

Tvorba replik povrchů pomocí techniky 3D tisku

Bc. Ondřej Beneš

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Ondřej Beneš
Osobní číslo:	T22359
Studijní program:	N0788A270007 Řízení jakosti
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Tvorba replik povrchů pomocí techniky 3D tisku

Zásady pro vypracování

- Vypracování rešerše na zadané téma
- Proměření jakosti povrchů zadaných vzorků
- Nalezení vhodné struktury, včetně její optimalizace

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

Seznam doporučené literatury:

- MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2196-8.
- WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.
- AGGARWAL, Charu C. *Neural networks and deep learning: a textbook*. Cham: Springer, [2018].
- GRAUPE, Daniel. *Deep learning neural networks: design and case studies*. Singapore: World scientific, [2016]. ISBN 978-981-3146-44-0.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Vladimír Pata**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Obsah diplomové práce se zaměřuje na rekonstrukci hrubých povrchů pomocí metod fotogrammetrie a následného 3D tisku.

V teoretické části shrnuje důležitost drsnosti parametrů povrchu a jejich vývoj využití v moderním průmyslu. Dále obsahuje základní přehled o metodách měření povrchů. Následuje částí zabývající se samotnou fotogrammetrií a v posledních kapitolách shrnuje metody tvorby součástí pomocí 3D tisku.

Praktická část obsahuje samotný projekt. Zde popisuje zásady a postupy, jak z daného povrchu vytvořit replikovatelný model pomocí obyčejného mobilního zařízení s fotoaparátem. Věnuje se principům a optimalizaci jednotlivých kroků v procesu tak aby bylo dosaženo nejvěrnější rekonstrukce. Následně je tahle metoda porovnána s profesionálním skenovacím zařízením.

Klíčová slova: Povrch, Drsnost, Fotogrammetrie, Rekonstrukce

ABSTRACT

The content of the thesis focuses on the reconstruction of rough surfaces using photogrammetry and subsequent 3D printing.

In the theoretical part it summarizes the importance of surface roughness parameters and their evolution of use in modern industry. It also provides a basic overview of surface measurement methods. This is followed by a section dealing with photogrammetry itself and in the final chapters it summarises methods of creating components using 3D printing.

The practical part contains the project itself. Here it describes the principles and procedures for making a replicable model of a given surface using an ordinary mobile device with a camera. It discusses the principles and optimization of each step in the process to achieve the most faithful reconstruction. This method is then compared with professional scanning equipment.

Keywords: Surface, Roughness, Photogrammetry, Reconstruction

V téhle části bych si vzal chvíli a chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu prof. Dr. Ing. Vladimíru Patovi, který mi byl napříč celou prací velkou oporou, podporou a rádcem. Jeho připomínky a rady byly nesmírnou nápomocí a jeho vlidný a přátelský přístup zase nesmírnou motivací.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 DRSNOST POVRCHU	13
1.1 PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU	13
1.1.1 Aritmetický průměr drsnosti Ra (Arithmetic mean deviation)	13
1.1.2 Kvadratický průměr drsnosti Rq (Root mean square deviation).....	13
1.1.3 Střední hloubka drsnosti Rz (Maximum height).....	14
1.1.4 Maximální výška Rp (Maximum profile peak height).....	15
1.1.5 Maximální hloubka Rv (Maximum profile valley depth)	15
1.1.6 Průměrná výška Rc (Mean height).....	15
1.1.7 Největší výška Rt (Total height)	16
1.1.8 Šikmost profilu Rsk (Skewness)	16
1.1.9 Špičatost profilu drsnosti Rku (kurtosis).....	17
1.2 POVRCHOVÉ PARAMETRY V PRŮMYSLU	17
1.2.1 Vývoj užívání povrchových parametrů	18
1.3 MĚŘENÍ DRSNOSTI.....	21
1.4 METODY MĚŘENÍ.....	21
1.5 PŘÍSTROJE KONTAKTNÍ	22
1.6 PŘÍSTROJE BEZKONTAKTNÍ	23
1.6.1 Chromatic Lenght Aberration (CLA).....	24
1.6.2 Laserové snímače	25
1.6.3 Coherence Scanning Interferometry (CSI).....	26
2 FOTOGRAMMETRIE	27
2.1 FOTOGRAMMETRICKÝ PROCES	27
2.2 ASPEKTY FOTOGRAMMETRIE.....	29
2.2.1 Rozdělení fotogrammetrie do kategorií	30
2.3 MODEL FORMOVÁNÍ OBRAZU	31
2.4 DIGITÁLNÍ SYSTÉM.....	33
2.5 APLIKACE FOTOGRAMMETRIE	34
Automotive, strojní a lodní průmysl.....	35
Vesmírný průmysl	35
Architektura a archeologie	35
Strojírenství	35
Medicína	36
Kinematografie/animace	36
3 3D TISK	37
3.1 STEREOLITOGRAFIE (SLA).....	37
3.1.1 Základní principy	37

3.1.2	Aplikace	38
3.1.3	Budoucí vývoj	38
3.2	FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)	39
3.2.1	Základní principy	39
3.2.2	Materiály	39
3.2.3	Aplikace	40
3.2.4	Budoucnost FDM	40
3.3	SELEKTIVNÍ LASEROVÉ SPÉKÁNÍ (SLS)	40
3.3.1	Princip	41
3.3.2	Materiály a aplikace	41
3.3.3	Budoucnost	41
II	PRAKTICKÁ ČÁST	42
4	PŘÍPRAVA	43
4.1	VOLBA POVRCHU	43
4.2	POŘIZOVÁNÍ SNÍMKŮ	43
4.2.1	Světlo	44
4.2.2	Polohování	44
4.2.3	Kvalita	44
4.2.4	Kvantita	44
5	TVORBA MODELU	45
5.1	ZAŘÍZENÍ	45
5.1.1	Stolní počítač	45
5.1.2	Notebook	45
5.2	FOTOGRAMMETRIE	46
5.2.1	Získání programu MeshroomCL	46
5.2.2	První spuštění	46
5.2.3	Vkládání dat/fotografií	47
5.2.4	Nastavení	49
5.2.5	Popis procesů a jejich nastavení	52
5.2.6	Hodnoty experimentu	57
5.2.7	Spuštění	58
5.2.8	Výsledky	60
5.3	ÚPRAVA MODELU	63
5.3.1	První spuštění, import a základní ovládání	63
5.3.2	Vyhlazení	65
5.3.3	Oříznutí	67
5.3.4	Opravné kroky	68
5.3.5	Redukce sítě	70
5.3.6	Manuální opravy	73
5.3.7	Export	79
5.4	TVORBA OBJEMU	80
5.4.1	Import	80

5.4.2	Převod na solidní objekt.....	82
5.4.3	Tvorba objemu	83
5.4.4	Převod zpět na STL	87
5.5	PŘÍPRAVA NA TISK.....	89
5.5.1	První spuštění a nastavení	89
5.5.2	Import.....	91
5.5.3	Nastavení.....	92
6	TISK	96
6.1	CREALITY ENDER 5	96
6.2	CREALITY ENDER 3 S1	96
	ZÁVĚR	98
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	100
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	103
	SEZNAM OBRÁZKŮ	104

ÚVOD

Tvorba replik povrchů je v praxi velmi cennou záležitostí, která umožňuje lepší vizualizaci daného povrchu v případě třeba reklamací a stejně tak pomáhají při samotném kvalitativním vyhodnocení např. drsnosti povrchu.

V dnešní době se na vyhodnocování takových povrchů používá profesionálních a drahých skenovacích zařízení, které v zásadě musí být splaceny tudíž i samotný sken je poměrně drahou záležitostí. Zároveň skener je také omezen pracovním prostorem, do kterého je danou součástí možné vložit, tudíž některé součásti je nemožné vyhodnotit. Pro to se zde zaměřuji na využití technik fotogrammetrie, která v metrologii otevírá potenciálně nové verzatilnější možnosti.

Fotogrammetrie je technika, která umožňuje z fotografií vytvářet modely. V dnešní době je hojně využívána v odvětvích architektury, modelářství, archeologie nebo třeba i medicíny. Hojně se taky využívá pro měření a mapování země. Obecně je tedy možné říct, že je využívána pro rekonstrukci rozměrnějších předmětů či ploch.

Využití fotogrammetrie v oblasti metrologie otevírá mnoho možností, které konvenčními metodami nejsou realizovatelné. Díky této metodě je možné replikovat a vyhodnotit povrchy, které by nebylo možné vložit pod skener jako např. velké plochy, rozměrné díly, formy atd. Také zpřístupňuje možnost nevyřazovat či nerozebírat sestavy, ve kterých se požadované součásti nachází a stačí pouze požadovaný povrch důkladně nafotit. Navíc ne všechny povrchy je skener schopný zachytit. Povrchy, které mají velké rozdíly mezi hloubkami skener není schopný správně zachytit, zatímco ve fotogrammetrii tohle nepředstavuje žádný problém.

Využití téhle metodiky má teda velké opodstatnění nejen možnostmi, které otevírá, ale i finančně se jedná o velké zlehčení, a tedy mnohem lukrativnější možnost.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DRSNOST POVRCHU

Drsnost povrchu je kvantitativní charakteristika, která popisuje mikroskopické nerovnosti na povrchu materiálu. Tyto nerovnosti jsou výsledkem různých výrobních procesů, jako je obrábění, lití, svařování, leptání a další. Je to klíčový parametr, který ovlivňuje mnoho fyzikálních a funkčních vlastností materiálů, včetně adheze, tření, odolnosti proti opotřebení, odrazivosti a mokřivosti. Drsnost povrchu se měří různými metodami a vyjadřuje se pomocí několika parametrů. [3] [6] [20]

1.1 Parametry drsnosti povrchu

1.1.1 Aritmetický průměr drsnosti R_a (Arithmetic mean deviation)

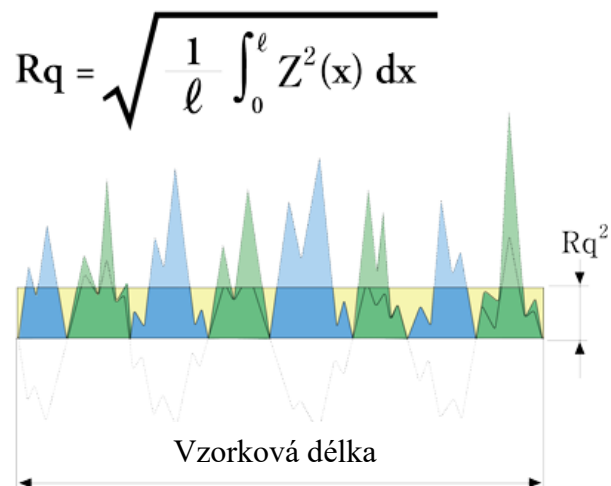
R_a je průměrná absolutní hodnota odchylek výšky profilu od střední čáry přes základní délku. Je to nejběžnější měřítko drsnosti a poskytuje základní přehled o stavu povrchu. [3]



Obrázek 1. Parametr R_a [23]

1.1.2 Kvadratický průměr drsnosti R_q (Root mean square deviation)

Je střední kvadratický průměr výšek profilu na pozorované délce vzorku. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších parametrů, který se také označuje jako RMS hodnota. Parametr R_q odpovídá směrodatné odchylce rozdělení výšek. Protože parametr R_q není výrazně ovlivněn škrábanci, znečištěním ani šumem měření, je tak vhodný pro statistické zpracování a umožňuje větší konzistentnost výsledků. [3]



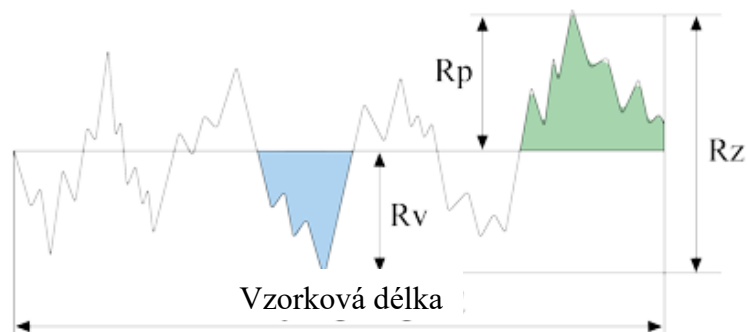
Obrázek 2 Parametr Rq [23]

1.1.3 Střední hloubka drsnosti Rz (Maximum height)

Střední výška drsnosti Rz je aritmetický průměr hodnot jednotlivých hloubek drsnosti Rti po sobě jdoucích pozorovaných délkách na stejném vzorku. Jednotlivá hloubka drsnosti Rti je svislá vzdálenost mezi nejvyšším vrcholem a nejhlubší propadlinou v rámci pozorované délky.

Celková hloubka profilu drsnosti Rz je součtem maximální výšky profilu drsnosti Rp a maximální hloubky profilu drsnosti Rv v rámci jedné délky měření.

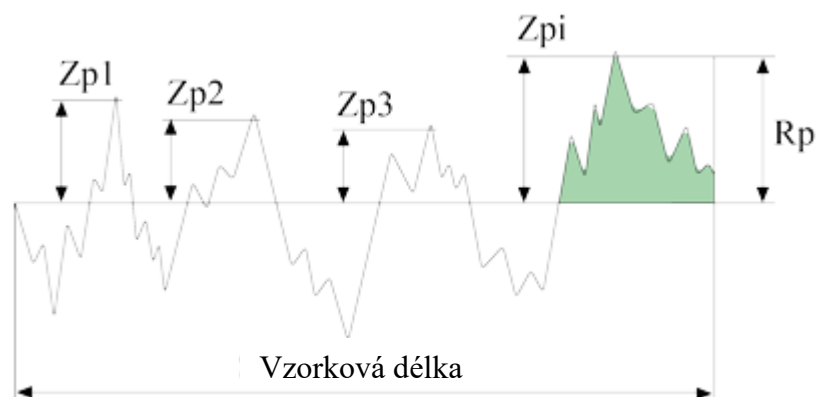
Dle norem ISO je hodnota Rz pak udávána jako průměrná hodnota 5 největších hloubek na pozorované délce vzorku. Tzv. „Ten point height of Irregularities“. [3]



Obrázek 3 Parametr Rz [23]

1.1.4 Maximální výška R_p (Maximum profile peak height)

Vzdálenost nejvyššího vrcholu od střední čáry v měřeném úseku. [3]



Obrázek 4 Parametr R_p [23]

1.1.5 Maximální hloubka R_v (Maximum profile valley depth)

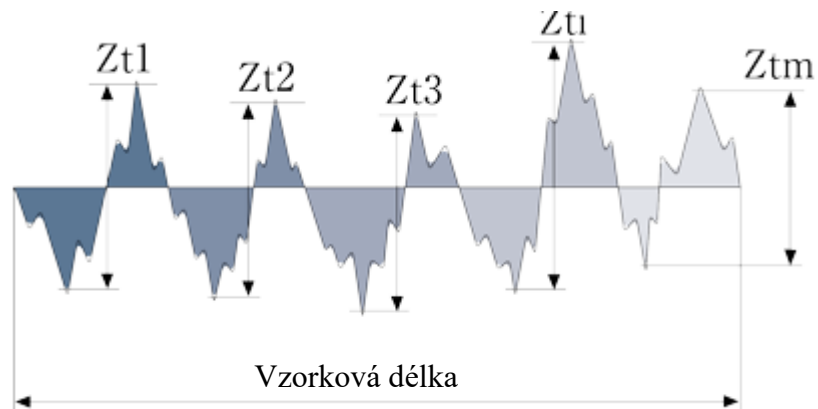
Maximální vzdálenost nejnižšího bodu od střední čáry v měřeném úseku. [3]



Obrázek 5 Parametr R_v [23]

1.1.6 Průměrná výška R_c (Mean height)

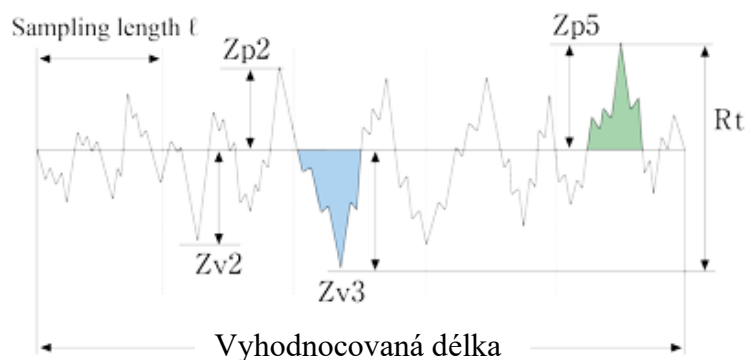
Jedná se o střední hodnotu hloubek a výšek na měřené délce vzorku. [3]



Obrázek 6 Parametr Rc [23]

1.1.7 Největší výška Rt (Total height)

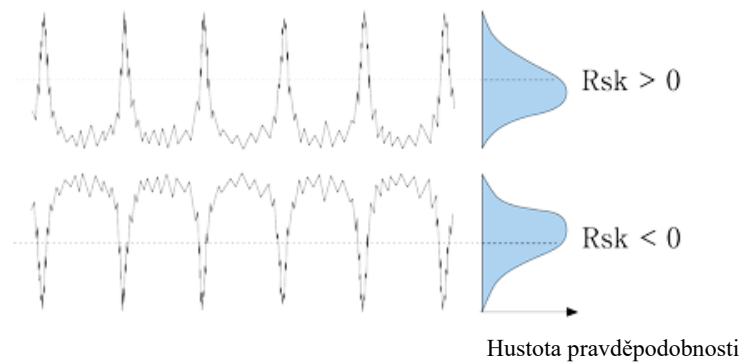
Jedná se o vzdálenost mezi nejnižším bodem a nejvyšším vrcholem na celém měřeném profilu. [3]



Obrázek 7 Parametr Rt [23]

1.1.8 Šikmost profilu Rsk (Skewness)

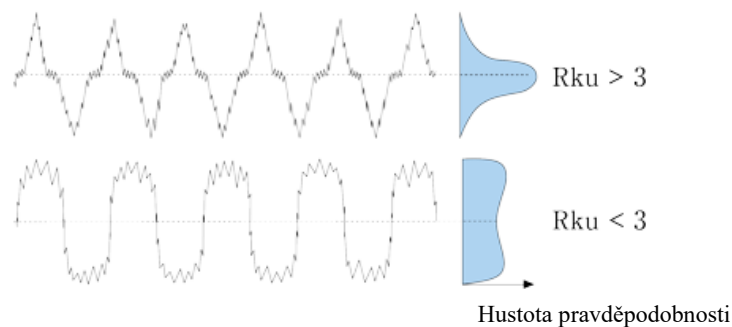
Rsk charakterizuje asymetrii profilu drsnosti kolem střední čáry. Hodnoty Rsk mohou indikovat převahu propadlin nebo vrcholů na povrchu. [3]



Obrázek 8 Parametr Rsk [23]

1.1.9 Špičatost profilu drsnosti Rku (kurtosis)

Rku udává míru ostrých vrcholů profilu ve srovnání s normálním rozdělením. Vyšší hodnoty Rku indikují více špičatý profil. [3]



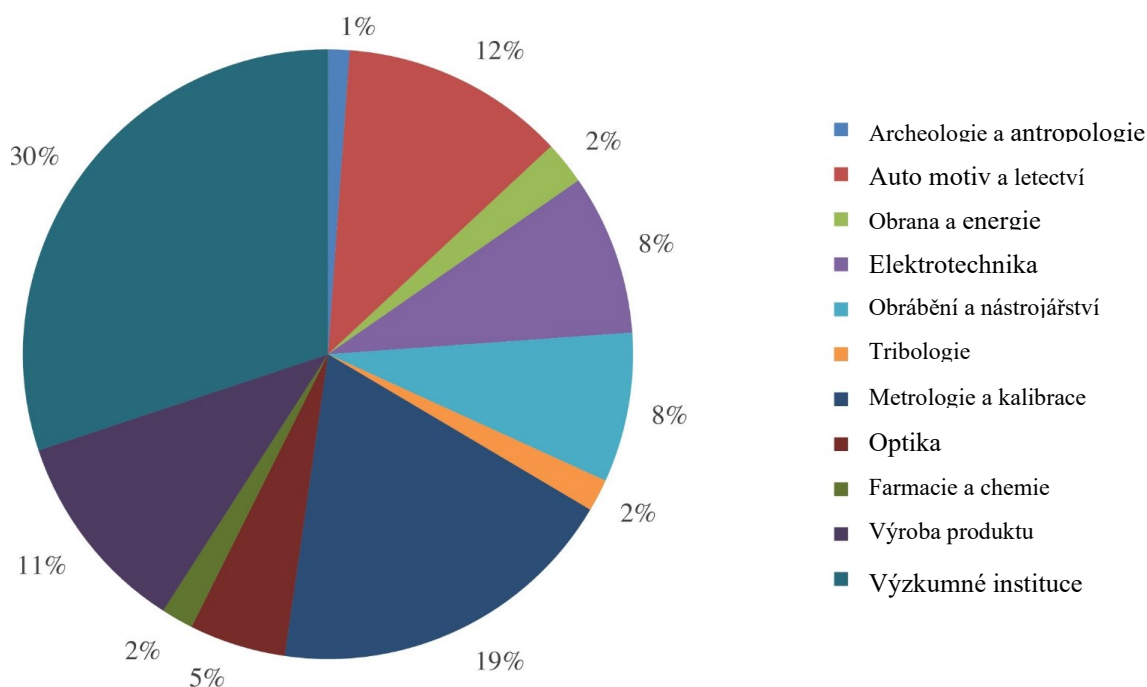
Obrázek 9 Parametr Rku

1.2 Povrchové parametry v průmyslu

Analýza textury povrchu je stále důležitějším aspektem výrobního průmyslu. Jak se vyráběné díly stávají složitějšími, tolerance se zpřísňují a potřeba přesné kontroly textury povrchu se stává významnější. Parametry textury povrchu usnadňují kontrolu povrchu tím, že povrchu přiřazují kvantitativní hodnotu, vypočtenou pomocí řady matematických operací, které umožňují porovnávání s jinými povrchy, specifikaci povrchů na technických výkresech a kvantifikaci funkčních informací. [2]

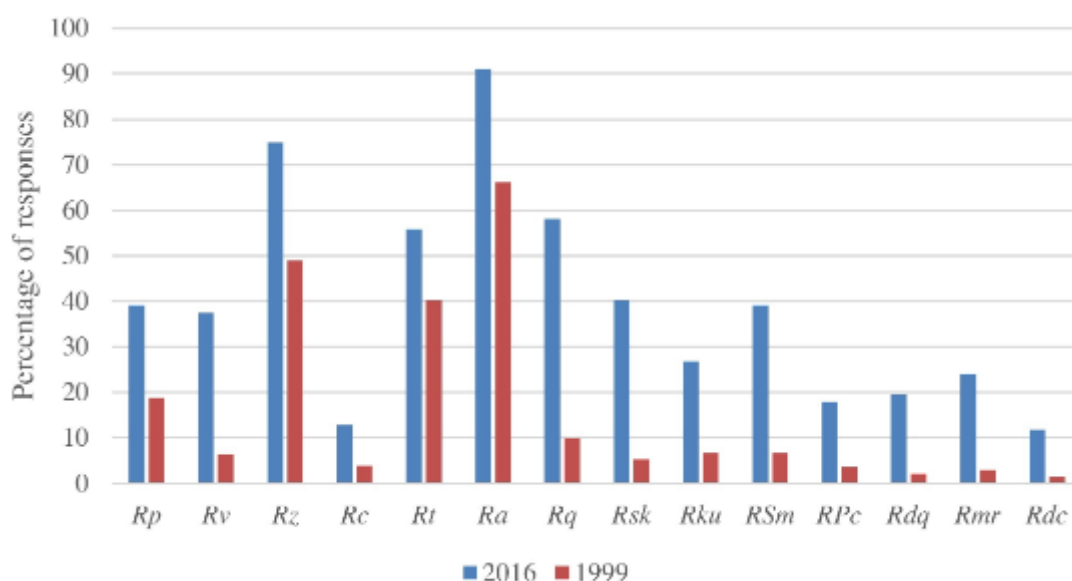
1.2.1 Vývoj užívání povrchových parametrů

Parametry definující povrch nachází uplatnění v mnoha odvětvích i mimo strojírenství. V roce 2016 byl proveden výzkum zkoumající vývoj používání jednotlivých parametrů v různých průmyslových odvětvích. Výzkumu se zúčastnilo 179 respondentů ze 34 zemí. [2]

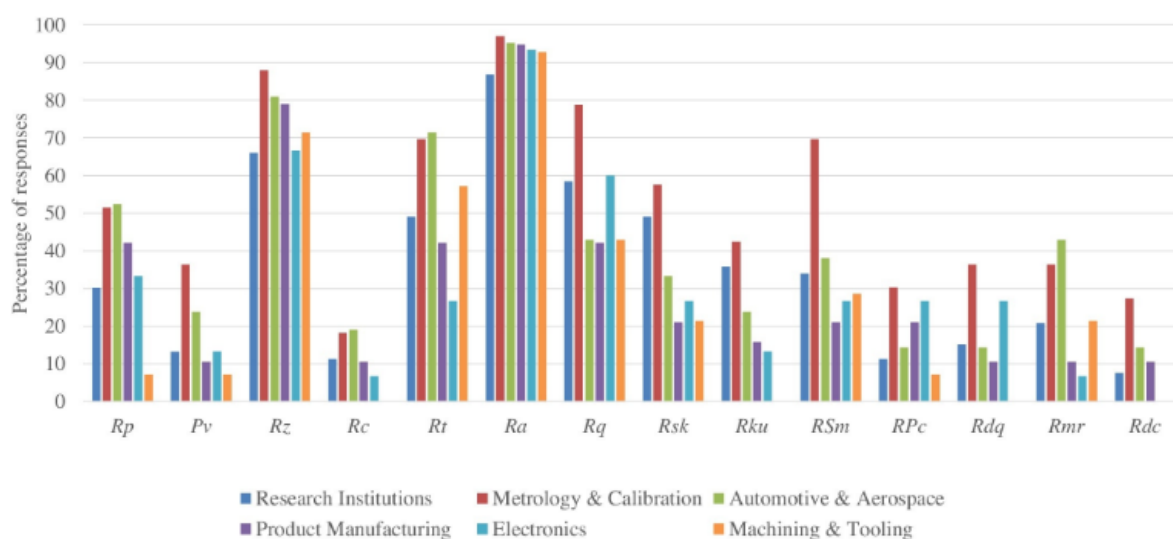


Obrázek 10 Procentuální zastoupení průmyslových odvětví v průzkumu [2]

Bylo zkoumáno jak se od roku 1999 měnilo užívání parametrů drsnosti definované normou ISO 4287. Největší zastoupení měly výzkumná střediska, oddělení metrologie a kalibrace následované automotivem, letectvím, výrobou produktů, elektrotechnikou a nástrojářstvím s obráběním. Odvětví s malým zastoupením byla ze studie odstraněna, protože by jejich bližší zkoumání nepřineslo žádných relevantních výsledků. [2]



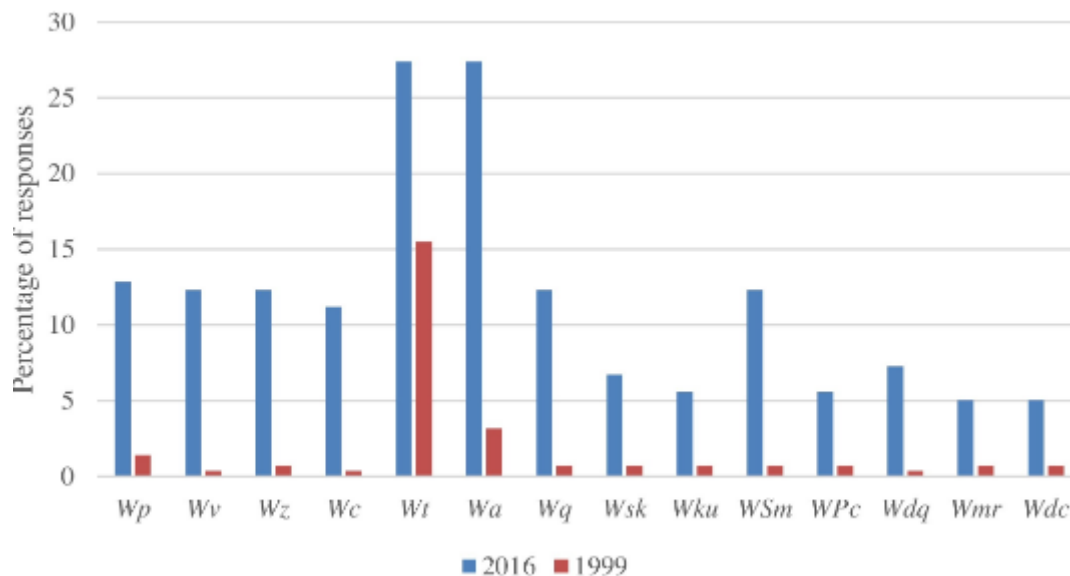
Obrázek 11 Změna míry užívání parametrů drsnosti v průmyslu za 17 let [2]



Obrázek 12 Procentuální zastoupení užívání parametrů drsnosti napříč sektory [2]

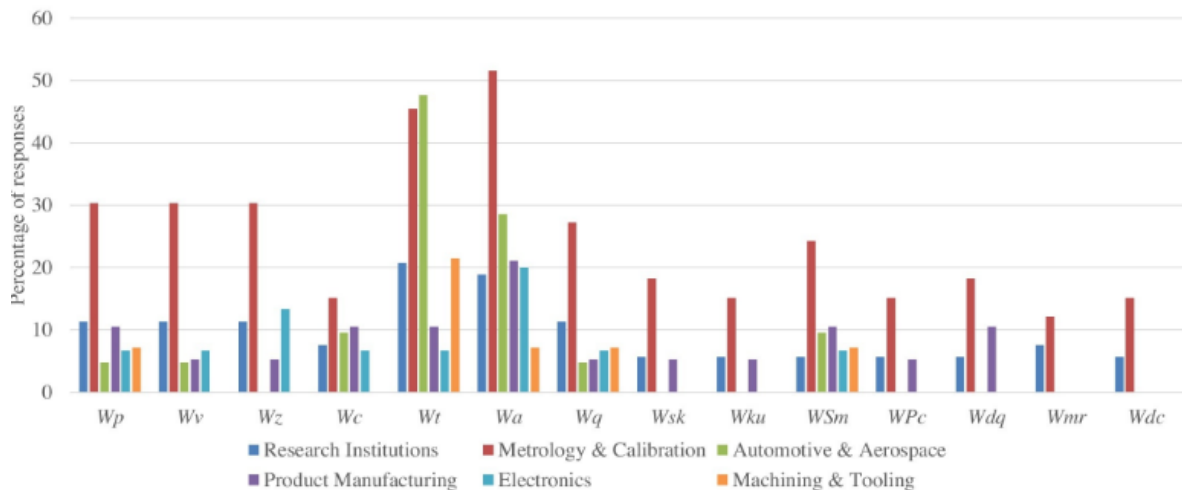
Z průzkumu vyplývá, že dle očekávání nejpoužívanějším a nejrelevantnějším parametrem stále zůstává parametr drsnosti Ra. Stejně tak parametry Rz a Rt zůstávají v prvních příčkách. Ovšem nastal signifikantní nárůst popularity méně známých parametrů jako např. Rq, Rsk nebo Rku. Speciálně pak nárůst využívání parametru Rq je pozitivní známkou vývoje, protože pro samotné pochopení povrchu je více konzistentní a není příliš ovlivněn kvalitou měřené plochy. Obecně vzrostlo využití všech parametrů, tento nárůst může být

způsoben razantním pokrokem ve výpočetních výkonech, které mají uživatelé měřících nástrojů k dispozici. Tento přístup by pak, ale znamenal, že takové parametry pak nemusí být správně pochopeny a jsou udávány pouze, protože byly vypočítány. Jednalo by se tedy pouze o tzv. „parametrickou vyrážku“. [2]



Obrázek 13 Změna míry užívání parametrů vlnitosti v průmyslu za 17 let [2]

Zajímavým zjištěním z výsledků je výrazný nárůst používání parametrů vlnitosti ve srovnání s rokem 1999. S výjimkou parametru Wt, který použilo 15 % účastníků, nebyla většina parametrů vlnitosti v roce 1999 téměř používána, pouze 1 % účastníků uvedlo použití parametru. Nové výsledky ukazují mnohem větší využití, kdy parametry vlnitosti používá v průměru 12 % účastníků. [2]



Obrázek 14 Procentuální zastoupení užívání parametrů vlnitosti napříč sektory [2]

Dalším zajímavým zjištěním je, že odvětví "automobilový a letecký průmysl" vykazuje poměrně vysoké využití parametrů W_t a W_a , ale velmi nízké využití ostatních parametrů. Tato malá škála používaných parametrů naznačuje, že toto odvětví identifikovalo malý výběr užitečných parametrů a vyhnulo se takzvané "parametrické vyrážce" tím, že používá pouze ty, které jsou nezbytné. [2] [9]

1.3 Měření drsnosti

V současné době, kdy existují vysoké požadavky na kvalitu povrchových struktur funkčních oblastí, bylo vyvinuto množství metod pro jejich měření. To vedlo k zavedení nových parametrů pro popis struktury povrchů.

Aktuálně platné normy ISO zahrnují definice pro parametry, které charakterizují povrchy jak ve 2D, tak ve 3D formátu. Mezi klíčové normy patří ČSN EN ISO 4287, která definuje „Pojmy, definice a parametry struktury povrchu“. [8] [10]

1.4 Metody měření

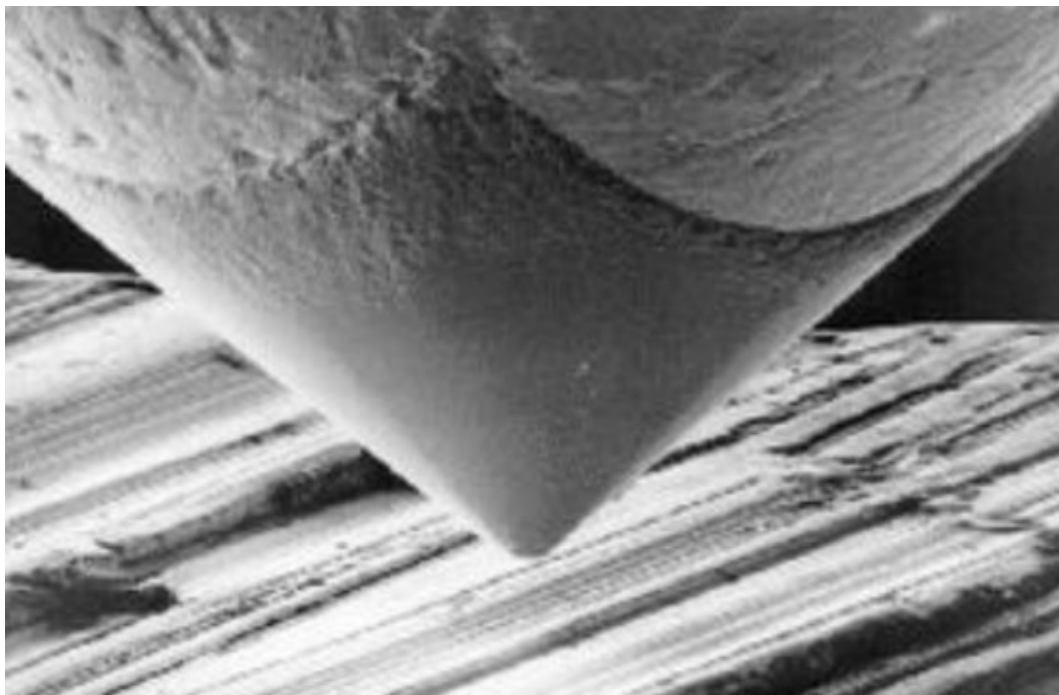
Kvalitativní metody (srovnávání se standardními vzorky reálného povrchu) - pro tento účel se stále používají standardní vzorkovnice povrchů nebo komparační mikroskopy. Pro samotné porovnání se pak využívá především lidských vjemů jako je zrak či hmat. Je důležité poznamenat, že tato metoda je poměrně zastaralá a závisí na subjektivním hodnocení pracovníka, který povrch vyhodnocuje.

Kvantitativní metody (založené na parametrech, využívající matematické modelování povrchových parametrů) - v současné praxi se běžně používají přístroje známé jako profilometry. V obchodní terminologii se tyto přístroje někdy nepřesně označují jako drsnoměry. Kromě měření drsnosti jsou tyto přístroje schopné měřit také vlnitost a často i geometrický tvar. [8] [10]

Obecně pak přístroje pro kvantitativní měření rozlišujeme na kontaktní a bezkontaktní.

1.5 Přístroje kontaktní

Kontaktní drsnoměry jsou přístroje určené k měření drsnosti povrchu materiálů prostřednictvím přímého fyzického kontaktu mezi senzorem přístroje a povrchem materiálu. Kontaktní drsnoměr funguje tak, že jeho měřicí hrot (většinou diamantový) je přesně veden po povrchu testovaného materiálu. Pohyb špičky zaznamenává mikroskopické výškové rozdíly na povrchu, které jsou následně analyzovány a převedeny na kvantitativní hodnoty drsnosti. [10]

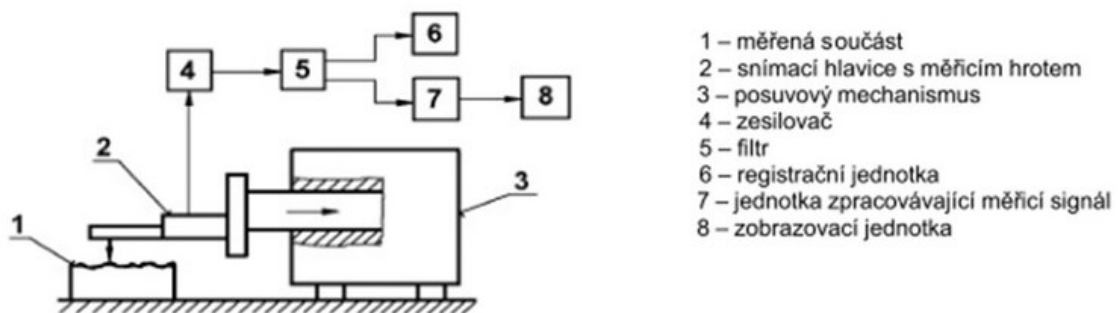


Obrázek 15 Diamantový snímací hrot [22]

Přístroj se skládá z části mechanické a části elektronické. Mechanická část obsahuje stůl na který se měřený dílec pokládá a rameno se snímacím hrotem, které se pohybuje konstantní rychlostí pro zaručení konzistence měření. Rychlost musí být volena s ohledem na vlastnosti

snímacího systému a na stav měřeného vzorku tak aby nedocházelo ke zkreslení naměřených výsledků.

Elektronická část má za úkol převádět mechanický signál, vytvořený kontaktem snímací špičky s nerovnostmi na povrchu zkoumané oblasti, na elektrický signál. Tento signál je poté analyzován a převeden buď na číselné údaje odpovídající konkrétním parametrům drsnosti, nebo na vizuální reprezentaci nerovností povrchu. [10]



Obrázek 16 Schéma dotykového drsnoměru [22]

Výhodou kontaktních drsnoměrů je jejich univerzálnost, přenosnost a možnost přesného měření i lehce znečištěných povrchů, kde hrot je schopen během měření vrstvu znečištění mechanicky odebrat.

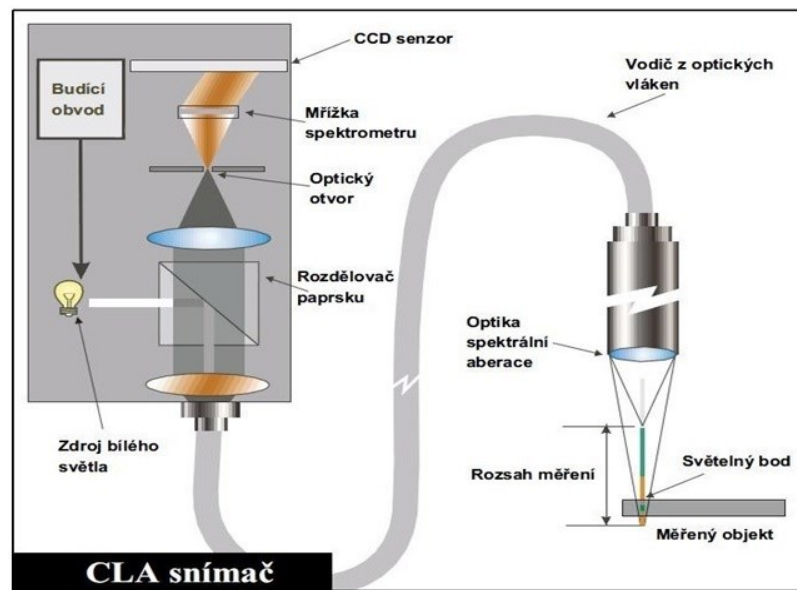
Mezi nevýhody pak patří možnost poškození měřené plochy díky přímému kontaktu měřícího hrotu s povrchem dílce. Toto platí zejména pro měkké materiály. Druhou nevýhodou je omezená přístupnost hrotu na površích, kde jsou těžce obtížné oblasti nebo složité geometrie což pak vede k nesprávným nebo zkresleným výsledkům. [10]

1.6 Přístroje bezkontaktní

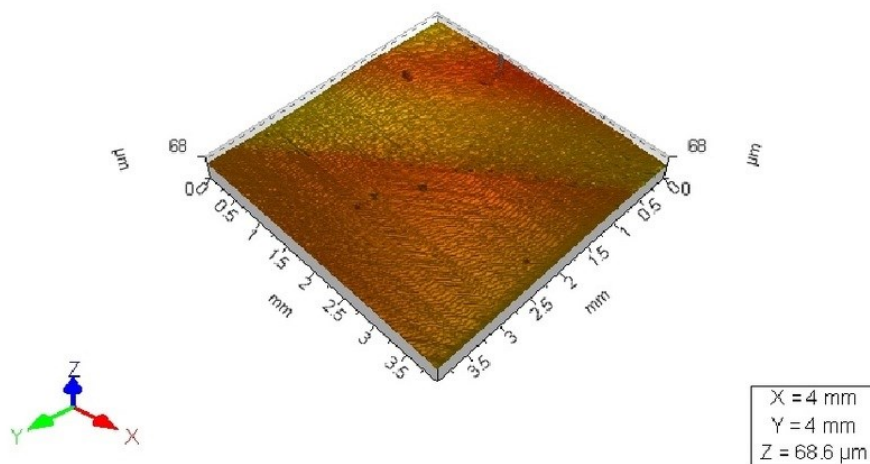
V oblasti laboratorního a vědeckého výzkumu se obvykle upřednostňují přístroje pro hodnocení povrchů, které fungují na principu bezkontaktního měření, tedy s využitím bezkontaktních detektorů. Mezi nejčastěji používané typy patří CLA (Chromatic Length Aberration) snímače a laserové snímače. Rozlišovací schopnost CLA snímačů dosahuje mikrometrů, zatímco laserové snímače mají rozlišení přibližně o řád nižší. Nejpřesnější, ale v praxi tolik nevyužívanou metodou je CSI neboli Coherence Scanning Interferometry, která dosahuje přesnosti v řádech nanometrů. [8] [10]

1.6.1 Chromatic Length Aberration (CLA)

Princip práce spočívá v tom, že bílé světlo je rozděleno a pomocí optiky nasměrováno na zkoumaný povrch. Optický systém rozdělí světlo na jednotlivé vlnové délky a na povrchu se zaostří pouze specifická vlnová délka světla pro každý bod. Odražené světlo prochází otvorem, který propouští jen světlo s danou zaostřenou vlnovou délkou. Spektrometr poté odkloní světlo na maticový senzor, kde je každému bodu přiřazena specifická prostorová pozice. Tato data jsou následně zpracována počítačem a vyhodnocena. [8]



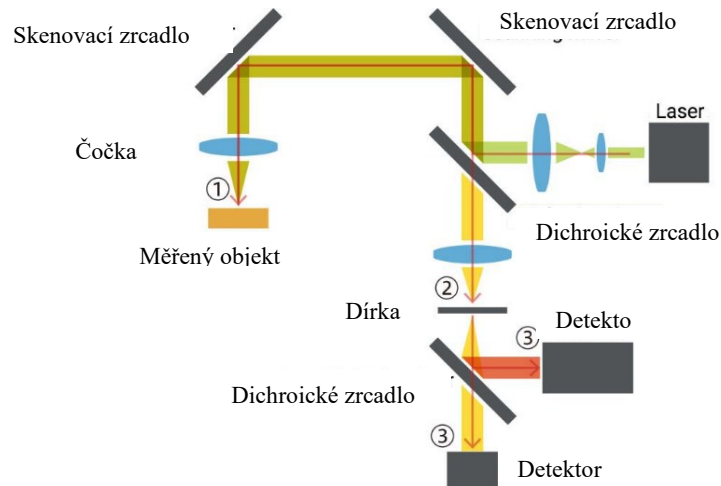
Obrázek 17 Schéma CLA [22]



Obrázek 18 Příklad výsledku z CLA [22]

1.6.2 Laserové snímače

Laserové snímače jsou moderní měřicí zařízení využívající laserové technologie k přesnému měření vlastností povrchů, jako jsou drsnost, profil, tloušťka, vzdálenost nebo jiné geometrické charakteristiky. Tyto snímače najdou uplatnění v široké škále průmyslových a výzkumných aplikací díky své vysoké přesnosti, rychlosti a schopnosti měřit bez fyzického kontaktu s měřeným objektem. [8]

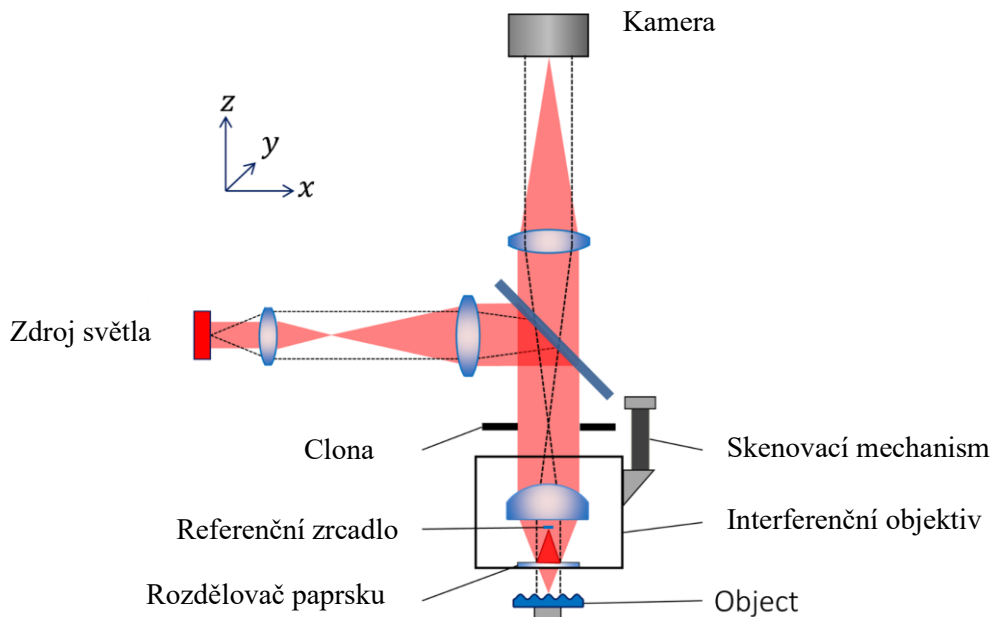


Obrázek 19 Schéma laserového snímače

Laserové snímače povrchu pracují na principu laserové triangulace, kde laserový paprsek je vyslán na povrch objektu a odražený paprsek je zachycen detektorem. Poloha odraženého paprsku na detektoru se mění v závislosti na vzdálenosti a topografii povrchu. Tato změna je analyzována a převedena na digitální data, která přesně popisují měřený povrch. [8]

1.6.3 Coherence Scanning Interferometry (CSI)

Coherence Scanning Interferometry (CSI) je pokročilá optická měřicí technika používaná k vysoce přesnému měření topografie povrchu. Tato metoda je zvláště užitečná pro měření velmi jemných detailů a drsnosti povrchu na mikro a nano úrovni. CSI je ceněna pro svou vysokou přesnost, rychlost a schopnost měřit širokou škálu materiálů, od kovů po polymery a biologické vzorky. [8]



Obrázek 20 Schéma CSI

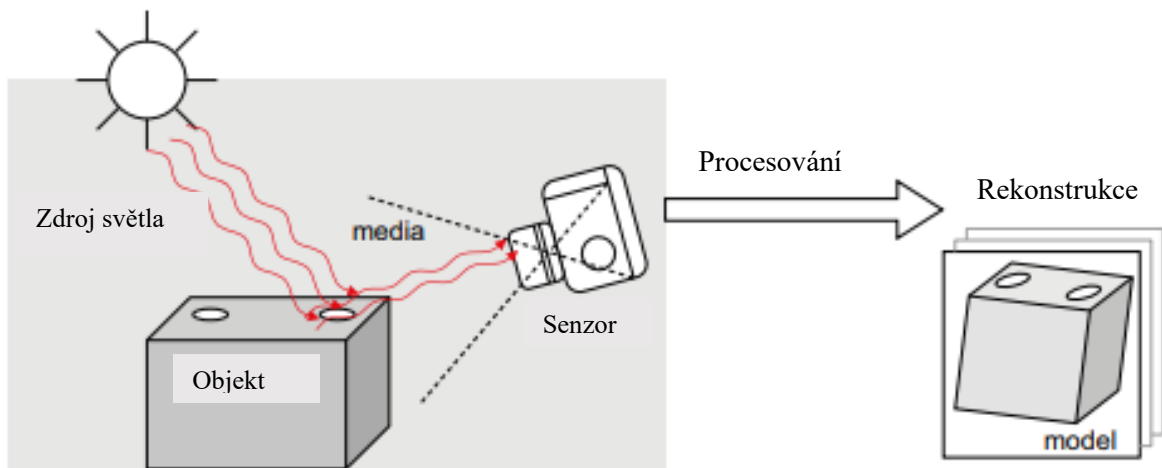
CSI využívá princip interferometrie, kde koherentní světlo z laseru nebo super luminiscenční diody je rozděleno na dvě cesty: referenční a měřicí. Měřicí paprsek je směřován na zkoumaný povrch, zatímco referenční paprsek je směřován na pevné referenční zrcadlo. Světlo odražené od zkoumaného povrchu a referenčního zrcadla je poté kombinováno, což vytváří interferenční vzor závislý na rozdílu optických cest mezi dvěma paprsky. [8]

2 FOTOGRAMMETRIE

Fotogrammetrie je vědecká disciplína, která umožňuje získávat přesné údaje o fyzických objektech a jejich prostředí pomocí analýzy fotografií. Technika využívá snímky pořízené z různých perspektiv nebo v odlišných časech, aby mohla měřit a vyhodnocovat objekty a určovat jejich velikost, polohu a tvar ve trojrozměrném prostoru. Fotogrammetrie se uplatňuje v řadě oblastí, včetně kartografie, architektury, inženýrství, archeologie a výrobního průmyslu. [1]

2.1 Fotogrammetrický proces

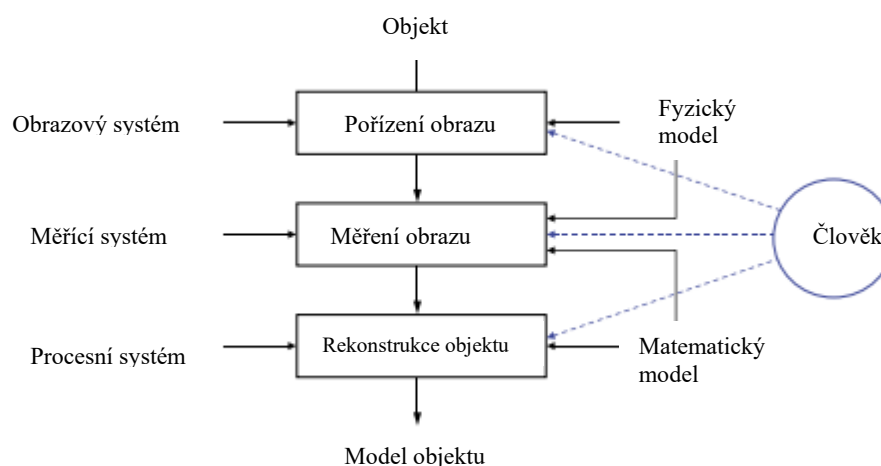
Fotogrammetrie se věnuje měření a analýze obrazů s cílem určit tvar a polohu objektů na základě jedné nebo více fotografií těchto objektů. Tyto metody lze použít v jakékoliv situaci, kde je možné objekt změřit pomocí fotografického zachycení. Hlavním cílem fotogrammetrických měření je vytvořit trojrozměrnou digitální nebo grafickou rekonstrukci objektu. Fotografie slouží jako zdroj informací, ke kterým lze opakovaně přistupovat. Převod trojrozměrného objektu do dvourozměrného obrazu však vede ke ztrátě informací, zejména v oblastech objektu, které nejsou na fotografii vidět, jako jsou skryté části nebo oblasti s nízkým kontrastem či malými detaily. Navíc, zatímco polohu bodu na objektu definují tři souřadnice, jeho 2D obraz má k dispozici jen dvě souřadnice. To vede k geometrickým změnám způsobeným tvarem objektu, umístěním kamery, perspektivním zobrazením a vadami optických čoček. Rovněž dochází k radiometrickým změnám, protože obraz je ovlivněn světlem, které prochází různými médii jako vzduch či sklo, a je zachyceno světlo citlivými médii, jako jsou film nebo elektronické senzory. Pro úspěšnou rekonstrukci objektu z obrazů je tedy klíčové porozumět optickému procesu tvorby obrazu, zahrnující faktory jako zdroje světla, vlastnosti objektů, vlastnosti prostředí, technologii senzorů, obrazovou techniku a post procesní zpracování. [1]



Obrázek 21 Proces získávání obrazu [1]

Následně je nutné použít metody pro interpretaci a měření obrazu, které umožňují z obrazového záznamu objektu rozpoznat jeho tvar, jas nebo barvu. Pro každý bod na obrazu lze získat informace ve formě radiometrických (intenzita světla, šedá stupnice, barva) a geometrických dat (umístění v rámci obrazu). Tento proces vyžaduje měřicí systémy, které disponují potřebnou geometrickou a optickou přesností.

Z těchto měření a pomocí matematické transformace mezi obrazovým a objektovým prostorem lze nakonec objekt modelovat. Tuhle sekvenci zobrazuje následující schéma. [1]



Obrázek 22 Fotogrammetrický proces – z objektu na model [1]

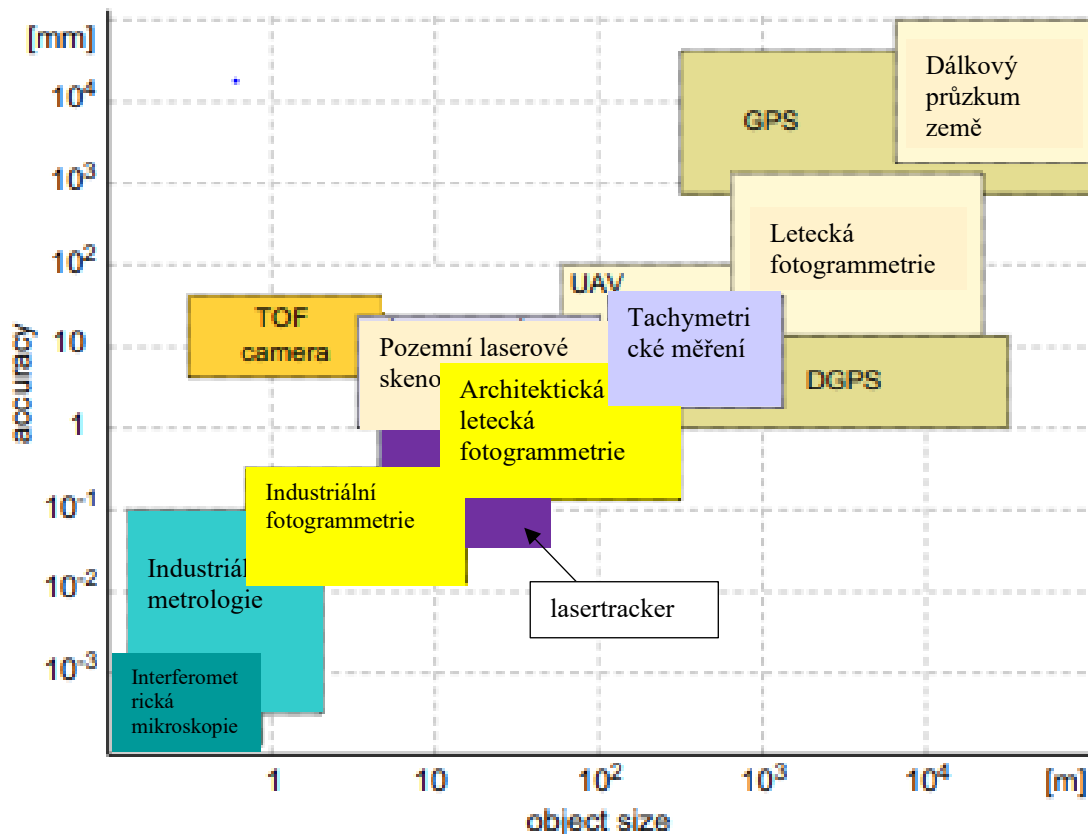
Společně s fyzikálními a matematickými modely hraje významnou roli lidská znalost, zkušenost a dovednost. Ta určuje míru, do jaké rekonstruovaný model odpovídá zobrazovanému objektu. [1]

2.2 Aspekty fotogrammetrie

Blízká fotogrammetrie se vyznačuje silným interdisciplinárním charakterem kvůli svému širokému spektru aplikačních oblastí. Tato disciplína je úzce propojena nejen s dalšími měřicími metodami, ale také s fundamentálními vědními obory, jako jsou matematika, fyzika, informatika a biologie.

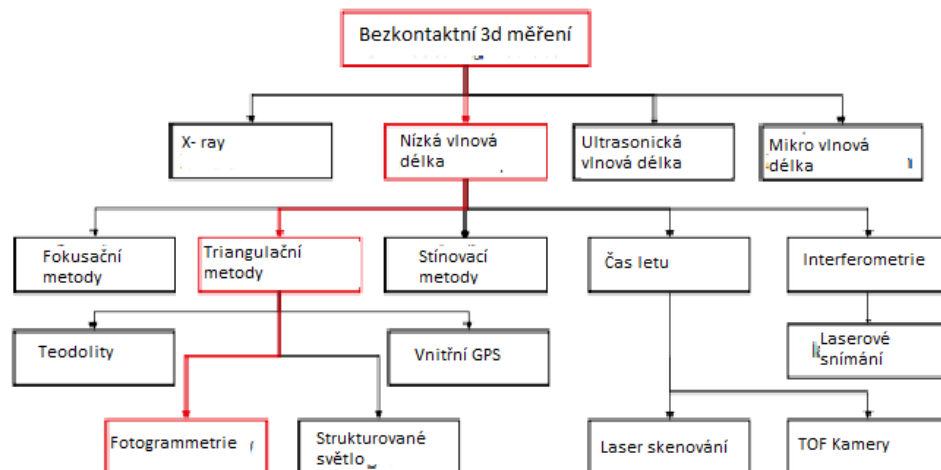
Dále blízká fotogrammetrie má důležité spojení s oblastmi grafiky a fotografické vědy, včetně počítačové grafiky, digitálního zpracování obrazu, počítačem podporovaného designu (CAD), geografických informačních systémů (GIS) a kartografie.

Tradičně má též hluboké vazby s geodézií, zejména ve vyrovnávacích metodách a inženýrském měření. S rostoucím využitím v průmyslové metrologii a kontrole kvality fotogrammetrie rozšiřuje své vazby i do dalších oblastí. [1] [16]



Obrázek 23 Vztah mezi velikostí měřeného objektu, požadovanou přesností měření a relevantní technologií [1]

Optické metody využívající světlo jako nosič informací jsou jádrem technik nekontaktního 3D měření. Měřicí techniky využívající elektromagnetické vlny mohou být rozděleny způsobem ilustrovaným na obr. 24. [1] [15]



Obrázek 24 Měřicí techniky využívající elektromagnetické vlny [1]

2.2.1 Rozdělení fotogrammetrie do kategorií

Podle pozice kamery a vzdálenosti objektu [1] [18]:

- Satelitní fotogrammetrie
- Letecká fotogrammetrie
- Dronová fotogrammetrie
- Pozemní fotogrammetrie
- Close-range fotogrammetrie
- Podvodní fotogrammetrie
- Makro fotogrammetrie
- Mapování pohybu

Podle počtu použitých snímků:

- Jedno snímková fotogrammetrie
- Stereo fotogrammetrie
- Více snímková fotogrammetrie

Podle metody záznamu a zpracování:

- Ruční fotogrammetrie
- Analogová fotogrammetrie
- Analytická fotogrammetrie
- Digitální fotogrammetrie
- Videogrammetrie
- Panoramatická fotogrammetrie

Podle dostupnosti výsledků:

- Offline fotogrammetrie
- Online fotogrammetrie
- Fotogrammetrie v reálném čase

Podle uplatnění:

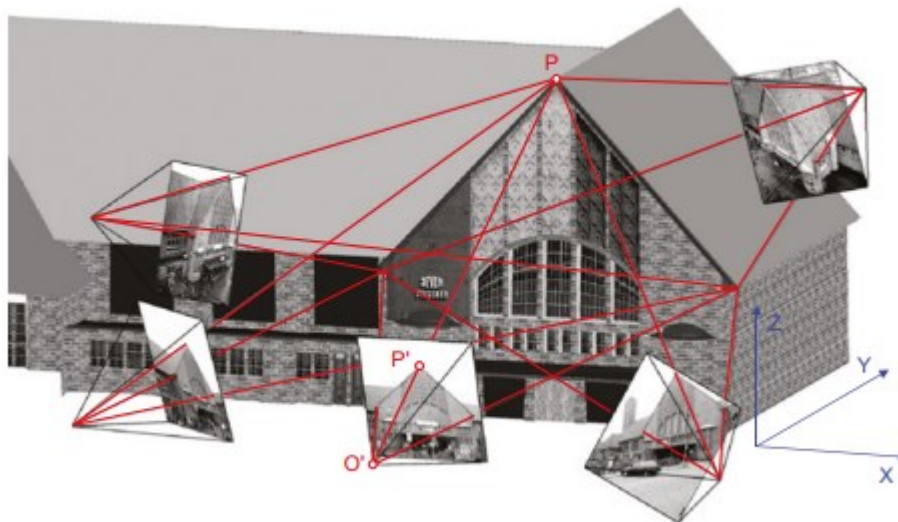
- Architektonická fotogrammetrie
- Strojírenská fotogrammetrie
- Průmyslová fotogrammetrie
- Forenzní fotogrammetrie
- Multi-mediální fotogrammetrie

2.3 Model formování obrazu

Fotogrammetrie je metoda trojrozměrného měření, která využívá centrální projekční zobrazování jako svůj základní matematický model. Tato technika určuje tvar a polohu objektu rekonstrukcí paprsků. Každý bod obrazu P' spolu s odpovídajícím perspektivním centrem O' určuje pro každou kameru prostorový směr paprsku směřujícího k bodu objektu P . S přesnými informacemi o geometrii kamery a její pozici vůči zobrazovanému objektu lze každý obrazový paprsek definovat ve trojrozměrném prostoru. [14]

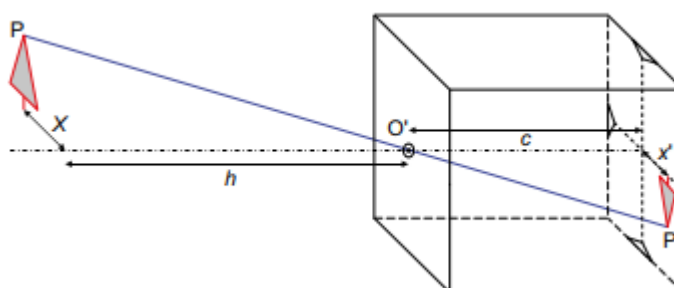
Průsečíkem alespoň dvou odpovídajících, prostorově oddělených obrazových paprsků lze určit bod objektu ve třech rozměrech. Ve stereofotogrammetrii se k tomuto účelu používají

dva snímky. V multiobrazové fotogrammetrii je počet zapojených snímků v principu neomezený. [1]



Obrázek 25 Princip fotogrammetrie [1]

Využitím modelu kamery obscura (obr. 26) je klíčovým referenčním bodem perspektivní centrum O , skrze které prochází všechny obrazové paprsky. Vnitřní orientace určuje umístění tohoto centra ve vztahu k referenčnímu systému, který je pevně spojen s kamerou (systém obrazových souřadnic), a zahrnuje také odchylky od ideální centrální projekce, jako jsou zkreslení obrazu. Zásadním parametrem vnitřní orientace je hlavní vzdálenost, označovaná jako c , což je vzdálenost mezi obrazovou rovinou a perspektivním centrem. [1]

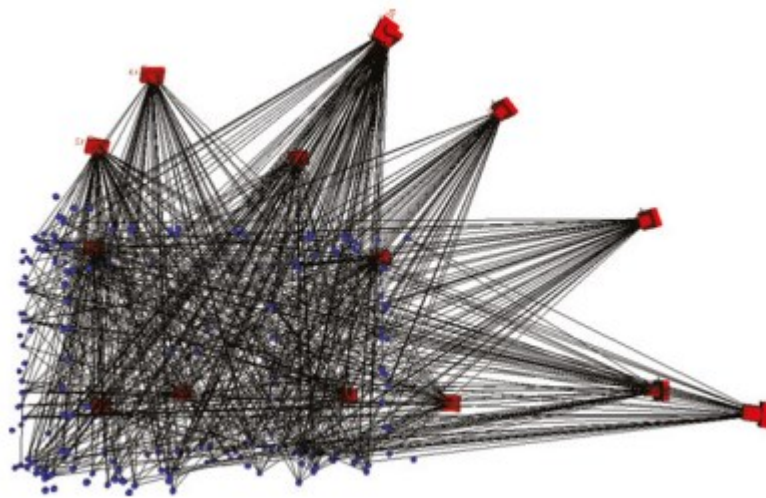


Obrázek 26 Schéma kamery obscura [1]

Reálná a praktická fotogrammetrická kamera se bude lišit od modelu kamery obscura. Nutnost použití relativně složité čočky, konstrukce kamery, která nemusí být stavěna na stabilitu, a záznamového povrchu obrazu, který nemusí být rovinný ani kolmý na optickou

osu čočky. To vše povede k odchylkám od ideální geometrie zobrazování. Vnitřní orientace, která bude zahrnovat parametry definující tyto odchylky, musí být určena kalibrací pro každou kameru. [1]

Každý změřený obrazový bod odpovídá prostorovému směru od projekčního centra k bodu objektu. Délka vektoru je zpočátku neznámá, tj. každý bod objektu ležící na lince tohoto vektoru generuje stejný obrazový bod. Bod objektu může být na obrazovém paprsku lokalizován, a tím absolutně určen v prostoru objektu, pouze průsečíkem paprsku s dalším známým geometrickým prvkem, jako je druhý prostorový směr nebo rovina objektu. [1] [18]



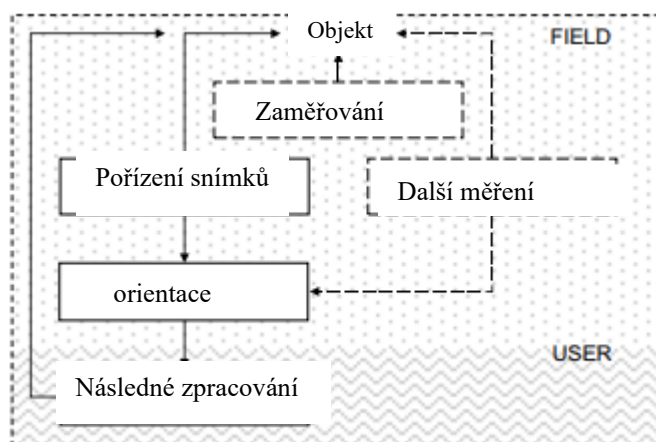
Obrázek 27 Znárodnění svazků paprsků z několika pořizených obrázků [1]

Každý obraz vytváří prostorový svazek paprsků, který je definován body na obrazu a perspektivním centrem, přičemž všechny tyto paprsky byly zachyceny v jednom momentu. Když se svazky paprsků z více obrazů protínají, jak bylo dříve zmíněno, vzniká hustá síť. Pokud je zobrazovací konfigurace správně nastavena, tato síť poskytuje vysokou geometrickou stabilitu. S použitím metody úpravy svazků lze současně orientovat libovolný počet obrazů (svazků paprsků) a také vypočítat související trojrozměrné pozice bodů na objektu. [1] [14]

2.4 Digitální systém

S několika výjimkami dnes fotogrammetrické snímání obrazu využívá digitální kamery podporované zpracováním obrazu na základě metod vizuální a digitální analýzy obrazu. Je

tedy možný uzavřený digitální systém, který může objekt přímo na místě změřit úplně bez jakékoliv významné časové ztráty mezi akvizicí obrazu a dodáním výsledků (Obr. 28.). [1]



Obrázek 28 Schéma digitálního fotogrammetrického systému [1]

Digitální snímání obrazu a zpracování nabízí možnost rychlého, uzavřeného toku dat od pořízení snímků po prezentaci výsledků. Zde se rozlišují dva obecné postupy. Offline fotogrammetrie využívá jednu kameru s výsledky měření generovanými po zaznamenání a následném vyhodnocení všech snímků. Online fotogrammetrie zaznamenává současně pomocí alespoň dvou kamer s okamžitým generováním výsledků. Pokud je výsledek dodán v určitém časovém období specifickém pro proces, běžně se používá termín real-time fotogrammetrie. [1] [11]

Automatizace a krátké zpracovatelské cykly umožňují přímou integraci s dalšími procesy, kde lze rozhodovat na základě zpětné vazby fotogrammetrických výsledků. Digitální systémy jsou proto klíčové pro aplikaci fotogrammetrie v komplexních procesech v reálném čase, zejména ve výrobě a montáži, robotice a medicíně, kde dochází ke zpětné vazbě s objektem nebo okolím. [1] [12]

2.5 Aplikace fotogrammetrie

Obecně je fotogrammetrie užitečná v případech kdy [1]:

- Měřený objekt je těžce dostupný
- Objekt není stálý a vyžaduje zachycení okamžitých rozměrů
- Kdy není jisté, zda měření je potřeba (uschování pro pozdější použití)
- Přímé měření by mohlo poškodit objekt

Aplikace fotogrammetrie může být rozdělena do několika odvětvích [1] [17]:

Automotive, strojný a lodní průmysl

- Inspekce náradí
- Reverzní inženýrství
- Kontrola výroby
- Analyzování bezpečnostních testů pro auta
- Kalibrace
- Asistenční systémy
- Měření lodních částí
- Kontrola lodních součástí

Vesmírný průmysl

- Měření parabolických antén a zrcadel
- Vesmírné simulace

Architektura a archeologie

- Měření fasád
- Dokumentace historických budov
- Rekonstrukce poškozených budov
- Mapování nalezišť

Strojírenství

- Měření velkých strojírenských pozemků
- Měření kanalizací a vodních potrubí
- Hornictví
- Větrné energetické systémy
- Měření cest a kolejnic

Medicína

- Dentální měření
- Měření páteře
- Plastická chirurgie
- Neuro chirurgie
- Mikroskopické analýzy

Kinematografie/animace

- Zaznamenání tvarů těla
- Analýza pohybu herců
- 3D filmy
- Virtuální realita
- Augmented realita

3 3D TISK

3D tisk, známý také jako aditivní výroba, je proces, při kterém se vytvářejí trojrozměrné objekty z digitálního souboru. Tato technologie představuje revoluci v mnoha odvětvích, od průmyslové výroby až po medicínu, a nabízí nové možnosti pro design, prototypování a výrobu. [4] [20]

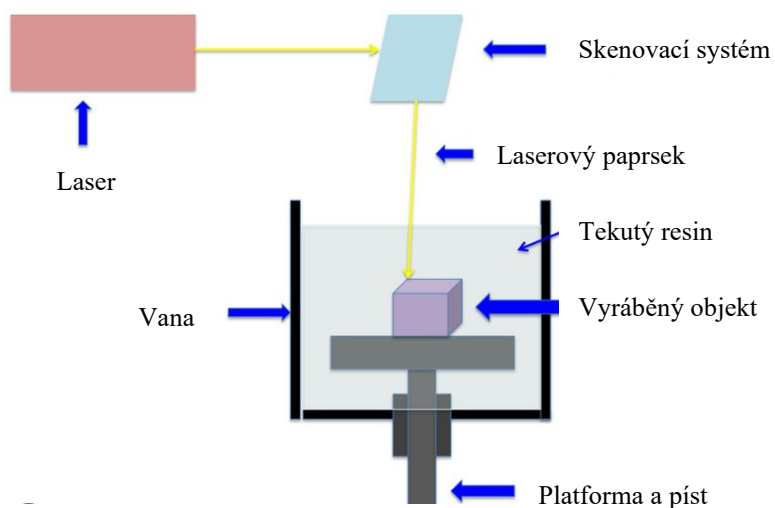
3D tisk funguje na principu postupného přidávání materiálu vrstva po vrstvě. Tento proces začíná návrhem 3D modelu v počítačovém programu, jako je CAD (počítačem podporovaný design). Model je poté rozdělen na tenké horizontální vrstvy a převeden do formátu, který 3D tiskárna může číst a vytisknout. [4] [5] [6]

3.1 Stereolitografie (SLA)

Stereolitografie (SLA) je jednou z nejstarších a nejrozšířenějších technologií 3D tisku. Tato metoda se vyznačuje vysokou přesností a schopností vytvářet složité geometrie s hladkým povrchem. SLA tiskárny pracují na principu vytvrzování tekuté pryskyřice pomocí ultrafialového (UV) světla. Využívá proces zvaný foto polymerizace k vytváření přesných a detailních trojrozměrných objektů. Tato technologie byla vynalezena v roce 1986 Charlesem W. Hullem a je považována za jednu z prvních metod 3D tisku. [5] [7] [24]

3.1.1 Základní principy

Stereolitografie pracuje s využitím tekutého fotopolymeru, obvykle pryskyřice, která se tuhne (polymerizuje) při expozici ultrafialovému (UV) světlu. Tento proces je řízen počítačem, který přesně řídí, kde světlo zasáhne povrch pryskyřice, a tím vytváří pevnou vrstvu materiálu. Tento proces se opakuje vrstva po vrstvě, dokud není celý objekt kompletně vytvořen. [5] [24]



Obrázek 29 Schéma SLA [24]

3.1.2 Aplikace

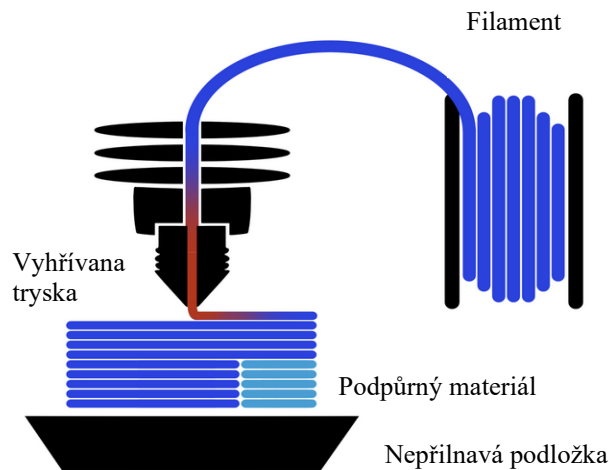
Stereolitografie se široce používá v prototypování, zubním průmyslu, šperkařství, výrobě forem a v mnoha dalších oblastech, kde jsou požadovány přesné a detailní objekty. Díky své schopnosti vytvářet složité geometrie s vysokou povrchovou kvalitou je SLA oblíbenou volbou pro vývoj produktů a vizualizace designu. [5]

3.1.3 Budoucí vývoj

S rozvojem technologie a materiálů se očekává, že stereolitografie bude nadále hrát klíčovou roli v oblasti 3D tisku, s možnými vylepšeními v rychlosti tisku, rozmanitosti materiálů a dostupnosti pro širší spektrum uživatelů. [5] [7]

3.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

Fused Deposition Modeling (FDM) je jednou z nejrozšířenějších a nejpobulárnějších technologií 3D tisku, která se vyznačuje svou dostupností, jednoduchostí použití a schopností tisknout širokou škálu materiálů. Tato technologie, často označovaná jako FFF (Fused Filament Fabrication), funguje na principu extruze termoplastického materiálu, který je postupně ukládán ve vrstvách na tiskovou platformu. [5] [20]



Obrázek 30 Schéma FDM [25]

3.2.1 Základní principy

FDM tiskárny pracují tak, že plastový filament, obvykle dodávaný v cívkách, je podáván do tiskové hlavy, kde je zahříván na tavicí teplotu. Po dosažení této teploty je materiál extrudován přes trysku a aplikován na tiskovou platformu nebo již vytvořenou vrstvu materiálu. Pohyb tiskové hlavy je řízen počítačem, který přesně určuje, kde a jak bude materiál uložen, aby se vytvořil požadovaný objekt. [5] [20]

3.2.2 Materiály

FDM technologie umožňuje použití různých typů termoplastických materiálů, včetně běžných jako je ABS (akrylonitril-butadien-styren) a PLA (kyselina polymléčná), ale také speciálnějších materiálů jako jsou TPU (termoplastický polyuretan), PETG (polyethylentereftalát glykol-modifikovaný) a mnoho dalších. Výběr materiálu závisí na požadovaných vlastnostech finálního produktu, jako je pevnost, pružnost, odolnost vůči teplotě nebo chemikáliím. [5] [13]

3.2.3 Aplikace

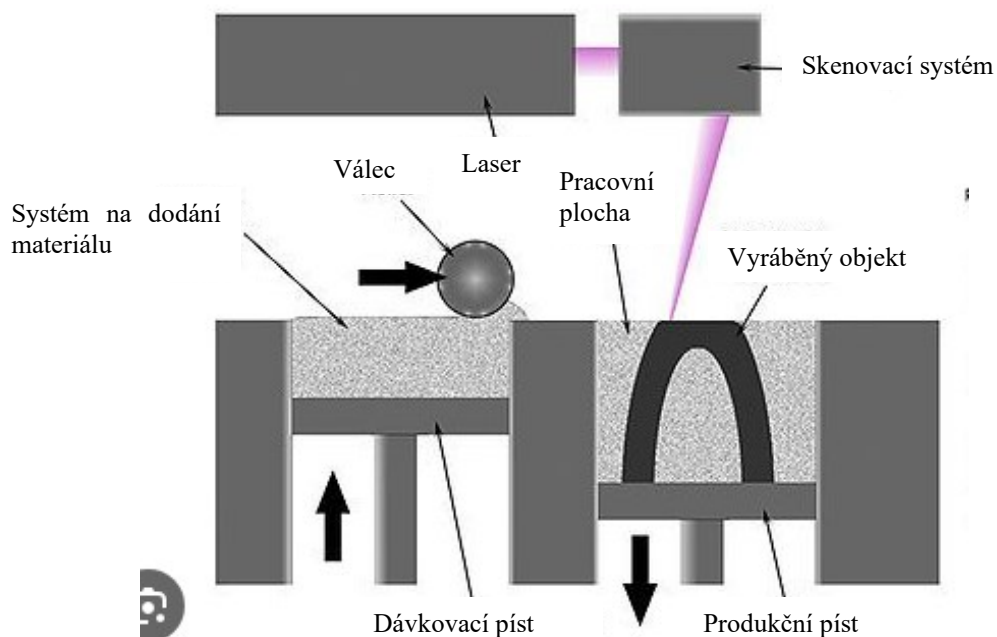
FDM se široce používá v různých oblastech, včetně prototypování, výroby nástrojů, vzdělávání, umění, a dokonce i v malosériové výrobě. Díky schopnosti tisknout s různými materiály a snadné přizpůsobitelnosti designu je FDM ideální pro rychlý vývoj produktů a testování nápadů. [5]

3.2.4 Budoucnost FDM

FDM technologie neustále pokračuje ve vývoji, s vylepšeními v oblasti rychlosti tisku, kvality povrchu a schopnosti tisknout s novými, pokročilými materiály. Tato neustálá inovace zajišťuje, že FDM zůstane klíčovou technologií v rychle se rozvíjícím světě 3D tisku. [5]

3.3 Selektivní laserové spékání (SLS)

Selektivní laserové spékání (SLS) je pokročilá technologie 3D tisku, která se využívá především v průmyslové výrobě pro vytváření komplexních a přesných dílů. Tato technologie se odlišuje od jiných metod 3D tisku tím, že používá laser k spékání práškových materiálů, obvykle plastů, kovů nebo keramiky, vrstvu po vrstvě, aby vytvořila pevný objekt. [5] [7]



Obrázek 31 Schéma SLS [26]

3.3.1 Princip

Základem SLS je použití vysokovýkonného laseru, který selektivně spéká práškový materiál podle digitálního modelu. Proces začíná rozložením tenké vrstvy práškového materiálu na pracovní plochu. Laser poté selektivně spéká prášek podle přesného vzoru odpovídajícího průřezu vytvářeného objektu. Po dokončení jedné vrstvy se pracovní plocha posune dolů a aplikuje se nová vrstva prášku. Tento proces se opakuje, dokud není objekt kompletně vytvořen. [5] [7]

3.3.2 Materiály a aplikace

SLS technologie umožňuje použití široké škály materiálů, včetně nylonu, polyamidů, skleněných a uhlíkových vláken, kovových prášků a mnoha dalších. Díky této flexibilitě se SLS využívá v mnoha odvětvích, jako je letecký průmysl, automobilový průmysl, zdravotnictví a výroba prototypů. Výhodou je schopnost vytvářet složité geometrie, které by byly pomocí tradičních výrobních metod obtížně realizovatelné nebo dokonce nemožné. [5] [7]

3.3.3 Budoucnost

SLS technologie se neustále vyvíjí, přičemž výzkum se zaměřuje na zlepšení kvality tisku, snížení nákladů a rozšíření možností použití různých materiálů. Vývoj nových práškových materiálů a vylepšení laserových systémů otevírá nové možnosti pro výrobu vysoce specializovaných a výkonných dílů. S rostoucím přijetím v průmyslu a pokračujícím vývojem se očekává, že SLS bude hrát klíčovou roli v budoucí výrobě, zejména v oblastech vyžadujících vysokou míru přizpůsobení a komplexní geometrie. [5]

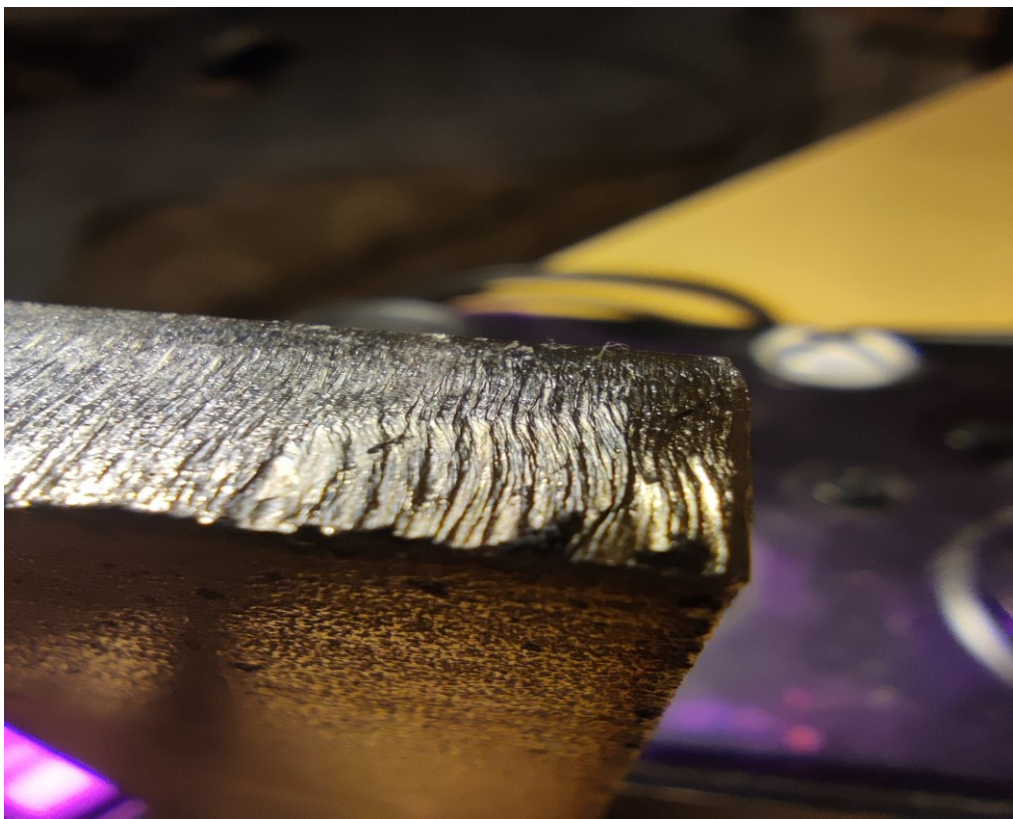
II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 PŘÍPRAVA

Před začátkem projektu je nutné si ujasnit pár základních principů a zásad.

4.1 Volba povrchu

Bylo nutné zvolit povrch takový, který by odpovídal reálnému povrchu možného dosáhnout během výroby. Volil jsem povrch, který byl dosažen laserováním. Zároveň je na tělese viditelných vad, které budou sloužit jako orientační a referenční body napříč celým procesem rekonstrukce.



Obrázek 32 Povrch po laserovém řezání

4.2 Pořizování snímků

Pro pořizování snímků bylo použito mého mobilního zařízení, konkrétně Xiaomi Mi 10 T Pro 5G. Volba klasického chytrého telefonu spočívala v jednoduchosti a snahy dosáhnout co nejmenší časové, technické a finanční náročnosti. Bylo zvoleno makro objektivu, který se na mobilu nachází. Makro objektiv byl volen z důvodu zachycení co nejvěrnějších a nejostřejších detailů povrchu. Pro pořizování bylo nutno však dodržet pár jednoduchých zásad.

4.2.1 Světlo

Na fotografovaný povrch je nutné stálého osvětlení. Světlo, které na model dopadá musí být o stále stejné intenzitě a musí přicházet se stále stejného směru. Zde jsem volil svoji stolní nastavitelnou lampičku a světlo mířil tak aby dané vady byly co nejlépe viditelné.

4.2.2 Polohování

Je velmi důležité, aby focený objekt byl v průběhu celého procesu focení stabilní a na stejném místě. Jakýkoli pohyb, otočení či přemístění, které vyvolá rozdíl mezi foceným materiálem může a má zásadní vliv na výslednou kvalitu replikace daného objektu.

4.2.3 Kvalita

Je samozřejmostí, že je vyžadováno, aby focené fotografie měly co největší rozlišení a nejlepší ostrost. Fotogrammetrické programy sice většinou disponují algoritmem, který nepodařené fotografie vyřazuje, ale není to nutností a není možno se na tyto algoritmy plně spolehnout.

4.2.4 Kvantita

Pro zhotovení co nejuvěrnější kopie povrchu je potřeba, abychom měli dostatečné množství dat v podobě fotografií. Čím více použitelných a použitých fotografií máme, tím více zvyšujeme šanci na kvalitnější rekonstrukci, ale zároveň zvyšujeme i výpočetní časy. Pro účely projektu jsem pořídil nad 60 fotografií, ze kterých bylo poté několik odstraněno z důvodu nedostačující kvality.

5 TVORBA MODELU

Pro tvorbu modelu repliky daného povrchu jsem zvolil fotogrammetrický program MeshroomCL. Meshroom jsem volil hlavně z důvodu, že se jedná o freeware a oproti konkurenčním a dosti často i monetizovaným programům má mnohem větší volnost nastavení a přizpůsobení. Verzi CL jsem volil, protože oba moje dostupné počítače jak stolní, tak i notebook obsahují AMD grafickou jednotku, která nepodporuje CUDA, který je pro základní verzi meshroomu esenciální.

5.1 Zařízení

Pro zachování transparentnosti experimentu je nutné dodat všechny informace o zařízeních, které v experimentu byly použity.

5.1.1 Stolní počítač

Jedná se o můj osobní skládaný a na míru konfigurovaný stolní počítač s primárním účelem zaměřeným na hraní.

Specifikace:

Procesor: Intel core i5-9400f

Grafická karta: Sapphire AMD Radeon RX 6650 XT

Uložiště: SSD disk Samsung 970 EVO 500 GB

Operační paměť: HyperX 16 GB KIT DDR4 3200MHz CL16 FURY series

5.1.2 Notebook

Jedná se o náš rodinný notebook, konkrétně Lenovo IdeaPad 5 14ALC05.

Specifikace:

Procesor: AMD Ryzen 5 5500U

Grafická karta: AMD Radeon Graphics

Uložiště: SSD 256 GB

Operační paměť: 8 GB DDR4

5.2 Fotogrammetrie

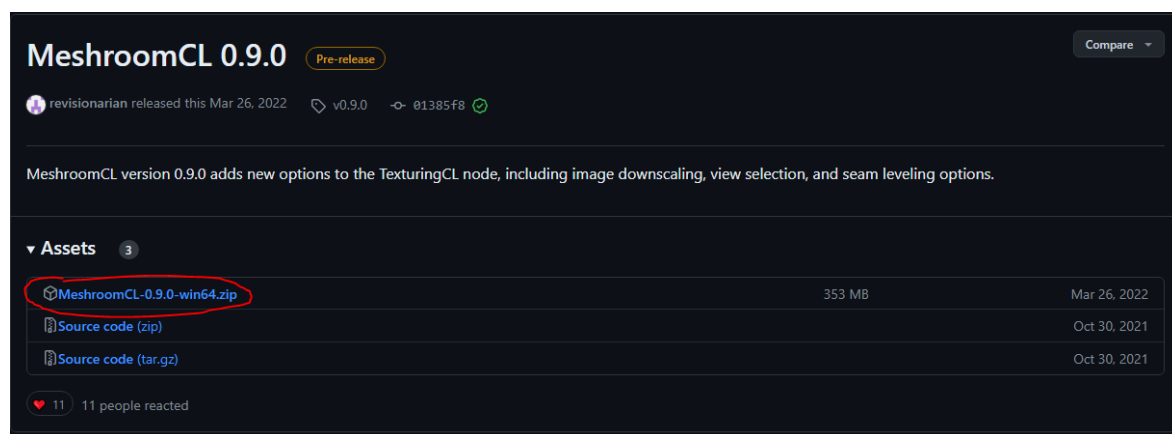
5.2.1 Získání programu MeshroomCL

Jak již bylo zmíněno jedná se o freeware program. Proto k jeho stažení stačí vyhledat pouze oficiální stránku.

MeshroomCL je k dispozici z odkazu:

<https://github.com/openphotogrammetry/meshroomcl/releases>

Zde je možnost výběru z více verzí programu. Já volil verzi nejaktuálnější a tudíž verzi 0.9.0. Po rozkliknutí verze stačí najet na odkaz programu a kliknutím se program stáhne.

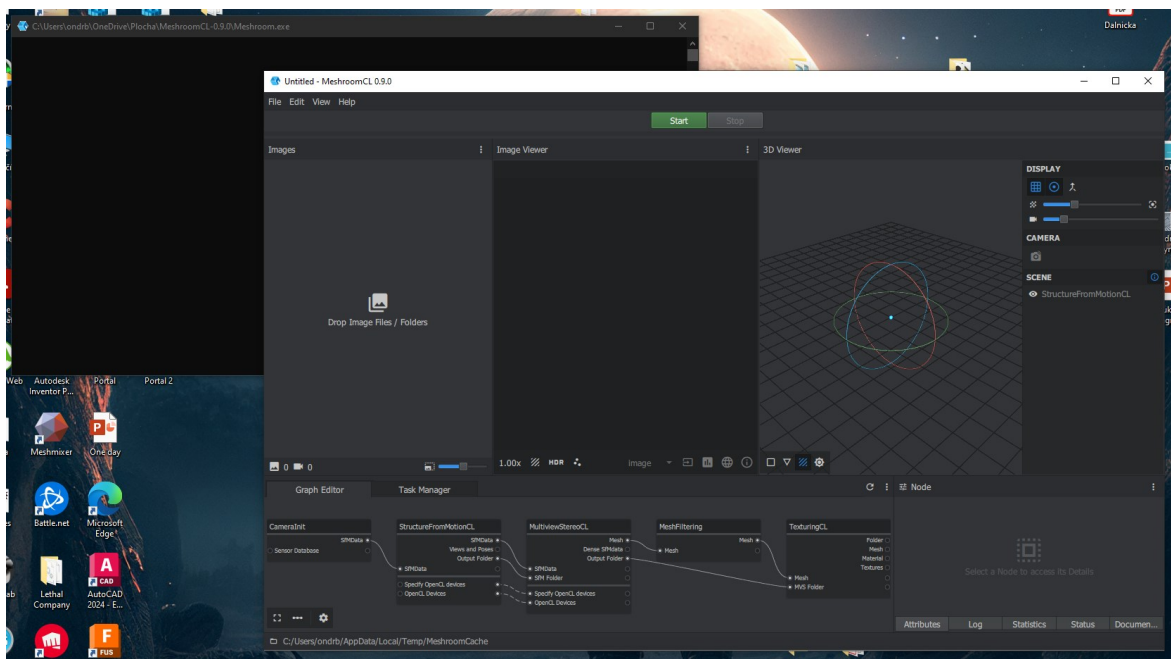


Obrázek 33 Stažení MeshroomCL

Po stažení zip souboru, stačí složku extrahovat na námi zvolené místo a ze složky program pomocí „.exe“ souboru spustit.

5.2.2 První spuštění

Při spuštění programu ihned vyskočí černé příkazové okno. Jedná se pouze o okno, kde program vypisuje aktuální dění a není nutné si ho všimnout. Je ovšem potřebné pro chod a v případě jeho vypnutí se vypne celý program i se vším co momentálně prováděl.



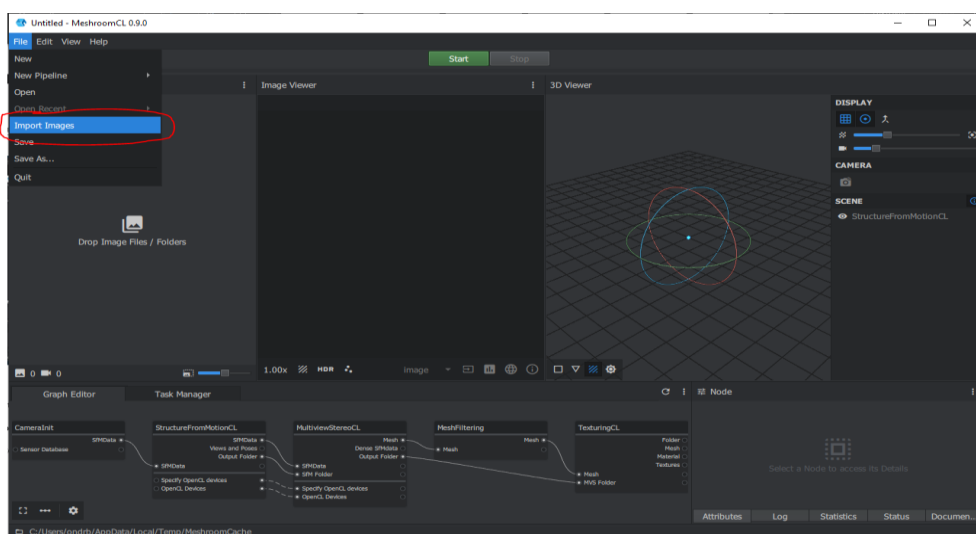
Obrázek 34 První spuštění

5.2.3 Vkládání dat/fotografií

Než budeme fotografie vkládat je vhodné si všechny fotografie, které chceme použít umístit do jedné složky. Není to ovšem nutností, ale pouze doporučení pro lepší přehlednost. Samozřejmostí je, že musíme vkládat fotografie pouze předmětu, který chceme rekonstruovat a nesmíme míchat fotografie různých modelů/předmětů.

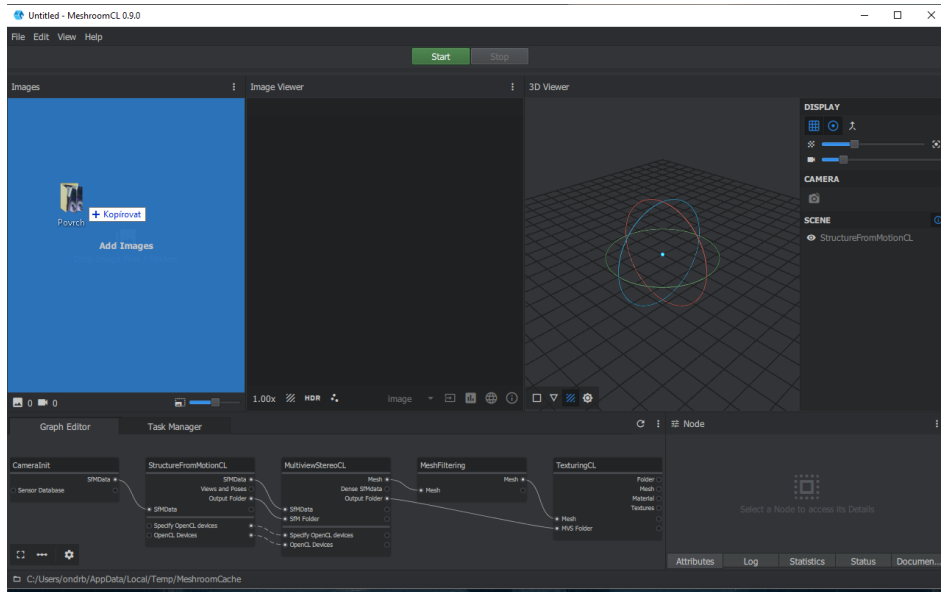
Možnosti vložení jsou dvě.

1. Možnost – otevřít záložku „file“ a zde zvolit možnost „import images“ a poté najít a vybrat všechny fotky, které chceme vložit.



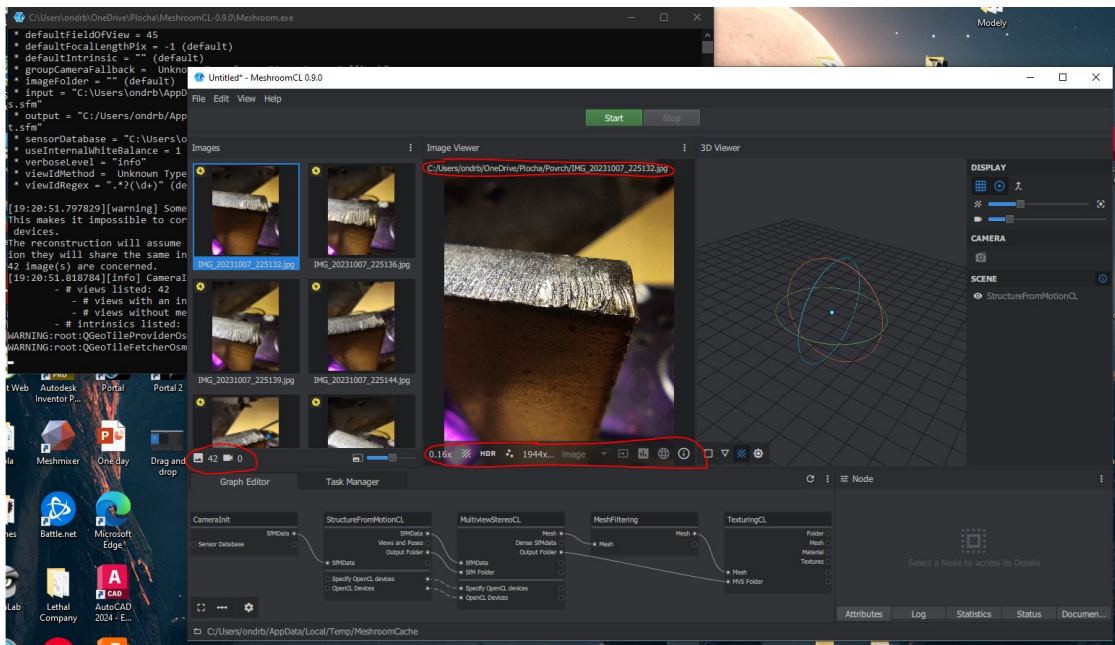
Obrázek 35 Možnost vložení 1

2. Možnost – Celou složku se všemi fotografiemi pouze vzít a tzv „drag and drop“ přesunout do levé části obrazovky programu.



Obrázek 36 Možnost vložení 2

Takhle potom vypadá správné vložení:

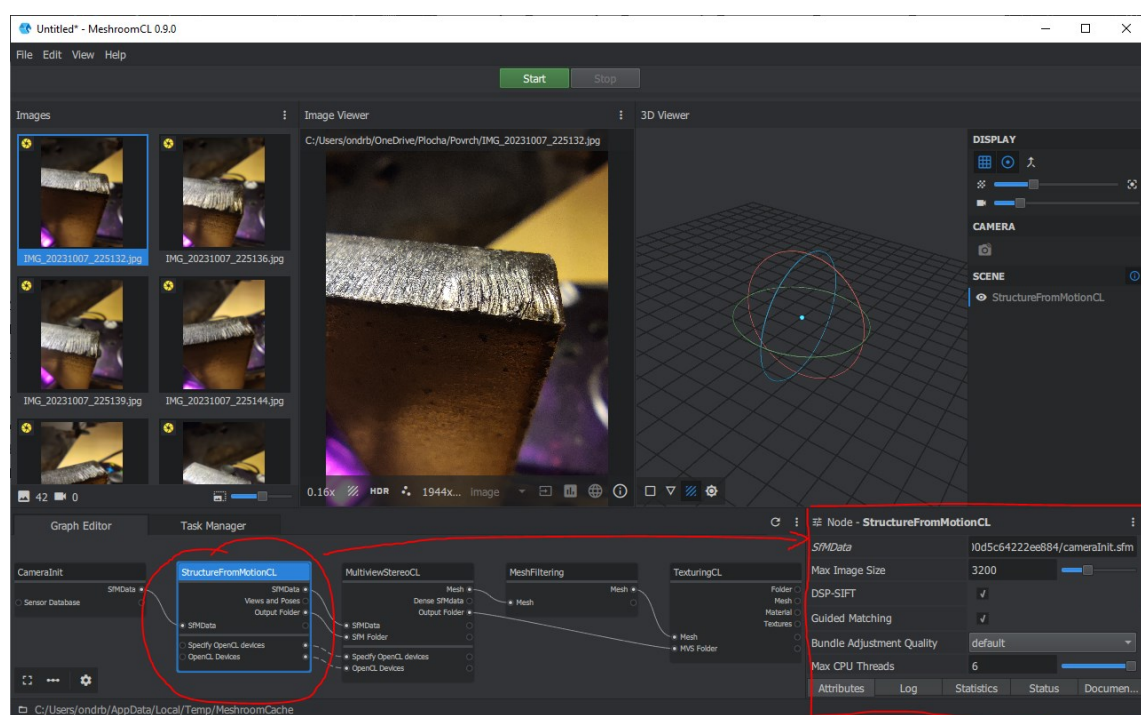


Obrázek 37 Vložení

Můžeme zde vidět všechny vložené fotografie. Pod seznamem obrázků je pak viditelný počet vložených fotografií. Vprostřed obrazovky se nachází náhled na právě zvolený obrázek společně s informacemi o samotné fotografii. (Obr. 37)

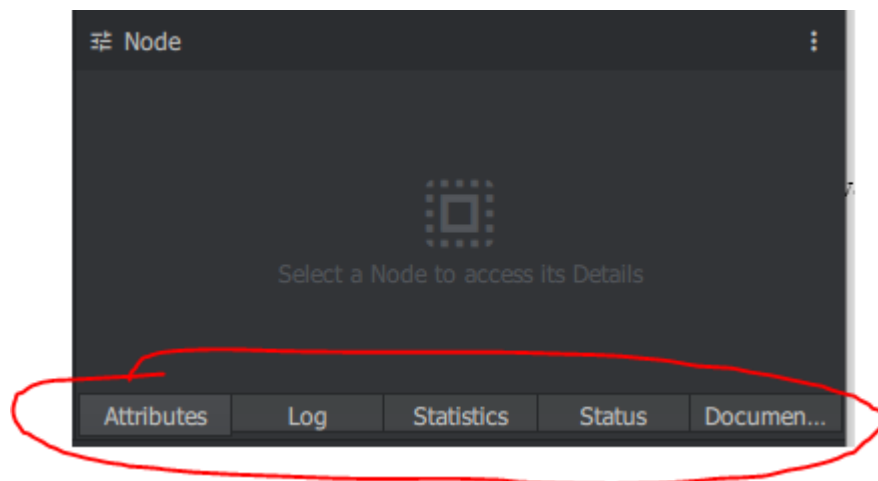
5.2.4 Nastavení

Po úspěšném vložení je nutné proces správně nastavit a optimalizovat. V dolní části obrazovky se nachází jednotlivá okna nastavení procesů, které bude program vykonávat. Po kliknutí na jedno z 5 oken se v pravé části otevře samotné nastavení zvoleného procesu.



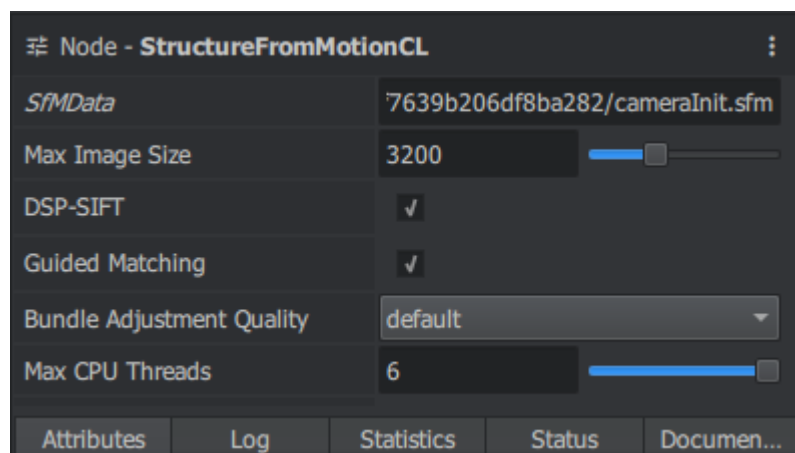
Obrázek 38 Popis základní orientace

Každé okno je rozděleno do 5 záložek (Obr. 39).



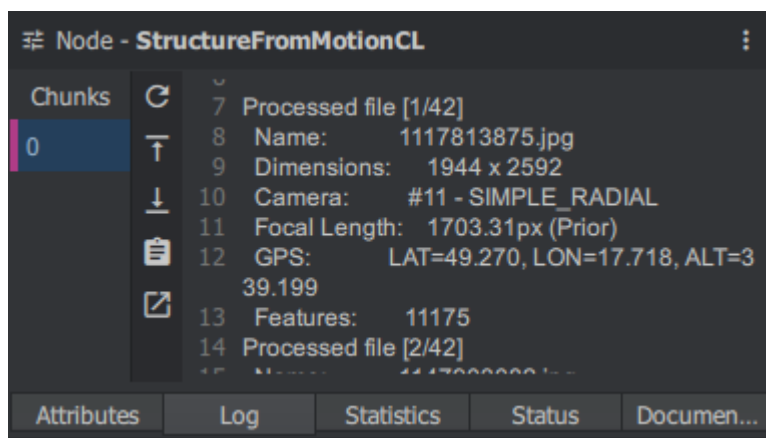
Obrázek 39 Záložky procesu

Attributes je záložka se samotným nastavením daného procesu, zde si měníme jednotlivé parametry, které do procesu budou v daném kroku vstupovat.



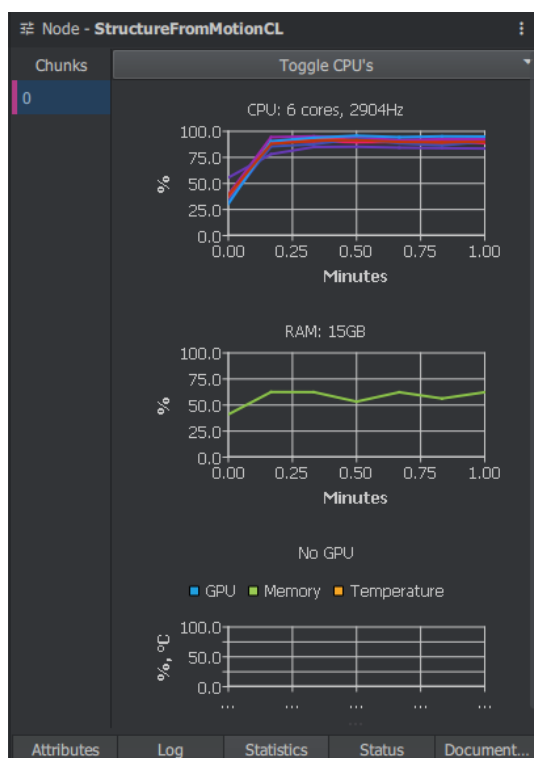
Obrázek 40 Attributes záložka

Log je záložka, kde program vypisuje procesní data v reálném čase. Zde se dá kontrolovat co se zrovna v daný čas děje a výpis těchto dat je možné poté extrahovat do txt souboru.



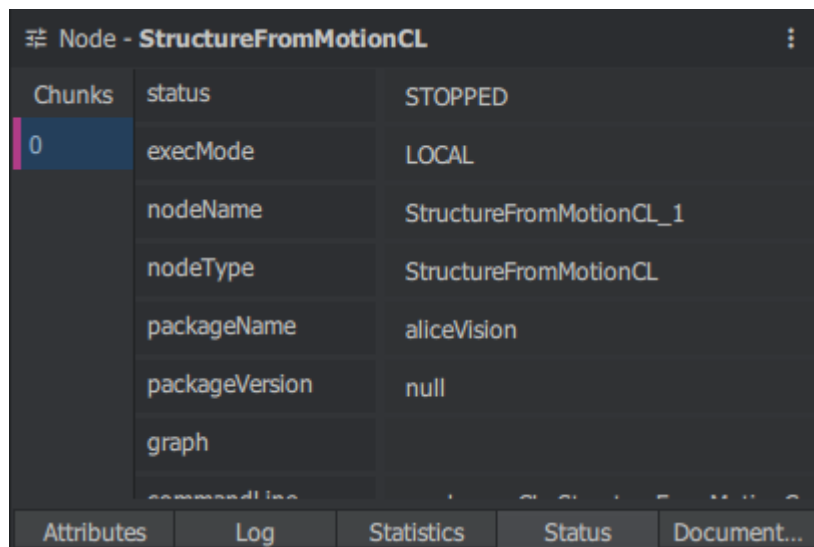
Obrázek 41 Log záložka

Statistics záložka zobrazuje vytížení CPU, RAM a GPU.



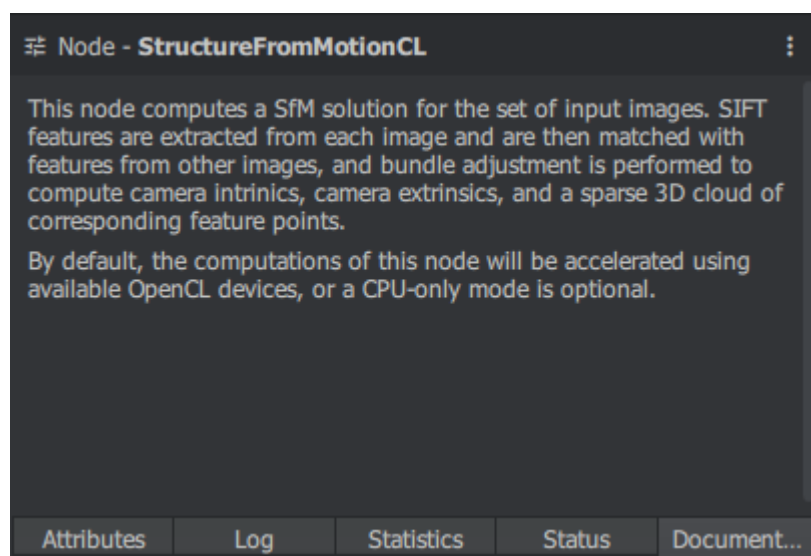
Obrázek 42 Statistics záložka

Status pouze ukazuje základní informace o procesu jako jestli je v pořadí, probíhá, je ukončený nebo zastavený. Dále jsou zde jen logistické informace.



Obrázek 43 Status záložka

Documentation nám pouze dává stručný popis daného procesu.



Obrázek 44 Documentation záložka

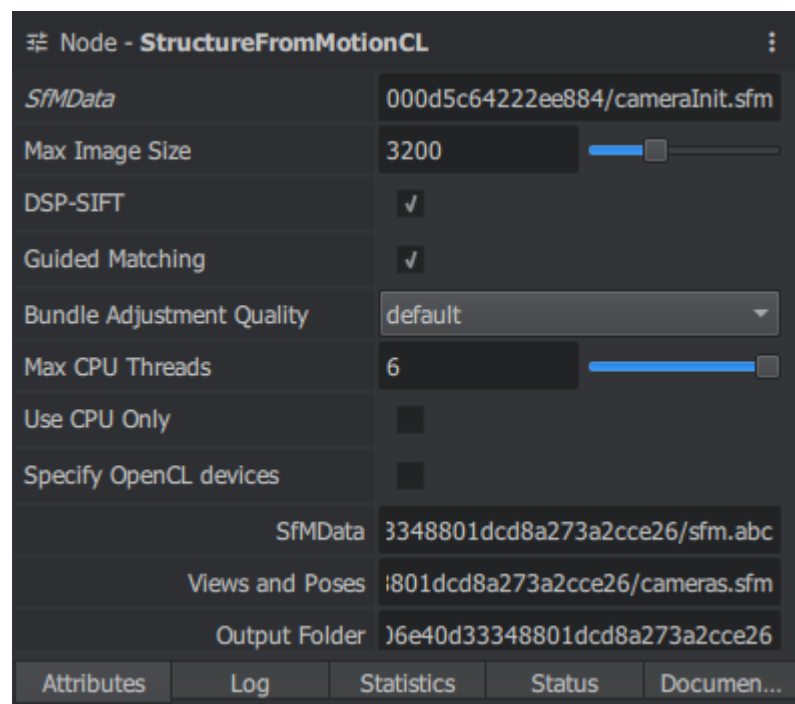
5.2.5 Popis procesů a jejich nastavení

5.2.5.1 CameraInit

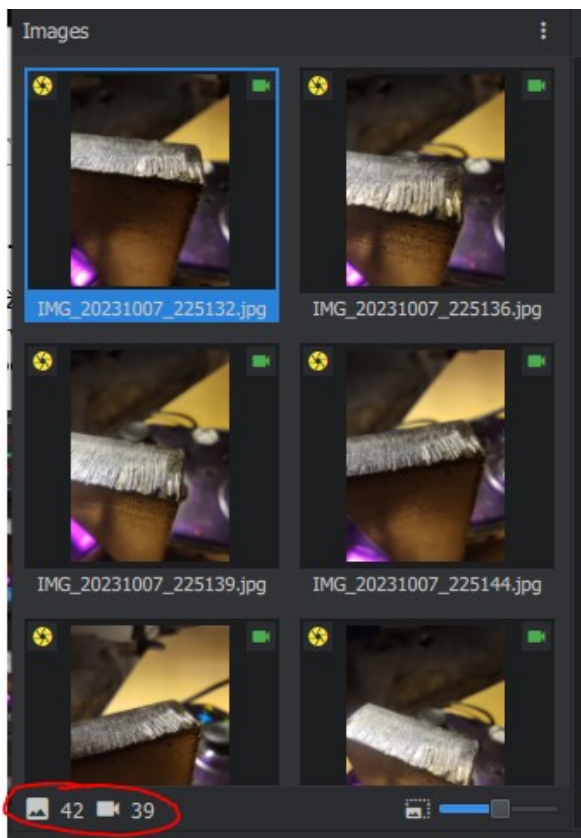
Zde se jedná pouze o zpracování metadat z daných fotografií a tento proces trvá z pravidla pouze zlomek vteřiny a není zde co nastavit.

5.2.5.2 StructureFromMotionCL

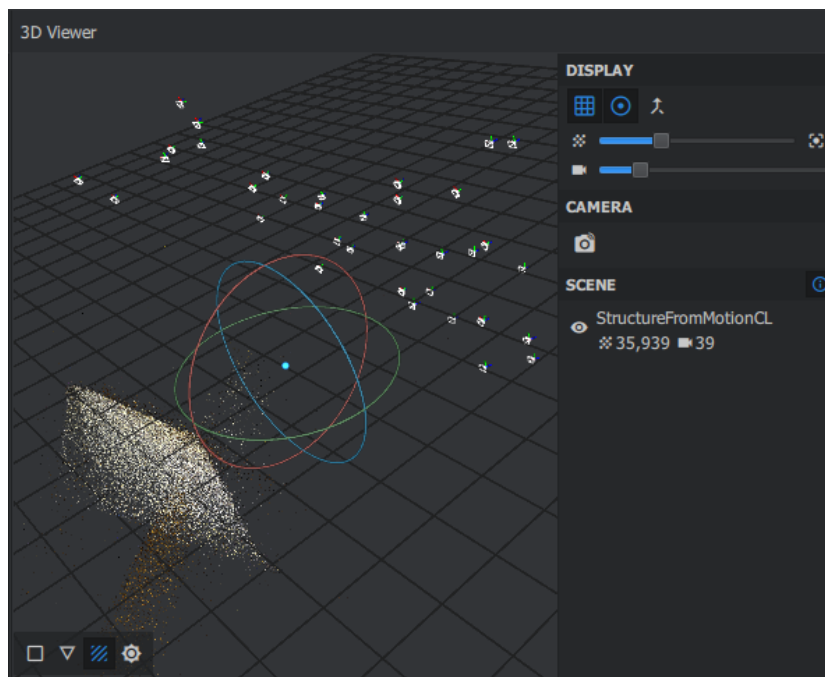
Jedná se o krok, ve kterém program bere informace z jednotlivých fotografií a spřádá je do sebe tak aby vytvořil „mračno“ referenčních bodů a stanovil uhly a vzdálenosti jednotlivých kamer. V tomto procesu probíhá taky selekce výběru fotografií, které program použije. Fotografie, které vyhodnotí jako nevhodné pak dále nezpracovává a počet reálně použitých fotografií zobrazí (obr. 46). Tento krok se zároveň pro danou sérii fotografií ukládá a při tvorbě více modelů ze stejné série fotografií není nutné tenhle úkon vykonávat znovu. Po dokončení tohoto procesu je poté graficky zobrazeno „mračno“ a jednotlivé kamery. [19]



Obrázek 45 Atributy StructureFromMotionCL



Obrázek 46 Použité fotografie



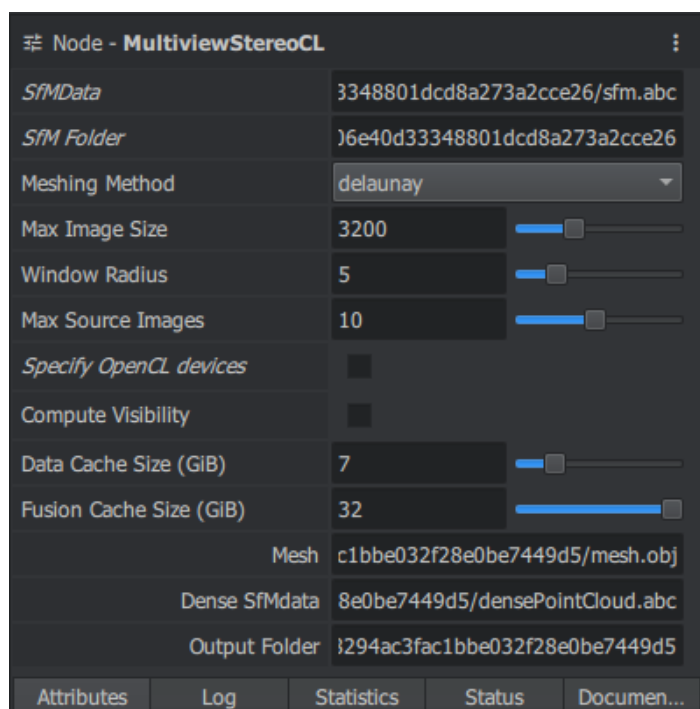
Obrázek 47 Vizualizace kamer

Zásadní nastavitelné parametry:

1. **Max Image Size** – jedná se o maximální počet pixelů, které v jednom směru může fotografie mít. Vlastně se jedná o maximální rozlišení fotografie. V případě že fotografie přesáhne tuto hodnotu tak program automaticky zredukuje její rozlišení na hodnotu zvolenou. Nemá zásadní vliv na výpočetní časy a není nutné tuhle hodnotu měnit, pokud fotografie nedosahují větších rozlišení.
2. **Bundle Adjustment Quality** – udává úroveň kvality rekonstrukce. Na výběr je zde „default“, „higher“ a „highest“. Čím vyšší hodnota tím delší výpočetní časy, ale zároveň potenciálně vyšší kvalita rekonstrukce. Vzhledem k faktu, že tenhle proces po jednom výpočtu není nutné znova opakovat tak bych doporučil zvolit nejvyšší možnou hodnotu pro co nejkvalitnější výsledek.

5.2.5.3 MultiViewStereoCL

Jedná se o proces, kde algoritmus vypočítává hloubku jednotlivých bodů z fotografií a spojí je do kompletního 3D modelu. Při tomto procesu vzniká už požadovaný 3D objekt ve formě triangulovaného meshe. Výpočet je závislý na výkonnosti dostupné grafické výpočetní jednotky. [19]



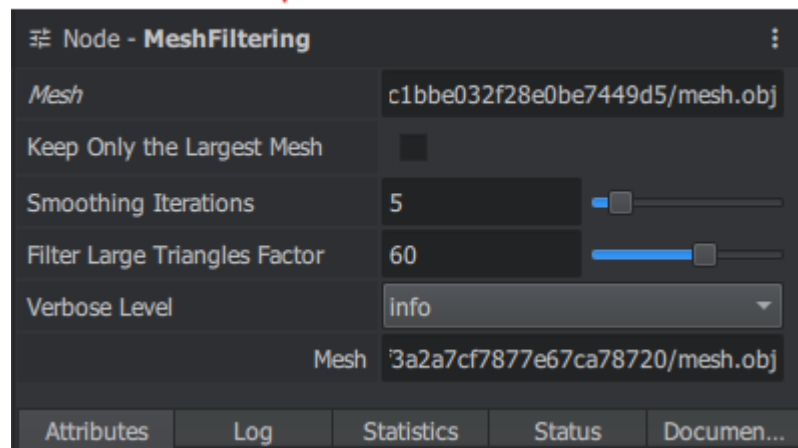
Obrázek 48 Atributy MultiViewStereoCL

Zásadní nastavitelné parametry:

1. **Meshing Method** – Nejdůležitější parametr. Zde je na výběr ze dvou nastavení – „delaunay“ nebo „poisson“. Jedná se o metodu algoritmu, který bude použit pro rekonstrukci. Delaunay je proces, který je velmi závislý na kvalitě a jasnosti „mračna“ bodů a je vhodný použít pouze v případech, kdy fotografie jsou jasně zřetelné, je jich mnoho, a tak naše „mračno“ z předchozího procesu je velmi kvalitní. Poisson je v tomhle případě mnohem lepší volbou, protože je mnohem méně závislý na kvalitě, kterou už z principu, že se jedná o fotografie pořízené mobilním zařízením, musíme brát s rezervou. Navíc poisson otevírá i další nastavení.
2. **Poisson Depth** – Nastavení, které se otvírá zvolením rekonstrukční metody „poisson“ v předcházejícím kroku. Rozsah nastavení činí od 1 do 20 a defaultní nastavení je na 13. Čím větší hodnota tím větší rozlišení výsledného modelu bude tzn. více trojúhelníků v síti. Ovšem s větším rozlišením značně stoupá i časová náročnost rekonstrukce. Záleží tedy jak detailní výsledek požadujeme. Osobní doporučení hodnotu ponechat nebo snížit a pohybovat se v rozmezí od 10 do 15. Při maximálním rozlišení doba výpočtu vzrůstá až o 250 % a vzhledem k tomu, že síť je kvůli další zpracovatelnosti nutné ke konci redukovat tak nedává smysl tohle nastavení přehánět.
3. **Windows Radius** – Defaultní nastavení 5. Rozsah nastavení 1 až 20. Parametr ovlivňuje rádius, ve kterém netexturovaný prostor je schopen být spojen do sítě. Znamená, že čím větší číslo tím větší oblast je schopna být vykonstruována z mála informací. Zvýšení znamená že ostré hrany budou více zahmlené a rapidně vzroste výpočetní čas. Doporučený rozsah 3 až 7. Větší hodnoty už velmi zkreslují výsledek a čas projektu násobně roste.
4. **Max Source Images** – Maximální počet sousedících kamer. V případě, že nemáme velký počet fotografií ze stejného úhlu tak tohle nastavení nemá signifikantní význam. Ovšem pokud máme k dispozici velký počet fotografií tak zvýšení téhle hodnoty povede ke zvýšení přesnosti, ale také ke zvýšení náročnosti na naši grafickou kartu.

5.2.5.4 MeshFiltering

Tenhle proces využívá Laplaciánskou filtraci k odstranění defektů ze surové sítě. Jedná se o poslední proces, který nějakým způsobem upravuje výslednou rekonstrukci. Není prakticky vůbec časově náročný a z pravidla trvá několik vteřin. [19]



Obrázek 49 Atributy MeshFiltering

Zásadní nastavitelné parametry:

1. **Smoothing Iterations** – Určuje počet iterací, kterýma je model prohnán. V zásadě není nutné měnit ani nastavovat, protože tahle filtrace je možno dělat manuálně v editovacích programech a nastavení nemá žádný vliv na výpočetní časy.
2. **Filter Large Triangles Factor** – Odstraní všechny „velké“ trojúhelníky. Velkým trojúhelníkem se rozumí takový, který má jednu ze stran tolikrát větší jakožto nastavená hodnota, než je průměr v celém modelu.

5.2.5.5 TexturingCL

Pouze přiřadí na síť texturu. Zde nic nenastavujeme a pro experiment není důležité.

5.2.6 Hodnoty experimentu

StructureFromMotionCL

1. Max Image Size – 3200
2. Bundle Adjustment Quality – Highest

MultiViewStereoCL

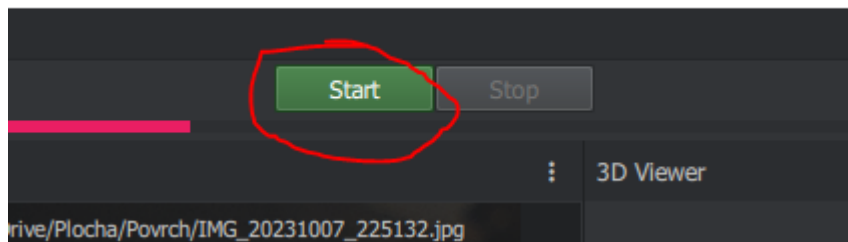
1. Meshing Method – Poisson
2. Poisson Depth – 15
3. Windows Radius – 5
4. Max Source Images – 10

MeshFiltering

1. Smoothing Iterations – 5
2. Filter Large Triangles Factor – 30

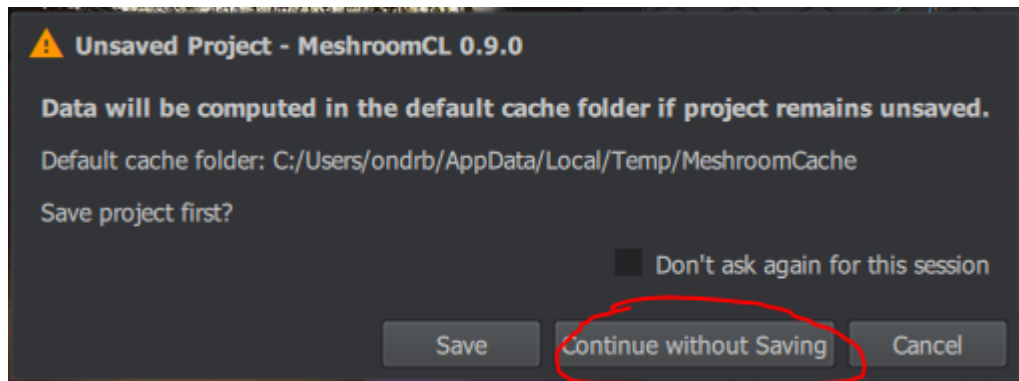
5.2.7 Spuštění

Po nastavení jednotlivých parametrů je dalším krokem samotné spuštění rekonstrukce. Pro spuštění pouze stačí kliknout na zelené tlačítko „Start“ v horní části obrazovky (obr.50).



Obrázek 50 Start

Po zmáčknutí vyskočí okénko, které se zeptá zda chceme změnit složku pro ukládání. Důležité zde je vybrat možnost „continue without saving“ (obr. 51), protože změna uložení v momentální verzi programu dělá problémy. Výsledky se tedy uloží do defaultně nastavené složky, viz další body.

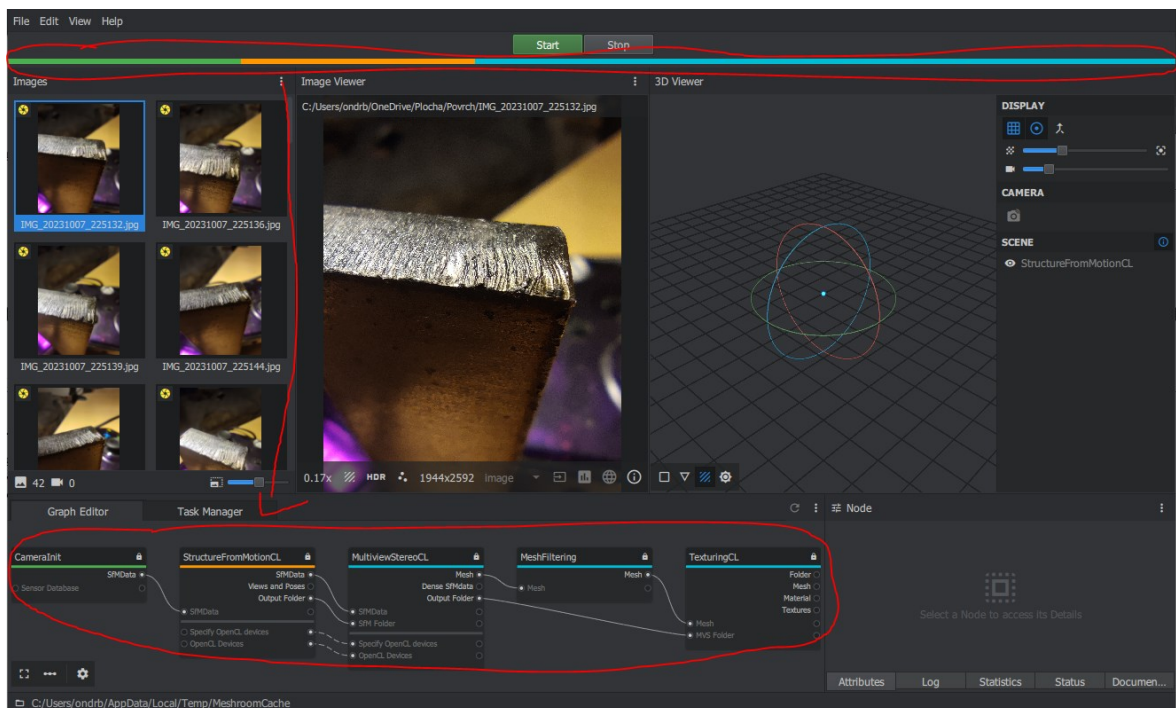


Obrázek 51 Volba uložení

Po zvolení možnosti uložení program začne zpracovávat dané fotografie v pořadí procesů, jak byly popsány.

5.2.7.1 Barevné značení

Každé okénko se po spuštění vybarví příslušnou barvou podle toho, v jaké fázi procesu se zrovna nachází. Oranžová značí právě probíhá. Zelená, že je proces hotový a modrá že je proces v pořadí. Tohle značení jde vidět i v horní části obrazovky pod tlačítkem start (obr. 52).

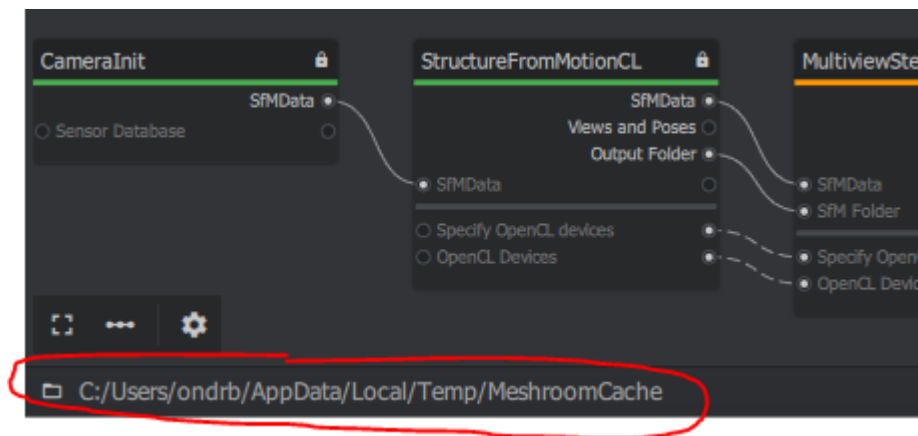


Obrázek 52 Proces rekonstrukce

Dále už jen počkáme až se rekonstrukce vyhotoví.

5.2.8 Výsledky

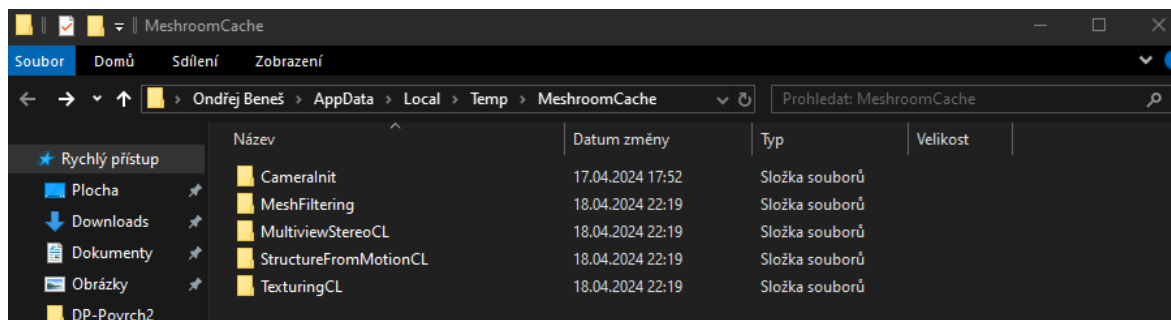
Jak již bylo zmíněno, výsledky se ukládají do defaultní složky, která je ukázána v levém dolním rohu (obr. 53).



Obrázek 53 Umístění složky s výsledky

Pro další manipulaci doporučím udělat si zástupce této složky. Stačí pouze složku v počítači najít a přes pravé tlačítko a možnost „vytvořit zástupce“ takto učinit.

Po otevření složky uvidíme několik dalších složek nesoucí názvy jednotlivých procesů, které jsem popisoval v předešlých bodech.



Obrázek 54 MeshroomCache

Zde nás budou zajímat pouze dvě složky a to „MultiViewStereoCL“ a „MeshFiltering“.

MultiViewStereoCL – hrubé nefiltrované modely. (Obr. 56)

MeshFiltering – modely prohnané laplacovou filtrací (Obr. 55)



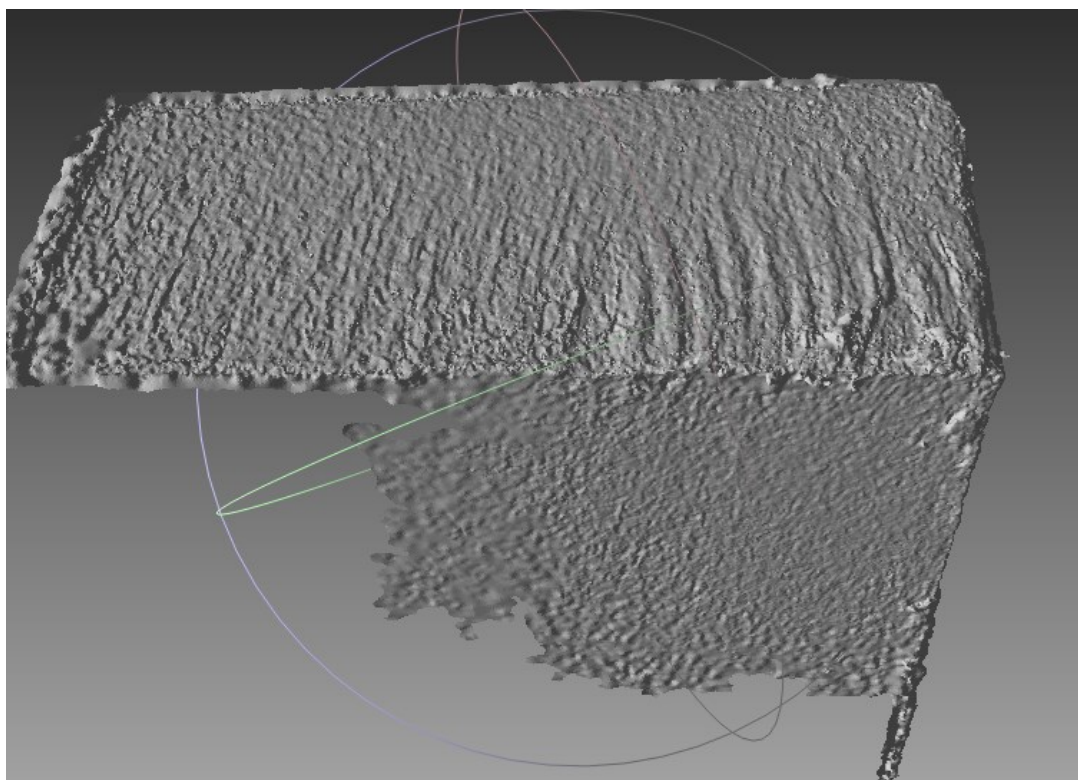
Obrázek 55 Filtrovaná textura povrchu



Obrázek 56 Nefiltrovaná textura povrchu

Výběr, který model zvolíme pro následnou úpravu záleží čistě na nás. Ovšem moje doporučení je volit hrubý nefiltrovaný model, který je poté možné filtrovat a vyhladit manuálně a s větší kontrolou nad výsledkem.

V obou složkách se nachází jednotlivé projekty. Modely jsou ukládány ve formátu „OBJ“ a pod názvem „mesh“. Na obrázku 57 vidíme ukázkou výsledného modelu.



Obrázek 57 Výsledný model

5.3 Úprava modelu

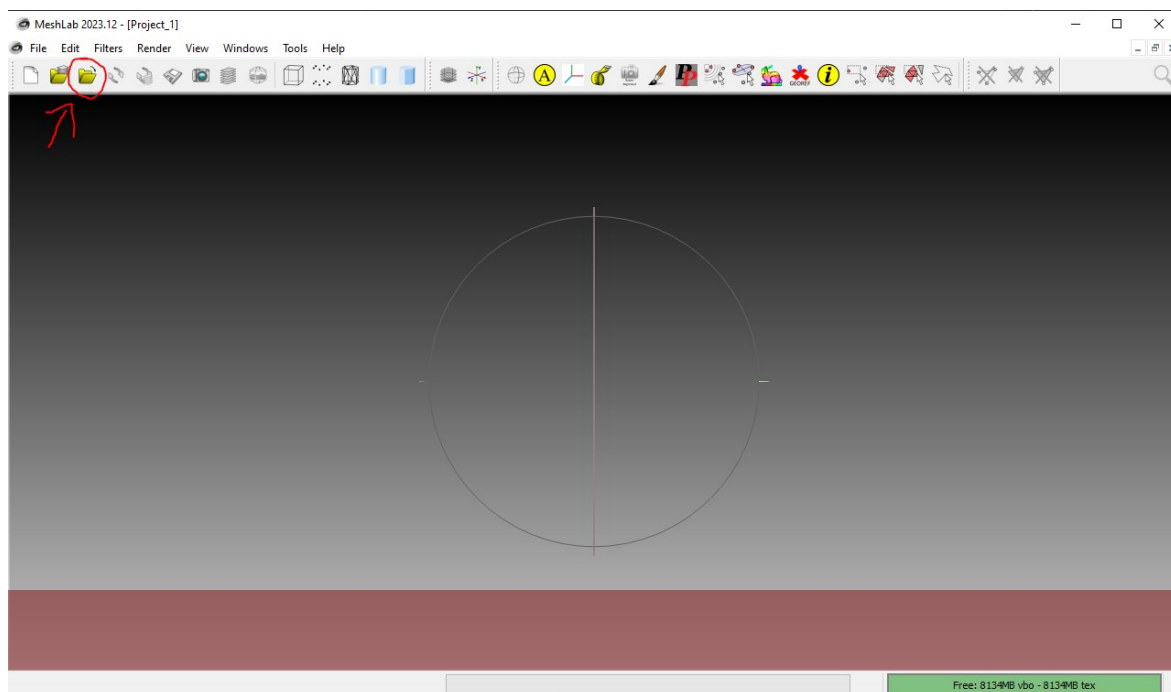
Abychom mohli vytvořit repliku je nutné model získaný fotogrammetrií následně upravit do tvaru a formátu se kterým bude dále možno pracovat. Pro úpravu meshe jsem zvolil program **Meshlab**. Meshlab je, stejně jako Meshroom, freeware, tedy volně dostupný ke stažení na internetu.

Odkaz pro stažení: <https://www.meshlab.net/>

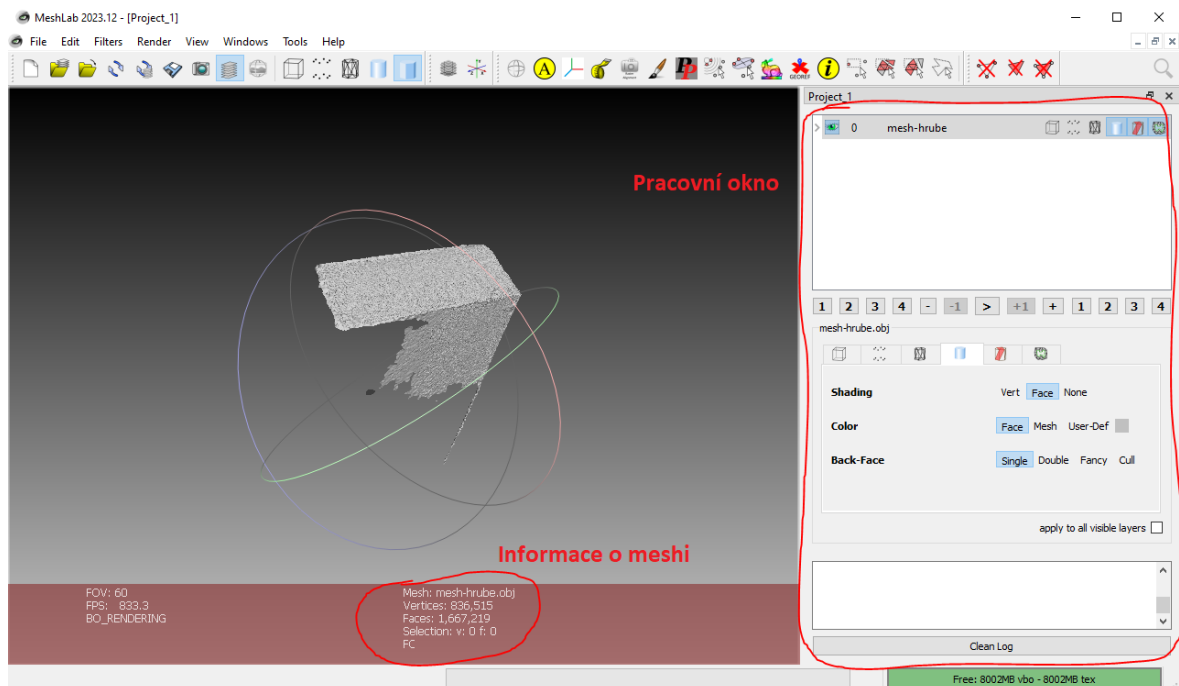
Po stažení „.exe“ souboru, stačí spustit a program klasicky nainstalovat.

5.3.1 První spuštění, import a základní ovládání

Po zapnutí programu se zobrazí pracovní prostředí a je nutné nahrát model se kterým chceme pracovat. Nahrání provedeme ikonkou „import mesh“ (obr. 58), která se nachází na třetí pozici z prava a vybereme náš vytvořený model v již zmíněném formátu „.obj“.



Obrázek 58 Pracovní prostředí



Obrázek 59 Nahraný model

Po nahrání se zobrazí náš model společně s informacemi v dolní části obrazovky a pracovním oknem v pravé části obrazovky. V pracovním okně se nachází hlavně možnosti zobrazování jakožto změna osvětlení, změna barvy meshe, stínování, vypínání a zapínání viditelnosti jednotlivých meshů v případě více modelů apod. pro projekt tohle není nutné jakkoli měnit.

Mnohem důležitější jsou informace pod modelem jakožto počet trojúhelníků neboli „faces“, který bude nutné pro další využitelnost upravit.

5.3.1.1 Základní ovládání

Manipulace

Levé tlačítko myši – Otáčení

Zmáčknutí kolečka – Posuv

Otáčení kolečkem – Přiblížení/oddálení

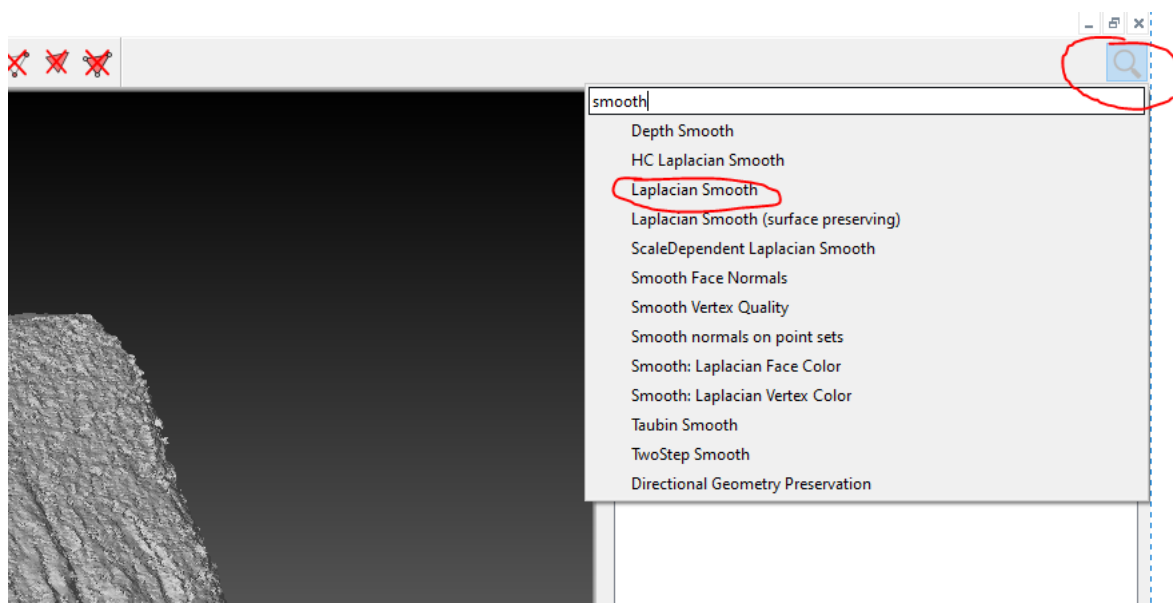
ESC – přepínání mezi zrovna zvolenou úlohou a módem pro manipulaci

Osvětlení

Shift + Ctrl + levé tlačítko myši – změna/nastavení úhlu, ze kterého na model „svítí“

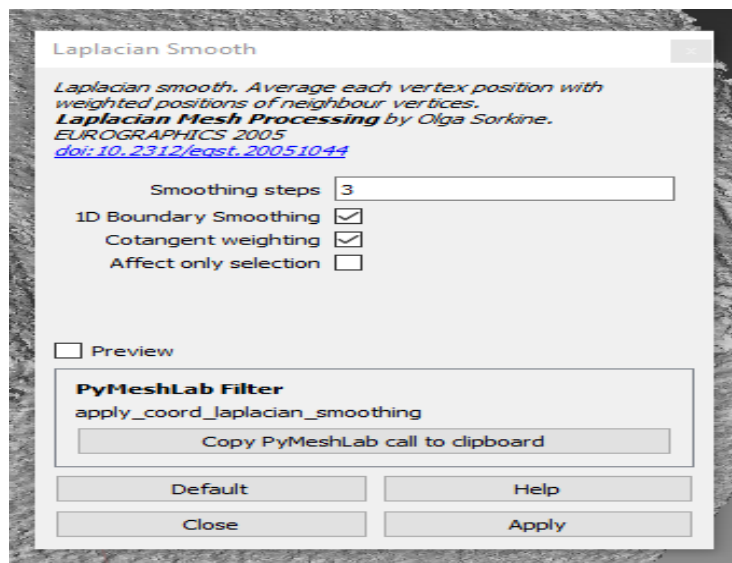
5.3.2 Vyhlazení

Jako první krok je nutné hrubý model vyhladit. Na vyhlazení použijeme funkci „Laplacian smooth“. Nejjednodušším způsobem je otevřít vyhledávač v pravém horním rohu (Obr. 60), napsat „Smooth“ a zvolit danou funkci.

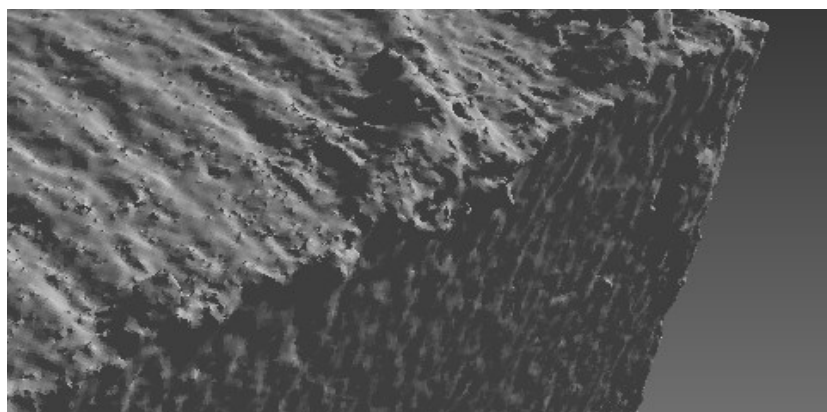


Obrázek 60 Vyhledávání

Po rozkliknutí se zobrazí okno s nastavením (obr. 61). Důležitý parametr je „Smoothing steps“. Jedná se o počet vyhlazovacích iterací a počet zde záleží model od modelu a subjektivním posouzení, protože výsledek se nedá kvalitativně ani kvantitativně obecně posoudit. Já volil počet iterací 3, které dle mého usouzení nejlépe reprezentovalo reálný povrch. Zbylé prvky jsem ponechal beze změny.



Obrázek 61 Nastavení vyhlazení



Obrázek 62 Povrch před a po

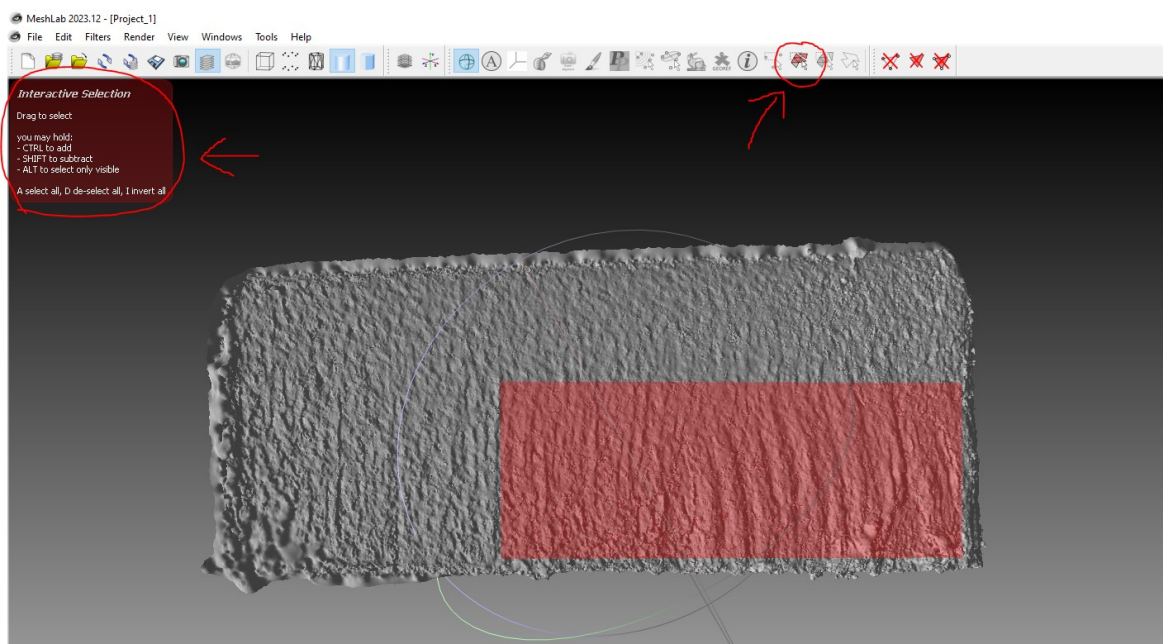
Jde vidět, jak se velice hrubý fragmentovaný povrch změní na vyhlazený s mnohem menší fragmentací. Výsledek není 100 %, ale více iterací by už zasahovalo do tvaru modelu.

5.3.3 Oříznutí

Dále je potřeba povrch oříznout a odstranit zbytečné a nepotřebné aspekty.

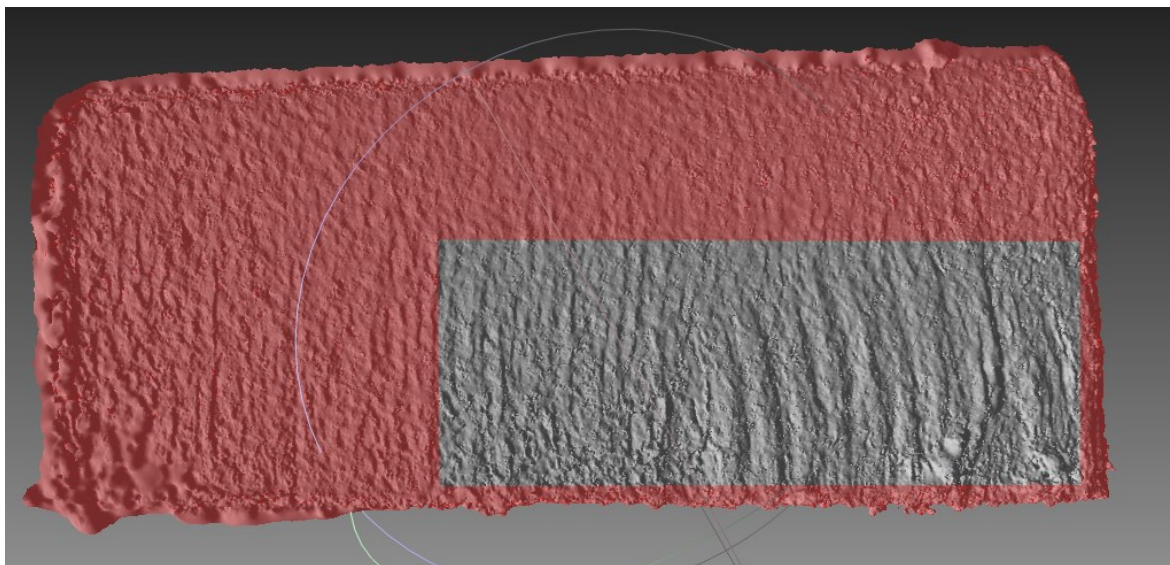
K tomu využijeme funkci „select faces in a rectangular region“, která se nachází na 5. pozici z prava (Obr. 63) a vybereme část povrchu, kterou chceme ponechat, v našem případě se jedná o focenou stranu povrchu.

Každá funkce po vybrání má v levé horní části další nápovědu klávesových zkratk (Obr. 63).



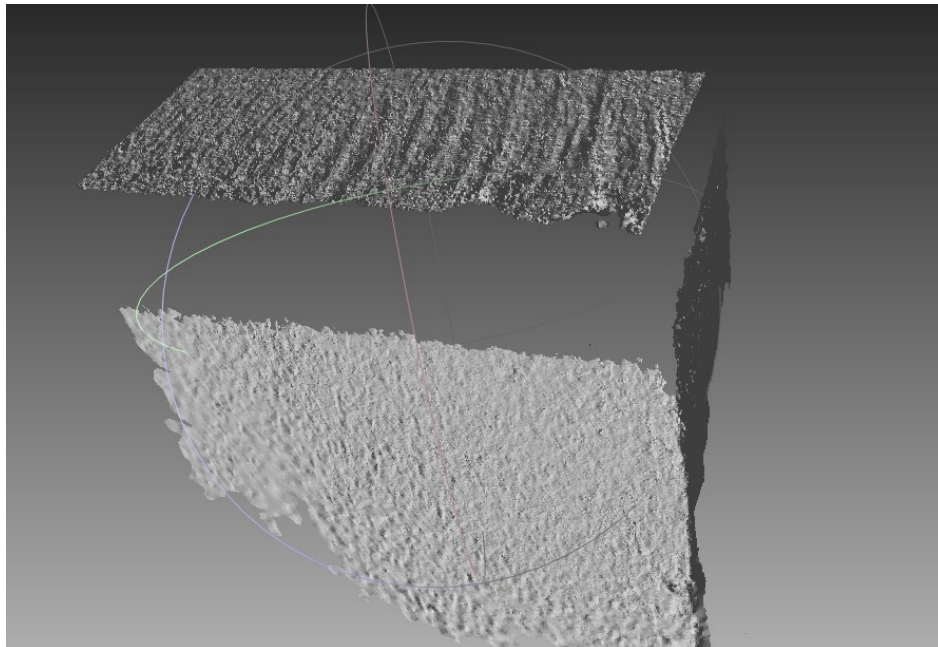
Obrázek 63 „Select faces in a rectangular region“

Po vybrání oblasti zmáčkeme klávesu „i“ pro invertování výběru a funkce nám vybere vše krom označené části (obr. 64).



Obrázek 64 Invertace výběru

Jako poslední krok už jen zmáčkne klávesu „**delete**“ pro odstranění vyznačených částí. Tím dosáhneme toho, že oddělíme část, se kterou chceme pracovat a zbylé „odpadní části“ (obr. 65).



Obrázek 65 Oříznutý model

5.3.4 Opravné kroky

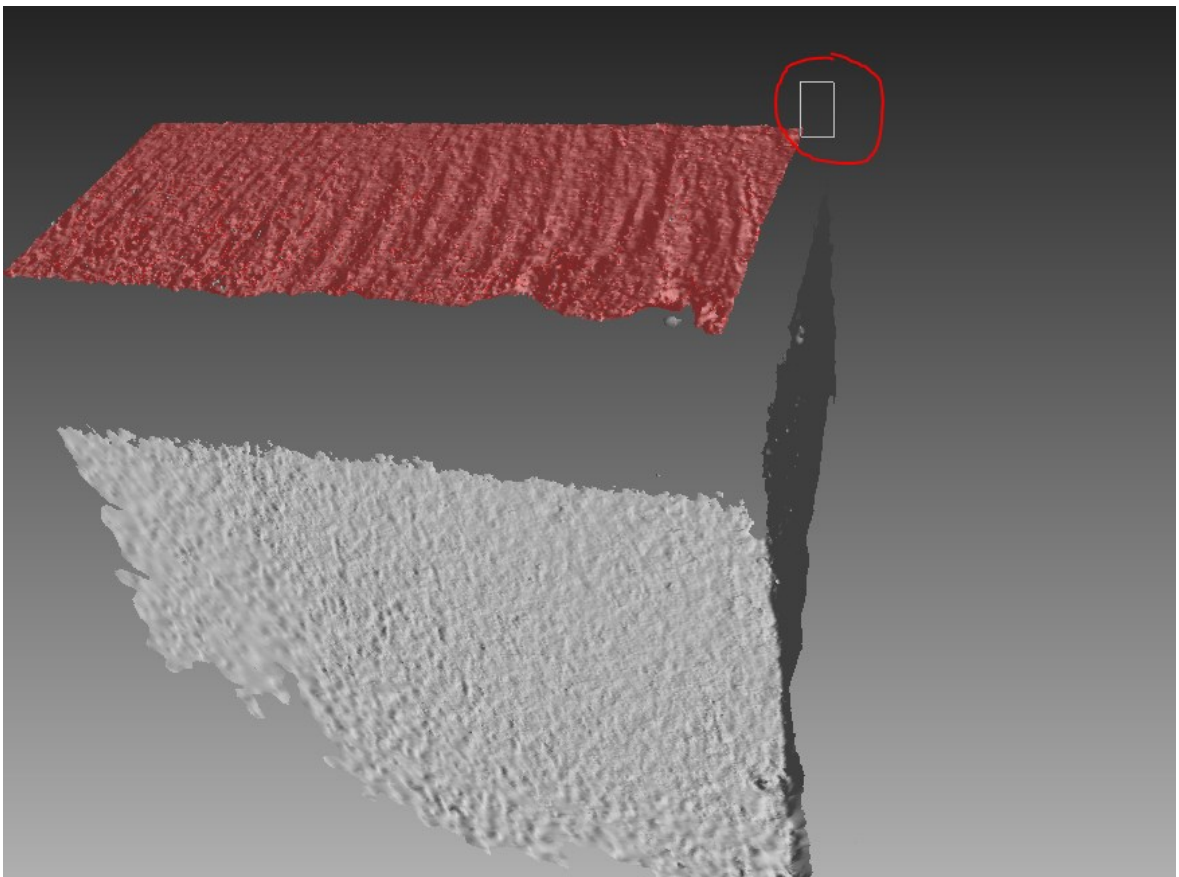
Dále je nutné podobným způsobem odstranit zbylé nepotřebné části modelu.

K tomu lze využít druhou výběrovou funkci „Select connected component in region“, která se nachází hned vedle předem použité funkce pro výběr (obr. 66). Tahle funkce vybere vše na sebe napojené.

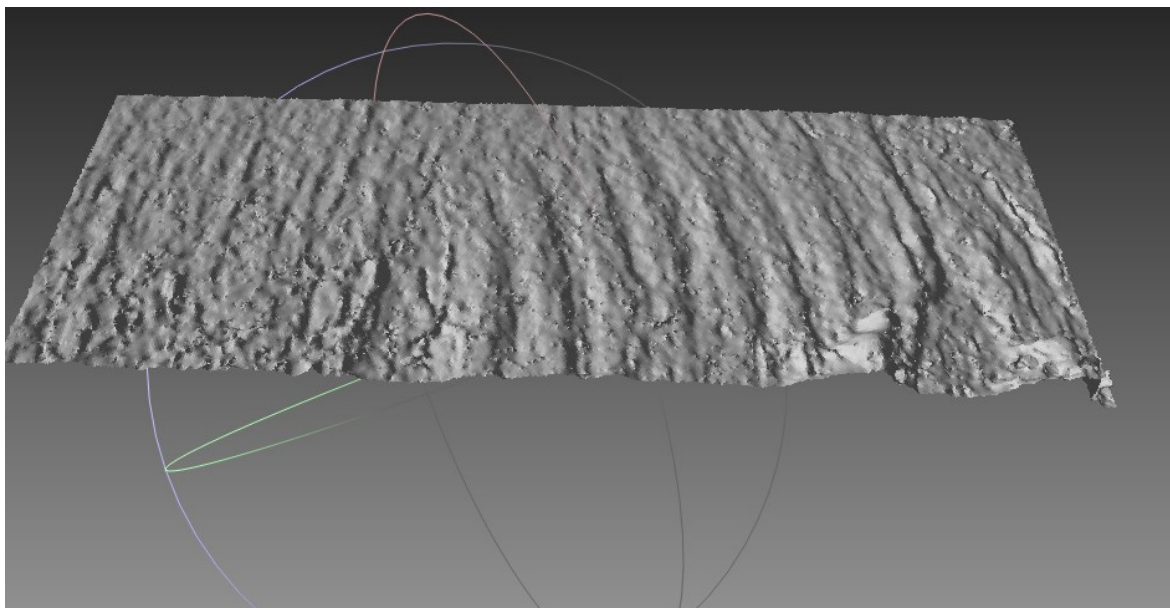


Obrázek 66 Select connected component in region

Vybereme pouze roh tak abychom věděli, že vybíráme pouze hlavní část (obr. 67), tím eliminujeme jakoukoli existenci zbylých fragmentů a zůstane nám pouze jeden plně napojený model. Postup je pak stále stejný, invertujeme pomocí „i“ a odstraníme.



Obrázek 67 Výběr hlavní části



Obrázek 68 Výsledný povrch

Takhle jsme získali model, který je připravený pro další práci (obr. 68).

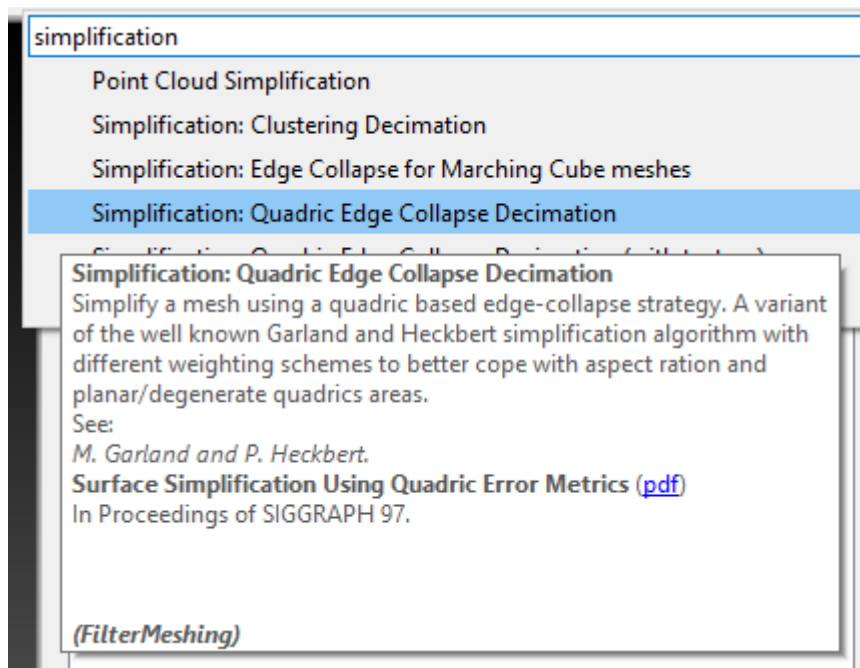
5.3.5 Redukce sítě

Síť v tomhle momentu má statisíce trojúhelníků (obr. 69), které v následujících procesech jsou extrémně náročné na výpočet a zpracování. Proto je důležité síť redukovat.

```
Mesh: mesh-hrube.obj  
Vertices: 836,515  
Faces: 271,245  
Selection: v: 0 f: 0  
FC
```

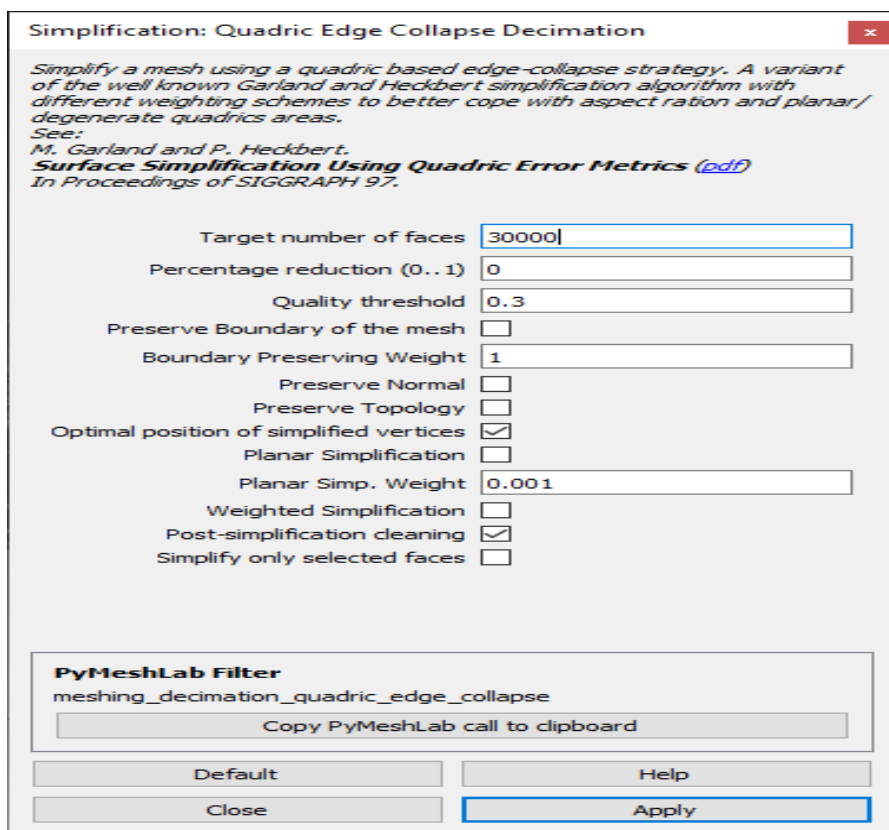
Obrázek 69 Počet trojúhelníků

K tomu využijeme funkci „**Simplification: Quadratic Edge Collapse Decimation**“. Do vyhledávání stačí napsat „Simplification“ a funkci zvolit (obr. 70).



Obrázek 70 Vyhledání quadratic edge collapse decimation

Po zvolení funkce se otevře okno nastavení (obr. 71).



Obrázek 71 Okno nastavení

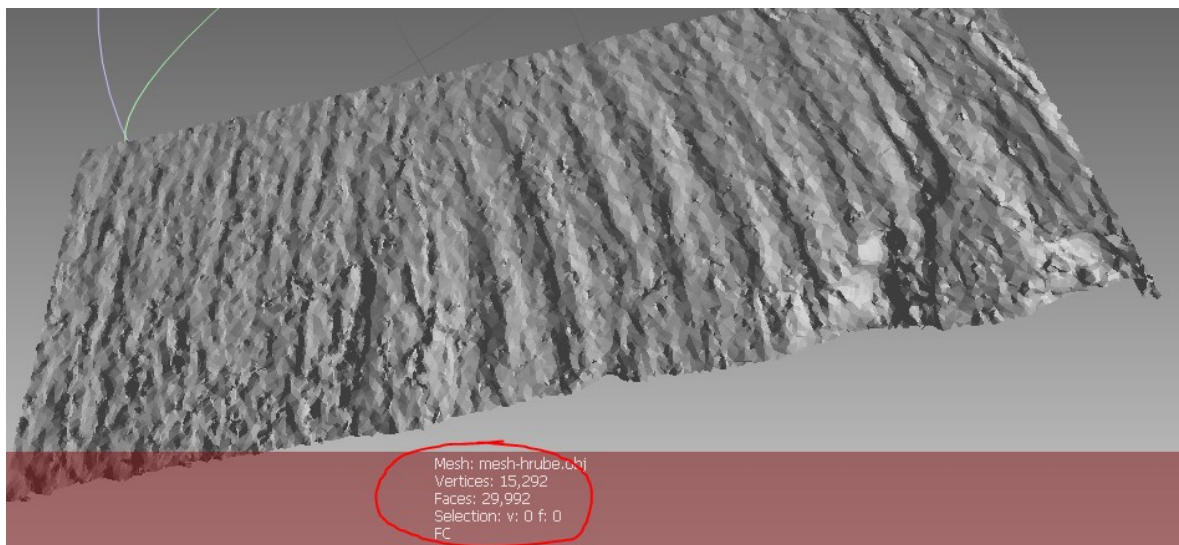
Zde si můžeme vybrat, zda chceme redukovat kvantitativně nebo procentuálně:

1. Target number of faces – kvantitativně, zvolíme počet, na který se algoritmus bude snažit redukovat
2. Percentage reduction – procentuálně, volíme číslo, kterým bude stávající počet trojúhelníků vynásoben

Volbu, kterou z možností použijeme uskutečníme tím, že opačnou možnost nastavíme na hodnotu „0“.

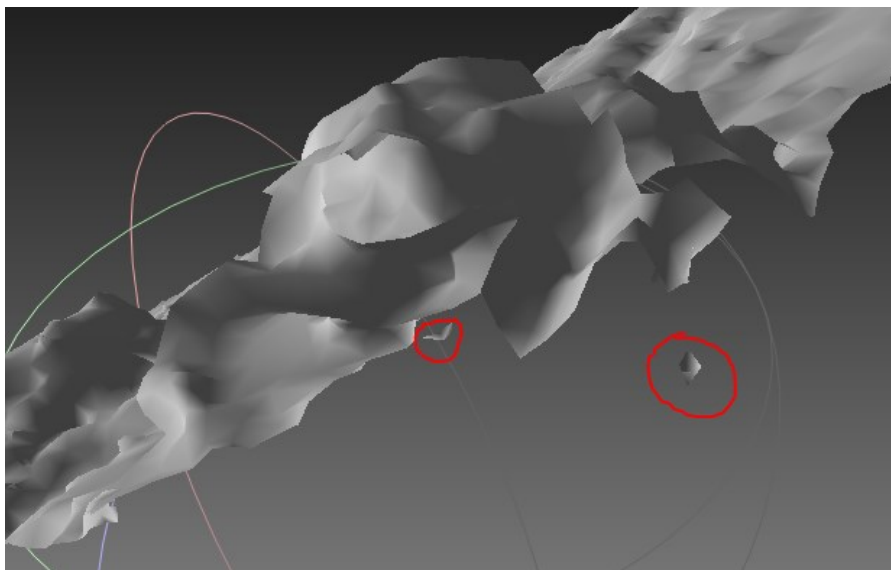
Osobně používám 1. možnost z důvodu jednoduchosti nastavení složitosti sítě. Požadovaný počet trojúhelníků volíme podle výpočetní síly našeho PC. Já tedy volil 30000, které mám odzkoušené, že můj počítač zvládne dále zpracovávat a zároveň stále kvalitně reprezentuje původní model.

Zbylé atributy není nutno řešit. Jakmile máme zvoleno stačí kliknout na „apply“ a síť se zredukuje (obr. 72).



Obrázek 72 Redukovaný model

Po redukci může nastat, že se v modelu objeví malé „poletující“ fragmenty (obr. 73) důsledkem spojování jednotlivých trojúhelníků. Pro jistotu opět opakujeme postup z bodu 5.3.4 a případné fragmenty takhle odstraníme.



Obrázek 73 Fragmenty po redukci

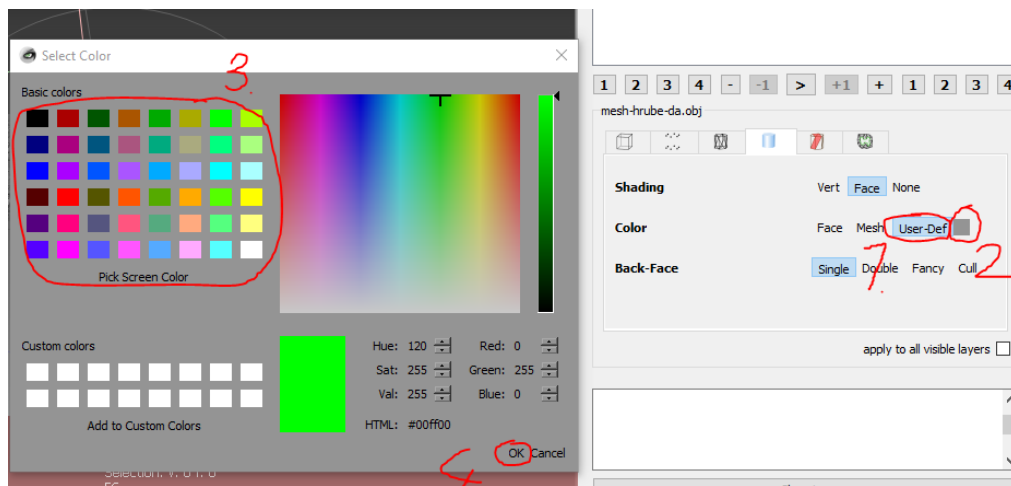
5.3.6 Manuální opravy

Bohužel, rekonstrukce samotná není dokonalá a v modelu se nachází jisté chyby, které nemusí být hned na první pohled viditelné, ale další zpracování je díky nim pak nemožné. Chyby jako „non manifold edges“, další fragmenty nebo se v modelu nachází díry. Proto je nutné model manuálně zkontrolovat. [21]

5.3.6.1 Přehlednost

Pro přehlednost doporučím změnu barvy modelu, aby vynikl kontrast mezi pozadím prostředí a naším modelem a tyhle chyby byly lépe viditelné.

Změnu barvy provedeme kliknutím na „Usef-def“ možnost v pravé části obrazovky a následným vybráním požadované barvy a potvrzením tlačítkem „ok“ (obr. 74).

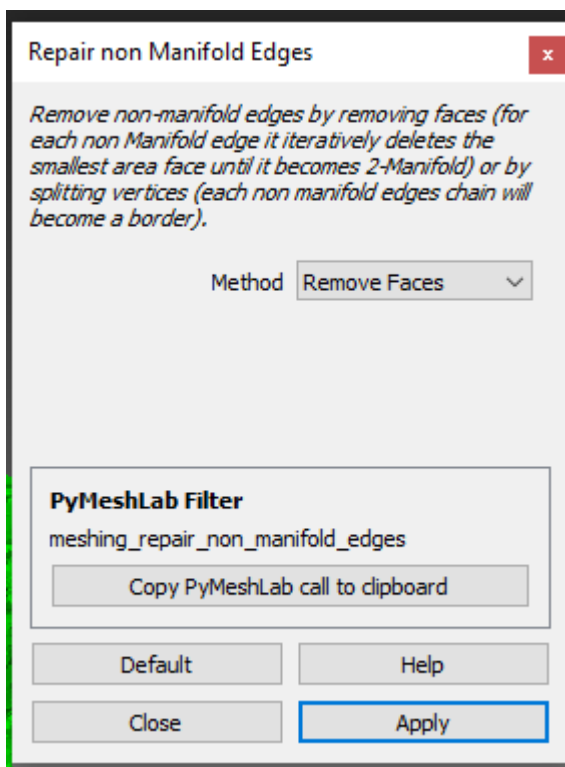


Obrázek 74 Změna barvy

5.3.6.2 Non manifold edges

Jak již bylo zmíněno v modelu se nachází tzv. „non manifold edges“. Non manifold edge je jev, kdy je jedna hrana trojúhelníku sdílena se dvěma nebo více různými trojúhelníky. Tohle je prakticky nemožné zpozorovat, ale naštěstí na odstranění těchto hran existuje velmi spolehlivá funkce s názvem „Repair non manifold edges“ (obr. 75).

Opět nejjednodušší způsob je do vyhledávání napsat „repair“ a funkci zvolit. Nastavení ponecháme a pouze klikneme na „apply“.

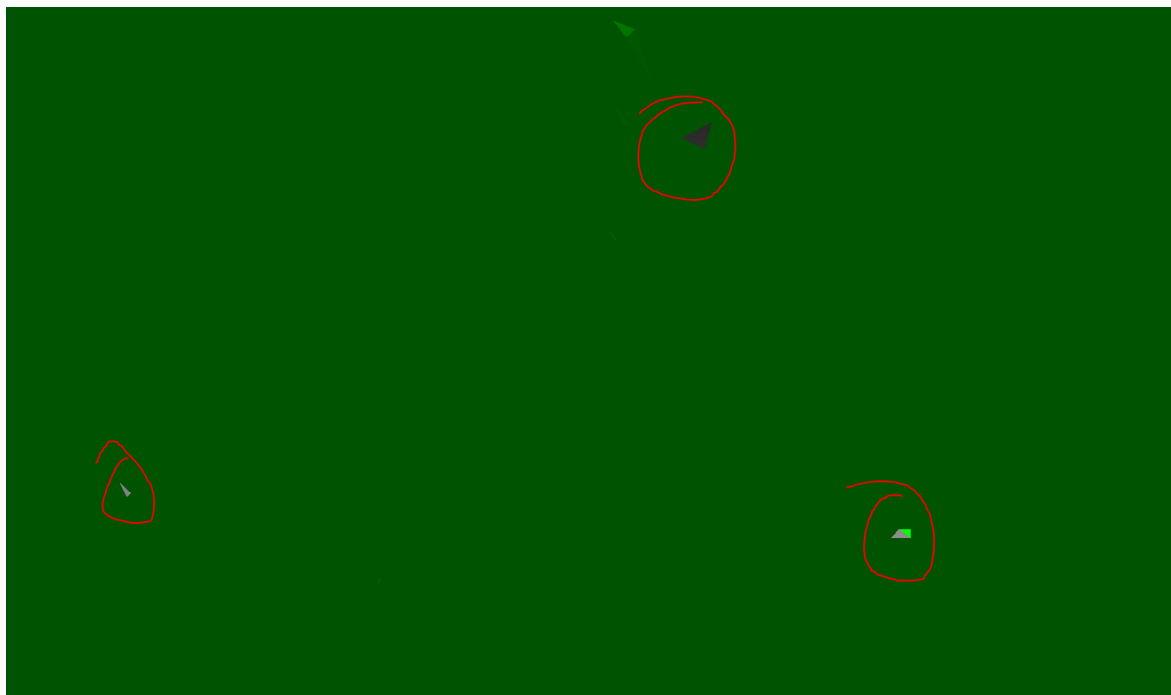


Obrázek 75 Repair no manifold edges

Po kliknutí na apply se nám v pravém dolním rohu vypíše, kolik hran bylo opraveno a délka procesu. Jedná se pouze o informace a není nutno se tímhle zabývat.

5.3.6.3 Opravy děr

Po předešlém kroku, kdy jsme odstranili sdílené hrany se v modelu s největší pravděpodobností objeví i díry, protože funkce „repair non manifold edges“ odstraňuje trojúhelníky, kterých se tento jev týkal (obr. 76).



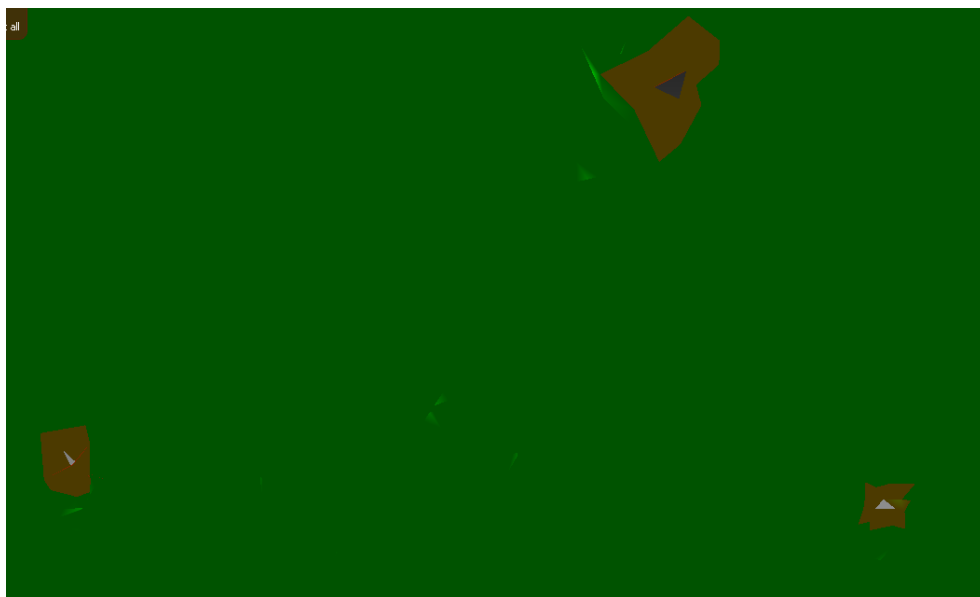
Obrázek 76 Díry v modelu

Pro to využijeme funkci „close holes“. Bohužel funkce na opravu děr už tak spolehlivá není a je nutné proto tyhle díry kontrolovat vlastnoručně.

Díry mohou být velmi malé a viditelné pouze z určitých úhlů, proto je důležité důkladně model zkontrolovat. K tomu nám pomáhá změna barvy z předešlého kroku.

Důležitá je důslednost, protože pokud v modelu zůstane jakákoli díra tak jeho zpracování dále bude nemožné. Naštěstí model je možné ukládat a pokud se zpracování v dalších krocích nezdaří, můžeme se k tomuto kroku vrátit a zbylé díry najít a opravit.

Protože jak bylo zmíněno funkce „close holes“ není spolehlivá je potřeba nalezené díry nepatrně zvětšit, aby je funkce poté zaznamenala a opravila. Stačí tedy pouze vybrat pár trojúhelníků okolo díry a ty odstranit.

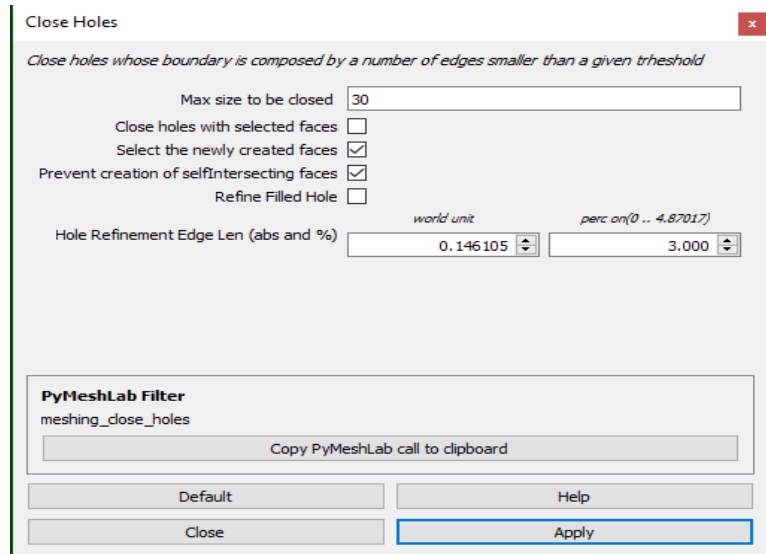


Obrázek 77 Označené trojúhelníky

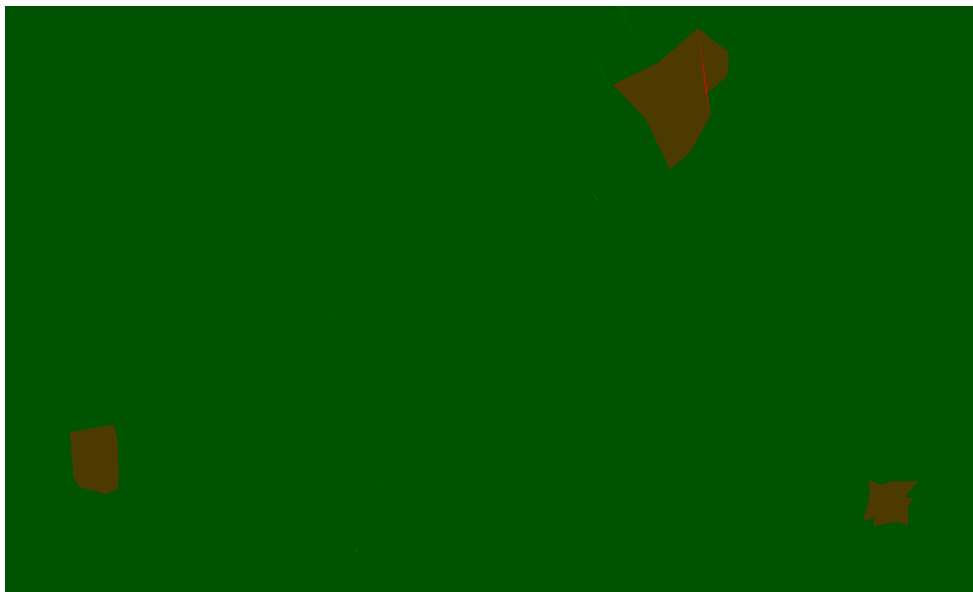


Obrázek 78 Odstraněné trojúhelníky

Jakmile máme všechny díry zvětšené tak najdeme funkci „close holes“ (obr. 79) a pouze stiskneme „apply“. Tím se všechny díry uzavřou (obr. 80).

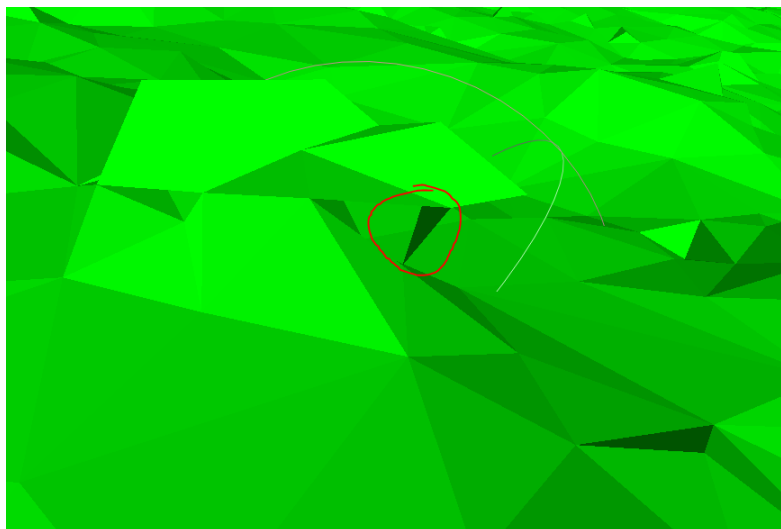


Obrázek 79 Close holes



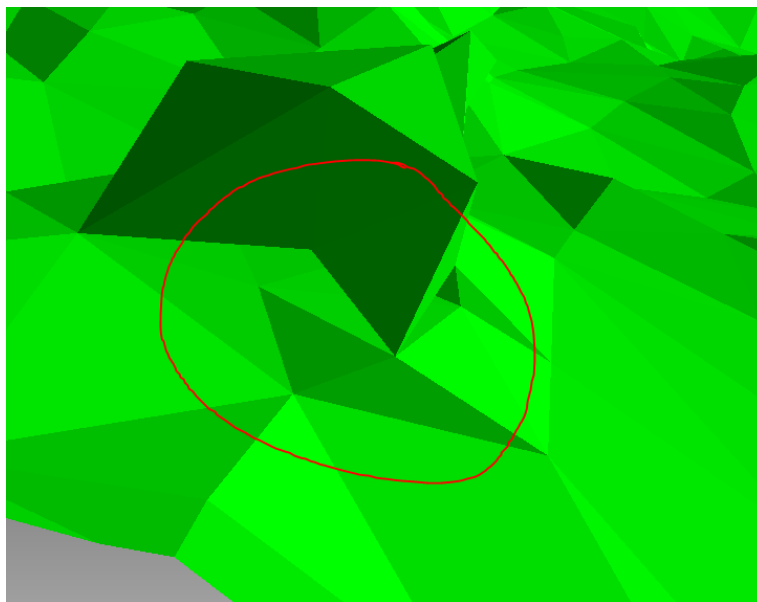
Obrázek 80 Opravené díry

5.3.6.4 Další chyby



Obrázek 81 Volný trojúhelník

Je nutné model důkladně kontrolovat. Na obrázku 81 lze vidět velmi lehce přehlédnutelná vada kdy jeden trojúhelník je uvolněný a netvoří žádný objem, to je bohužel taky nepřijatelné.

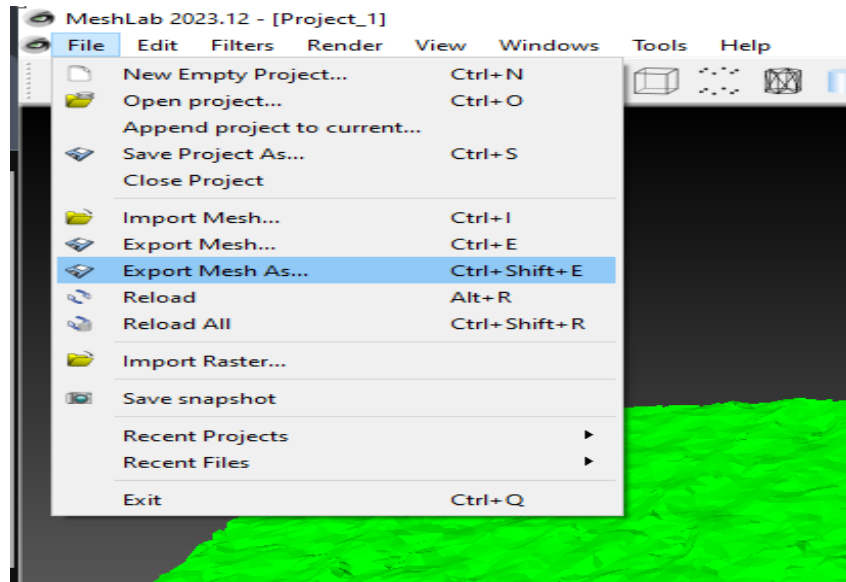


Obrázek 82 Oblouk

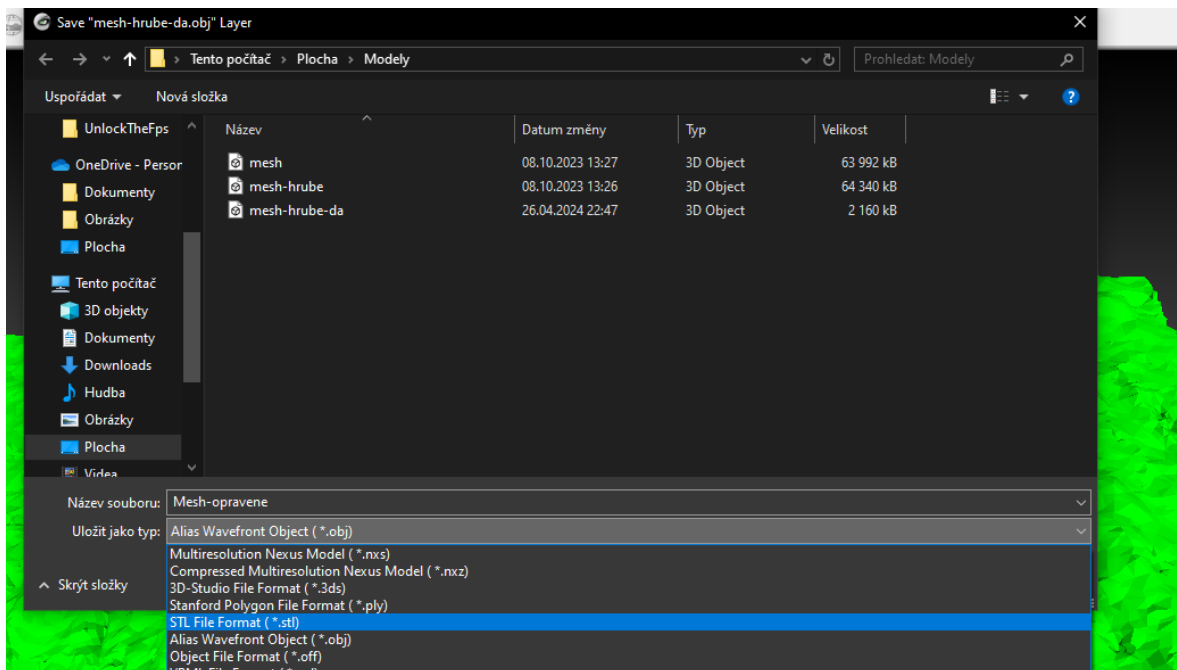
Další možnou vadou je pokud nějaká část s jinou tvoří „oblouk“ jak je znázorněno na obrázku 82. Bohužel tohle je taky velmi lehce přehlédnutelné a taky nepřijatelné.

5.3.7 Export

Jakmile máme model opravený tak ho můžeme převést do formátu STL. Převod funguje jednoduše, vybereme „file“ a zde vybereme „export mesh as“ (obr. 81). poté zvolíme název a vybereme formát „. stl“ (obr. 82).



Obrázek 83 Export mesh as



Obrázek 84 Export

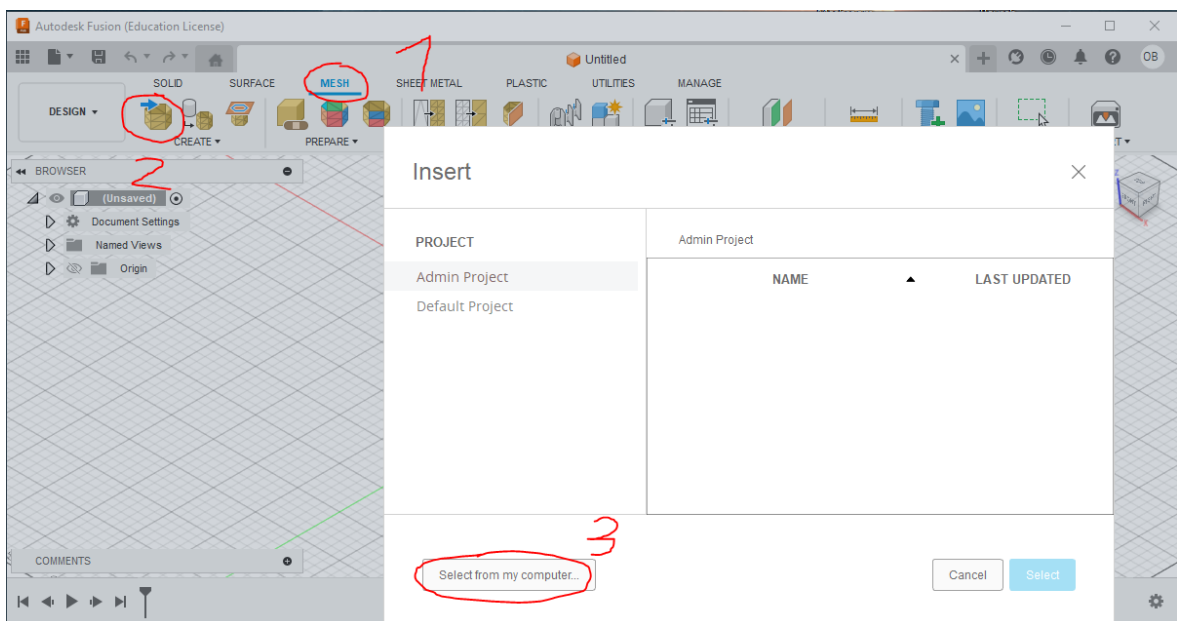
Nyní máme model ve správném formátu a můžeme se přesunout na další program.

5.4 Tvorba objemu

Aby bylo možné povrch replikovat pomocí 3D tisku je nutné dát modelu objem. Pro tvorbu objemu jsem volil program **Autodesk Fusion 360**. Zde se nejvíce projeví schopnosti a možnosti našeho hardwaru. Síť musí být dostatečně redukována na úroveň kdy náš počítač je schopen ji zpracovat. Pokud je síť moc složitá tak program vypoví fungování. Ovšem to není problém, stačí pouze zopakovat bod „5.3.5“ neboli redukcí sítě a zvolit nižší hodnoty.

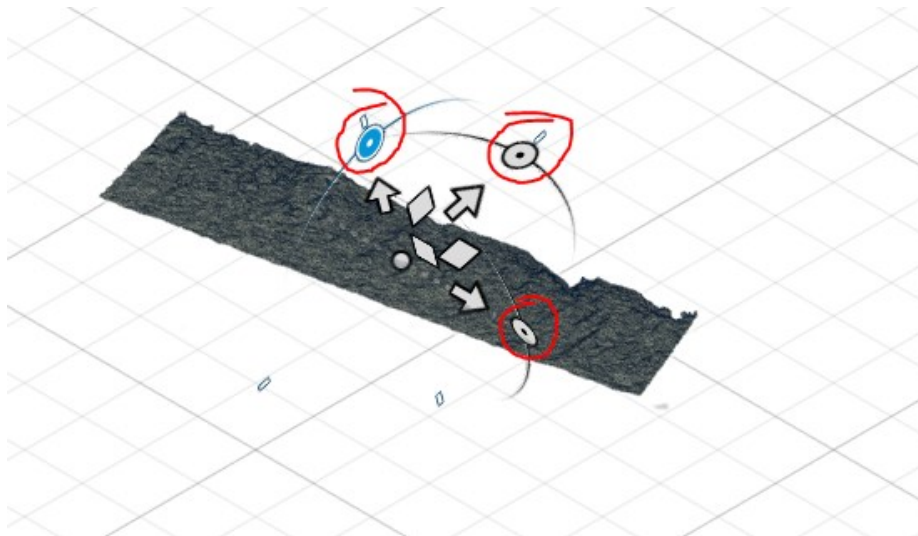
5.4.1 Import

Import modelu provedeme pře kliknutím na záložku „mesh“, zde „import mesh“ a poté „select from my computer“ a poté najít a vybrat námi připravený model (obr. 85).

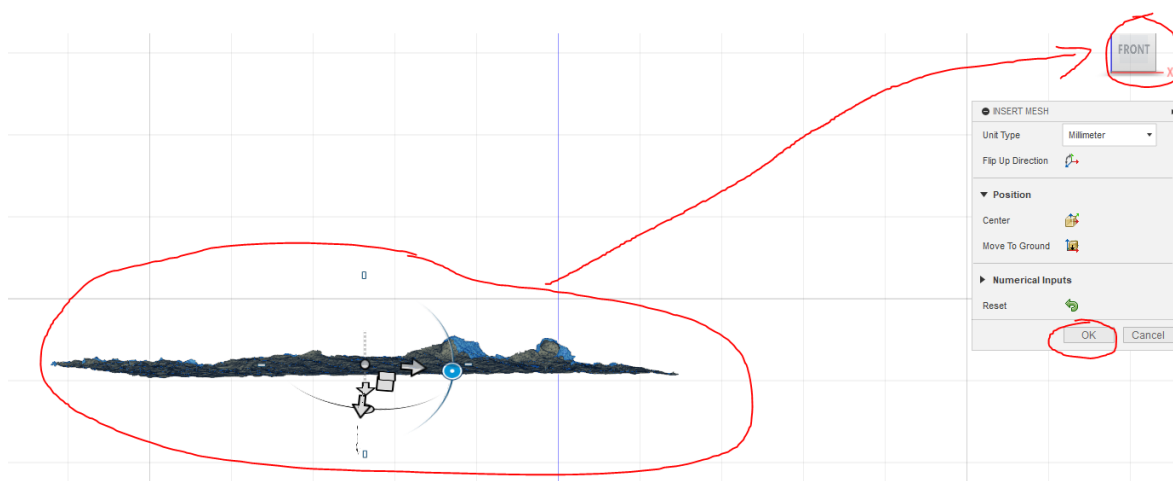


Obrázek 85 Vložení modelu

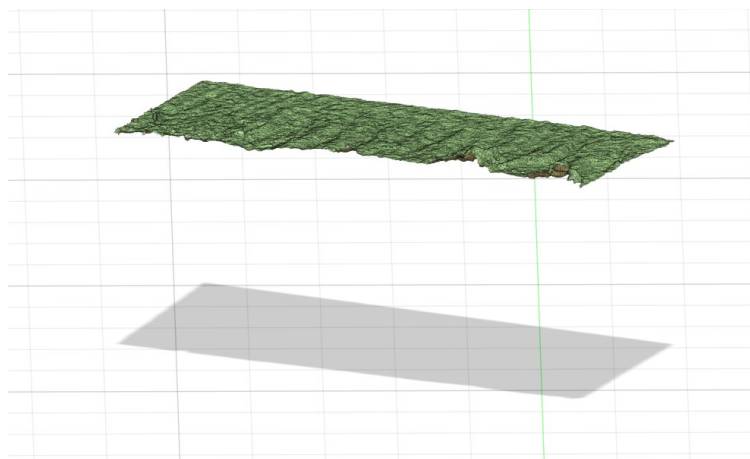
Po načtení sítě se zobrazí model se kterým, před tvrdým vložením, můžeme manipulovat. Pomocí rotačních prvků (obr. 86) model nastavíme tak aby byl co nejvíce vodorovný s podlahou prostředí (obr. 87) a klikneme na tlačítko „ok“.



Obrázek 86 Rotační manipulace



Obrázek 87 Nastavený model

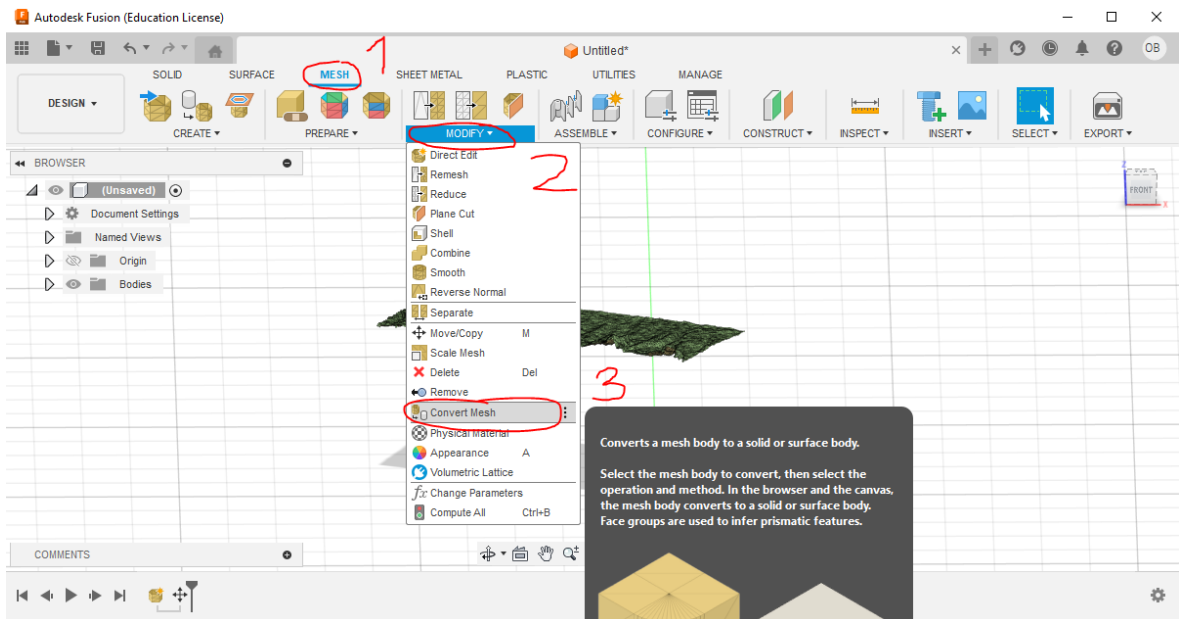


Obrázek 88 Vložený model

5.4.2 Převod na solidní objekt

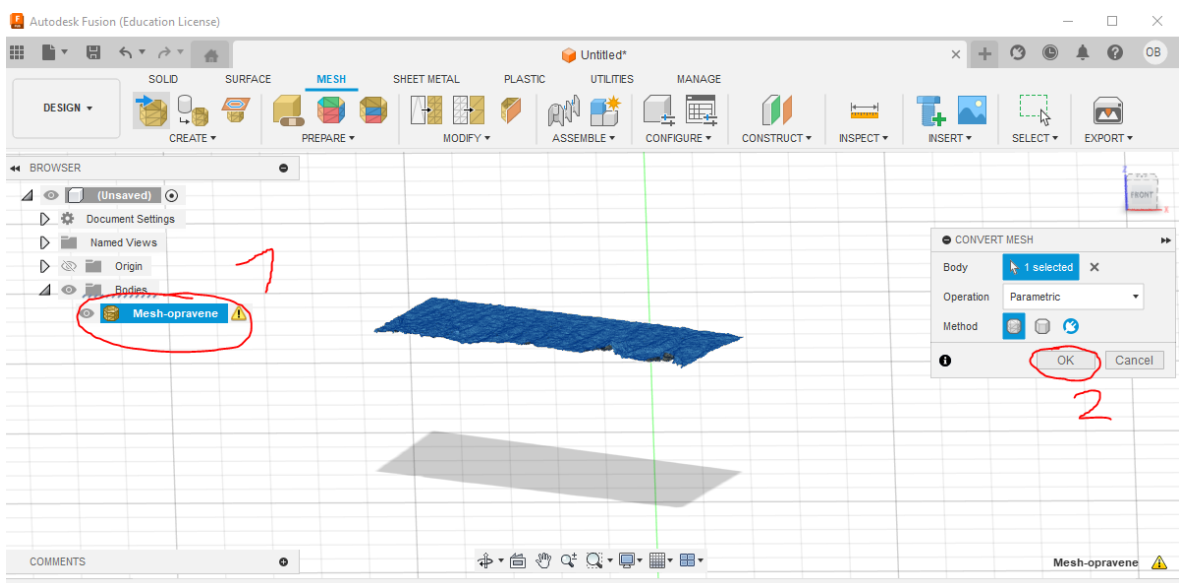
Abychom mohli modelu přiřadit objem je nutné ho nejdříve převést na solidní objekt, protože s meshem jako takovým program pracovat neumí a není upravitelný.

To provedeme na záložce „mesh“, rozkliknutím „modify“ a zvolením funkce „convert mesh“ (obr. 89).



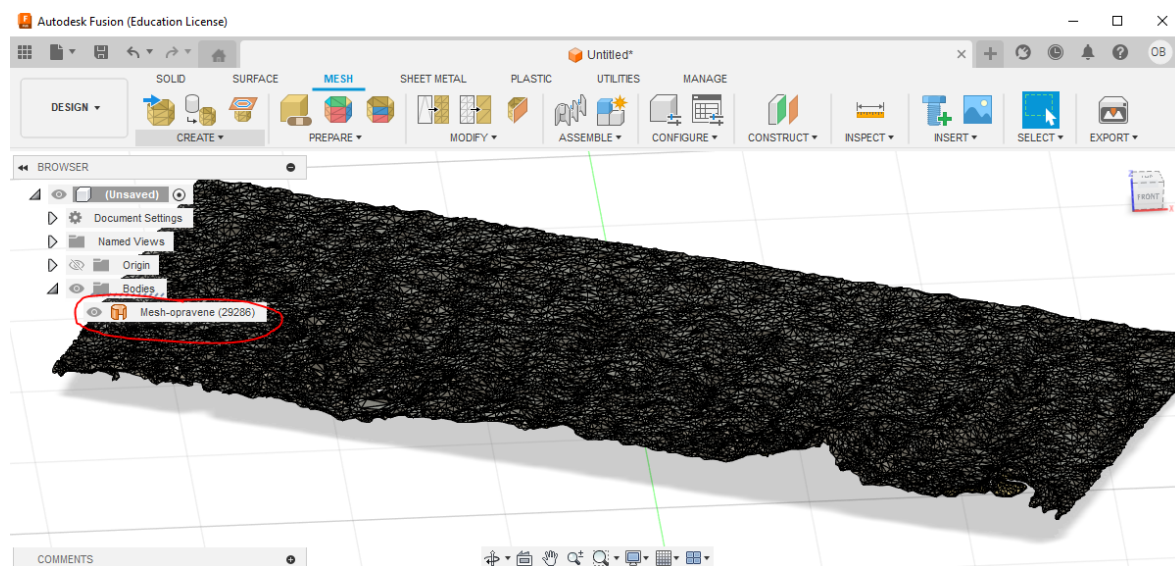
Obrázek 89 Convert mesh

Po zvolení funkce stačí ve stromu kliknout na náš model a potvrdit tlačítkem „ok“ (obr. 90).



Obrázek 90 Vyhotovení převodu

Vyhotovený solid model se pak nachází ve stromě místo našeho meshe společně s údajem o počtu ploch (trojúhelníků) (obr. 91).



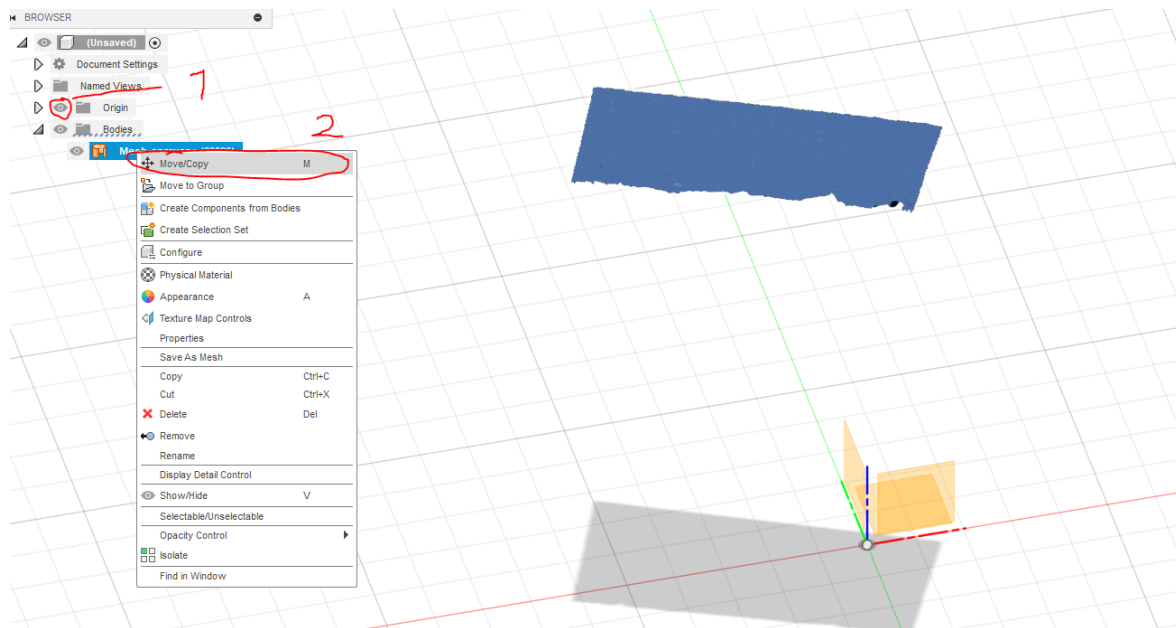
Obrázek 91 Vyhotovený solid model

5.4.3 Tvorba objemu

Dalším krokem je přidání objemu.

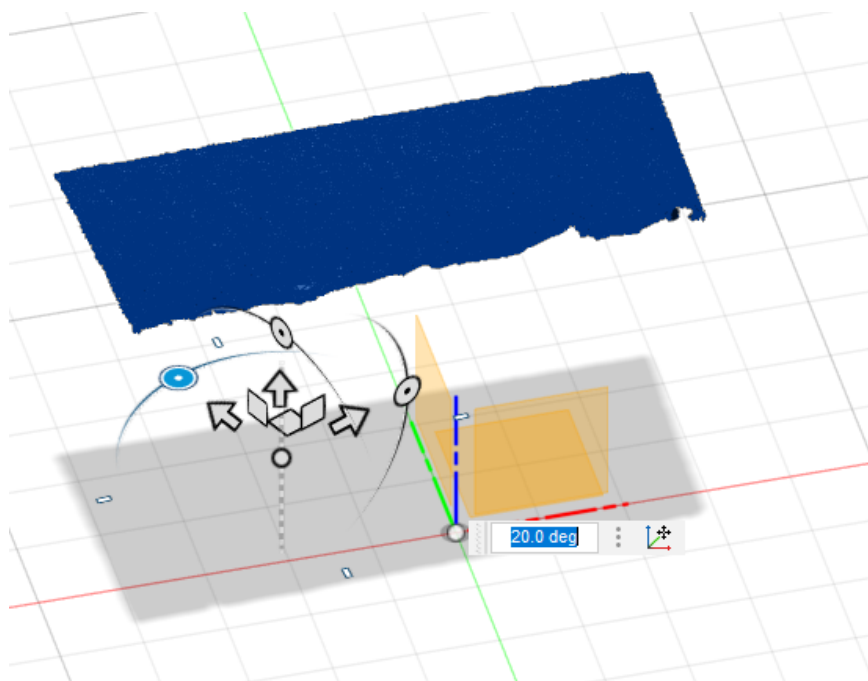
5.4.3.1 Nastavení pozice

Tenhle krok není nutný, ale pro přehlednost a jednoduchost doporučuji si model v prostoru nastavit tak aby se s ním co nejlépe pracovalo. Jako první si zobrazíme počátek kliknutím na značku oka vedle nápisu „origin“ ve stromu (obr. 92). Manipulaci pak uskutečníme kliknutím pravým tlačítkem na náš model ve stromu a zvolením „move/copy“ (obr. 92).



Obrázek 92 Manipulace s modelem

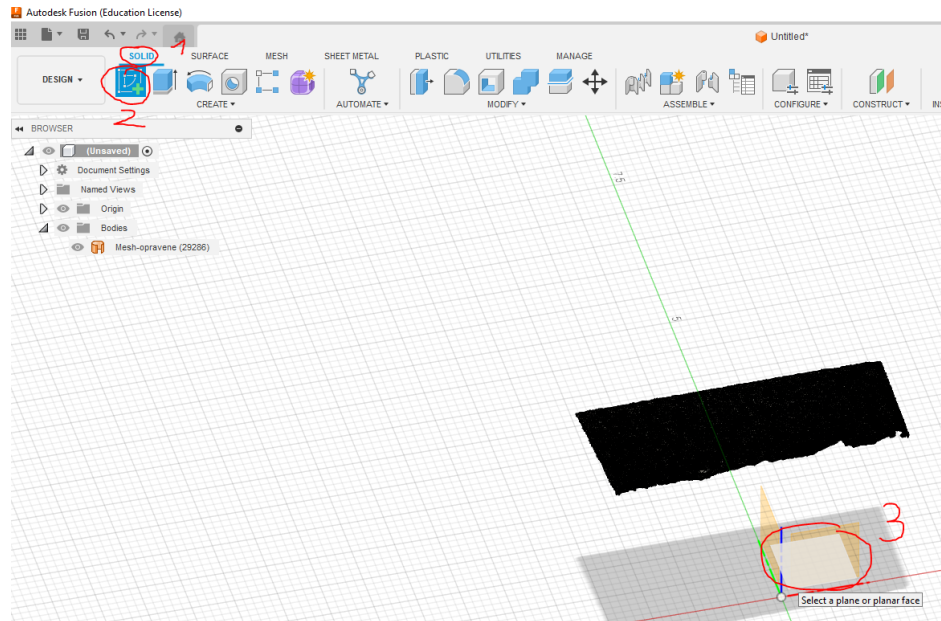
Poté pomocí manipulačních nástrojů nastavíme model tak aby se nacházel lehce nad počátkem a jeho hrany byly co nejvíce vodorovné s osovým křížem (obr. 93), poté pouze potvrdíme tlačítkem „ok“.



Obrázek 93 Ideální pozice

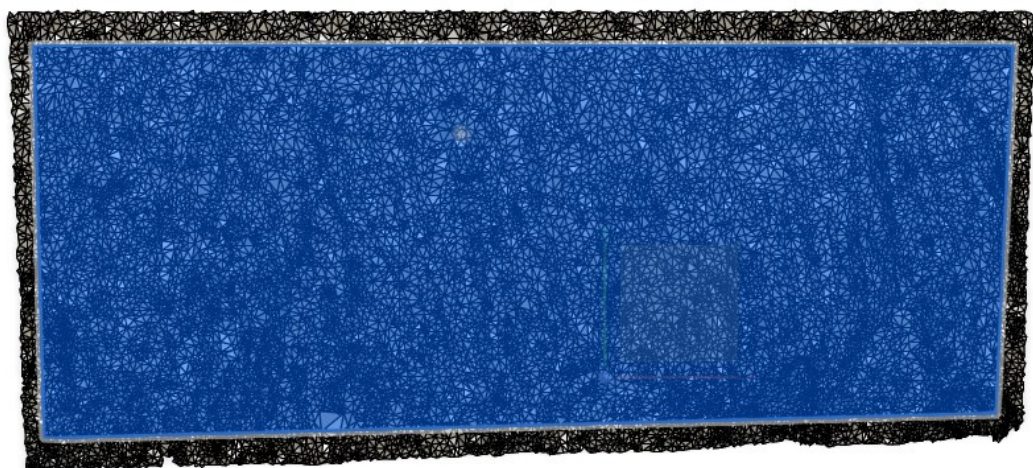
5.4.3.2 Tvorba skicy a objemu

Když máme model ustanovený tak dalším krokem je tvorba skicy. V záložce „solid“ zvolíme funkci „create sketch“ a zvolíme XY plochu (obr. 94).



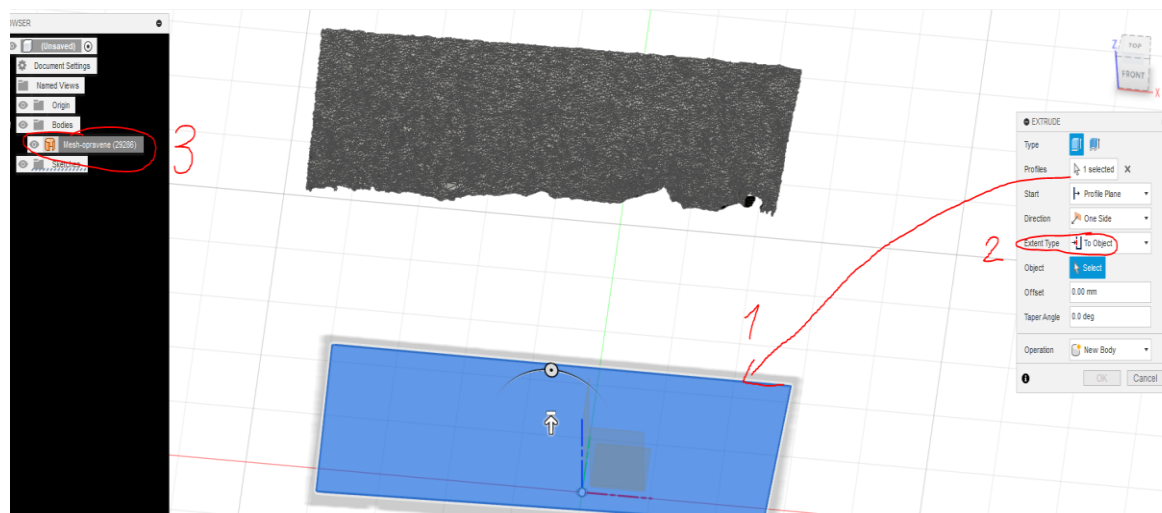
Obrázek 94 Tvorba skicy

Jakmile jsme v prostředí tvorby skicy tak pouze nakreslíme uzavřený tvar tak aby žádná jeho část nepřesahovala hranici modelu (obr. 95).



Obrázek 95 Skica

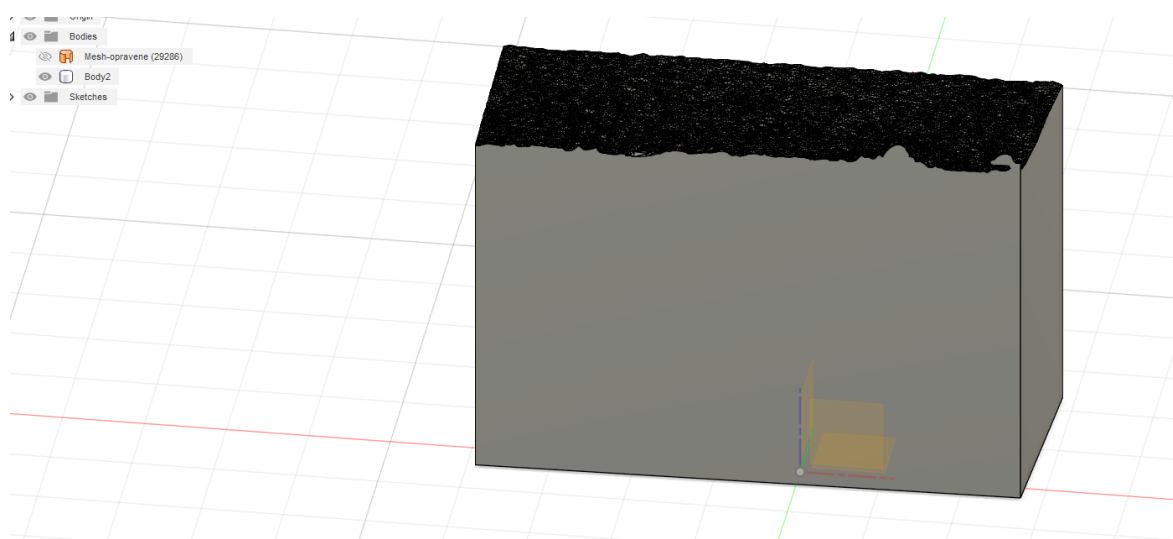
Jakmile máme tvar nakreslený tak potvrdíme skicu a přepneme se do funkce „extrude“. Zde vybereme skicu a přepneme extend type na „to object“ a ve stromu vybereme náš model (obr. 96).



Obrázek 96 Tvorba objemu

Po vybrání modelu se začne zpracovávat návrh, zde se počítač zasekne a vypočítává daný úkon, je nutné program nezavírat a počkat až se vytažení vyhotoví. Zde pokud je v modelu chyba tak nastává error a program nám vyhodí chybové hlášení, že vytažení nemůže být dokončeno, protože objekt vypadává z ohraničení a je tedy nutné se vrátit do meshlabu a model opravit.

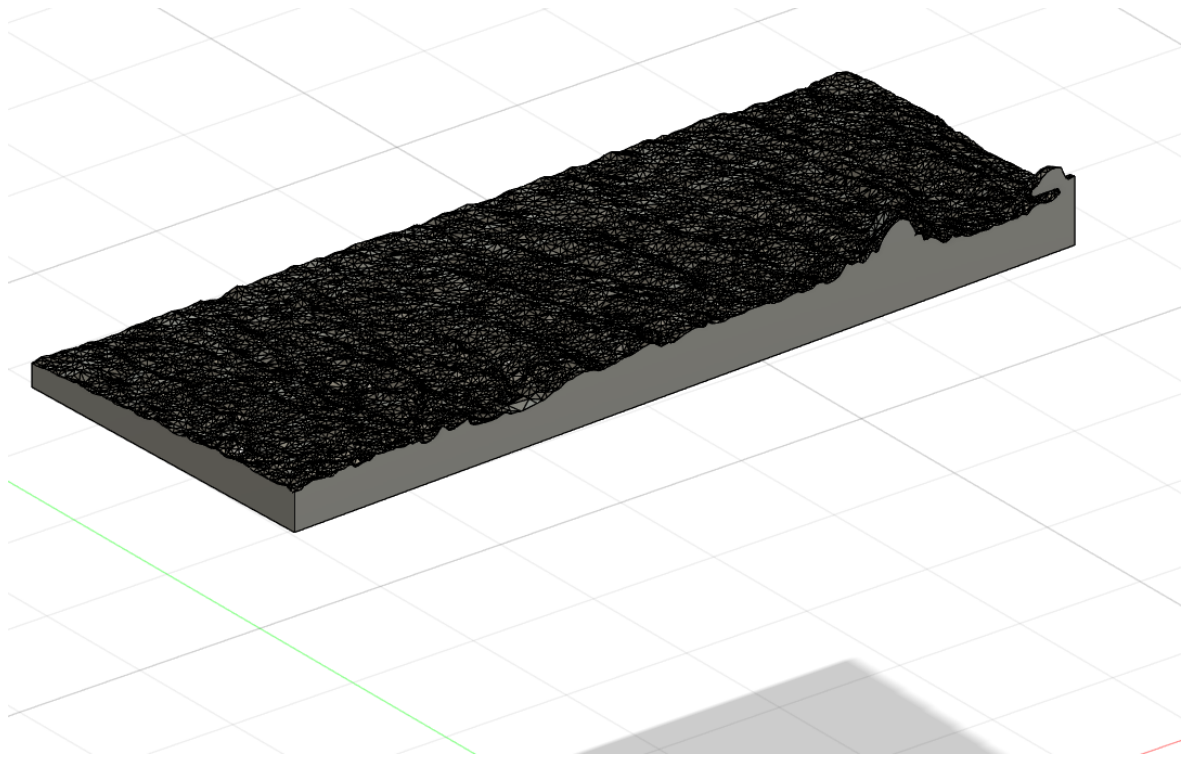
Po vytvoření náhledu stačí kliknout na „ok“ počkat a vytvoří se nám nové požadované tělo modelu (obr. 97).



Obrázek 97 Vyhotovený model

5.4.3.3 Dodatečné úpravy

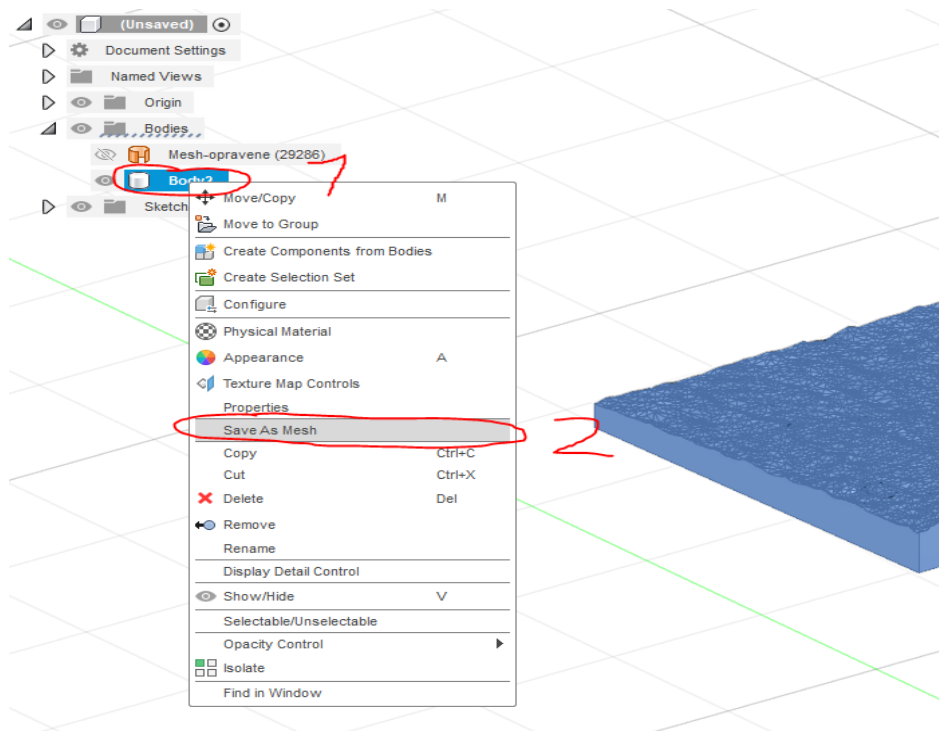
Tohle není nutné, ale pokud chceme teď s modelem můžeme pracovat jako s objektem a třeba co doporučuji tak zmenšit samotné tělo, to už velmi jednoduše pomocí funkce „extrude“ a následným odebráním materiálu.



Obrázek 98 Model po oříznutí

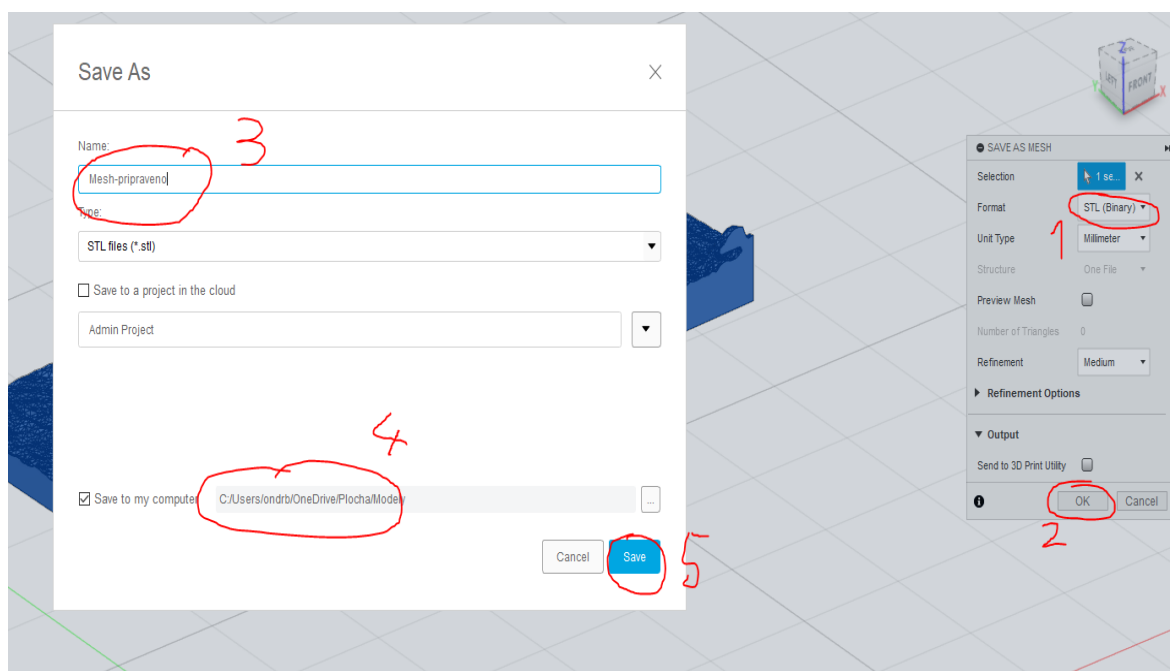
5.4.4 Převod zpět na STL

Pro následný tisk je poté nutné model převést zpět do STL formátu. Převod je velmi jednoduchý, stačí ve stromě pravým tlačítkem myši kliknout na vytvořený model a zvolit možnost „save as mesh“ (obr. 99).



Obrázek 99 Save as mesh

Po rozkliknutí se objeví tabulka, ve které stačí vybrat formát STL (Binary) a následným kliknutí na „OK“ se zobrazí úložné okno kde pouze zvolíme název, místo, kam chceme mesh uložit a klikneme na „SAVE“. Model se uloží a je připravený na poslední krok (Obr. 100).



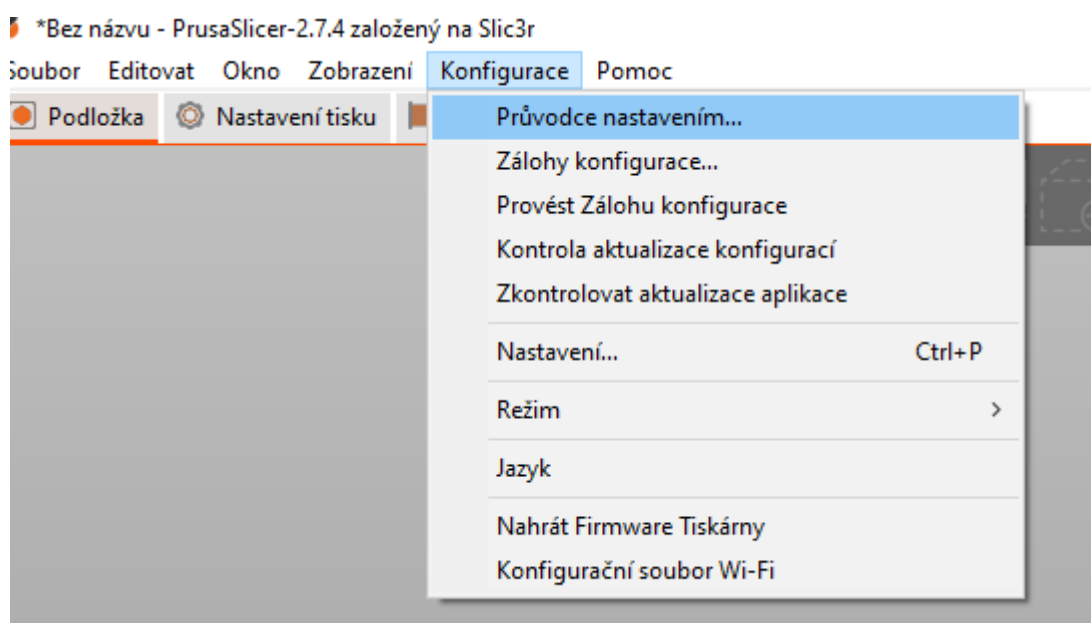
Obrázek 100 Úložné okno

5.5 Příprava na tisk

Poslední krok, před samotnou tvorbou repliky a importování do 3D tiskárny, je zpracovaný model nastavit pro tisk ve slicovacím programu. Pro slicování jsem zvolil program **PrusaSlicer**, který je zdarma dostupný z internetu a je velmi jednoduchý na práci.

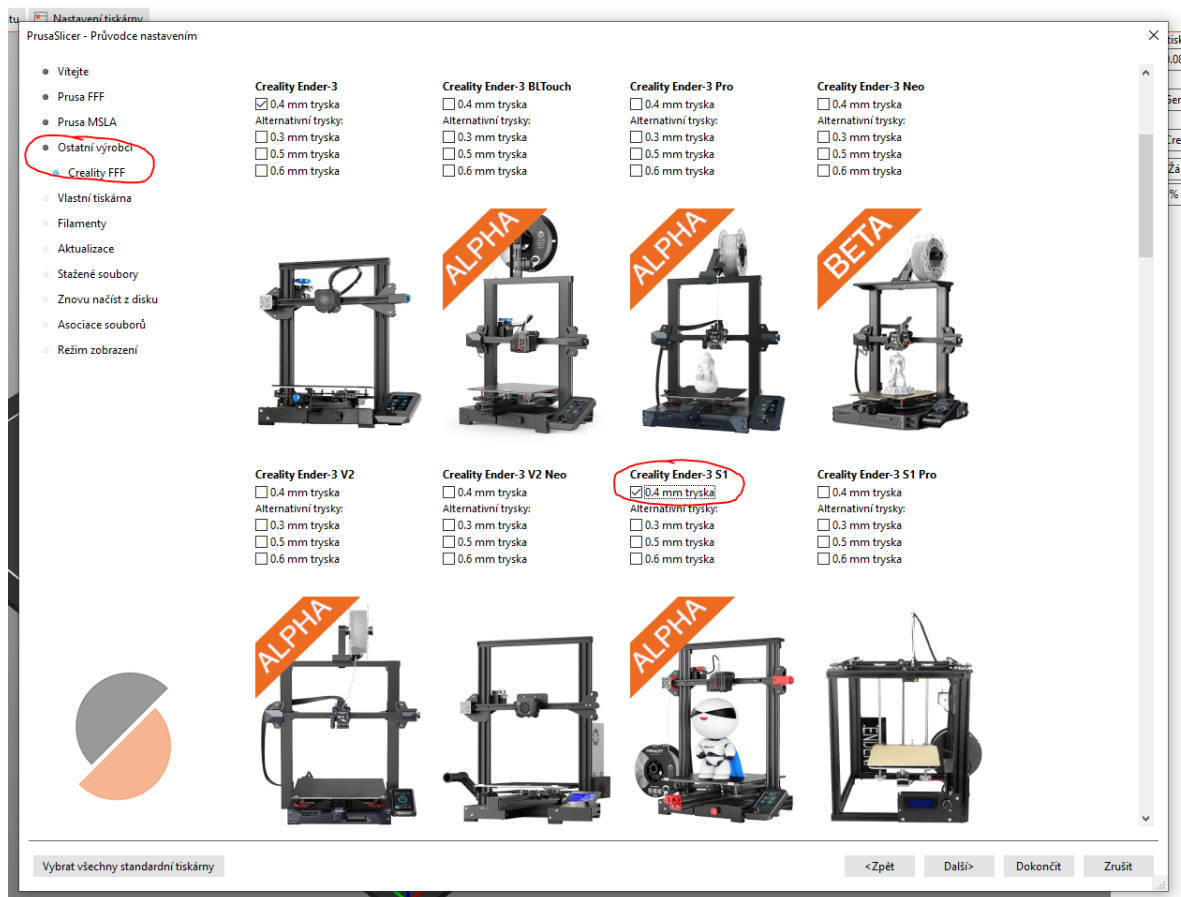
5.5.1 První spuštění a nastavení

Prvním krokem je nastavení a konfigurace programu. V případě prvního spuštění se konfigurace otevře sama, jinak je možná vyvolat kliknutím na záložku konfigurace a poté vybrat „průvodce konfigurací“ (obr. 101).



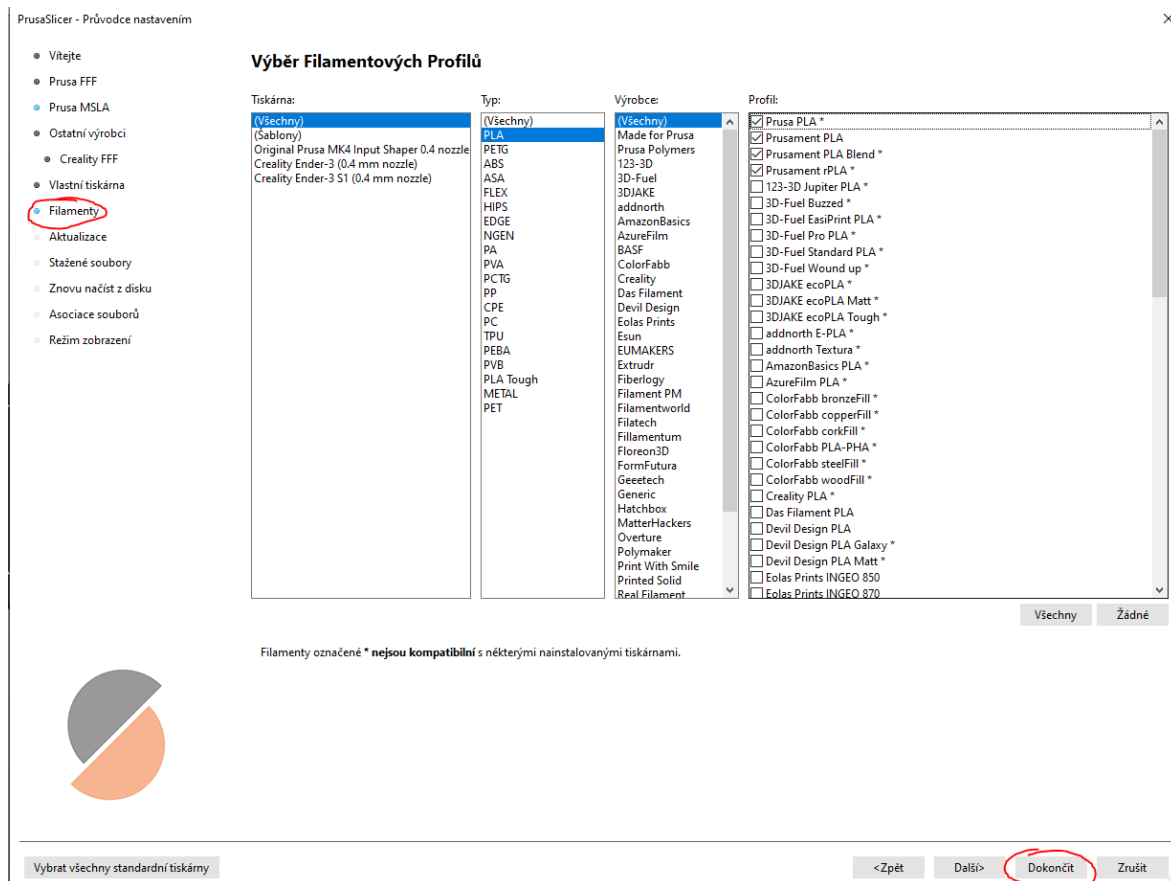
Obrázek 101 Průvodce nastavením

Prvním krokem nastavení je zvolení naší tiskárny. Já používal tiskárnu **Ender 3 S1** od firmy **Creality**. V nastavení tedy zvolíme záložku „ostatní výrobci“, zde zvolíme „Creality“ a poté naši tiskárnu a trysku (obr. 102).



Obrázek 102 Výběr tiskárny

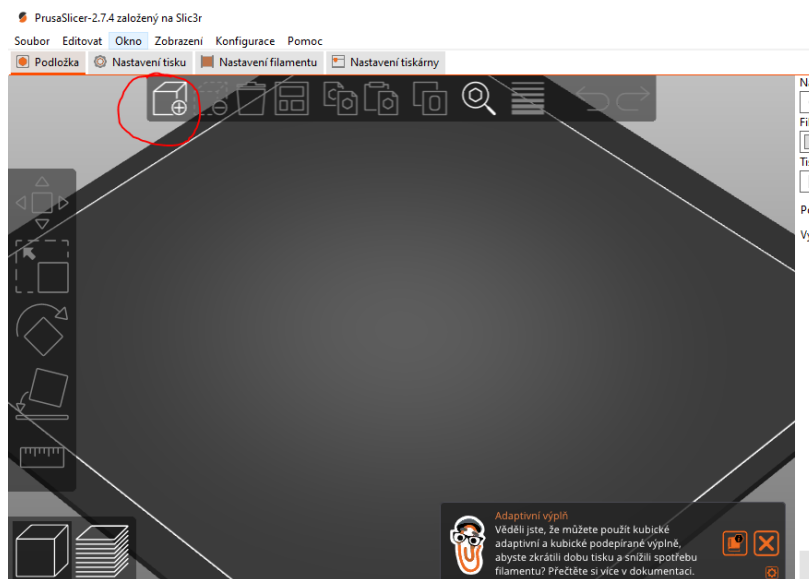
Posledním důležitým krokem v konfiguraci je zvolení filamentu. Pro to se přepneme do záložky „filamenty“ a zvolíme filament, který máme k dispozici. Já požíval polymer PLA. (obr. 103). Jakmile máme zvoleno stačí kliknout na „dokončit“ a můžeme se přesunout k importu.



Obrázek 103 Filamenty

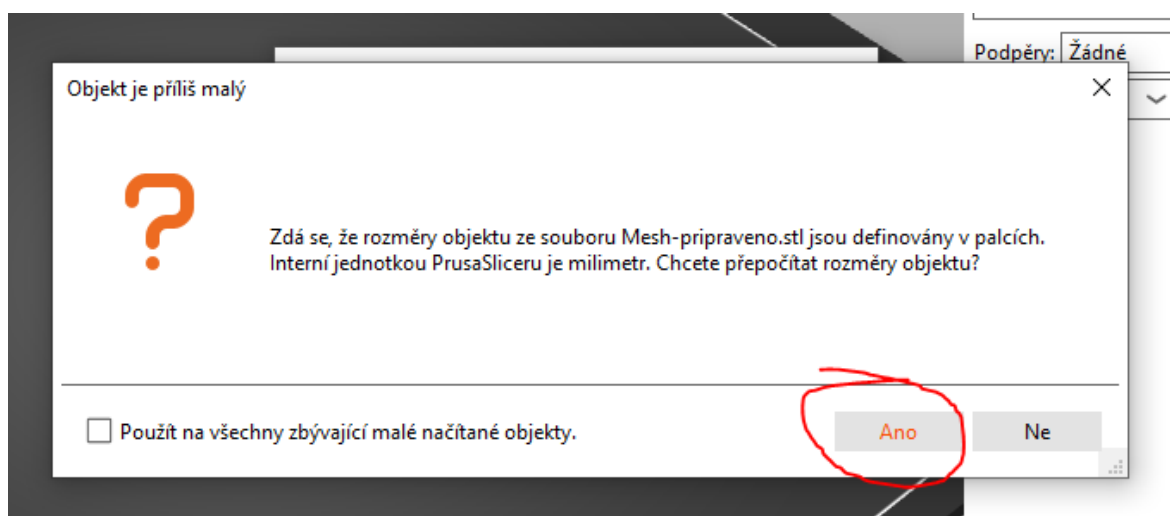
5.5.2 Import

Prvním krokem je import vyhotoveného meshe. To provedeme kliknutím na ikonu „přidat“ (obr. 104) a vybereme náš model.



Obrázek 104 Import

Po načtení se nás program zeptá, zda chceme přepnout jednotky na milimetry, protože je objekt příliš malý a definovaný v palcích, zde je dobré zvolit „ano“ (obr. 105).



Obrázek 105 Přepnutí na milimetry

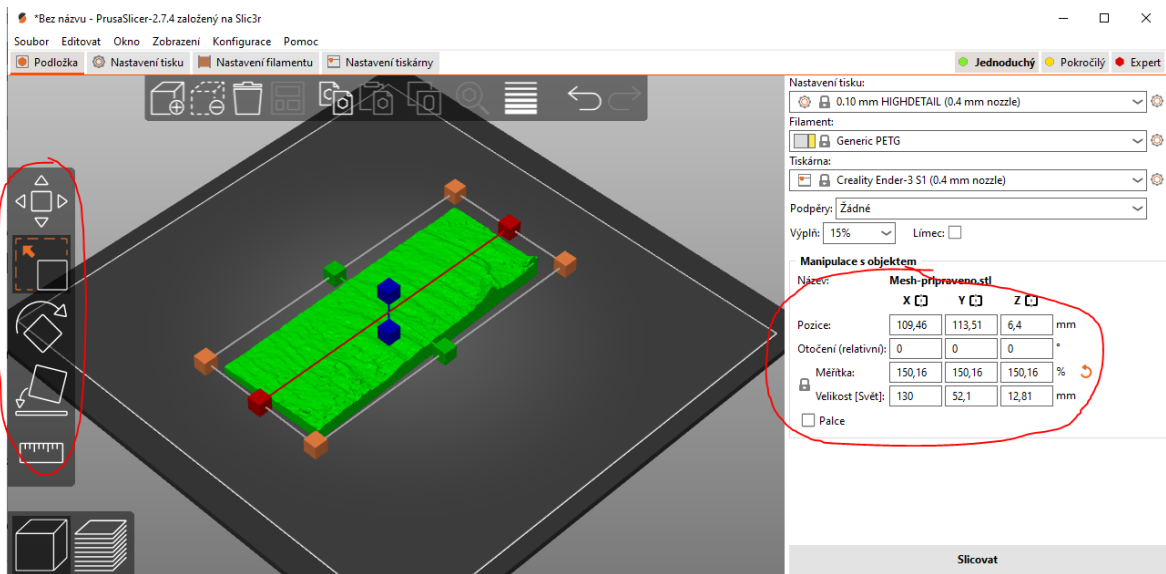
Po kliknutí na ano se nám model načte a můžeme ho začít upravovat/nastavovat.

5.5.3 Nastavení

Před samotným slicováním a tiskem je potřeba model nastavit. Nastavení se dělí na dvě části. Nejprve nastavení velikosti a polohy a poté nastavení tisku.

5.5.3.1 Velikost a poloha

Nastavení velikosti a polohy můžeme provést dvěma způsoby. Buď využijeme funkce na polohování, otáčení a změny měřítka v levé části pracovního prostředí nebo pomocí souřadnic v pravé části (obr. 106).



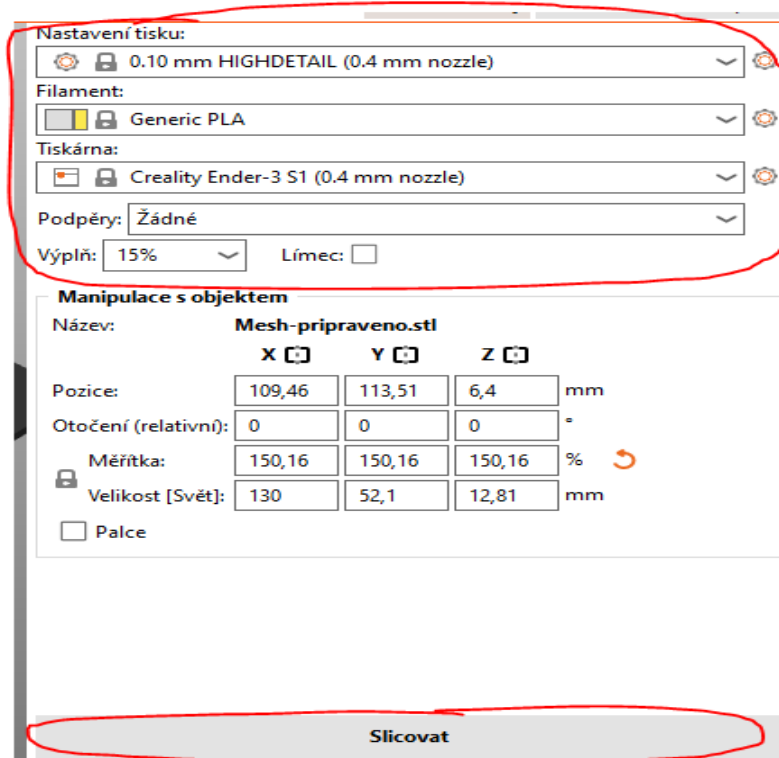
Obrázek 106 Možnosti polohování

Já volil možnost nastavení přes souřadnice a pouze jsem nastavil velikost v ose x na 130 mm, aby mohla být dodržena reprodukovatelnost v případě více tisků či případného porovnání.

V případě využití manipulace pomocí manipulačních funkcí tak se jedná o velmi intuitivní a jednoduché ovládání. Stačí vybrat jednu z funkcí a poté tahem myši upravit co je potřeba.

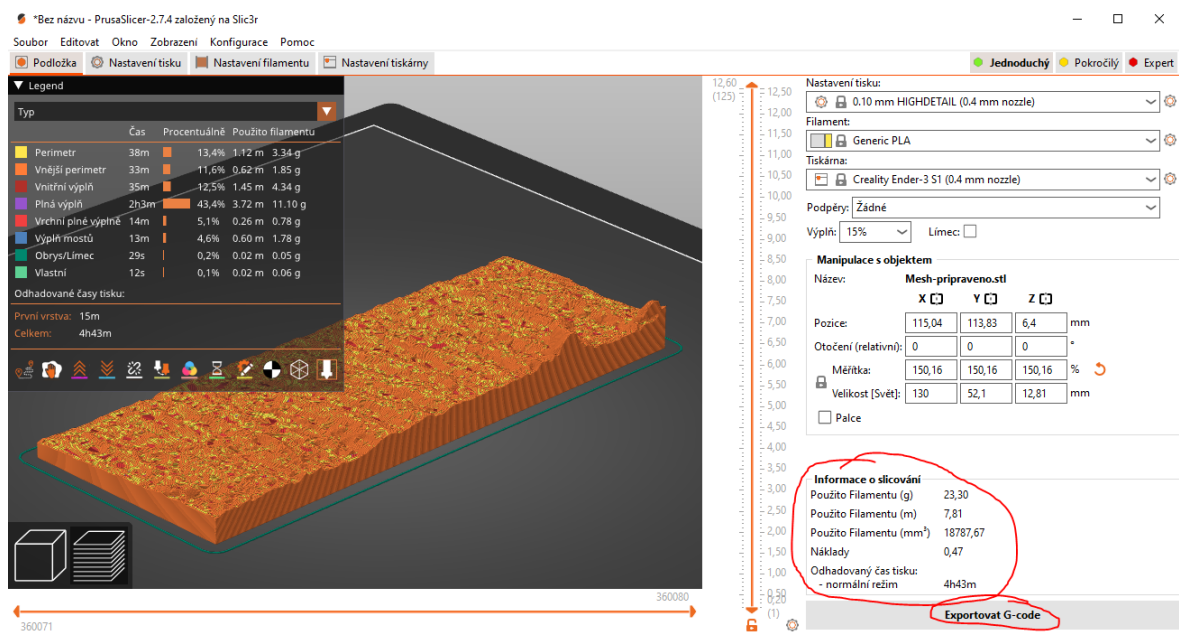
5.5.3.2 Nastavení tisku

Nastavení je velmi jednoduché a nachází se v horní části pravého nastavovacího menu stejně jako souřadnicové polohování. Prvně volíme výšku tištěné vrstvy, zde je vhodné volit menší hodnoty abychom dostali co nejkvalitnější povrch. Pro moji trysku je nejmenší doporučená hodnota 0,1 mm. Dále volíme filament, já používal PLA a jako poslední tiskárnu, kterou máme předem volenou skrze konfiguraci. Podpěry nenastavujeme a výplň můžeme ponechat, protože větší hodnoty zvyšují čas tisku a menší zase riskují zhroucení výtisku. Jakmile máme nastaveno můžeme kliknout na „slicovat“ (obr. 107).



Obrázek 107 Nastavení tisku

Tím se náš model rozpracuje na jednotlivé vrstvy a výplně a zároveň vypočítá čas tisku, čas tisku jednotlivých vrstev/částí modelu a odhadovanou spotřebu materiálu. Poté stačí kliknout na „Exportovat G-Code“ a uložit (obr. 108).



Obrázek 108 Tvorba G-kódu

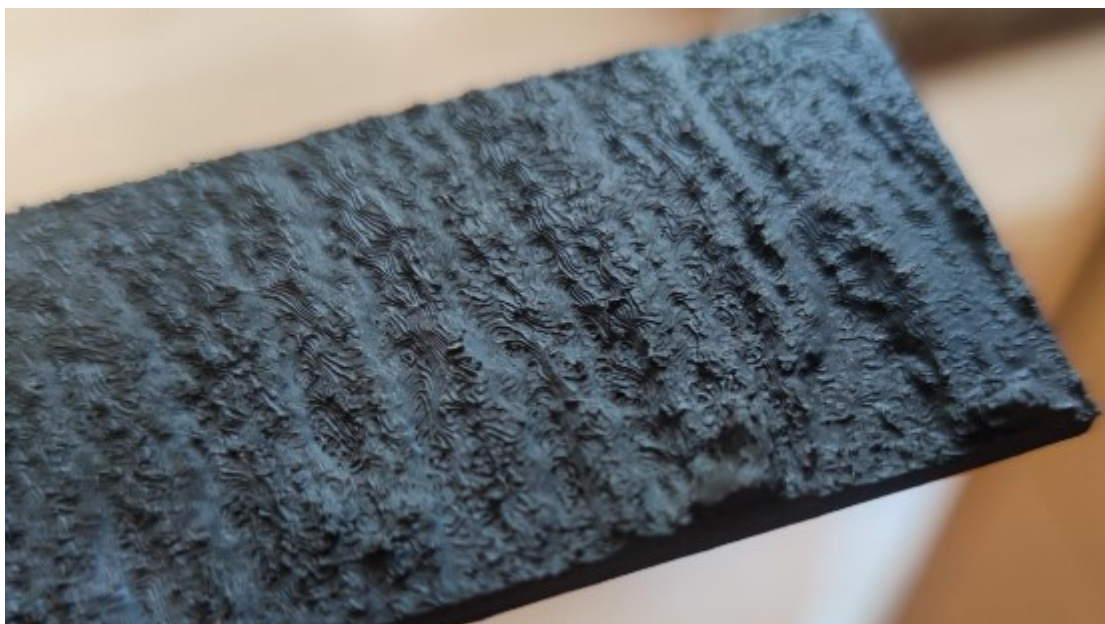
Jakmile máme uloženo, stačí G-Code nahrát do naší tiskárny, zapnout tisk a počkat na výsledný produkt. Pokud by se nám zdálo, že tisk je moc „hrubý“ tak případně je možno snížit rychlost tisku.

6 TISK

Výsledný tisk byl prováděn na dvou tiskárnách. **Creality Ender 5** a **Creality Ender 3 S1**. Obě tiskárny byly nastaveny stejně a v obou případech bylo voleno stejného materiálu – PLA.

6.1 Creality Ender 5

Jedná se o relativně levnou tiskárnu, kterou máme k dispozici u nás doma. Oproti a Creality Ender 3 S1 její pracovní plošina není statická a jednotlivé vrstvy se tvoří pohybem plošiny směrem dolů. Na tisk byl použit černý filament.



Obrázek 109 Výtisk z Ender 5

Výsledek není vůbec špatný, povrch je velice dobře rozeznatelný a jednotlivé vady jsou též hezky viditelné. Avšak je zde docela značně viditelná výška vrstvy a působí celkově dosti hrubě (obr. 109).

6.2 Creality Ender 3 S1

Tiskárna dostupná na fakultě a jedná se o už poměrně dražší tiskárnu (cca 2 až 3násobek Ender 5). Zde se tisk provádí na statické plošině a vrstvení provádí samotná tryska. Použitý filament byl červené barvy.



Obrázek 110 Výtisk z Ender 3 S1

Oproti výtisku z levnějšího modelu je zde vidět relativně značný posun v kvalitě. Výtisk je mnohem hladší a působí méně vrstveně. Details jsou lépe viditelné a jednotlivé vrstvy skoro nerozeznatelné (obr. 110).

ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvoření postupu pro tvorbu replik hrubých povrchů a optimalizace daných procesů, přímo poté s využitím fotogrammetrie a 3D tisku.

Prvně bylo nutné zvolit vyhovující povrch, zde jsem zvolil povrch po laserovém řezání, na kterém bylo dobře viditelných vad, ze kterého jsem poté vyhotovil sérii fotografií, při dodržení daných zásad opakovatelnosti.

Následoval samotný proces fotogrammetrie. Zde jsem volil program MeshroomCL z důvodu, že základní verze nebyla uzpůsobená pro mě dostupná zařízení a jedná se o freeware dostupný na internetu. Následně jsem vyhotovil několik rekonstrukcí, vždy s jinými parametry nastavení a stanovil rozsahy optimálního nastavení programu pro co největší efektivitu a zároveň uspokojitelnosti výsledku.

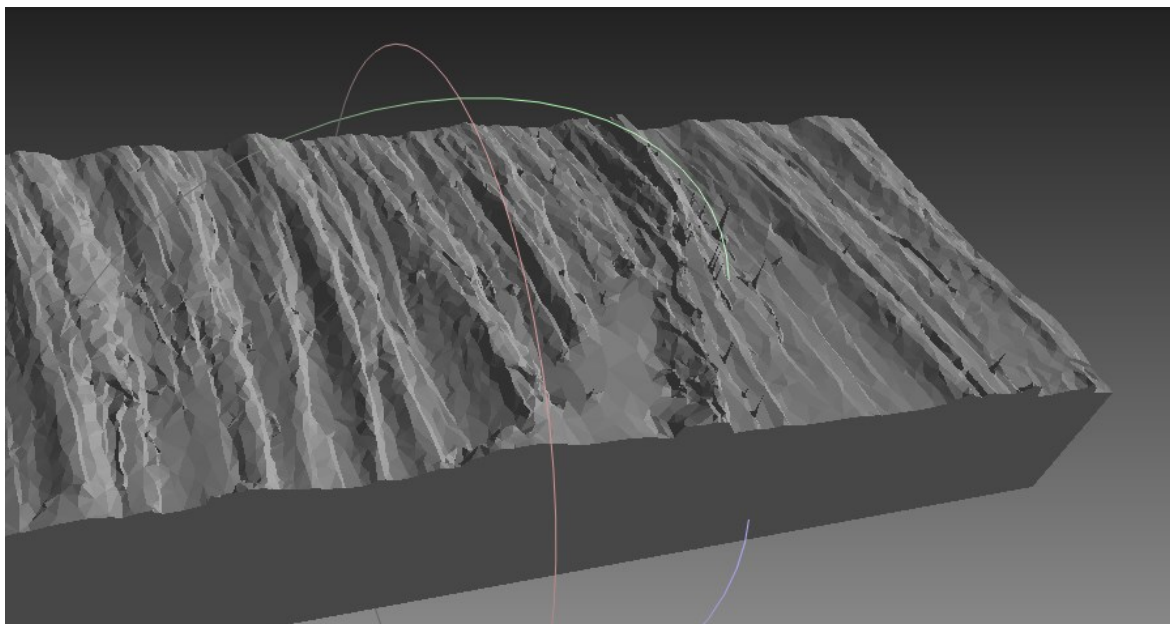
Dalším krokem byla nutnost úpravy vzniklého modelu. Pro tenhle krok jsem volil opět freeware s názvem Meshlab. Meshlab je velice intuitivní a přehledný program, který pro úpravu poskytuje vše potřebné. Zde jsem objevil, stanovil a zaznamenal všechny úpravy, které je nutné provést pro následné zpracování.

Poslední úpravy byly provedeny v programu Autodesk Fusion 360. Zde bylo nutné modelu přidat objem, aby byl tisk možný. Objevený postup jsem otestoval a zaznamenal.

Finálním krokem bylo nastavení rozměrů a už pouhé slicování modelu na jednotlivé tištěné vrstvy. Pro tyto kroky jsem volil program PrusaSlicer, který je velmi jednoduchý a intuitivní. Zde bylo nastaveno použité tiskárny, přiřazení filamentu, zadání měřítka, určení výšky vrstvy a samotné slicování.

Vygenerovaný kód byl poté nahrán do tiskárny a finální model byl tak vytištěn.

V závěru jsem poté provedl sken téhož povrchu na profesionálním zařízení ZYGO (obr.111). Ve srovnání s modelem, který byl získán pomocí fotogrammetrie vidíme detailnější a uhlazenější povrch. Také je ale vidět „hluchých míst“ kde sken nebyl schopen povrch zaznamenat, protože otřep v daném místě byl příliš vysoký a skener ho nedokázal zaměřit. Ovšem krom „uhlazenějšího“ zjevu lze vidět, že oba modely mají stejných základních rysů a vad. To pro experiment shledávám jako úspěch a tvorba replik povrchů pomocí fotogrammetrie je možnou relevantní náhradou, která má i mnoha výhod.



Obrázek 111 Model z profesionálního skeneru

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LUHMANN, Thomas; ROBSON, Stuart; KYLE, Stephen; BOEHM, Jan a LI, Zhengminqing, 2023. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. Online. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2023-04-28, roč. 11, č. 2. ISSN 2051-672X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/9783110607253>. [cit. 2024-03-10].
- [2] TODHUNTER, L.D.; LEACH, R.K.; LAWES, S.D.A.; BLATEYRON, F. a LI, Zhengminqing, 2017. Industrial survey of ISO surface texture parameters. Online. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Roč. 19, č. 2, s. 84-92. ISSN 17555817. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.06.001>
- [3] TOSELLO, G.; HANSEN, H.N.; LAWES, S.D.A.; BLATEYRON, F. a LI, Zhengminqing, 2006. In-process assembly of micro metal inserts in a polymer matrix. Online. *4M 2006 - Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*. Roč. 19, č. 2, s. 83-86. ISBN 9780080452630. ISSN 17555817. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-008045263-0/50019-2>.
- [4] KLOSKI, Liza Wallach; KLOSKI, Nick a GONER, Jakub, 2017. *Začínáme s 3D tiskem*. ISBN 9788025148761.
- [5] GEBHARDT, Andreas; KESSLER, Julia a THURN, Laura, 2019. *3D printing*. ISBN 9781569907023.
- [6] HARTCHER-O'BRIEN, Jess; EVERS, Jeremy; TEMPELMAN, Erik; BLATEYRON, F. a LI, Zhengminqing, 2019. Surface roughness of 3D printed materials: Comparing physical measurements and human perception. Online. *Materials Today Communications*. Roč. 19, č. 2, s. 300-305. ISBN 9780080452630. ISSN 23524928. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.01.008>
- [7] GEBHARDT, Andreas a HÖTTER, Jan-Steffen, 2016. *Additive manufacturing*. ISBN 9781569905821.
- [8] YU, Xiaofeng; YAN, Yongqi; ZHAO, Jiang; SHENG, Wei a LI, Zhengminqing, 2023. Non-contact inspection method for surface roughness on small samples: Comparing physical measurements and human perception. Online. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2023-04-28, roč. 11, č. 2, s. 300-305. ISBN 9780080452630. ISSN 2051-672X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/2051-672X/acce50>.
- [9] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2196-8.
- [10] WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.
- [11] AGGARWAL, Charu C. *Neural networks and deep learning: a textbook*. Cham: Springer, [2018].

- [12] GRAUPE, Daniel. *Deep learning neural networks: design and case studies*. Singapore: World scientific, [2016]. ISBN 978-981-3146-44-0.
- [13] BERNIER, Samuel N.; LUYT, Bertier a REINHARD, Tatiana. *Design for 3D printing: scanning, creating, editing, remixing, and making in three dimensions*. San Francisco: Maker Media, 2015. ISBN 9781457187360.
- [14] PAVELKA JR., K., 2022. PHOTOGRAMMETRY, LASER SCANNING AND HBIM FOR CONSTRUCTION DIAGNOSTIC. Online. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Roč. XLVI-5/W1-2022, s. 171-176. ISSN 2194-9034. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-171-2022>.
- [15] KUDELA, P.; PALCAK, M.; ZABOVSKA, K. a BUCKO, B., 2020. Integration of photogrammetry within laser scanning approach. Online. *2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*. 2020-9-28, s. 1691-1694. ISBN 978-953-233-099-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.23919/MIPRO48935.2020.9245297>.
- [16] SARICAM, Ismail Turgut a OZTURK, Hasan, 2022. Joint roughness profiling using photogrammetry. Online. *Applied Geomatics*. Roč. 14, č. 4, s. 573-587. ISSN 1866-9298. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00454-y>.
- [17] DRIZDAL, Tomas; PAULIDES, Margarethus M.; SUMSER, Kemal; VRBA, David; MALENA, Lukas et al., 2022. Application of photogrammetry reconstruction for hyperthermia quality control measurements. Online. *Physica Medica*. Roč. 101, s. 87-94. ISSN 11201797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2022.08.008>.
- [18] KURNIAWAN, Wendy Cahya; WIBOWO, Fauzy Satrio; LIN, Hsien-I; HANDAYANI, Anik Nur a SENDARI, Siti, 2021. Development of Photogrammetry Application for 3D Surface Reconstruction. Online. *2021 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE)*. 2021-10-2, s. 478-482. ISBN 978-1-6654-3232-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEEIE52663.2021.9616728>.
- [19] ENESI, Indrit a KUQI, Anduel, 2023. Performance Analysis for 3D Reconstruction Objects in Meshroom and Agisoft—A Comparative Study. Online. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (ijOE)*. 2023-04-27, roč. 19, č. 05, s. 22-41. ISSN 2626-8493. Dostupné z: <https://doi.org/10.3991/ijoe.v19i05.37257>.

[20] BIGLETE, Emmanuelle R.; CHRISTIAN E. MANUEL, Mark; DELA CRUZ, Jennifer C.; VERDADERO, Marvin S.; DIESTA, John Michael B. et al., 2020. Surface Roughness Analysis of 3D Printed Parts Using Response Surface Modeling. Online. *2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*. S. 191-196. ISBN 978-1-7281-5313-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICSGRC49013.2020.9232561>.

[21] Structure-Preserving Mesh Simplification, 2020. Online. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*. 2020-11-30, roč. 14, č. 11. ISSN 19767277. Dostupné z: <https://doi.org/10.3837/tiis.2020.11.012>.

[22] *Měření drsnosti povrchu*. Online. In: Elektronická učebnice – ELUC. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>. (obrázek)

[23] *Surface Roughness Measurement – Parameters*. Online. In: Olympus. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>. (obrázek)

[24] JOSE, Preethy Ani a GV, Peter Christoper, 2018. 3D PRINTING OF PHARMACEUTICALS – A POTENTIAL TECHNOLOGY IN DEVELOPING PERSONALIZED MEDICINE. Online. *Asian Journal of Pharmaceutical Research and Development*. 2018-07-10, roč. 6, č. 3, s. 46-54. ISSN 2320-4850. Dostupné z: <https://doi.org/10.22270/ajprd.v6i3.375>.

[25] S., Maidin; K. H., Ting a Y.Y, Sim, 2022. Investigation of Mechanical Properties of Recycled ABS Printed with Open Source FDM Printer Integrated with Ultrasound Vibration. Online. In: *International Journal of Integrated Engineering*. 2022-06-21, s. 46-54. ISSN 2229838X. Dostupné z: <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.04.006>.

[26] PUICHAUD, Anne-Helene; FLAMENT, Camille; CHNIOUEL, Aziz; LOMELLO, Fernando; ROUESNE, Elodie et al., 2019. Microstructure and mechanical properties relationship of additively manufactured 316L stainless steel by selective laser melting. Online. In: *International Journal of Integrated Engineering*. S. 46-54. ISSN 2491-9292. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/epjn/2019051>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Ra	Aritmetický průměr drsnosti
Rq	Kvadratický průměr drsnosti
Rz	Střední hloubka drsnosti
Rp	Maximální výška drsnosti
Rv	Maximální hloubka drsnosti
Rc	Průměrná výška drsnosti
Rt	Největší výška drsnosti
Rsk	Šikmost profilu drsnosti
Rku	Špičatost profilu drsnosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Parametr Ra [23]	13
Obrázek 2 Parametr Rq [23]	14
Obrázek 3 Parametr Rz [23]	14
Obrázek 4 Parametr Rp [23]	15
Obrázek 5 Parametr Rv [23]	15
Obrázek 6 Parametr Rc [23]	16
Obrázek 7 Parametr Rt [23]	16
Obrázek 8 Parametr Rsk [23]	17
Obrázek 9 Parametr Rku	17
Obrázek 10 Procentuální zastoupení průmyslových odvětví v průzkumu [2].....	18
Obrázek 11 Změna míry užívání parametrů drsnosti v průmyslu za 17 let [2]	19
Obrázek 12 Procentuální zastoupení užívání parametrů drsnosti napříč sektory [2]	19
Obrázek 13 Změna míry užívání parametrů vlnitosti v průmyslu za 17 let [2].....	20
Obrázek 14 Procentuální zastoupení užívání parametrů vlnitosti napříč sektory [2].....	21
Obrázek 15 Diamantový snímací hrot [22].....	22
Obrázek 16 Schéma dotykového drsnoměru [22].....	23
Obrázek 17 Schéma CLA [22].....	24
Obrázek 18 Příklad výsledku z CLA [22]	24
Obrázek 19 Schéma laserového snímače	25
Obrázek 20 Schéma CSI	26
Obrázek 21 Proces získávání obrazu [1].....	28
Obrázek 22 Fotogrammetrický proces – z objektu na model [1]	28
Obrázek 23 Vztah mezi velikostí měřeného objektu, požadovanou přesností měření a relevantní technologií [1].....	29
Obrázek 24 Měřicí techniky využívající elektromagnetické vlny [1]	30
Obrázek 25 Princip fotogrammetrie [1].....	32
Obrázek 26 Schéma kamery obscura [1]	32
Obrázek 27 Znázornění svazků paprsků z několika pořízených obrázků [1].....	33
Obrázek 28 Schéma digitálního fotogrammetrického systému [1]	34
Obrázek 29 Schéma SLA [24]	38
Obrázek 30 Schéma FDM [25].....	39
Obrázek 31 Schéma SLS [26].....	40
Obrázek 32 Povrch po laserovém řezání	43

Obrázek 33 Stažení MeshroomCL.....	46
Obrázek 34 První spuštění	47
Obrázek 35 Možnost vložení 1	47
Obrázek 36 Možnost vložení 2	48
Obrázek 37 Vložení	48
Obrázek 38 Popis základní orientace.....	49
Obrázek 39 Záložky procesu	50
Obrázek 40 Attributes záložka.....	50
Obrázek 41 Log záložka	51
Obrázek 42 Statistics záložka	51
Obrázek 43 Status záložka.....	52
Obrázek 44 Documentation záložka	52
Obrázek 45 Atributy StructureFromMotionCL	53
Obrázek 46 Použité fotografie	54
Obrázek 47 Vizualizace kamer	54
Obrázek 48 Atributy MultiViewStereoCL	55
Obrázek 49 Atributy MeshFiltering.....	57
Obrázek 50 Start	58
Obrázek 51 Volba uložení	59
Obrázek 52 Proces rekonstrukce.....	59
Obrázek 53 Umístění složky s výsledky.....	60
Obrázek 54 MeshroomCache.....	60
Obrázek 55 Filtrovaná textura povrchu	61
Obrázek 56 Nefiltrovaná textura povrchu	61
Obrázek 57 Výsledný model.....	62
Obrázek 58 Pracovní prostředí	63
Obrázek 59 Nahraný model	64
Obrázek 60 Vyhledávání	65
Obrázek 61 Nastavení vyhlazení	66
Obrázek 62 Povrch před a po.....	66
Obrázek 63 „Select faces in a rectangular region“	67
Obrázek 64 Invertace výběru.....	68
Obrázek 65 Oříznutý model.....	68
Obrázek 66 Select connected component in region.....	69
Obrázek 67 Výběr hlavní části.....	69

Obrázek 68 Výsledný povrch	70
Obrázek 69 Počet trojúhelníků	70
Obrázek 70 Vyhledání quadratic edge collapse decimation	71
Obrázek 71 Okno nastavení	71
Obrázek 72 Redukovaný model	72
Obrázek 73 Fragmenty po redukci	73
Obrázek 74 Změna barvy	74
Obrázek 75 Repair no manifold edges	74
Obrázek 76 Díry v modelu	75
Obrázek 77 Označené trojúhelníky	76
Obrázek 78 Odstraněné trojúhelníky	76
Obrázek 79 Close holes	77
Obrázek 80 Opravené díry	77
Obrázek 81 Volný trojúhelník	78
Obrázek 82 Oblouk	78
Obrázek 83 Export mesh as	79
Obrázek 84 Export	79
Obrázek 85 Vložení modelu	80
Obrázek 86 Rotační manipulace	81
Obrázek 87 Nastavený model	81
Obrázek 88 Vložený model	81
Obrázek 89 Convert mesh	82
Obrázek 90 Vyhotovení převodu	82
Obrázek 91 Vyhotovený solid model	83
Obrázek 92 Manipulace s modelem	84
Obrázek 93 Ideální pozice	84
Obrázek 94 Tvorba skicy	85
Obrázek 95 Skica	85
Obrázek 96 Tvorba objemu	86
Obrázek 97 Vyhotovený model	86
Obrázek 98 Model po oříznutí	87
Obrázek 99 Save as mesh	88
Obrázek 100 Úložné okno	88
Obrázek 101 Průvodce nastavením	89
Obrázek 102 Výběr tiskárny	90

Obrázek 103 Filamenty	91
Obrázek 104 Import	91
Obrázek 105 Přepnutí na milimetry	92
Obrázek 106 Možnosti polohování	93
Obrázek 107 Nastavení tisku	94
Obrázek 108 Tvorba G-kódu	95
Obrázek 109 Výtisk z Ender 5	96
Obrázek 110 Výtisk z Ender 3 S1	97
Obrázek 111 Model z profesionálního skeneru	99