



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Jana Marešová

APLIKACE REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ PRO ÚČELY
ANTROPOMORFNÍCH TESTOVACÍCH ZAŘÍZENÍ

Diplomová práce

2021



K622..... Ústav soudního znalectví v dopravě

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Jana Marešová

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Aplikace reverzního inženýrství pro účely antropomorfních testovacích zařízení**

Název tématu (anglicky): Application of Reverse Engineering for Anthropomorphic Test Devices

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Návrh postupů pro tvorbu části dolní končetiny antropomorfního testovacího zařízení
- Popis použitých metod a technologií
- Prostorová rekonstrukce části antropomorfního testovacího zařízení
- Tvorba vhodného modelu a jeho následná úprava
- Návrh, příprava a výroba potřebných součástí pro výrobu zvolené části
- Zhodnocení a definice doporučení pro další postup




- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího DP v textu nebo v příloze
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ŠTRONER, Martin. 3D skenovací systémy. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05371-3.
3D systems. Geomagic Design X:User Guide. USA, 2013.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Svatý, Ph.D.**
Ing. Peter Vertal', Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **10. června 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **1. prosince 2021**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


doc. Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu soudního znalectví v dopravě




doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Jana Marešová
jméno a podpis studenta

V Praze dne 9. srpna 2021

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Abstrakt

Tato diplomová práce je věnována tématu návrhu modelu dolní končetiny nárazové figuríny. Práce se zabývá historií nárazových figurín a jejich vývojem až do současnosti. V práci jsou zmíněny použité technologie jako fotogrammetrie, 3D skenování a 3D tisk. Hlavním tématem práce je reverzní návrh modelu dolní končetiny pro nárazové zkoušky a vytvoření formy pro následné vyrobení dolní končetiny figuríny pro případnou dodatečnou instrumentaci. Celý model je tvořen v softwaru Geomagic Desing X.

Klíčová slova

Dolní končetina, nárazová figurína, reverzní inženýrství, fotogrammetrie, 3D skenevání, 3D tisk, Geomagic Design X

Abstract

This thesis focuses on the design model of the lower limb of the anthropomorphic testing device. The work deals with history of anthropomorphic testing devices and their development to the present. Used technologies such as photogrammetry, 3D scanning and 3D printing are also briefly described in the thesis. The main focus of the work is on reverse engineering and design of model of the lower limb and creation of a mould for the possible creation of the lower limb with an aim to enable further instrumentation. The whole workflow was performed in Geomagic Design X software.

Keywords

Leg, crash test dummy, reverse engineering, photogrammetry, 3D scan, 3D print, Geomagic Design X

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala Ing. Zdeňkovi Svatému Ph.D., za pomoc při vypracování této diplomové práce. Především děkuji za cenné rady, trpělivost a vstřícný a přátelský přístup.

Rovněž bych chtěla poděkovat celému Ústavu soudního znalectví v dopravě K622 za veškerou podporu, která mi byla poskytnuta.

V neposlední řadě chci velice poděkovat své rodině a přátelům za jejich podporu a zázemí během celého mého studia.

Obsah

1	Úvod	9
2	Antropomorfní testovací zařízení	11
2.1	Historie nárazových figurín	11
2.2	Nárazové figuríny v současnosti	13
2.3	Budoucnost nárazových figurín	13
3	Popis použitých metod a technologií	15
3.1	Reverzní inženýrství	15
3.2	Fotogrammetrie	15
3.2.1	Základní fotogrammetrické metody	16
3.2.2	Využití fotogrammetrie	16
3.2.3	Dělení fotogrammetrie	16
3.2.3.1	Podle počtu snímků	17
3.2.3.2	Podle polohy komory při snímání	17
3.2.3.3	Podle způsobu získávání snímků	18
3.3	3D skenování	19
3.3.1	3D skenery	19
3.3.1.1	Kontaktní skenery	19
3.3.1.2	Bezkontaktní 3D skenery	20
3.4	3D tisk	21
3.4.1	Technologie 3D tisku	21
3.4.1.1	FDM/FFF	21
3.4.1.2	SLA	21
3.4.1.3	SLS/DMLS	22
4	Prostorová rekonstrukce části antropomorfního testovacího zařízení	24
4.1	Skenování dolní končetiny nárazové figuríny	25
4.2	Fotogrammetrické doplnění modelu	28
5	Tvorba modelu dolní končetiny a jeho následná úprava	30
5.1	Model kosti	30

5.2	Model dolní končetiny.....	32
5.2.1	Zpracování dat z laserového skenování	32
5.2.2	Zpracování dat z fotogrammetrického měření	34
5.2.3	Tvorba mesh modelu dolní končetiny	38
5.2.4	Tvorba parametrického modelu dolní končetiny	45
6	Návrh a výroba formy pro odlévání figuríny dolní končetiny	59
6.1	Model formy	59
7	Závěr	68
8	Seznam obrázků.....	70
9	Seznam tabulek.....	72
10	Použitá literatura.....	73

1 Úvod

Dopravní nehody na pozemních komunikacích jsou celosvětovým problémem. Na silnicích ročně zemře více než jeden milion lidí a dalších třicet až padesát milionu osob je zraněno. Bezpečnost je jednou z nejzásadnějších vlastností vozidel, otázkou bezpečnosti dopravních prostředků se konstruktéři zabývají již od samého vzniku prvních automobilů. Jednou z metod používaných pro testování pasivní bezpečnosti vozidel jsou dynamické nárazové testy (tzv. crashtesty). Jedná se o destruktivní zkoušky, které mají simulovat dopravní nehody, ke kterým v běžném provozu dochází. Pomocí těchto testů je možné nejen hodnotit pasivní bezpečnostní prvky vozidel, ale odhalit i možné proměnné, které hrají významnou roli při závažnosti dopravních nehod. Nárazové zkoušky nám umožňují např. zkoumat interakce mezi interiérem a posádkou vozidla (různé typy střetů, nárazy do pevných překážek aj.), či exteriérem vozidla a ostatními účastníky provozu (srážky se zranitelnými účastníky silničního provozu). K tomuto účelu slouží antropomorfní testovací zařízení (tzv. testovací figuríny), které nám umožňují studovat biomechaniku poranění, způsoby chování lidského těla při dopravních nehodách a poukazují na možná rizika. Díky těmto poznáním máme možnost konstruovat bezpečnější vozidla a jejich části, které mohou eliminovat zranění či je minimalizovat a často i zachránit život.

Motivací pro vytvoření této diplomové práce byla omezená možnost úpravy či doplnění testovací figuríny (např. o přídatná měřicí zařízení) po jejím pořízení. Např. jedna z nejpokročilejších testovacích figurín THOR (Test device for Human Occupant Restraint), která je nástupcem známé figuríny Hybrid III, obsahuje přes 30 000 dílů, její vývoj trval více než pět měsíců a cena se pohybuje okolo jednoho milionu dolarů, což je v přepočtu při momentálním kurzu přes 22,6 milionů českých korun. Při pořízení je nutno jasně definovat jaké zařízení či snímače budou zabudovány a je jen velice omezená možnost následného doplnění bez výrazných finančních investic. Současně s tím, výrobce nabízí pouze určité konfigurace, které v určitých případech nejsou dostatečné pro požadovaný typ testu či získání určité podoby dat. Cílem práce je tak navrhnout a implementovat postupy reverzního inženýrství, které umožní tvorbu či úpravy částí figuríny dle potřeb při současném dodržení odpovídajících mechanických vlastností testovacího zařízení.

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na antropomorfní testovací zařízení neboli testovací figuríny, na jejich vývoj, historii a současnost, dále se také věnuje technologiím a metodám, které byly využity při návrhu a tvorbě modelu dolní končetiny dětské testovací figuríny P6 jako je reverzní inženýrství, fotogrammetrie, 3D skenování a 3D tisk.

Praktická část diplomové práce se zabývá samotnou tvorbou modelu dolní končetiny, formy pro následné odlití a různých komponentů potřebných pro vytvoření dostatečně přesné a věrné kopie dolní končetiny testovací figuríny. V řadě nárazových testů nejsou používány celé figuríny (zejména u střetů s chodci), a to vzhledem k obtížnému zajištění přesného umístění, které je pro dané účely třeba dodržet. Např. při hodnocení ochrany bérce při úderu do nárazníku se používá maketa nohy, pro určení míry ochrany při nárazu do kapoty je používána maketa hlavy.

Jak už bylo zmíněno v předchozích odstavcích, cílem této práce bylo navrhnout postupy a potřebné kroky pro úspěšné vytvoření či úpravy komponent antropomorfního testovacího zařízení. Cílem je mj. také kromě udržení tvarové věrnosti a podobnosti části testovací figuríny i zohlednění finanční a časové náročnosti souvisejících prací.

2 Antropomorfní testovací zařízení

Antropomorfní testovací zařízení, častěji označovaná jako nárazové či testovací figuríny, jsou mechanickými náhradami člověka, které se využívají k získání informací o ochraně cestujících ve vozidle či dalších účastníků provozu při simulovaných kolizích vozidel.

Přibližně před sto lety byla úmrtnost účastníků silničního provozu daleko vyšší, než je dnes, a to i přesto že počet vozidel na silnicích se stále zvyšuje. Díky využívání nárazových figurín při nárazových zkouškách mají konstruktéři lepší představu o dopadu dopravní nehody na lidské tělo a mohou vozidla a bezpečnostní zařízení tvořit tak, aby docházelo k co nejmenším zraněním během dopravních nehod. [7]

2.1 Historie nárazových figurín

Od roku 1930 se společnost začala tématem nárazových figurín více zabývat, avšak první figurína „Sierra Sam“ byla vyrobena až v roce 1949. Jednalo se o strojírenskou figurínu 95percentilního muže od firmy Sierra Engineering. Do tohoto roku byly požívány na testy lidské mrtvoly, ale z etických důvodů se s jejich požíváním přestalo. Zkoušely se používat i těla zvířat, například šimpanzů nebo vepřů, ale z důvodu jiné biologické stavby nemohla být získaná data využita, proto se od této alternativy rychle upustilo. [7]



Obrázek 1 - Figurína Sierra Sam [8]

V roce 1971 byla představena první figurína vyvinuta speciálně pro automobilový průmysl firmou General Motors. Jednalo se o první generaci figurín Hybrid I – padesátiprocentní mužská figurína. Už v roce 1973 byla představena druhá řada Hybrid II., u které došlo k vylepšení páteře, ramen a kolen. Na rozdíl od předchozích figurín byly tyto části již pohyblivé. [7]



Obrázek 2 - Testovací figuríny Hybrid II [9]

Od roku 1972 se začalo pracovat na výzkumu další figuríny. Důležitým aspektem pro novou figurínu Hybrid III bylo, aby realističtěji odrážela biomechaniku lidského těla. Experti se proto při vývoji zaměřili na používané materiály, nové vnitřní prvky, ale i na způsob držení těla člověka.

Nástupcem Hybridu III je THOR (Test device for Human Occupant Restraint). V současnosti se jedná o nejpokročilejší testovací figurínu, která se skládá z více jak třiceti tisíc součástí. Jeho propracovaná stavba těla umožňuje zapojení většího počtu senzorů, které upřesňují chování lidského těla během dopravní nehody. [7] [15]

2.2 Nárazové figuríny v současnosti

V současnosti je na trhu velké množství nárazových figurín různých velikostí, které jsou rozděleny i podle druhu použití. Nárazové figuríny rozlišujeme na figuríny používané pro čelní a boční náraz vozidla, náraz do vozidla zezadu a figuríny pro nárazové testy s chodci. V návaznosti na tento fakt je uzpůsobena i jejich konstrukce.



Obrázek 3 - Ukázka různých typů figurín současnosti [10]

2.3 Budoucnost nárazových figurín

I přes možnost simulací dopravních nehod pomocí výpočtových a simulačních programů, které v poslední době nabývají na popularitě, crashtesty a vývoj testovacích figurín stále zůstává spolehlivým měřítkem bezpečnosti. Po celém světě existuje několik institucí, které se zabývají nárazovými zkouškami vozidel a využívají při tom dva typy figurín. Jednou z nich je sedící figurína, která je využívána na všech místech ve vozidle a další figurínou je figurína chodce. Nejvýznamnějšími institucemi jsou Euro-NCAP (European New Car Assessment Programme), která na základě předepsaných nárazových zkoušek uděluje vozidlům určitý počet hvězdiček (0-5) reprezentující míru bezpečnosti vozidel. Hodnotí ochranu dospělé posádky, dětí,

chodců a aktivní bezpečnostní systémy ve vozidle. Euro-NCAP provádí celkem tři nárazové testy. Čelní náraz do deformované bariéry v rychlosti 64 km/h, boční náraz do vozidla rychlostí 50 km/h a simulaci nárazu do stromu (boční náraz na kůl tzv. pole test) rychlostí 29 km/h. Další institucí je například americká společnost NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), která si klade za cíl zabránit úmrtím, předcházet zraněním a snižovat ekonomické náklady v důsledku dopravních nehod. NHTSA provádí čelní náraz do zdi v rychlosti 56 km/h, boční náraz do vozu rychlostí 62 km/h a test převrácení. K tomu využívají figuríny chodců a figuríny reprezentující posádku vozidla.

Cílem je distribuovat nárazové figuríny, které budou obsahovat senzory zaměřené i na velmi specifická poranění. Vyvíjí se například materiály simulující vlastnosti kůže, které se během testů odřou a pohmoždí. Data získaná z figurín už nejsou nápomocná pouze pro vytváření stále lepších a bezpečnějších vozidel, ale slouží i lékařům pro zvyšování úspěchu při záchraně lidských životů a péči o ně. Přesto však většina testovacích figurín bývá dodávána pouze v předem určené konfiguraci, která odpovídá standardizovaným testům používaným např. pro homologaci vozidel. Mohou však nastat i situace, kdy je třeba měřit i jiné veličiny či dovybavit zařízení o další snímače, toto však ve většině případech není možné. Příkladem mohou být testy prováděné Ústavem soudního znalectví v dopravě pro hodnocení závažnosti střetu dětského chodce s přídílí vozidla. V tomto případě byla jedním z důležitých aspektů velikosti sil působících na dolní končetinu (stehno) a hodnocení případného vzniku zlomeniny. Vzhledem k faktu, že dětské testovací figuríny neobsahují tenzometrické čidlo ani neumožňují jeho případné dodatečné osazení na stehenní kosti, bylo třeba tuto část končetiny upravit. To vedlo k výrazným komplikacím a jen značně omezeným možnostem při následných testech. V případě jasně definovaného postupu tvorby a úpravy končetiny, by tvorba části končetiny byla výrazně snazší a umožnila hladkou implementaci nového čidla. [11] [12][13]

3 Popis použitých metod a technologií

Níže jsou představeny základní vlastnosti a charakteristiky technologických postupů a metod použitých v rámci předložené diplomové práce.

3.1 Reverzní inženýrství

Reverzní inženýrství je opačným procesem klasického inženýrství. Objekt nenavrhuje na základě vstupních požadavků nebo parametrů, ale na základě podkladů získaných z již hotového výrobku sloužícího jako vzor. Z tohoto vzorového výrobku se snažíme získat co nejvíce informací o jeho vlastnostech, postupech výroby a funkcích. Ze získaných informací jsme schopni vytvořit výrobní dokumentaci objektu a následně ho znovu zreprodukovat v téměř shodné kvalitě, nebo provést změny dle určitých požadavků, např. využití v jiné konfiguraci či umístění.

Jako zkoumaný předmět si můžeme představit téměř cokoli od strojních součástí, automobilů, letadel, mobilních telefonů, přes domy, nábytek, software nebo i jídla. Velmi často jsou postupy reverzního inženýrství vnímány negativně, zejména ve vztahu k ochraně duchovního vlastnictví či patentových práv. Současně ale postupy reverzního inženýrství umožňují zpětně popsat přesně vlastnosti zkoumaného objektu, které jsou jinak nedostupné, např. díl, který se již nevyrábí a je potřeba vytvořit jeho náhradu. Tato práce se zabývá dolní končetinou antropomorfního testovacího zařízení, zejména z hlediska možného rozšíření možností umístění nových měřicích zařízení či její úpravy dle potřeb a cílů prováděných testů. [1]

3.2 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je vědní obor, který se zabývá zpracováním informací na fotografických snímcích. Jedná se o proces, který vypočítává umístění bodu v trojrozměrném prostoru použitím fotografií objektu zachyceného z více úhlů.

Název fotogrammetrie vznikl složením tří řeckých slov: photos – světlo, gramma – záznam (napsáno, nakresleno) a metron – měřit. Slovo fotogrammetrie vzniklo ze snahy nazvat vhodným způsobem činnost zabývající se měřením světelných záznamů (fotografických snímků). [16] [17] [18]

3.2.1 Základní fotogrammetrické metody

Fotogrammetrií v nejširším slova smyslu rozumíme měřičskou metodu, která umožňuje určení tvaru, velikosti či polohy měřeného předmětu v prostoru z jednoho či více obrazových, nejčastěji fotografických záznamů. Primárním úkolem fotogrammetrického měření je získání trojrozměrné rekonstrukce objektu v digitální podobě (souřadnic a odvozených geometrických parametrů) či grafické formě (obrazů, plánů, map). Jedná se o optickou měřičskou metodu, která využívá jako nosič informací elektromagnetické vlnění (nejčastěji světlo). [19]

3.2.2 Využití fotogrammetrie

Fotogrammetrie se využívá v topografii, kde se zabývá vyhodnocováním snímků ke geodetickým a fotografickým účelům, jako je zhotovování plánů a map, pořizování a obnova map, mapování menších, skalnatých a strmých území nebo pořizování mapových podkladů pro projektování staveb. Současný rozvoj výpočetní techniky umožnil implementaci automatizace pro vyhodnocení a zpracování prostorové rekonstrukce a tím i její rozšíření v rámci celé řady vědeckých či jiných účelů. Příkladem může být její využití v rámci dokumentace nárazových testů, kdy je možné získat výstupy velmi podobné laserovému skenování, avšak s výrazně nižšími náklady.

Dále je využívána v zemědělství pro agropedologický rozbor, hospodářsko-technické úpravy pozemků nebo projektování meliorací. Své využití má také ve strojírenství, stavebnictví či v archeologii, kde byla pomocí snímků odkryta pravěká sídliště. Uplatnění našla také v meteorologii, architektuře, oceánografii a dalších vědních oborech jako je moderní kriminalistika, kde se pomocí fotogrammetrie řeší dopravní nehody nebo sledování povrchu vozovek. [16] [17] [18]

3.2.3 Dělení fotogrammetrie

Fotogrammetrii můžeme dělit dle různých technických hledisek či využívaných technologií, a to jak podle pořizování snímků ale i podle způsobu vyhodnocování. [16]

3.2.3.1 Podle počtu snímků

Jedním z hlavních dělení fotogrammetrie je dělení dle snímkové konfigurace neboli počtu snímků. Konfigurace se určuje uspořádáním poloh komorových stanic a podle směrů snímání těchto komor v čase měření. Podle snímkové konfigurace dělíme fotogrammetrii na dvě skupiny: jednosnímková fotogrammetrie a vícesnímková fotogrammetrie. [16] [17] [18]

- **Jednosnímková fotogrammetrie**

U jednosnímkové fotogrammetrie máme k dispozici pouze jeden snímek měřeného předmětu. Jelikož lze ze snímku určit pouze rovinné souřadnice, lze ji použít pouze na předměty rovinné.

Jednosnímková fotogrammetrie se využívá hlavně pro ortofotografie, fotoplány rovinných území nebo u dalších rovinných předmětů, jako jsou stavební objekty. [16] [17] [18]

- **Vícesnímková fotogrammetrie**

U vícesnímkové fotogrammetrie máme k dispozici neomezený počet snímků. Předmět měření je nasnímán z několika poloh. Souřadný systém u vícesnímkové fotogrammetrie u daného předmětu je následně určen metodou protínání paprskových svazků – tento postup lze nazvat také průseková fotogrammetrie.

Vícesnímková fotogrammetrie je využívána nejčastěji hlavně u složitých tvarů snímaných předmětů, nebo pokud je vyžadována vysoká přesnost. Tato metoda byla využita i v této práci při fotogrammetrickém doplnění modelu dolní končetiny testovací figuríny. [16] [17] [18]

3.2.3.2 Podle polohy komory při snímání

U rozdělení fotogrammetrie podle polohy komory při snímání záleží na vzájemné vzdálenosti komory a předmětu snímání. Tímto způsobem fotogrammetrii dělíme na tři skupiny: pozemní (terrestrická) fotogrammetrie, letecká fotogrammetrie a satelitní (družicová) fotogrammetrie. [16] [17] [18]

- Pozemní fotogrammetrie

Pozemní fotogrammetrie se využívá na objekty zpravidla nepohyblivé umístěné na Zemi. Výhodou těchto objektů je, že u nich můžeme přesně geodeticky určit souřadnice, a i prostorovou orientaci snímku. Oproti tomu nevýhodou pozemní fotogrammetrie je vzájemné překrývání objektů během měření. Přesnost u pozemní fotogrammetrie ubývá se vzdáleností, proto je vhodná k použití u objektů, které jsou přibližně ve stejné vzdálenosti, jako jsou například fasády budov. [16] [17] [18]

- Letecká fotogrammetrie

Letecká fotogrammetrie má nejširší uplatnění, a to zejména při zhotovování map nejrůznějších měřítek. Při pořizování fotek z dopravního prostředku je vzdálenost komory a měřeného objektu přibližně ve stejné vzdálenosti, proto je dosaženo vysoké přesnosti. Nevýhodou letecké fotogrammetrie ale je, že zpravidla nelze přesně určit prostorovou polohu snímku v momentě jeho pořízení, a proto následné zpracování je značně složitější než u fotogrammetrie pozemní. [16] [17] [18]

- Satelitní fotogrammetrie

Satelitní fotogrammetrie vzniká ze snímků pořízených družicí. Mají vysokou kvalitu, proto jsou používány pro tvorbu geografických, tematických map středního a malého měřítko. Snímky z družice se také využívají v archeologii a k pozemkovým úpravám. Pro satelitní fotogrammetrii se využívají speciální softwary. [16] [17] [18]

3.2.3.3 Podle způsobu získávání snímků

- Analogová fotogrammetrie

Analogová fotogrammetrie je dnes už nevyužívanou metodou. Pro analogové zpracování snímků se využívá složitých jednoúčelových analogových strojů, které se již nepoužívají. Tato technologie je vhodná pouze pro archivní snímky nebo pro malý objem dat. [16] [17] [18]

- Digitální fotogrammetrie

Při digitální fotogrammetrii se využívá digitální obraz. Snímkové souřadnice se určují přímo v rámci jednotlivých pixelů snímků. Digitalizované souřadnice se na počítači transformují do geodetického souřadnicového systému a dále pak na počítači zpracovávají. Právě digitální fotogrammetrie, přesněji metoda digitální obrazové korelace, byla využita v rámci této diplomové práce. [16] [17] [18]

3.3 3D skenování

3D skenování je označení procesu určování prostorových souřadnic bodů měřeného objektu, které se ukládají do paměti. U 3D skenování se setkáváme s velkým množstvím bodů, které označujeme za mračno bodů. Počet získaných bodů závisí na použitém zařízení – 3D skeneru a na nastavených parametrech. [21]

3.3.1 3D skenery

3D skenery jsou zařízení, která analyzují objekt a shromažďují údaje o jeho tvaru a případně vzhledu (barva, struktura). Tyto nashromážděná data jsou následně použita pro vytváření 3D modelů.

3D skenery dělíme podle způsobu průběhu skenování do několika základních skupin. Záleží, zda při skenování dochází ke kontaktu s měřeným objektem, či nikoliv. Podle toho 3D skenery dělíme na kontaktní a bezkontaktní. [22] [24] [25]

3.3.1.1 Kontaktní skenery

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, u kontaktních skenerů dochází během měření ke kontaktu s měřeným objektem. Výhodou kontaktních skenerů je přesnost měření, které se pohybuje v řádech mikrometrů, proto jsou kontaktní 3D skenery využívány například ve strojírenství. Oproti tomu jejich nevýhodou je rychlost měření, proto s nimi není vhodné skenovat velké součástky.

Kontaktní 3D skenery dále můžeme dělit na destruktivní a nedestruktivní skenery. [24] [25]

- Destruktivní 3D skenery

Destruktivní 3D skenery jsou význačné tím, že mohou zaznamenat vnější, ale i vnitřní geometrii měřeného objektu. Proto je vhodné tyto skenery používat na předměty složitých tvarů se záhyby a dutinami. Nevýhoda destruktivního 3D skeneru je zničení objektu během skenování. [25]

- Nedestruktivní 3D skenery

Nedestruktivní 3D skenery jsou význačné pevnou platformou a ramenem, který je vybaven sondou a drží měřený objekt. Při kontaktu sondy s objektem jsou zaznamenány polohové souřadnice ramena. Tyto informace následně tvoří výsledné bodové mračno. Rameno 3D skeneru se sondou bývá ovládáno manuálně. [22] [24]

3.3.1.2 Bezkontaktní 3D skenery

Při skenování měřených objektů bezkontaktními 3D skenery nedochází k žádným deformacím, posunům nebo ke zničení objektu, jelikož při měření nedochází ke kontaktu skeneru a měřeného objektu. Oproti kontaktním skenerům zaznamenávají informace o měřeném objektu daleko vyšší rychlostí, ale s nižší přesností. Při využití bezkontaktních 3D skenerů se dále využívá počítačová rekonstrukce objektu.

Bezkontaktní 3D skenery využívají dvě metody k získání potřebných informací o měřeném objektu. Jedná se o aktivní a pasivní metodu. [22] [24]

- Aktivní metoda

Při využívání 3D skenerů s aktivní metodou, 3D skener vysílá záření (světlo, ultrazvuk nebo rentgenové záření) a následně zaznamenává odraz od měřeného objektu. [22] [24]

- Pasivní metoda

U pasivní metody se nevyzařuje žádné záření, ale 3D skenery jsou odkázány na odraz jiného záření od měřeného objektu. 3D skenery používají většinou viditelné světlo kvůli snadnému snímání. [22] [24]

3.4 3D tisk

3D tisk se stal v poslední době velmi populární. Jedná se o výrobu různých fyzických modelů z 3D modelu. Princip 3D tisku je vytváření fyzického modelu po jednotlivých vrstvách, materiál se postupně přidává a tím se tvoří výsledný produkt. Tomuto postupu se říká aditivní výroba.

3.4.1 Technologie 3D tisku

V následující kapitole se zaměříme na různé technologie 3D tisku. Všechny tyto technologie jsou ale založené na stejném základu. Jedná se o postupné nanášení vrstev na sebe. Každá ze zmíněných technologií je vhodná pro jiné použití. Technologie si liší podle toho, jakou má materiál podobu a jakým způsobem je materiál zpracován. [26] [27] [28]

3.4.1.1 FDM/FFF

Technologie Fused deposition modeling (FDM), taktéž nazývána jako Fused filament fabrication (FFF) je nejrozšířenější a zároveň i nejdostupnější technologie 3D tisku. Materiálem je plastová tisková struna (filament), která je vytlačována rozehrátou tryskou. Tryska rozehrátý plast postupně nanáší do vrstev. Tato technologie se využívá pro tisk různých prototypů a funkčních modelů. [26] [27]

3.4.1.2 SLA

Metoda SLA (stereolitografie) je daleko preciznější než předchozí FDM. Zároveň je ale tato technologie používána na tisk malých předmětů a jejich tisk trvá delší dobu. Tato technologie funguje na principu vytvrzování světlocitlivé pryskyřice pomocí světla.

Při každé vytištěné vrstvě se musí podložka posunout a proběhne vytvrzení fotopolymeru na požadovaných místech. Vytištěný produkt je téměř dokonale hladký, detailní a nejsou na něm patrně jednotlivé vrstvy tisku. Proto se tato technologie využívá hlavně v odvětví medicíny a šperkařství. [26] [27]

3.4.1.3 SLS/DMLS

Tato technologie nanáší postupně tenké vrstvy prášku, který je laserem zapečen v místech, které jsou součástí výsledného produktu. Oproti ostatním technologiím je na konci tisku produkt zasypaný v tiskovém materiálu. Při této technologii je oproti FDM velmi nevýrazné vrstvení materiálu. [26] [27]

	FDM	SLA	SLS/DMLS
Použité materiály	Plasty (FDM nylon 12)	fotopolymery	Keramika, plasty / kov
Výhody	Minimální odpad, vysoká pevnost modelu	Výborná přesnost v rámci mikronů	Nízká cena materiálů, výroba složitých tvarů, kvalitní povrch
Nevýhody	Hrubá struktura	Nutnost model dotvrdit ke zlepšení vlastností	Vysoká cena tiskárny
Velikost vrstvy	0,1 mm	0,01 mm	0,06 mm / 0,02 mm
Pořizovací cena tiskárny	Od 20 tisíc Kč	Od 100 tisíc Kč	5–10 mil. Kč

Tabulka 1 - Porovnání metod 3D tisku

Na následujícím obrázku (viz. Obrázek 4) jsou vidět rozdíly 3D tisku podle různých technologií na totožném modelu.



Obrázek 4 - Porovnání jednotlivých technologií 3D tisku [29]

4 Prostorová rekonstrukce části antropomorfního testovacího zařízení

V rámci této diplomové práce bylo prvním krokem jasné vymezení cílů, kterých v rámci praktické části mělo být dosaženo. Vzhledem k rozsahu problematiky revizního inženýrství, tvorby a návrhu antropomorfních testovacích zařízení a souvisejících materiálových vlastností a ověření věrnosti vytvořených konstrukčních částí bylo rozhodnuto po poradě s vedoucím práce o omezení rozsahu a zaměření práce na tvarovou rekonstrukci spodní části dolní končetiny dětské testovací figuríny P6. Toto omezení souvisí i s faktem, že problematika či její dílčí části jsou či byly již částečně řešeny v rámci jiných závěrečných prací studentů Ústavu soudního znalství v dopravě. Z tohoto důvodu byla zanedbána problematika určení nejvhodnějšího materiálu, jeho mechanických a chemických vlastností a technologie tvorby formy pro následné odlévání je uvažována pro předem jasné definovaný materiál. Současně s tím bylo rozhodnuto, že pro skelet končetiny bude využit původní skelet (kost) originální figuríny pro zajištění co možná nejvyšší míry kompatibility se zbytkem testovací figuríny.



Obrázek 5 - Diagram znázorňující jednotlivé kroky praktické části

4.1 Skenování dolní končetiny nárazové figuríny

První kroky praktické části byly určeny požadavkem pro jednoznačné určení a popis zvolené končetiny testovací figuríny. Vzhledem ke komplexnímu tvaru, kdy je součástí modelu jak holení část, tak chodidlo včetně kotníku, bylo rozhodnuto aplikovat laserové skenování. Ke skenování dolní končetiny nárazové figuríny jsem použila ruční skener VIUscan (40115). Zvolila jsem pro tuto práci tento skener, protože umožňuje skenování menších objektů s vysokou přesností (0,01 mm) a současně umožňuje v průběhu skenování pohybovat s měřeným objektem a zajistit tak zachycení celého předmětu.

Na začátku skenování je prvním krokem kalibrace přístroje. Tato kalibrace se provádí pomocí skleněné desky osazené terčí s předem známou polohou. Kalibrační deska je pro každý scanner unikátní. Proto je důležité sériové číslo každého přístroje, které je shodné s kalibrační deskou. Pokud by se kalibrační deska poškodila, není možné 3D skener zkalibrovat pomocí jiné desky. Kalibrace se provádí na počítači v rámci proprietárního softwaru (VXelements), do kterého je přístroj zapojen. Kalibrace spočívala v koordinovaném pohybu skeneru, který snímal kalibrační desku předepsaným způsobem.

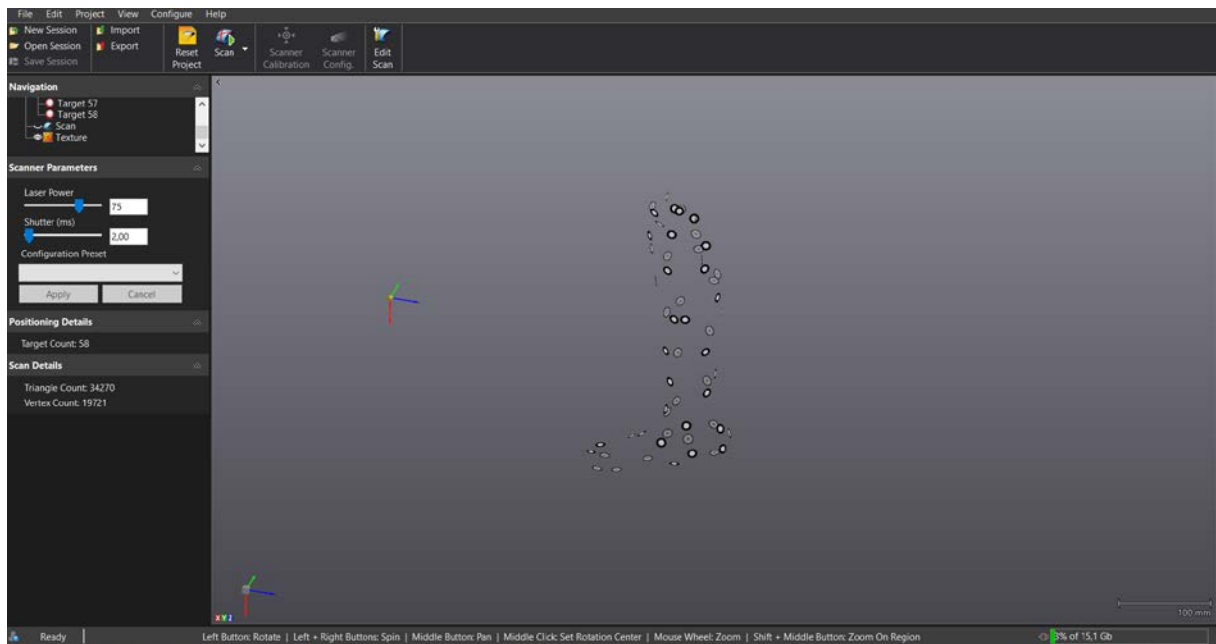


Obrázek 6 - Kalibrační deska

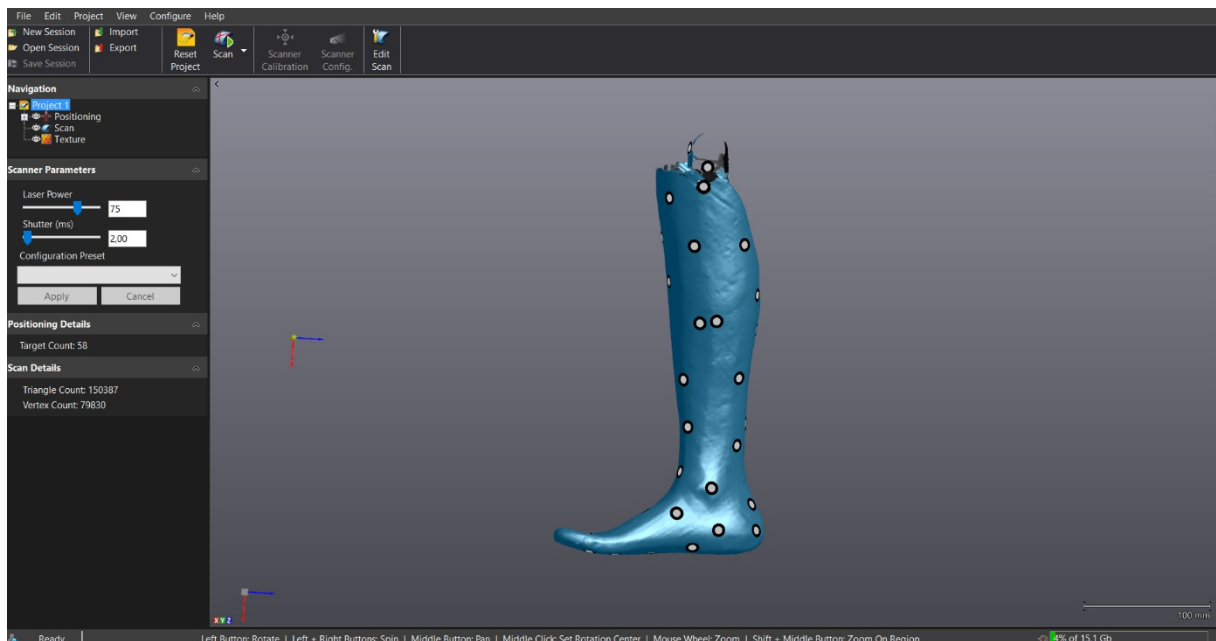


Obrázek 7 - Úvodní okno a průběh kalibrace

Skenování probíhalo ve dvou krocích – prvním bylo skenování pozičních terčů (targetů), druhým vlastní skenování povrchu končetiny. Targety jsou reflexní poziční prvky, které umožňují jednoznačnou orientaci skeneru v prostoru a tím zjednodušují a zrychlují proces skenování. Pro skenování dolní končetiny dětské figuríny bylo použito 58 targetů (viz. Obrázek 8), které byly rozmístěny rovnoměrně, ale zároveň částečně náhodně po celém povrchu.



Obrázek 8 - Rozmístění targetů na dolní končetině figuríny



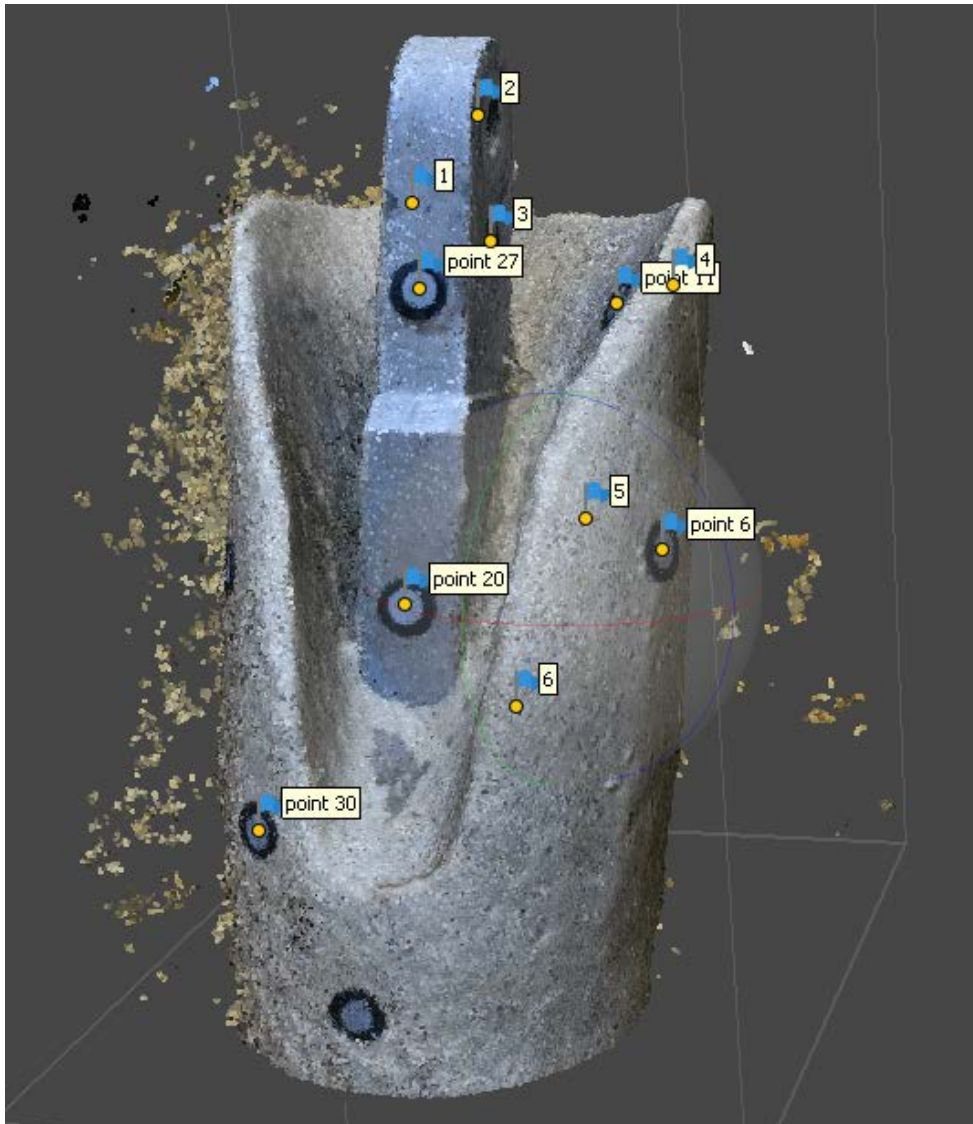
Obrázek 9 - Naskenovaná dolní končetina v programu VXElements

Skenování povrchu bylo prováděno s rozlišením 1 mm a po jeho úspěšném dokončení byl výsledný povrch vyexportován ve formátu .stl. Ačkoliv software VXelement obsahuje pokročilé funkce pro úpravu modelu (jako meshování, zaoblování hran, filtrace šumu atd.), byla snaha získat naměřená data v jejich surové podobě, bez jakýchkoliv následných zásahů softwaru skeneru. Důvodem bylo, že pro následné zpracování byl použit specializovaný software Geomagic Design X, který má výrazně vyšší možnosti zpracování dat. Proto jsem při exportu nastavila parametry,

jako *Optimize scan mesh*, *Decimate scan mesh*, *Boundaries optimization*, *Auto-fill holes* a *Remove isolated patches* na nulovou hodnotu.

4.2 Fotogrammetrické doplnění modelu

Po úspěšném dokončení skenování nastal problém v horní části končetiny, kde chyběla vnitřní část modelu v místě kloubu. Důvodem byl zejména omezený prostor a povrch kosti, který skener nebyl schopen podrobně zachytit. Proto byla pro účely doplnění modelu využita digitální fotogrammetrie, která umožnila doplnit chybějící data z laserového skenování. Pro měření byl využit digitální full-frame fotoaparát Nikon D850 společně s objektivem Nikkor 50mm f/1.8G AF-S. Celkem bylo pořízeno 80 snímků, které zachycovaly chybějící část modelu. Následně jsem snímky zpracovala s využitím programu Agisoft Metashape Professional. V rámci zpracování software umožňuje automatické zalícování jednotlivých snímků, identifikaci targetů skeneru na povrchu a následně podrobnou tvorbu hustého bodového mračka povrchu končetiny. Vzhledem k potřebě následného zalícování výsledného modelu s povrchem získaným z laserového skenování a potřebou definice měřítka fotogrammetrického modelu byly využity targety z laserového skenování. Jejich poloha byla získána po exportu z programu VxElements a umožnila tak získat doplněný povrch, který přesně navazuje na výstup z laserového skenování. Výsledná dosažená průměrná odchylka poloh jednotlivých bodů dosahovala hodnoty 0,39 mm. Stejně jako v případě dat z laserového skenování bylo vyexportováno bodové mračno v surové podobě tak, aby bylo možné provést následné úpravy až v programu Geomagic Design X. Export byl proveden ve formátu .e57.



Obrázek 10 - Husté bodové mračno z fotogrammetrie použité pro doplnění modelu z laserového skenování

5 Tvorba modelu dolní končetiny a jeho následná úprava

Při další práci s modelem byl využit počítačový program Geomagic Design X, což je profesionální software umožňující implementovat jednotlivé kroky reverzního inženýrství v jednom prostředí – od importu získaných dat, jejich zpracování, začištění, doplnění až po tvorbu následných parametrických modelů. Tento program tak propojuje možnosti parametrického CAD modeláře, funkcí pro zpracování 3D naskenovaných dat, pokročilých funkcí pro jejich editaci, hodnocení dosažené přesnosti až po následnou přípravu pro výrobní procesy.

Model nohy bude složen z dvou dílů, které budou vytvářeny jednotlivě a následně spojeny do uceleného modelu nohy.

- Model kosti
- Model dolní končetiny (masa)

5.1 Model kosti

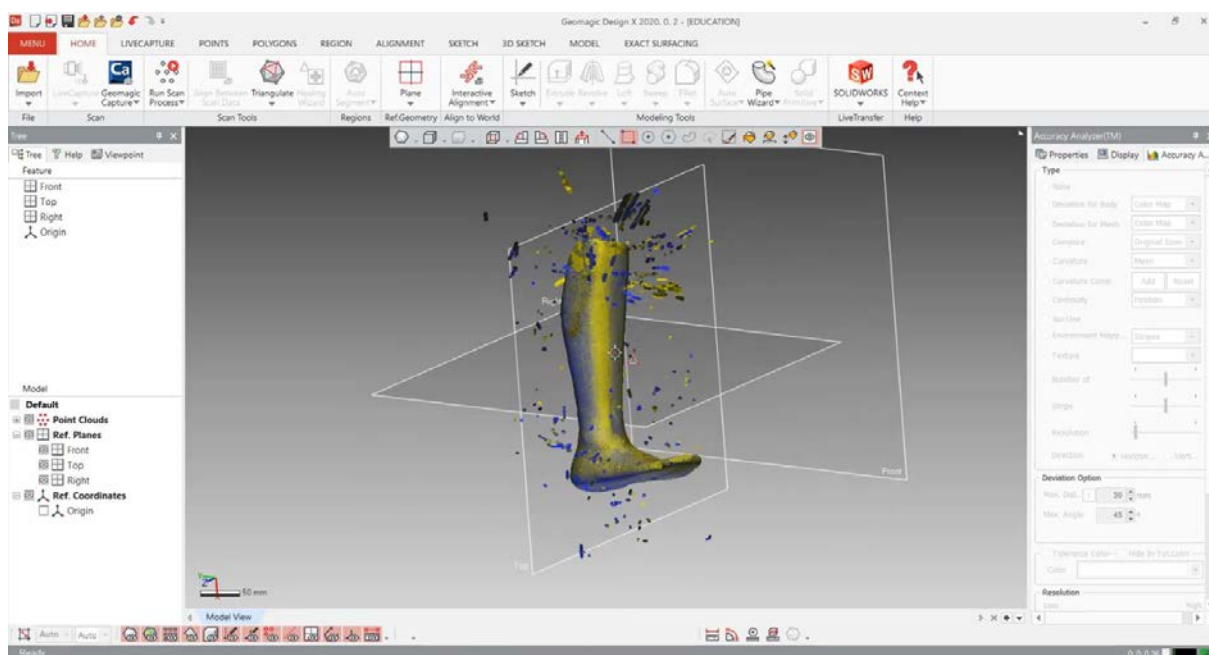
Prvním krokem bylo vytvoření přesného parametrického modelu kosti, která prochází končetinou. Jak již bylo řečeno, v rámci práce bude využita původní kost z testovací figuríny P6. Z tohoto důvodu bylo třeba zjistit přesné rozměry existující kosti a následně vytvořit její věrný parametrický model, který bude následně využíván v rámci dalších fází zpracování. Kost byla vymodelována na základě výkresové dokumentace (viz. Obrázek 11), která byla poskytnuta vedoucím diplomové práce. Modelace byla provedena přímo v softwarovém prostředí programu Geomagic Design X, přičemž cílem bylo zajistit její vhodnou orientaci vůči souřadnému systému modelu tak, aby i výsledný model byl vhodně orientován pro následné činnosti (viz. Obrázek 12). Výsledná kost byla vyexportována ve formátu .stl a použita v rámci dalších fází zpracování.

5.2 Model dolní končetiny

Následující kapitola popisuje podrobně jednotlivé fáze a hlavní kroky pro tvorbu modelu vybrané končetiny figuríny P6. Vzhledem k zaměření práce jsou podrobněji popsány jednotlivé fáze a kroky zpracování zejména v prostředí programu Geomagic Desing X.

5.2.1 Zpracování dat z laserového skenování

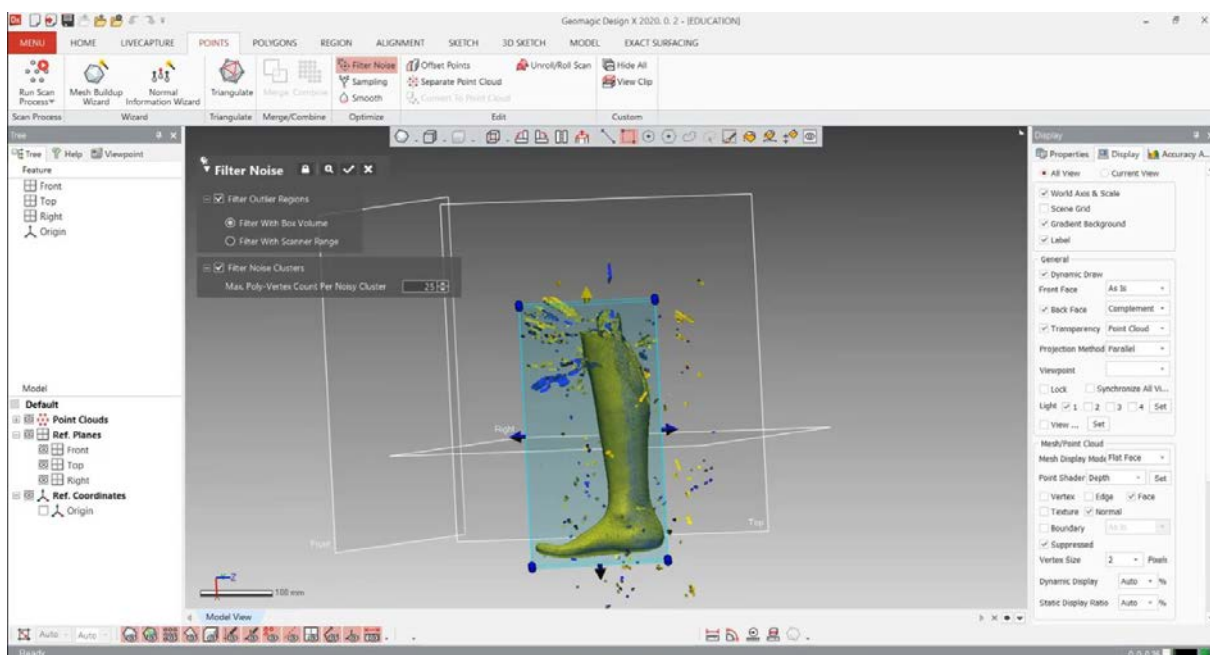
V prvním kroku byla surová data z laserového skenování vyexportovaná z programu VXELEMENTS a následně nahrána do prostředí programu Geomagic. Ačkoliv software exportuje přímo trojúhelníkovou síť ve formátu .stl, při importu byly použity pouze body tvořící tento povrch. Důvodem byla jak potřeba následné kombinace s fotogrammetrickým výstupem, který byl pouze v podobě hustého bodového mračka, tak následná úprava dat a tvorba povrchu přímo v programu Geomagic.



Obrázek 13 - Základní data nahraná z VXELEMENTS

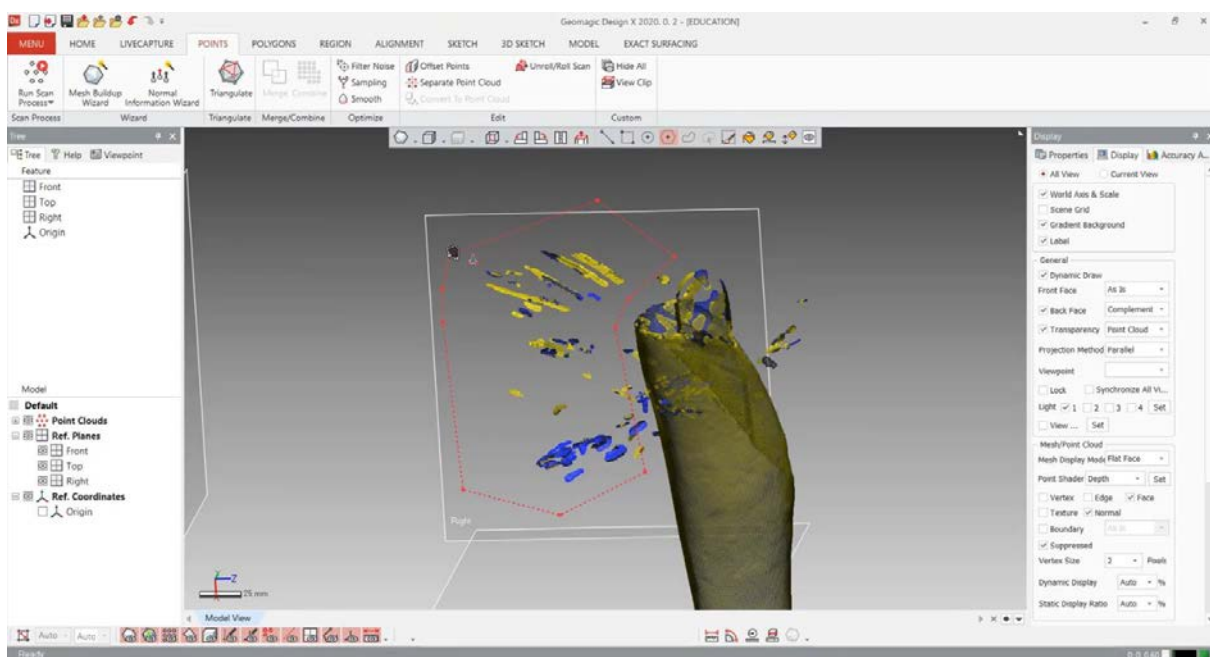
Vzhledem k tomu, že získaná data byla exportována v co nejméně upravené podobě, obsahovala výrazný šum, chybně určené polohy bodů, výrazně odlišnou hustotu v různých částech modelu či body uvnitř končetiny. Prvním krokem tak bylo vyčištění získaného povrchu. K čistění dat byla použita funkce *Filter Noise*, kdy byl vytvořen

pomyslný box kolem modelu dolní končetiny (viz. Obrázek 14), a veškerá data, která se nenacházela uvnitř tohoto boxu, byla odstraněná.



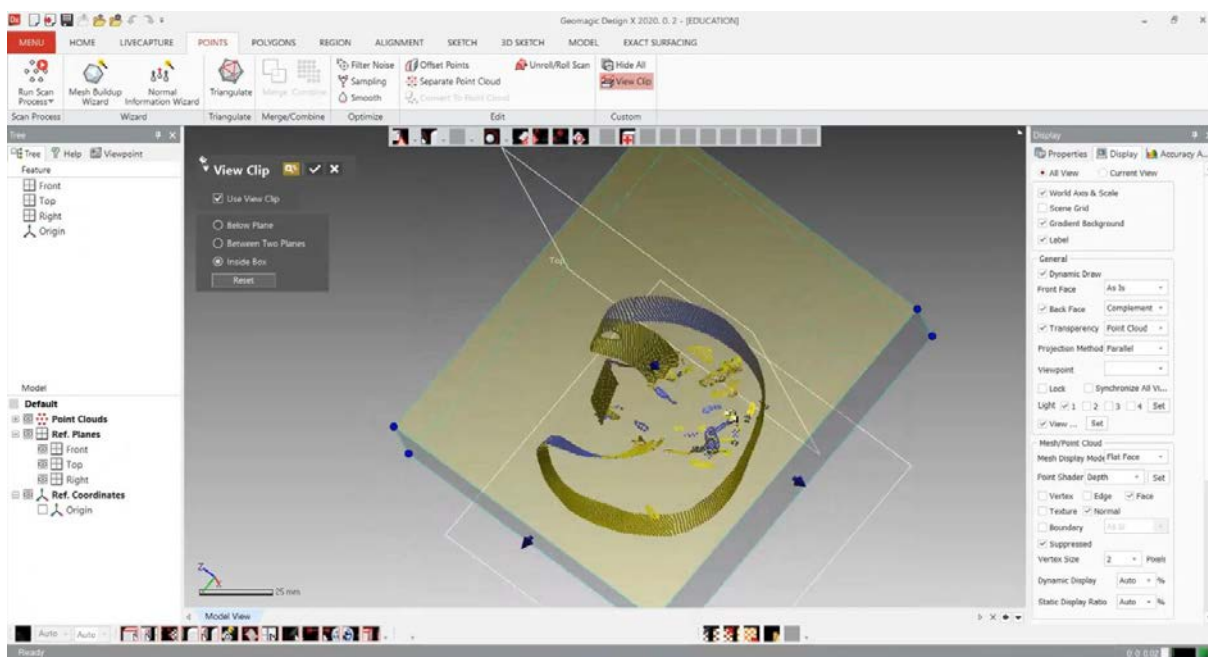
Obrázek 14 - Zčištění dat pomocí Filter Noise

Funkce *Filter Noise* vyčistila data jenom z části, ostatní nerelevantní body bylo třeba vyčistit ručně. Skupiny jednotlivých bodů, které nebyly součástí dolní končetiny byly manuálně ořezány (viz. Obrázek 15) formou přímého výběru.



Obrázek 15 - Manuální ořezání bodů dolní končetiny

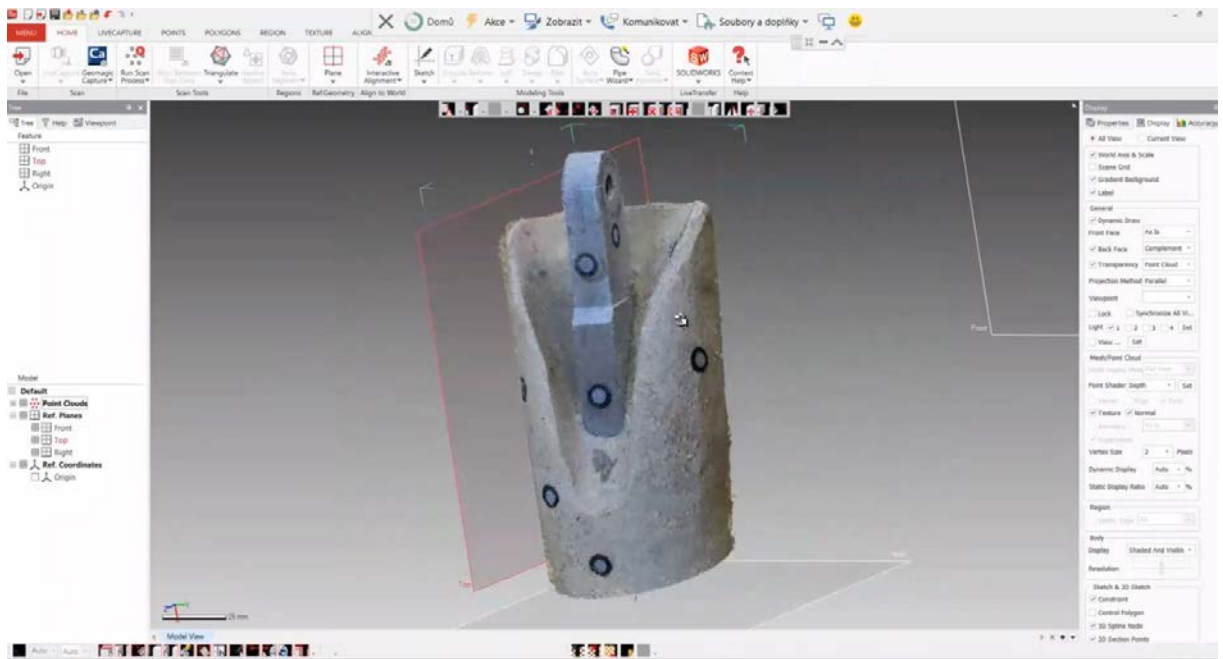
Po ořezání veškerých nevhodných dat vně nohy, bylo třeba zjistit, zda se nenachází nějaký šum v oblasti masa, do kterého se vsouvá kost. Použila jsem funkci *View Clip*, který mi umožnil nohu rozřezat na části a nahlédnout dovnitř. Tak jsem mohla očistit končetinu i uvnitř od nežádoucích a nepřesných dat.



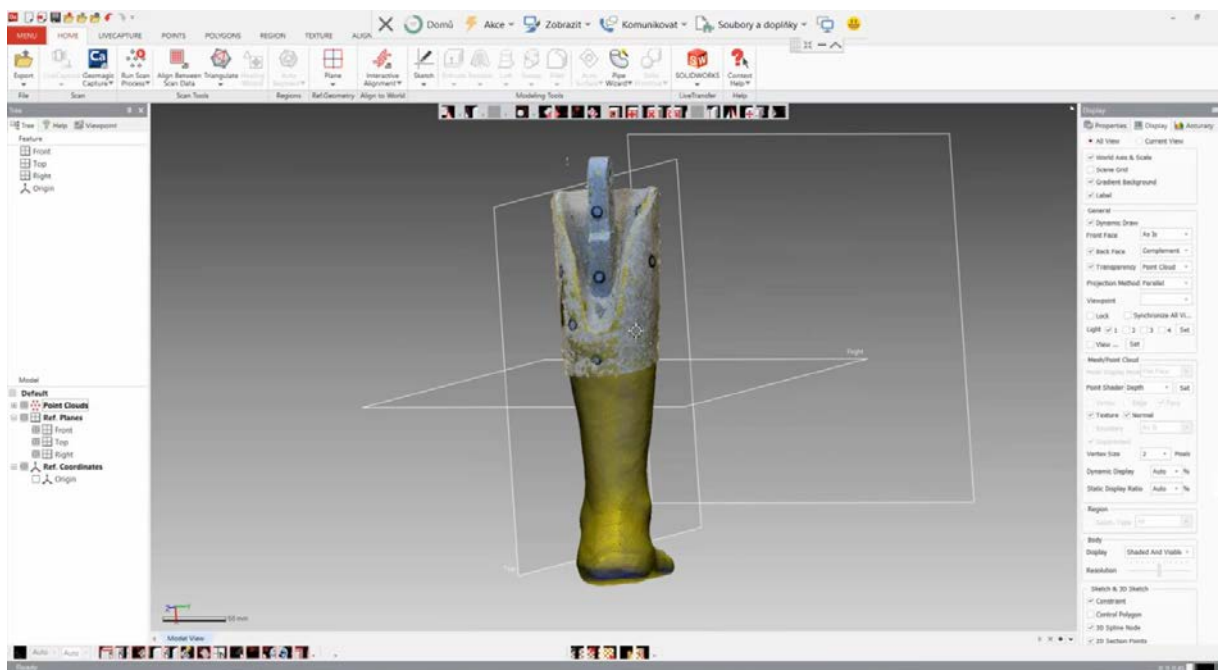
Obrázek 16 – Řez – problematická část dolní končetiny

5.2.2 Zpracování dat z fotogrammetrického měření

Skenování části končetiny, kde do masa vstupuje kost, bylo velmi náročné a výsledek nebyl dostačující. Z toho důvodu jsem tuto část nahradila modelem získaným pomocí fotogrammetrie. Obě části jsem poté spojila a vytvořila tak ucelený model končetiny. Na následujících obrázcích je vidět výsledné husté bodové mračno povrchu části končetiny z fotogrammetrického měření a jeho návaznost na naskenované body končetiny z laserového skeneru. Výstupy jasně ukázaly rozdílnou podobu výstupů z laserového skenování a fotogrammetrie. Fotogrammetricky zrekonstruovaný povrch vykazoval výrazně vyšší míru šumu, vyšší hustotu bodového mračna a nejednoznačně určený povrch (vyšší míra variace bodů na povrchu). Kroky následného zpracování tak byly provedeny s cílem odstranění zjevných chyb a sjednocení podoby s výstupy z laserového skenování.

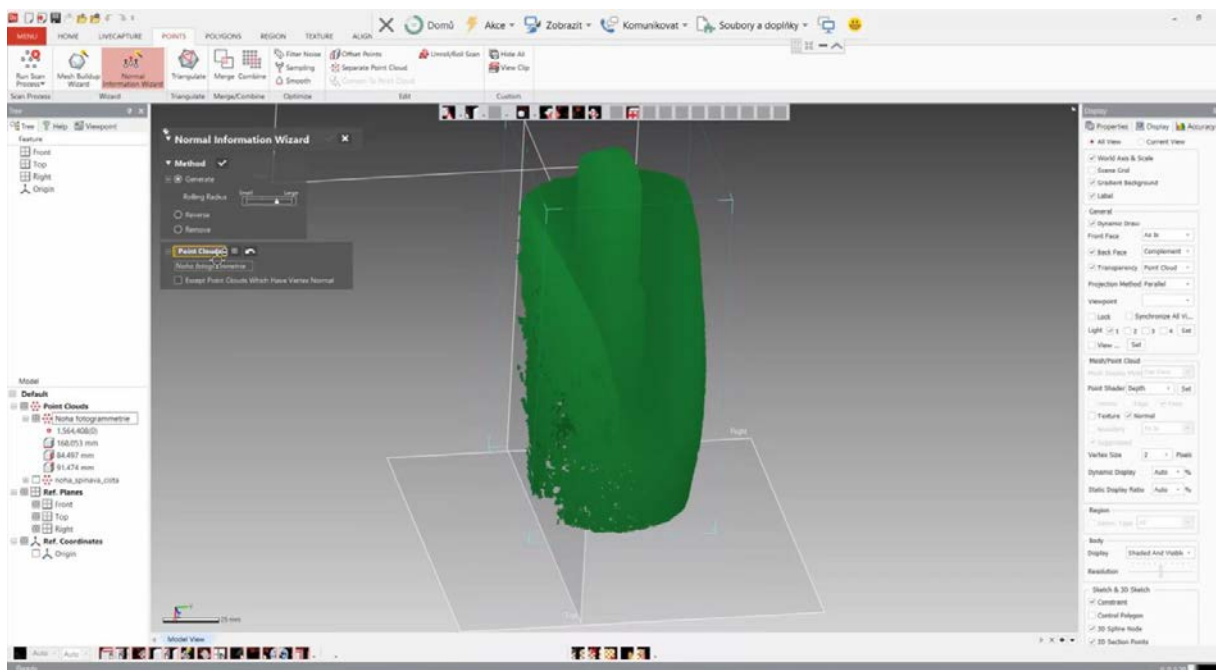


Obrázek 17 - Část modelu vytvoření pomocí fotogrammetrie



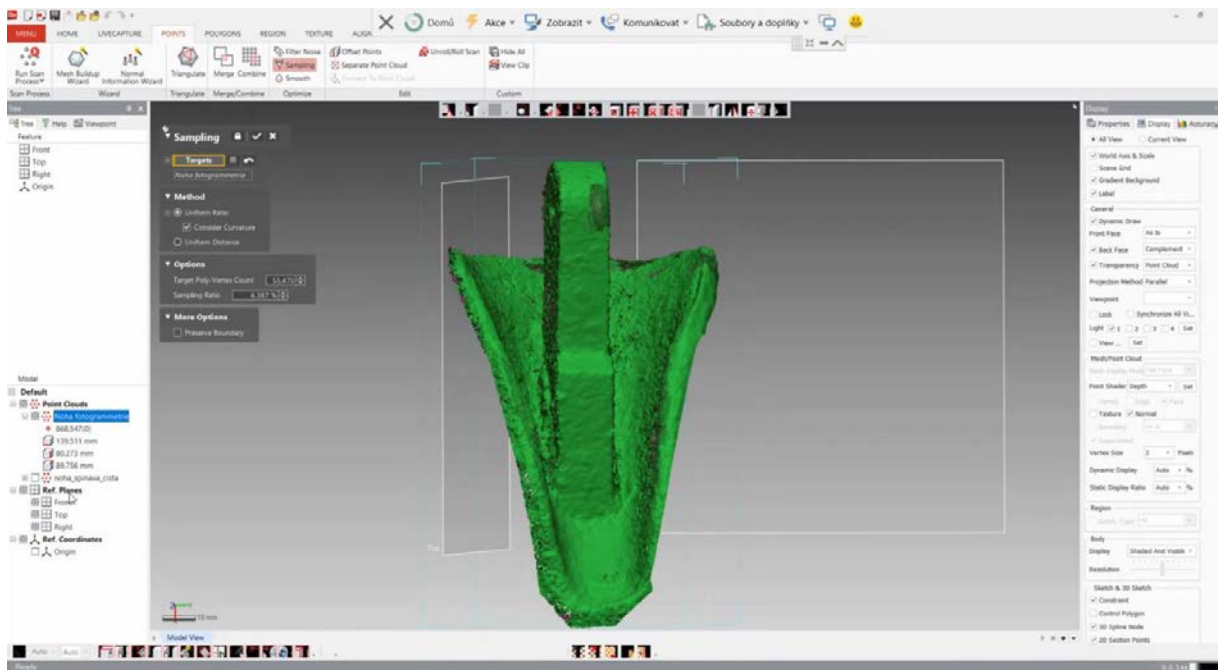
Obrázek 18 - Kombinace naskenované části modelu a části získané fotogrammetrií

Jelikož bodové mračno z fotogrammetrie obsahovalo výrazně vyšší míru šumu, použila jsem znovu funkci *Filter Noise* k jeho odstranění. Následně jsem provedla i opravu normálové informace s využitím funkce *Normal information wizard*, která v některých částech modelu byla určena chybně.



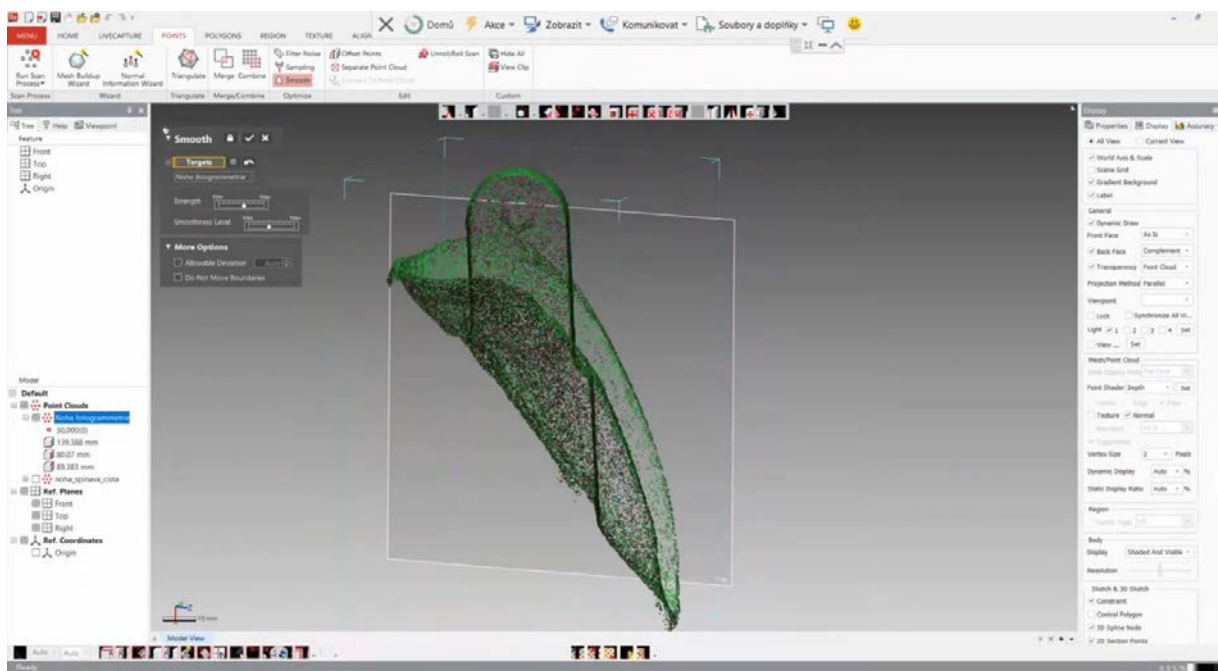
Obrázek 19 – Funkce Normal information wizard

Vzhledem k výrazně vyšší podrobnosti výstupů z fotogrammetrie, byla na část výplně u kosti použita funkce *Sampling*, která redukuje počet bodů. Cílem bylo dosáhnout podobné podrobnosti jako u laserového skenu (rozlišení 1 mm) a současně dosáhnout rovnoměrné hustoty bodů povrchu. Ve výsledku tak došlo k redukci z cca 800 tisíc bodů na 50 tisíc bodů. Nepřímým výsledkem bylo i snížení výpočetních nároků dalších fázích zpracování. V posledním kroku jsem ořízla fotogrammetrický model na část, která přímo doplnila povrch získaný z laserového skenování.



Obrázek 20 - Funkce Sampling

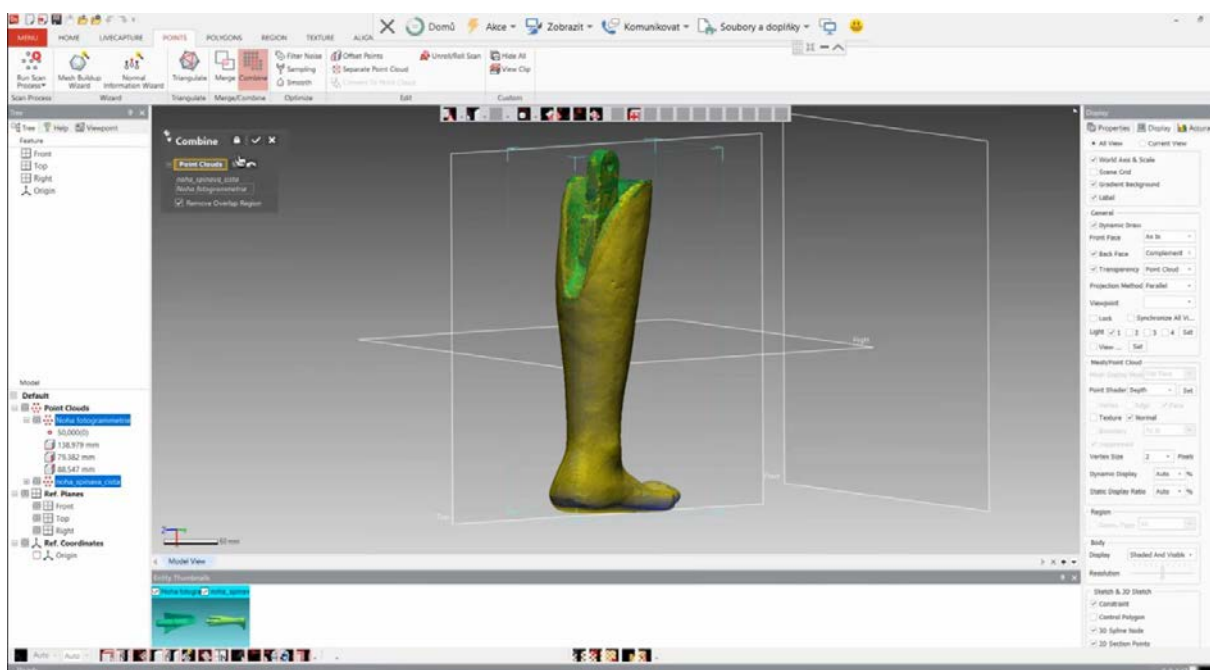
Po redukci bodů jsem se rozhodla na tento díl použít ještě funkci *Smooth*, která vyhladila a odstranila výrazné odchylky rekonstruovaného povrchu. V okamžiku, kdy jsem byla spokojená s kvalitou modelu části masa, do které vstupuje kost, mohla jsem ji použít k dalšímu zpracování.



Obrázek 21 - Funkce Smooth

5.2.3 Tvorba mesh modelu dolní končetiny

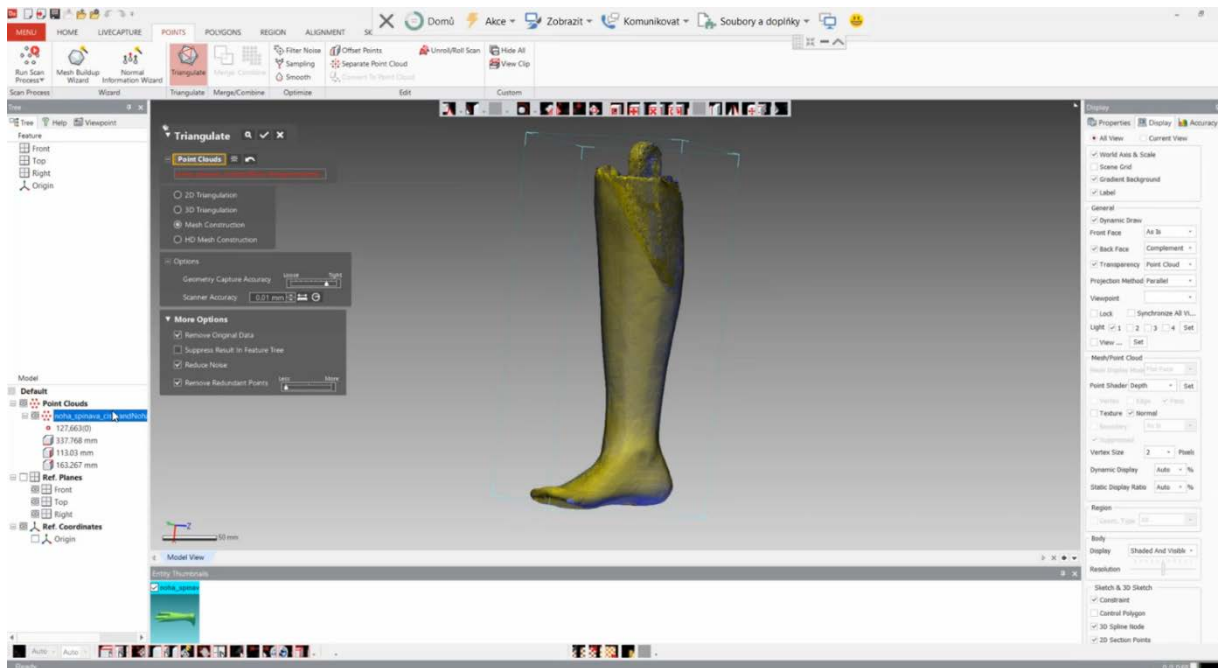
Výsledný model povrchu dolní končetiny vznikl propojením fotogrammetricky získanou částí masa s kostí a naskenovanou část končetiny. K tomu jsem využila funkci *Combine*, která oba datové soubory povrchu spojila. Velkou výhodou byl shodný souřadný systém, který byl zajištěn pomocí terčů pro laserové skenování, a tedy i vzájemné zarovnání jednotlivých dat vůči sobě. Znovu jsem využila funkci *Filter Noise*, která vzhledem k doplnění informace z obou mračen byla schopna odstranit odlehle body v místech, kde předtím nebylo dostatečné množství informací.



Obrázek 22 - Finální mračno bodů

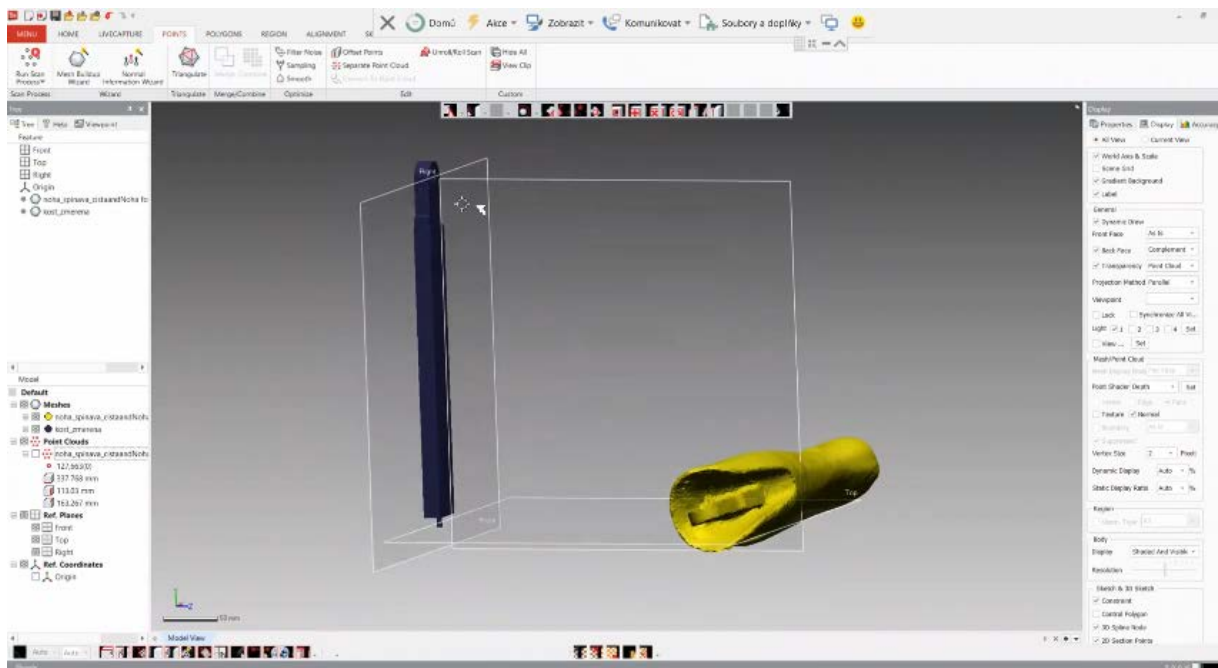
V této fázi jsem měla připravené kompletní bodové mračno končetiny, ze kterého bylo třeba vytvořit mesh (trojúhelníková síť). Program umožňuje několik úrovní triangulace ve vztahu na požadované přesnosti, kvalitě či komplexnosti rekonstruovaného povrchu. Vzhledem k tomu, že původní končetina byla již používána v rámci crash testů, tak vykazovala vysokou míru deformací, odřenin a v určitých částech i chybějící hmoty. Cílem rekonstrukce tak bylo vytvořit věrný model, který však tyto nedostatky eliminuje. Z tohoto důvodu jsem k vytvoření meshe využila funkci *Triangulate*, u které jsem požadovala *Mesh Construction*, *Scanner Accuracy* na 0,01 mm

a souhlasila jsem s *Reduce Noise* a zároveň *Remove Redundant Points* jsem nastavila na minimum.



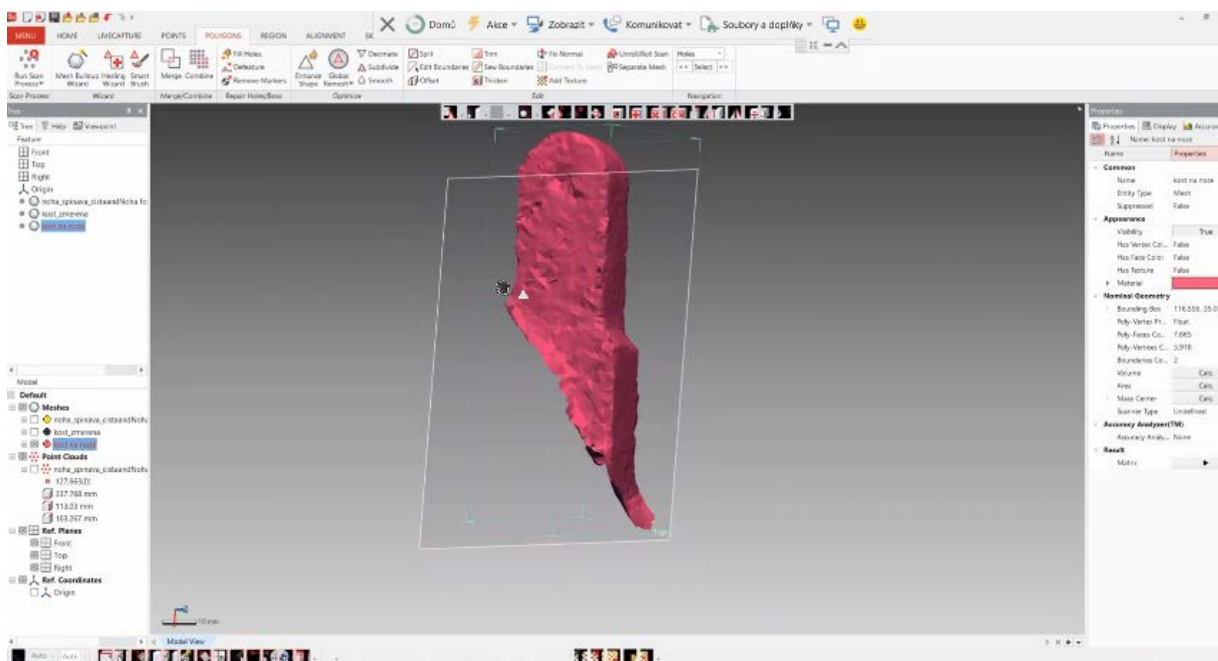
Obrázek 23 – Výsledek funkce *Triangulate*

Tímto krokem byl vytvořen základní mesh model dolní končetiny, který bylo nutné správně zalícovat s předem vymodelovanou kostí. Výstup z laserového skeneru měl sice jasně definovaný souřadný systém prostřednictvím jednotlivých terčů, avšak byl obecně natočen a posunut v prostoru. Oproti tomu parametrický model kosti byl tvořen ve vztahu k následnému požadavku tvorby formy pro odlévání a byl tak orientován korektně. Pro vzájemné zalícování tak bylo potřeba určit transformační matici (posun a otočení v prostoru) modelu. K tomuto bylo potřeba identifikovat shodné části mezi oběma modely. V tomto případě se jednalo o vrchní část kosti u kloubu, která vystupuje z masa.



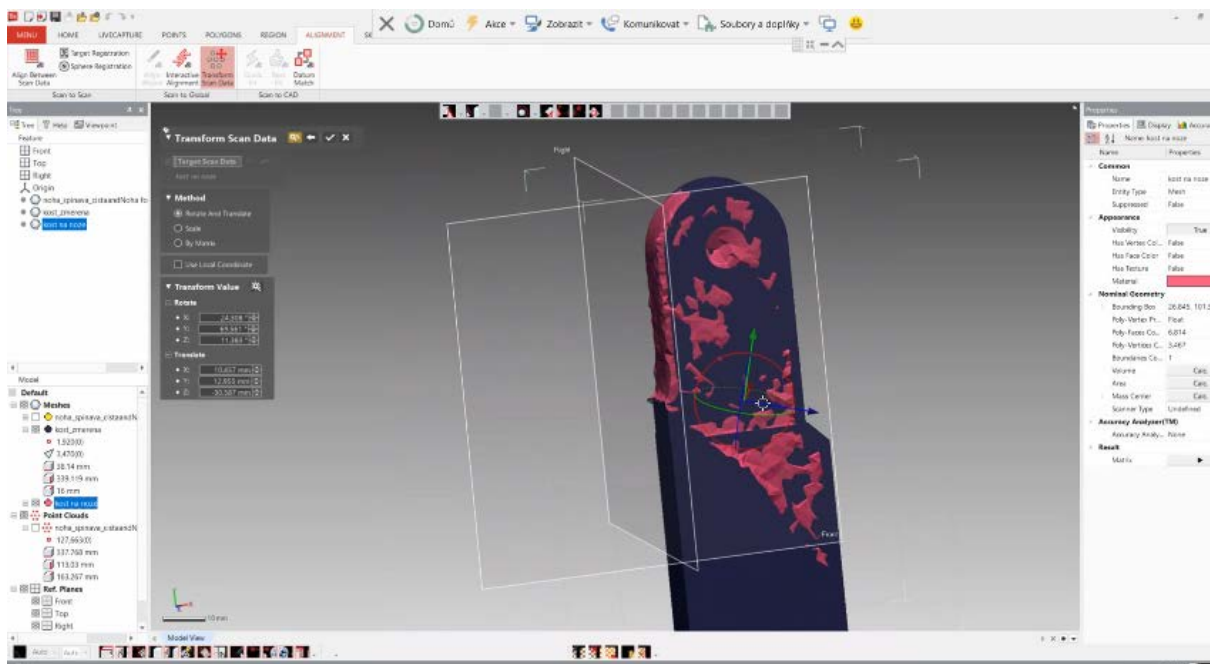
Obrázek 24 - Propojení vymodelované kosti a meshe

K zalícování vymodelované kosti s meshem bylo třeba jako první udělat výběr kosti u meshe a její částečné oříznutí. Tento výřez kosti jsem si zkopírovala a následně pracovala pouze se zkopírovaným výřezem tak, aby části s masem neovlivňovaly vlastní transformaci a její statistickou analýzu.



Obrázek 25 - Výřez kosti u meshe

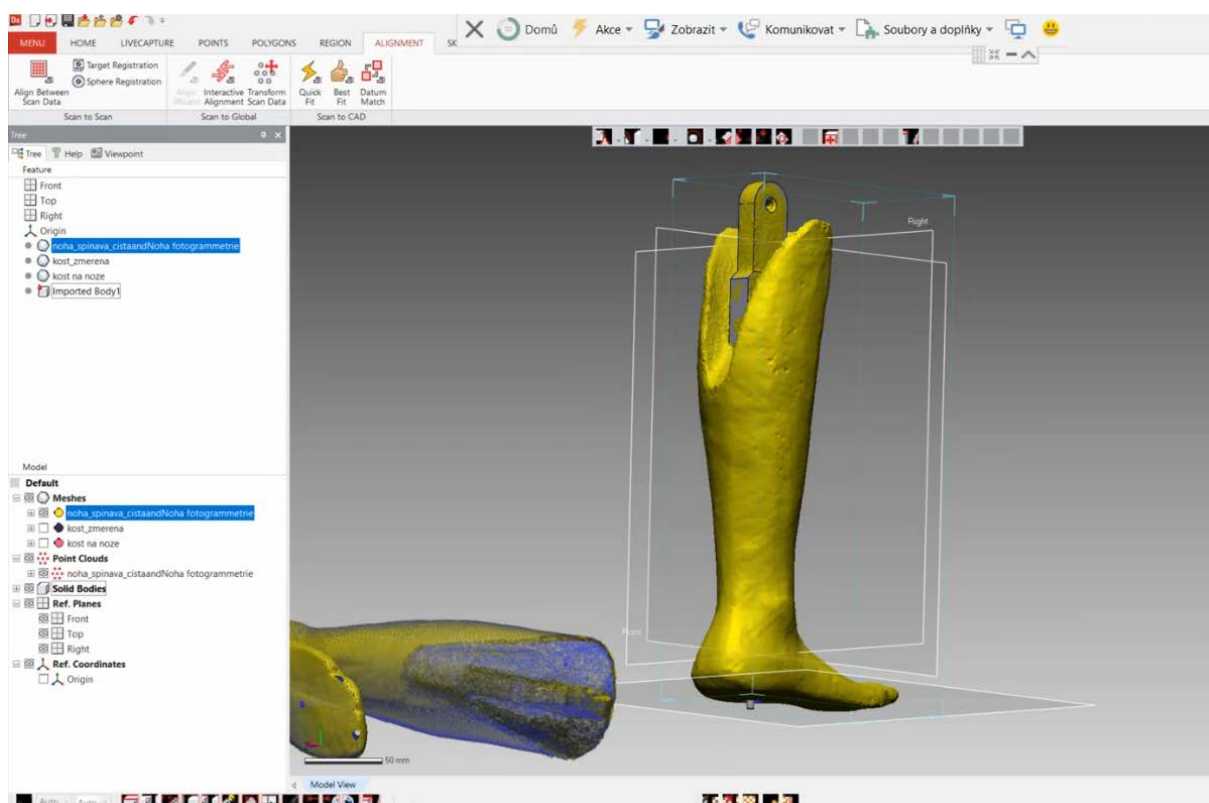
Dalším krokem bylo ořezání nepotřebných částí okolo kosti. Jednalo se o měkkou tkáň končetiny, která se potkávala s kostí. V této fázi jsem pracovala s očištěným ořezem kosti z meshe a vymodelovanou kostí. K překrytí obou kostí využiji funkci *Transform Scan Data*. Tato funkce mi umožnila pohybovat zkopírovanou částí a přiblížit se co nejvíce souřadnému systému vymodelované kosti.



Obrázek 26 - Funkce *Transform Scan Data*

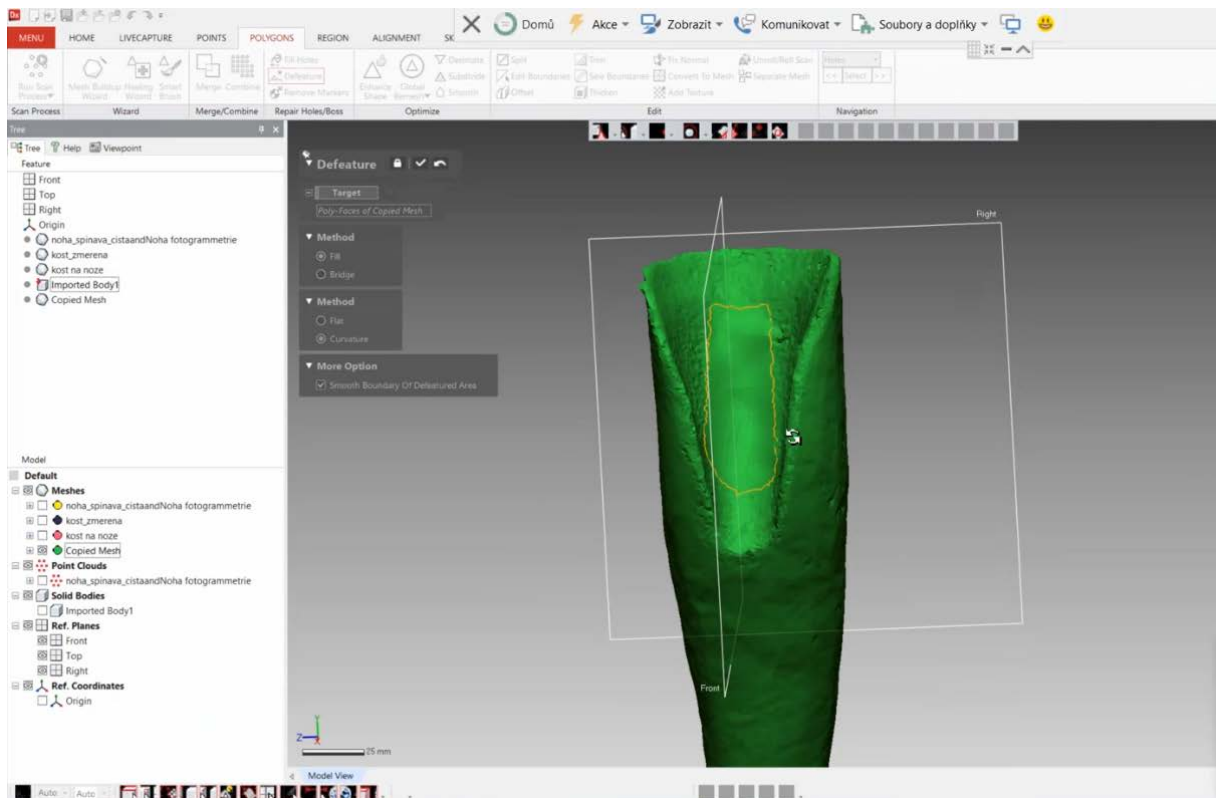
Následně jsem použila funkci *Best Fit Alignment*, která propojila obě části tak, že měly stejný souřadný systém. Pro zjednodušení zalícování výřezu meshe kosti s vymodelovanou kostí jsem určila části vymodelované kosti, které odpovídaly výřezu meshe. Program je schopen iteračním procesem provést drobné transformace a sledovat jejich vliv na celkovou střední kvadratickou odchylku mezi modely (tzv. RMS). Cílem funkce je tuto odchylku minimalizovat. Konečná střední kvadratická odchylka zarovnání byla 0,2 mm.

Následně bylo třeba do stejného souřadného systému posunout i celý mesh dolní končetiny. V *Properties* výřezu meshe kosti jsem získala transformační matici, která popisovaly posunutí a pootočení výřezu meshe kosti. Tuto transformační matici jsem vyexportovala. U meshe celé dolní končetiny pomocí funkce *Transform Scan Data* jsem vybrala možnost *By Matrix* a pomocí vyexportované matice dostala mesh do stejné polohy jako výřez kosti meshe a tím i do stejného souřadného systému vymodelované kosti.



Obrázek 27 - Zalícování meshe končetiny a vymodelované kosti

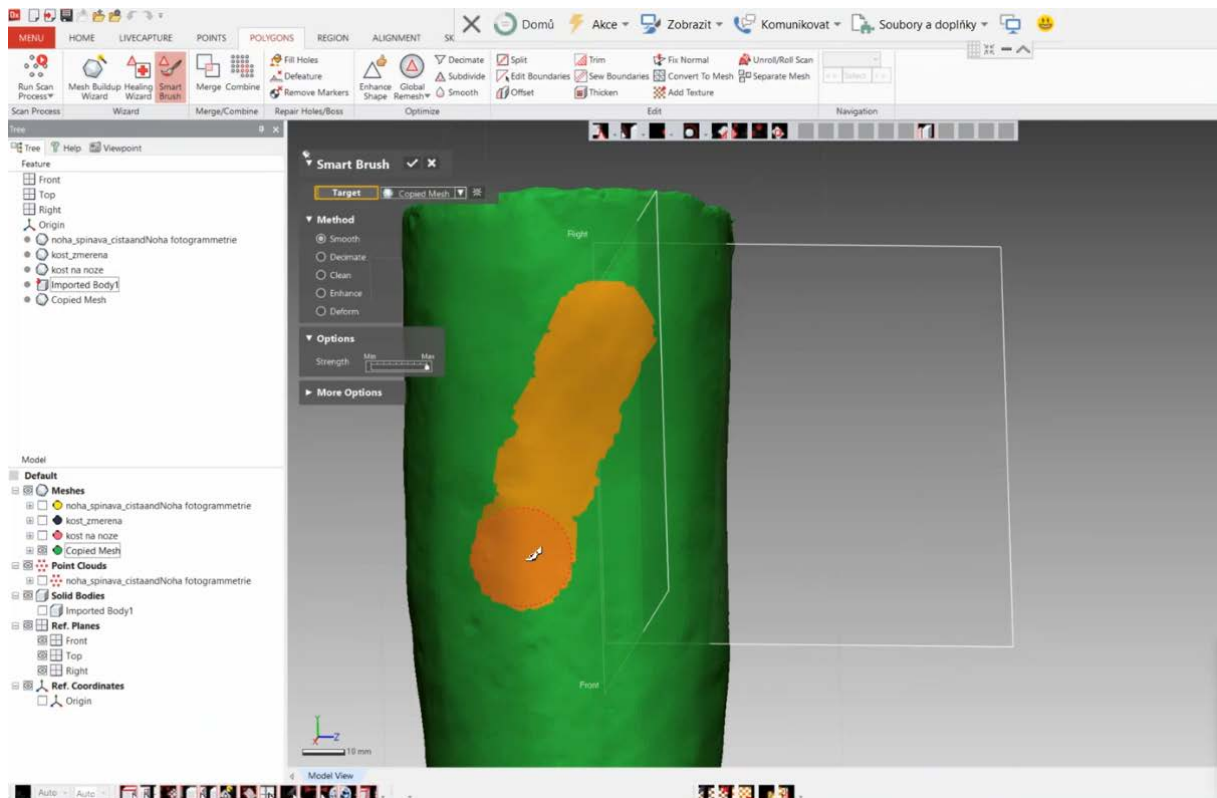
Pro další práci s meshem a pro vytvoření modelu dolní končetiny bylo třeba odstranit z meshe znázorněnou kost. K odstranění kosti z meshe jsem využila funkci *Defeature*, která kost nejen odstranila, ale zároveň i vyplnila díru, která by po odstranění části meshe vznikla (viz. Obrázek 28). Při vyplnění bylo možné vzít do úvahy normálové informace okolních ploch a jejich směřování tak, aby výsledné vyplnění plynule navazovalo na své okolí.



Obrázek 28 - Funkce Defeature

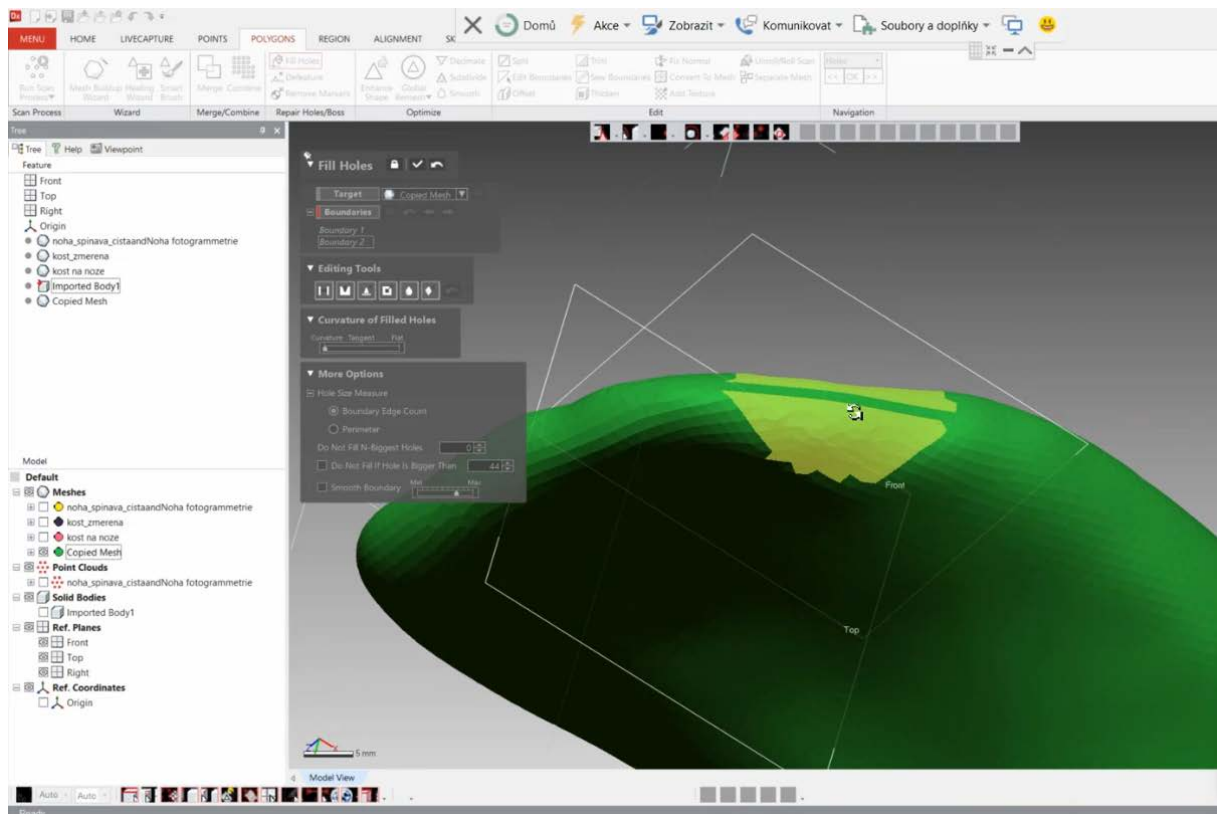
Stejnou funkci jsem použila i pro zadělání otvoru po kosti v oblasti paty. Využila jsem ještě funkci *Global Remesh*. Funkce v principu provede opětovnou tvorbu meshe, avšak se zohledněním původního meshe a ve výsledku tak umožnila uzavření veškerých drobných otvorů, které se na něm nacházely. Díky tomu jsem získala mesh pouze dolní končetiny vhodný k dalším úpravám.

Jak již bylo řečeno, povrch končetiny nebyl dokonalý a tento fakt se projevil i na výsledném struktuře meshe. Nacházely se na něm různé nerovnosti, odřeny a deformace způsobené degradací materiálu, které pro vytvoření výsledného modelu končetiny a následné formy byly nežádoucí. K vyhlazení těchto nerovností se v softwaru nachází funkce *Smart Brush*. Tuto funkci jsem postupně využila na celou dolní končetinu. V principu se jednalo o snížení komplexnosti povrchu při zachování jeho tvarového průběhu. Docházelo tak k postupnému zahlazení povrchu modelu.



Obrázek 29 - Funkce Smart Brush

Na původní dolní končetině chyběl jeden z prstů. Při tvorbě modelu jsem však požadovala kompletní končetinu, proto bylo třeba chybějící malíček domodelovat. V prvním kroku byly odstraněny části povrchu, které zjevně zachycovali odtrženou část prstu. Následně jsem využila funkci *Fill Holes* (viz.Obrázek 30), pomocí které jsem vytvořila pomyslný most a následně doplnění meshe, který svým tvarem připomínal chybějící malíček. Výhodou zvoleného přístupu byla možnost zachování tvarového průběhu, který se v místech, kde tato informace chybí, určí na základě okolních částí povrchu.



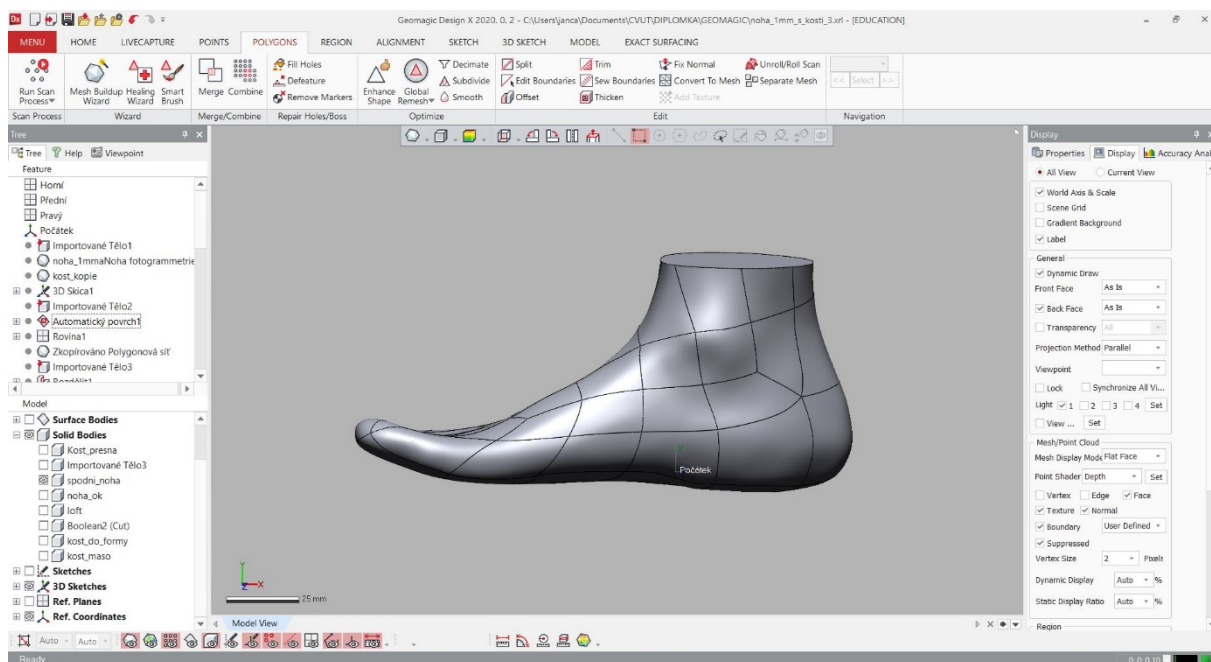
Obrázek 30 - Funkce Fill Holes

5.2.4 Tvorba parametrického modelu dolní končetiny

Vzhledem k tomu, že dalším krokem byla tvorba formy pro odlití končetiny, bylo třeba výsledný mesh model převést na objemové těleso, které umožnilo booleanovské operace, které byly nezbytné pro vytvoření jednotlivých částí formy. Vzhledem k charakteru povrchu končetiny a její struktuře nebylo možné využít klasický postup parametrického modelování. Bylo nutné aplikovat tvorbu tělesa, které je popsáno pomocí matematického modelu s využitím křivek. Šlo o tzv. Non-uniform rational basis spline (NURBS), což je matematický model, běžně používaný v počítačové grafice, pro generování a reprezentování křivek a ploch, které nabízejí velkou flexibilitu a přesnost při manipulaci jak s analytickými, tak s volnými tvary. V principu je povrch tělesa popsán za pomoci souboru křivek NURBS. Každá z křivek je definována svým pořadím, skupinou kontrolních bodů s různou vahou a uzlovými vektory. Jeho podoba je do velké míry závislá na počtu křivek použitých pro jeho definici, množstvím kontrolních bodů. Tyto kontrolní body je následně také možno upravovat dle potřeby.

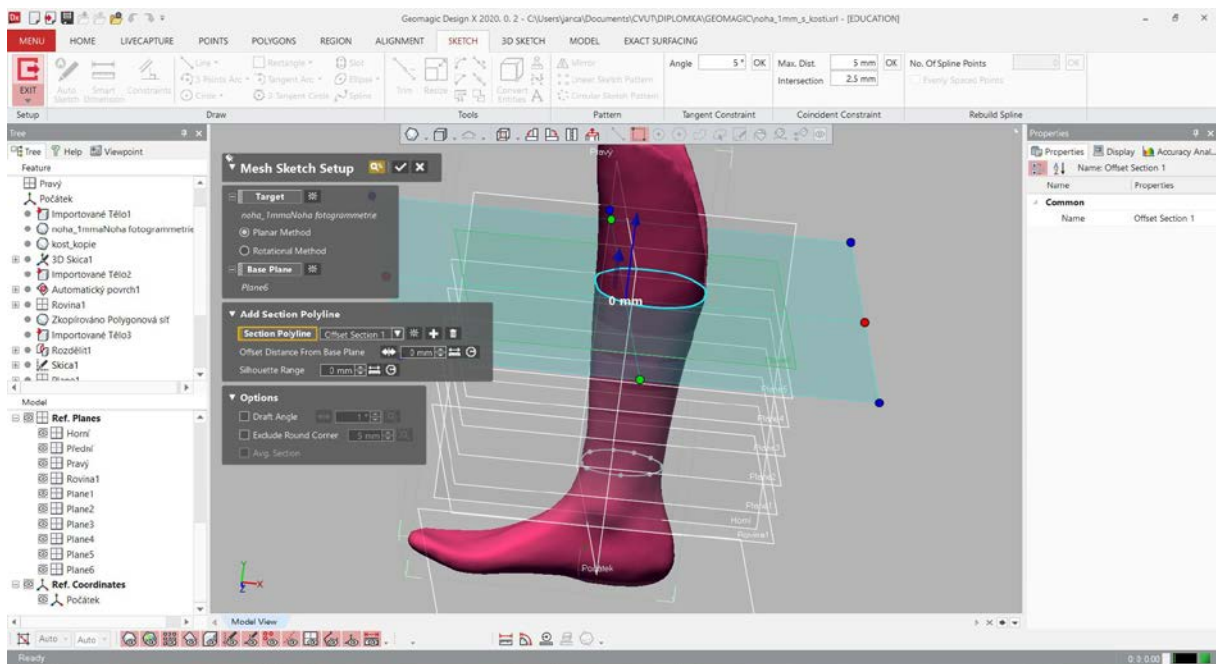
Ačkoliv tvar končetiny byl do velké míry organický, zejména ve své spodní části, tak holenní část vykazovala po převedení na NURBS plochu vysokou míru deformací, které vznikly na původní končetině z důvodu postupné degradace materiálu i jejím používání v rámci nárazových testů. Holení část tak byla nahrazena s využitím parametrického modelování tzv. *loftem*, tedy propojením jasně definovaných profilů.

Jako počátek byla zvolena oblast nad kotníkem, kdy jsem přes rovinu uřízla spodní část nohy V místě řezu v oblasti kotníku (viz. Obrázek 31) jsem pomocí *Mesh sketch* vytvořila profil, který byl definován promítnutím konce dolní části vzniklého tělesa do roviny řezu.



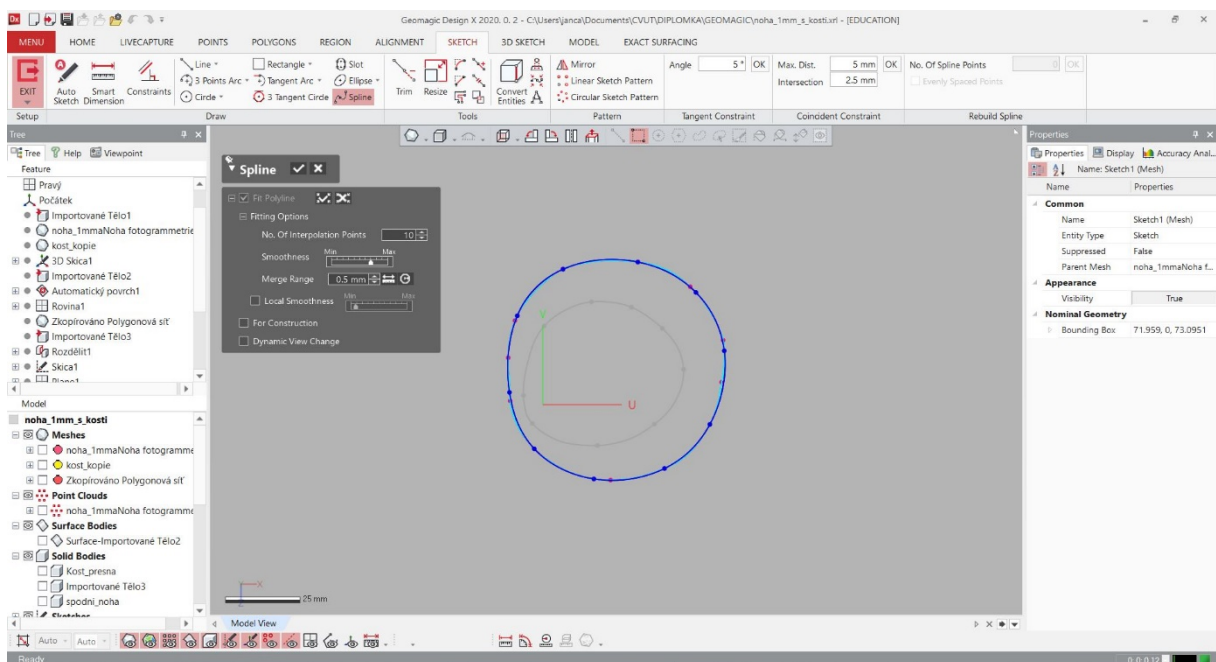
Obrázek 31 - Oříznuté chodidlo

Pro zachování dostatečné věrnosti a podrobnosti se současným postihnutím změny průběhu horní části holeně jsem definovala sérii rovin, které sloužily jako řezy pro určení profilů pro následné vytažení (*loft*). K rozdělení jsem využila funkci *offset* a použila celkem šest rovin v rozestupu 20 mm (viz. Obrázek 32).



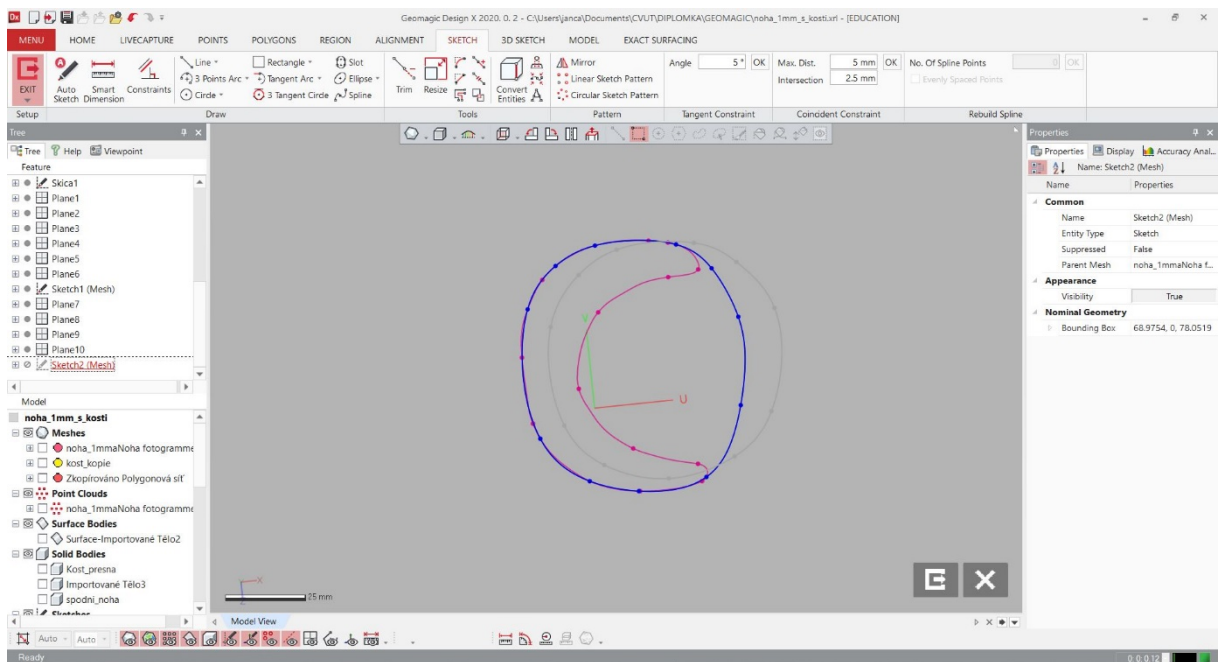
Obrázek 32 - Rozdělní rovin na holení části končetiny

V místech, kde holenní část protínala jednotlivé roviny, bylo možné provést prolnutí meshe a následně tento tvar aproximovat křivkou. Pro každou křivku byl definován počet řídicích bodů, který byl v rámci všech řezů konstantní, přičemž softwaru provedl tzv. *fitování* automaticky.

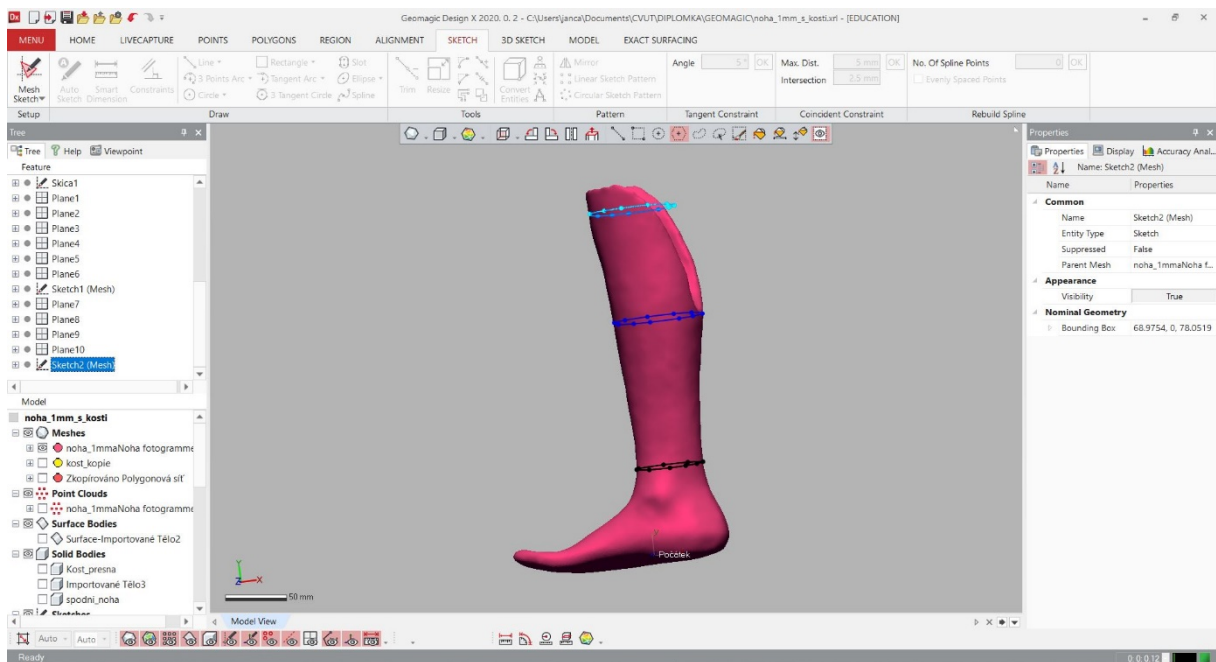


Obrázek 33 – Prfil (Spline) na obvodu končetiny

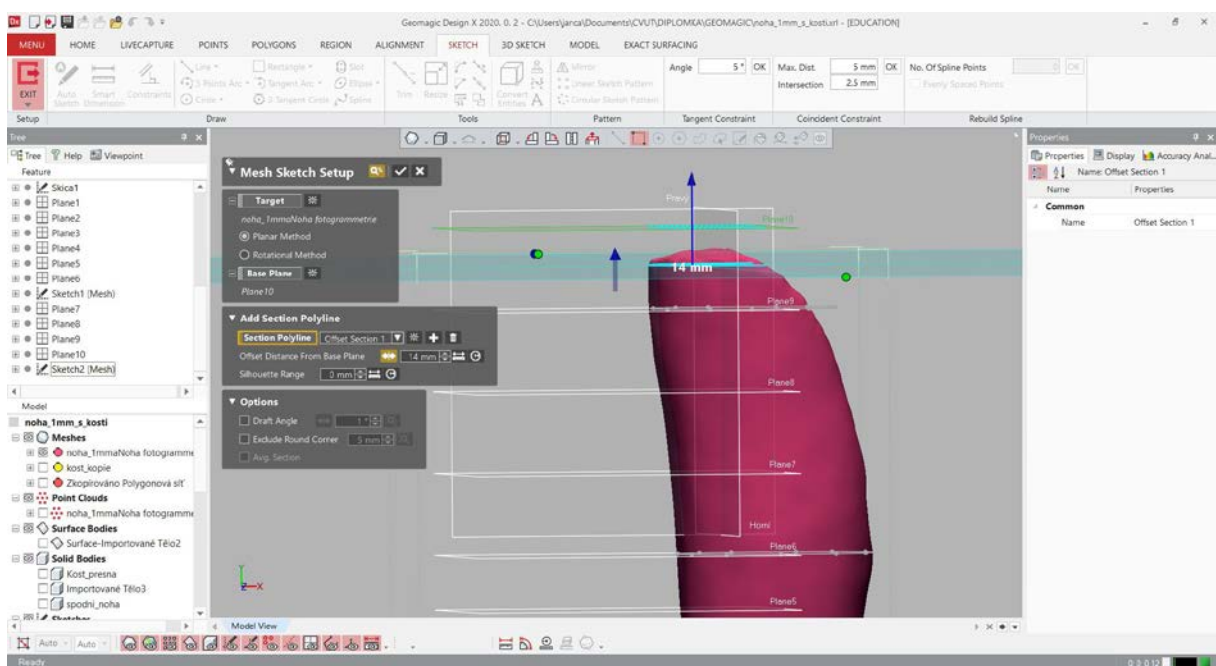
V horní části končetiny bylo třeba zohlednit tvar holenní části. Jednalo se o těleso, které se nacházelo v části, kde vystupovala kost oříznuta plochou. Byla tedy potřeba definovat chybějící části profilů. V místech, kde obvod nepřipomínal kruh, jsem z reálného obvodu vytvořila křivku podobnou kruhu na základě informací z přecházejících řezů. Důvodem byla právě potřeba veškeré křivky propojit pomocí funkce *Loft*.



Obrázek 34 – Profily ve vrchní části končetiny



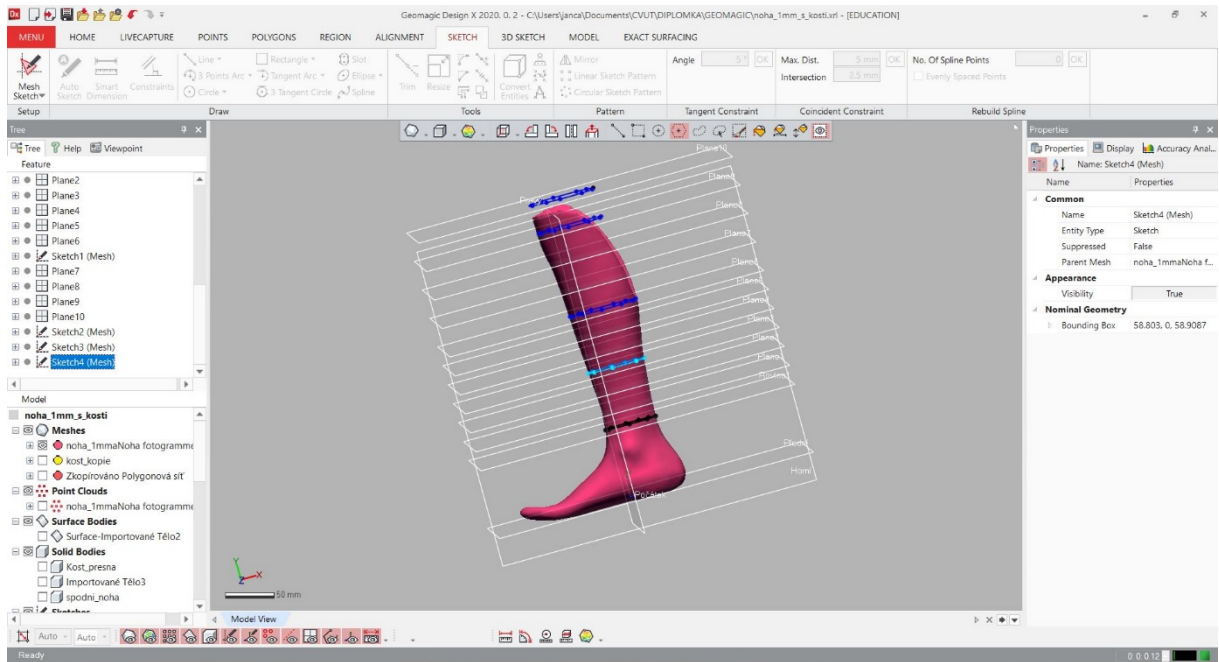
Obrázek 35 - Poslední reálný sketch



Obrázek 36 - Posunutí roviny – mesh sketch

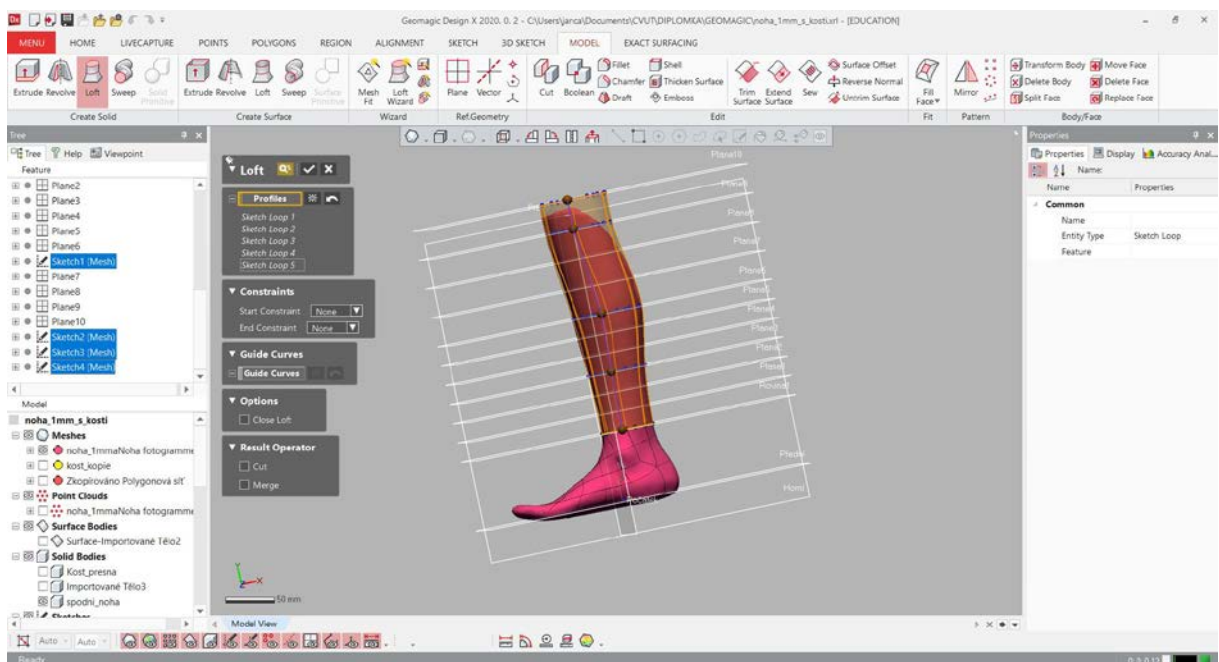
Poslední profil, který jsem potřebovala pro vytvoření následného loftu, se nacházel až nad modelem končetiny. Proto jsem obrys končetiny vytvořila mesh sketchem

v rovině nad končetinou pomocí prolnutí průřezu s rovinou těsně před koncem končetiny.

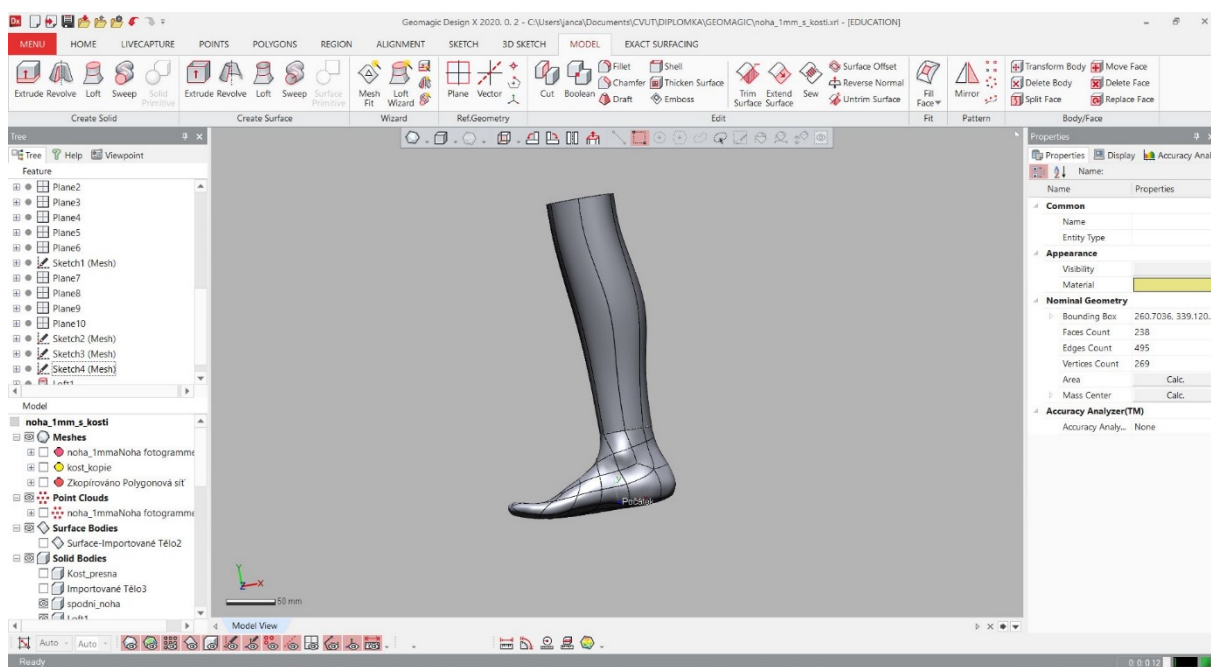


Obrázek 37 - Sketche připravené pro loft

Po vytvoření všech sketchů jsem použila funkci *Loft* pro vytažení modelu skrz mnohu vytvořené sketche. Touto funkcí jsem získala dokonale hladký model, který tvarem odpovídá původní končetině.

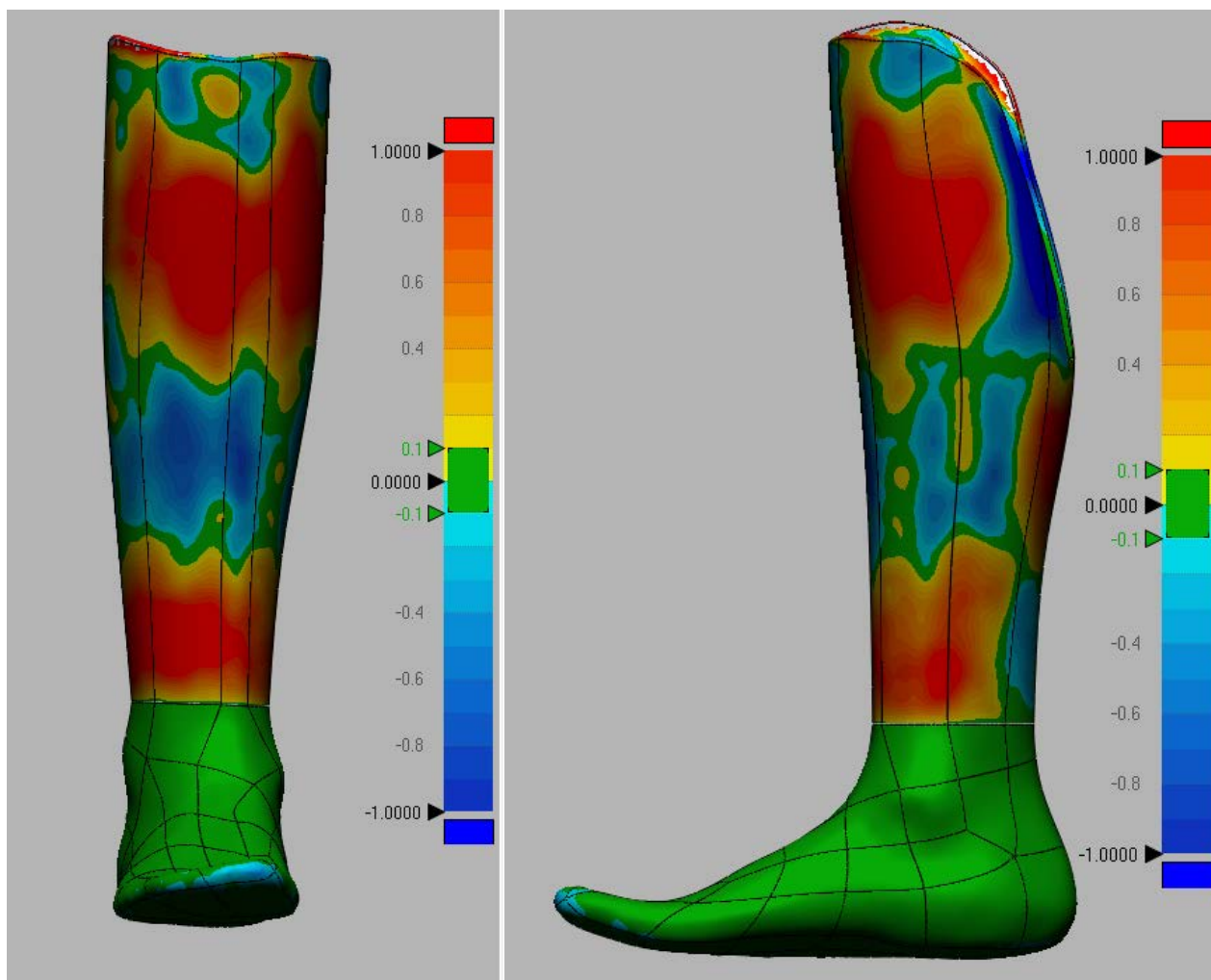


Obrázek 38 - Vytvoření loftu



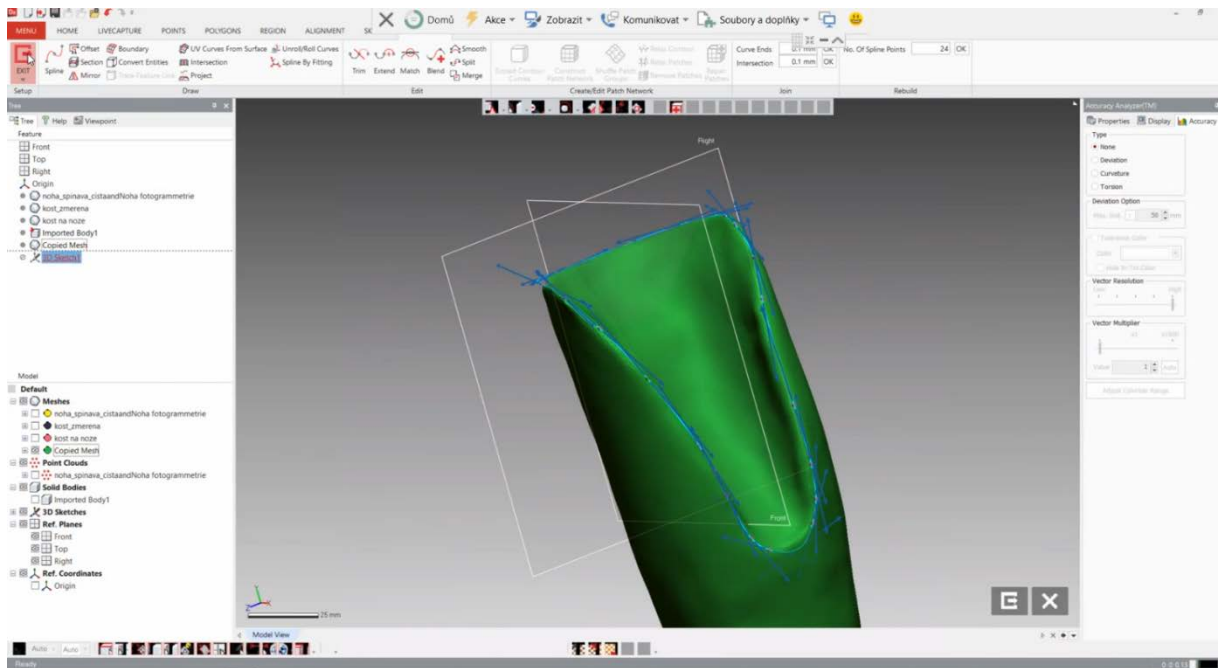
Obrázek 39 – Loft

Na dalším obrázku (viz. Obrázek 40) je vidět porovnání tvarových odchylek původní končetiny a mnou vytvořeného modelu. Odchytky, které vznikly byly naprosto zanedbatelné, a proto bylo možné použít nově vzniklou holenní část a nahradit jí část původní.

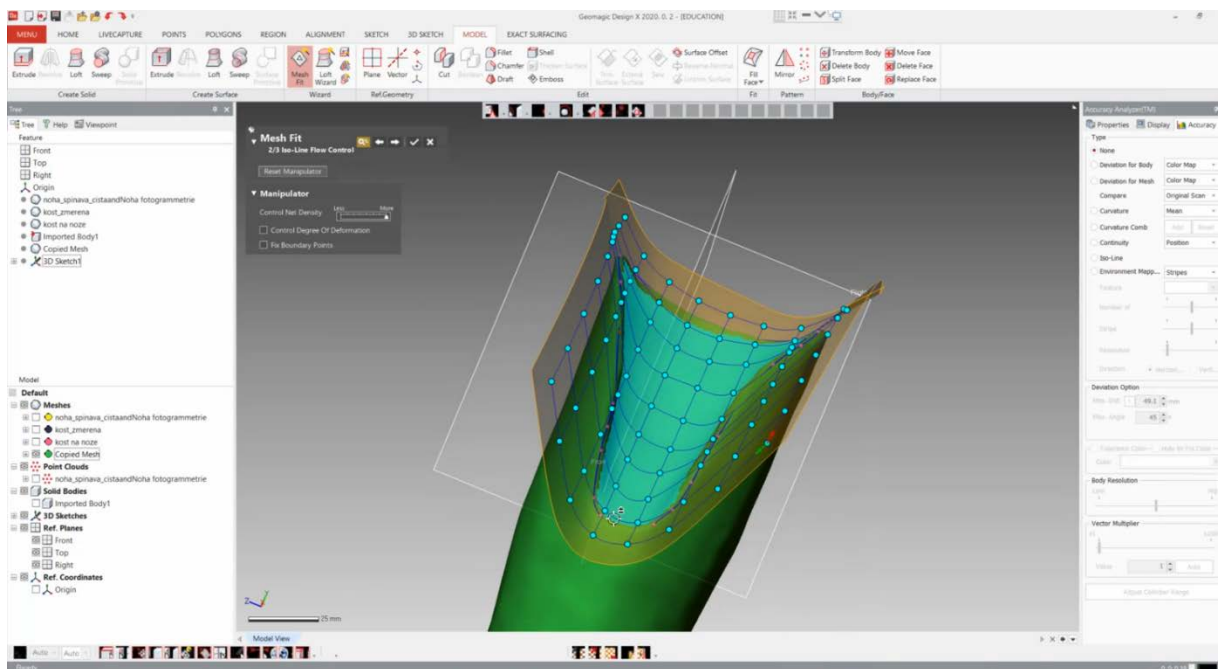


Obrázek 40 - Porovnání tvarových odchylek původní končetiny a modelu

Po vytvoření loftu jej bylo třeba zaříznout tak, aby bylo zachováno místo pro vložení kosti. K tomu bylo třeba definovat plochu pro ořez. Prvním krokem pro její vytvoření bylo pomocí funkce *3D mesh sketch* a *Spline* obkreslit původní hranu svrchní části končetiny v oblasti, kterou bylo třeba zachovat (viz. Obrázek 41).



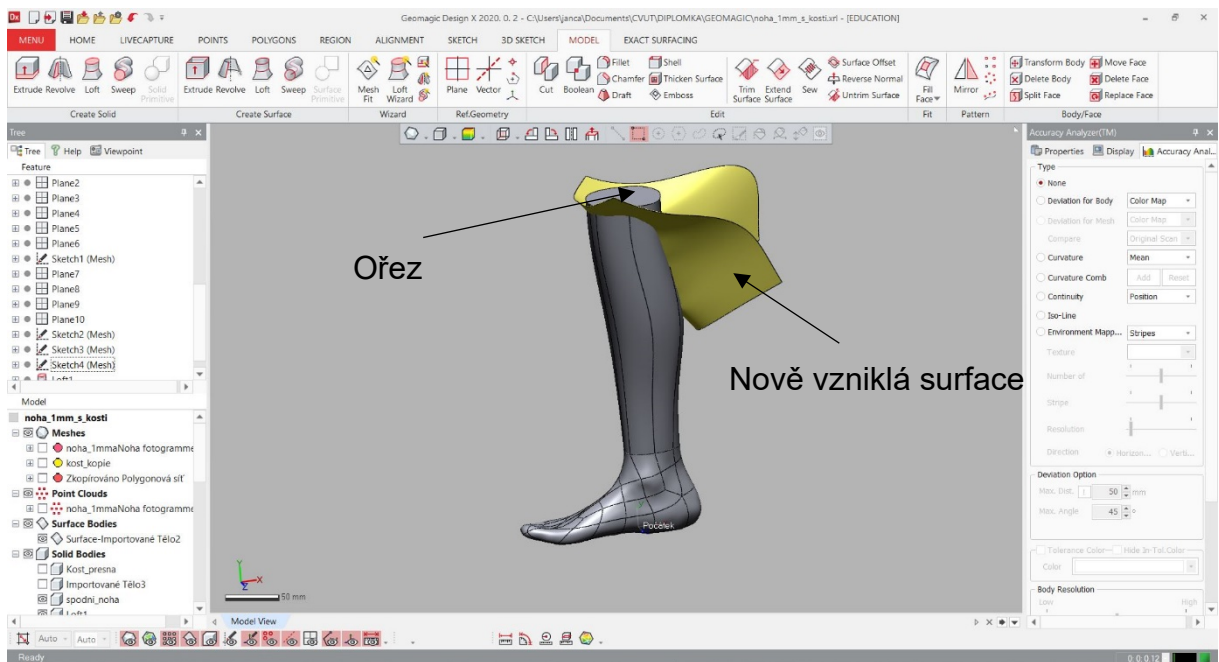
Obrázek 41 Původní tvar zakončení svrchní části končetiny



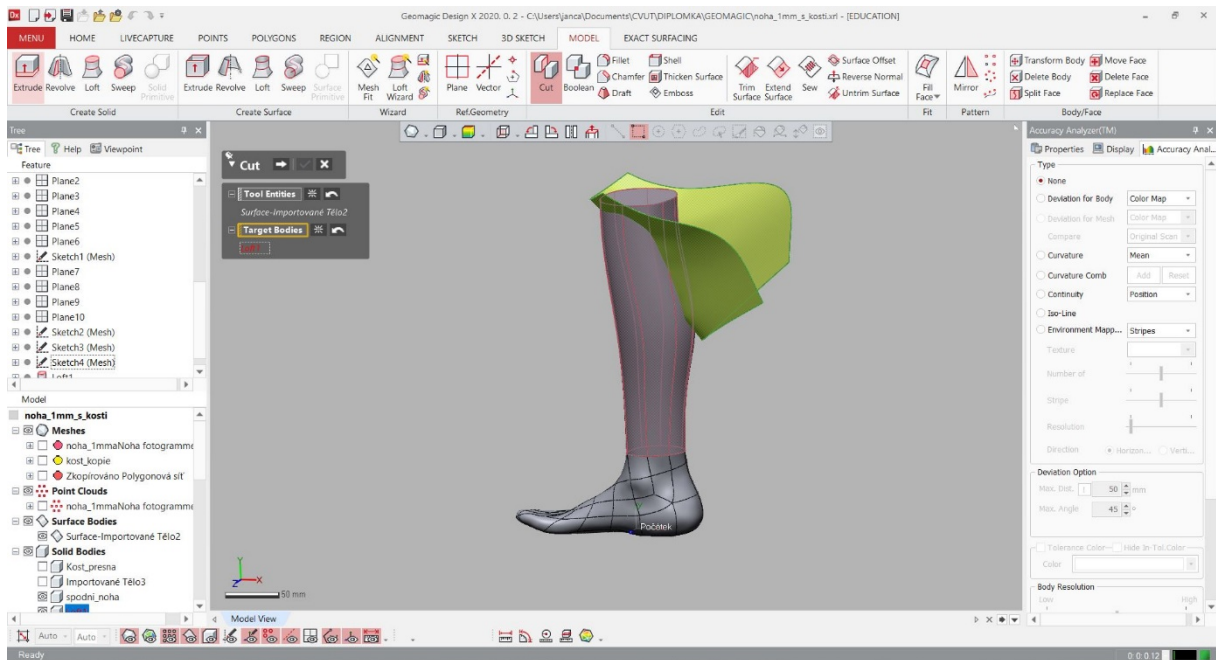
Obrázek 42 - Bodová síť – surface

Následně pomocí funkce *Mesh Fit* jsem vybrala vnitřní část vyznačené spliny a tato funkce mi pomocí bodové sítě (viz. Obrázek 42) vytvořila plochu (surface), která kopírovala tvar dolní končetiny v místě, ve kterém vchází kost a sloužila k odříznutí přebývajících svrchní části končetiny – ořez (viz. Obrázek 43).

Pro vyříznutí požadovaného tvaru jsem tedy měla všechny potřebné komponenty – objekt určený k seříznutí, i plochu řezu (surface). K tomu účelu jsem použila funkci *Cut* (viz. Obrázek 44). Při použití této funkce bylo třeba správně zvolit jednotlivé prvky a následně určit jakou část po oříznutí je třeba zachovat. Pro mě byla prioritní část holeně. Záměrně jsem si ale nechala i horní doplněk nohy (ořez), který jsem později využila při tvorbě formy.

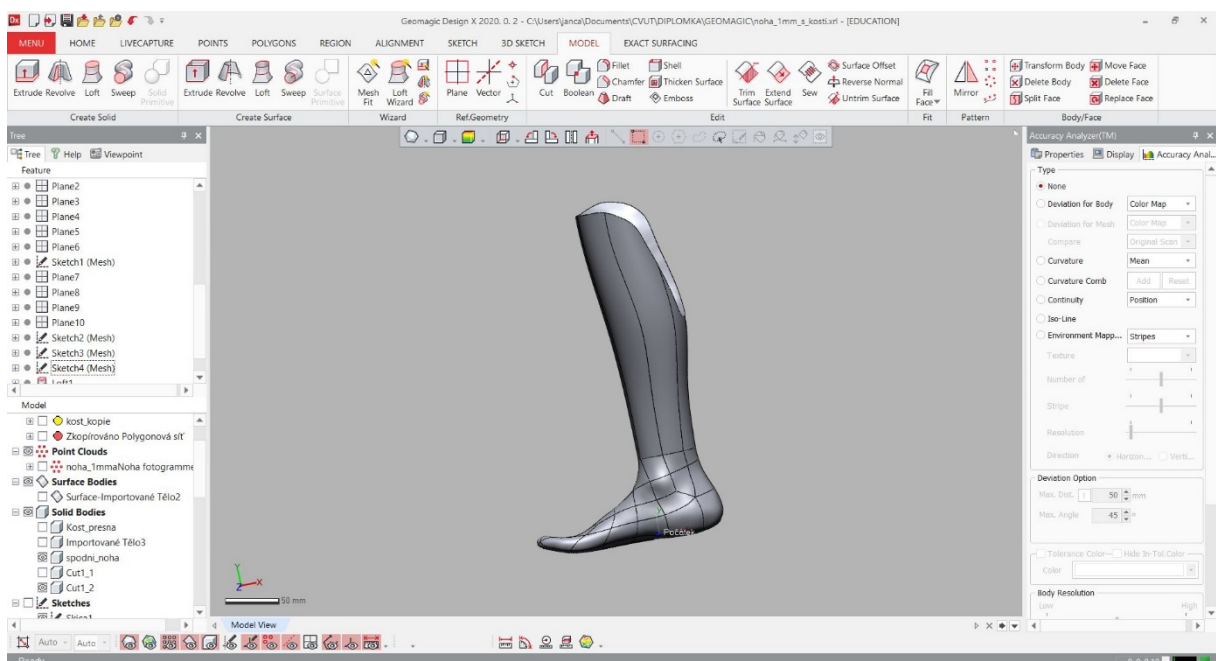


Obrázek 43 - Proložení loftu surfacem

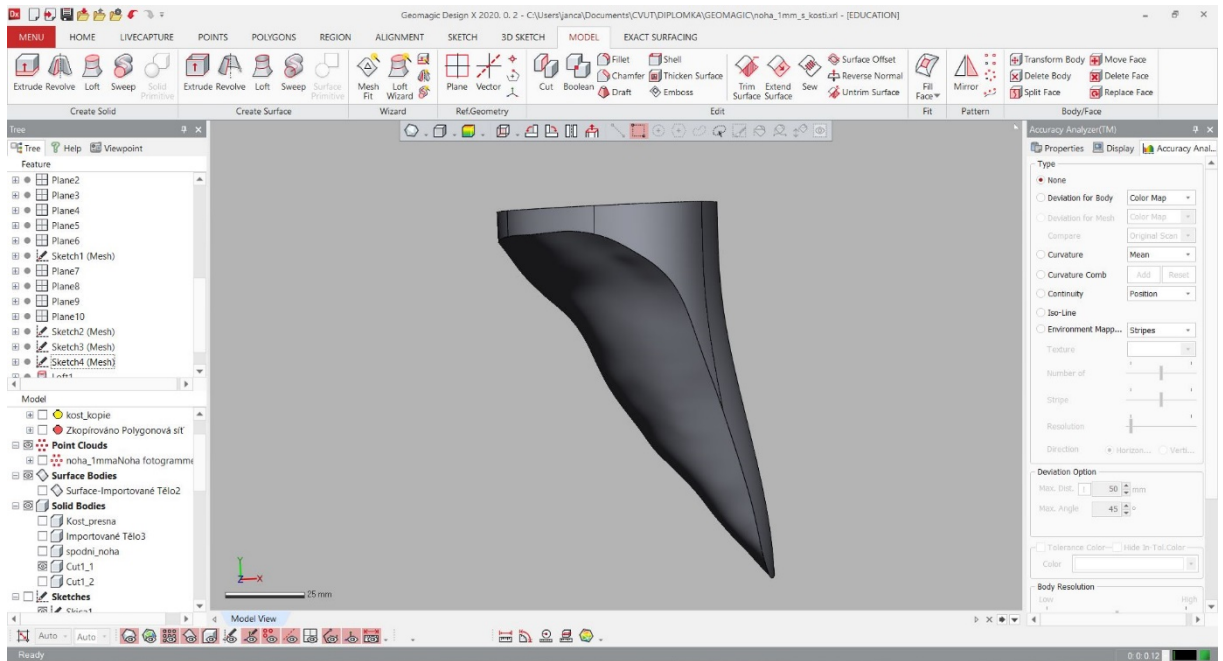


Obrázek 44 - Ořez loftu podle surface

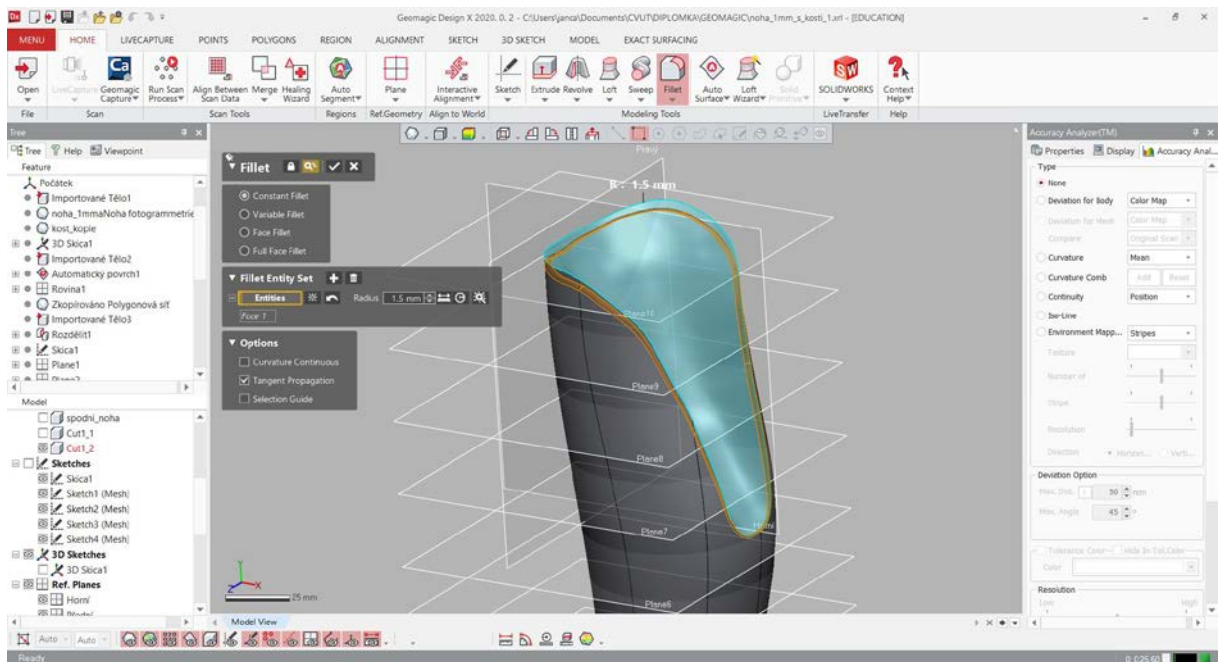
Na následujících obrázcích vidíme model končetiny a doplněk nohy. Při tomto řezu vznikly dokonale ostré hrany, které byly nežádoucí. Proto jsem model končetiny na horní hraně zaoblila. Použila jsem k tomu funkci *Fillet*, s konstantním zaoblením 1,5 mm. Toto zaoblení jsem použila i pro horní doplněk končetiny potřebný k vytvoření formy.



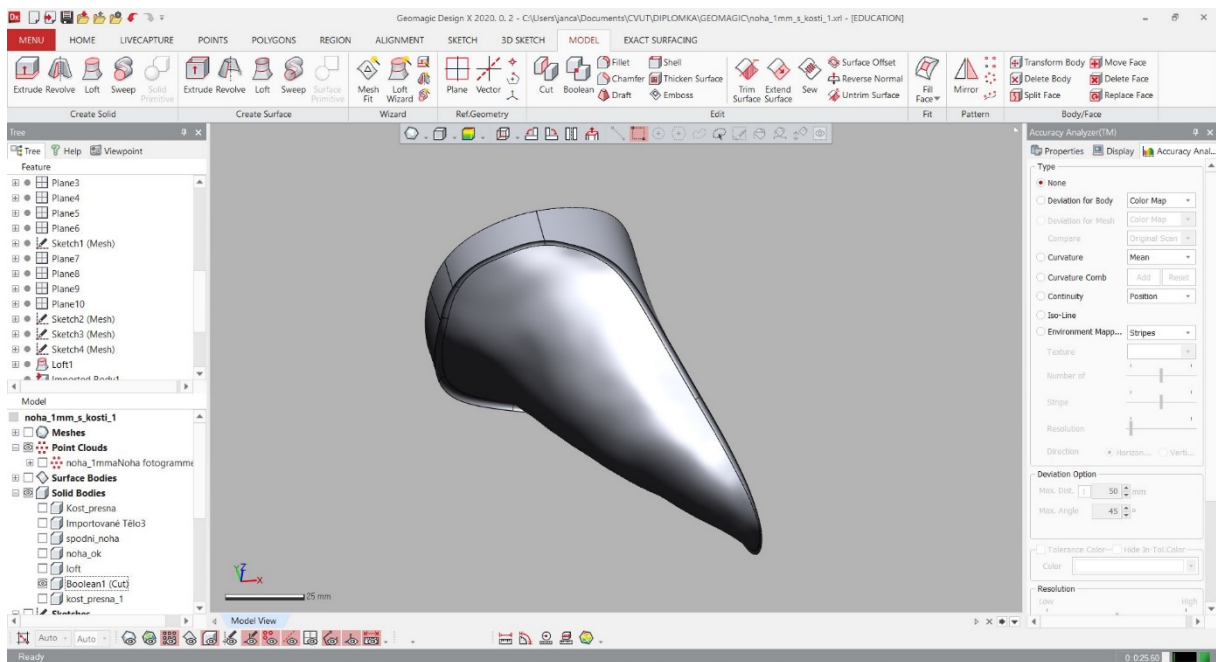
Obrázek 45 - Končetina před zaoblením



Obrázek 46 - Doplněk nohy ve formě před zaoblením

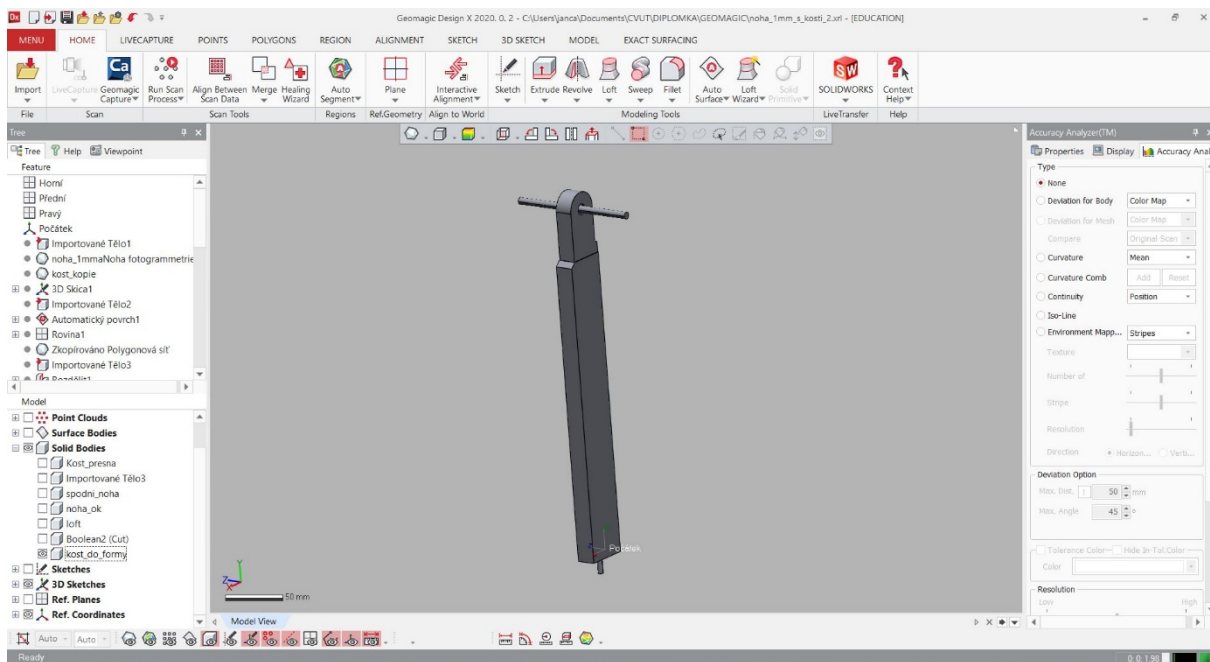


Obrázek 47 - Zaoblení končetiny



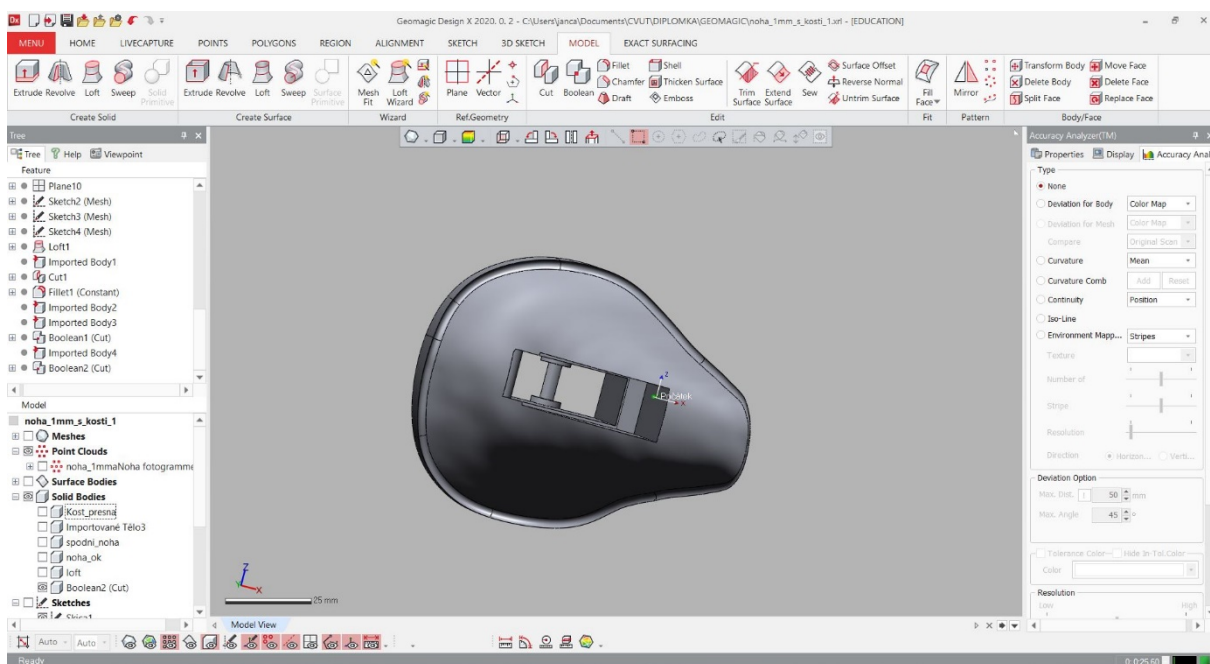
Obrázek 48 - Doplněk nohy ve formě – pohled z boku – bez výřezu kosti

V dalším kroku bylo třeba vytvořit náhradní model kosti, který byl použit pro tvorbu modelu formy – pro odečet v rámci booleanovského rozdílu. Tento náhradní model kosti byl zvětšen o desetinu milimetru oproti původní kosti. Důvodem bylo, že tato kost byla použita pro vytvoření otvorů/výčnělků v modelu formy (které by měly být o desetinu milimetru větší), a díky tomu bude zajištěno, že při odlévání končetiny bude vložení původní kosti do formy bezproblémové. Dále jsem náhradní model kosti, využitý při tvorbě formy, doplnila o vytažení v prostoru, kde se holenní kost napojuje na stehenní, aby i po vylití formy zůstal otvor volný pro možné napojení částí končetiny.



Obrázek 49 - Model kosti pro použití do formy

Následně jsem na doplněk končetiny a model kosti aplikovala funkci *Boolean*, pro tuto operaci je třeba vybrat dvě (či více) těles, ze kterých se dle zvoleného režimu určí průnik, rozdíl či součet. V tomto případě byl použit režim *Cut*, díky čemuž jsem získala rozdíl, tzn. z doplňku nohy byla odebrána část která byla společná s modelem kosti, díky tomu byl zajištěn otvor pro vložení kosti do doplňku končetiny (viz. Obrázek 50)



Obrázek 50 - Doplněk nohy ve formě – pohled zdola – s výřezem kosti

6 Návrh a výroba formy pro odlévání figuríny dolní končetiny

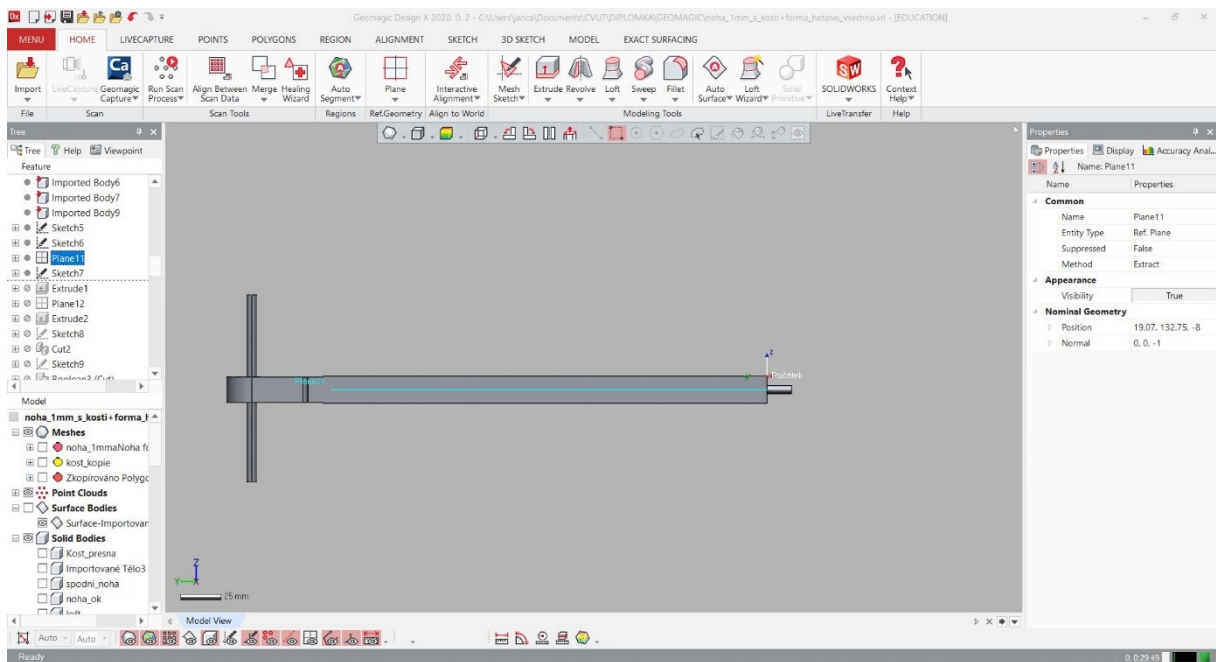
Návrh vychází z předem definovaného materiálu, který byl vybrán v rámci závěrečné práce Ing. Kristýny Řepové. Jedná se o tekutý materiál, který je třeba po jeho umíchání odvakuovat a následně nalít do předem vytvořené formy. Tento pracovní postup současně definuje základní požadavky na formu – upevnění kosti a jejímu přesnému vymezení, možnost nalítí materiálu masa, eliminace vzniku vzduchových bublin, možnost snadného odformování a zajištění, že materiál z formy nevyteče. [30]

6.1 Model formy

Po vytvoření končetiny figuríny bylo nutné vytvořit formu, ve které bude končetina následně odlévána.

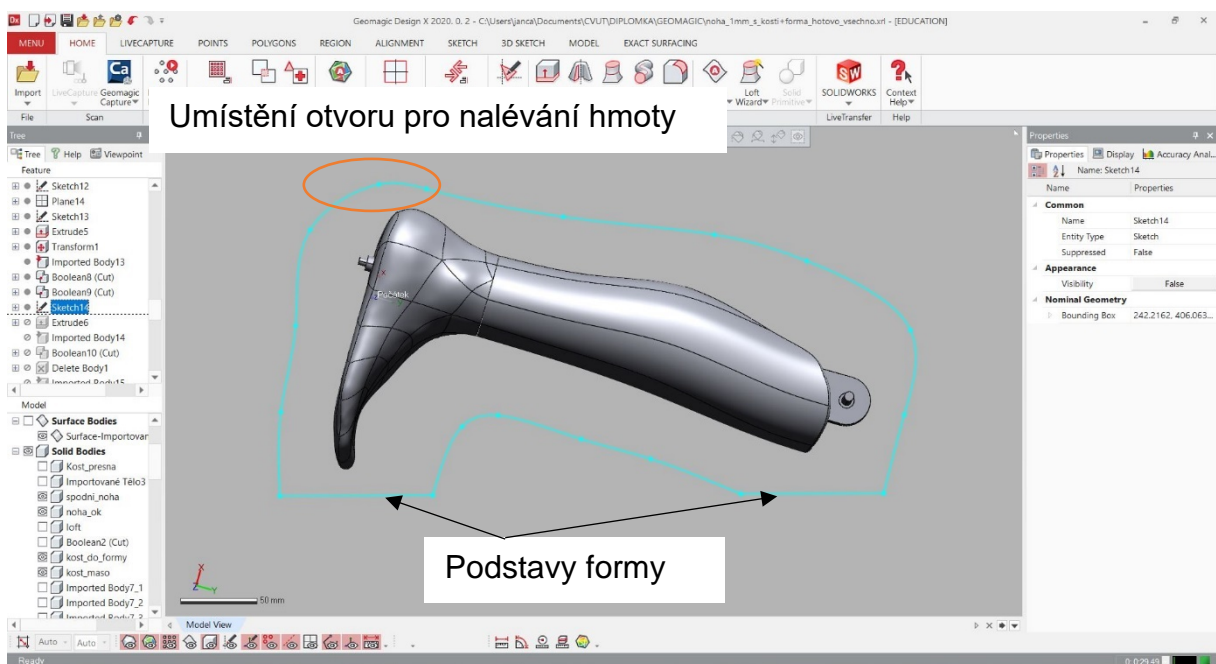
Tato forma bude vytvořena pomocí metody 3D tisku. Pro formu jsem zvolila tvar, co nejpodobnější končetině, ale zároveň co nejjednodušší, jednak kvůli ušetření času i materiálu (minimalizace rozměrů) při tisku, ale i samotné vyrobiteľnosti formy pomocí 3D tiskárny.

Forma se skládá celkem ze dvou částí, které se k sobě spojují ve středu vymodelované kosti pomocí šroubů. Ve středu kosti jsem vytvořila novou rovinu, která sloužila jako výchozí pro návrh formy.



Obrázek 51 - Rovina pro modelaci formy

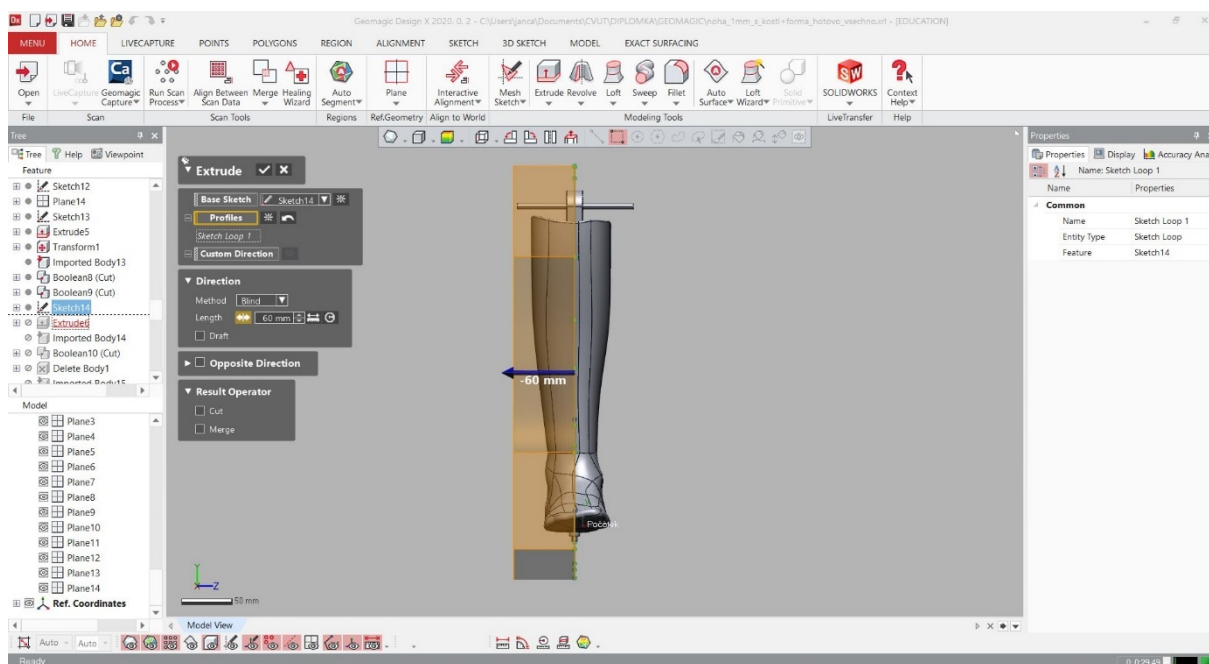
V této rovině jsem vytvořila křivku, která kopírovala tvar dolní končetiny, zároveň byl zajištěn dostatečný prostor pro veškeré šrouby a těsnění, které se ve formě musí vyskytovat, ale zároveň dostatečně úsporný, kvůli materiálu a době tisku na 3D tiskárně.



Obrázek 52 - Tvar formy

Za nejvhodnější místo pro umístění otvoru pro nalévání hmoty, tak aby bylo zajištěno rozlítí do celé formy včetně záhybů atd., byla stanovena oblast paty. Proto bylo třeba zajistit, aby tato část byla nejvyšším bodem formy. K tomu slouží dvě vodorovné plošky – podstavy (v oblasti prstů a konce kosti v kolenní oblasti), které zaručí stabilitu formy a vhodné umístění nalévacího otvoru.

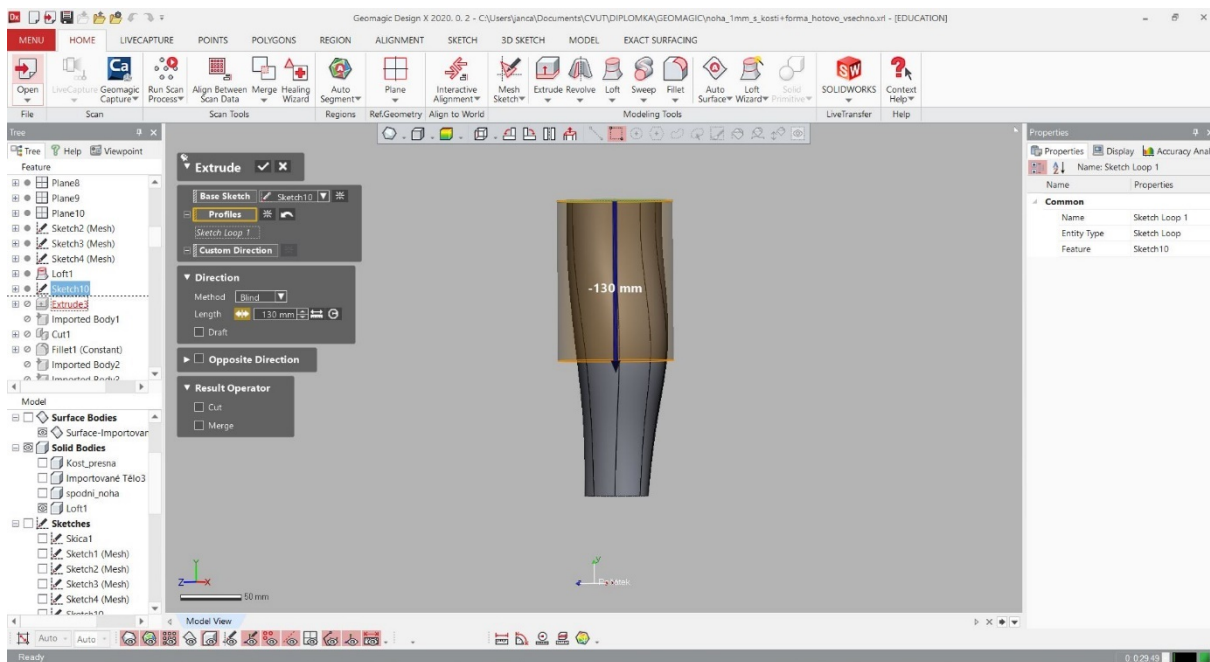
Po vytvoření tohoto návrhu formy jsem použila funkci *Extrude*, která vytvořila z plochy 3D objekt. Hloubka jedné části formy (poloviny) je 60 mm.



Obrázek 53 - Funkce extrude u formy

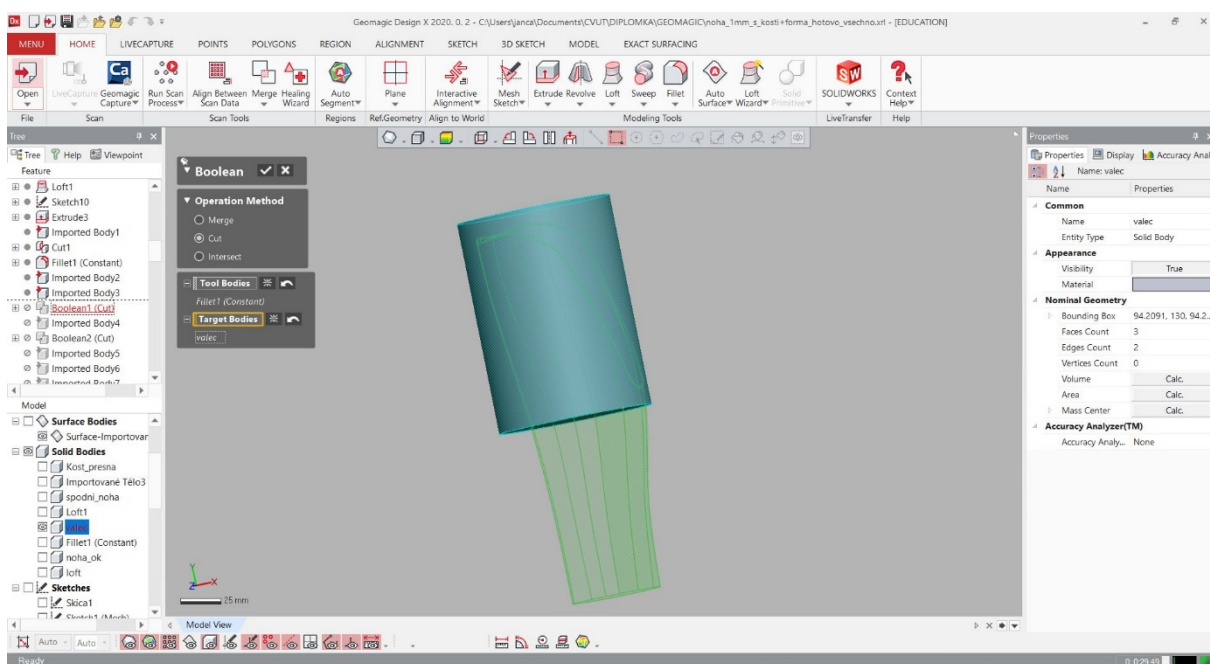
V dalším kroku bylo třeba vyplnit formu částí, kterou jsem v předešlých kapitolách nazvala doplňkem končetiny. Tento doplněk se bude samostatně tisknout na 3D tiskárně a následně se do formy vloží. Jelikož by ale mohl nastat problém u 3D tisku s velmi tenkou a ostrou hranou, bylo třeba tento doplněk končetiny upravit, aby jeho tvar byl vhodnější pro 3D tisk. Rozhodla jsem se vytvořit válec, který bude tento doplněk končetiny v sobě obsahovat. Cílem byla možnost využít doplněk pro zajištění přesné reprodukce komplexního tvaru při zachování možnosti následného odformování.

Prvním krokem pro vytvoření válce do formy bylo třeba nakreslit kruh, který jsem následně pomocí funkce *Extrude* vytáhla až do oblasti, kde doplněk končetiny přechází v samotnou končetinu.



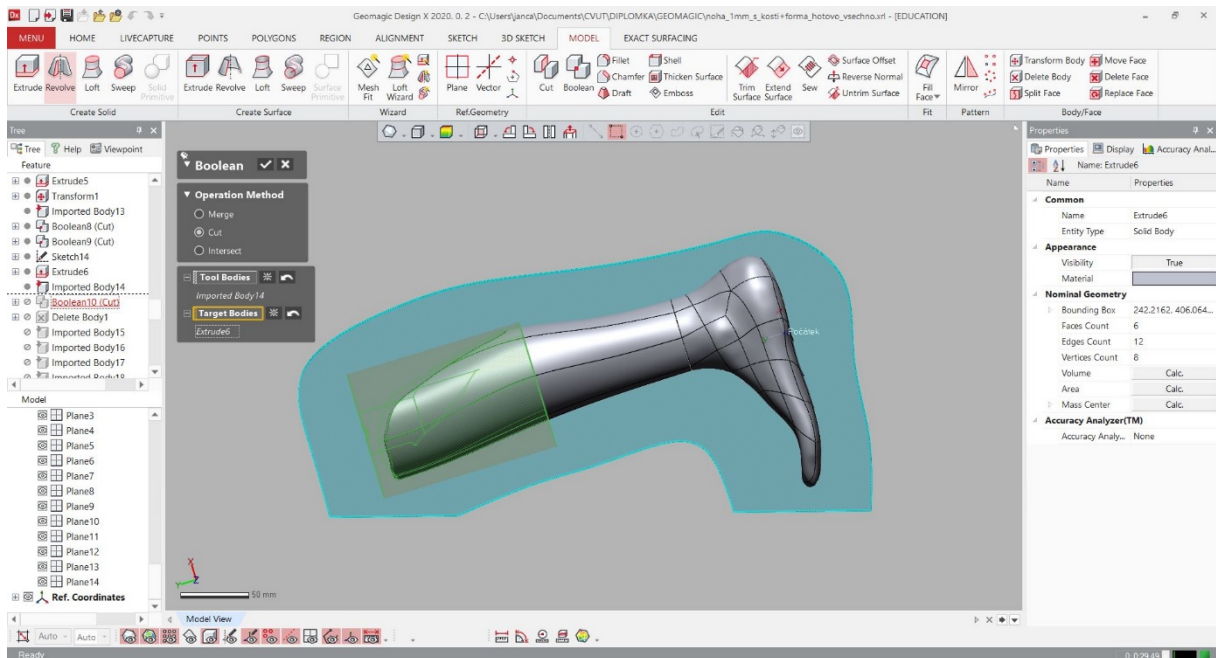
Obrázek 54 - Extrude válce

Výška válce byla nastavena na 130 mm. Následně jsem pomocí funkce *Boolean (cut)* odřízla od válce vymodelovanou nohu. Tím jsem získala požadovaný válec s doplňkem končetiny uvnitř. Ještě bylo třeba v tomto válci nakonec udělat výřez pro kost, která se při tisku bude vkládat do formy.



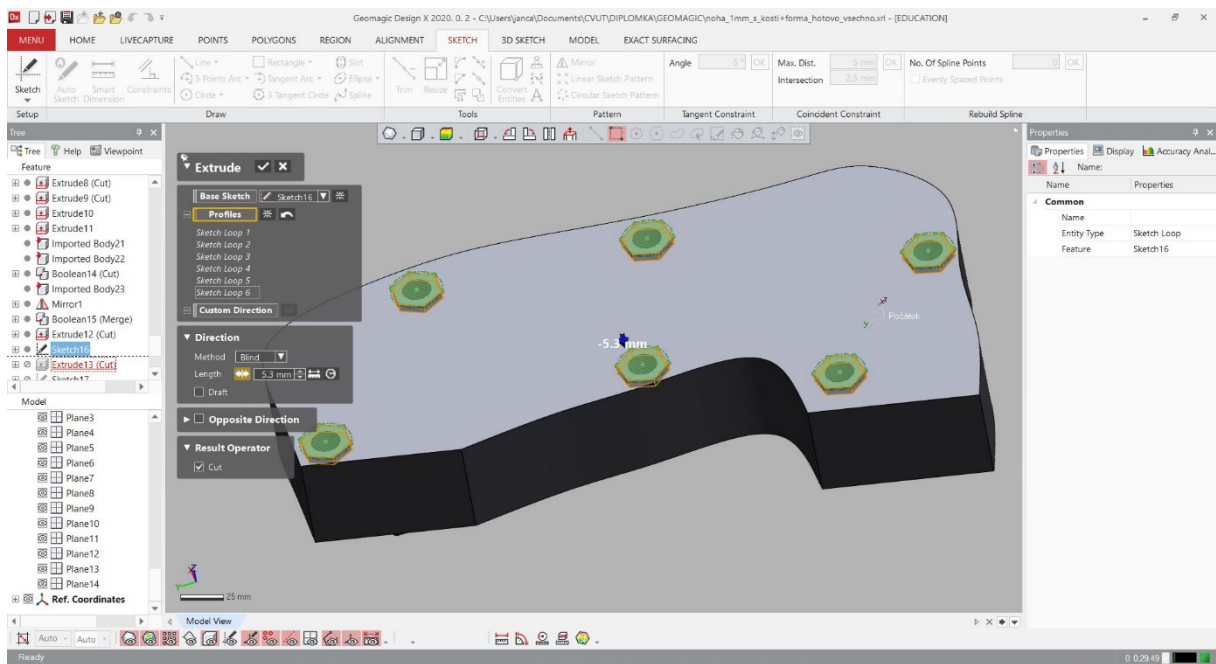
Obrázek 55 - Funkce boolean pro válec a končetinu

V této chvíli jsem mohla ve formě vymodelovat prostor pro válec a zajistit si potřebný prostor pro šrouby a těsnění. Pro vyříznutí místa pro vytvořený válec jsem použila funkci *Boolean (cut)*.



Obrázek 56 - Funkce boolean pro válec a formu

Dalším krokem bylo vytvoření otvorů pro šrouby na následné spojení obou částí formy. Pro spojení formy jsem se rozhodla pro použití šroubů M8. Vytvořila jsem proto kruhové výřezy o dvou různých průměrech. Menší z nich má průměr 8,3 mm a druhý 15 mm. Na jedné polovině formy jsou oba výřezy kruhové, na druhé polovině formy použiji pro výřez s větším průměrem šestiúhelník. Hloubku pro šestiúhelníky a kruhy o větším průměru (otvor pro hlavu šroubu a matici) použiji 5,3 mm, otvor o menším průměru je veden skrz celou formu..

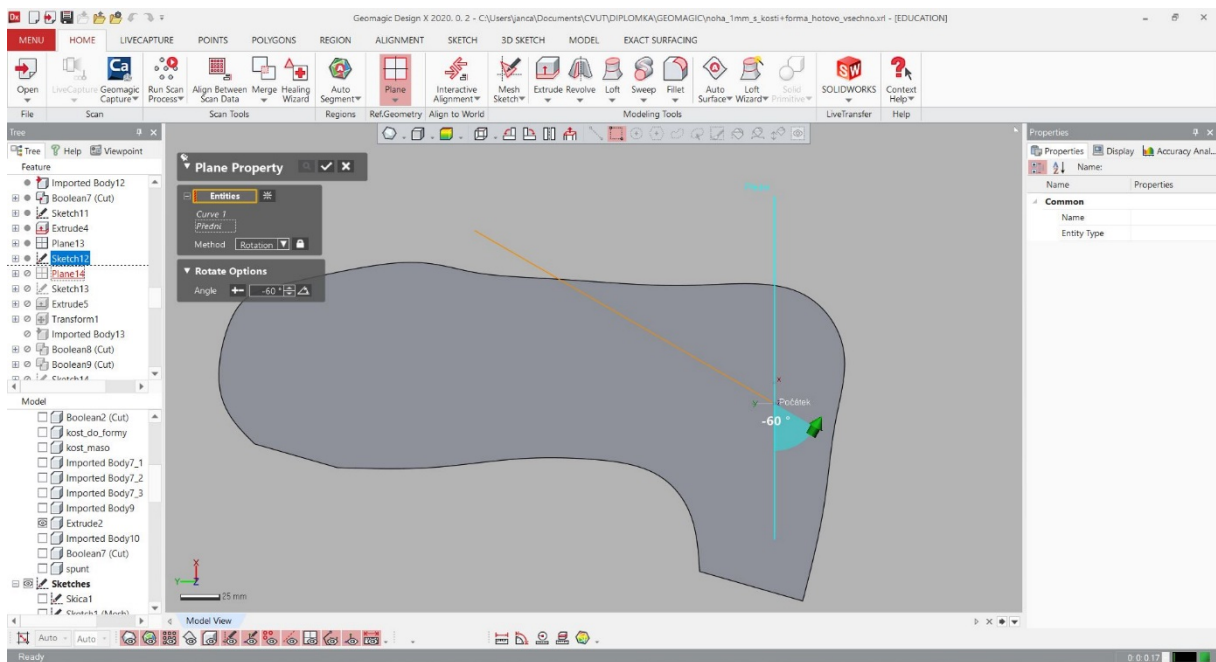


Obrázek 57 - Rozmístění šroubů na formě

V této fázi modelování byly připraveny dvě části formy, které se k sobě připojí pomocí šesti šroubů M8. Dalším krokem v modelování bylo třeba zajistit otvor pro nalévání hmoty, z které bude dolní končetina zhotovena.

Tento otvor pro nalévání byl vytvořen v oblasti paty. Jedná se o nejvyšší bod dolní končetiny ve formě.

Otvor pro nalévání směsi jsem vytvořila pomocí pootočení roviny, ve které jsem následně nakreslila otvor. Rovinu jsem otočila pomocí funkce *Plane property – rotation* o 60° (viz Obrázek 58).

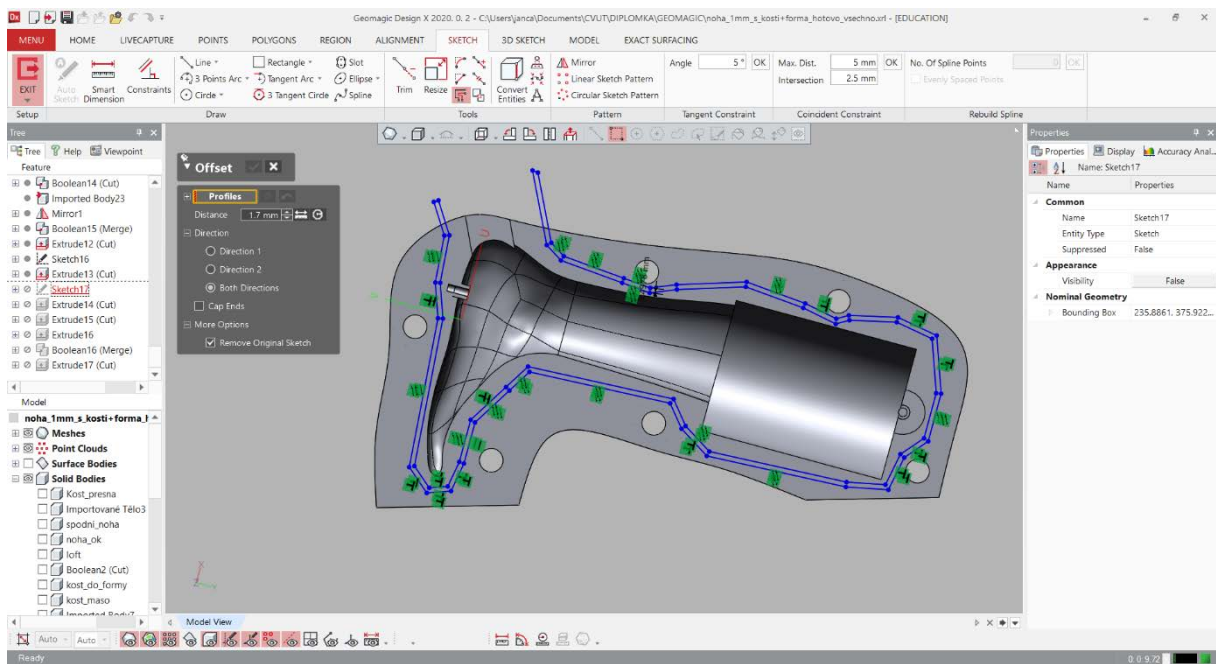


Obrázek 58 - Rotace roviny

Do připravené pootočené roviny jsem zakreslila otvor tvaru obdélníku. Po nakreslení přibližného tvaru jsem následně pomocí funkce *Transform* upravila tvar na mnou požadované rozměry. Rozměry jsem zvolila 20x30 mm.

Následně jsem tento otvor pomocí funkce *Extrude* vytáhla směrem ven z formy a zároveň použila funkci *Boolean (cut)* na odstranění vzniklého kvádrů. Tímto procesem vznikl vhodný otvor pro nalévání směsi do formy.

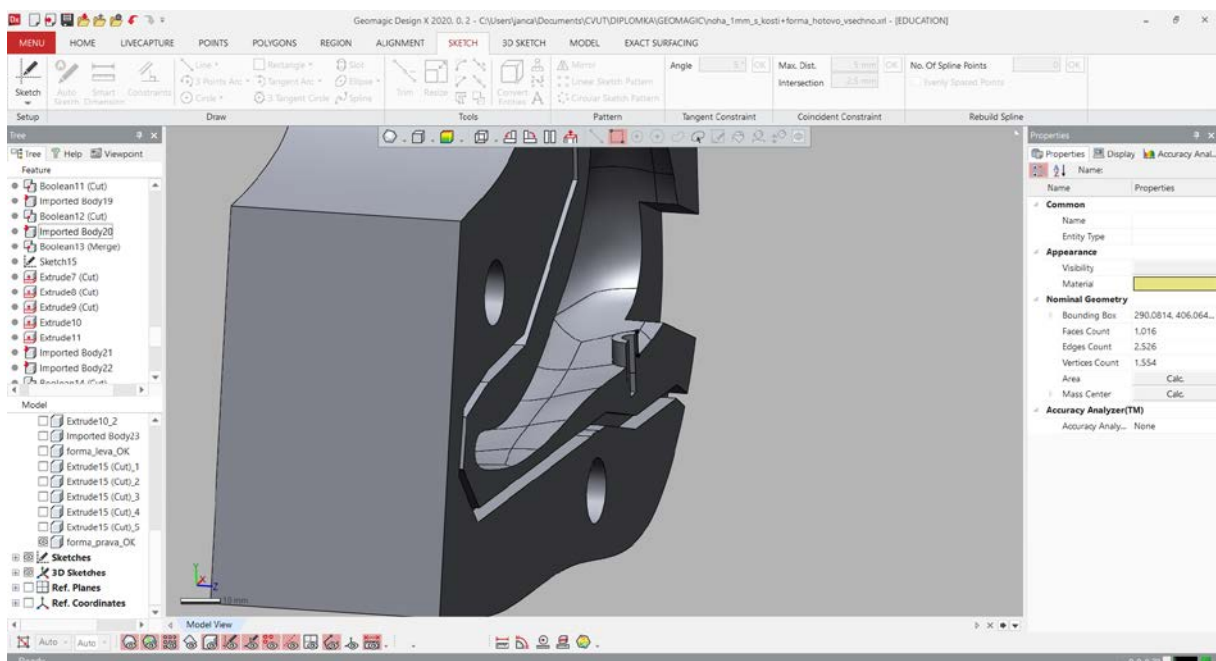
Dalším krokem pro dokončení formy bylo zajištění těsnění ve formě, aby materiál, který se bude vlévat do formy, nevytékal. Vytvořila jsem křivku kopírující tvar nohy, na kterou jsem následně využila funkci *Offset* (viz. Obrázek 59). Křivku jsem odsadila z každé strany o 1,7 mm. Následně jsem využila opět funkci *Extrude* a následně *Boolean (cut)* k vytvoření vhodného otvoru pro těsnění. Hloubku drážky pro těsnění jsem v obou částech formy použila 5 mm.



Obrázek 59 - Offset křivky pro těsnění

Při tvorbě formy bylo třeba také zohlednit, aby materiál, který se využije pro zhotovení dolní končetiny nezatekl ke kosti, která vystupuje z chodidla. V této části bylo důležité zachovat volný prostor pro následnou manipulaci s končetinou.

Ve formě jsem vymodelovala kruhový výstupek, do kterého se zasune kost, a výstupek nedovolí zatečení materiálu. Výstupek ve formě má vnější průměr 10 mm a je vysoký 6,3 mm (viz. Obrázek 60).

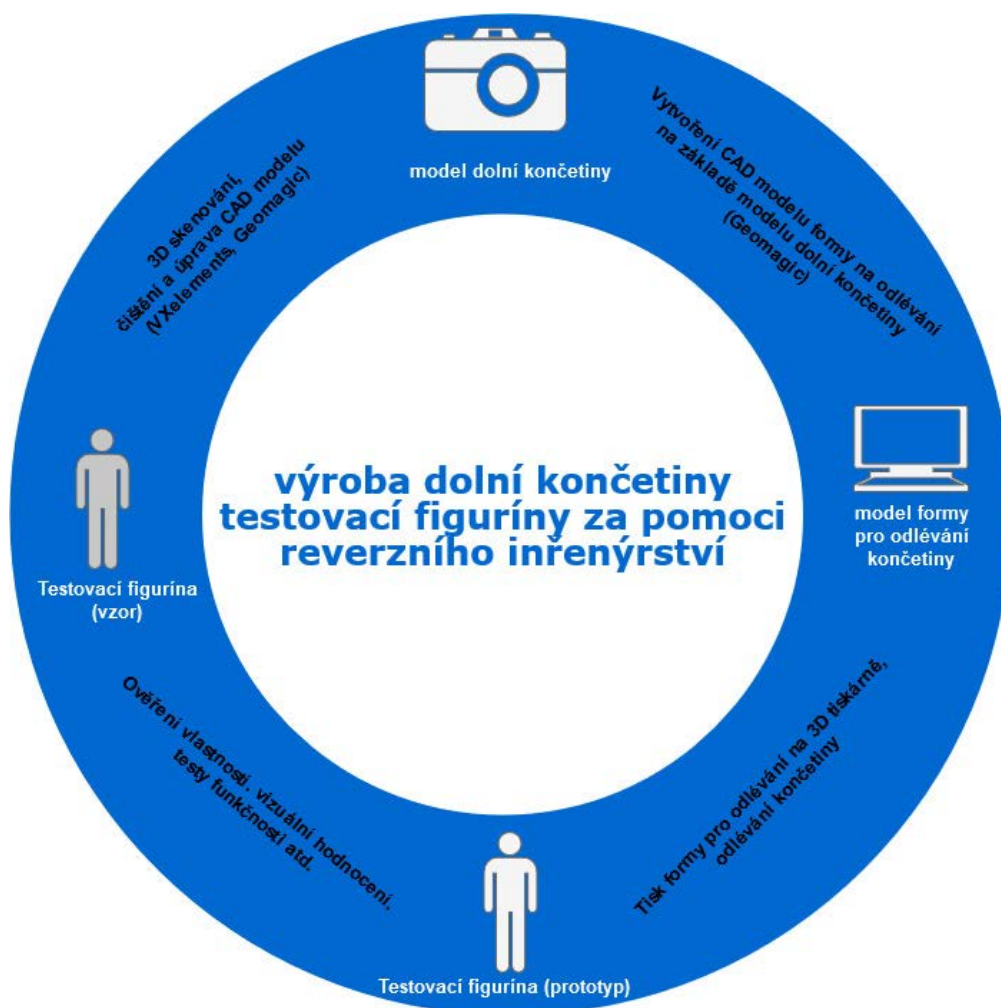


Obrázek 60 - Detail výstupu ve formě

Po vyříznutí všech částí končetiny v obou částech formy byl model formy a její komponenty dokončeny a připraveny pro následné uplatnění.

Celý proces výroby dolní končetiny testovací figuríny tímto krokem nekončí. Jak nastiňuje diagram znázorňující celý proces výroby za pomoci reverzního inženýrství, po vytvoření modelu formy by měly navazovat další kroky pro dokončení funkčního prototypu. Následovat by mělo vytvoření fyzického modelu formy pro odlévání končetiny a dalších komponentů za použití metody 3D tisku. Do takto vzniklé formy bude možné umístit veškeré potřebné komponenty včetně kosti, těsnění, šroubů atd. a následně nalít materiál reprezentující tkáň. Po zatuhnutí materiálu tkáně a odstranění formy získáme novou repliku dolní končetiny testovací figuríny.

Závěrečným krokem by mělo být vyhodnocení nově vzniklého prototypu, ověření jeho vlastností a zhodnocení funkčnosti jednotlivých kroků postupu.



Obrázek 61 - Aplikace metody reverzního inženýrství

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a implementovat postupy reverzního inženýrství, které umožní tvorbu či úpravy částí figuríny dle potřeb při současném dodržení odpovídajících mechanických vlastností testovacího zařízení. Konkrétně se jednalo o model dolní končetiny dětské testovací figuríny P6.

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na antropomorfní testovací zařízení neboli testovací figuríny, na jejich vývoj, historii a současnost, dále se také věnuje technologiím a metodám, které byly (či budou) využity při návrhu a tvorbě modelu dolní končetiny dětské testovací figuríny P6 jako je fotogrammetrie, 3D skenování a 3D tisk.

Praktická část diplomové práce se zabývá samotnou tvorbou modelu dolní končetiny, formy pro následné odlití a různých komponentů potřebných pro vytvoření dostatečně přesné a věrné kopie končetiny. Podstatným vstupním krokem praktické části bylo stanovení optimálních postupů, volba vhodných metod a rozvržení jednotlivých kroků.

Prvním krokem bylo provedení prostorové rekonstrukce dolní končetiny antropomorfního testovacího zařízení – dětské testovací figuríny P6. Prostorovou rekonstrukci dolní končetiny jsem získala zkombinováním dvou metod, jednalo se o 3D skenování a fotogrammetrii. Pomocí těchto metod jsem získala mračna bodů reprezentující mnou zkoumaný objekt. Jednalo se ovšem o surová data, se kterými bylo třeba dále pracovat. Pro práci s daty a pro následné modelování jsem využila software Geomagic Design X. V tomto softwaru jsem data vyčistila, zredukovala a připravila k dalšímu zpracování.

Druhým krokem byla samotná modelace dolní končetiny a dalších komponentů. Původní končetina, a tedy i její prostorová rekonstrukce, obsahovala řadu vad, které vznikly degradací materiálu a jejím používáním při nárazových zkouškách. Proto jsem postupně vymodelovala novou dolní končetinu, která oproti původní měla zcela zanedbatelné odchyly. Kromě samotné končetiny bylo třeba vytvořit i další komponenty, které jsem následně využila při tvorbě formy pro odlévání.

Třetím krokem byla tvorba modelu formy pro možné odlití dolní končetiny dětské testovací figuríny. V tomto kroku bylo zapotřebí vhodně zvolit tvar (minimalizace materiálových i časových nákladů) a jednotlivé prvky, jako je otvor pro nalévání hmoty,

či umístění podstav. Pro model formy jsem zvolila tvar podobný končetině a určila ji dvě podstavy, na kterých forma při odlévání končetiny bude stát a zároveň tím docílím že otvor pro nalévání hmoty (oblast paty) bude nejvyšším bodem formy. Model formy byl modelován jako dvě samostatné části (pro snadné vyjmutí odlévané končetiny), ve kterých byly vytvořeny otvory pro jejich spojení šrouby a těsnění, aby při následném odlévání materiál nevytékal z formy. V rámci tohoto kroku jsem vytvořila všechny potřebné komponenty pro výrobu dolní končetiny antropomorfního testovacího zařízení.

Mnou připravené modely je následně možné použít pro vytvoření fyzické formy pro odlévání za pomoci 3D tisku a následně provést samotné odlití končetiny. Software použitý pro modelování nám umožňuje stanovit objem daných modelů. Pro odlití dolní končetiny dětské testovací figuríny P6 bude zapotřebí 0,87 l materiálu. Takto vzniklý prototyp byl měl být následně podroben testům ověřující jeho vlastnosti a funkčnost.

Má práce prokázala využitelnost těchto metod pro tvorbu součástí na výrobu částí antropomorfního testovacího zařízení. Jako jednu z výhod tohoto postupu vidím v přínosu možnosti tvoření nových částí testovacích figurín, ať už za účelem opravy dané části nebo vytvoření nové s možností osazením požadovanou měřicí technikou. Jedna z předností je, že celý model a veškeré komponenty bylo možné vytvořit pomocí jednoho softwaru. Zvolený postup je časově náročný, ale při úvaze vysokých cen antropomorfních testovacích zařízení a možnosti opakovatelného vyrobení dané části testovací figuríny se podle mého názoru prokázal tento postup jako perspektivní a uplatnitelný.

8 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Figurína Sierra Sam [8].....	11
Obrázek 2 - Testovací figuríny Hybrid II [9]	12
Obrázek 3 - Ukázka různých typů figurín současnosti [10].....	13
Obrázek 4 - Porovnání jednotlivých technologií 3D tisku [29]	23
Obrázek 5 - Diagram znázorňující jednotlivé kroky praktické části.....	24
Obrázek 6 - Kalibrační deska	25
Obrázek 7 - Úvodní okno a průběh kalibrace	26
Obrázek 8 - Rozmístění targetů na dolní končetině figuríny.....	27
Obrázek 9 - Naskenovaná dolní končetina v programu VXelements	27
Obrázek 10 - Husté bodové mračno z fotogrammetrie použité pro doplnění modelu z laserového skenování	29
Obrázek 11 – Výkresová dokumentace kosti	31
Obrázek 12 - Modelace kosti v Geomagic Design X	31
Obrázek 13 - Základní data nahraná z VXelements.....	32
Obrázek 14 - Začištění dat pomocí Filter Noise	33
Obrázek 15 - Manuální ořezání bodů dolní končetiny	33
Obrázek 16 – Řez – problematická část dolní končetiny	34
Obrázek 17 - Část modelu vytvoření pomocí fotogrammetrie	35
Obrázek 18 - Kombinace naskenované části modelu a části získané fotogrammetrií	35
Obrázek 19 – Funkce Normal information wizard.....	36
Obrázek 20 - Funkce Sampling	37
Obrázek 21 - Funkce Smooth.....	37
Obrázek 22 - Finální mračno bodů	38
Obrázek 23 – Výsledek funkce Triangulate.....	39
Obrázek 24 - Propojení vymodelované kosti a meshe	40
Obrázek 25 - Výřez kosti u meshe	40
Obrázek 26 - Funkce Transform Scan Data.....	41
Obrázek 27 - Zalícování meshe končetiny a vymodelované kosti.....	42
Obrázek 28 - Funkce Defeature	43
Obrázek 29 - Funkce Smart Brush	44

Obrázek 30 - Funkce Fill Holes	45
Obrázek 31 - Oříznuté chodidlo.....	46
Obrázek 32 - Rozdělní rovin na holení části končetiny.....	47
Obrázek 33 – Prfil (Spline) na obvodu končetiny.....	47
Obrázek 34 – Profily ve vrchní části končetiny	48
Obrázek 35 - Poslední reálný sketch.....	49
Obrázek 36 - Posunutí roviny – mesh sketch	49
Obrázek 37 - Sketche připravené pro loft.....	50
Obrázek 38 - Vytvoření loftu.....	50
Obrázek 39 – Loft.....	51
Obrázek 40 - Porovnání tvarových odchylek původní končetiny a modelu	52
Obrázek 41 Původní tvar zakončení svrchní části končetiny	53
Obrázek 42 - Bodová síť – surface.....	53
Obrázek 43 - Proložení loftu surfacem	54
Obrázek 44 - Ořez loftu podle surface.....	55
Obrázek 45 - Končetina před zaoblením	55
Obrázek 46 - Doplněk nohy ve formě před zaoblením	56
Obrázek 47 - Zaoblení končetiny.....	56
Obrázek 48 - Doplněk nohy ve formě – pohled z boku – bez výřezu kosti	57
Obrázek 49 - Model kosti pro použití do formy	58
Obrázek 50 - Doplněk nohy ve formě – pohled zdola – s výřezem kosti	58
Obrázek 51 - Rovina pro modelaci formy	60
Obrázek 52 - Tvar formy.....	60
Obrázek 53 - Funkce extrude u formy	61
Obrázek 54 - Extrude válce	62
Obrázek 55 - Funkce boolean pro válec a končetinu	62
Obrázek 56 - Funkce boolean pro válec a formu.....	63
Obrázek 57 - Rozmístění šroubů na formě	64
Obrázek 58 - Rotace roviny.....	65
Obrázek 59 - Offset křivky pro těsnění	66
Obrázek 60 - Detail výstupku ve formě	66
Obrázek 61 - Aplikace metody reverzního inženýrství	67

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání metod 3D tisku	22
--	----

10 Použitá literatura

- [1] BELL, W. *Reverse Engineering* [online]. Global Media, 2006. ISBN 9788189940164. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=3011014> [cit. 2021-02-02]
- [2] HASLAM, D a JONES T. *The Humanetics Story: All Illustrated History of the Crash Test Dummy*. United States of America: HMSI Publishing, 2013. ISBN 987-0-9851996-1-6. [cit. 2021-02-02]
- [3] BELLIS, M. *The History of Crash Test Dummies*. ThoughtCo. [online]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/history-of-crash-test-dummies-1992406> [cit. 2021-02-05]
- [4] MERTZ, H a IRWIN A. YOGANANDAN, N a A. NAHUM *Anthropomorphic Test Devices and Injury Risk Assessment*. Accidental Injury. Third edition. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-1732-7
- [5] Humanetics. *Crash Test Dummies. ATD* [online]. Farmington Hills, MI 48335 USA, 2019. Dostupné z: <https://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies> [cit. 2021-02-05]
- [6] Humanetics. *Children. ATD* [online]. Farmington Hills, MI 48335 USA, 2019. Dostupné z: <https://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/children> [cit. 2021-02-06]
- [7] Humanetics – *Inovative solution* [online], 2015, Dostupné z: <http://www.humaneticsatd.com/about-us/dummy-history> [cit. 2021-02-13]
- [8] How Crash Tests Help Bring Traffic Deaths Down: Sierra Sam. NPR [online]. USA, 2009. Dostupné z: https://media.npr.org/assets/img/2009/11/23/sam4_slide616ecbf1735bf146e32c6c606deaaa6b37c545b8-s800.jpg [cit. 2021-02-05]
- [9] BRANCH, B. *Dynamics Of A Crash – A 1970s Film About Crash Testing* [online]. 20.01.201. Dostupné z: <https://silodrome.com/dynamics-of-a-crash/> [cit. 2021-02-05]

- [10] LEE, Bruce. *Crash Test Dummies: Here's What The Obesity Epidemic Is Doing To Them* [online]. 28.04.2017. Dostupné z: https://www.forbes.com/sites/brucelee/2017/04/28/crash-test-dummies-heres-what-the-obesity-epidemic-is-doing-to-them/amp/?fbclid=IwAR3Im9ENaUOalpqVcx1_VGLt4sqf-TN-DaoAhdIjNRzGliEritxWEQZ7rtc [cit. 2021-02-05]
- [11] SIEFFERT U, WECH L. *Automotive Safety Handbook*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc., 2003. 499 s. ISBN 9780768017984.
- [12] Euro NCAP [online], 2013, Dostupné z: <https://www.euroncap.com/en/about-euro-ncap/> [cit. 2021-02-07]
- [13] NHTSA [online], 2014, Dostupné z: <https://www.nhtsa.gov/Driving+Safety> [cit. 2021-02-07]
- [14] ŽÁK, D. *Figuríny pro crash-testy budou staré a obézní. Pomohou upravit design aut* [online]. 11.05.2017. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/figuriny-crash-testy-budou-stare-obezni-pomohou-upravit-design-aut/> [cit. 2021-11-20]
- [15] MAZAL, M. *Figuríny zkušebních crash testů mohou stát miliony korun* [online]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/figuriny-zkusebnich-crash-testu-mohou-stat-miliony-korun-141794> [cit. 2021-11-30]
- [16] PAVELKA, K. *Fotogrammetrie 1*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6. [cit. 2021-04-17]
- [17] BÖHM, J. *Fotogrammetrie – učební texty*. Ostrava: Vysoká škola báňská-technická univerzita Ostrava, 2002. [cit. 2021-04-17]
- [18] ŠMIDRKAL, J. *Fotogrammetrie*. Praha: Geodetický a kartografický podnik v Praze, 1986 [cit. 2021-04-17]
- [19] LUHMANN, T. et al. *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications*. Dunbeath (Escocia): Whittles. 2006. ISBN 04-701-0633-6.
- [20] ŠTRONER, Martin a České vysoké učení technické v Praze. Katedra speciální geodézie. *3D skenovací systémy*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05371-3. [cit. 2021-04-19]

- [21] ŠTRONER, M. *Teorie fungování terestrických skenovacích systémů. Fyzikální principy skenovacích systémů. Bezpečnost práce*. [online prezentace]. 2008
Dostupné z: <http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/LSK/index.html> [cit. 2021-05-15].
- [22] BELLOCCHIO, F. *3D surface reconstruction: multi-scale hierarchical approaches*. New York: Springer, 2013. ISBN 14-614-5631-2.
- [23] HORÁK, K.: *Metody měření 3D objektů*, Ročníkový projekt, VUT Brno, 2002
[cit. 2021-05-15].
- [24] ČEPOVÁ, L. a PETŘKOVSKÁ L. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4
- [25] EBRAHIM, M. *3D Laser Scanners' Techniques Overview* [online]. 4. Raipur: International Journal of Science and Research, 2015. ISSN 2319- 7064.
Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/282753883_3D_Laser_Scanners'_Techniques_Overview [cit. 2021-06-15]
- [26] FANTA, M. *Základy 3D tisku* [online]. 18.5.2020. Dostupné z: <https://www.earch.cz /technologie/clanek/zaklady-3d-tisku> [cit. 2021-06-20]
- [27] ZATLOUKAL, F. *Tvorba modelů pro 3D tisk: základní tvary* [online]. 15. 2. 2017.
Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/tvorba-modelu-pro-3d-tisk-zakladni-tvary/> [cit. 2021-06-20]
- [28] 3D Systems. *3D Printers, 3D Scanning, Software, Manufacturing and Healthcare Services* [online]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/> [cit. 2021-06-22]
- [29] MANUFACTUR3D. *3D Printing Technology Choice: FDM v/s SLA v/s SLS* [online]. 13.02.2018. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/3d-printing-technology-choice-fdm-v-s-sla-v-s-sls/> [cit. 2021-06-22]
- [30] ŘEPOVÁ, K. *Antropomorfní testovací zařízení – jeho vlastnosti a výroba*. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Luboš Nouzovský, Ph. D.
- [31] Geomagic Design X [online]. 3D SCAN. Dostupné z: <https://www.3dskenovani.cz/software/reverzni-inzenyrstvi/geomagic-design-x/> [cit. 2021-02-15]