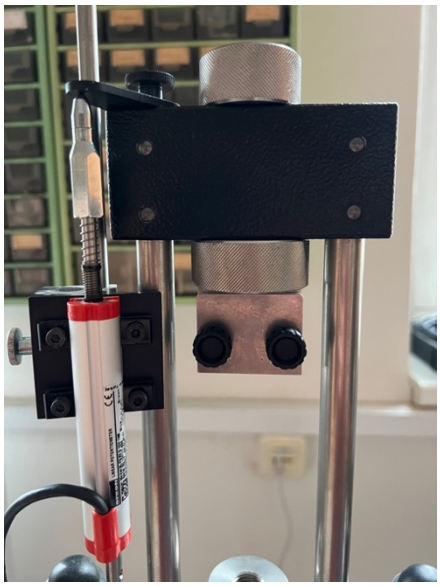
Pro účely naší práce jsme zařízení používali s elektronickým snímačem polohy připojeným k počítači, kvůli poměrně velkému množství vzorků, pohodlnosti a efektivitě testování.



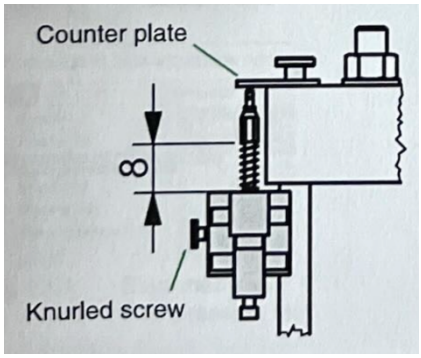
Obrázek 21: Schéma zapojení sondy a testovacího zařízení k PC

8.2 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU NA TESTOVACÍM ZAŘÍZENÍ

Pro každou zkoušku je na zařízení vždy potřeba nejprve přestavět testovací ústrojí zařízení. Výměna je pro obsluhu poměrně jednoduchou záležitostí. Testovací hlavy jsou na příčníky konstrukce umístěny pomocí závitu. To znamená, že jdou snadno vymontovat a vyměnit za jiný aktuálně využívaný typ hlavy. Před samotným testováním je potřeba ještě správně nastavit polohu analogové sondy v levé horní části zařízení. Přesné umístění sondy můžeme vidět na obrázku č. 22. U sondy je aretace pouze formou ručně otočné matice, která drží sondu nebo případně úchylkoměr pevně na svém místě. Po tomto fyzickém nastavení zařízení je potřeba nastavit správné hodnoty i v počítačovém programu, do kterého nám vstupují data z manometru a z analogové sondy polohy.



Obrázek 23: Umístění analogové sondy polohy na zařízení

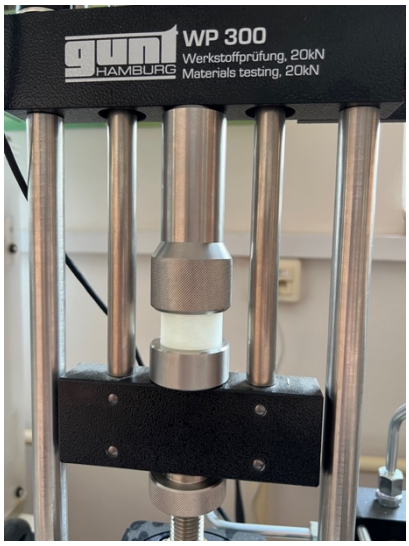


Obrázek 23: Vzdálenost předepětí pružiny na analogové sondě

8.2.1 KOMPRESNÍ TEST

Pro kompresní test je potřeba na zařízení umístit testovací hlavu pro tento test. Hlavu pro kompresní test můžete vidět na obrázku č. 24.

Obrázek 25: Testovací hlava (kompresní test)



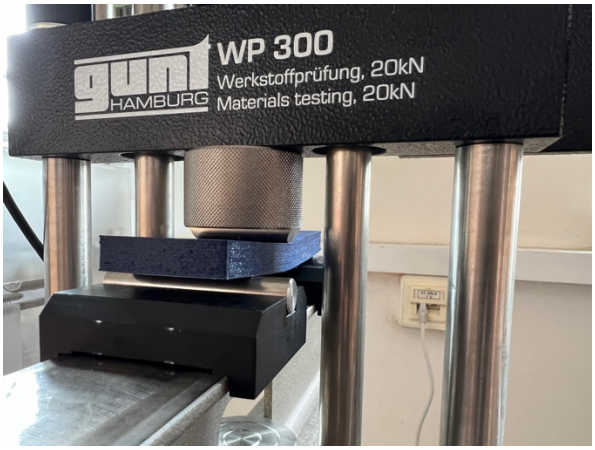
Obrázek 25: Kompresní test

8.2.2 OHYBOVÝ TEST

Velikost vzorků pro ohybový test na zařízení GUNT WP 300 může mít rozměry 120 mm, 220 mm a 320 mm. Na obrázku č. 27 je vidět podložka pro testování. Na podložce jsou položené dva jezdce, se kterými se dá volně pohybovat. Jejich umístění záleží právě na velikosti testovaných vzorků.

Obrázek 27: Testovací hlava (ohybový test)

Obrázek 27: Podložka pro testované vzorky (ohybový test)



Obrázek 28: Ohybový test

8.2.3 TEST TVRDOSTI PODLE BIRNELLA

Při přípravě této práce jsme zvažovali testování tvrdosti vytisklých vzorků podle Brinella. Zkoušeli jsme tento test realizovat i na několika málo zkušebních vzorcích. Původním

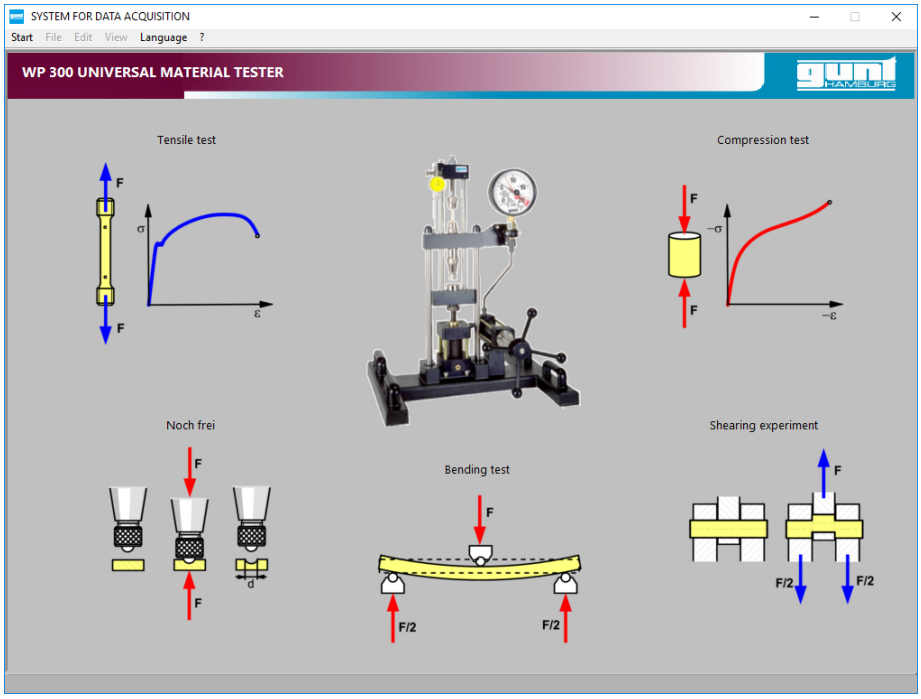
Obrázek 29: Ukázka vzorku po otestování (Brinell test)

Obrázek 30: Testovací hlava (Brinellův test tvrdosti)

záměrem bylo tisknout vzorky s různou hodnotou parametru „počet horních vrstev“, kde by se hodnota postupně zvyšovala a porovnávala se mezi vzorky navzájem. Kvůli volným místům ve vnitřní výplni u vzorků byl ale problém správně a věrohodně získaná data porovnávat. Vznikalo obrovské zkreslení kvůli vnitřní struktuře a dutinám, do kterých měla vtlačovaná kulička tendenci sjíždět. Z těchto důvodů jsme Brinellův test tvrdosti nakonec vynechali.

8.3 PC PROGRAM GUNT (SYSTEM FOR DATA ACQUISITION)

Po přípravě zařízení a osazením vybranou testovací hlavou pro daný test je potřeba nastavit důležité parametry na počítači v programu GUNT. V první řadě je potřeba vybrat, jakou konkrétní zkoušku budeme se zařízením realizovat. Prostředí programu je velmi přehledné a intuitivní.

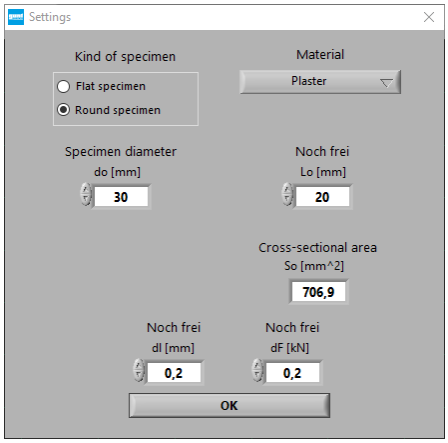


Obrázek 31: Prostředí programu GUNT

Kliknutím na danou zkoušku se dostaneme již do prostředí konkrétního experimentu.

Po tomto přednastavení velikosti a parametrů vzorků už následuje vytvoření nové testovací série (*File* → *New series*). Zde se vyplňují název testu a případná upřesňující poznámka. Název je pro správnou orientaci ve vzorcích a testech velmi důležitý. Těchto vytvořených testovacích sérií může být v jednom souboru maximálně 10. Možnost dělat takto početné série testovaných dat je při používání a testovaní většího množství vzorků pro uživatele velmi přívětivá.

V dalším kroku je zásadní přesné nadefinování rozměrů vzorků a doupřesnění konkrétního materiálu, na kterém se testování provádí.



Obrázek 32: Nastavení parametrů testovaných vzorků (kompresní test)

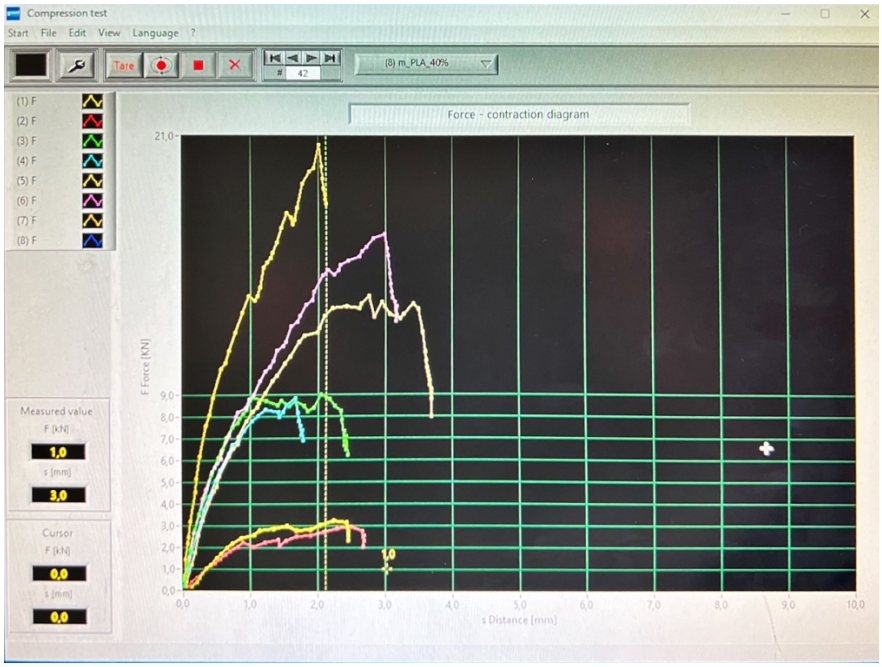
Bez vyplnění této tabulky, do které se vpisují parametry vzorků, není možné zaznamenávat data z testování (ukazují se pouze aktuální hodnoty). Při vytvoření první série testování je tedy nutné nejprve vyplnit parametry. Po splnění všech předchozích kroků je možné přejít už přímo na testování a zaznamenávání dat vzorků.

8.4 PRŮBĚH TESTOVÁNÍ

Testovaný vzorek se umístí mezi testovací hlavu a podložku. Otáčením čtyřramenného dílu se vysouvá hydraulický zvedák. Otáčíme do té doby, než se hlava lehce dotýká horní strany testovaného vzorku. Pro lepší orientaci kontaktu můžeme sledovat výstup v programu s aktuální hodnotou F [kN], na levé straně okna. Ve chvíli kontaktu mírně pootočíme zpět (zasuneme zvedák) a klikneme na PC v programu na tlačítko *Tare* (vynulování). Následně můžeme kliknout na tlačítko start (umístěného vpravo od *Tare)* a začít plynule otáčet a tím stlačovat testovaný vzorek. Během otáčení se začne vykreslovat křivka a zaznamenávat se data. Aktuální hodnotu vzdálenosti a síly můžeme odečítat přímo v programu v levé části. Aktuálně měnící se hodnotu síly můžeme případně odečítat přímo na zařízení na siloměru.

Při dosažení hraničních hodnot zařízení nebo při naprosté deformaci vzorku ukončujeme měření kliknutím na tlačítko *STOP* v programu. Pří náhlém prasknutí nebo jiné rychlé změně vzdálenosti sám program vyhodnotí ukončení měření.

Pokud chceme testovat více vzorků v rámci jedné série, postačí kliknout (*File* → *New series*). Vytvoří se tím další položka na testování, kde je potřeba vyplnit název s případnou poznámkou. Tímto způsobem se naměřená data překreslují přes sebe.

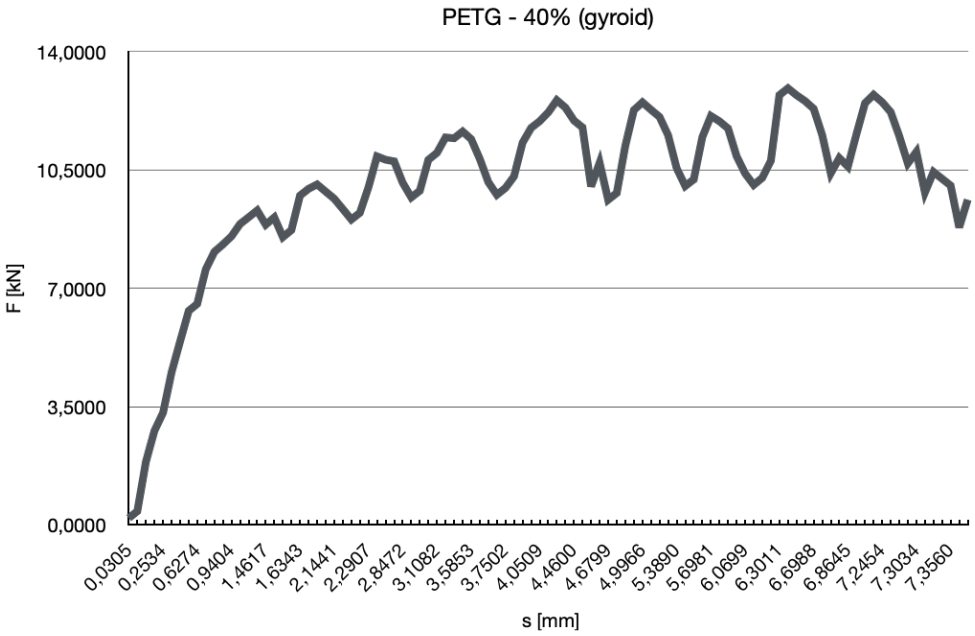


Obrázek 33: Prostředí testování s více vzorky

Naměřená data můžeme následně exportovat v podobě excelovské tabulky. Zde je možné ukládání jen po jednotlivých vzorcích. Dalším způsobem je uložení všech deseti vzorků ve formátu *.dat*, který je možné otevřít například v poznámkovém bloku, což jsme při testování využili my.

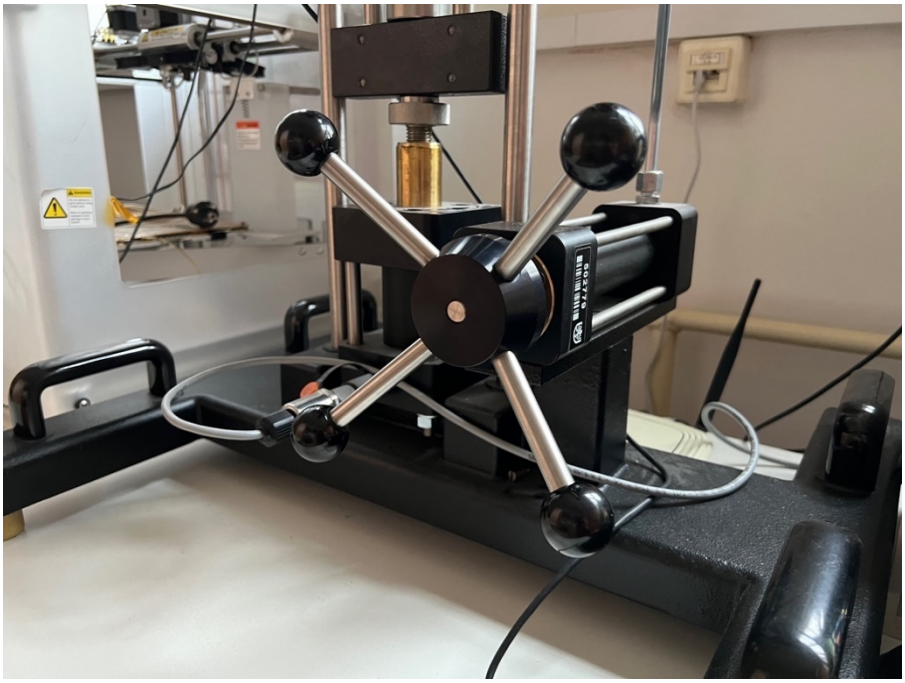
8.5 NÁVRH VYLEPŠENÍ ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ GUNT WP 300

Při testování se několikrát objevil problém s omezenou možností plynulého vyvíjení tlaku při kompresním testu. Bylo to z toho důvodu, že zařízení má pro vysouvání hydraulického zvedáku použit čtyřramenný otočný díl. Při testování se tedy musí několikrát přehmatávat, což může zavádět mírnou chybovost při testování.



Graf 1: Nepřesnosti testování v důsledku přehmatů a neplynulého otáčení

Vylepšením pro testování by mohlo být nahrazení čtyřramenného otočného dílu kolem s kličkou, které by zajistilo rovnoměrnější a plynulejší pohyb výsuvného hydraulického zvedáku. Pro tyto účely jsme v již popisované aplikaci *Shapr3D* vytvořili 3D model, který by bylo možné vytisknou na 3D tiskárně a nahradit tak tento původní díl. Podobné otočné kolo s kličkou by šlo samozřejmě i rovnou pořídit nebo demontovat z již nepoužívaných strojů jako jsou soustruhy nebo frézky. Vlastní vytvořený model můžete vidět na obrázku č. 35.



Obrázek 34: Čtyřramenný otočný díl testovacího zařízení

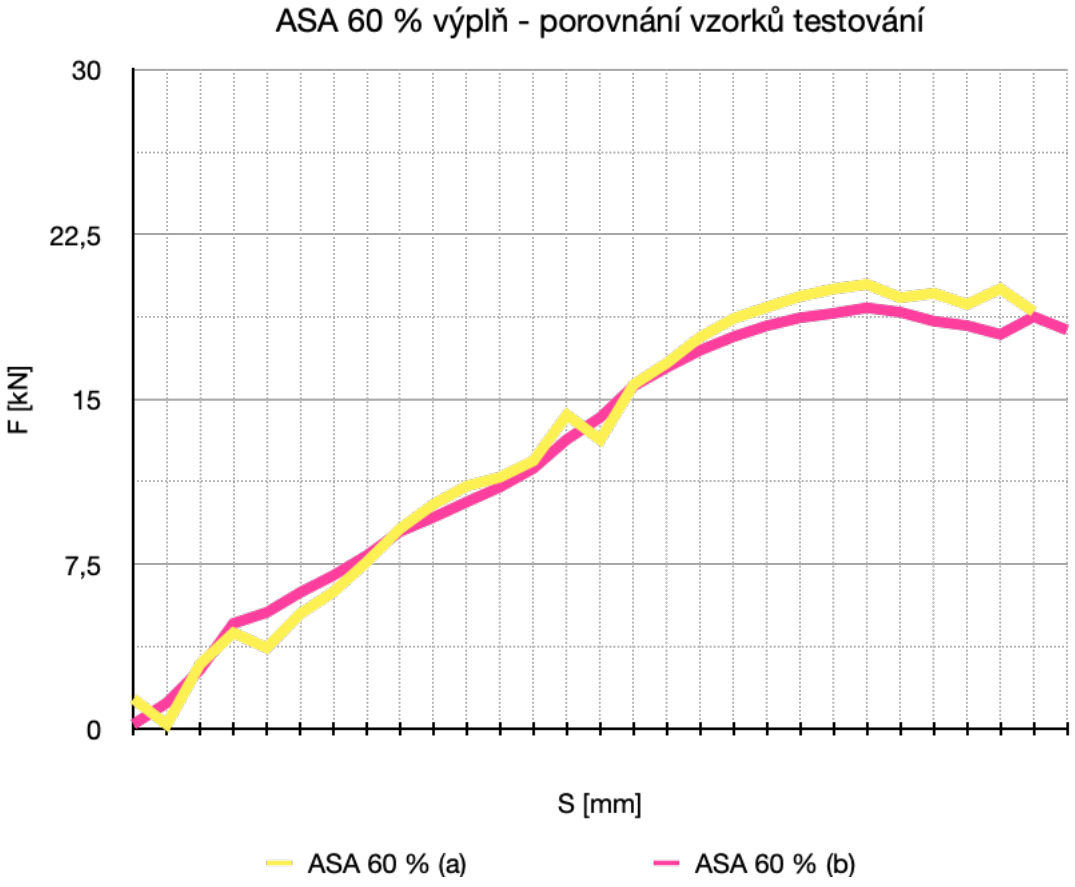
Obrázek 35: Otočné kolo s kličkou (vlastní návrh)

9 VÝSLEDKY VÝZKUMU

V této kapitole zhodnotíme celkové výsledky z testování podle různých předem stanovených kritérií, které jsme při přípravě práce zvažovali. Následovat bude přehled dat získaných testováním vzorků na zařízení GUNT WP 300 a jejich reprezentace v grafech, kde bude ukázán rozdíl mezi jednotlivými materiály a jejich vlastnostmi při mechanickém testování.

9.1.1 OVĚŘENÍ VĚROHODNOSTI DAT

Každé tiskové nastavení bylo zhotoveno vždy minimálně ve třech vzorcích pro dosažení věrohodných dat. Až na výjimky se naměřené hodnoty na vzorcích se stejnými parametry výrazněji nelišili. To dokazují i graf a tabulky ukázané na příkladu dvou porovnávaných vzorků u materiálu ASA při 60% výplni (vzor mřížka).



Graf 2: Porovnání naměřených dat na více vzorcích (ASA – 60 %, mřížka)

Tabulka 11: ASA – 60 % a

60 % a	S [mm]	F [kN]
	0,0221	0,2042
	0,0275	1,1799
	0,1015	2,6903
	0,1756	4,7968
	0,2023	5,2959
	0,2595	6,2026
	0,2855	6,982
	0,3236	7,8895
	0,361	8,9821
	0,3878	9,6254
	0,4023	10,3242
	0,442	11,0073
	0,4679	11,8563
	0,5206	13,1704
	0,5549	14,1674
	0,6129	15,5965
	0,6587	16,4512
	0,6916	17,2275
	0,729	17,8447
	0,7534	18,3434
	0,7755	18,7094
	0,8183	18,9084
	0,8206	19,1621
	0,8267	18,9586
	0,8381	18,5528
	0,8396	18,3501
	0,8442	17,9477
	0,8473	18,754
	0,8603	18,1489

Tabulka 12: ASA - 60 % b

60 % b	S [mm]	F [kN]
	0,0137	1,3654
	0,026	0,1982
	0,0771	2,9394
	0,1038	4,3723
	0,1122	3,6873
	0,1305	5,2329
	0,1702	6,2319
	0,2015	7,6017
	0,2603	9,1054
	0,2862	10,2148
	0,313	11,0526
	0,3229	11,4498
	0,3412	12,1977
	0,4046	14,2892
	0,4122	13,1584
	0,4267	15,6628
	0,4626	16,6438
	0,5053	17,8255
	0,5305	18,6723
	0,5442	19,1898
	0,5725	19,6806
	0,5862	20,0201
	0,6007	20,2292
	0,6175	19,6196
	0,6206	19,8253
	0,6229	19,3168
	0,6229	20,0265
	0,6244	18,9796

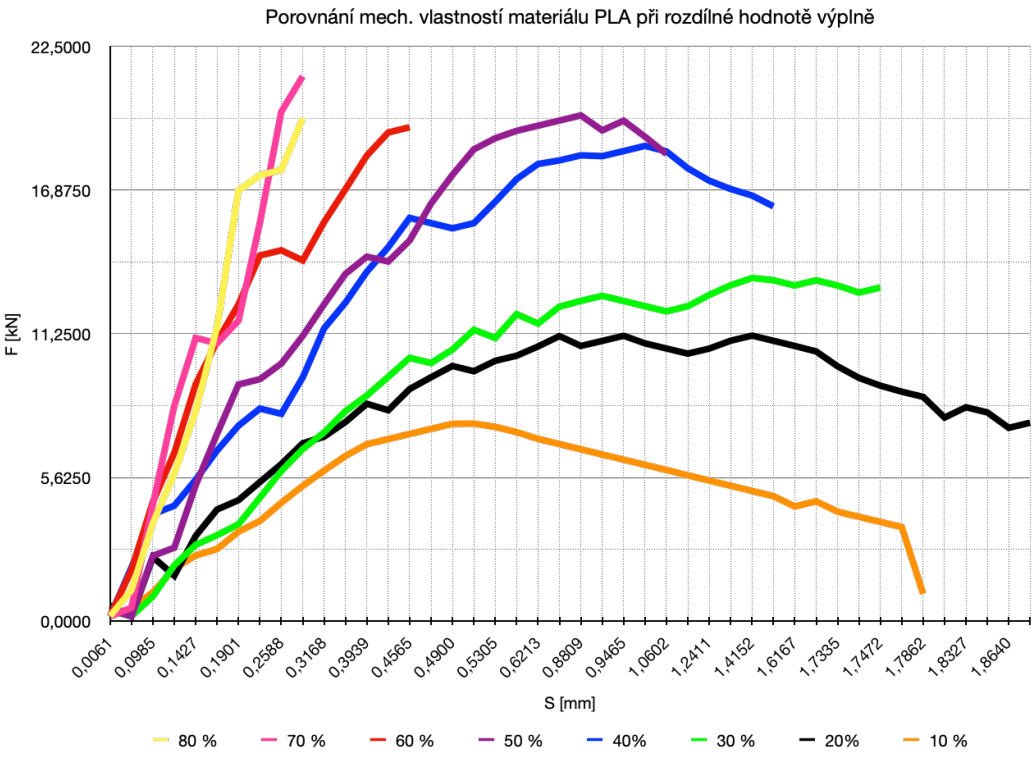
Pro další reprezentaci dat bude tedy pro daný parametr vybrán vždy jen jeden ze 3 testovaných vzorků.

9.2 KRITÉRIUM 1 – POROVNÁNÍ MNOŽSTVÍ VÝPLNĚ V RÁMCI JEDNOHO MATERIÁLU

V prvním bodě posuzování vlastností testovaných materiálů jsme se zaměřili, jak už je popsáno v kapitole 3.5, na 3D tisk technologií FDM/FFF a konkrétně parametr množství výplně. Tento parametr jsme testovali u materiálů PLA, ASA, PETG a ABS. Pro každý z materiálů můžete v následujících kapitolách vidět vybraná data a jejich reprezentaci v grafech.

9.2.1 PLA - (VÝPLŇ GYROID)

Následující graf reprezentuje první ze získaných dat, která jsme při testování chtěli porovnávat. Data, z nichž je graf vytvořen jsou v tabulkách č. 8 – č. 15. Podle grafu můžeme vyhodnotit, že se snižující se hodnotou výplně klesá i mezní hodnota síly, která je potřebná k výraznější deformaci testovaného vzorku. To však zřejmě tak výrazně neplatí pro více vyplněné vzorky (60 % – 80 %), protože mezi hodnotou 60 % a 50 % se liší výrazněji.



Graf 3: PLA 10 - 80 % (gyroid)

Tabulka 13: PLA - 80 % (Gyroid)

80 %	S [mm]	F [kN]
	0,0229	0,2072
	0,0267	1,2241
	0,0679	3,8537
	0,1176	5,7815
	0,1382	8,2151
	0,2130	11,5247
	0,2939	16,8633
	0,3435	17,4546
	0,3656	17,6614
	0,4015	19,6851

Tabulka 14: PLA - 70 % (Gyroid)

70 %	S [mm]	F [kN]
	0,0183	0,1986
	0,0374	0,5343
	0,1221	4,5821
	0,2229	8,4380
	0,2488	11,0905
	0,2511	10,8773
	0,2832	11,7660
	0,3595	15,5954
	0,4282	19,9399
	0,5091	21,3263

Tabulka 15: PLA - 60 % (Gyroid)

60 %	S [mm]	F [kN]
	0,0008	0,2083
	0,0641	2,0166
	0,1198	4,6795
	0,1633	6,5934
	0,2366	9,2781
	0,2771	10,9575
	0,3076	12,3978
	0,3420	14,3151
	0,3458	14,5185
	0,3595	14,1202
	0,3763	15,6201
	0,4259	16,9109
	0,4908	18,2265
	0,4984	19,1280
	0,5061	19,3318

Tabulka 16: PLA - 50 % (Gyroid)

50 %	S [mm]	F [kN]
	0,0183	0,4395
	0,0366	0,1930
	0,1649	2,5644
	0,1801	2,8817
	0,2465	5,3270
	0,3000	7,3428
	0,3206	9,2684
	0,3862	9,4741
	0,4084	10,0852
	0,4343	11,1639
	0,4816	12,4053
	0,5236	13,5964
	0,5320	14,2679
	0,5496	14,0794
	0,5656	14,9037
	0,6213	16,3474
	0,6580	17,4696
	0,7145	18,4685
	0,7274	18,9024
	0,7771	19,1928
	0,7778	19,3936
	0,8251	19,5941
	0,8435	19,7968
	0,8656	19,2097
	0,8877	19,5896
	0,9160	18,9616
	0,9427	18,2860
	0,9435	18,7132
	0,9442	18,0818
	0,9442	18,4895
	0,9824	17,8799
	1,0412	16,0694
	1,0496	15,0599

	1,0518	15,6647
	1,0648	15,4631

Tabulka 17: PLA - 40 % (Gyroid)

40 %	S [mm]	F [kN]
	0,0229	0,1990
	0,1366	2,1136
	0,2259	4,1913
	0,2328	4,5266
	0,2557	5,5413
	0,3091	6,6834
	0,3221	7,6572
	0,3275	8,3260
	0,3534	8,1207
	0,3649	9,5430
	0,4259	11,4629
	0,4549	12,4735
	0,5053	13,6815
	0,5366	14,6395
	0,5992	15,7854
	0,6244	15,5808
	0,6374	15,3788
	0,6564	15,5800
	0,6900	16,4171
	0,7335	17,3055
	0,7885	17,8960
	0,9877	18,0361
	1,0030	18,2340
	1,2030	18,2021
	1,3350	18,4003
	1,3785	18,6034
	1,4152	18,3887
	1,4457	17,7259
	1,4587	17,2429
	1,5045	16,9165
	1,5243	16,6625
	1,5289	16,2384
	1,5419	16,4407
	1,5488	15,2289
	1,5518	16,0360
	1,5564	15,0281
	1,5678	15,4298
	1,5678	15,8348
	1,5694	14,8269
	1,5701	14,6261
	1,5724	15,6321
	1,5915	14,2229
	1,6091	14,4237
	1,6106	12,7151
	1,6114	14,0213
	1,6159	13,8193
	1,6236	13,6095

Tabulka 18: PLA - 30 % (Gyroid)

30 %	S [mm]	F [kN]
	0,0145	0,4039
	0,0160	0,2031
	0,0489	0,9768
	0,1160	2,1942
	0,1336	2,9927
	0,1649	3,3726
	0,2084	3,7982
	0,2313	4,8369
	0,2862	5,8793
	0,2931	6,7384
	0,3160	7,3919
	0,3618	8,2233
	0,3786	8,8382
	0,4420	9,5666
	0,4549	10,3100
	0,4656	10,1065
	0,4755	10,6349
	0,5328	11,4082
	0,5351	11,0871
	0,5656	12,0167
	0,5748	11,6529
	0,5809	12,3123
	0,6137	12,5383
	0,6412	12,7376
	0,8305	12,5353
	0,8511	12,3307
	0,8534	12,1280
	0,9144	12,3292
	0,9282	12,7713

	0,9641	13,1464
	0,9770	13,4345
	1,1786	13,3472
	1,2244	13,1415
	1,2495	13,3435
	1,2831	13,1389
	1,2862	12,8631
	1,3167	13,0636
	1,3427	13,3517
	1,4152	13,5514
	1,4869	13,3439
	1,5511	13,5428
	1,5823	13,7425
	1,6266	13,9430
	1,7923	13,7283
	1,8220	13,3877
	2,0220	13,2607
	2,0571	12,8410
	2,0724	13,0527
	2,0785	12,1111
	2,1159	12,4686
	2,1251	11,8556
	2,1388	11,2475
	2,1472	10,6412
	2,1503	11,4521
	2,1640	11,6533
	2,1762	11,0448
	2,1785	10,2392
	2,1808	10,4396
	2,1884	10,0387
	2,1899	10,8428
	2,2052	9,6374
	2,2205	9,4370
	2,2212	9,8379
	2,2357	8,2960
	2,2441	9,0226
	2,2678	9,2361

Tabulka 19: PLA - 20 % (Gyroid)

20 %	S [mm]	F [kN]
	0,0061	0,6246
	0,0221	0,1975
	0,0985	2,5146
	0,1076	1,7862
	0,1427	3,3445
	0,1763	4,3771
	0,1901	4,7417
	0,2420	5,4510
	0,2588	6,1524
	0,3084	6,9663
	0,3168	7,2255
	0,3328	7,8011
	0,3939	8,5126
	0,4107	8,2604
	0,4565	9,0896
	0,4786	9,5512
	0,4900	9,9926
	0,5053	9,7862
	0,5305	10,1931
	0,5565	10,3939
	0,6213	10,7551
	0,6809	11,1620
	0,8809	10,7761
	0,9099	10,9728
	0,9465	11,1740
	0,9877	10,8765
	1,0602	10,6757
	1,1389	10,4745
	1,2411	10,6719
	1,2999	10,9799
	1,4152	11,1804
	1,5404	10,9784
	1,6167	10,7746
	1,6823	10,5603
	1,7335	9,9799
	1,7388	9,5265
	1,7472	9,2208
	1,7556	8,9858
	1,7862	8,7835
	1,8297	7,9730
	1,8327	8,3785
	1,8388	8,1746
	1,8640	7,5714
	1,8671	7,7718
	1,8747	7,1690

	1,8839	6,9685
	1,8915	7,1678
	1,9022	7,3694
	1,9022	7,3758
	1,9266	7,8033
	1,9861	8,6670
	2,0113	9,3729
	2,0281	9,9855
	2,0915	10,4235
	2,1594	10,0803
	2,1678	9,7603
	2,1739	9,9600

Tabulka 20: PLA - 10 % (Gyroid)

10 %	S [mm]	F [kN]
	0,0015	0,1978
	0,0260	0,5167
	0,0618	1,1376
	0,1015	2,0664
	0,1305	2,5771
	0,1404	2,8312
	0,1847	3,5082
	0,2076	3,9264
	0,2450	4,6428
	0,2862	5,2981
	0,3244	5,8991
	0,3527	6,4705
	0,4046	6,9322
	0,4458	7,1319
	0,4649	7,3316
	0,5023	7,5305
	0,5450	7,7280
	0,7465	7,7381
	0,9465	7,6077
	1,0060	7,4031
	1,0572	7,1394
	1,1526	6,9367
	1,1862	6,7321
	1,2190	6,5275
	1,2602	6,3263
	1,2999	6,1236
	1,3465	5,9209
	1,5388	5,7140
	1,5404	5,5091

	2,2533	10,2838
	2,4518	10,1755
	2,4701	9,9585
	2,4960	9,7307
	2,5426	9,1796
	2,6510	8,7472
	2,7235	8,3324
	2,9227	8,2844
	2,9937	8,0772
	3,1952	8,1117

	1,5564	5,3064
	1,5701	5,1022
	1,5808	4,8991
	1,6030	4,4940
	1,6098	4,6964
	1,6289	4,2921
	1,6388	4,0912
	1,6472	3,8904
	1,6556	3,6896
	6,0271	1,0761

Pokud bychom chtěli porovnávat jednu z vybraných hodnot při jmenovitém zatížení mezi testovanými vzorky, mohla by nás zaujmout hodnota při středním zatížení, tedy přibližně 10 kN.

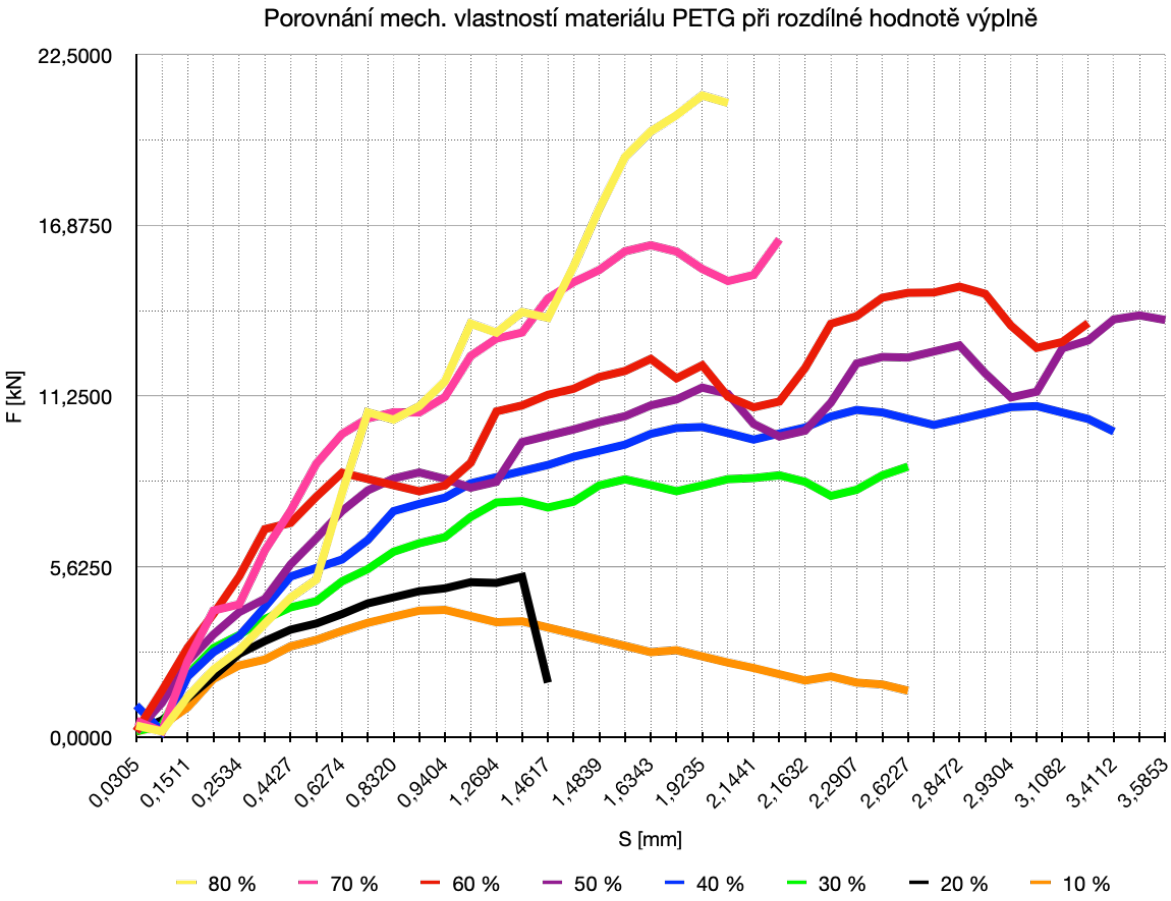
Tabulka 21: Porovnání velikosti deformace u materiálu PLA při přibližně stejném zatížení

Množství výplně [%]	S [mm]	F [kN]
80	0,2130	11,5247
70	0,2511	10,8773
60	0,2771	10,9575
50	0,4084	10,0852
40	0,3649	9,5430
30	0,4549	10,3100
20	0,5305	10,1931
10	1,0060	7,4031

Při 10% výplni (vzor gyroid) u materiálu PLA nebylo možné dosáhnout hodnoty 10 kN. Proto jsme vybrali nebližší možnou hodnotu, která je v tomto případě přesně 7,4031 kN.

Poměrně velký skok mezi hodnotou velikosti deformace nastal mezi vzorky s 60% výplní a s 50% výplní. Což je vidět i na celkovém průběhu v grafu č. 4.

9.2.2 PETG - (VÝPLŇ GYROID)



Graf 4: PETG - 10 - 80 % - (gyroid)

U porovnávání PETG s různým množstvím výplně jsme postupovali naprosto stejně jako u PLA materiálu. Z naměřených dat jsme si vytvořili tabulky s daty z průběhu testování. Tyto data jsme dále upravili a vytvořili z nich graf, který můžete vidět víše. Pokud bychom opět zvolili jednu konkrétní hodnotu napětí a porovnávali, museli bychom určitě přistoupit k o dost nižší hodnotě než u materiálu PLA. Z grafu je jasně vidět, že minimálně 4 z průběhů (40 %, 30 %, 20 %, 10 %) střední hodnoty testování (10 kN) vůbec nedosáhly. Zároveň se při vyšším množství výplně průběhy v grafu a tedy celkové hodnoty u PETG materiálu liší o dost méně.

Tabulka 22: PETG - 80 % (Gyroid)

80 %	S [mm]	F [kN]
	0,0237	0,3938
	0,0275	0,2001
	0,0481	1,3429
	0,0672	2,2362
	0,0809	2,8776
	0,0924	3,7525
	0,1153	4,6061
	0,1343	5,2015
	0,1763	8,0566
	0,2229	10,7135
	0,2267	10,4719
	0,2298	10,9147

	0,2305	11,7334
	0,2618	13,6369
	0,2740	13,3360
	0,2847	14,0168
	0,2901	13,8272
	0,3061	15,5186
	0,3397	17,4246
	0,3694	19,1242
	0,3908	19,9662
	0,4046	20,5042
	0,4290	21,1539
	0,4450	20,9055

Tabulka 23: PETG - 70 % (Gyroid)

70 %	S [mm]	F [kN]
	0,0130	0,5493
	0,0359	0,1986
	0,1046	2,5217
	0,1908	4,1815
	0,1946	4,3846
	0,2603	6,1640
	0,3343	7,4702
	0,4374	9,0211
	0,4900	9,9971
	0,5526	10,5123
	0,5671	10,7139
	0,5832	10,7083
	0,6343	11,2194
	0,6824	12,5705
	0,7618	13,1415
	0,8007	13,3431
	0,8915	14,4638
	1,0030	15,0007
	1,0450	15,4028
	1,1793	16,0177
	1,2541	16,2185
	1,3236	16,0105
	1,3503	15,4373
	1,3564	15,0371
	1,4045	15,2398
	1,4656	16,4107

Tabulka 24: PETG - 60 % (Gyroid)

60 %	S [mm]	F [kN]
	0,0206	0,2057
	0,0328	1,5434
	0,1244	2,9597
	0,1725	4,0691
	0,2809	5,3026
	0,3771	6,8655
	0,3878	7,0682
	0,5061	7,9315
	0,5916	8,7236
	0,6274	8,5160
	0,6335	8,3121
	0,6381	8,1094
	0,6404	8,3046
	0,6824	9,0484
	0,8442	10,7424
	0,8847	10,9395
	1,0450	11,2894
	1,0725	11,4884
	1,2236	11,8762
	1,3037	12,0759
	1,4304	12,4727
	1,5213	11,8327
	1,5266	12,2614
	1,5282	11,2239
	1,5579	10,8780
	1,6129	11,0676
	1,6633	12,1763
	1,8159	13,6290
	1,8472	13,8812
	2,0235	14,4878
	2,2228	14,6493
	2,4235	14,6598
	2,4922	14,8546
	2,5533	14,6171
	2,6243	13,5691
	2,6395	12,8343
	2,7525	13,0310
	2,7975	13,6519

Tabulka 25: PETG - 50 % (Gyroid)

50 %	S [mm]	F [kN]
	0,0565	0,1986
	0,1145	1,1428
	0,1717	2,5067
	0,2008	3,3921
	0,3099	4,1291
	0,3443	4,5671
	0,4030	5,7017
	0,4771	6,5635
	0,5839	7,4608
	0,6832	8,1402
	0,7923	8,5332
	0,8412	8,7314
	0,9351	8,5201
	0,9358	8,2293
	0,9389	8,4238
	1,1381	9,7326
	1,1618	9,9413
	1,1847	10,1470
	1,3198	10,3872
	1,4251	10,5858
	1,5243	10,9413
	1,5831	11,1366
	1,7312	11,5285
	1,7854	11,3194
	1,8304	10,3302
	1,9190	9,9147
	1,9609	10,1092
	2,0312	11,0320
	2,1632	12,3213
	2,2350	12,5364
	2,4357	12,5180
	2,6090	12,7166
	2,6861	12,9178
	2,7952	11,9984
	2,8349	11,2029
	2,9265	11,3932
	3,0380	12,8215
	3,0761	13,0812
	3,2418	13,7744
	3,4410	13,9074
	3,6395	13,7557

Tabulka 26: PETG - 40 % (Gyroid)

40 %	S [mm]	F [kN]
	0,0160	1,0548
	0,0298	0,2020
	0,0969	2,0068
	0,1359	2,8083
	0,1954	3,3419
	0,2504	4,3026
	0,3435	5,3026
	0,3740	5,5851
	0,4168	5,8632
	0,4954	6,5080
	0,5977	7,4567
	0,6832	7,6962
	0,7816	7,9030
	0,8793	8,3740
	1,0045	8,5763
	1,0717	8,7775
	1,1709	8,9783
	1,2679	9,2477
	1,4442	9,4471
	1,4885	9,6490
	1,6106	10,0020
	1,7846	10,1961
	1,9854	10,2283
	2,0067	10,0275
	2,1281	9,8139
	2,2907	10,0151
	2,3518	10,2126
	2,4228	10,5738
	2,5403	10,7918
	2,7395	10,7094
	2,7869	10,5007
	2,8556	10,2954
	2,8830	10,4865
	3,0723	10,6839
	3,1288	10,8840
	3,3273	10,9181
	3,3517	10,7053
	3,3578	10,4947
	3,4074	10,0792

Tabulka 27: PETG - 30 % (Gyroid)

30 %	S [mm]	F [kN]
	0,0305	0,2016
	0,0336	0,3942
	0,1756	2,0780
	0,2366	2,9492
	0,2817	3,3733
	0,3298	3,9013
	0,3481	4,2872
	0,3748	4,4892
	0,4458	5,1434
	0,4916	5,5477
	0,5977	6,1180
	0,6442	6,3993
	0,7641	6,6017
	0,8381	7,2638
	0,9702	7,7426
	1,1717	7,7891
	1,2442	7,5759
	1,3610	7,7677
	1,4465	8,3058
	1,5190	8,5044
	1,7190	8,3181
	1,7892	8,1132
	1,9006	8,3061
	1,9472	8,5107
	2,1464	8,5471
	2,3464	8,6370
	2,4327	8,4242
	2,4495	7,9596
	2,5037	8,1600
	2,5991	8,6359
	2,7044	8,9248

Tabulka 28: PETG - 20 % (Gyroid)

20 %	S [mm]	F [kN]
	0,0038	0,1978
	0,0107	0,5680
	0,0954	1,2957
	0,1572	2,0136
	0,2626	2,7547
	0,3046	3,1778
	0,3916	3,5517
	0,4213	3,7544
	0,5023	4,0661
	0,6023	4,4176
	0,6992	4,6173
	0,8725	4,8189
	1,0725	4,9141
	1,2549	5,1157
	1,4541	5,0920
	1,5167	5,2910
	1,7052	1,8060

Tabulka 29: PETG - 10 % (Gyroid)

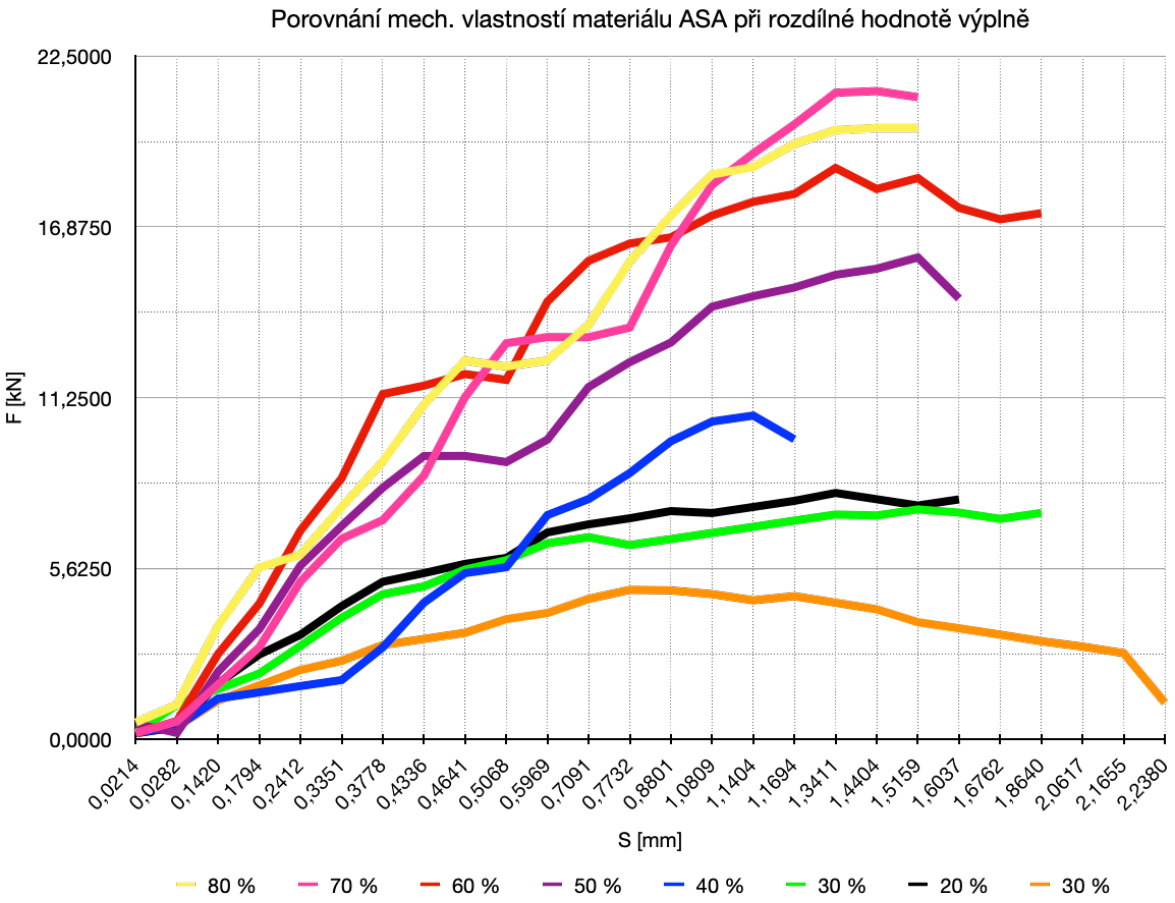
10 %	S [mm]	F [kN]
	0,0252	0,1990
	0,0359	0,4009
	0,0771	0,9963
	0,2237	1,9285
	0,2786	2,3722
	0,3053	2,5681
	0,3870	3,0028
	0,4252	3,2133
	0,4931	3,5097
	0,5542	3,7773
	0,7374	3,9796
	0,9373	4,1771
	1,1373	4,2025
	1,2488	4,0006
	1,3305	3,7979
	1,5297	3,8286
	1,6503	3,6225
	1,7701	3,4209
	1,9518	3,2190
	2,0968	3,0189
	2,1380	2,8106
	2,3365	2,8746
	2,4067	2,6719
	2,5403	2,4670
	2,7426	2,2875

	2,8319	2,0833

	3,1052	2,0117
	3,2784	1,8079
	3,4769	1,7464
	3,6135	1,5426

	2,9052	1,8776

9.2.3 ASA - (VÝPLŇ GYROID)



Graf 5: ASA - 10 - 80 % - (gyroid)

Tabulka 30: ASA - 80 % (Gyroid)

80 %	S [mm]	F [kN]
	0,0056	0,5491
	0,0109	1,1374
	0,1178	3,7437
	0,1964	5,6580
	0,2346	6,0784
	0,3048	7,6413

	0,3651	9,1449
	0,4262	11,0176
	0,4933	12,4774
	0,5078	12,2743
	0,5208	12,4815
	0,5590	13,6502
	0,6727	15,7335
	0,7551	17,2457

	0,8757	18,6025
	0,9017	18,8517
	0,9742	19,6112
	1,0582	20,0720
	1,2605	20,1387
	1,4612	20,1387

Tabulka 31: ASA - 70 % (Gyroid)

70 %	S [mm]	F [kN]
	0,0008	0,2008
	0,0405	0,5841
	0,1282	1,8064
	0,2038	3,0268
	0,3244	5,1932
	0,3542	6,6021
	0,3717	7,2154
	0,4603	8,6786
	0,5549	11,2748
	0,5923	13,0441
	0,6076	13,2468
	0,6129	13,2423
	0,6259	13,5616
	0,7053	16,2578
	0,7801	18,2621
	0,8488	19,2943
	0,8854	20,2550
	0,9961	21,2971
	1,1961	21,3521
	1,2251	21,1494

Tabulka 32: ASA - 60 % (Gyroid)

60 %	S [mm]	F [kN]
	0,0061	0,1948
	0,0122	0,5995
	0,1305	2,8091
	0,1450	4,4644
	0,2359	6,8726
	0,3183	8,5954
	0,4084	11,3689
	0,4442	11,6461
	0,4748	12,0291
	0,4755	11,8365
	0,5725	14,4170
	0,6641	15,7599
	0,7732	16,3287
	0,7771	16,5329
	0,8625	17,2523
	0,9694	17,7034
	1,0358	17,9597
	1,1572	18,8185
	1,2213	18,1245
	1,2343	18,4857
	1,2442	17,5067
	1,2625	17,1275
	1,3175	17,3283

Tabulka 33: ASA - 50 % (Gyroid)

50 %	S [mm]	F [kN]
	0,0504	0,5171
	0,0611	0,2031
	0,1679	2,2279
	0,2382	3,6240
	0,2977	5,7167
	0,3755	7,0217
	0,4328	8,2848
	0,5191	9,3283
	0,5221	9,3321
	0,5236	9,1297
	0,5458	9,8705
	0,6618	11,6019
	0,7480	12,4221
	0,7809	13,0673
	0,9007	14,2499
	0,9839	14,5935
	1,0236	14,8801
	1,1877	15,2979
	1,2152	15,4987
	1,2992	15,8712
	1,3663	14,5189

Tabulka 34: ASA - 40 % (Gyroid)

40 %	S [mm]	F [kN]
	0,0489	0,2046
	0,1069	0,4095
	0,2488	1,3406
	0,2832	1,5415
	0,3007	1,7494
	0,3160	1,9469
	0,4114	3,0219
	0,4908	4,4985
	0,5740	5,4712
	0,6030	5,6650
	0,7244	7,3833
	0,8083	7,9101
	0,8839	8,7670
	1,0099	9,8154
	1,0862	10,4644
	1,1412	10,6607
	1,2396	9,8798

Tabulka 35: ASA - 30 % (Gyroid)

30 %	S [mm]	F [kN]
	0,0168	0,1990
	0,1176	1,1342
	0,1855	1,6498
	0,2343	2,1650
	0,3603	3,0717
	0,4198	3,9980
	0,5015	4,7724
	0,5587	5,0321
	0,6328	5,5893
	0,7030	5,8950
	0,8381	6,4522
	0,8915	6,6523
	0,9213	6,3945
	0,9870	6,5919
	1,0205	6,7935
	1,1259	6,9940
	1,2992	7,2001
	1,3366	7,4016
	1,5373	7,3702
	1,7281	7,5684
	1,9274	7,4646
	1,9403	7,2563
	2,0793	7,4545

Tabulka 36: ASA - 20 % (Gyroid)

20 %	S [mm]	F [kN]
	0,0214	0,1963
	0,0282	0,3927
	0,1420	1,8405
	0,1794	2,7877
	0,2412	3,4400
	0,3351	4,3813
	0,3778	5,1857
	0,4336	5,4701
	0,4641	5,7755
	0,5068	5,9711
	0,5969	6,8111
	0,7091	7,0779
	0,7732	7,2776
	0,8801	7,5148
	1,0809	7,4496
	1,1404	7,6501
	1,1694	7,8509
	1,3411	8,1106
	1,4404	7,9041
	1,5159	7,6976
	1,6037	7,8996

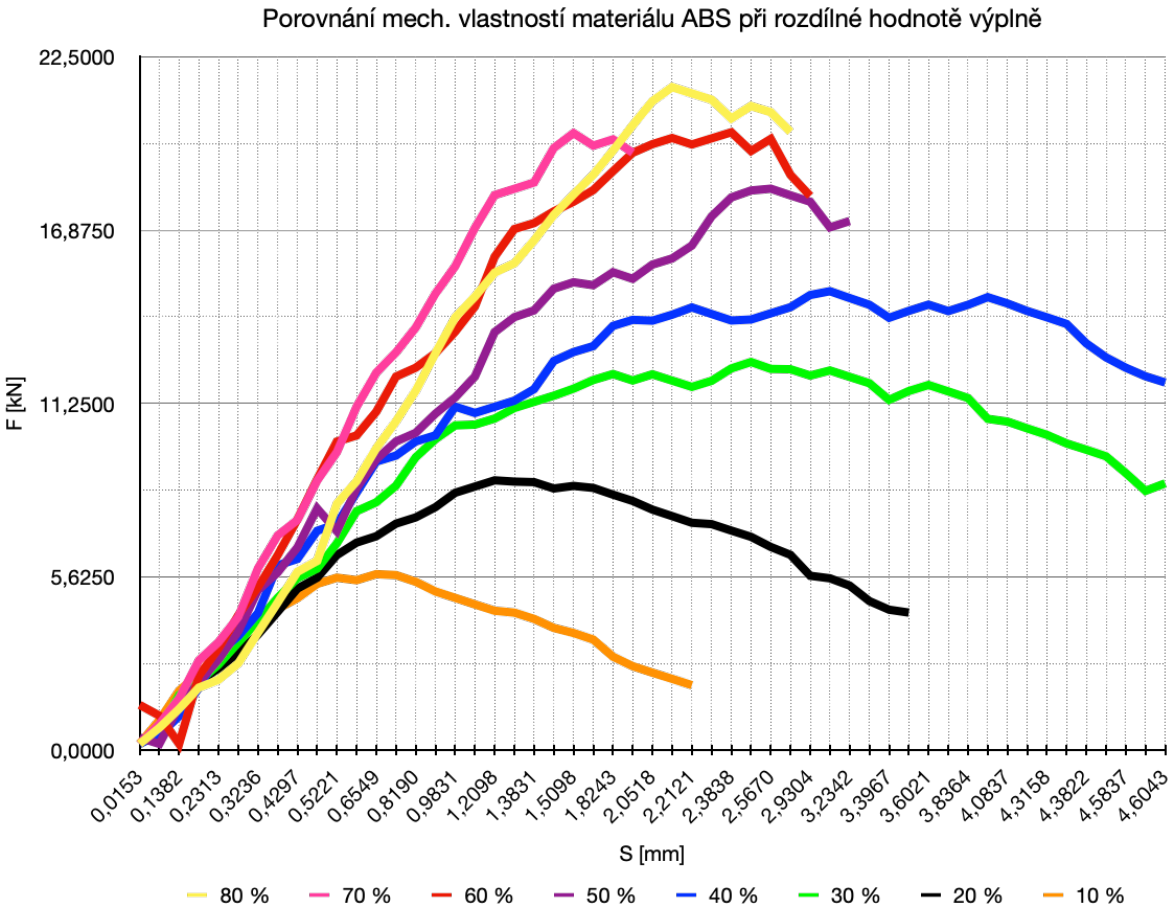
Tabulka 37: ASA - 10 % (Gyroid)

10 %	S [mm]	F [kN]
	0,0038	0,2023
	0,0267	0,4084
	0,1244	1,2732
	0,1817	1,7715
	0,2290	2,2811
	0,2672	2,5809
	0,3366	3,1013
	0,3832	3,3014
	0,4068	3,5052

	0,4588	3,9541
	0,5320	4,1561
	0,6297	4,6214
	0,7343	4,9174
	0,9335	4,9017
	1,1328	4,7781
	1,2679	4,5739
	1,4686	4,7095
	1,6457	4,4948

	1,6663	4,2775
	1,8144	3,8537
	1,9854	3,6521
	2,1724	3,4449
	2,1869	3,2265
	2,3876	3,0489
	2,4953	2,8334
	3,5181	1,2009

9.2.4 ABS - (VÝPLŇ GYROID)



Graf 6: ABS - 10 - 80 % - (gyroid)

80 %	S [mm]	F [kN]

Tabulka 38: ABS - 80 % (Gyroid)

	0,0122	0,2005
	0,0183	0,7220

	0,0572	1,3361
	0,0962	2,0260
	0,1160	2,2830

	0,1351	2,8124
	0,1840	3,8054
	0,2107	4,7822
	0,2404	5,7867
	0,2931	6,1397
	0,3458	7,9922
	0,3557	8,7228
	0,4084	9,7937
	0,4496	10,6697
	0,4923	11,6604
	0,5595	12,8804
	0,5809	14,0434
	0,6221	14,7141
	0,6557	15,4942
	0,6771	15,7985
	0,6939	16,5392
	0,7313	17,3680
	0,7687	18,0294
	0,7854	18,6697
	0,8259	19,4547
	0,8717	20,2768
	0,9022	21,0573
	0,9457	21,5151
	0,9870	21,3105
	0,9954	21,1078
	1,0045	20,4978
	1,0137	20,9018
	1,0190	20,7005
	1,0205	20,0606

Tabulka 39: ABS - 70 % (Gyroid)

70 %	S [mm]	F [kN]
	0,0084	0,1993
	0,0443	0,8416
	0,1053	1,6756
	0,1717	2,9057
	0,1809	3,5030
	0,2091	4,3172
	0,2786	5,8995
	0,3366	6,9659
	0,3572	7,4680
	0,3954	8,7430
	0,4404	9,6663
	0,5076	11,1418
	0,5916	12,2486
	0,6252	12,9070
	0,6473	13,7114
	0,7236	14,8160
	0,7893	15,7003
	0,8641	16,9465
	0,9572	18,0110
	1,0152	18,2141
	1,0671	18,4194
	1,1343	19,5386
	1,1717	20,0220
	1,3404	19,6151
	1,3503	19,8181
	1,3648	19,3869

Tabulka 40: ABS - 60 % (Gyroid)

60 %	S [mm]	F [kN]
	0,0076	1,4665
	0,0168	1,1177
	0,0542	0,2005
	0,0580	2,4021
	0,0641	3,2977
	0,0992	4,3738
	0,1313	5,2835
	0,1817	6,3267
	0,2244	7,4859
	0,2931	8,7858
	0,3351	10,0114
	0,3687	10,2103
	0,3923	10,9814
	0,4458	12,1212
	0,4717	12,4090
	0,5137	12,8796
	0,5343	13,5784
	0,5862	14,3956
	0,6740	16,0090
	0,7824	16,9094
	0,9129	17,1020

	0,9480	17,4838
	1,0099	17,7956
	1,0473	18,1729
	1,1228	18,7855
	1,2457	19,3846
	1,2908	19,6642
	1,3572	19,8631
	1,4824	19,6537
	1,6037	19,8515
	1,6312	20,0490
	1,7113	19,4420
	1,7159	19,8331
	1,7396	18,6660
	1,7465	17,9818

Tabulka 41: ABS - 50 % (Gyroid)

50 %	S [mm]	F [kN]
	0,0031	0,4043
	0,0130	0,2016
	0,0504	1,4171
	0,1511	2,1998
	0,1588	2,9406
	0,1939	3,8477
	0,3298	5,1868
	0,3542	5,7657
	0,3656	6,5781
	0,4099	7,8389
	0,4244	7,1060
	0,4633	8,4931
	0,5229	9,4343
	0,5603	10,0162
	0,5946	10,2965
	0,6198	10,9185
	0,7251	11,4453
	0,7328	12,1220
	0,8488	13,5638
	0,9335	14,0498
	0,9503	14,2697
	1,0373	14,9734
	1,1587	15,1813
	1,2106	15,0873
	1,2205	15,5066
	1,2694	15,2945
	1,3190	15,7558
	1,4602	15,9540
	1,5129	16,3732
	1,5999	17,3182
	1,7159	17,9342
	1,7846	18,1601
	1,9846	18,2182
	2,0136	18,0028
	2,1052	17,7956
	2,1915	16,9623
	2,2502	17,1687

Tabulka 42: ABS - 40 % (Gyroid)

40 %	S [mm]	F [kN]
	0,0145	0,2065
	0,0260	0,4972
	0,0626	1,0956
	0,1641	2,0185
	0,2534	3,1470
	0,2969	3,7001
	0,3557	4,4457
	0,4878	5,9947
	0,5061	6,2030
	0,5923	7,1154
	0,6244	7,3417
	0,7076	8,3552
	0,8267	9,3631
	0,8801	9,5576
	0,9175	10,0159
	1,0114	10,2148
	1,0725	11,1448
	1,1663	10,9402
	1,2152	11,1399
	1,2541	11,3400
	1,2801	11,7136
	1,3732	12,6275
	1,4808	12,9171
	1,6045	13,1093
	1,6831	13,7658
	1,8487	13,9617
	2,0487	13,9355

	2,1777	14,1296
	2,2480	14,3653
	2,3518	14,1524
	2,4800	13,9415
	2,6808	13,9730
	2,7120	14,1742
	2,7319	14,3720
	2,8441	14,7677
	3,0456	14,8917
	3,1074	14,6688
	3,2364	14,4511
	3,2471	14,0284
	3,3158	14,2532
	3,4204	14,4556
	3,5502	14,2465
	3,6059	14,4492
	3,6792	14,6984
	3,8402	14,4934
	3,8685	14,2491
	3,9570	14,0442
	4,0356	13,8287
	4,0616	13,1974
	4,0906	12,7436
	4,1020	12,4083
	4,1104	12,1299
	4,1188	11,9283

Tabulka 43: ABS - 30 % (Gyroid)

30 %	S [mm]	F [kN]
	0,0153	0,2023
	0,0427	0,6396
	0,1382	1,7918
	0,1832	2,2223
	0,2313	2,7731
	0,2855	3,4846
	0,3236	4,1954
	0,3862	4,9414
	0,4297	5,5758
	0,4671	5,8868
	0,5221	6,7100
	0,6183	7,7531
	0,6549	8,0424
	0,7084	8,5815
	0,8190	9,5033
	0,9137	10,0901
	0,9831	10,5374
	1,1824	10,5622
	1,2098	10,7589
	1,2396	11,1006
	1,3831	11,3007
	1,4221	11,5004
	1,5098	11,7289
	1,6251	12,0092
	1,8243	12,2026
	1,8770	11,9942
	2,0518	12,1947
	2,1663	11,9901
	2,2121	11,7863
	2,2739	11,9834
	2,3838	12,3854
	2,4762	12,5941
	2,5670	12,3697
	2,7685	12,3588
	2,9304	12,1535
	3,1319	12,3191
	3,2342	12,1111
	3,3265	11,9047
	3,3967	11,3636
	3,5311	11,6518
	3,6021	11,8485
	3,7898	11,6383
	3,8364	11,4239
	3,8830	10,7499
	4,0837	10,6596
	4,1478	10,4404
	4,3158	10,2306
	4,3494	9,9510
	4,3822	9,7465
	4,5486	9,5333
	4,5837	8,9896
	4,5890	8,4122
	4,6043	8,6561

Tabulka 44: ABS - 20 % (Gyroid)

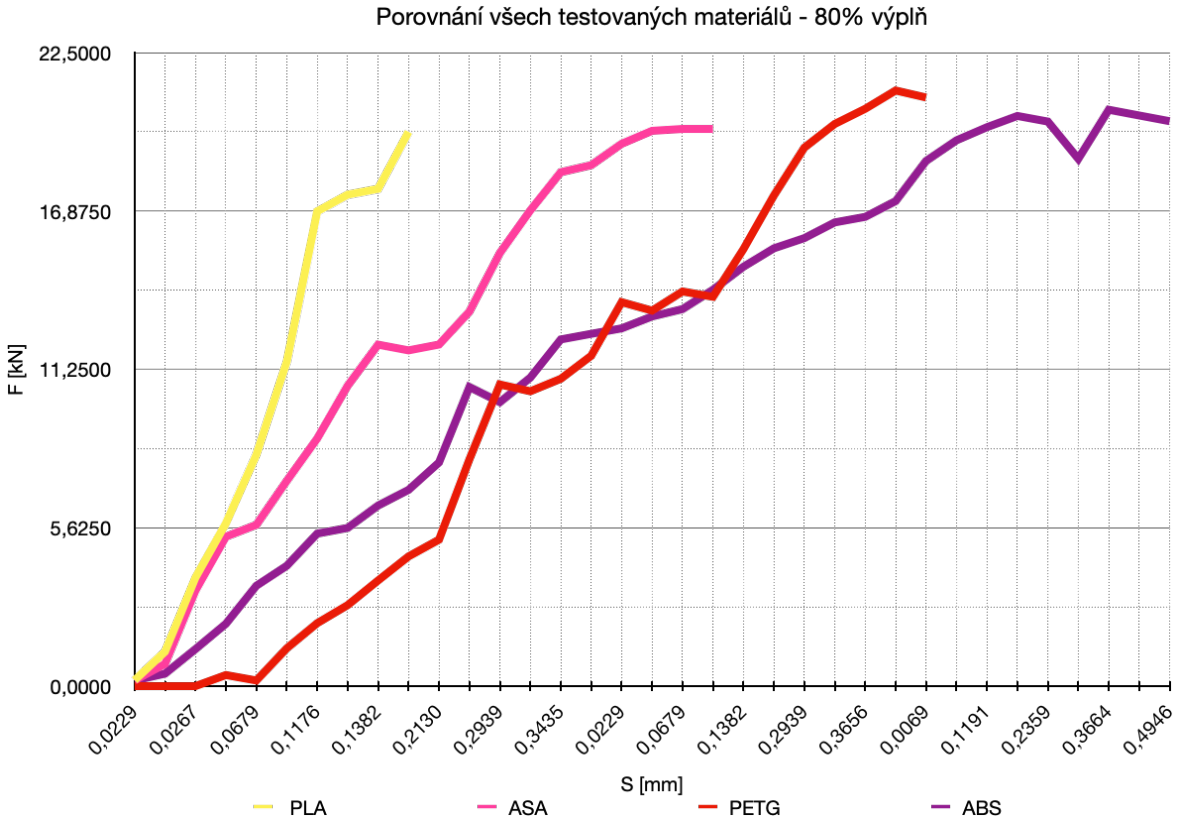
20 %	S [mm]	F [kN]
	0,0221	0,1982
	0,0405	0,5815
	0,1420	1,4197
	0,1977	2,2257
	0,2557	2,6449
	0,3183	3,1620
	0,3557	3,7484
	0,4481	4,4858
	0,5420	5,2412
	0,5488	5,5941
	0,6496	6,3270
	0,7534	6,7336
	0,7717	6,9404
	0,8480	7,3492
	0,9175	7,5515
	1,0030	7,8839
	1,1228	8,3507
	1,1824	8,5523
	1,3663	8,7535
	1,5678	8,7131
	1,7671	8,6958
	1,7869	8,4890
	1,9861	8,5729
	2,1861	8,5081
	2,3724	8,2900
	2,4953	8,0840
	2,5731	7,8033
	2,6281	7,5924
	2,8265	7,3765
	3,0258	7,3327
	3,1357	7,1232
	3,2143	6,9202
	3,3433	6,5919
	3,4204	6,3349
	3,5479	5,6567
	2,5724	2,3115
	2,6571	2,1065
	3,7463	5,5743
	3,7807	5,3378
	3,8013	4,8350
	3,9265	4,5555
	4,1288	4,4618

Tabulka 45: ABS - 10 % (Gyroid)

10 %	S [mm]	F [kN]
	0,0221	0,2046
	0,0969	0,9723
	0,2030	1,9244
	0,2534	2,4868
	0,3137	3,0961
	0,4336	4,0362
	0,4893	4,2359
	0,5358	4,5798
	0,5992	4,9287
	0,6984	5,3937
	0,8053	5,5945
	1,0038	5,5140
	1,0763	5,7092
	1,2770	5,6788
	1,3091	5,4622
	1,3472	5,1468
	1,4152	4,9388
	1,5701	4,7275
	1,6052	4,5218
	1,8052	4,4603
	1,9014	4,2561
	1,9365	3,9646
	2,1373	3,8001
	2,2037	3,5858
	2,2739	3,0301
	2,3937	2,7225
	2,4930	2,5127

9.3 KRITÉRIUM 2 – POROVNÁNÍ MATERIÁLŮ MEZI SEBOU

9.3.1 80% VÝPLŇ (GYROID)

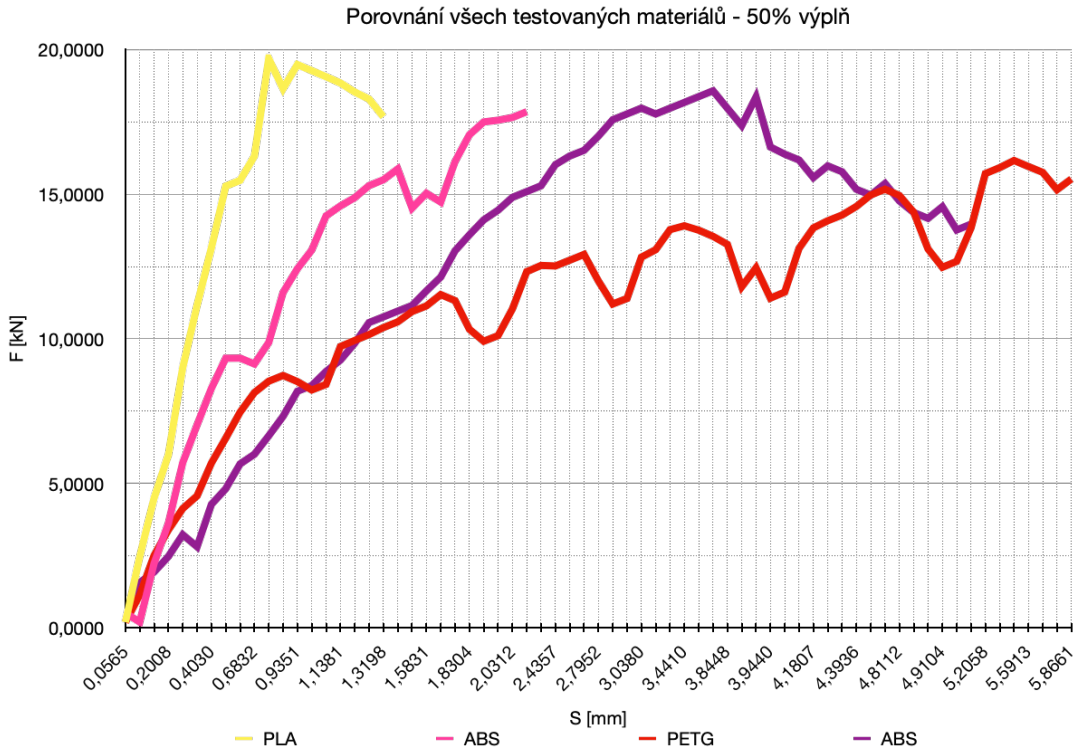


Graf 7: 80% výplň (gyroid) a porovnání všech materiálů

Pro následující porovnání jsme vybrali hodnoty 80 %, 50 % a 10 % s výplní gyroid.. Vybrali jsme maximum, minimum a střední hodnotu z toho důvodu, že výsledky jsou v dalších hodnotách velmi podobné, tedy co se týká rozdílů mezi jednotlivými průběhy vzorků.

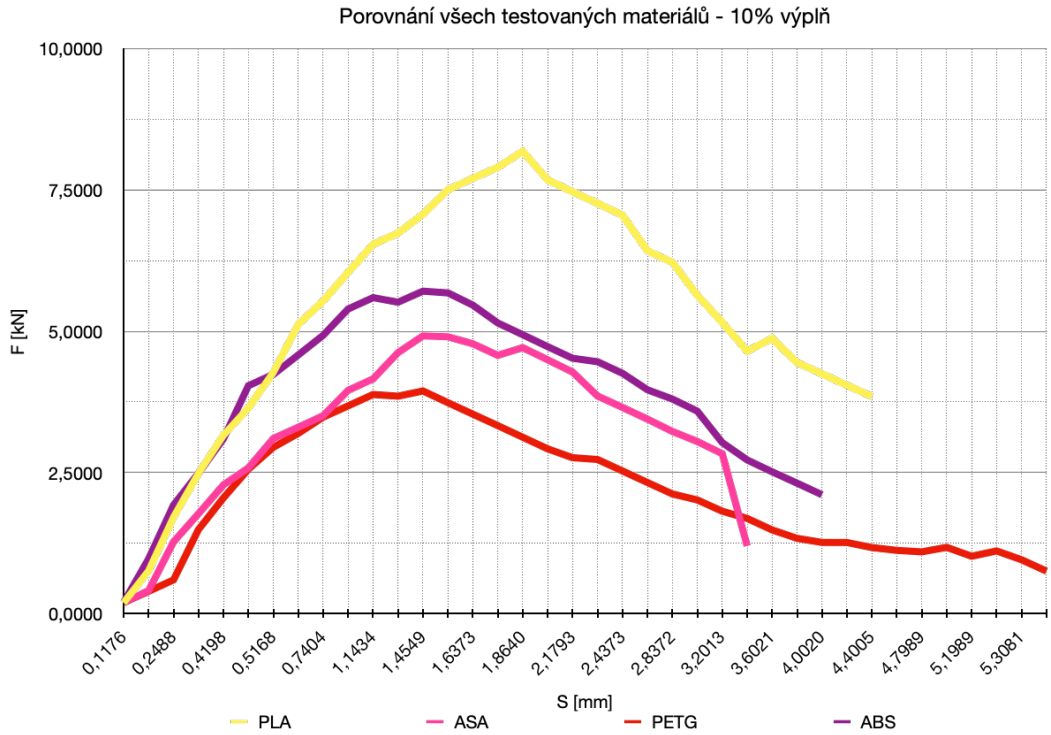
Potvrzují se tak u všech jednotlivých materiálů jejich obecné vlastnosti. Nejvíce je to vidět u materiálu PLA, který je křehký a tvrdý a pak u materiálu PETG, který je naopak velmi pružný a houževnatý. Toto tvrzení se potvrdlo ve všech prováděných testech. U materiálů ABS a ASA nás překvapili větší rozdíly v pevnosti materiálu. Podle výsledků je ABS materiál více houževnatý, ASA je spíš křehčí.

9.3.2 50% - VÝPLŇ (GYROID)



Graf 8: 50% výplň (gyroid) a porovnání všech materiál

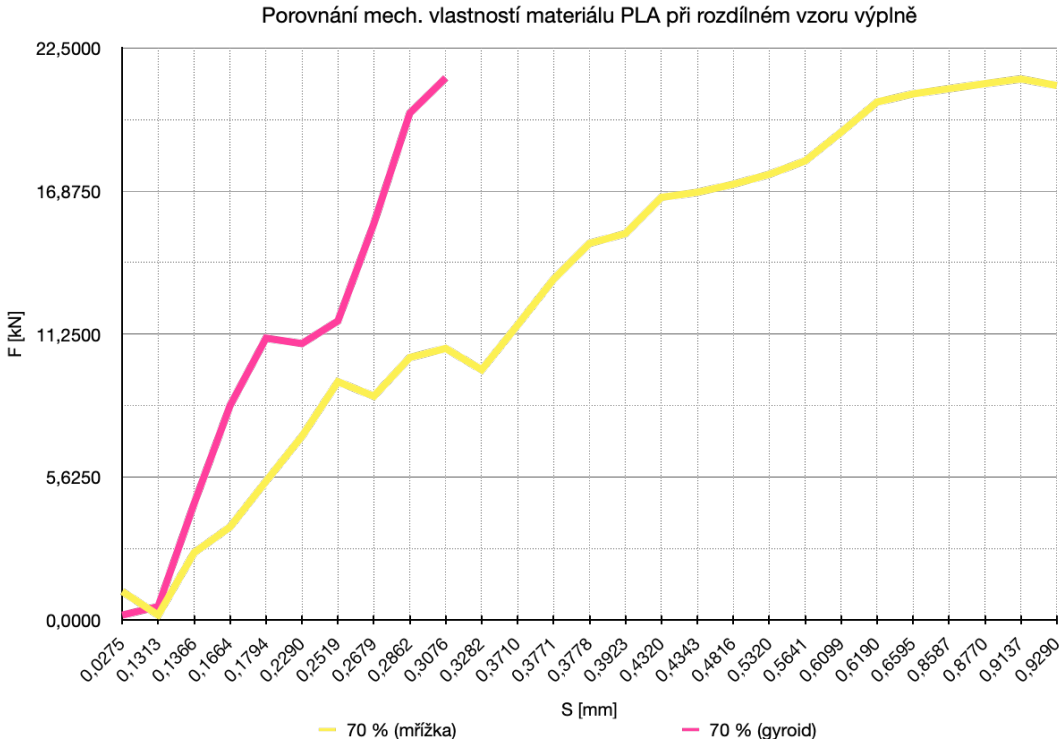
9.3.3 10 %- VÝPLŇ (GYROID)



Graf 9: 10% výplň (gyroid) a porovnání všech materiálů

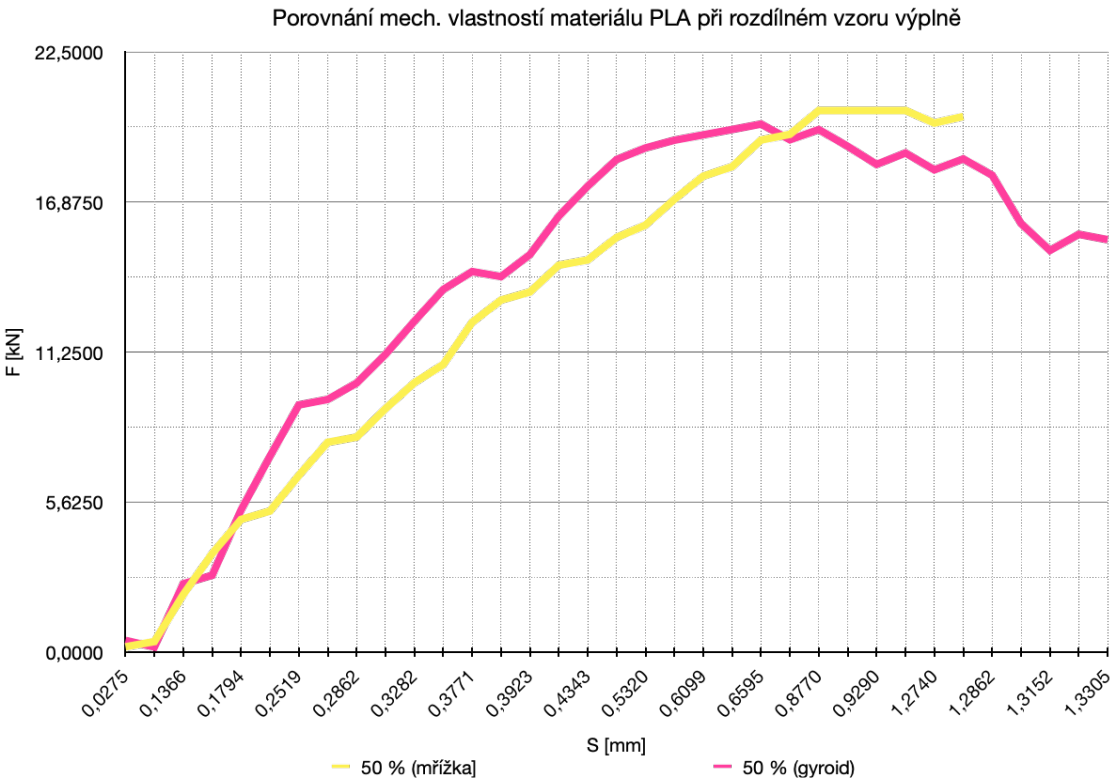
9.4 KRITÉRIUM 3- POROVNÁNÍ VZORU VÝPLNÍ U JEDNOHO MATERIÁLU

9.4.1 70% - VÝPLŇ (GYROID)/(MŘÍŽKA)



Graf 10: Porovnání vzoru výplní (gyroid, mřížka) 70 %

9.4.2 50% - VÝPLŇ (GYROID)/(MŘÍŽKA)

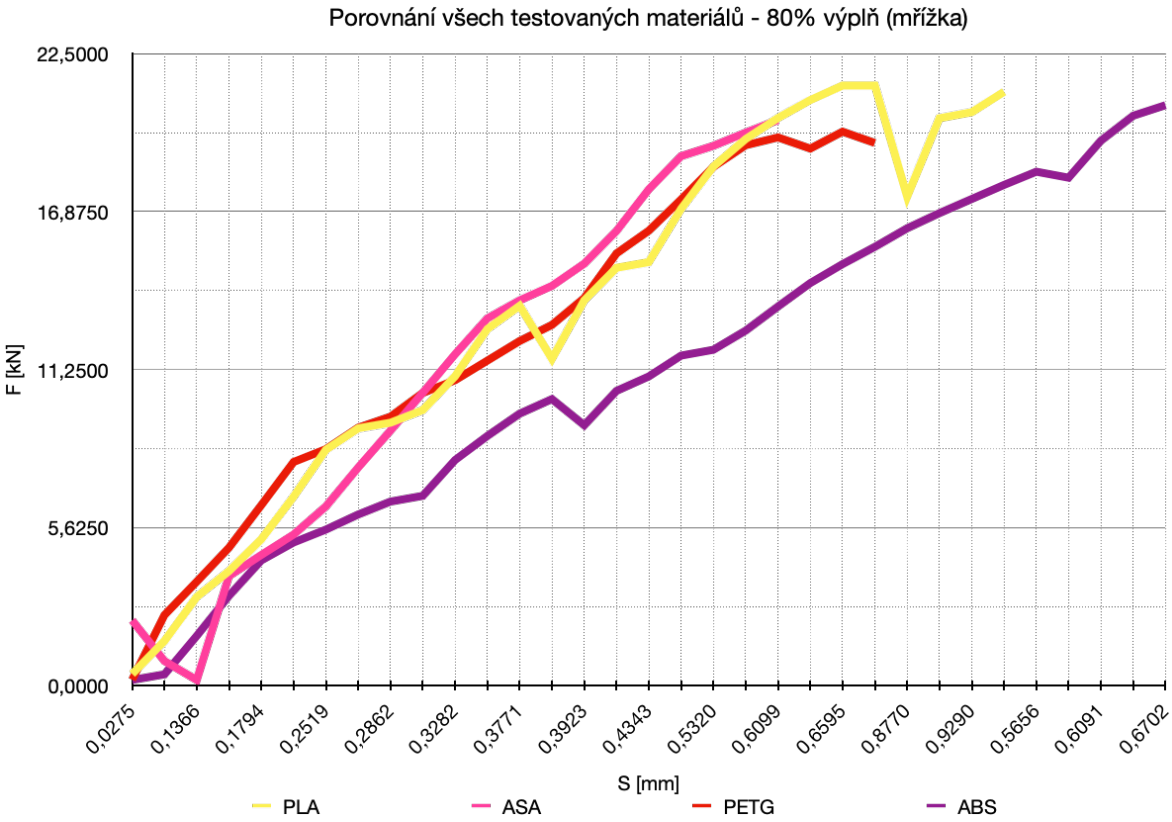


Graf 11: Porovnání vzoru výplní (gyroid, mřížka) 50 %

Pro porovnání jsme vybrali dvě hodnoty (50 % a 70 %). Jak je v grafu vidět, por hodnotu 70 % se výsledné křivky poměrně liší. Z grafu vyplívá, že pro výplň gyroid při stejnom množství výplně má lepší vlastnosti v tlaku než s výplní mřížka. U hodnoty 50 % se ale rozdíl mezi vzory výplně o něco zmenšil.

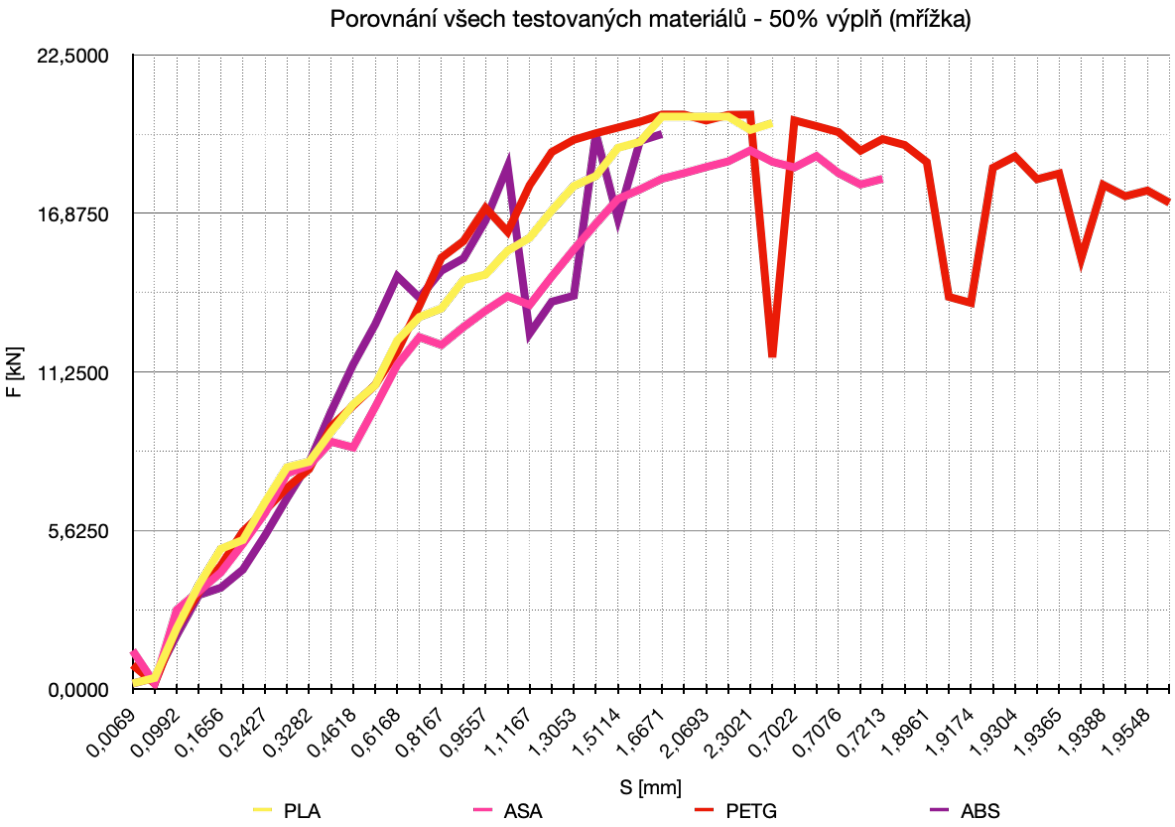
9.5 KRITÉRIUM 4 – POROVNÁNÍ VZORU VÝPLNÍ MEZI TESTOVANÝMI MATERIÁLY

9.5.1 80% - VÝPLŇ (MŘÍŽKA)



Graf 12: Porovnání testovaných materiálů mezi sebou (80% výplň), vzor mřížka

9.5.2 50% - VÝPLŇ (MŘÍŽKA)



Graf 13: Porovnání testovaných materiálů mezi sebou (50% výplň), vzor mřížka

U testování s výplní mřížka a porovnáním mezi jednotlivými materiály se podle výsledků ukázalo, že se při použití mřížky snižují schopnosti vzorků odolávat v tlaku, nebo se alespoň oproti původní mu gyroidu značně zhoršily. Myslíme si, že je to hlavně kvůli menší vazbě výplně na vnitřní perimetry a horní a spodní vrstvy vnitřní struktury 3D výtisků. Tato tvrzení se dají zobecnit na veškeré testování se vzorem výplně mřížka.

9.6 KRITÉRIUM 5 - OHYBOVÝ TEST

Při testování na ohybový test jsme chtěli zjistit, jakou silou musíme na jednotlivé vzorky od různých materiálů působit, pokud chceme dosáhnout určité velikosti průhybu. Podle zkušebních vzorků jsme si určili hodnotu pro dosažení průhybu na 5,4 mm. Této hodnoty se nám nepodařilo dosáhnout s materiálem PLA při hodnotě výplně 30 %, který při ohýbaní prasknul. Vzorky z ostatních materiálů testování vydrželi. Hodnoty působící síly u materiálu PETG potvrdili jeho pružnost a houževnatost.

Tabulka 46: Ohybový test výplň 30 %, vzor výplně - gyroid

Materiál	S [mm]	F [kN]

PLA	5,0027	0,8644
ASA	5,4012	0,7531
PETG	5,4081	0,6456
ABS	5,402	0,876

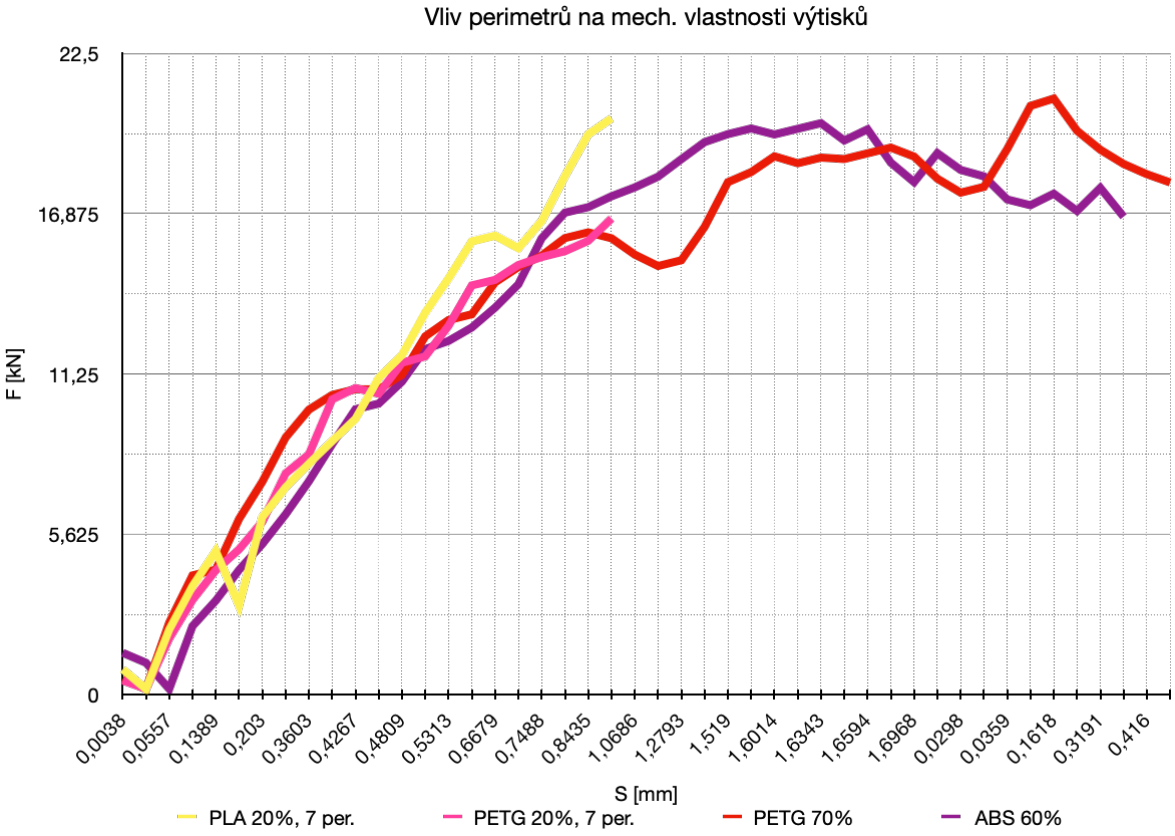
Tabulka 47: Ohybový test výplň 20 %, vzor výplně - gyroid

Materiál	S [mm]	F [kN]
PLA	5,4039	1,2421
ASA	5,4004	0,9364
PETG	5,4119	0,7295
ABS	5,4035	0,8524

Z tabulky č. 47 můžeme vyhodnotit následující. Je vidět, že při snížení hodnoty výplně u materiálu PLA ze 30 % na 20 % už nedochází k prasknutí vzorku, ale dokážeme zvolené hodnoty 5,4 mm dosáhnout. Zároveň se potvrdila role materiálu PETG, který i pro hodnotu 20% výplně vyšel s nejmenší potřebnou silou pro jeho deformaci v ohybu pro dosažení hodnoty 5,4 mm.

9.7 KRITÉRIUM 6 – NASTAVENÍ PERIMETRŮ VÝTISKU

Úpravou nastavení počtu perimetrů jsme se snažili dosáhnout u vzorků s 20% množstvím výplně stejných vlastností jako u vzorků s větším množstvím výplně (60 % – 80 %) se vzorem gyroid.



Graf 14: Vliv počtu perimetrů na mech. vlastnosti výtisků (7 perimetrů)

Zkoušeli jsme porovnávat celou řadu vzorků a nastavení. Dospěli jsme k závěru, že se vlastnosti vzorku s 20% výplní se vzorem gyroid a 7 perimetry z materiálu PLA podobají materiálu PETG s hodnotou výplně 70 % a 2 perimetry a také vzorku ABS se 60% výplní a 2 perimetry.

Porovnání času tisku:

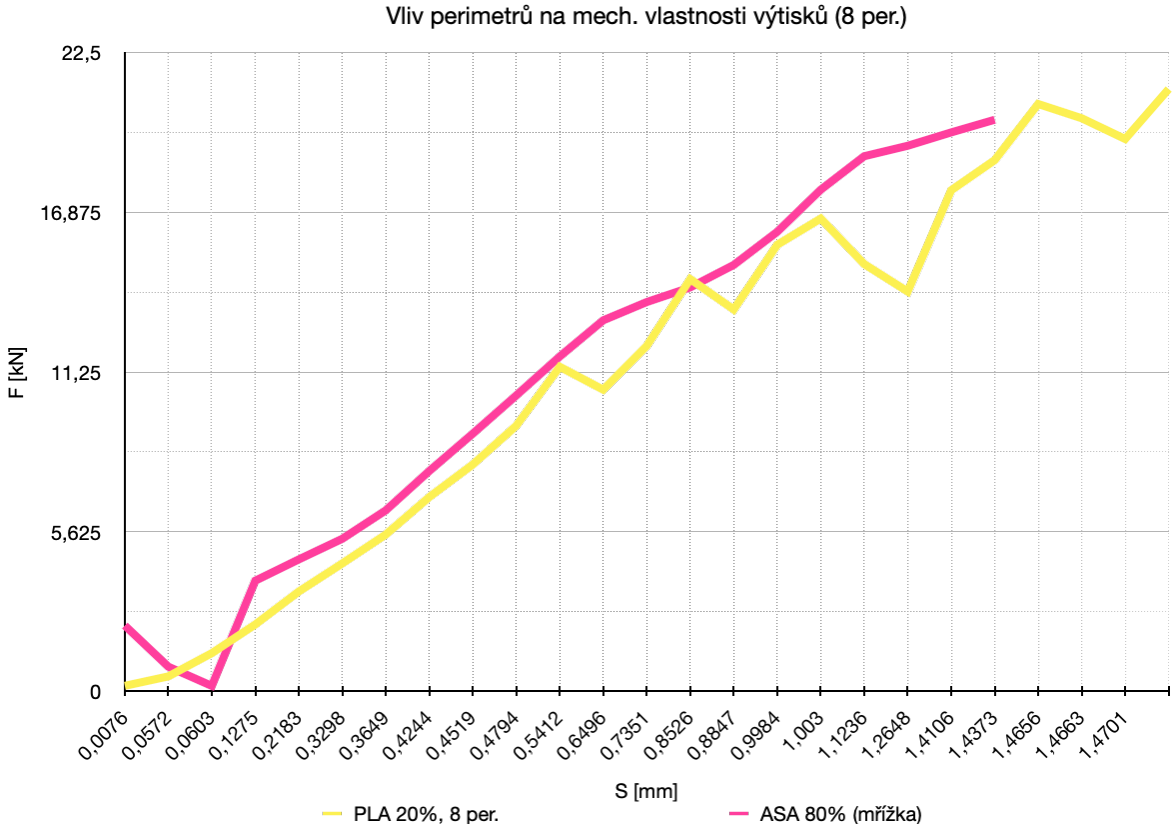
Tabulka 48: Porovnání času tisku

TEST	Materiál	3D tiskárna	Průměr trysky	Výška vrstvy [mm]	Vzor - výplň	Množství výplně [%]	Počet perimetrů	Počet horních vrstev	Teplota trysky	Typ podložky	čas tisku [xh xm]	Váha [g]	Filament [m]	Počet kusů
Compression test	PLA	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20**	7	4	215	PEI	23m	14,73	4,94	1
Compression test	PETG	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**20**	7	4	250	Zrnitý PEI	23m	15,08	4,94	1
Compression test	ABS	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**60**	2	4	255	Zrnitý PEI	35m	13,99	5,59	1
Compression test	PETG	Prusa MINI+	0,6	0,4	**Gyroid**	**70**	2	4	250	Zrnitý PEI	41m	18,77	6,15	1
											2h 2m	**62,57**	**21,62**	**4**

V tabulce č. 48 je vidět porovnání času tisku a spotřeby materiálu při snaze dosáhnout obdobných vlastností při jiném nastavení tisku. Nejzajímavější je asi porovnání PETG se 7

perimetry a 20% výplní s PETG s 2 perimetry a 70% výplní. Překvapil nás poměrně velký rozdíl času tisku. Díky tomuto testu, jsme zjistili, že je možné při téměř o polovinu kratším čase získat výtisk, který se mechanickými vlastnostmi velmi podobá výtisku s menším počtem perimetrů.

Pro naše testování jsme vytiskli vzorky pro materiál PLA a PETG. Výplň jsme pro všechny tyto vzorky nechali stejnou. Zvyšovali jsme pouze hodnotu perimetrů od 4 do 8. Testováním pro vzorky s počtem perimetrů 4 až 6 jsme vyhodnotili, že se vlastnosti zvýšením perimetrů na tyto hodnoty významně nezměnili oproti hodnotám 7 a 8 perimetrů. Z tabulky č. 48 je patrné, že se zvyšování počtu perimetrů může vyplatit, a to hlavně z důvodu úspory času tisku.



Graf 15: Vliv počtu perimetrů na mech. vlastnosti výtisků (8 perimetrů)

Pro materiál PLA s 20% a vzorem gyroid s 8 perimetry jsou nejvíce podobné vlastnosti v tlakové zkoušce vlastnosti vzorků materiálu ASA s 80% výplní mřížka.

Pokud i v tomto případě porovnáme výsledky testování s časem tisku a spotřebou materiálu. Vyjde nám, že pro tisk vzorku PLA s 20% výplní a 8 perimetry zabere 24 minut. U vzorku ASA s 80% výplní a vzorem mřížka trvá tisk 33 minut. V tomto případě bychom mohli

k zhodnocení přidat i fakt, že z PLA materiálu se tiskne mnohem lépe než z materiálu ASA a i přes malý rozdíl v čase tisku bychom se přikláněli k využití PLA materiálu.

10 ZÁVĚR

Diplomová práce s názvem *Výtisky na 3D tiskárně a jejich mechanické vlastnosti* se věnuje porovnávání mechanických vlastností vzorků vytištěných na 3D tiskárně z materiálů PLA, PETG, ASA a ABS.

V teoretické části jsme se zaměřili nejprve na obecný popis 3D tisku a následně i na několik konkrétních technologií 3D tisku. Jednotlivé technologie jsme mezi sebou porovnávali. U technologie FDM/FFM jsme i detailně popsali všechny části tiskárny. Dále jsme vybrali několik materiálů pro 3D tisk technologií FDM/FFF, u nichž jsme posuzovali jejich mechanické vlastnosti. Další kapitolou teoretické části byl výběr a popis tří mechanických testů: kompresní test, ohybový test a test tvrdosti materiálů (Brinellův test).

V praktické části jsme si nejprve stanovili kritéria pro mechanické testování vzorků na testovacím zařízení GUNT WP 300. Pro testování bylo nejprve nutné vytvořit digitální 3D modely vzorků, které jsme následně tiskli na nám dostupné tiskárně Original Prusa Mini+. Celkový počet testovaných vzorků je 252 kusů s celkovým časem tisku 4 dny 23 hodin 7 minut a spotřebou materiálu 3 577,81 gramů. Tiskli jsme dva druhy vzorků. První typ pro kompresní test a druhý typ pro ohybový test. Tyto vzorky poté podléhaly testování na testovacím zařízení.

Na základě provedených testů a jejich analýz lze konstatovat, že výtisky na 3D tiskárně vykazují různorodé mechanické vlastnosti, které jsou ovlivněny parametry tisku a použitým materiálem. Mimo testování vzorků vznikl současně i manuál pro zařízení GUNT WP 300, ve kterém je popsáno, jak nastavit zařízení a jak na něm pracovat při konkrétních testech.

Výsledky z testování ukázaly rozdílnost jednotlivých materiálů. Ukázalo se, že je potřeba znát kladné a záporné vlastnosti jednotlivých testovaných materiálů z důvodu vhodné aplikace na funkčních výtiscích.

11 RESUMÉ

Diplomová práce s názvem *Výtisky na 3D tiskárně a jejich mechanické vlastnosti* obsahuje část teoretickou a praktickou.

Teoretická část se zabývá popisem 3D tisku a jednotlivých technologií, mechanickými vlastnostmi materiálů pro 3D tisk technologie FDM/FFF a popisem několika vybraných mechanických zkoušek materiálů.

Praktická část je orientována na popis výsledků testovaných vzorků vytištěných z několika materiálů. Tyto testované vzorky podrobujeme několika mechanickým zkouškám. První ze zkoušek je kompresní test, který zkoumá odolnost vzorků v tlaku. Druhou zkouškou je ohybový test, který zkoumá plasticitu a ohebnost testovaných materiálů a vzorků. Součástí práce je i manuál pro práci s testovacím zařízením GUNT WP 300.

11.1 SUMMARY

The thesis entitled 3D Printer Prints and their Mechanical Properties contains a theoretical and a practical part.

The theoretical part deals with the description of 3D printing and individual technologies, mechanical properties of materials for 3D printing of FDM/FFF technology and description of several selected mechanical tests of materials.

The practical part is oriented to the description of the results of the tested samples printed from several materials. These test samples are subjected to several mechanical tests. The first test is the compression test, which examines the compressive strength of the samples. The second test is the bending test, which examines the plasticity and flexibility of the tested materials and samples. A manual for the use of the GUNT WP 300 testing equipment isincluded in the thesis.

SEZNAM LITERATURY

- BUKHARI, Syed Bacha Hussain, et al. Design and Fabrication of Inexpensive Portable Polar 3D Printer. In: *2023 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI)*. IEEE, 2023
- BY JOSH MATTE ON SEPTEMBER 13, 2017 https://trimech.com/blog/differences-between-abs-and-asa [citováno 2023-04-20].
- Datasheets: Aurapol. Aurapol [online]. Copyright © 2022 Dostupné z: https://www.aurapol.com/datasheets [citováno 2023-04-25].
- HIPS | Fillamentum. Fillamentum | addi(c)tive polymers [online]. Copyright © 2023 Fillamentum Powered by Fillamentum Dostupné z: https://fillamentum.com/collections/hips-filament/ [citováno 27.04.2023].
- HIPS | Prusa Knowledge Base. Prusa Knowledge Base [online]. Copyright © Prusa Research a.s. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/hips_167118 [citováno 2023-04-25].
- HONZÍK, Pavel, et al. 3D skenování a modelování ve výuce na ZŠ. 2021.
- Jak funguje 3D tiskárna: Základní technologie 3D tisku | TonerPartner.cz. *Tonery a cartridge za super ceny | TonerPartner.cz* [online]. Copyright © 2023 TonerPartner.cz Dostupné z: https://www.tonerpartner.cz/clanky/jak-funguje-stolni-3d-tiskarna-zakladni-technologie-3d-tisku-24967cz39332/ [citováno 2023-04-25].
- Jak funguje 3D tiskárna. *3D Tiskárna - Abc3D nejlepší pro 3D tisk* [online]. Copyright © 2014 Dostupné z: https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/3d-tisk-principy-technologie [citováno 2023-04-25].
- Jak vybrat správnou 3D tiskárnu | Rádce 3D tisku. *Jak vybrat správnou 3D tiskárnu | Rádce 3D tisku* [online]. Copyright © 3Dwiser s.r.o., 2020 Dostupné z: https://www.radce3d.cz/?gclid=CjwKCAjwrpOiBhBVEiwA_473dA0XUPPVU70aluD9yYhUk-tFBqWH-7GbgG_T0aEwfkNZfZkHbazRexoCXxoQAvD_BwE [citováno 2023-04-25].

- KLOSKI, L. W., L. a KLOSKI, N. *Začínáme s 3D tiskem*. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- KLOSKI, Liza Wallach; KLOSKI, Nick. *Začínáme s 3D tiskem*. Computer Press, 2017.
- Mittasch, P. Schröder, K, 2014. Experiment instictions.version 1.3. Gerätebau, Germany: G.U.N.T. 208 s.
- PET-G filamenty pro 3D tisk - materialpro3d.cz. Materiály a doplňky pro 3D tisk - filamenty - Materialpro3d.cz [online]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/pet-g/
- Proč používat 3D tisk? Kde se dá využít? - Technologie Budoucnosti. *Technologie Budoucnosti - Cesta k finanční svobodě* [online]. Dostupné z: https://technologiebudoucnosti.cz/proc-pouzivat-3d-tisk-kde-se-da-vyuzit/ [citováno 2023-04-25].
- Proč používat 3D tisk? Kde se dá využít? - Technologie Budoucnosti. *Technologie Budoucnosti - Cesta k finanční svobodě* [online]. Dostupné z: https://technologiebudoucnosti.cz/proc-pouzivat-3d-tisk-kde-se-da-vyuzit/ citováno 2023-04-25].
- Prusament ASA | Prusament. Homepage | Prusament [online]. Copyright © Prusa Polymers a.s.Dostupné z: https://prusament.com/cs/materials/prusament-asa/ [citováno 2023-04-25].
- Prusament PC Blend | Prusament. Homepage | Prusament [online]. Copyright © Prusa Polymers a.s. Dostupné z: https://prusament.com/cs/materials/prusament-pc-blend/ [citováno 2023-04-25].
- Prusament PC Blend Natural 970g | NC Computers s.r.o.. NC Computers s.r.o. [online]. Copyright © 2023 Dostupné z: https://www.nc.cz/prusament-pc-blend-natural-970g_d433643.html [citováno 2023-04-25].
- Prusament PETG | Prusament. Homepage | Prusament [online]. Copyright © Prusa Polymers a.s. [cit. 28.04.2023]. Dostupné z: https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/
- Prusament PLA | Prusament. Homepage | Prusament [online]. Copyright © Prusa Polymers a.s. Dostupné z: https://prusament.com/cs/materials/prusament-pla/ [citováno 2023-04-25].

- Průvodce materiály. Tlačové struny, 3D filamenty: Profi-Filaments [online]. Dostupné z: https://www.profi-filaments.sk/cz/pruvodce-materialy [citováno 2023-04-25].
- Průvodce materiály. Tlačové struny, 3D filamenty: Profi-Filaments [online]. Dostupné z: https://www.profi-filaments.sk/cz/pruvodce-materialy [citováno 2023-04-25].
- Přehled technologií 3D tisku | dkmp Nový Jičín, Ostrava. *Kovovýroba, 3D tisk, konstrukce, vývoj | dkmp Nový Jičín, Ostrava* [online]. Copyright © Dostupné z: https://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologii-3d-tisku [citováno 2023-04-25].
- SEIDLOVÁ, Kristýna. *Výukové moduly pro žáky se speciálními vzdělávacími potřebami-zkouška Brinella-Autismus*. 2018. PhD Thesis. Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta.
- SLS (Selective Laser Sintering) | cotu.cz. *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz* [online]. Copyright © 2023 Dostupné z: https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selective-laser-sintering [citováno 2023-04-25].
- STŘÍTESKÝ, O., PRŮŠA, J., BACH, M. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou.*Praha: Prusa Research s.r.o., 2019.
- ŠMEJCKÝ, J.,SEQUENC P. *Benefity a limity technologie FFF/FDM.* ABC3D, Praha, 2021 38s.
- TECHNOLOGIE 3D TISKU – 3D tisk-Online. *3D tisk-Online – 3D tisk pro každého* [online]. Copyright © 2023 Dostupné z: https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-technologie-3d-tisku/ [citováno 2023-04-25].
- Tryska pro 3D tisk KALENÁ české výroby 0,6/1,75 - Materialpro3d.cz. Materiály a doplňky pro 3D tisk - filamenty - Materialpro3d.cz [online]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/hotendy/tryska-pro-3d-tisk-kalena-ceske-vyroby-0-6-1-75/ [citováno 2023-04-25].

- URBÁŠEK, J. Měření tvrdosti a vrypové odolnosti pomocí univerzálního tribometru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 19 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.
- Využití 3D tisku - co vše lze vytisknout na 3D tiskárně | PREMO. *PREMO | Jsme experty na tonery a inkousty do tiskáren* [online]. Dostupné z: https://www.premocz.eu/vyuziti-3d-tisku [citováno 2023-04-25].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Částečně uzavřená konstrukce 3D tiskárny 15
Obrázek 2: Uzavřená konstrukce 3D tiskárny 15
Obrázek 3: Otevřená konstrukce 3D tiskárny 15
Obrázek 4: Model Benchy v prostředí programu PrusaSlicer 18
Obrázek 5: Proces FDM/FFF tisku z kovu (Převzato z: 3D printing functional metal parts) 19
Obrázek 6: Ohybový test a) tříbodový ohyb; b) čtyřbodový ohyb *Převzato z : Polymery (Běhálek, 2016)* 26
Obrázek 7: Rovnice pro výpočet tvrdosti materiálu - Brinellův test 27
Obrázek 8: Prostředí programu Shapr3D 30
Obrázek 9: 2D nákres – funkce Circle 31
Obrázek 10: Funkce extrude 31
Obrázek 11: Náhled možnosti exportu z programu Shapr3D 32
Obrázek 12: Export modelu pro 3D tisk 32
Obrázek 13: Náhled vyexportovaného 3D modelu – Kompresní test 33
Obrázek 14: 3D nákres - funkce Rectagle (diagonal) 34
Obrázek 15: Funkce extrude 34
Obrázek 16: Náhled centrovací značky 35
Obrázek 17: Náhled vyexportovaného modelu - Ohybový test 36
Obrázek 18: Original Prusa Mini+ 38
Obrázek 19: Ukázka rozdílného nastavení vnitřní výplně (mřížka) u testovacích vzorků (Kompresní test) 39
Obrázek 20: Testovací zařízení GUNT WP 300 45
Obrázek 21: Schéma zapojení sondy a testovacího zařízení k PC 46
Obrázek 23: Vzdálenost předepětí pružiny na analogové sondě 47
Obrázek 23: Umístění analogové sondy polohy na zařízení 47
Obrázek 25: Testovací hlava (kompresní test) 47
Obrázek 25: Kompresní test 47
Obrázek 27: Testovací hlava (ohybový test) 48
Obrázek 27: Podložka pro testované vzorky (ohybový test) 48
Obrázek 28: Ohybový test 48
Obrázek 29: Ukázka vzorku po otestování (Brinell test) 49
Obrázek 30: Testovací hlava (Brinellův test tvrdosti) 49
Obrázek 31: Prostředí programu GUNT 50
Obrázek 32: Nastavení parametrů testovaných vzorků (kompresní test) 51
Obrázek 33: Prostředí testování s více vzorky 52
Obrázek 34: Čtyřramenný otočný díl testovacího zařízení 54
Obrázek 35: Otočné kolo s kličkou (vlastní návrh) 54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vliv velikosti trysky na celkovou dobu tisku 18
Tabulka 2: Parametry použité 3D tiskárny 37
Tabulka 3: Globální nastavení pro porovnávané nastavení tisku 40
Tabulka 4: Porovnání času tisku - A 40
Tabulka 5: Porovnání času tisku – B 40
Tabulka 6: Souhrn 3D tisku z materiálu PLA 41
Tabulka 7: Souhrn 3D tisku z materiálu PETG 42
Tabulka 8: Souhrn 3D tisku z materiálu ASA 42
Tabulka 9: Souhrn 3D tisku z materiálu ABS 43
Tabulka 10: Kompletní souhrn 3D tisku vzorků 44
Tabulka 11: ASA – 60 % a 57
Tabulka 12: ASA - 60 % b 57
Tabulka 13: PLA - 80 % (Gyroid) 59
Tabulka 14: PLA - 70 % (Gyroid) 59
Tabulka 15: PLA - 60 % (Gyroid) 59
Tabulka 16: PLA - 50 % (Gyroid) 59
Tabulka 17: PLA - 40 % (Gyroid) 60
Tabulka 18: PLA - 30 % (Gyroid) 60
Tabulka 19: PLA - 20 % (Gyroid) 61
Tabulka 20: PLA - 10 % (Gyroid) 62
Tabulka 21: Porovnání velikosti deformace u materiálu PLA při přibližně stejném zatížení 63
Tabulka 22: PETG - 80 % (Gyroid) 64
Tabulka 23: PETG - 70 % (Gyroid) 65
Tabulka 24: PETG - 60 % (Gyroid) 65
Tabulka 25: PETG - 50 % (Gyroid) 66
Tabulka 26: PETG - 40 % (Gyroid) 66
Tabulka 27: PETG - 30 % (Gyroid) 67
Tabulka 28: PETG - 20 % (Gyroid) 67
Tabulka 29: PETG - 10 % (Gyroid) 67
Tabulka 30: ASA - 80 % (Gyroid) 68
Tabulka 31: ASA - 70 % (Gyroid) 69
Tabulka 32: ASA - 60 % (Gyroid) 69
Tabulka 33: ASA - 50 % (Gyroid) 69
Tabulka 34: ASA - 40 % (Gyroid) 70
Tabulka 35: ASA - 30 % (Gyroid) 70
Tabulka 36: ASA - 20 % (Gyroid) 70
Tabulka 37: ASA - 10 % (Gyroid) 70
Tabulka 38: ABS - 80 % (Gyroid) 71
Tabulka 39: ABS - 70 % (Gyroid) 72
Tabulka 40: ABS - 60 % (Gyroid) 72
Tabulka 41: ABS - 50 % (Gyroid) 73
Tabulka 42: ABS - 40 % (Gyroid) 73
Tabulka 43: ABS - 30 % (Gyroid) 74

Tabulka 44: ABS - 20 % (Gyroid)..... 75
Tabulka 45: ABS - 10 % (Gyroid)..... 75
Tabulka 46: Ohybový test výplň 30 %, vzor výplně - gyroid 81
Tabulka 47: Ohybový test výplň 20 %, vzor výplně - gyroid 82
Tabulka 48: Porovnání času tisku..... 83

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Nepřesnosti testování v důsledku přehmatů a neplynulého otáčení..... 53
Graf 2: Porovnání naměřených dat na více vzorcích (ASA – 60 %, mřížka)..... 56
Graf 3: PLA 10 - 80 % (gyroid) 58
Graf 4: PETG - 10 - 80 % - (gyroid) 64
Graf 5: ASA - 10 - 80 % - (gyroid) 68
Graf 6: ABS - 10 - 80 % - (gyroid)..... 71
Graf 7: 80% výplň (gyroid) a porovnání všech materiálů..... 76
Graf 8: 50% výplň (gyroid) a porovnání všech materiál..... 77
Graf 9: 10% výplň (gyroid) a porovnání všech materiálů..... 77
Graf 10: Porovnání vzoru výplní (gyroid, mřížka) 70 % 78
Graf 11: Porovnání vzoru výplní (gyroid, mřížka) 50 % 79
Graf 12: Porovnání testovaných materiálů mezi sebou (80% výplň), vzor mřížka..... 80
Graf 13: Porovnání testovaných materiálů mezi sebou (50% výplň), vzor mřížka..... 81
Graf 14: Vliv počtu perimetrů na mech. vlastnosti výtisků (7 perimetrů) 83
Graf 15: Vliv počtu perimetrů na mech. vlastnosti výtisků (8 perimetrů) 84